

RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

ELEKTRISKO SISTĒMU NESIMETRISKO REŽĪMU MATEMĀTISKĀ MODELĒŠANA

Ivars Zālītis, Aleksandrs Dolgicers, Jevgeņijs Kozadajevs





Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultāte
Enerģētikas institūts

Ivars Zālītis, Aleksandrs Dolgicers, Jevgeņijs Kozadajevs

ELEKTRISKO SISTĒMU NESIMETRISKO REŽĪMU MATEMĀTISKĀ MODELĒŠANA

Zinātniskā monogrāfija

Apstiprinājusi RTU Zinātnes padome 2022. gadā

RTU Izdevniecība
Rīga 2022

Elektrisko sistēmu nesimetrisko režīmu matemātiskā modelēšana.

Zinātniskā monogrāfija. Rīga, RTU Izdevniecība, 2022. 527 lpp.

Monogrāfijas autori

Ivars Zālītis, Aleksandrs Dolgicers, Jevgeņijs Kozadajevs

Zinātniskais redaktors Aleksandrs Dolgicers

Recenzenti Vladimirs Čuvičins, *Dr. sc. ing.*

Larisa Gračkova, *Dr. sc. ing.*

Zinātniskā monogrāfija veltīta elektrisko sistēmu nesimetrisko režīmu skaitliskās modelēšanas metodēm. Monogrāfijas zinātniskā novitāte galvenokārt saistīta ar elektrisko sistēmu režīmu parametru aprēķinu metodiku vienlaicīgu nesimetriju rašanās gadījumos un skaitliskās apgrieztās Laplasa transformācijas metodes apvienošanu ar topoloģisko elektriskās sistēmas modelēšanu Laplasa telpā. Monogrāfijā iekļauti vairāki elektrisko sistēmu nesimetrisko bojājumu režīmu aprēķinu un to sagatavošanas piemēri, kā arī ietverta vienkāršota dažādo bojājumu analīze, kas papildināta ar potenciālās relejaizsardzības darbības izvērtējumu.

Grāmatas teorētiskais materiāls, praktiskie piemēri un papildu materiāli būs noderīgi ne tikai studentiem, bet arī speciālistiem, kas darbojas relejaizsardzības un automātikas jomā.

Zinātniskā monogrāfija apstiprināta publicēšanai RTU Zinātnes padomes 2022. gada 24. oktobra sēdē, protokola Nr. 04000-3/09.

Darbs izstrādāts ar Latvijas Zinātnes padomes pētījumu programmas I-POWER (Nr. Izp-2018/1-0066) un valsts pētījumu programmas INGRIDO (2018–2021) atbalstu.

Darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda projekta “Rīgas Tehniskās universitātes akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās” (SAM 8.2.2.0/18/A/017, RTU PVS ID 3826) atbalstu. Šo pētījumu finansē Latvijas Republikas Ekonomikas ministrija, projekts „Ilgtspējīga Latvijas energosistēmas attīstība un integrācija Eiropā (FutureProof)”, projekts Nr. VPP-EM-INFRA-2018/1-0005.

Literārā redaktore Inga Gulbe

Datorsalikums Ivars Zālītis, Paula Lore

Vāka dizains Paula Lore

© Rīgas Tehniskā universitāte, 2022

© Ivars Zālītis, Aleksandrs Dolgicers, Jevgeņijs Kozadajevs, 2022

<https://doi.org/10.7250/9789934227110>

ISBN 978-9934-22-833-9 (print)

ISBN 978-9934-22-711-0 (pdf)

MATHEMATICAL MODELLING OF ASYMMETRICAL OPERATION OF POWER SYSTEMS

Mathematical Modelling of Asymmetrical Operation of Power Systems.

Scientific monograph. Riga, RTU Press, 2022. 527 p.

Authors

Ivars Zālītis, Aleksandrs Dolgicers, Jevgeņijs Kozadajevs

Scientific editor Aleksandrs Dolgicers

Reviewers Vladimirs Čuvičins, *Dr. sc. ing.*

Larisa Gračkova, *Dr. sc. ing.*

The present monograph is dedicated to the subject of numerical methods for modelling of asymmetrical modes of operation of power systems. The scientific novelty of the monograph mainly pertains to numerical methods for calculation of power system regime parameters with multiple asymmetrical faults and the method for calculation of power system fault transients which combines the numerical inverse Laplace transformation and topological modelling of the power system in Laplace space. This study also includes multiple examples of both fault and preparatory calculations with their respective implementations in computer codes and basic analysis of the characteristics of different faults as well as potential operation of relay protection for some of the examples.

The theoretical background, practical examples and additional information provided in this study will prove useful not only to students but also to engineers and researchers already working in the field of relay-based protection and automation.

The scientific monograph has been approved for publishing at the RTU Council of Science meeting of 24 October, 2022, minutes of meeting No. 04000-3/09.

This research has been supported by the Latvian Council of Science, project: Management and Operation of an Intelligent Power System (I-POWER) (No. lzp-2018/1-0066) and by National Research Programme project: Innovative Intelligent Network Technologies and their Optimization (INGRIDO), 2018–2021.

This research has been funded by European Social Fund Project “Strengthening of Academic Staff of Riga Technical University in Strategic Specialization Areas” (SAM 8.2.2.0/18/A/017). This research has also been funded by the Ministry of Economics of the Republic of Latvia, project “Future-proof development of the Latvian power system in an integrated Europe (FutureProof)”, project No. VPP-EM-INFRA-2018/1-0005.

Literary Editor Inga Gulbe

Layout and design Ivars Zālītis, Paula Lore

Cover design Paula Lore

© Riga Technical University, 2022

© Ivars Zālītis, Aleksandrs Dolgicers, Jevgeņijs Kozadajevs, 2022

<https://doi.org/10.7250/9789934227110>

ISBN 978-9934-22-833-9 (print)

ISBN 978-9934-22-711-0 (pdf)

SUMMARY

The presented work is dedicated to the subject of numerical methods for modelling of asymmetrical regimes (modes of operation) of power systems. The first chapter discusses the basics of symmetrical component method and its link with higher harmonic components of electrical signals. The second chapter describes methods for depiction of various power system elements in sequence networks and calculation of their respective parameters. The third chapter of this work is devoted to the principles of drawing of sequence networks of power systems. The fourth chapter presents mathematical methods suitable for calculations of steady-state parameters of fault and pre-fault regimes of equivalent circuits and numerical implementations for these calculations. The fifth chapter includes an analysis of the effects of transformers with a complex transformation coefficient (ones that introduce both an amplitude transformation and a phase shift) on the symmetrical component values and the resulting phase values. The sixth chapter of this work provides a theoretical base for calculations of regimes with a single transverse asymmetry (shunt faults) and demonstrates examples with analytical and topological (graph based) solution approaches. The seventh chapter is dedicated to a theoretical description of calculation methods for power system regimes with a single longitudinal asymmetry (series faults) and demonstrates them with examples of analytical and topological solution approaches. The eighth chapter presents descriptions of both analytic and topological calculation methods for power system regimes with multiple simultaneous asymmetrical faults and two different examples of possible topological solution. The ninth chapter discusses theory of the Laplace transformation, its applications for calculations of electrical transients, and then presents a numerical inverse Laplace transformation method as well as examples of its application for calculation of transients of a symmetrical and an asymmetrical short-circuit.

The main contributions of this work are the numerical methods for calculation of power system regimes with multiple asymmetrical faults and the method for calculation of power system fault transients, which combines the numerical inverse Laplace transformation and topological modelling of the power system in Laplace space. This work also includes multiple examples of both fault and preparatory calculations with their respective implementations in computer codes and basic analysis of the characteristics of different faults as well as potential operation of relay protection for some of the examples. Authors hope, that the theoretical background and practical examples provided in this work will prove useful not only for students, but also to engineers and researchers already working in the field of relay protection and automation.

This work consists of an Introduction; 9 chapters; Conclusions; appendices; the Bibliography. The total number of pages is 527 including appendices. It contains 75 tables; 271 figures; 470 equations; 126 cited sources of information; 19 appendices.

KOPSAVILKUMS

Šis darbs ir veltīts elektrisko sistēmu nesimetrisko režīmu parametru skaitlisko aprēķinu metodēm. Darba pirmajā nodaļā aprakstīta simetrisko komponentu metode un tās sasaiste ar elektrisko signālu augstākajām harmonikām. Otrajā nodaļā parādīta dažādu elektrisko sistēmu elementu atainošana secību aizvietošanas shēmās un šo elementu aizvietošanas shēmu parametru aprēķinu metodes. Trešā nodaļa veltīta secību aizvietošanas shēmu sastādīšanas principiem. Ceturtajā nodaļā aprakstītas skaitliskās metodes aizvietošanas shēmu stacionāro režīmu parametru aprēķiniem un to implementācijas. Piektā nodaļa iekļauj analīzi par transformatoru ar kompleksu transformācijas koeficientu ietekmi uz simetriskajām komponentēm un no tām iegūstamajiem fāžu lielumiem. Sestajā nodaļā aprakstītas elektrisko sistēmu režīmu parametru aprēķinu metodes, rodoties vienai šķērsnesimetrijai, kas demonstrētas ar piemēriem, kuru risināšanai izmantots gan analītisks, gan topoloģisks jeb uz grafu teorijas balstīts paņēmiens. Septītā nodaļa ietver elektrisko sistēmu režīmu parametru aprēķinu metožu aprakstus, rodoties vienai garensimetrijai, kas demonstrētas ar piemēriem, kuru risināšanai lietots gan analītisks, gan topoloģisks paņēmiens. Astotajā nodaļā parādītas elektrisko sistēmu režīmu parametru aprēķina analītiskās un topoloģiskās risināšanas metodes, rodoties sarežģītiem bojājumiem jeb vairākām vienlaicīgām nesimetrijām, kā arī divu dažādu topoloģisko risināšanas metožu lietojuma piemēri. Pēdējā devītajā nodaļā aprakstīta Laplasa transformācija, tās izmantošana elektrisko ķēžu pārejas procesu aprēķinos, skaitliskas apgrieztās Laplasa transformācijas versija un doti tās lietojuma piemēri simetriska un nesimetriska īsslēguma pārejas procesa aprēķinam.

Galvenie šī darba pienesumi ir parādītā metodoloģija elektrisko sistēmu režīmu parametru aprēķiniem, rodoties vairākām vienlaicīgām nesimetrijām, un skaitliskās apgrieztās Laplasa transformācijas metode, kas apvienota ar topoloģisko elektriskās sistēmas modelēšanu Laplasa telpā. Šajā darbā iekļauti vairāki elektrisko sistēmu nesimetrisko bojājumu režīmu aprēķinu piemēri, to veikšanai nepieciešamie sagatavojošie aprēķini, to implementācijas programmu tekstos un vienkāršota dažādo bojājumu analīze, kas dažiem piemēriem papildināta ar potenciālo relejaizsardzības darbības izvērtējumu. Autori cer, ka darba teorētiskā bāze un praktiskie piemēri būs noderīgi ne tikai studentiem, bet arī speciālistiem, kas jau darbojas relejaizsardzības un automātikas jomā.

Šajā darbā ir ievads, deviņas nodaļas, secinājumi, pielikumi un informācijas avotu saraksts, kopējais apjoms ir 527 lappuses. Darbs satur 75 tabulas, 271 attēlu, 470 vienādojumus, 126 informācijas avotus un 19 pielikumus.

SATURS

Darbā izmantoto saīsinājumu saraksts.....	9
Ievads.....	11
1. IEVADS SIMETRISKO KOMPONENŠU METODĒ.....	13
2. AIZVIETOŠANAS SHĒMU ELEMENTI.....	25
2.1. Nosaukto un relatīvo vienību sistēmas lietošana aizvietošanas shēmu parametriem...25	
2.1.1. Nosaukto vienību sistēma un parametru reducēšana uz aprēķina sprieguma pakāpi.....	25
2.1.2. Relatīvo vienību sistēma un parametru reducēšana uz aprēķina sprieguma pakāpi.....	27
2.2. Elektropārvades gaisvadu un kabeļlīnijas.....	30
2.3. Spēka transformatori un autotransformatori.....	61
2.4. Sinhronās mašīnas.....	84
2.5. Lieljaudas energosistēmas.....	93
2.6. Asinhronās mašīnas un elektriskā slodze.....	95
2.7. Strāvu ierobežojošie reaktori.....	101
2.8. Ar pārveidotājiem saistītie elementi.....	103
3. SIMETRISKO KOMPONENŠU METODES AIZVIETOŠANAS SHĒMU SASTĀDĪŠANA.....	107
4. ELEKTRISKO SISTĒMU REŽĪMU PARAMETRU APRĒĶINI AR TOPOLOĢISKO METODI.....	112
5. STRĀVU UN SPRIEGUMU SIMETRISKO KOMPONENŠU TRANSFORMĀCIJA BOJĀJUMIEM AIZ TRANSFORMATORA.....	125
6. ELEKTRISKĀS SISTĒMAS REŽĪMA PARAMETRU APRĒĶINI VIENAS ŠĶĒRSNESIMETRIJAS RAŠANĀS GADĪJUMOS.....	132
6.1. Vienas šķērsnesimetrijas režīmu analīze un parametru aprēķinu metodika.....	132
6.1.1. Vispārīgas šķērsnesimetrijas gadījums.....	132
6.1.2. Trīsfāžu īsslēgumi.....	140
6.1.3. Divfāžu īsslēgumi.....	144
6.1.4. Vienfāzes īsslēgumi.....	154
6.1.5. Nesimetriskas slodzes režīms.....	158
6.2. Pirmais elektriskās sistēmas režīma parametru aprēķina piemērs vienas šķērsnesimetrijas rašanās gadījumā ar analītisku risinājumu.....	159
6.3. Otrais elektriskās sistēmas režīma parametru aprēķina piemērs vienas šķērsnesimetrijas rašanās gadījumā ar topoloģisku risinājumu.....	168
6.4. Trešais elektriskās sistēmas režīma parametru aprēķina piemērs vienas šķērsnesimetrijas rašanās gadījumā ar topoloģisku risinājumu.....	178
7. ELEKTRISKĀS SISTĒMAS REŽĪMA PARAMETRU APRĒĶINI VIENAS GARENESIMETRIJAS RAŠANĀS GADĪJUMOS.....	194
7.1. Vienas garennesimetrijas režīmu analīze un parametru aprēķinu metodika.....	194

7.1.1. Vispārīgas garenesimetrijas gadījums.....	194
7.1.2. Trīsfāžu garenesimetrija ar pretestībām visās fāzēs.....	201
7.1.3. Vienfāzes pārrāvumi.....	205
7.1.4. Divfāžu pārrāvumi.....	209
7.2. Pirmais elektriskās sistēmas režīma parametru aprēķina piemērs vienas garenesimetrijas rašanās gadījumā ar analītisku risinājumu.....	213
7.3. Otrais elektriskās sistēmas režīma parametru aprēķina piemērs vienas garenesimetrijas rašanās gadījumā ar topoloģisku risinājumu.....	225
7.4. Trešais elektriskās sistēmas režīma parametru aprēķina piemērs vienas garenesimetrijas rašanās gadījumā ar topoloģisku risinājumu.....	238
8. ELEKTRISKĀS SISTĒMAS REŽĪMA PARAMETRU APRĒĶINI VAIRĀKU VIENLAICĪGU NESIMETRIJU RAŠANĀS GADĪJUMOS.....	258
8.1. Elektriskās sistēmas režīmu parametru aprēķinu analītiskā metodika vairāku vienlaicīgu nesimetriju rašanās gadījumos.....	258
8.2. Elektriskās sistēmas režīmu parametru topoloģiskā aprēķinu metodika vairāku vienlaicīgu nesimetriju rašanās gadījumos.....	265
8.3. Pirmais elektriskās sistēmas režīma parametru aprēķina piemērs vairāku vienlaicīgu nesimetriju rašanās gadījumā ar topoloģisku risinājumu.....	301
8.4. Otrais elektriskās sistēmas režīma parametru aprēķina piemērs vairāku vienlaicīgu nesimetriju rašanās gadījumā ar topoloģisku risinājumu.....	317
9. LAPLASA TRANSFORMĀCIJAS LIETOŠANA BOJĀJUMU PĀREJAS PROCESU APRĒĶINOS.....	333
9.1. Laplasa transformācija un tās lietojums elektrisko ķēžu pārejas procesu aprēķinos..	333
9.2. Skaitliska apgrieztā Laplasa transformācija ar izvedumu Furjē rindā.....	344
9.3. Elektriskās sistēmas trīsfasžu īsslēguma pārejas procesa aprēķina realizācijas piemērs ar skaitliskās apgrieztās Laplasa transformācijas lietošanu.....	351
9.4. Elektriskās sistēmas vienfāzes īsslēguma pārejas procesa aprēķina realizācijas piemērs, lietojot skaitlisko apgriezto Laplasa transformāciju	359
Secinājumi.....	368
Noslēguma vārdi.....	370
Pielikumi.....	371
1. pielikums Atkārtojums par kompleksiem skaitļiem.....	372
2. pielikums Ievads Furjē rindās un Furjē transformācijā.....	378
3. pielikums Kabeļu fāzes vadu īpatnējās aktīvās līdzstrāvas pretestības dažādu materiālu vadiem un dažādiem IEC 60228 norādītajiem nominālajiem vadītāju šķērsriezuma laukumiem pie 20 °C.....	387
4. pielikums Zemsprieguma kabeļu dati.....	388
5. pielikums Vidsprieguma kabeļu dati.....	392
6. pielikums Augstsprieguma kabeļu dati.....	397
7. pielikums Neitrāļu režīmi, to īpašības un realizācija.....	399
8. pielikums 4A sērijas AD aizvietošanas shēmu pretestību vērtības atkarībā no to nominālās aktīvās jaudas un sinhronās rotācijas frekvences.....	419

9. pielikums Pirmā aprēķinu piemēru tīkla elementu izejas dati un sagatavojošie aprēķini.....	422
10. pielikums Otrā aprēķinu piemēru tīkla elementu izejas dati un sagatavojošie aprēķini.....	438
11. pielikums Trešā aprēķinu piemēru tīkla elementu izejas dati un sagatavojošie aprēķini.....	448
12. pielikums Otrā šķērsnesimetrijas aprēķinu piemēra topoloģiskā režīma parametru aprēķina datorrealizācija <i>MATLAB</i> © programmas tekstā.....	472
13. pielikums Trešā šķērsnesimetrijas aprēķinu piemēra topoloģiskā režīma parametru aprēķina datorrealizācija <i>MATLAB</i> © programmas tekstā.....	476
14. pielikums Otrā garennesimetrijas aprēķinu piemēra topoloģiskā režīma parametru aprēķina datorrealizācija <i>MATLAB</i> © programmas tekstā.....	484
15. pielikums Trešā garennesimetrijas aprēķinu piemēra topoloģiskā režīma parametru aprēķina datorrealizācija <i>MATLAB</i> © programmas tekstā.....	489
16. pielikums Pirmā vairāku vienlaicīgu nesimetriju aprēķinu piemēra topoloģiskā režīma parametru aprēķina datorrealizācija <i>MATLAB</i> © programmas tekstā.....	499
17. pielikums Otrā vairāku vienlaicīgu nesimetriju aprēķinu piemēra topoloģiskā režīma parametru aprēķina datorrealizācija <i>MATLAB</i> © programmas tekstā.....	507
18. pielikums Skaitliskās apgrieztās Laplasa transformācijas datorrealizācijas piemērs <i>MATLAB</i> © programmas tekstā.....	514
19. pielikums Skaitliskās apgrieztās Laplasa transformācijas realizācijai izmantotās ārējās attēla funkcijas ar topoloģisko tīkla režīma parametru risinājumu vienfāzes īsslēgumam datorrealizācijas piemērs <i>MATLAB</i> © programmas tekstā.....	515
Informācijas avoti.....	519

DARBĀ IZMANTOTO SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

Nr. p. k.	Saīsinājums	Atšifrējums
1.	SKM	Simetrisko komponentu metode
2.	RA	Relejaizsardzība
3.	BVN	Bojājuma vietas noteikšana
4.	RAA	Relejaizsardzība un automātika
5.	NS	Nullsecība
6.	F-Z	Fāze-zeme
7.	F-F	Fāze-fāze
8.	AD	Asinhronais dzinējs
9.	<i>AC</i>	Maiņstrāva (angļu val. <i>Alternating current</i>)
10.	TS	Tiešsecība
11.	PS	Pretsecība
12.	LVS	Lineāru vienādojumu sistēma
13.	GL	Gaisvadu līnija
14.	KL	Kabeļlīnija
15.	EPL	Elektropārvades līnija
16.	EDS	Elektrodzinējspēks
17.	<i>DC</i>	Līdzstrāva (angļu val. <i>Direct current</i>)
18.	<i>SI</i>	Starptautiskā mērvienību sistēma (franču val. <i>Système international (d'unités)</i>)
19.	<i>OPGW</i>	Zibensaizsardzības trose ar optiskās šķiedras kabeli vai dzīslām (angļu val. <i>Optical ground wire</i>)
20.	AS	Augstspriegums
21.	<i>XPLE</i>	Šķērssaistītais polietilēns (angļu val. <i>Cross-linked polyethylene</i>)
22.	<i>HDPE</i>	Augsta blīvuma polietilēns (angļu val. <i>High density polyethylene</i>)
23.	PET	Polietilēntereftalāts
24.	PE	Polietilēns
25.	<i>PVC</i>	Polivinilhlorīds (angļu val. <i>Polyvinyl chloride</i>)
26.	ZS	Zemspriegums
27.	<i>PEN</i>	Apvienotais neitrāles un zemēšanas vads (angļu val. <i>Protective earthing and neutral</i>)
28.	MDS	Magnetodzinējspēks
29.	VS	Vidspriegums
30.	BV	Bojājuma vieta
31.	<i>ГОСТ</i>	(Padomju Savienības) Valsts standarts (krievu val. <i>Государственный стандарт</i>)
32.	NT	Neitrāles transformators
33.	SM	Sinhronā mašīna
34.	SG	Sinhronais ģenerators
35.	TG	Turboģenerators
36.	HG	Hidroģenerators
37.	MPM	Mezglu potenciālu metode
38.	RUV	Releja uzstādīšanas vieta

39.	<i>IEC</i>	Starptautiskā elektrotehnikas komisija (angļu val. <i>International Electrotechnical Commission</i>)
40.	MSA	Maksimālstrāvas aizsardzība
41.	<i>ANSI</i>	Amerikas Valsts standartu institūts (angļu val. <i>American National Standards Institute</i>)
42.	DA	Distantaizsardzība
43.	DFT	Diskrētā Furjē transformācija

IEVADS

Lasītājam piedāvātā grāmata veltīta simetrisko komponentu jeb sastāvdaļu metodes lietojumiem elektrisko sistēmu režīma parametru aprēķinos, īpašu uzmanību pievēršot nesimetrisku bojājumu režīmiem. Simetrisko komponentu metodi (turpmāk tekstā – SKM) izmanto jau vairāk nekā 100 gadus [1]. Tās galvenā priekšrocība ir iespēja izvairīties no nepieciešamības ņemt vērā starpfāžu mijinduktivitātes, pārejot no reālas nesimetriskas trīsfāžu sistēmas pie simetriskām apakšsistēmām. Minētās mijinduktivitātes palielina pat vienkārša tīkla režīma parametru aplēses darba apjomu tik ļoti, ka rezultējošās vienādojumu sistēmas manuāls risinājums kļūst praktiski neiespējams vai ļoti laikietilpīgs un skaitliska risinājuma ar datora palīdzību realizācija arī var sagādāt grūtības. SKM ir kļuvusi par stūrakmeni energosistēmu bojājumu, relejaizsardzības (turpmāk tekstā – RA) un pretavārijas automātikas darbības un sprieguma kvalitātes analīzē, bojājuma vietas noteikšanā (turpmāk tekstā – BVN) un citu līdzīgu uzdevumu risināšanā. Diemžēl jākonstatē, ka Latvijas zinātniekiem un speciālistiem enerģētikas jomā valsts valodā pieejams ierobežots literatūras apjoms, kurā rūpīgi izklāstīti jautājumi, kas saistīti ar SKM lietošanu kopā ar datormodelēšanas metodēm, sarežģīto bojājumu modelēšanu, SKM lietošanu pārejas procesu brīvās komponentes aplēsēm. Līdz ar to pēc bāzes līmeņa apgūšanas elektromagnētisko pārejas procesu kursā [2] students, vēloties uzzināt par šo zināšanu tālāku izmantošanu, var nonākt informācijas vakuumā. Pieejamas vairākas ārzemju grāmatas (piemēram, [3]–[7]), bet tām nereti ir šaura specializācija un tās ir grūti saprotamas, it īpaši cilvēkam, kurš tikai iesāk savu darbību šajā nozarē vai nepārvalda konkrēto svešvalodu pietiekamā līmenī. Šīs grāmatas saturu autori veidojuši tā, lai grāmata būtu lietderīga gan pieredzējušiem speciālistiem, gan studentiem. Priekšzināšanu apjoms, ko šī grāmata prasa no lasītāja aprobežojas ar elektrotehnikas teorētiskajiem pamatiem, lineāro algebru un elementārām zināšanām kompleksa mainīgā algebrā. Grāmatā iekļauti gan vairāki elektrisko sistēmu bojājuma režīmu parametru aplēsei nepieciešamo sagatavojošo aprēķinu, gan pašu bojājumu režīmu parametru noteikšanas piemēri, kas, pēc autoru domām, varētu palīdzēt studentiem materiāla apgūšanā un, cerams, netraucēs arī pieredzējušajiem speciālistiem. Grāmatā dotie aprēķinu piemēri īstenoti *MATLAB*© matemātiskās modelēšanas programmā tā, lai tos būtu iespējams īstenot ar personālā datora palīdzību, neizmantojot specializētus moduļus (angļu val. *toolbox*). Šos aprēķinus var īstenot arī citās analogiskās modelēšanas vidēs, kurās iespējams veikt darbības ar kompleksajiem skaitļiem, tostarp arī brīvpieejas programmās, piemēram, *SciLab*©. Daļai no piemēriem pievienota arī vienkāršota rezultātu tālāka apstrāde un analīze, lai sniegtu ieskatu par iespējamajiem šādu aplēšu lietojumiem.

Grāmatā aplūkoti gan vienas nesimetrijas režīmi, gan sarežģītie bojājumi, piemēram, vairāki vienlaicīgi īsslēgumi vai vienlaicīgi īsslēgumi un pārrāvumi, gan vienā un tajā pašā, gan atšķirīgās fāzēs un dažādās tīkla daļās. Minēto bojājumu modelēšana ir lietderīgs instruments, gan veicot elektrisko sistēmu esošās RA un automātikas (turpmāk tekstā – RAA) darbības analīzi, gan izstrādājot un pārbaudot jaunus RAA algoritmus un iekārtas. Autoru piedāvātā metodoloģija, kas apvieno SKM un uz grafu teorijas balstītas topoloģiskās elektrisko ķēžu stacionāro režīma parametru aprēķinu metodes, dod iespēju noteikt režīma parametrus

aizsardzības vai automātikas uzstādīšanas vietā, rodoties jebkurai vairāku nesimetrisku bojājumu kombinācijai. Galvenie piedāvātās metodes ierobežojumi ir skaitļošanas iekārtas, parasti datora, veiktspēja un SKM lietošanas nosacījumi. Pilnīgākai aprēķinu gaitas izpratnei grāmatā aplūkoti arī elektrisko sistēmu elementu aizvietošanas shēmu parametru aprēķini un to nianses, balstoties uz ražotāju datiem un elementu fiziskajiem parametriem, kā arī pirmsavārijas režīma parametru aprēķini.

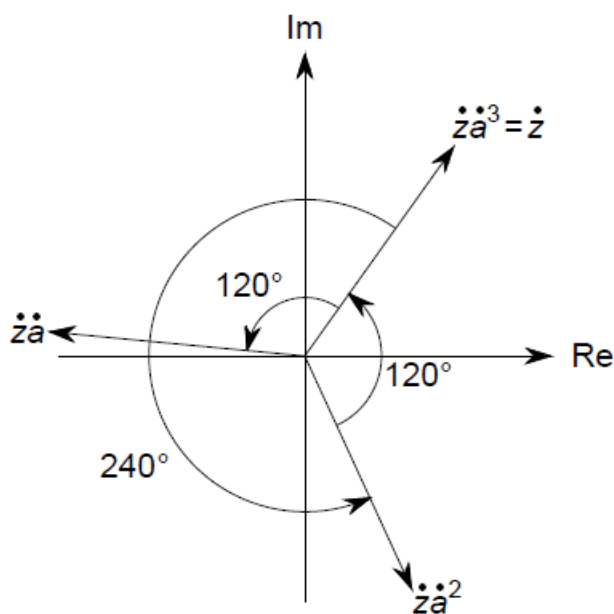
Papildus stacionāro bojājumu režīmu parametru aprēķinu metodēm autori piedāvā skaitlisku metodi elektrisko sistēmu parametru pārejas procesu signālu nestacionārās jeb brīvās komponentes aprēķiniem, kas apvieno skaitlisku apgriezto Laplasa transformāciju, atbilstošas aizvietošanas shēmas izveidi ar parametriem Laplasa telpā un tās režīma parametru topoloģisku aprēķinu. Parādīto apgrieztās Laplasa transformācijas lietošanas metodi iespējams izmantot arī nesimetriskajiem bojājumiem, izmantojot kompleksās aizvietošanas shēmas, bet jāņem vērā, ka šādiem bojājumiem dotais aprēķins nosaka vienīgi īpašās jeb aprēķina fāzes simetrisko komponentu signālu brīvās komponentes. No citas puses, metodes universālais raksturs ļauj veikt aprēķinus dažādiem tīkliem, koriģējot vienīgi tīklu aprakstošās topoloģiskā režīma parametru aprēķina ieejas matricas. Aplūkoto praktisko piemēru rezultāti parādīja, ka piedāvātās metodes iegūtie rezultāti ir gandrīz identiski diferenciālvienādojumu risinājumam.

1. IEVADS SIMETRISKO KOMPONENŠU METODĒ

SKM ir aprēķinu metode, ko lieto nesimetrisku vektoru sistēmu transformēšanai vairākās simetriskās vektoru sistēmās.

SKM pirmais piedāvāja Forteskju [1], un tālāks šīs metodes lietojums tika paplašināts Evansa grāmatā [8] un Klarkas grāmatā [9]. Forteskju simetriskās komponentes formulēja šādi: jebkuru nesimetrisku n fāžu strāvu vai spriegumu vektoru sistēmu var aizstāt ar n dažādu simetrisku n fāžu strāvu vai spriegumu vektoru sistēmu vektoriālu summu. Vienā no minētajām sistēmām – nullsecības (turpmāk tekstā – NS) – visu fāžu strāvu vai spriegumu vektori tiek pieņemti esam vienādi pēc garuma un sakrītoši fāzē. Savukārt atlikušajās $n - 1$ sistēmās fāžu strāvu vai spriegumu vektori tiek pieņemti vienādi pēc garuma, bet savstarpēji nobīdīti par leņķi $2\pi / n$ rad un ar dažādiem fāžu strāvu vai spriegumu vektoru savstarpējiem novietojumiem [1]. Forteskju transformācija ļauj no n fāžu strāvu vai spriegumu nesimetriskas sistēmas ar n mijinduktivitātēm fāze–zeme (turpmāk tekstā – F–Z) un n mijinduktivitātēm fāze–fāze (turpmāk tekstā – F–F) pāriet uz n simetrisku n fāžu strāvu vai spriegumu sistēmu aprēķinu. Tad sadalīto simetrisko sistēmu režīmi ir jāaprēķina tikai vienai fāzei, bet pārējo fāžu režīma parametri ieviestajās sistēmās iegūstami, veicot vienkāršus vektoru pagriezienus par leņķi $2\pi / n$ rad, izņemot NS sistēmu, kur visu fāžu vektori sakrīt.

Formulēsim Forteskju transformāciju nesimetriskai trīsfāžu sistēmai ($n = 3$). Balstoties uz vispārīgo definīciju, var secināt, ka jebkuru nesimetrisku trīsfāžu spriegumu vektoru sistēmu $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ vai strāvu vektoru sistēmu $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ var iegūt no trīs simetrisku trīsfāžu sistēmu summas. Divās sistēmās savstarpējai vektoru nobīdei ir jābūt $2\pi / n = 2\pi / 3$ rad jeb 120° , bet trešajā vektoriem ir jāsakrīt. Simetrisko sistēmu vektoru nobīdes īstenošanai ieviesta kompleksa konstante jeb operators (vektors) \dot{a} , kas vienāda ar $\dot{a} = 1e^{j120^\circ}$ (atkārtojums par darbībām ar kompleksiem skaitļiem atrodams 1. pielikumā). Jebkura vektora reizināšana ar \dot{a} ir ekvivalenta tā pagriešanai pretēji pulksteņa rādītāja kustības virzienam par 120° jeb $2\pi / 3$ rad, bet vektora reizināšana ar \dot{a}^2 ir ekvivalenta tā pagriešanai par 240° jeb $4\pi / 3$ rad (1.1. att.). Vektors, kas reizināts ar \dot{a}^3 , ir identisks pats sev. Ieviestā pagriezienu operatora un tā kāpinājuma kvadrātā algebriskā forma ir $\dot{a} = -0,5 + j\sqrt{3}/2$, $\dot{a}^2 = -0,5 - j\sqrt{3}/2$ [1], [8], [9].



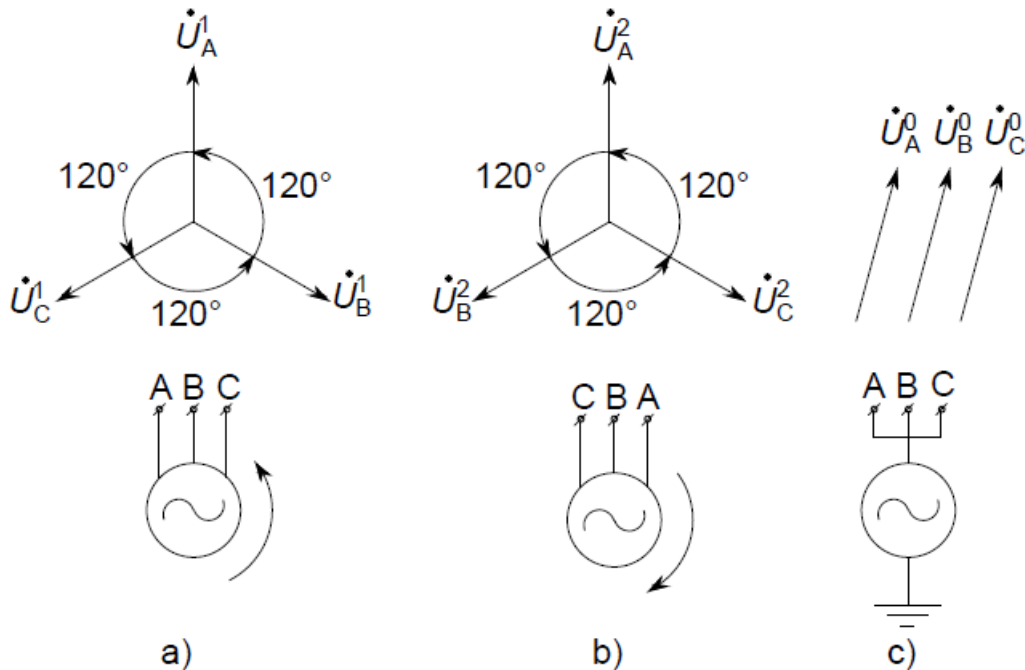
1.1. att. Vektora \dot{z} reizināšana ar pagriezienu operatoru \dot{a} .

Izmantojot iepriekš definēto pagriezienu operatoru \dot{a} , iespējams parādīt nesimetriska trīsfāžu režīma sprieguma vektoru sistēmas $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ sadalīšanu ieviešamās simetriskās vektoru sistēmās:

- Nr. 1 – $\dot{U}_A^1, \dot{U}_B^1 = \dot{a}^2 \dot{U}_A^1, \dot{U}_C^1 = \dot{a} \dot{U}_A^1$, kura atbilst simetriskai trīsfāžu sistēmai;
- Nr. 2 – $\dot{U}_A^2, \dot{U}_B^2 = \dot{a} \dot{U}_A^2, \dot{U}_C^2 = \dot{a}^2 \dot{U}_A^2$, kura atbilst simetriskai trīsfāžu sistēmai ar pretēju fāžu secību jeb miju;
- Nr. 3 – $\dot{U}_A^0, \dot{U}_B^0 = \dot{U}_A^0, \dot{U}_C^0 = \dot{U}_A^0$, kurā visu fāžu vektori sakrīt.

Pieslēdzot trīsfāžu asinhrono dzinēju (turpmāk tekstā – AD) spriegumu sistēmai Nr. 1, tā statora magnētiskais lauks un rotors sāktu rotēt tiešā virzienā (pretēji pulksteņa rādītāja kustības virzienam). Pieslēdzot to pašu dzinēju spriegumu sistēmai Nr. 2, tā statora magnētiskais lauks un rotors sāktu rotēt pretējā virzienā (pulksteņa rādītāja kustības virzienā). Savukārt, pieslēdzot šo dzinēju spriegumu sistēmai Nr. 3, tā statora magnētiskais lauks nevis rotētu, bet pulsētu. Literatūrā vektoru sistēma Nr. 1 (ar fāžu secību A, B, C) ir ieguvusi nosaukumu „tiešsecības sistēma” (angļu val. *positive-sequence system*) un indeksu „1”, sistēmu Nr. 2 (ar fāžu secību C, B, A) sauc par „pretsecības sistēmu” (angļu val. *negative-sequence system*) un apzīmē ar indeksu „2” (1.2. att.). Sistēma Nr. 3 ir ieguvusi nosaukumu „nullsecības sistēma” (angļu val. *zero-sequence system*) un indeksu „0” [8], jo tā ir saistīta ar trīsfāžu sistēmas neitrāli. Svarīgi atcerēties, ka fāžu vektoru savstarpējais novietojums neietekmē vektoru rotāciju kompleksajā plaknē, kas nepieciešama, lai modelētu maiņstrāvu (turpmāk tekstā – AC, angļu val. *alternating current*) un maiņspriegumu ar kompleksajiem skaitļiem (atkārtojums par simboliskās metodes lietošanu AC lielumu reprezentācijai dots 1. pielikuma beigās). Attiecīgi visi vektori gan oriģinālajā nesimetriskajā sistēmā, gan sistēmās Nr. 1, 2 un 3 rotē ar kādu leņķisko frekvenci ω (visi vektori satur reizinātāju $e^{j\omega t}$, ko bieži neparāda, jo vektoru diagrammu parasti konstruē vienam fiksētam laika momentam). Transformācija no fāžu spriegumu sistēmas $[\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C]$ uz simetrisko komponentu sistēmām $[\dot{U}_A^1, \dot{U}_B^1, \dot{U}_C^1], [\dot{U}_A^2, \dot{U}_B^2, \dot{U}_C^2], [\dot{U}_A^0, \dot{U}_B^0, \dot{U}_C^0]$ ir lineāra, jo šīs

sistēmas tiek uzskatītas par komplanārām, t. i., par tādām, kuras atrodas vienā plaknē, kuras rotē sinhroni un kuras ir savstarpēji lineāri atkarīgas.



1.2. att. Tiešsecības (a), pretsecības (b) un NS (c) spriegumu vektoru sistēmas ar atbilstošajām fāžu secībām.

Kā jebkuru lineāru transformāciju, arī Forteskju transformāciju iespējams uzrakstīt šādā formā [8]:

$$U = kU^s, \quad (1.1.)$$

kur U – oriģinālās fāžu spriegumu sistēmas vektors $[\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C]^T$, V;

k – Forteskju transformācijas koeficientu kvadrātmatrixa;

U^s – aprēķina fāzes sprieguma simetrisko komponentu sistēmas vektors, V.

Kā minēts iepriekš, SKM aprēķinus veic vienai no fāzēm, ko literatūrā sauc par īpašo jeb aprēķina fāzi (nesimetriskos elektriskās sistēmas režīmos par tādu parasti pieņem fāzi ar atšķirīgu pārejas pretestību, bet simetriskos režīmos vai vispārīgas nesimetrijas gadījumos, kad visās fāzēs ir atšķirīgas pārejas pretestības, visbiežāk tiek izraudzīta A fāze). Attiecīgi pagaidām pieņemsim A fāzi par aprēķina fāzi un vienkāršības dēļ, kamēr nosakām transformācijas (1.1.) koeficientu matrixu, pieņemsim, ka ar aprēķina fāzi saistītie vektori ir vērsti vienā virzienā. No veiktajiem pieņēmumiem izriet, ka

$$U^s = [\dot{U}_A^1, \dot{U}_A^2, \dot{U}_A^0]^T, \quad (1.2.)$$

$$\frac{\text{Re}(\dot{U}_A)}{\text{Im}(\dot{U}_A)} = \frac{\text{Re}(\dot{U}_A^1)}{\text{Im}(\dot{U}_A^1)} = \frac{\text{Re}(\dot{U}_A^2)}{\text{Im}(\dot{U}_A^2)} = \frac{\text{Re}(\dot{U}_A^0)}{\text{Im}(\dot{U}_A^0)}. \quad (1.3.)$$

Balstoties uz ieviesto tiešsecības (turpmāk tekstā – TS), pretsecības (turpmāk tekstā – PS) un NS vektoru sistēmu fāžu secību (1.2. att.) un principu, ka oriģinālo vektoru sistēmu veido

ieviesto sistēmu summa, ir iespējams rakstīt fāžu spriegumu vienādojumus, izsakot tos ar A fāzes simetriskajām komponentēm [2], [8]:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_A^1 + \dot{U}_A^2 + \dot{U}_A^0, \quad (1.4.)$$

$$\dot{U}_B = \dot{U}_B^1 + \dot{U}_B^2 + \dot{U}_B^0 = \dot{a}^2 \dot{U}_A^1 + \dot{a} \dot{U}_A^2 + \dot{U}_A^0, \quad (1.5.)$$

$$\dot{U}_C = \dot{U}_C^1 + \dot{U}_C^2 + \dot{U}_C^0 = \dot{a} \dot{U}_A^1 + \dot{a}^2 \dot{U}_A^2 + \dot{U}_A^0, \quad (1.6.)$$

kur $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ – A, B un C fāzes spriegums, V;

$\dot{U}_A^1, \dot{U}_A^2, \dot{U}_A^0$ – A fāzes sprieguma simetriskās komponentes, V;

$\dot{U}_B^1, \dot{U}_B^2, \dot{U}_B^0$ – B fāzes sprieguma simetriskās komponentes, V;

$\dot{U}_C^1, \dot{U}_C^2, \dot{U}_C^0$ – C fāzes sprieguma simetriskās komponentes, V;

\dot{a} – SKM vektoriālā pagriezienu operators.

Vienādojumi (1.4.)–(1.6.) dod iespēju parādīt saturu koeficientu matricai k , ko izmanto (1.1.) parādītajā Forteskju transformācijā, ja tai lieto A fāzes simetriskās komponentes:

$$k_A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1.7.)$$

un uzrakstīt transformāciju (1.1.) formā

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_A^1 \\ \dot{U}_A^2 \\ \dot{U}_A^0 \end{bmatrix}. \quad (1.8.)$$

Ja ir aprēķinātas vai zināmas B vai C fāzes simetriskās komponentes, tad transformācijas koeficientu matricas k vērtības var iegūt analogiskā veidā un tās būs šādas:

$$k_B = \begin{bmatrix} \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \end{bmatrix}, \quad (1.9.)$$

$$k_C = \begin{bmatrix} \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1.10.)$$

Aplūkojot (1.1.) un (1.8.) kā lineāru vienādojumu sistēmu (turpmāk tekstā – LVS), var formulēt arī apgriezto transformāciju ($U^S = k^{-1}U$), kurā no novērotajiem fāžu spriegumiem U pāriet uz aprēķina fāzes simetriskajām komponentēm U^S . Matricas k^{-1} elementus var iegūt, atrisinot vienādojumu sistēmu $kU^S = U$ (kā $AX = B$). Atrisinot minēto vienādojumu sistēmu, iegūst transformāciju $U^S = k^{-1}U$ formā $U^S = \mathcal{K}U/3$:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_A^1 \\ \dot{U}_A^2 \\ \dot{U}_A^0 \end{bmatrix} = (\mathcal{K}/3) \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix}, \quad (1.11.)$$

kur \mathcal{K} – Forteskju apgrieztās transformācijas matrica (saukta arī par Kirkegora matricu).

A fāzes simetrisko komponentu noteikšanai Kirkegora matrica ir vienāda ar

$$\mathcal{K}_A = \begin{bmatrix} 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1.12.)$$

Savukārt B vai C fāzes simetrisko komponentu noteikšanai jāizmanto šādas Kirkegora matricas formas:

$$\mathcal{K}_B = \begin{bmatrix} \dot{a}^2 & 1 & \dot{a} \\ \dot{a} & 1 & \dot{a}^2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1.13.)$$

$$\mathcal{K}_C = \begin{bmatrix} \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1.14.)$$

Analoģiski spriegumiem arī strāvām ir iespējams uzrakstīt Forteskju un tai apgriezto transformāciju matricu formā:

$$I = kI^s, \quad (1.15.)$$

$$I^s = \frac{1}{3}\mathcal{K}I. \quad (1.16.)$$

Aprakstīto transformāciju izpratnes nostiprināšanai aplūkosim piemēru ar nejauši izvēlētu nesimetrisku spriegumu sistēmu: $\begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 60e^{j60^\circ} \\ 25e^{-j10^\circ} \\ 95e^{j125^\circ} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 30 + j51,96 \\ 24,62 - j4,34 \\ -54,49 + j77,82 \end{bmatrix}$ kV. Vispirms,

izmantojot apgriezto Forteskju transformāciju, pāriesim uz A fāzes sprieguma simetriskajām komponentēm, izmantojot vienādojumus (1.11.) un (1.12.). Tad aplūkosim pārejas starp simetriskajām komponentēm, aprēķinot fāžu B un C spriegumu simetriskās komponentes, izmantojot vienādojumus (1.4.)–(1.6.). Beigās no B fāzes simetriskajām komponentēm pāriesim atpakaļ uz fāžu spriegumiem, izmantojot transformāciju (1.1.) ar koeficientu matricu k_B no (1.9.), un aplūkosim oriģinālās spriegumu sistēmas grafisko konstruēšanu no iegūtajām fāžu A, B un C simetriskajām komponentēm (1.3. att. un 1.4. att.).

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_A^1 \\ \dot{U}_A^2 \\ \dot{U}_A^0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 30 + j51,96 \\ 24,62 - j4,34 \\ -54,49 + j77,82 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 38,70 + j27,91 \\ -8,74 - j17,76 \\ 0,04 + j41,81 \end{bmatrix} \text{ kV},$$

$$\dot{U}_B^1 = \dot{a}^2 \dot{U}_A^1 = \dot{a}^2(38,70 + j27,91) \approx 4,82 - j47,47 \text{ kV},$$

$$\dot{U}_B^2 = \dot{a} \dot{U}_A^2 = \dot{a}(-8,74 - j17,76) \approx 19,75 + j1,31 \text{ kV},$$

$$\dot{U}_B^0 = \dot{U}_C^0 = \dot{U}_A^0 = \dot{U}^0 = 0,04 + j41,81 \text{ kV},$$

$$\dot{U}_C^1 = \dot{a}^2 \dot{U}_B^1 = \dot{a}^2(4,82 - j47,47) \approx -43,52 + j19,56 \text{ kV},$$

$$\dot{U}_C^2 = \dot{a} \dot{U}_B^2 = \dot{a}(19,75 + j1,31) \approx -11,01 + j16,45 \text{ kV},$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_B^1 \\ \dot{U}_B^2 \\ \dot{U}_B^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 4,82 - j47,47 \\ 19,75 + j1,31 \\ 0,04 + j41,81 \end{bmatrix} \approx$$

$$\approx \begin{bmatrix} 30 + j51,96 \\ 24,62 - j4,34 \\ -54,49 + j77,82 \end{bmatrix} \text{ kV}.$$

Grafiskai attēlošanai ir lietderīgi parādīt simetrisko komponentu moduļus un leņķus:

$$\dot{U}_A^1 = (38,70 + j27,91) \approx 47,71e^{j36^\circ} \text{ kV},$$

$$\dot{U}_A^2 = (-8,74 - j17,76) \approx 19,80e^{-j116^\circ} \text{ kV},$$

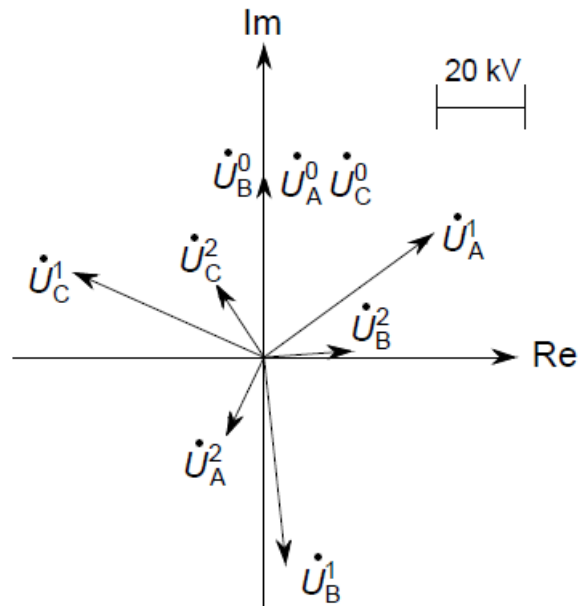
$$\dot{U}_A^0 = \dot{U}_B^0 = \dot{U}_C^0 = (0,04 + j41,81) \approx 41,80e^{j90^\circ} \text{ kV},$$

$$\dot{U}_B^1 = (4,82 - j47,47) \approx 47,71e^{-j84^\circ} \text{ kV},$$

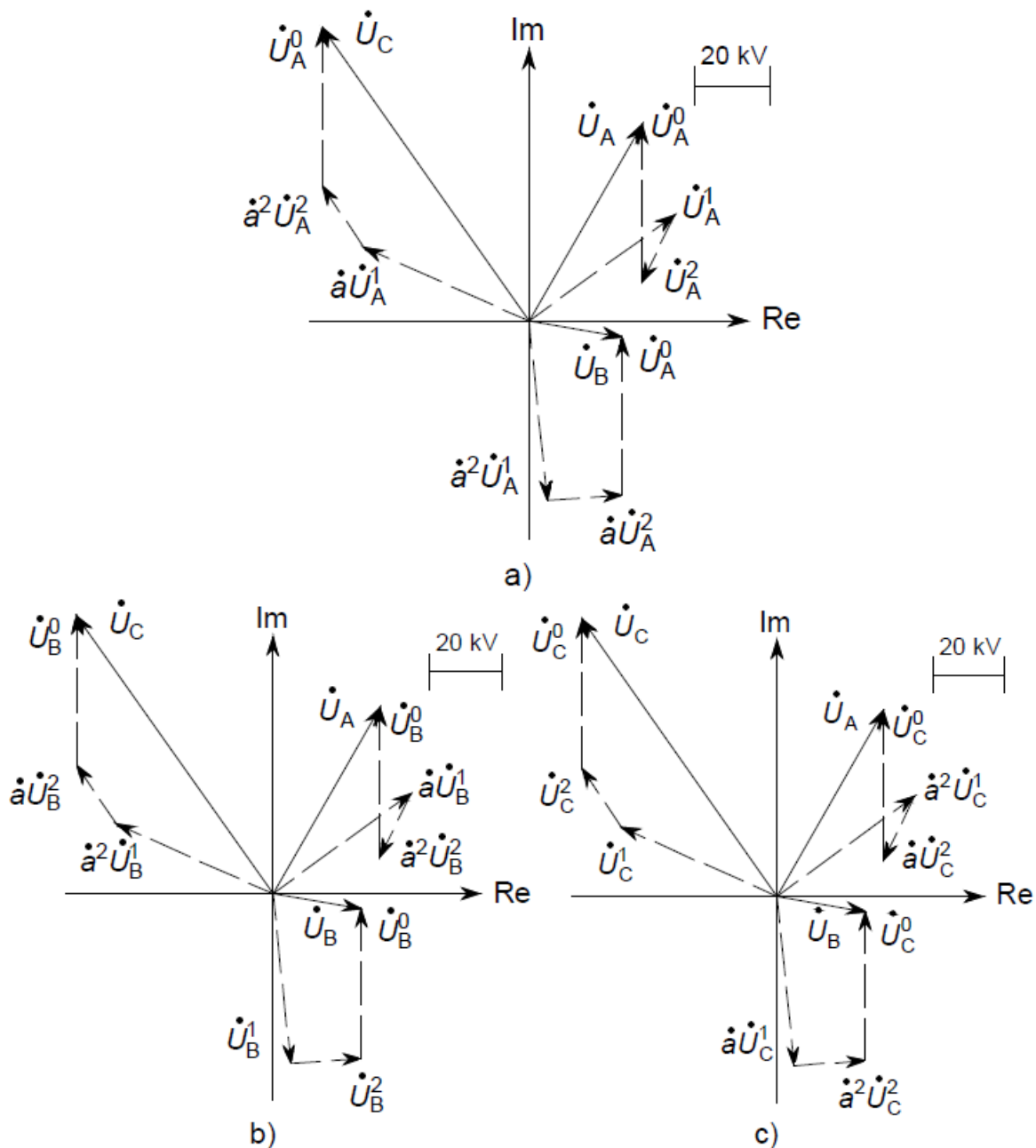
$$\dot{U}_B^2 = (19,75 + j1,31) \approx 19,80e^{j4^\circ} \text{ kV},$$

$$\dot{U}_C^1 = (-43,52 + j19,56) \approx 47,71e^{j156^\circ} \text{ kV},$$

$$\dot{U}_C^2 = (-11,01 + j16,45) \approx 19,80e^{j124^\circ} \text{ kV}.$$



1.3. att. A, B un C fāzes sprieguma simetriskās komponentes.



1.4. att. A, B un C fāžu spriegumu vektoru konstruēšana no A fāzes simetriskajām komponentēm (a), no B fāzes simetriskajām komponentēm (b) un no C fāzes simetriskajām komponentēm (c).

Balstoties uz iepriekš skaidroto teoriju, izveidota vēlāk aprēķinos izmantotā *MATLAB*® funkcija pārejai no simetriskajām komponentēm uz fāžu lielumiem (uzreiz jābrīdina, ka šajā un nākamajos aprēķinu veikšanai izveidotajos programmu tekstos netiks izmantotas diakritiskās zīmes, jo *MATLAB*® var neatpazīt šīs zīmes un padarīt komentāru un paziņojumu tekstu neuztveramu):

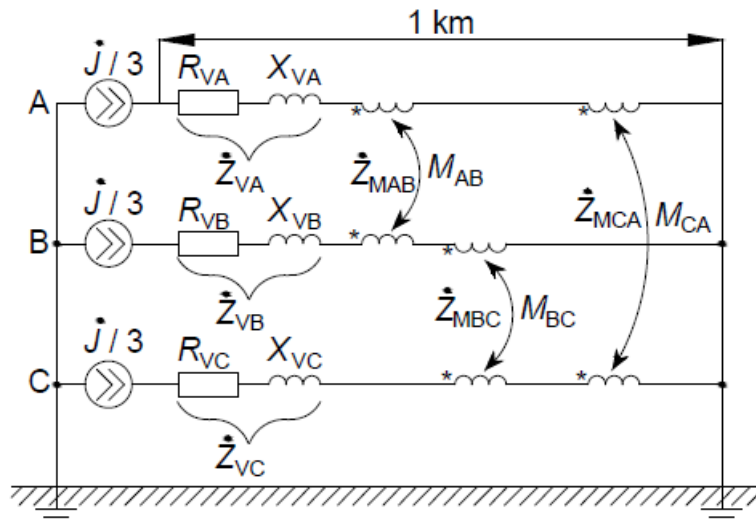
```
function X=SimComp2Ph(A, Ph)
%Balstoties uz apreķina fazi, funkcija izvada fazu lielumus, kas noteikti
no ievaditajiem simetrisko komponentu lielumiem
a=((-1*0.5)+(1i*sqrt(3)/2));
```

```

a2=conj(a);
Asim=0;
%izvelamies atbilstosu transformācijas matricu uzdotajai apreķina fazei
if strcmp(Ph,'A')==1 || strcmp(Ph,'L1')==1
    Asim=[1 1 1
          a2 a 1
          a a2 1];
elseif strcmp(Ph,'B')==1 || strcmp(Ph,'L2')==1
    Asim=[a a2 1
          1 1 1
          a2 a 1];
elseif strcmp(Ph,'C')==1 || strcmp(Ph,'L3')==1
    Asim=[a2 a 1
          a a2 1
          1 1 1];
else
    disp ('Ievadiet apreķina fazes nosaukumu: A/B/C vai L1/L2/L3')
end
X=Asim*A;
end

```

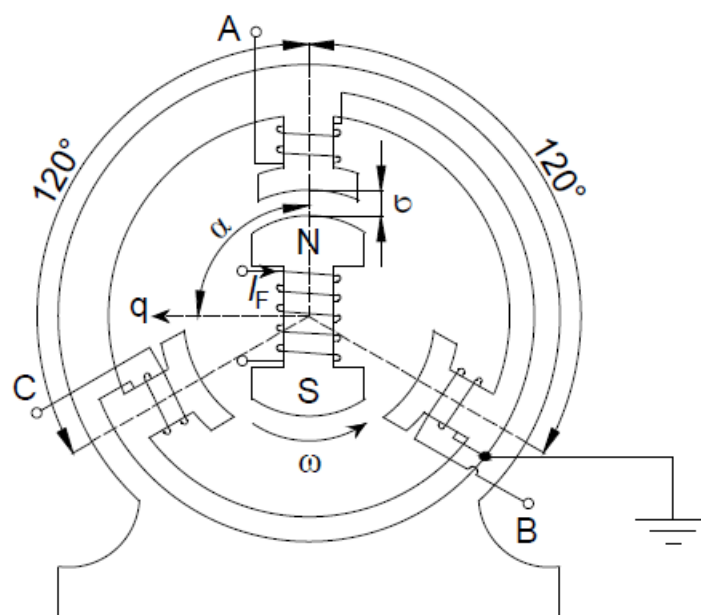
Sākotnēji var rasties iespaids, ka nesimetriska režīma parametru sadalīšana simetriskajās komponentēs tikai palielina aprēķinu apjomu. Patiesībā nesimetriskās parametru sistēmas sadalīšanas rezultātā iegūtās trīs simetriskās sistēmas ļauj aplūkot simetriskajām sistēmām tikai vienas fāzes režīmu, jo pārējo fāžu parametru vērtības ir nosakāmas, zinot īpašās fāzes simetrisko komponentu vērtības un simetriju raksturojošos vienādojumus. Papildus jāmin, ka TS strāvas rada tikai TS sprieguma kritumus, PS strāvas rada vienīgi PS sprieguma kritumus un NS strāvas rada tikai NS sprieguma kritumus. Tas izskaidrojams ar apstākli, ka lielākā daļa elektrisko sistēmu elementu (sinhronās un asinhronās elektriskās mašīnas, gaisvadu līnijas (turpmāk tekstā – GL) un kabeļlīnijas (turpmāk tekstā – KL) u. c.) ir izveidoti pēc iespējas simetriskāki, lai novērstu nesimetrijas radītus papildu enerģijas zudumus un citus nevēlamus efektus. Tādēļ visbiežāk tiek aplūkotas situācijas, kurās citādi simetriskā elektriskajā sistēmā rodas nesimetrija vienā vai vairākos punktos (šādi aprēķini aplūkoti šajā grāmatā). Ja kāds tīkla elements nav lineārs vai tas ir izteikti nesimetrisks (atšķiras fāžu pretestības, starpfāžu mijinduktivitāšu vai mijinduktivitāšu starp fāzēm un neitrāli, vai strāvas atgriešanās ceļu zemē pretestības), tad TS, PS un NS sprieguma kritumus konkrētajā elementā veido arī citu secību strāvas [8]. Elektrisko sistēmu vai ķēžu, kuras veido nesimetriski elementi, režīma parametrus var aprēķināt vienīgi ar specializētu skaitlisko metožu palīdzību, kuras šajā darbā netiks aplūkotas. Vēl viens svarīgs ieguvums, izmantojot SKM, ir iespēja izvairīties no atsevišķas fāžu pretestību un starpfāžu mijinduktivitāšu ievērošanas, kā tas būtu jādara, analizējot nesimetrisku elementu darba režīmu. Piemēram, iespējams parādīt, kāds būtu vienkāršots trīsfāžu elektropārvades līnijas (turpmāk tekstā – EPL) analīzes modelis, nosakot ekvivalento NS pretestību, ja ievērotu atsevišķi fāzes vadu pretestības \dot{Z}_{VA} , \dot{Z}_{VB} , \dot{Z}_{VC} un starpfāžu mijinduktivitāšu pretestības \dot{Z}_{MAB} , \dot{Z}_{MBC} , \dot{Z}_{MCA} (1.5. att.).



1.5. att. Trīsfažu līnijas fāzes pretestību un mijinduktivitāšu modelis, nosakot NS ekvivalento pretestību.

TS un PS visbiežāk starpfāžu mijinduktivitātes kompensējas tīkla elementu konstrukcijas simetrijas rezultātā, un NS parasti arī iespējami vienkāršojumi. Rezultātā iespējams iegūt EPL TS (EPL sakrītoša PS) un NS pretestības, kuras nosakāmas, izmantojot fāžu telpisko izvietojumu un fāzes vada parametrus, un kuras ievēro visas attēlā parādītās pretestības un mijinduktivitātes.

SKM parasti izmanto, lai veiktu stacionāru režīmu mezglu spriegumu un zaru strāvu pamatharmonikas (50 Hz vai 60 Hz) komponentu aprēķinus, bet ar to iespējams aprēķināt arī strāvu un spriegumu signālu augstākās harmonikas. Šim nolūkam jāapskata, kā simetriskās komponentes sasaistāmas ar augstākajām harmonikām. Atkārtojums par Furjē rindām un signālu harmonikām dots 2. pielikumā. Apraksta ilustrācijai 1.6. attēlā parādīts vienkāršots trīsfažu ģenerators.



1.6. att. Vienkāršota trīsfažu ģenerators skice [10].

Magnētiskā lauka indukcijas B sadalījums gaisa spraugā σ visbiežāk būs atšķirīgs no ideāla harmoniska jeb sinusoidāla. Attiecīgi indukciju gaisa spraugā iespējams izteikt Furjē rindā, kas vienkāršā formā būs šāda:

$$B(t) = B_{1M} \cos(\omega t) + B_{3M} \cos(3\omega t) + B_{5M} \cos(5\omega t) + \dots \\ \dots + B_{(2n-1)M} \cos((2n-1)\omega t), \quad (1.17.)$$

kur $B(t)$ – magnētiskās indukcijas momentānā vērtība gaisa spraugā, T;

$B_{1M}, B_{3M}, B_{(2n-1)M}$ – magnētiskās indukcijas momentānā signāla augstāko harmonisko sastāvdaļu amplitūdas, T;

ω – leņķiskais ātrums (elektrotehnikā dēvēts arī par leņķisko frekvenci), rad/s;

t – laiks, s.

Furjē rinda (1.17.) nesatur pāra harmonikas, jo $B(\omega t + \pi) = -B(\omega t)$ [11]. Papildus pieņemts, ka rotora rotācijas ass pozīcija ir nemainīga. Statora tinumā inducēto elektrodzinējspēku (turpmāk tekstā – EDS) nosaka magnētiskā lauka indukcijas atvasinājums [10]:

$$E(t) = -wS(dB(t)/dt), \quad (1.18.)$$

kur w – statora vijumu skaits;

S – statora tinuma serdes šķērsriezuma laukums, m^2 .

Pie nemainīga rotora rotācijas ātruma A fāzes EDS:

$$E_A(t) = E_{1M} \sin(\omega t) + E_{3M} \sin(3\omega t) + E_{5M} \sin(5\omega t) + \dots \\ \dots + E_{(2n-1)M} \sin((2n-1)\omega t), \quad (1.19.)$$

kur $E_A(t)$ – A fāzes EDS momentānā vērtība, V;

$E_{1M}, E_{3M}, E_{(2n-1)M}$ – EDS momentānā signāla augstāko harmonisko sastāvdaļu amplitūdas, V.

Šo harmonisko sastāvdaļu amplitūda būs:

$$E_{kM} = wSB_{kM}, \quad (1.20.)$$

kur k – signāla harmoniskās sastāvdaļas kārtas skaitlis.

Fāžu B un C EDS atšķiras no (1.19.) parādītā A fāzes EDS, tikai ar nobīdes leņķiem $-\pi/3$ rad un $\pi/3$ rad. Nobīdes leņķi $\pm \pi/3$ rad jeb $\pm 120^\circ$ šeit nosaka tinumu savstarpējais novietojums. Balstoties uz iepriekš minēto, aplūkosim visu fāžu EDS dažādām harmonikām. Pamatharmonikai fāžu EDS ir:

$$\begin{cases} E_{A1}(t) = E_{1M} \sin(\omega t). \\ E_{B1}(t) = E_{1M} \sin(\omega t - 2\pi/3). \\ E_{C1}(t) = E_{1M} \sin(\omega t + 2\pi/3). \end{cases} \quad (1.21.)$$

No (1.21.) redzams, ka pamatharmonikas EDS atainoti vektoriāli veidotu TS vektoru sistēmai (1.2. (a) att.) identisku sistēmu. Visām augstākajām harmonikām jāņem vērā, ka to kārtas skaitlis jāreizina ne tikai ar ωt , bet arī ar fāžu nobīdes leņķi. Trešajai harmonikai tādā gadījumā fāžu EDS ir šādi:

$$\begin{cases} E_{A3}(t) = E_{3M} \sin(3\omega t). \\ E_{B3}(t) = E_{3M} \sin(3(\omega t - 2\pi/3)) = E_{3M} \sin(3\omega t). \\ E_{C3}(t) = E_{3M} \sin(3(\omega t + 2\pi/3)) = E_{3M} \sin(3\omega t). \end{cases} \quad (1.22.)$$

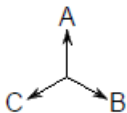

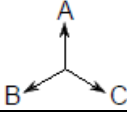
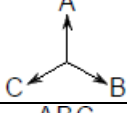

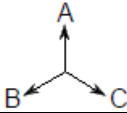

(1.22.) redzams, ka šie EDS, atainoti kompleksajā plaknē, veidotu vektoru sistēmu, kas atbilst NS (1.2. (c) att.). Tādēļ režīma parametru trešās harmonikas aprēķiniem iespējams izmantot NS aizvietošanas shēmu, pirms tam trīskāršojot shēmas induktīvās pretestības un trīs reizes samazinot kapacitatīvās pretestības. Trešās harmonikas EDS avotu šādā gadījumā aizvietošanas shēmā pieslēdz trešās harmonikas rašanās vietā (piemēram, nelineāras slodzes analīzei EDS avotu ieslēdz starp NS aizvietošanas shēmas neitrāli un šīs slodzes pieslēguma vietu NS aizvietošanas shēmā). Analogisks risinājums iegūstams visām $3(2n - 1)$ EDS harmonikām. Tagad aplūkosim piektās harmonikas fāžu EDS:

$$\begin{cases} E_{A5} = E_{5M} \sin(5\omega t). \\ E_{B5} = E_{5M} \sin(5(\omega t - 2\pi/3)) = E_{5M} \sin(5\omega t + 2\pi/3). \\ E_{C5} = E_{5M} \sin(5(\omega t + 2\pi/3)) = E_{5M} \sin(5\omega t - 2\pi/3). \end{cases} \quad (1.23.)$$

Vienādojumu sistēma (1.23.) parāda, ka piektās harmonikas fāžu EDS sistēma, atainota vektoriāli kompleksajā plaknē, būtu analogiska PS sistēmai (1.2. (b) att.). Tādēļ režīma 5. harmonikas aprēķinam iespējams izmantot PS aizvietošanas shēmu, piecas reizes palielinot induktīvās pretestības un piecas reizes samazinot kapacitatīvās pretestības. Turpinot analīzi šādā veidā, var parādīt, ka septītā harmonika ir analogiska TS, devītā harmonika ir analogiska NS un vienpadsmitā harmonika ir analogiska PS. Šīs analīzes rezultāti apkopoti 1.1. tabulā.

1.1. tabula

Augstākajām harmonikām atbilstošās SKM secības un to fāžu vektoru sistēmas

Harmonikas Nr.	Secība	Fāžu vektoru diagramma
1	1	
3	0	
5	2	
7	1	
9	0	
11	2	
15	0	

Šādā veidā SKM var izmantot arī nesinusoidālu režīmu parametru aprēķinos, **bet svarīgi ir ņemt vērā, ka rezultējošo signālu nevar iegūt, vienkārši summējot atsevišķu harmonisko sastāvdaļu režīma parametru aprēķinu rezultātus, bet jāizmanto Furjē sintēze**, kurā ietverta līdzstrāvas (turpmāk tekstā – *DC* angļu val. *direct current*) sastāvdaļa un teorētiski bezgalīgi (praksē parasti līdz 11. vai 15. harmonikai) liels augstāko harmoniku skaits [12]:

$$s(t) = (A_0/2) + \operatorname{Re}\left(\sum_{k=1}^{\infty} \dot{A}_k e^{jk\omega t}\right), \quad (1.24.)$$

kur $s(t)$ – nosakāmā signāla momentānā vērtība;

A_0 – nosakāmā signāla *DC* sastāvdaļas vērtība;

\dot{A}_k – k -tās harmonikas vērtība kompleksā skaitļa veidā.

Trīsfāžu tīkla strāvai bez *DC* sastāvdaļas, ievērojot faktu, ka tajā nav pāra harmoniku:

$$i(t) = \operatorname{Re}\left(\sum_{i=1}^{\infty} \dot{A}_{(2i-1)} e^{j(2i-1)\omega t}\right). \quad (1.25.)$$

Apvienojot SKM topoloģisko risinājumu ar skaitlisku apgriezto Laplasa transformāciju, iespējams aprēķināt arī bojājumu režīma parametru pārejas procesu signālu nestacionārās jeb brīvās komponentes, kas tiks parādīts grāmatas pēdējā nodaļā.

Ir jāatzīmē arī tas, ka elektrisko lielumu analīzei izmanto arī citas transformāciju metodes, piemēram, modālo, Klarkas, Karenbauera un Vedepola transformāciju, kuras vajadzības gadījumā var izteikt vienu no otras [13].

2. AIZVIETOŠANAS SHĒMU ELEMENTI

Elektrisko sistēmu režīma parametru aprēķinu veikšanai ir jāzina sistēmā uzstādīto iekārtu jeb elementu atainojums aizvietošanas shēmās un jānosaka šos elementus raksturojošie elektriskie parametri. Pirms to noteikšanas jāmin viens no galvenajiem priekšnoteikumiem elektrisko sistēmu aizvietošanas shēmu režīmu parametru aprēķiniem ar SKM – visu aizvietošanas shēmu elementu parametru (EDS un strāvas avotu, pretestību un vadītspēju u. c.) reducēšana jeb pārrēķināšana uz vienu sprieguma pakāpi [6], [8], [14]. Vienlaikus jāmin, ka teorētiski iespējams izmantot parametru vērtības pie reālās sprieguma pakāpes un tādējādi uzreiz noteikt faktiskās spriegumu un strāvu vērtības, ja tiek izmantoti skaitliskā aprēķina gaitā vadāmi EDS avoti, kas replicē reālo transformatoru ieviestās sprieguma amplitūdas izmaiņas un vektorālo leņķa nobīdi. Tomēr šāds risinājums ir sarežģītāks, pagaidām nav plaši izplatīts un šajā grāmatā sīkāk netiks aplūkots. Līdz ar to visbiežāk skaitliskais režīma parametru aprēķins notiek pie vienotas aprēķina sprieguma pakāpes, bet pēc tam iegūtās vērtības tiek reducētas atpakaļ uz faktiskajām sprieguma pakāpēm ar pretēju pārrēķinu. Šāda redukcija jāizpilda, veicot aprēķinus ar aizvietošanas shēmu parametriem gan nosaukto vienību sistēmā, gan relatīvo vienību sistēmā.

2.1. Nosaukto un relatīvo vienību sistēmas lietošana aizvietošanas shēmu parametriem

2.1.1. Nosaukto vienību sistēma un parametru reducēšana uz aprēķina sprieguma pakāpi

Nosaukto vienību sistēma pēc būtības atbilst *SI* (starptautiskajai mērvienību sistēmai, franču val. *Système international (d'unités)*) vai citām lielumu vērtību sistēmām, kuras norāda parametru reālās fizikālās vērtības ar tām atbilstošajām mērvienībām, piemēram, strāva ampēros, spriegums voltos, laiks sekundēs utt. Nosaukto vienību aprēķinos par vienoto sprieguma līmeni bieži pieņem vidējo nominālo aprēķina spriegumu, kas paredz darbību ar nedaudz paaugstinātu spriegumu, lai aplūkotu īsslēgumu režīmus ar vislielākajām sagaidāmajām bojājumu strāvām. Tipveidā šo sprieguma vērtību pieņem atbilstoši izvēlētās aprēķina sprieguma pakāpes nominālajam spriegumam un tīklos ar nominālo spriegumu līdz 220 kV, ieskaitot $U_{APR} \approx 1,05 U_N$ (0,42 kV, 6,3 kV, 10,5 kV, 21 kV, 115 kV un 230 kV), bet tīklos ar nominālo spriegumu, sākot no 330 kV $U_{APR} \approx 1,025 U_N$ (piemēram, 340 kV un 515 kV) [2], [15]. Šāds paaugstināta sprieguma pieņēmums ir svarīgs, aprēķinot tīkla elementu dinamisko un termisko izturību, analizējot sistēmas stabilitāti un nosakot maksimāla ārējā bojājuma parametrus RA iestatījumu izvēlei. Savukārt minimāla iekšēja bojājuma parametru aprēķinam pareizāk būtu pieņemt pazeminātu aprēķina spriegumu, kam atbilst mazākas īsslēgumu strāvas.

Nosaukto vienību sistēmā noteikto elektrisko lielumu vērtību reducēšana uz aprēķina sprieguma pakāpi notiek līdzīgi transformatora tinumu parametru reducēšanai uz citu tinumu pusi. Attiecīgi, ja starp sprieguma pakāpi, kurai zināmas EDS, sprieguma, strāvas, pretestības un vadītspējas vērtības, un aprēķina sprieguma pakāpi, ir transformatori ar transformācijas

koeficientiem $k_{T1}, k_{T2}, \dots, k_{Tm}$ (definēti kā attiecība starp nominālo spriegumu tinumam, kas ir aprēķina sprieguma pakāpes pusē, un nominālo spriegumu tinumam, kas ir dotās sprieguma pakāpes pusē), šo vērtību reducēšanai izmantojamās šādas formulas [6], [14]:

$$\dot{E}_{\text{red.}} = \dot{E}(k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot \dots \cdot k_{Tm}), \quad (2.1.)$$

$$\dot{U}_{\text{red.}} = \dot{U}(k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot \dots \cdot k_{Tm}), \quad (2.2.)$$

$$\dot{I}_{\text{red.}} = \dot{I}/(k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot \dots \cdot k_{Tm}), \quad (2.3.)$$

$$\dot{Z}_{\text{red.}} = \dot{Z}(k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot \dots \cdot k_{Tm})^2, \quad (2.4.)$$

$$\dot{Y}_{\text{red.}} = \dot{Y}/(k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot \dots \cdot k_{Tm})^2, \quad (2.5.)$$

kur $\dot{E}_{\text{red.}}, \dot{U}_{\text{red.}}$ – uz aprēķina sprieguma pakāpi reducētā starpfāžu EDS un sprieguma kompleksā vērtība nosaukto vienību sistēmā, V;

$\dot{I}_{\text{red.}}$ – uz aprēķina sprieguma pakāpi reducētā fāzes strāvas stipruma kompleksā vērtība nosaukto vienību sistēmā, A;

$\dot{Z}_{\text{red.}}$ – uz aprēķina sprieguma pakāpi reducētā fāzes pretestības kompleksā vērtība nosaukto vienību sistēmā, Ω ;

$\dot{Y}_{\text{red.}}$ – uz aprēķina sprieguma pakāpi reducētā fāzes vadītspējas kompleksā vērtība nosaukto vienību sistēmā, S;

\dot{E}, \dot{U} – starpfāžu EDS un sprieguma kompleksā vērtība nosaukto vienību sistēmā pie kādas (no aprēķina sprieguma atšķirīgas) sprieguma pakāpes, V;

\dot{I} – fāzes strāvas stipruma kompleksā vērtība nosaukto vienību sistēmā pie kādas (no aprēķina sprieguma atšķirīgas) sprieguma pakāpes, A;

\dot{Z} – fāzes pretestības kompleksā vērtība nosaukto vienību sistēmā pie kādas (no aprēķina sprieguma atšķirīgas) sprieguma pakāpes, Ω ;

\dot{Y} – fāzes vadītspējas kompleksā vērtība nosaukto vienību sistēmā pie kādas (no aprēķina sprieguma atšķirīgas) sprieguma pakāpes, S;

$k_{T1}, k_{T2}, \dots, k_{Tm}$ – transformatoru, kas atrodas starp sprieguma pakāpi, kurai zināmas parametru vērtības, un aprēķina sprieguma pakāpi, transformācijas koeficienti.

Var ievērot, ka augstāk parādītā elektrisko lielumu reducēšana izveidota tā, lai jaudas vai jaudas zudumu vērtības būtu nemainīgas gan pirms, gan pēc redukcijas. Ja kāda tīkla elementa EDS, pretestības vai vadītspējas datus tā ražotājs devis relatīvo vienību sistēmā, reducējot tos uz šī elementa nominālo spriegumu, strāvu un jaudu, augstāk parādītajās reducēšanas formulās parametrus aizvieto ar formulām, kuras izmanto vērtību aprēķinam nosauktajās vienībās šajos nominālajos apstākļos [6], [14]:

$$\dot{E}_{\text{red.}} = \dot{E}_{N \text{ r. v.}} U_N (k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot \dots \cdot k_{Tm}), \quad (2.6.)$$

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{\text{red.}} &= (\dot{Z}_{N \text{ r. v.}} U_N^2 / S_N) (k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot \dots \cdot k_{Tm})^2 = \\ &= (\dot{Z}_{N \text{ r. v.}} U_N / \sqrt{3} I_N) (k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot \dots \cdot k_{Tm})^2, \end{aligned} \quad (2.7.)$$

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{\text{red.}} &= \dot{Y}_{N \text{ r. v.}} S_N / [U_N^2 (k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot \dots \cdot k_{Tm})^2] = \\ &= \dot{Y}_{N \text{ r. v.}} \sqrt{3} I_N / [U_N (k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot \dots \cdot k_{Tm})^2], \end{aligned} \quad (2.8.)$$

kur $\dot{E}_{N \text{ r. v.}}$ – tīkla elementa starpfāžu EDS kompleksā vērtība relatīvo vienību sistēmā noteikta iekārtas nominālajos apstākļos, r. v.;

$\dot{Z}_{N r. v.}$ – tīkla elementa fāzes pretestības kompleksā vērtība relatīvo vienību sistēmā, kas noteikta iekārtas nominālajos apstākļos, r. v.;

$\dot{Y}_{N r. v.}$ – tīkla elementa fāzes vadītspējas kompleksā vērtība relatīvo vienību sistēmā, kas noteikta iekārtas nominālajos apstākļos, r. v.;

U_N – tīkla elementa nominālais starpfažu spriegums, V;

I_N – tīkla elementa nominālā fāzes strāva, V;

S_N – iekārtas nominālā trīsfāžu pilnā jauda, VA.

2.1.2. Relatīvo vienību sistēma un parametru reducēšana uz aprēķina sprieguma pakāpi

Dažādus fizikālos lielumus iespējams izteikt arī relatīvās vienībās, bez noteiktām fizikālām mērvienībām, kā attiecības pret kādām šo lielumu bāzes vērtībām. Lasītājam, visticamāk, jau zināms, kā izsakāmi dažādi lielumi procentos. Piemēram, ja atskaitē par studiju rezultātiem norādīts, ka šajā semestrī sekmīgo studentu skaits pieaudzis par 5 %, var saprast, ka attiecība starp šajā semestrī sesiju veiksmīgi nokārtojušo studentu skaitu N_2 un pagājušajā semestrī sekmīgo studentu skaitu N_1 ir $\frac{N_2}{N_1} = 1 \frac{5}{100}$ jeb $N_2 = 1,05N_1$. Redzams, ka nav iespējams noteikt N_2 , nezinot bāzes lielumu, kas šajā piemērā ir N_1 , bet šāda relatīvā sekmības dinamika un šim piemēram līdzīgi definētas parametru vērtības ir pateicīgas šo parametru raksturošanai, to izmaiņu dinamikas attēlošanai un analīzei. Savukārt nosaukto vienību sistēma, kura šajā darbā izmantota visvairāk, sniedz labāku priekšstatu par parametru fizikālajām vērtībām. Ilustrācijai pieņemsim, ka kāda iekārta garantēti būs darbospējīga, pat ja tīkla spriegums samazināsies par 8 %. Ja šo iekārtu pieslēdz tīklam ar nominālo spriegumu 230 V, pieļaujams sprieguma samazinājums par $230 \cdot 8 / 100 \approx 18,4$ V vai mazāk. Savukārt tīklā ar nominālo spriegumu 110 V pieļaujams sprieguma samazinājums par $110 \cdot 0,08 \approx 8,8$ V vai mazāk. Secināms, ka pieļaujamā sprieguma samazinājuma rezerves norādīšana procentos sniedz kvalitatīvu aprakstu pieļaujamā sprieguma krituma atkarībai no nominālā sprieguma, bet vienlaikus bez papildu aprēķina nenorāda tā fizikālo vērtību un to, ka tīklā ar 230 V nominālo spriegumu minēto iekārtu testētu pie 211,6 V sprieguma, bet tīklā ar 110 V nominālo spriegumu – pie 101,2 V sprieguma. Visus parametrus, kuru vērtības nosaka elektrisko sistēmu nesimetrisko režīmu modelēšanas un aprēķinu rezultātā, iespējams izteikt ar šādiem lielumiem bez fizikālām mērvienībām, kas attiecināti pret to bāzes vērtībām. Šāda transformācija ļauj daudz uzskatāmāk parādīt un raksturot modelētos procesus, skaidrāk izceļot to īpatnības un likumsakarības starp dažādiem parametriem. Pareiza bāzes vērtību izvēle arī ļauj ierobežot skaitliskajos aprēķinos izmantojamo mainīgo vērtību intervālu, kas ir ļoti nozīmīgi iebūvētām (angļu val. *embedded*) mikroprocesoru sistēmām, kuras bieži ierobežo tas, ka šīs sistēmas skaitlisko operāciju veikšanai izmanto tikai veselus skaitļus.

Ņemot vērā, ka no četriem galvenajiem elektriskajiem lielumiem – strāvas, sprieguma, jaudas un pretestības – divi ir neatkarīgi lielumi, relatīvo vienību sistēmas izmantošanai elektrisko tīklu režīmu parametru aprēķiniem ir pietiekami izvēlēties divu minēto lielumu bāzes vērtības. Bieži šīs vērtības izvēlas pilnās jaudas modulim (S_B) un sprieguma modulim (U_B). Attiecīgi bāzes vērtības strāvai un pretestībai iespējams noteikt ar formulām [6], [14], [16]:

$$I_B = S_B / (\sqrt{3}U_B), \quad (2.9.)$$

$$Z_B = U_B / (\sqrt{3}I_B) = U_B^2 / S_B, \quad (2.10.)$$

$$Y_B = \sqrt{3}I_B / U_B = S_B / U_B^2, \quad (2.11.)$$

kur S_B – trīsfāžu pilnās jaudas bāzes vērtības, VA;

U_B – starpfāžu sprieguma bāzes vērtība, V;

I_B – fāzes strāvas bāzes vērtība, A;

Z_B – fāzes pretestība bāzes vērtība, Ω ;

Y_B – fāzes vadītspējas bāzes vērtība, S.

Tiklīdz ir noteiktas šīs bāzes vērtības, praktiski visus elektrisko sistēmu režīmu parametru aprēķinos parasti izmantojamus elektriskos lielumus var izteikt to relatīvajās vienībās (r. v.) [2], [14], [16]:

$$\dot{E}_{r. v.} = \dot{E} / U_B, \quad (2.12.)$$

$$\dot{U}_{r. v.} = \dot{U} / U_B, \quad (2.13.)$$

$$\dot{I}_{r. v.} = \dot{I} / I_B, \quad (2.14.)$$

$$\dot{Z}_{r. v.} = \dot{Z} / Z_B, \quad (2.15.)$$

$$\dot{Y}_{r. v.} = \dot{Y} / Y_B, \quad (2.16.)$$

$$\dot{S}_{r. v.} = \dot{S} / S_B, \quad (2.17.)$$

kur $\dot{E}_{r. v.}$, $\dot{U}_{r. v.}$ – starpfāžu EDS un spriegumu kompleksās vērtības, izteiktas relatīvajās vienībās, r. v.;

\dot{E} , \dot{U} – starpfāžu EDS un spriegumu kompleksās vērtības nosauktajās vienībās, V;

$\dot{I}_{r. v.}$ – fāžu strāvu kompleksās vērtības, izteiktas relatīvajās vienībās, r. v.;

\dot{I} – fāžu strāvu kompleksās vērtības nosauktajās vienībās, A;

$\dot{Z}_{r. v.}$ – fāžu pretestību kompleksās vērtības, izteiktas relatīvajās vienībās, r. v.;

\dot{Z} – fāžu pretestību kompleksās vērtības nosauktajās vienībās, Ω ;

$\dot{Y}_{r. v.}$ – fāžu vadītspēju kompleksās vērtības, izteiktas relatīvajās vienībās, r. v.;

\dot{Y} – fāžu vadītspēju kompleksās vērtības nosauktajās vienībās, S;

$\dot{S}_{r. v.}$ – trīsfāžu pilno jaudu vērtības, izteiktas relatīvajās vienībās, r. v.;

\dot{S} – trīsfāžu pilno jaudu vērtības nosauktajās vienībās, VA.

Pēc ieejas lielumu pārveides relatīvajās vienībās visi aprēķini veicami šajā sistēmā un to rezultātā iegūtās režīma parametru vērtības arī būs relatīvajās vienībās, ja netiks veikta transformācija atpakaļ uz nosauktajām vienībām. **Jāatgādina, ka relatīvo vienību sistēmas izmantošana neatbrīvo no tīkla parametru reducēšanas uz vienotu aprēķina sprieguma (šeit sakrīt ar bāzes sprieguma) pakāpi, transformatoru ienesto fāžu nobīžu u. tml. aspektu ievērošanas.** Ja starp bāzes sprieguma pakāpi un tīkla elementu, kuram tā sprieguma pakāpē zināmas aizvietošanas shēmas parametru vērtības relatīvo vienību sistēmā, atradīsies transformatori ar transformācijas koeficientiem k_{T1} , k_{T2} , ..., k_{Tm} , šī elementa aizvietošanas shēmas parametru vērtības jāreducē uz bāzes sprieguma pakāpi [14], [17]:

$$\dot{E}_{red. r. v.} = \dot{E}_{r. v.} (k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot \dots \cdot k_{Tm}), \quad (2.18.)$$

$$\dot{I}_{red. r. v.} = \dot{I}_{r. v.} / (k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot \dots \cdot k_{Tm}), \quad (2.19.)$$

$$\dot{Z}_{\text{red. r. v.}} = \dot{Z}_{\text{r. v.}} (k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot \dots \cdot k_{Tm})^2, \quad (2.20.)$$

$$\dot{Y}_{\text{red. r. v.}} = \dot{Y}_{\text{r. v.}} / (k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot \dots \cdot k_{Tm})^2, \quad (2.21.)$$

kur $\dot{E}_{\text{red. r. v.}}$ – tīkla elementa starpfāžu EDS vērtība relatīvo vienību sistēmā, kas reducēta uz bāzes sprieguma pakāpi, r. v.;

$\dot{I}_{\text{red. r. v.}}$ – tīkla elementa fāzes strāvas stipruma vērtība relatīvo vienību sistēmā, kas reducēta uz bāzes sprieguma pakāpi, r. v.;

$\dot{Z}_{\text{red. r. v.}}$ – tīkla elementa fāzes pretestības vērtība relatīvo vienību sistēmā, kas reducēta uz bāzes sprieguma pakāpi, r. v.;

$\dot{Y}_{\text{red. r. v.}}$ – tīkla elementa fāzes vadītspējas vērtība relatīvo vienību sistēmā, kas reducēta uz bāzes sprieguma pakāpi, r. v.

Ja elektriskās iekārtas ražotājs savas iekārtas parametrus transformējis un uzrādījis relatīvo vienību sistēmā, par bāzi pieņemot šīs iekārtas nominālo spriegumu, strāvu un jaudu, to aizvietošanas shēmu parametru pārrēķinam uz citām bāzes vērtībām izmantojamas šādas formulas [16], [17]:

$$\dot{E}_{\text{red. r. v.}} = \dot{E}_{\text{Nr. v.}} U_N / U_B, \quad (2.22.)$$

$$\dot{U}_{\text{red. r. v.}} = \dot{U}_{\text{Nr. v.}} U_N / U_B, \quad (2.23.)$$

$$\dot{Z}_{\text{red. r. v.}} = \dot{Z}_{\text{Nr. v.}} S_B U_N^2 / (S_N U_B^2), \quad (2.24.)$$

$$\dot{Y}_{\text{red. r. v.}} = \dot{Y}_{\text{Nr. v.}} S_N U_B^2 / (S_B U_N^2), \quad (2.25.)$$

kur $\dot{U}_{\text{red. r. v.}}$ – uz aprēķina sprieguma pakāpi reducētā iekārtas starpfāžu sprieguma vērtība relatīvo vienību sistēmā, r. v.

Analizējot elektrisko sistēmu asinhronos režīmus, bieži izmanto arī relatīvo leņķisko frekvenci [2], [14]:

$$\omega_{\text{r. v.}} = \omega / \omega_N, \quad (2.26.)$$

kā arī relatīvo slīdi [2], [14]:

$$s_{\text{r. v.}} = (\omega - \omega_N) / \omega_N, \quad (2.27.)$$

kur $\omega_{\text{r. v.}}$ – sprieguma leņķiskā frekvence (jeb leņķiskais ātrums), izteikta relatīvo vienību sistēmā, r. v.;

ω – faktiskā sprieguma leņķiskā frekvence (Eiropā parasti aptuveni 100π), rad/s;

ω_N – nominālā sprieguma leņķiskā frekvence, rad/s;

$s_{\text{r. v.}}$ – slīde, izteikta relatīvo vienību sistēmā, r. v.

Šāda relatīvās leņķiskās frekvences ieviešana praktiski nominālas sprieguma frekvences gadījumā ($\omega_{\text{r. v.}} \approx 1$ r. v.) ļauj pierakstīt, ka relatīvo vienību sistēmā induktīvā pretestība sakrīt ar induktivitāti [14], [17]:

$$X_{L_{\text{r. v.}}} = \omega_{\text{r. v.}} L_{\text{r. v.}} = L_{\text{r. v.}}, \quad (2.28.)$$

kur $X_{L_{\text{r. v.}}}$ – induktīvā pretestība, izteikta relatīvo vienību sistēmā, r. v.;

$L_{\text{r. v.}}$ – induktivitāte, izteikta relatīvo vienību sistēmā, r. v.

Savukārt magnētiskās plūsmas saķēdējums sakrīt ar pašindukcijas EDS [14], [17]:

$$\Psi_{\text{r. v.}} = I_{L_{\text{r. v.}}} L_{\text{r. v.}} = E_{L_{\text{r. v.}}} / (\omega_N / \omega_N) = E_{L_{\text{r. v.}}}, \quad (2.29.)$$

kur $\Psi_{r.v}$ – magnētiskās plūsmas saķēdējums, izteikts relatīvo vienību sistēmā, r. v.;

$I_{L.r.v}$ – induktivitātes strāvas stiprums, izteikts relatīvo vienību sistēmā, r. v.;

$E_{L.r.v}$ – induktivitātes pašindukcijas EDS, izteikts relatīvo vienību sistēmā, r. v.

Uz relatīvo vienību sistēmu pārejas procesu aprēķinos iespējams transformēt arī laiku. Šādai transformācijai par laika bāzes vērtību bieži izvēlas laiku, kurā pie nominālas frekvences EDS vektors veicis rotāciju kompleksajā plaknē par 1 elektrisko radiānu vai 1 elektrisko grādu [14], [17]:

$$t_{r.v.} = t/t_B = \omega_N t, \quad (2.30.)$$

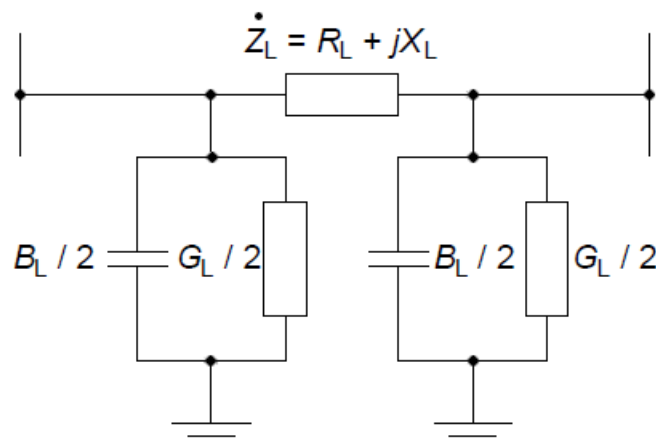
kur $t_{r.v}$ – laika moments, izteikts relatīvo vienību sistēmā, r. v.;

t – faktiskais laika moments, s;

t_B – laika bāzes vērtība, s.

2.2. Elektropārvades gaisvadu un kabeļlīnijas

Šajā darbā aplūkoti divi izplatītākie EPL veidi: GL un KL. Ir zināms, ka režīma parametru aprēķiniem GL un KL var ievērot ar dažādām aizvietošanas shēmām (Γ veida, T veida, Π veida u. c.), no kurām visbiežāk izmanto Π veida aizvietošanas shēmu (2.1. att.) vai tās vienkāršotus variantus [18]–[20].



2.1. att. EPL līniju Π veida aizvietošanas shēma [18].

EPL Π veida aizvietošanas shēmā \dot{Z}_L ir pilnā pretestība, ko veido fāžu vadu aktīvā pretestība R_L un induktīvā pretestība X_L . Attēlā redzama arī līnijas kapacitatīvā vadītspēja B_L , kas atbilst summārai kapacitātei, kura veidojas starp EPL fāžu vadiem un zemi, kā arī kapacitātei, kura veidojas starp fāžu vadiem, un aktīvā vadītspēja G_L , kura ataino AS GL koronas zudumus un KL izolācijas zudumus.

Aktīvo pretestību vienam fāzes vadam iespējams aprēķināt ar vispārīgu fizikas formulu [21], [22]:

$$R = \rho l / S_{\text{šk}}, \quad (2.31.)$$

kur R – vadītāja aktīvā pretestība, Ω ;

$S_{\text{šk}}$ – vadītāja šķērsriezuma laukums, m^2 ;

ρ – vadītāja materiāla īpatnējā pretestība, Ωm ;

l – vadītāja garums, m.

Ievietojot (2.31.) līnijas garumu 1000 m, iegūst izteiksmi 1 km gara vadītāja pretestības aprēķinam, kuru bieži modificē ar konkrētu šķērsriezuma laukuma aprēķina formulām. Īpatnējās pretestības vērtības dažādiem bieži izmantotiem vadītājiem dotas 2.1. tabulā.

2.1. tabula

Dažādu vadītāju īpatnējās pretestības [21], [22]

Materiāls	ρ , Ωm
Sudrabs (Ag)	$1,59 \cdot 10^{-8}$
Varš (Cu)	$1,68 \cdot 10^{-8}$
Zelts (Au)	$2,44 \cdot 10^{-8}$
Alumīnijs (Al)	$2,82 \cdot 10^{-8}$
Volframs (W)	$5,6 \cdot 10^{-8}$
Cinks (Zn)	$5,9 \cdot 10^{-8}$
Dzels (Fe)	$1 \cdot 10^{-7}$
Svins (Pb)	$2,2 \cdot 10^{-7}$

Aprēķinot apaļa fāzes vada aktīvo pretestību ar vienādojumu (2.31.), tajā vada šķērsriezuma laukumu var aizvietot ar tā atkarību no vada izmēriem:

$$R_0 = 4000\rho / (\pi d_v^2 n_{\text{šk}}) = 1000\rho / (\pi r_v^2 n_{\text{šk}}) \approx 318,31\rho / (r_v^2 n_{\text{šk}}), \quad (2.32.)$$

kur R_0 – līnijas fāzes īpatnējā aktīvā pretestība, Ω/km ;

d_v un r_v – līnijas fāzes vada diametrs un rādiuss, m;

$n_{\text{šk}}$ – šķelto fāzes vadu skaits, ja fāzē ir vairāk nekā viens vads.

EPL inductīvās pretestības aprēķinam galvenokārt izmanto no Karsona modeļa [6], [23] iegūtas formulas. Uzreiz jābrīdina, ka ar Karsona modeli noteiktās pretestību vērtības var būt neatbilstošas, analizējot signālu augstfrekvences komponentu (vismaz sākot no 2 kHz) ietekmi, un to analīzei jāveic detalizētāks EPL parametru aprēķins [24]. Papildus tam ar Karsona modeli noteiktās ekvivalentās TS un NS pretestības izmantojamas elektriski īsām EPL. GL, kuru garums pārsniedz 250 km (KL 50 km) [19], pareizai aizvietošanas shēmas parametru iegūšanai jāizmanto hiperboliskā sinusa un kosinusa funkcijas. Sīkākam skaidrojumam par precīzu līnijas parametru noteikšanu rekomendējams izmantot [6], [19] dotos aprakstus. Tuvinātiem aprēķiniem iespējams garas pārvades līnijas sadalīt 250 km vai īsākos posmos, kuriem joprojām izmanto koncentrētus parametrus [18]–[20].

Elektriski īsām trīsfāžu GL ar pilnu transpozīcijas ciklu TS un PS īpatnējo pretestību aprēķinam izmanto formulu [6], [8]:

$$\dot{Z}_{L0}^1 = \dot{Z}_{L0}^2 = R_0 + j2,8938 \cdot 10^{-3} \cdot f \cdot \lg(D_{\text{vid}}/r_G), \quad (2.33.)$$

kur $\dot{Z}_{L0}^1, \dot{Z}_{L0}^2$ – trīsfāžu GL fāzes TS un PS īpatnējā pretestība, Ω/km ;

f – tīkla sprieguma frekvence, Hz;

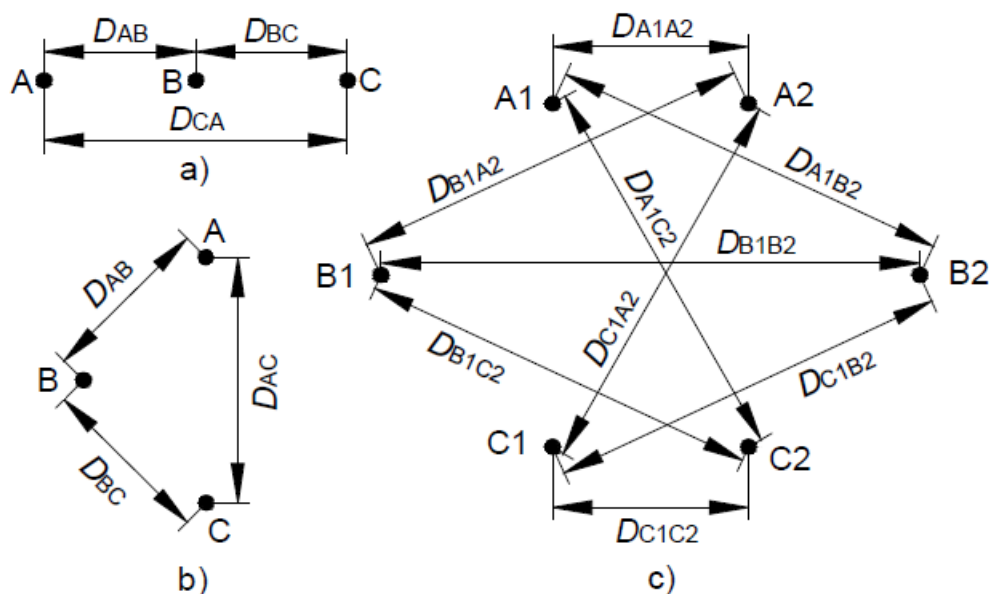
r_G – fāzes vada ģeometriskais rādiuss (šķeltiem fāžu vadiem lieto vidējo ģeometrisko rādiusu $r_{G\text{vid}}$), m;

D_{vid} – vidējais ģeometriskais attālumu starp fāžu vadiem, m.

Vidējo ģeometrisko attālumu starp fāzēm iespējams noteikt šādi [18]:

$$D_{\text{vid}} = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{BC} \cdot D_{CA}}, \quad (2.34.)$$

kur D_{AB} , D_{BC} , D_{CA} – attālumi starp fāžu A un B, B un C, C un A vadu ģeometriskajiem centriem (2.2. att.), m.



2.2. att. Trīs fāžu vienķēdes EPL fāžu horizontālā (a) un trijstūrveida (b) izvietojumi bez zibensaizsardzības trosēm un trīs fāžu divķēžu EPL fāžu izvietojums bez zibensaizsardzības trosēm (c) [8], [18].

Vada ģeometrisko rādiusu apraksta vienādojums [8]:

$$r_G = k_E r, \quad (2.35.)$$

kur r – fāzes vada faktiskais rādiuss, m;

k_E – ekvivalentēšanas koeficients, kas nosacīti aizstāj vadu ar cauruli, kurai ir bezgalīgi plānas sienīņas.

Ekvivalentēšanas koeficienta vērtības dažādu veidu fāzes vadiem parādītas 2.2. tabulā. Tuvinātos aprēķinos vara vadiem var pieņemt $k_E = 0,75$, alumīnija vadiem var pieņemt $k_E = 0,85$ un tērauda–alumīnija vadiem var pieņemt $k_E = 0,95$. Ja GL konstruēta ar šķeltiem fāzes vadiem, jālieto vidējais ģeometriskais rādiuss, ko nosaka šādi [6]:

$$r_{G\text{vid}} = \sqrt[n]{r_G a_{\text{vid}}^{n-1}}, \quad (2.36.)$$

kur $r_{G\text{vid}}$ – šķelta fāzes vada vidējais ģeometriskais rādiuss, m;

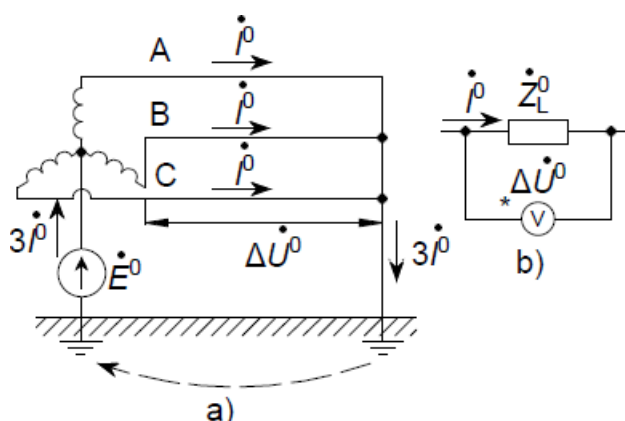
n – vadu skaits fāzē;

a_{vid} – vidējais ģeometriskais attālums starp šķeltās fāzes vadiem (tuvināti var pieņemt arī mazāko no šķelto vadu attālumiem [25]), m.

Ekvivalentēšanas koeficienta vērtība dažādiem vadu veidiem [8], [20], [25]

Vada materiāls	Konstrukcija	k_E
Varš	1 apaļa dzīsla	0,779
	7 dzīslas	0,726
	19 dzīslu	0,758
	37 dzīslas	0,768
	61 dzīsla	0,772
	91 dzīsla	0,774
	127 dzīslas	0,776
Tērauda–alumīnija vadi	2 slāņi 26 dzīslas	0,809
	2 slāņi 30 dzīslu	0,826
	3 slāņi 54 dzīslas	0,81
	Viena slāņa konstrukcijas	0,55–0,7

Bieži nesimetrisku bojājumu aprēķinos ir jāzina arī līnijas NS pretestība, kas atbilst vidējai fāzes pretestībai, kuru eksperimentāli iegūst, ja neitrālē ieslēdz EDS avotu, zemējot līnijas otru galu un nosakot sprieguma kritumus līnijā (2.3. att.).



2.3. att. Trīs fāžu vienķēdes GL bez zibensaizsardzības trosēm NS pretestības noteikšanas eksperiments (a) un tam atbilstošā analīzes shēma (b).

Elektriski īsai GL ar pilnu transpozīcijas ciklu NS īpatnējo pretestību iespējams noteikt ar šādu formulu [6], [8]:

$$\dot{Z}_{L0}^0 = R_0 + 2,964 \cdot 10^{-3} \cdot f + j8,6814 \cdot 10^{-3} \cdot f \cdot \lg(D_Z/r_\delta), \quad (2.37.)$$

kur \dot{Z}_{L0}^0 – trīs fāžu GL fāzes NS īpatnējā pretestība, Ω/km ;

R_0 – līnijas fāzes vada aktīvā īpatnējā pretestība, Ω/km ;

r_δ – līnijas vidējais ģeometriskais rādiuss, m;

D_Z – zemē atspoguļotā vada dziļums, m.

Līnijas vidējais ģeometriskais rādiuss līnijām ar vienu vadu fāzē vienāds ar:

$$r_\delta = \sqrt[9]{r_G^3 \cdot D_{\text{vid}}^6} = \sqrt[3]{r_G \cdot D_{\text{vid}}^2}. \quad (2.38.)$$

Šķeltiem fāzes vadiem (2.38.) lieto fāzes vidējo ģeometrisko rādiusu no (2.36.). Zemē atspoguļotais vads atbilstoši Karsona modelim [23] ir ekvivalents aizvietojums strāvai, kas noslēdzas caur zemi zem līnijas un atvieglo magnētiskā lauka vienādojumu risinājumu. Attālums starp līniju un zemē atspoguļoto vadu D_Z ir atkarīgs no sprieguma frekvences un grunts vadāmības. SI sistēmā zemē atspoguļotā vada dziļumu nosaka formula [6], [8]:

$$D_Z = 658,368\sqrt{\rho/f}, \quad (2.39.)$$

kur ρ – grunts īpatnējā pretestība, Ω/m^3 .

Atbilstoši [26] publicētajiem pētījumu datiem grunts īpatnējās pretestības aptuvenās vērtības parādītas 2.3. tabulā.

2.3. tabula

Grunts īpatnējās pretestības vērtības [26]

Grunts veids	$\rho, \Omega/\text{m}^3$
Jūras ūdens	0,01–1
Purvs	10–100
Mitra grunts	100
Sausa grunts	1000
Tīrs slānekļis	10^7
Smilšakmens	10^9

Vidējā ρ mērījumu vērtība atbilst mitrai gruntij, un, balstoties uz (2.39.), D_Z ir vidēji 930–940 m [8], bet literatūrā D_Z vērtību bieži noapaļo līdz 1000 m.

Ja tuvumā atrodas vēl viena GL vai uz viena balsta atrodas divas līnijas (divķēžu GL līnija), NS aprēķinos jāievēro arī līniju savstarpējā mijinduktivitāte, kura palielina novērojamo līnijas NS pretestību. Divu paralēlu GL bez zibensaizsardzības trosēm NS mijinduktivitāti iespējams noteikt, vispārinot Karsona modeli, kas ļauj iegūt formulu [8], [25]:

$$\dot{Z}_{\text{M}p0}^0 = 2,964 \cdot 10^{-3} \cdot f + j8,6814 \cdot 10^{-3} \cdot f \cdot \lg(D_Z/D_{\text{vidp}}), \quad (2.40.)$$

kur $\dot{Z}_{\text{M}p0}^0$ – divu paralēlu trīsfāžu GL NS mijinduktivitātes īpatnējā pretestība, Ω/km ;

D_{vidp} – vidējais ģeometriskais attālums starp visu divu paralēlo GL fāžu vadu ģeometriskajiem centriem (2.2. (b) att.).

Iepriekš minēto vidējo ģeometrisko attālumu apraksta izteiksme [6], [8]:

$$D_{\text{vidp}} = \sqrt[9]{D_{A1A2}D_{A1B2}D_{A1C2}D_{B1A2}D_{B1B2}D_{B1C2}D_{C1A2}D_{C1B2}D_{C1C2}}, \quad (2.41.)$$

kur D_{A1A2} – attālums starp 1. līnijas A fāzi un 2. līnijas A fāzi (pārējiem attālumi ir analogiski apzīmēti), m.

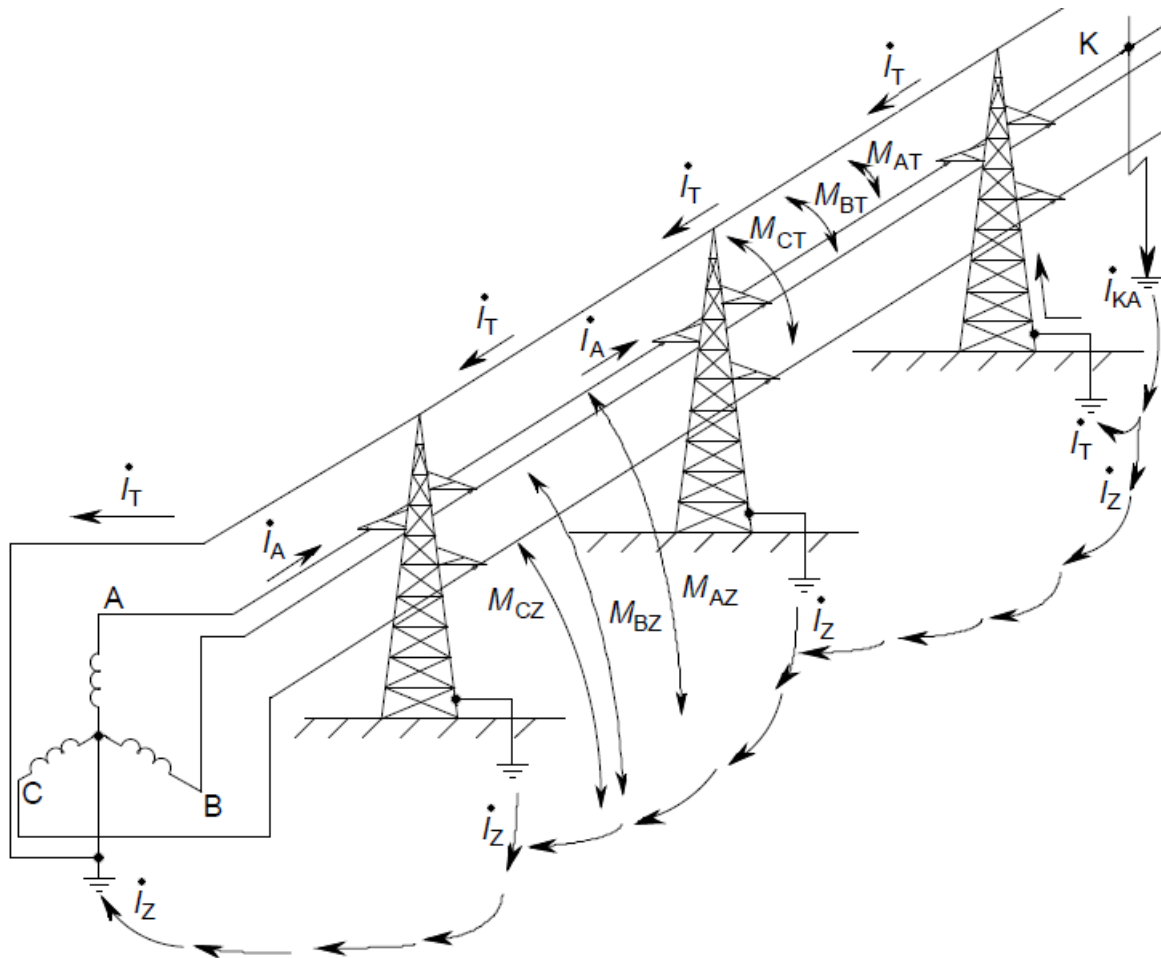
Pilnā ekvivalentā īpatnējā pretestība katrai no GL tādā gadījumā ir summa, ko veido konkrētās līnijas NS īpatnējā pretestība un abu līniju savstarpējās NS mijinduktivitātes īpatnējā pretestība [6], [14]:

$$\dot{Z}_{Lp0}^0 = \dot{Z}_{L0}^0 + \dot{Z}_{Mp0}^0, \quad (2.42.)$$

kur \dot{Z}_{Lp0}^0 – līnijas pilnā īpatnējā NS pretestība, ierēķinot mijinduktivitāti ar paralēlu līniju, Ω/km .

Visizteiktākā NS mijinduktivitātes ietekme būs divķēžu GL to tuvuma dēļ, bet, līnijām atrodoties apmēram 500 m attālumā, mijinduktivitātes ietekme nepārsniegs 10 % [14], atbilstoši gan iepriekš dotajai aprēķinu metodikai, gan vienkāršotai metodikai, kas parādīta [27].

Praksē pārvades tīklos plaši izmanto zibensaizsardzības troses vai mūsdienās arī zibensaizsardzības troses ar tajās iemontētiem optiskajiem kabeļiem *OPGW* (angļu val. *Optical Ground Wire*). Atbilstoši standartam LEK 135 330 kV GL ieteicams zibensaizsardzības troses stiprināt pie balstiem ar izolatoriem, kurus šuntē ar dzirksteļspraugām, izņemot vismaz vienu punktu enkurlaidumā (līdz 10 km garos posmos; garākiem laidumiem trosi ieteikts sadalīt elektriski izolētos posmos). Šādi risinājumi lietoti, lai novērstu vai samazinātu elektroenerģijas zudumus, kas rodas sazemētā trosē inducētās strāvas dēļ, un vienlaikus, lai novērstu dzirksteļspraugu pārklāšanos trosē inducētā EDS dēļ. Tomēr pat 330 kV līnijām apakšstaciju tuvumā (2–3 km) un 110 kV EPL visos starpbalstos parastās zibensaizsardzības troses un *OPGW* tiek zemētas [28]. Rodoties nesimetriskiem īsslēgumiem, kuri veido kontaktu ar zemi (vienfāzes īsslēgumi, divfāžu īsslēgumi uz zemi un nesimetriski trīsfāžu īsslēgumi uz zemi), līnijās vai to posmos ar zemētām zibensaizsardzības trosēm vismaz daļa no bojājuma strāvas sadalās starp zemi un zemēto trosi (2.4. att.). Zibensaizsardzības troses ietekme uz līnijas TS un PS pretestību ir niecīga, bet NS pretestības aprēķinos tā ir jāievēro [4].



2.4. att. A fāzes īsslēguma bojājuma strāvas sadalījums augstsprieguma GL ar zemētu zibensaizsardzības trosi.

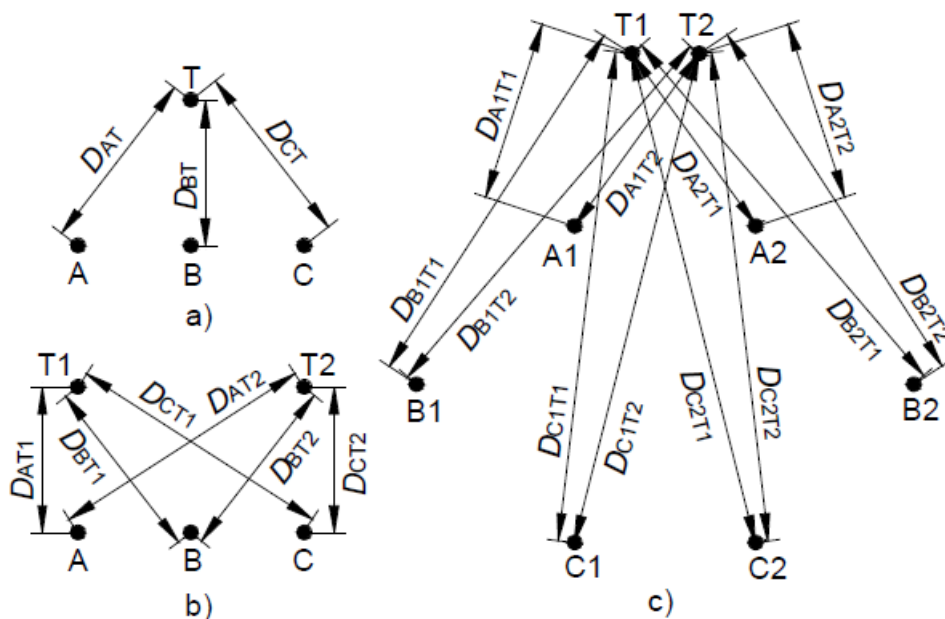
NS sistēmā trosi tuvināti var uzskatīt par vienu no Karsona modeļiem “vads–zeme”, ievērojot, ka tajā noslēdzas daļa no visu fāžu NS strāvām ($3I^0$) [8], [14]:

$$\dot{Z}_{T0}^0 = 3R_{T0} + 2,964 \cdot 10^{-3} \cdot f + j8,6814 \cdot 10^{-3} \cdot f \cdot \lg(D_z/r_{GT}), \quad (2.43.)$$

kur \dot{Z}_{T0}^0 – troses īpatnējā pilnā NS pretestība, Ω/km ;

R_{T0} – troses īpatnējā aktīvā pretestība, ko nosaka analogiski līnijas fāzes vada pretestībai ar (2.32.), Ω/km ;

r_{GT} – troses ģeometriskais rādiuss, ko nosaka, izmantojot (2.35.), kur koeficientu k_E parasti pieņem 0,95 un tiek izmantots troses faktiskais rādiuss, m;



2.5. att. Trīsfažu vienķēdes GL fāžu horizontālais izvietojums ar vienu (a) un divām zibensaizsardzības trosēm (b) trīsfažu divķēžu GL ar divām zibensaizsardzības trosēm fāžu un trošu izvietojums (c).

Īpatnējo NS mijinduktivitātes pretestību starp trosi un līnijas fāzēm var noteikt, vispārinot Karsona modeli vadu grupai A, B un C fāze un trose (2.5. (a) att.) [8], [25]:

$$\dot{Z}_{MT0}^0 = 2,964 \cdot 10^{-3} \cdot f + j8,6814 \cdot 10^{-3} \cdot f \cdot \lg(D_Z/D_{vidT}), \quad (2.44.)$$

kur \dot{Z}_{MT0}^0 – zibensaizsardzības troses un GL īpatnējā pilnā NS mijinduktivitātes pretestība, Ω/km ;

D_{vidT} – vidējais ģeometriskais attālums starp trosi un līnijas fāžu vadiem, m.

Minēto attālumu nosaka analogiski vidējam ģeometriskajam attālumam starp fāzēm:

$$D_{vidT} = \sqrt[3]{D_{AT}D_{BT}D_{CT}}, \quad (2.45.)$$

kur D_{AT} , D_{BT} , D_{CT} – attālums starp A, B un C fāzes vada un zibensaizsardzības troses ģeometriskajiem centriem, m.

Zemēto trosi iespējams uztvert kā īsslēgtu transformatora sekundāro tinumu, kuram līnija tādā gadījumā uzskatāma par primāro tinumu. Attiecīgi zibensaizsardzības trose samazina novērojamo līnijas NS īpatnējo pretestību, kuras ekvivalento vērtību izsaka šādi [14]:

$$\dot{Z}_{L+T0}^0 = \dot{Z}_{L0}^0 - (\dot{Z}_{MT0}^0)^2 / \dot{Z}_{T0}^0, \quad (2.46.)$$

kur \dot{Z}_{L+T0}^0 – GL īpatnējā pilnā NS pretestība, skaitliski ierēķinot zemētas troses ietekmi, Ω/km .

Vienķēdes GL ar divām zibensaizsardzības trosēm (2.5. (b) att.) tās iespējams aizstāt ar vienu ekvivalentu trosi, kuras vidējais ģeometriskais rādiuss būs [4]:

$$r_{G2T} = \sqrt{D_{T1T2} \cdot r_{GT}}, \quad (2.47.)$$

kur r_{G2T} – divu zibensaizsardzības trošu ekvivalentais ģeometriskais rādiuss, m;

D_{T1T2} – attālums starp abām zibensaizsardzības trosēm, m.

Savukārt vidējais ģeometriskais ekvivalentās troses attālums līdz vienas GL fāžu vadiem būs nosakāms, balstoties uz attālumiem no fāžu vadiem līdz abām trosēm (2.5. (b) att.) [4]:

$$D_{\text{vid}2T} = \sqrt[6]{D_{\text{AT}1} D_{\text{BT}1} D_{\text{CT}1} D_{\text{AT}2} D_{\text{BT}2} D_{\text{CT}2}}, \quad (2.48.)$$

kur $D_{\text{vid}2T}$ – vidējais ģeometriskais ekvivalentās troses attālums līdz vienas GL fāžu vadiem, m;

$D_{\text{AT}1}, D_{\text{BT}1}, D_{\text{CT}1}$ – attālums starp A, B un C fāzes vadu un 1. troses ģeometriskajiem centriem, m;

$D_{\text{AT}2}, D_{\text{BT}2}, D_{\text{CT}2}$ – attālums starp A, B un C fāzes vadu un 2. troses ģeometriskajiem centriem, m;

Tad iespējams noteikt ekvivalentās troses NS īpatnējo pretestību analogiski (2.43.) vienādojumam, ņemot vērā trošu aktīvo pretestību paralēlslēgumu [6], [8]:

$$\dot{Z}_{2T0}^0 = 1,5R_{T0} + 2,964 \cdot 10^{-3} \cdot f + j8,6814 \cdot 10^{-3} \cdot f \cdot \lg(D_Z/r_{G2T}), \quad (2.49.)$$

kur \dot{Z}_{2T0}^0 – ekvivalentās troses īpatnējā pilnā NS pretestība, Ω/km .

Ekvivalentās troses NS mijinduktivitātes ar līnijas fāžu vadiem īpatnējo pretestību var noteikt šādi [6], [8]:

$$\dot{Z}_{M2T0}^0 = 2,964 \cdot 10^{-3} \cdot f + j8,6814 \cdot 10^{-3} \cdot f \cdot \lg(D_Z/D_{\text{vid}2T}), \quad (2.50.)$$

kur \dot{Z}_{M2T0}^0 – ekvivalentās zibensaizsardzības troses mijinduktivitātes ar līnijas fāžu vadiem īpatnējā pilnā NS pretestība, Ω/km .

Attiecīgi vienai trīsfāžu GL, skaitliski ierēķinot divu zibensaizsardzības trošu NS mijinduktivitātes ietekmi, NS īpatnējā pretestība nosakāma ar vienādojumu (2.46.), aizstājot vienas troses NS pretestību un mijinduktivitātes pretestību ar divu trošu ekvivalenta pretestībām, kuras aprēķinātas ar (2.49.) un (2.50.) [4].

Ja jānosaka NS pretestība divām paralēlām GL vai divķēžu GL ar divām zibensaizsardzības trosēm, tad vispirms abām līnijām aprēķina NS pretestību neatkarīgi no otras līnijas un trosēm atbilstoši (2.37.) un abu līniju savstarpējās mijinduktivitātes pretestību – ar (2.40.). Nākamajā solī ar izteiksmi (2.48.) katrai līnijai aprēķina attālumu līdz ekvivalentai trosei, kā arī pašas ekvivalentās troses vidējo ģeometrisko rādiusu atbilstoši (2.47.). Seko ekvivalentās troses NS pretestības aprēķins ar (2.49.) un atsevišķi tās mijinduktivitātes pretestības ar abām līnijām aprēķini atbilstoši (2.50.) [4]. Tad ir iespējams noteikt GL īpatnējo NS pretestību, ierēķinot ekvivalentās troses ietekmi, ar izteiksmēm [4], [6]:

$$\dot{Z}_{L1+2T0}^0 = \dot{Z}_{L10}^0 - (\dot{Z}_{M2T-L10}^0)^2 / \dot{Z}_{2T0}^0, \quad (2.51.)$$

$$\dot{Z}_{L2+2T0}^0 = \dot{Z}_{L20}^0 - (\dot{Z}_{M2T-L20}^0)^2 / \dot{Z}_{2T0}^0, \quad (2.52.)$$

un abu GL savstarpējo mijinduktivitātes īpatnējo NS pretestību ar vienādojumu [4], [6]:

$$\dot{Z}_{Mp+2T0}^0 = \dot{Z}_{Mp0}^0 - (\dot{Z}_{M2T-L10}^0 \cdot \dot{Z}_{M2T-L20}^0) / \dot{Z}_{2T0}^0, \quad (2.53.)$$

kur $\dot{Z}_{L1+2T0}^0, \dot{Z}_{L2+2T0}^0$ – līniju L1 un L2 NS īpatnējā pilnā pretestība, ievērojot trošu ietekmi, Ω/km ;

$\dot{Z}_{L10}^0, \dot{Z}_{L20}^0$ – līniju L1 un L2 NS īpatnējā pilnā pretestība, neievērojot trošu ietekmi, Ω/km ;

$\dot{Z}_{M2T-L10}^0, \dot{Z}_{M2T-L10}^0$ – līnijas L1 un L2 NS mijinduktivitātes ar ekvivalento trosi īpatnējās pilnās pretestības, Ω/km ;
 \dot{Z}_{Mp+2T0}^0 – līniju L1 un L2 NS savstarpējās mijinduktivitātes īpatnējā pilnā pretestība, ievērojot trošu ietekmi, Ω/km .

Beigās katras līnijas fāzes NS īpatnējo pretestību iespējams noteikt ar divām paralēlām līnijām lietoto vienādojumu (2.42.), izmantojot līniju īpatnējo NS pretestību no (2.51.) un (2.52.) kopā ar NS mijinduktivitātes īpatnējo pretestību no (2.53.) [4].

Iespējamās arī situācijas, kurās bojājums rodas vienā no paralēlajām līnijām, kamēr otra ir atslēgta un zemēta (remontā). Tad zemēto līniju tuvināti var uzskatīt par vēl vienu trosi un izmantot (2.46.) ar līniju savstarpējās NS mijinduktivitātes un zemētās līnijas pretestību vai aplūkot zemētās līnijas fāzes un zibensaizsardzības troses kā apvienotu ekvivalentu trosi, bet abos gadījumos gan esošās zibensaizsardzības troses, gan zemētā līnija samazinās otras līnijas NS pretestību (atslēgta nezemēta līnija neietekmē otras līnijas NS pretestību) [4], [27].

Ja trūkst informācijas par līnijas konfigurāciju (izmantotajiem starpbalstiem vai pat līnijas fāzes vadu marku), tad aprēķinos iespējams orientēties uz bieži lietotajiem unificētajiem starpbalstiem (piemēram, 110 kV: ПБ110–15, ПС110–9В, П110–2 un 330 kV: ПБ330–7, П330–3Т, П330–2 [29]) vai izmantot vidējos līniju konstrukciju datus atkarībā no sprieguma līmeņa un minimālos vadu šķērsriezumu laukumus atbilstoši koronas zudumu ierobežojumiem, kas parādīti 2.4.–2.6. tabulā.

2.4. tabula

Vidējais GL balstu augstums atkarībā no nominālā sprieguma [18], [20]

Nominālais spriegums, kV	Vidējais balstu augstums h_B , m
35	12–15
110	19
220–330 (vienķēdes GL)	25
220–330 (divķēžu GL)	27,5
500–750	29

Minimālais pieļaujamais un vidējais attālums starp GL fāžu vadiem atkarībā no nominālā sprieguma [18], [20], [28], [30]–[32]

U_N , kV	D_{min} , m	D_{vid} , m
0–1	0,4	0,5
6–10	0,6–1,75*/0,4**	1
20	0,7–1,90*/0,4**	1,5
35	2,60–9,24*	3
110	3–9,68*	4
150	3,56–10,07*	5,5
220	4,25–10,57*	6–7
330	5,5–11,71*	8,5–9
500	6,21–12,63*	12
750	7,12–14,02*	15
1150	–	24,2

*Kailvadu minimālie attālumi, kas mainās atkarībā no GL apledošanas pakāpes un vadu nokares laidumā. Papildus tam standarts LEK 135 nosaka atšķirīgus minimālos attālus vadu horizontālam un citiem vadu izvietojumiem GL balstā līnijām ar nominālo spriegumu 110 kV un 330 kV [28];

**GL ar izolētiem vadiem.

Minimālā fāžu vadu marka atkarībā no nominālā sprieguma un šķelto vadu skaita fāzē* [18], [20]

U_N , kV	Šķelto vadu skaits fāzē	Minimālā fāzes vadu marka
110	1	AC–70/11
220	1	AC–240/39
330	1	AC–600/72
330	2	AC–240/39
500	2	AC–700/86
500	3	AC–300/66
750	4	AC–400/93
750	5	AC–240/56

*Šie dati ir balstīti uz Padomju Sociālistisko Republiku Savienības (PSRS) laika praksi. Mūsdienās lieto arī vadus ar lielākām šķērsriezuma rezervēm vai lielāku vadu skaitu fāzē (piemēram, Kurzemes lokā 110 kV līnijām izmanto 2 šķeltus vadus katrā fāzē).

Papildus tam informācijas trūkuma gadījumā var pieņemt, ka attālums starp šķeltiem fāzes vadiem ir robežās no 0,2 m līdz 0,6 m [18].

Alternatīvs tuvināts risinājuma variants ir, izmantojot grāmatas [18] 3.4. pielikumu vai grāmatas [20] 3.1. tabulu, noteikt vidējo TS īpatnējo induktīvo pretestību atbilstoši sprieguma līmenim. Tad, izmantojot grāmatas [2] 6.1. tabulu, noteikt aptuveno TS aktīvo pretestību. Ņemot vērā zibensaizsardzības trošu veidu un līnijas konstrukciju, iespējams noteikt aptuveno NS īpatnējo induktīvo pretestību, izmantojot attiecību starp NS un TS induktīvajām pretestībām, kas dotas 2.7. tabulā.

GL NS un TS induktīvo pretestību attiecības vidējās vērtības atkarībā no līnijas un zibensaizsardzības troses veida [2], [14], [25]

Līnijas veids	Troses veids	X^0/X^1
Vienķēdes līnija	Bez troses	3,5
	Ar tērauda trosi	3
	Ar vara vai alumīnija trosi	2
Divķēžu līnija	Bez troses	5,5
	Ar tērauda trosi	4,7
	Ar vara vai alumīnija trosi	3

Šādam tuvinātam aprēķinam GL NS īpatnējo aktīvo pretestību var pieņemt kā trīskāršotu TS īpatnējo aktīvo pretestību: $R^0 \approx 3R^1$.

Zinot līnijas vai līniju TS (PS pretestība sakrīt ar TS) un NS īpatnējo pretestību, atliek noteikt līnijas īpatnējās vadāmības. GL aktīvo īpatnējo vadāmību G_{L0} galvenokārt ievēro vienīgi augstsprieguma (turpmāk tekstā – AS) līnijām ar nominālo spriegumu 220 kV un augstāk, izņemot precīzu aprēķinu nepieciešamības gadījumus. Precīza koronas zudumu aprēķinu metodika parādīta [18], bet tuvināti šīs vērtības iespējams atrast 2.8. tabulā atkarībā no līnijas nominālā sprieguma un fāzes vadu šķēsgriezuma laukuma.

Koronas aktīvās jaudas īpatnējie zudumi AS GL [18]

U_N , kV	Fāzes vadu marka	Vadu skaits fāzē	$\Delta P_{\text{koma max}}$ (sliktos laika apstākļos), W/km	ΔP_{komin} (labos laika apstākļos), W/km
220	AC-240/32	1	2700	1200
	AC-300/39	1	2000	800
	AC-400/51	1	1000	400
	AC-500/64	1	700	300
330	AC-240/32	2	6300	2700
	AC-300/39	2	4600	1900
	AC-400/51	2	2500	1000
	AC-500/64	2	1600	500
500	AC-300/39	3	11500	4900
	AC-400/51	3	10200	3700
	AC-500/64	3	7500	3000
750	AC-400/51	4	18300	6400
	AC-300/66	5	13700	5100

Zinot koronas zudumu jaudas maksimālo vērtību un minimālo vērtību, iespējams noteikt to vidējo vērtību [18]:

$$\Delta P_{\text{ko}} = (\Delta P_{\text{koma max}} + \Delta P_{\text{komin}})/2, \quad (2.54.)$$

un šiem jaudas zudumiem atbilstošo līnijas īpatnējo aktīvo vadītspēju [18]:

$$G_{L0} = \Delta P_{ko} / U_{APR}^2, \quad (2.55.)$$

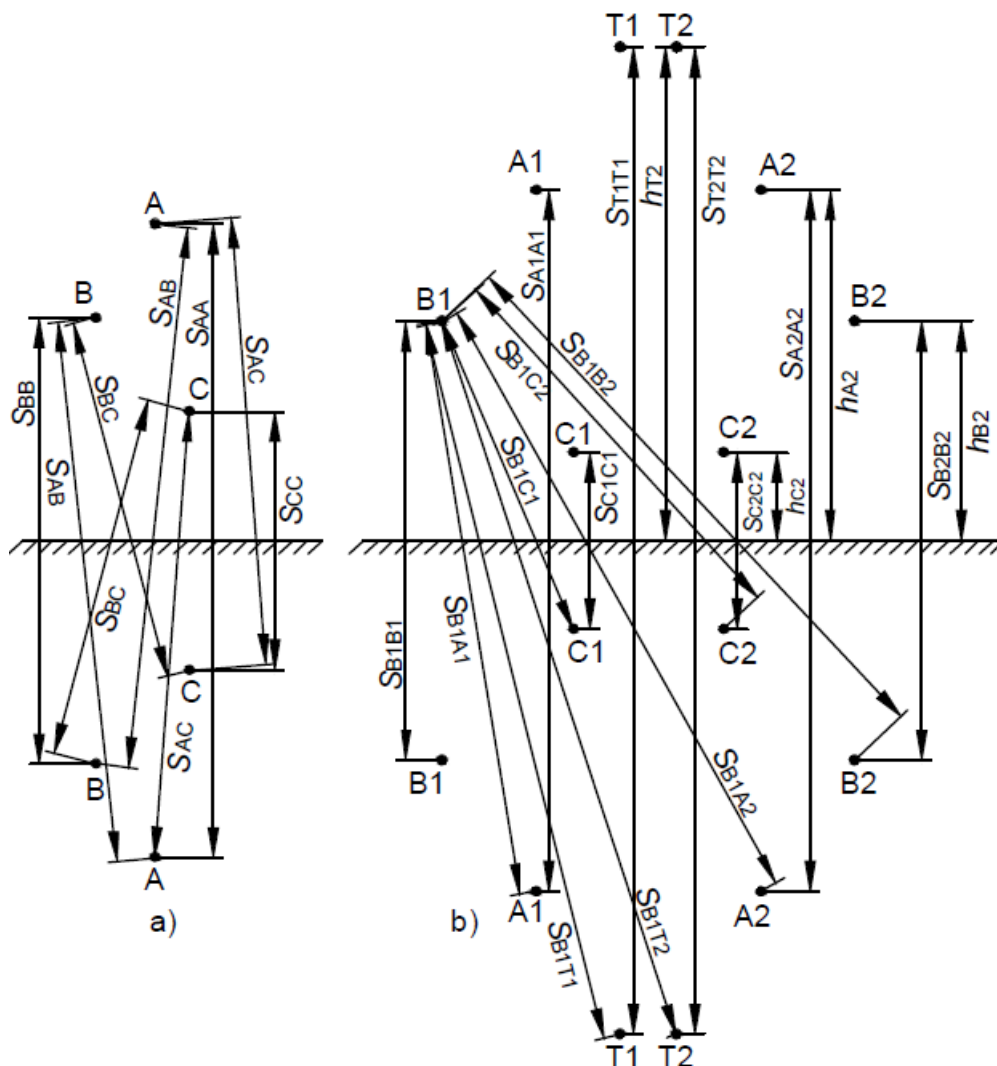
kur $\Delta P_{k_{\max}}$ – maksimālie novērotie īpatnējie koronas zudumi, W/km;

$\Delta P_{k_{\min}}$ – minimālie novērotie īpatnējie koronas zudumi, W/km;

ΔP_{ko} – vidējie novērotie īpatnējie koronas zudumi, W/km;

U_{APR}^2 – aprēķina vidējais nominālais spriegums (aprakstīts 2.1.1. apakšpunktā), V.

Elektrisko sistēmu slodzes un bojājumu režīmu parametru aprēķinos lielāku uzmanību parasti pievērš līniju kapacitatīvās vadītspējas noteikšanai, jo tās ietekme vismaz AS tīklos ir daudz izteiktāka. Kapacitāšu aprēķinam izmanto Karsona induktivitāšu modelim analogisku modeli, bet zemē atainotie vadi ir precīzā spoguļattēlā pret zemi (2.6. att.), kā arī zemes virsma pieņemta ar nulles potenciālu. Tādā veidā, neskatoties uz zemē atainoto vadu ieviešanu, tiek saglabāta nemainīga elektriskā lauka aina starp reālo līniju un zemi [8].



2.6. att. Trīsfāžu vienķēdes GL fāžu vadu izvietojums, visu vadu atspoguļojumi un attālumi starp fāzēm un visu fāžu vadu spoguļattēliem zemē (a) un trīsfāžu divķēžu GL ar divām trosēm vadu izvietojumi, to augstumi virs zemes, atspoguļojumi zemē un attālumi starp pirmās līnijas B fāzes vadu un visiem vadu atspoguļojumiem (b).

EPL kapacitāšu aprēķiniem izmanto potenciāla koeficientus. Vispārīgā gadījumā potenciāla koeficientus iespējams izteikt no līnijas konfigurācijas [2], [4], [6]:

$$\alpha_{ii} = 41,494 \cdot 10^6 \lg(S_{ii}/r_{Gi}), \quad (2.56.)$$

$$\alpha_{ij} = 41,494 \cdot 10^6 \lg(S_{ij}/D_{ij}), \quad (2.57.)$$

kur α_{ii}, α_{ij} – fāzes i potenciāla koeficients un starpfāžu potenciāla koeficients fāzēm i un j , km/F;

S_{ii}, S_{ij} – attālumi no fāzes vada i līdz fāzes vadu i un j spoguļattēliem zemē,

ierēķinot vadu nokari, m;

r_{Gi} – fāzes vada i ģeometriskais rādiuss (skatīt vienādojumu (2.35.); šķeltiem fāzes vadiem lieto r_{Gvid} atbilstoši (2.36.)), m;

D_{ij} – attālums no fāzes vada i līdz vadam j (2.5. att.), m.

Pāriesim pie trīsfāžu GL praktiskajiem kapacitāšu aprēķiniem, sākumā izskatot GL bez zibensaizsardzības trosēm. Ņemot vērā, ka koeficienti α_{ii} un α_{ij} precīzos aprēķinos visbiežāk būs atšķirīgi, parasti izmanto vidējos līnijas ģeometriskos parametrus, lai izteiktu vidējos fāžu un starpfāžu potenciāla koeficientus [2], [4], [5]:

$$\alpha_{fvid} = 1/3 (\alpha_{AA} + \alpha_{BB} + \alpha_{CC}) = 41,494 \cdot 10^6 \lg(S_{fvid}/r_G), \quad (2.58.)$$

$$\alpha_{Mvid} = 1/3 (\alpha_{AB} + \alpha_{BC} + \alpha_{CA}) = 41,494 \cdot 10^6 \lg(S_{Mvid}/D_{vid}), \quad (2.59.)$$

kur $\alpha_{fvid}, \alpha_{Mvid}$ – vidējie fāžu un starpfāžu potenciāla koeficienti, km/F;

S_{fvid}, S_{Mvid} – vidējie attālumi no fāžu vadiem līdz šo pašu fāžu un pārējo fāžu vadu spoguļattēliem zemē, m.

Šie vidējie ģeometriskie attālumi līdz fāžu spoguļattēliem zemē nosakāmi analogiski vidējam ģeometriskajam attālumam starp fāzēm (D_{vid}) [6], [8]:

$$S_{fvid} = \sqrt[3]{S_{AA}S_{BB}S_{CC}}, \quad (2.60.)$$

$$S_{Mvid} = \sqrt[3]{S_{AB}S_{BC}S_{CA}}. \quad (2.61.)$$

Aprēķinot vidējo ģeometrisko attālumu starp fāžu vadiem, vadu nokares ietekme ir neliela, jo tā novērojama visām fāzēm, tādēļ fāžu savstarpējais novietojums mainās salīdzinoši maz. Savukārt, precīziem aprēķiniem nosakot S_{fvid} un S_{Mvid} , uzreiz jāpieņem, ka fāžu vadu pozīcijas jāaizvieto ar ekvivalentām, kur visi fāžu vadi un to spoguļattēli atrodas ekvivalentā attālumā no zemes [18]:

$$h_{ek} = h_0 + \Delta h_{nok}/3, \quad (2.62.)$$

kur h_{ek} – ekvivalentais fāzes vada augstums virs (attālums no) zemes, m;

h_0 – minimālais reālais vai pieļaujama fāzes vada attālums līdz zemei, m;

Δh_{nok} – fāzes vadu nokare, m.

Tuvinātos praktiskos 220 kV un zemāka sprieguma GL aprēķinos vadu nokari ir pieļaujams neievērot, bet 330 kV un augstāka sprieguma aprēķinos to ieteicams ievērot. Protams, ar tam paredzētu metodiku iespējams aprēķināt faktisko vada nokari, bet var arī orientēties uz smagākajiem GL darba režīmiem ar maksimāli pieļaujamo nokari [18]:

$$\Delta h_{nokmax} = h_B - D_{vTmin} - D_{vvmin} - l_{iz} - h_0, \quad (2.63.)$$

kur Δh_{nokmax} – fāzes vada maksimālā pieļaujamā nokare, m;

h_B – līnijas balsta augstums, m;

D_{vTmin} – minimālais vertikālais attālums starp trosi un fāzes vadu atbilstoši balsta konfigurācijai, m;

D_{vmin} – minimālais vertikālais attālums starp diviem fāzes vadiem atbilstoši balsta konfigurācijai, m;

l_{iz} – fāzes izolatoru un stiprināšanas armatūras kopējais garums, m;

h_0 – minimālais pieļaujamais fāzes vada attālums līdz zemei, m;

Līnijām ar nominālajiem spriegumiem 110 kV, 220 kV, 330 kV un 500 kV var pieņemt h_0 vienādu ar 6 m, 7 m, 7,5 m un 8 m, bet izolatoru garumus l_{iz} aptuveni var pieņemt 1 m, 1,9 m, 2,7 m un 3,7 m (detalizētākiem aprēķiniem [18] dotas h_0 vērtības dažādām situācijām un precīzāki izolatoru un to piekararmatūras garumi).

Kapacitāti iespējams izteikt kā elektriskā lādiņa un sprieguma attiecību, kurai potenciāla koeficienti ir apgrieztie lielumi [4], [6]:

$$\begin{aligned} C_{L0}^1 &= C_{L0}^2 = 1/(\alpha_{fvid} - \alpha_{Mvid}) = \\ &= 1/(41,494 \cdot 10^6 [\lg(S_{fvid}/r_G) - \lg(S_{Mvid}/D_{vid})]) \approx \\ &\approx 0,0241 \cdot 10^{-6} / \lg(D_{vid} S_{fvid} / r_G S_{Mvid}), \end{aligned} \quad (2.64.)$$

kur C_{L0}^1, C_{L0}^2 – īpatnējā GL TS un PS kapacitāte, F/km.

NS īpatnējā kapacitāte nosakāma līdzīgā veidā [4], [6]:

$$\begin{aligned} C_{L0}^0 &= 1/(\alpha_{fvid} + 2\alpha_{Mvid}) = 1/(41,494 \cdot 10^6 [\lg(S_{fvid}/r_G) + \lg((S_{Mvid}/D_{vid})^2)]) \approx \\ &\approx 0,0241 \cdot 10^{-6} / \lg([S_{fvid}/r_G][S_{Mvid}/D_{vid}]^2), \end{aligned} \quad (2.65.)$$

kur C_{L0}^0 – īpatnējā GL NS kapacitāte, F/km.

NS iespējams īpatnējo kapacitāti izteikt arī kā trīskāršotu vidējo atsevišķo fāžu kapacitāšu vērtību [4], [6]:

$$\begin{aligned} C_{L0}^0 &= 1/\left(3 \cdot 41,494 \cdot 10^6 \left(\lg\left(S_{vid}/\left[\sqrt[3]{r_G D_{vid}^2}\right]\right)\right)\right) \approx \\ &\approx 0,803 \cdot 10^{-8} / \lg\left(S_{vid}/\left[\sqrt[3]{r_G D_{vid}^2}\right]\right), \end{aligned} \quad (2.66.)$$

kur S_{vid} – vidējais ģeometriskais attālums starp visiem fāžu vadiem un to spoguļattēliem zemē (skatīt (2.67.)), m.

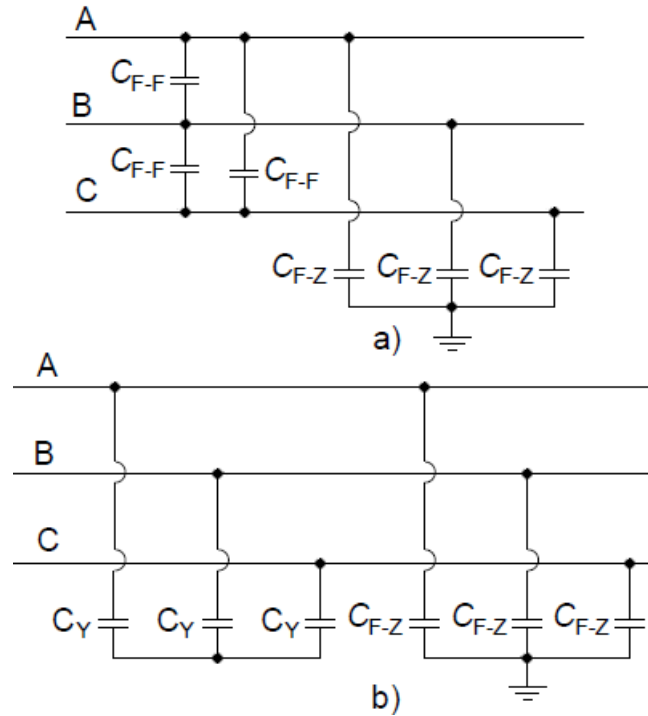
Minēto vidējo ģeometrisko attālumu iespējams noteikt šādi [4], [8]:

$$S_{vid} = \sqrt[9]{S_{AA}S_{BB}S_{CC}S_{AB}^2S_{BC}^2S_{CA}^2} \approx 2/3 (h_A + h_B + h_C), \quad (2.67.)$$

kur h_A, h_B, h_C – fāžu A, B un C vadu augstums virs zemes, m.

Jāatceras, ka fizikāli līnijai ir gan F–F kapacitātes C_{F-F} , gan F–Z kapacitātes C_{F-Z} (2.7. (a) att.), un šo abu veidu kapacitātes ir nozīmīgas, jo vismaz normālā darba režīmā spriegums pastāv gan starp fāzēm, gan fāzēm un zemi. Atbilstoši [5], [6] aprakstītajam augstāk parādītā TS kapacitāte iegūstama, apvienojot abus šo kapacitāšu veidus. Minētajai apvienošanai

starpfāžu kapacitāšu trīsstūra slēgums jāpārveido zvaigznes slēgumā (2.7. (b) att.), kur katra no zvaigznes fāzes kapacitātēm ir $C_Y = 3C_{F-F}$.



2.7. att. Trīsfasu līnijas starpfāžu un fāžu kapacitātes uz zemi (a) un starpfāžu kapacitāšu pārveidojums zvaigznes slēgumā (b) [5], [18].

Tālāk iespējams saskaitīt paralēli slēgtās kapacitātes, jo tās ir proporcionālas kapacitātvajām vadītspējām, un noteikt TS un tai identiskas PS kapacitātes: $C_L^1 = C_Y + C_{F-Z} = 3C_{F-F} + C_{F-Z}$. Savukārt NS sistēmā spriegumi ir vienīgi starp fāzēm un zemi, tādēļ $C_L^0 = C_{F-Z}$. Attiecīgi, zinot TS un NS kapacitātes, iespējams veikt arī apgrieztu aprēķinu un noteikt vidējo fizikālo starpfāžu kapacitāti [4], [5]:

$$C_{F-F} = (C_L^1 - C_L^0)/3 = \alpha_{Mvid}/([\alpha_{fvid} - \alpha_{Mvid}][\alpha_{fvid} + 2\alpha_{Mvid}]). \quad (2.68.)$$

Grāmatā [8] ir dota līdzīga aprēķinu metodika, bet tur vienādojumi uzreiz izteikti kapacitātvajām vadītspējām. Balstoties uz augstāk parādīto pārrēķinu, iespējams noteikt GL TS un NS kapacitātes arī no fizikālajām vadītāju kapacitātēm uz zemi un to savstarpējām kapacitātēm, kas aprēķinātas ar potenciālu koeficientu matricas metodi, par kuru aprakstīts [33]. Ņemot vērā, ka realitātē šīs kapacitātes dažādām fāzēm var atšķirties, šādam risinājumam izmantojamas vidējās kapacitāšu C_{F-F} un C_{F-Z} vērtības.

Turpinājumā aplūkosim zibensaizsardzības troses ietekmi uz GL kapacitāti. Zibensaizsardzības troses ietekme ir jāievēro vienīgi NS kapacitātes aprēķinā. Līnijas potenciāla koeficientu, kurā ievērota troses ietekme, var izteikt šādi [4], [6]:

$$\alpha_{L+T}^0 = \alpha_{fvid} + 2\alpha_{Mvid} - \Delta\alpha_T, \quad (2.69.)$$

kur α_{L+T}^0 – līnijas NS potenciāla koeficients, ievērojot troses ietekmi, km/F;

$\Delta\alpha_T$ – troses ietekmes potenciāla koeficients, km/F.

Troses ietekmes potenciāla koeficientu $\Delta\alpha_T$ definē kā vidējo troses ietekmi uz visām fāzēm [4], [6]:

$$\begin{aligned}\Delta\alpha_T &= 3(\alpha_{AT} + \alpha_{BT} + \alpha_{CT})^2/\alpha_{TT} = 3\alpha_{LT}^2/\alpha_{TT} = \\ &= 3 \cdot 41,4 \cdot 10^6 \left[\lg\left(\sqrt[3]{(S_{AT}S_{BT}S_{CT})/(D_{AT}D_{BT}D_{CT})}\right) \right]^2 / \lg(S_{TT}/r_{GT}),\end{aligned}\quad (2.70.)$$

kur S_{AT}, S_{BT}, S_{CT} – attālumi starp fāžu vadiem un troses spoguļattēlu zemē (2.6. att.), m;
 S_{TT} – attālums starp trosi un tās spoguļattēlu zemē, m.

Līnijas NS īpatnējā kapacitāte tādā gadījumā nosakāma kā apgriezta līnijas potenciāla koeficienta vērtība, ievietojot (2.69.) vienādojumus (2.66.), (2.70.) [4], [6]:

$$C_{L+T}^0 = 1/(\alpha_{fvid} + 2\alpha_{Mvid} - \Delta\alpha_T). \quad (2.71.)$$

Vienķēdes GL ar divām trosēm, kuras ir simetriski novietotas attiecībā pret fāžu vadiem, abas troses apvieno vienā ekvivalentā trosē un (2.70.) α_{TT} vietā izmanto ekvivalentas troses potenciāla koeficientu [4], [6]:

$$\alpha_{TTeK} = (\alpha_{T1T1} + \alpha_{T1T2})/2, \quad (2.72.)$$

kur $\alpha_{T1T1}, \alpha_{T1T2}$ – 1. troses potenciāla koeficients un abu trošu savstarpējais potenciāla koeficients, kurus nosaka ar izteiksmēm (2.56.) un (2.57.), izmantojot attālumus no trosēm līdz to spoguļattēliem S_{T1T1} un S_{T1T2} , attālumu starp trosēm D_{T1T2} un vidējo ģeometrisko divu trošu rādus, kuru nosaka formula (2.47.), km/F.

Ja abas troses nav simetriski novietotas attiecībā pret fāžu vadiem, arī trošu un līnijas fāžu savstarpējā potenciāla koeficienta vērtība ir jāaprēķina kā vidējā (α_{L2T}) atbilstoši vienādojumam (2.59.), bet, izmantojot vidējos ģeometriskos attālumus no fāžu vadiem līdz abām trosēm, – atbilstoši (2.48.) un trošu spoguļattēliem zemē – atbilstoši šādam vienādojumam [4], [6]:

$$S_{vid2T} = \sqrt[6]{S_{AT1}S_{BT1}S_{CT1}S_{AT2}S_{BT2}S_{CT2}}, \quad (2.73.)$$

kur S_{vid2T} – vidējais ģeometriskais attālums starp fāžu vadiem un abu zibensaizsardzības trošu spoguļattēliem zemē, m.

Turpinājumā pievērsīsimies paralēlu trīsfāžu GL savstarpējo kapacitāšu aprēķinam, vispirms tās aplūkojot bez zibensaizsardzības trosēm. Divu paralēlu GL vai divķēžu līniju savstarpējā kapacitāte ir jāievēro vienīgi NS aprēķinos. Izsakot divu paralēlu līniju NS spriegumus atkarībā no to lādiņiem, iespējams iegūt šādu vienādojumu sistēmu [4], [6]:

$$\begin{cases} \dot{U}_{L1}^0 = 1/3 (\dot{U}_{A1} + \dot{U}_{B1} + \dot{U}_{C1}) = \alpha_{L1}^0 \dot{q}_{L1}^0 + \alpha_{L1L2}^0 \dot{q}_{L2}^0, \\ \dot{U}_{L2}^0 = 1/3 (\dot{U}_{A2} + \dot{U}_{B2} + \dot{U}_{C2}) = \alpha_{L1L2}^0 \dot{q}_{L1}^0 + \alpha_{L2}^0 \dot{q}_{L2}^0, \end{cases} \quad (2.74.)$$

kur $\dot{U}_{L1}^0, \dot{U}_{L2}^0$ – 1. un 2. līnijas aprēķina fāzes sprieguma NS komponentes, V.

$\dot{U}_{A1}, \dot{U}_{B1}, \dot{U}_{C1}, \dot{U}_{A2}, \dot{U}_{B2}, \dot{U}_{C2}$ – 1. un 2. līnijas fāžu spriegumi, V;

$\alpha_{L1}^0, \alpha_{L2}^0$ – 1. un 2. līnijas NS potenciāla koeficienti, aplūkojot līnijas atsevišķi, km/F;

α_{L1L2}^0 – abu līniju savstarpējais NS potenciāla koeficients, km/F;

$\dot{q}_{L1}^0, \dot{q}_{L2}^0$ – 1. un 2. līnijas NS elektriskie lādiņi, C.

Abu atsevišķo līniju NS potenciāla koeficienti nosakāmi analogiski (2.65.) [4], [6]:

$$\begin{cases} \alpha_{L1}^0 = \alpha_{fvid1} + 2\alpha_{Mvid1}, \\ \alpha_{L2}^0 = \alpha_{fvid2} + 2\alpha_{Mvid2}, \end{cases} \quad (2.75.)$$

kur nepieciešamos potenciāla koeficientus α_{fvid1} , α_{fvid2} un α_{Mvid1} , α_{Mvid2} nosaka ar (2.58.) un (2.59.), ievietojot katras līnijas fāžu konfigurācijai atbilstošos attālumus. Līniju savstarpējo NS potenciāla koeficientu α_{L1L2}^0 nosaka, izmantojot vienādojumu (2.59.), bet konkrētajā gadījumā tiek aprēķināta vidējā vērtība no vienas līnijas visu fāžu un otras līnijas visu fāžu savstarpējiem potenciāla koeficientiem [4], [6]:

$$\begin{aligned} \alpha_{L1L2}^0 &= \\ &= \frac{(\alpha_{A1A2}^0 + \alpha_{A1B2}^0 + \alpha_{A1C2}^0 + \alpha_{B1A2}^0 + \alpha_{B1B2}^0 + \alpha_{B1C2}^0 + \alpha_{C1A2}^0 + \alpha_{C1B2}^0 + \alpha_{C1C2}^0)}{9} = \\ &= 3 \cdot 41,494 \cdot 10^6 \lg(S_{Mpvvid}/D_{pvvid}) \approx 1,245 \cdot 10^8 \lg(\Delta), \end{aligned} \quad (2.76.)$$

kur S_{Mpvvid} – vidējais ģeometriskais attālums starp abu paralēlo GL fāzēm un to spoguļattēliem zemē, m;

D_{pvvid} – vidējais ģeometriskais attālums starp abu paralēlo GL fāzēm, m;

Δ – vienkāršošanas mainīgais, kuram atbilst attiecība starp S_{Mpvvid} un D_{pvvid} .

Mainīgā Δ aprēķinam var izmantot šādu vienādojumu [4], [6]:

$$\Delta = \sqrt[9]{\frac{S_{A1A2} \cdot S_{A1B2} \cdot S_{A1C2} \cdot S_{B1A2} \cdot S_{B1B2} \cdot S_{B1C2} \cdot S_{C1A2} \cdot S_{C1B2} \cdot S_{C1C2}}{D_{A1A2} \cdot D_{A1B2} \cdot D_{A1C2} \cdot D_{B1A2} \cdot D_{B1B2} \cdot D_{B1C2} \cdot D_{C1A2} \cdot D_{C1B2} \cdot D_{C1C2}}}. \quad (2.77.)$$

Vienādojumi (2.76.) un (2.77.) ir derīgi, nosakot NS potenciāla koeficientu starp jebkurām divām no divām vai vairāk paralēlām līnijām. Lai noteiktu kapacitātes, (2.74.) jāpārveido, izsakot lādiņu atkarībā no sprieguma (formā: $q = CU$) [4], [6]:

$$\begin{cases} \dot{q}_{L1}^0 = (\alpha_{L2}^0 \dot{U}_{L1}^0 - \alpha_{L1L2}^0 \dot{U}_{L2}^0) / (\alpha_{L1}^0 \alpha_{L2}^0 - (\alpha_{L1L2}^0)^2) = C_{L10}^0 \dot{U}_{L1}^0 - C_{L1L20}^0 \dot{U}_{L2}^0, \\ \dot{q}_{L2}^0 = (\alpha_{L1}^0 \dot{U}_{L2}^0 - \alpha_{L1L2}^0 \dot{U}_{L1}^0) / (\alpha_{L1}^0 \alpha_{L2}^0 - (\alpha_{L1L2}^0)^2) = C_{L20}^0 \dot{U}_{L2}^0 - C_{L1L20}^0 \dot{U}_{L1}^0, \end{cases} \quad (2.78.)$$

no kurienes īpatnējās kapacitātes izsakāmas kā:

$$C_{L10}^0 = \alpha_{L2}^0 / (\alpha_{L1}^0 \alpha_{L2}^0 - (\alpha_{L1L2}^0)^2), \quad (2.79.)$$

$$C_{L20}^0 = \alpha_{L1}^0 / (\alpha_{L1}^0 \alpha_{L2}^0 - (\alpha_{L1L2}^0)^2), \quad (2.80.)$$

$$C_{L1L20}^0 = \alpha_{L1L2}^0 / (\alpha_{L1}^0 \alpha_{L2}^0 - (\alpha_{L1L2}^0)^2), \quad (2.81.)$$

kur C_{L10}^0 , C_{L20}^0 – 1. un 2. līnijas īpatnējās NS kapacitātes, neņemot vērā to savstarpējo kapacitāti, F/km;

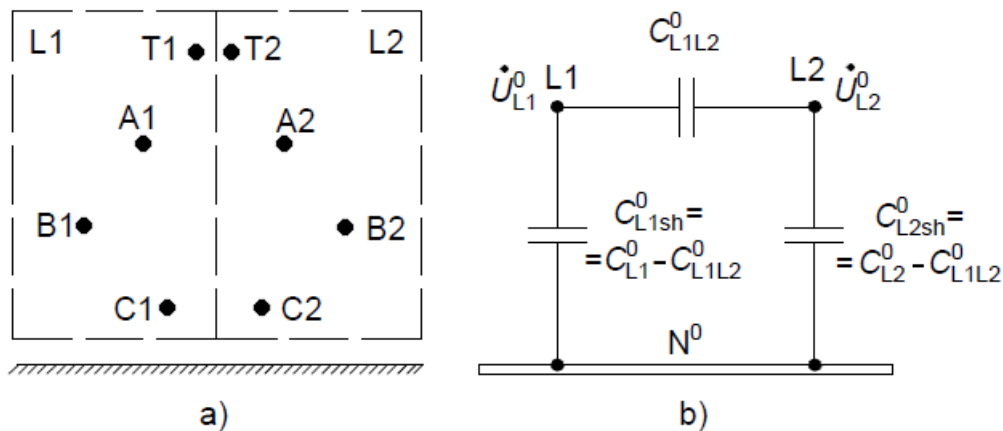
C_{L1L20}^0 – īpatnējā NS kapacitāte starp abām paralēlajām līnijām, F/km.

NS īpatnējās kapacitātes, kuras nosaka ar (2.79.)–(2.81.), atbilstoši [4], [6] tiek izmantotas uz spriegumu vienādojumu sistēmas (2.74.) balstītas aizvietošanas shēmas iegūšanai (2.8. att.). Šajā gadījumā katrai līnijai pret NS aizvietošanas shēmas neitrāli (N^0) pieslēdzama starpība starp augstāk aprēķinātajām līniju kapacitātēm un to savstarpējo kapacitāti (kapacitāte starp līnijām aizvietošanas shēmā saglabājas no (2.81.)). Tātad shēmā faktiski tiek izmantotas šādas īpatnējās kapacitātes:

$$C_{L1sh0}^0 = C_{L10}^0 - C_{L1L20}^0 = (\alpha_{L2}^0 - \alpha_{L1L2}^0) / (\alpha_{L1}^0 \alpha_{L2}^0 - (\alpha_{L1L2}^0)^2), \quad (2.82.)$$

$$C_{L2sh0}^0 = C_{L20}^0 - C_{L1L20}^0 = (\alpha_{L1}^0 - \alpha_{L1L2}^0) / (\alpha_{L1}^0 \alpha_{L2}^0 - (\alpha_{L1L2}^0)^2). \quad (2.83.)$$

kur C_{L1sh0}^0 , C_{L2sh0}^0 – 1. un 2. līnijas īpatnējās NS kapacitātes, ņemot vērā to savstarpējo kapacitāti, F/km;



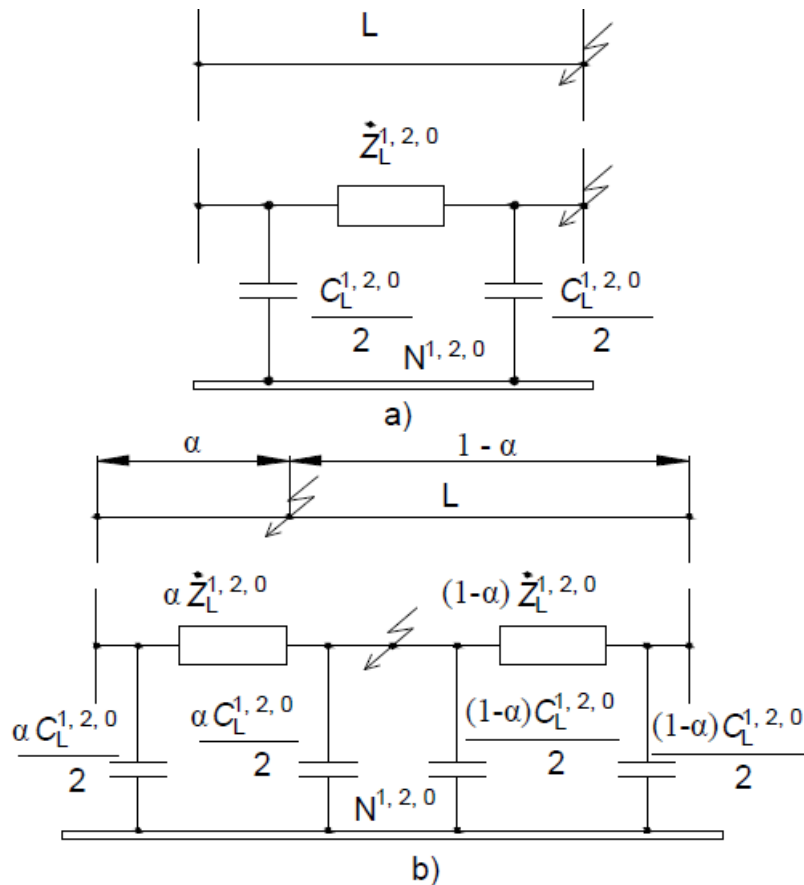
2.8. att. Divu paralēlu trīsfāžu GL L1 un L2 fāžu vadu izvietojumi (a) un to NS aizvietošanas shēma (b) [6].

Ja ir paralēlas līnijas ar trosēm, precīzs abu līniju un trošu savstarpējo kapacitāšu aprēķins ir sarežģītāks, bet tuvināti iespējams apvienot jau aplūkotās metodikas. Tādam risinājumam vienādojumu sistēmā (2.75.) līniju atsevišķos potenciāla koeficientus rēķina ar (2.71.), kur troses katrai līnijai ievēro kā sistēmu līnija–ekvivalentā trose (skatīt vienādojumus (2.72.), (2.73.) un to aprakstu), bet savstarpējo potenciāla koeficientu rēķina atbilstoši (2.76.) un (2.77.), neievērojot trošu ietekmi. Rezultātā izmanto 2.8. attēla aizvietošanas shēmu ar kapacitātēm no (2.81.)–(2.83.), kas aprēķinātas ar modificētiem līniju potenciāla koeficientiem α_{L1}^0 un α_{L2}^0 [4], [6].

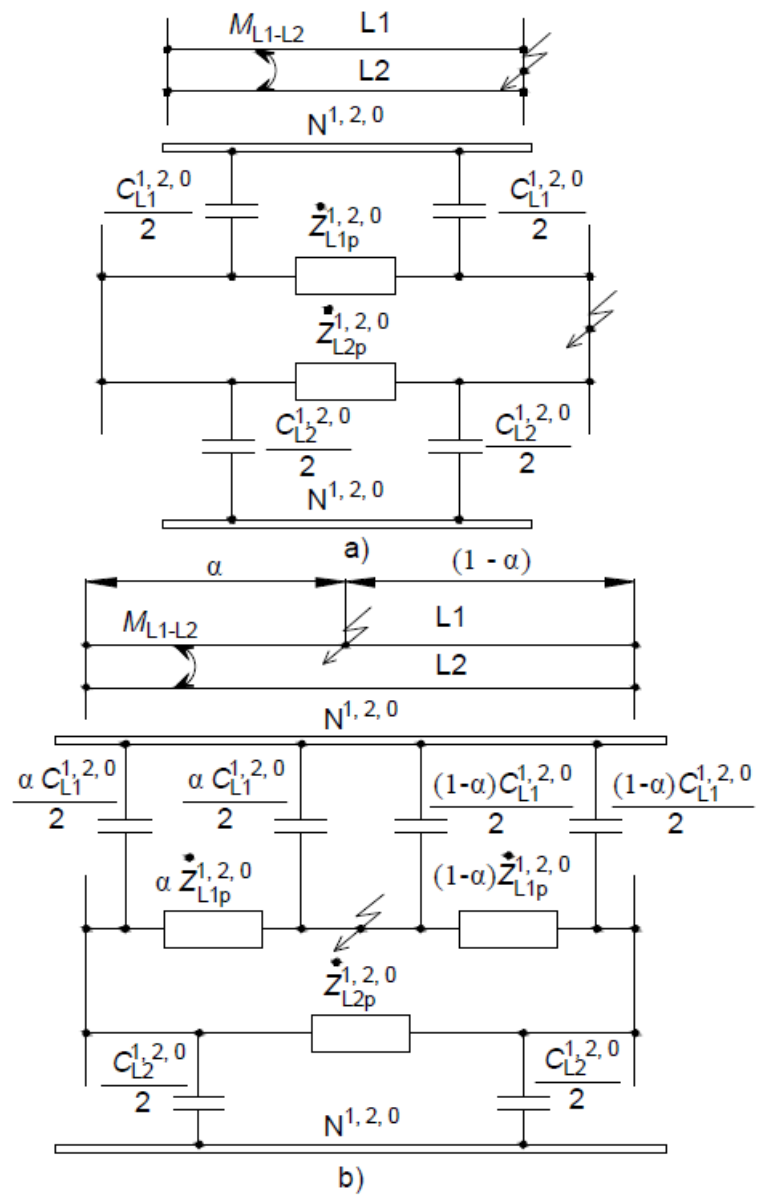
GL attālumam pārsniedzot 50 m vai veicot tuvinātus aprēķinus, pieļaujams neievērot paralēlo līniju savstarpējo NS kapacitāti, kas reducē uzdevumu līdz neatkarīgu līniju kapacitātes aprēķinam katrai līnijai, ņemot vērā konkrētās līnijas trosi. Ja trūkst informācijas par konkrēto līniju, aptuveni var pieņemt, ka TS īpatnējās kapacitātes vērtība 220–330 kV GL ar vienu vadu fāzē ir $C_{L0}^1 \approx 8,8 \cdot 10^{-9}$ F/km un 330–750 kV līnijām ar trīs vadiem fāzē $C_{L0}^1 \approx 12 \cdot 10^{-9}$ F/km. NS kapacitāti var aptuveni noteikt, balstoties uz literatūrā dotu NS kapacitātes attiecību pret TS kapacitāti $C_{L0}^0 \approx (0,55 - 0,6)C_{L0}^1$, un trošu ietekme vidēji palielina NS īpatnējo kapacitāti par 10 % [4]. Spriegumiem, sākot no 330 kV, precīzai līnijas izklaidēto parametru ievērošanai izmanto telegrāfa vienādojumus [18], kur līnijas īpatnējās pretestības aprēķina ar hiperboliskām funkcijām, un to nelinearitātes dēļ bieži tādas līnijas aizstāj ar četrpoliem, kuru lietošana ar SKM ir sarežģītāka un šajā grāmatā netiks izskatīta. Papildu informāciju par dažādiem EPL matemātiskajiem modeļiem un to nozīmīgumu šo līniju BVN algoritmos ieteicams meklēt [34].

Iepriekš izklāstītā metodika dod iespēju noteikt GL aizvietošanas shēmu parametru vērtības lielākajai daļai sastopamo GL, bet jāparāda arī praktiski izmantojamās aizvietošanas shēmu konfigurācijas, rodoties ārējam un iekšējam bojājumam (2.9.–2.12. att.). Turpinājumā parādītajās aizvietošanas shēmās pretestībām un kapacitātēm augšrakstā dotie indeksi “1, 2, 0”

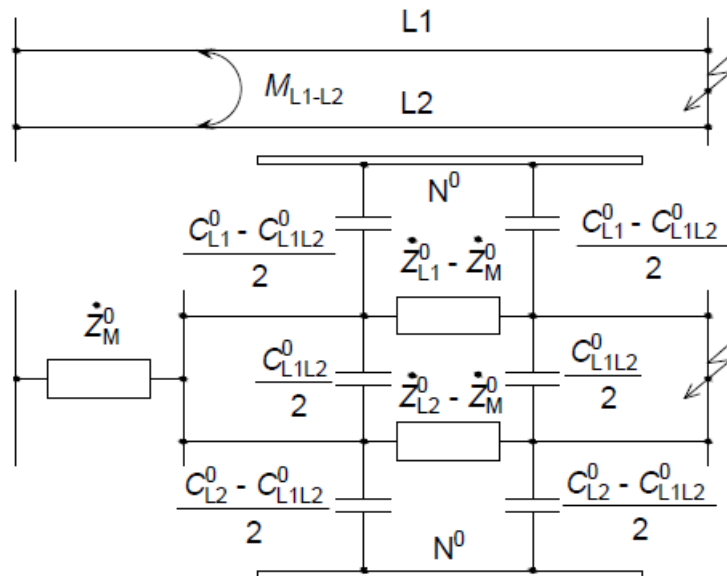
nozīmē, ka identisks risinājums izmantojams visām secību aizvietošanas shēmām. Paralēlo līniju aizvietošanas shēmām (2.10. att.) jāņem vērā, ka apakšrakstā izmantotais indekss “p” attiecas vienīgi uz NS aizvietošanas shēmām, un TS, PS iespējams izmantot neatkarīgi aprēķinātās līniju pretestības. Jābrīdina, ka šajās shēmās nav uzrādītas aktīvās vadītspējas, bet, ja tās tiek ņemtas vērā, tās sadala līdzīgā veidā kā kapacitātes.



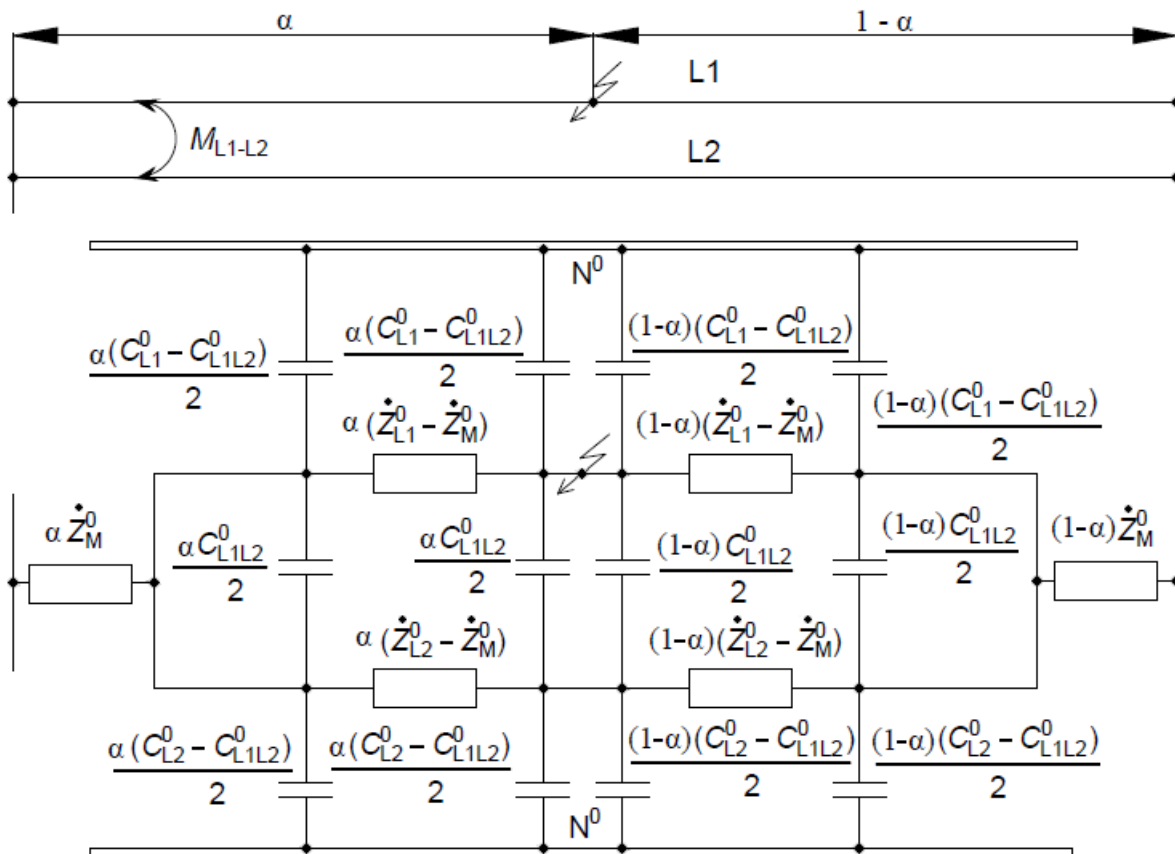
2.9. att. Vienas trīsfāžu GL aizvietošanas shēma ārējam bojājumam (a) un iekšējam bojājumam (b).



2.10. att. Divu paralēlu trīsfāžu GL aizvietošanas shēma ārējam (a) un iekšējam bojājumam, skaitliski ievērojot to savstarpējo NS mijinduktivitāti (b).



2.11. att. Divu paralēlu trīsfažu GL NS aizvietošanas shēma ārējam bojājumam, ievērojot paralēlo līniju mijinduktivitāti ar shēmas elementiem un līniju savstarpējo kapacitāti.



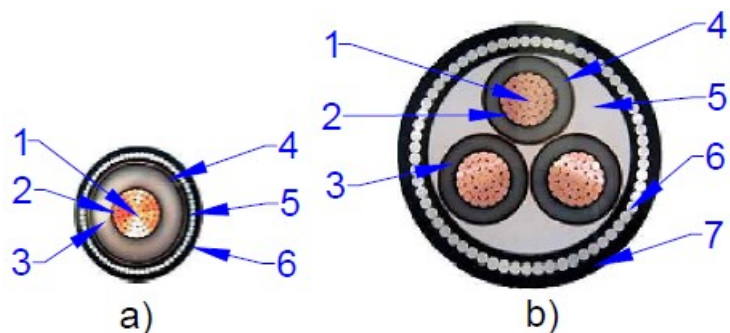
2.12. att. Divu paralēlu trīsfažu līniju NS aizvietošanas shēma iekšējam bojājumam, ievērojot paralēlo līniju mijinduktivitāti ar shēmas elementiem un savstarpējo kapacitāti.

Turpmāk aplūkotas KL un to aizvietošanas shēmu parametru noteikšana. KL pretestību aprēķins ir līdzīgs GL aprēķiniem, bet ar modifikācijām, kas izriet no to konstrukcijas

atšķirībām. Atbilstoši [8] elektriskajās sistēmās izmantotos spēka kabeļus vispārīgi var iedalīt šādās kategorijās:

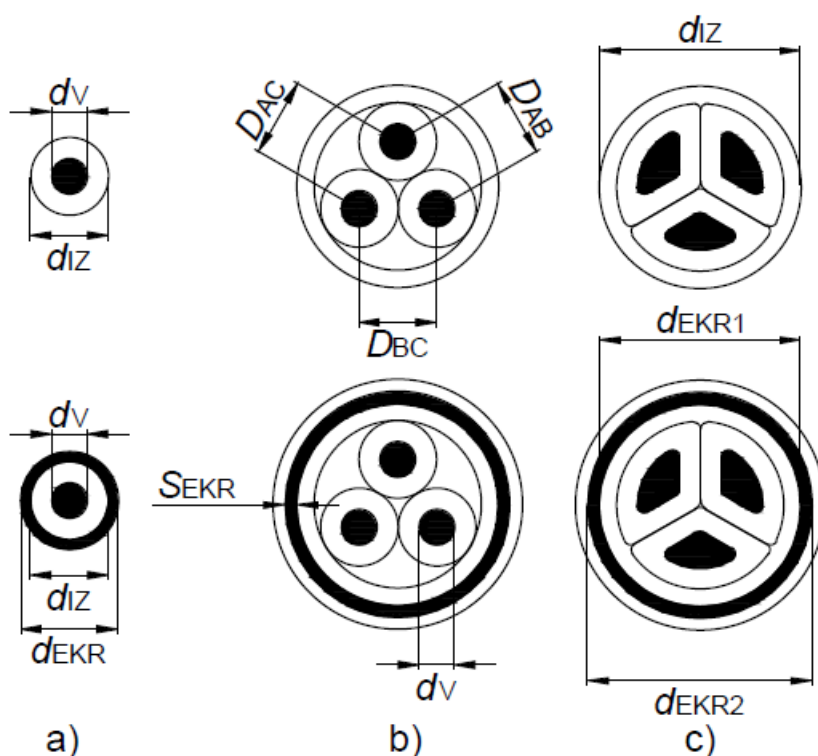
- ✓ vienfāzes kabeļi:
 - ekranēti,
 - neekranēti;
- ✓ trīsfāžu kabeļi ar aplveida dzīslu izvietojumu:
 - ekranēti,
 - neekranēti;
- ✓ trīsfāžu kabeļi ar sektorveida dzīslu izvietojumu:
 - ekranēti,
 - neekranēti.

Augstāk parādītais kabeļu saraksts izveidots laika posmā, kad galvenokārt izmantoja kabeļus ar papīra–eļļas izolāciju, bet kopumā šāds vispārīgs sadalījums vēl ir izmantojams, ja speciāli neizdala trīsfāžu kabeļus, kuriem ir fāžu ekrāni un kuriem tādu nav. Minētajai izolācijai raksturīga laba izturība pat nevienmērīga elektriskā lauka sadalījuma apstākļos, tādēļ agrāk trīsfāžu kabeļiem par ekrānu bieži kalpoja vienīgi kopējs bruņu apvalks. Mūsdienu kabeļiem izolācija visbiežāk izveidota no dažādiem polimēriem, kuriem ir mazāka izturība pret elektriskā lauka nevienmērību, tādēļ daudziem mūsdienu kabeļiem tiek ekranēta katra fāze atsevišķi, lai samazinātu daļējās izlādes starpfāžu izolācijā. Mūsdienu vienfāzes un trīsfāžu kabeļi parādīti 2.13. attēlā, kur 1 – abiem attēliem fāzes vads (parasti Al vai Cu), 2 – abiem attēliem presēta pusvadītāja slānis elektriskā lauka izlīdzināšanai, 3 – abiem attēliem šķērssaistīta jeb „šūta” polietilēna (turpmāk tekstā – *XPLE*, angļu val. *cross-linked polyethylene*) fāzes izolācijas slānis, 4 (a) – Cu lentas ekrāns ap *XPLE* slāni (parasti ar papildu Cu dzīslām un papildu pusvadītāja slāni), 4 (b) – fāzes ekrāns (parasti Cu lenta ar iekšēju pusvadītāja slāni ar vai bez papildu Cu dzīslām), 5 (b) – kabeļa iekšējā izolācija (parasti *XPLE* vai elastīgi materiāli – augsta blīvuma polietilēns (*HDPE*, angļu val. *high density polyethylene*), polietilēntereftalāts (PET) u. c.), 5 (a) un 6 (b) – kabeļa ārējais bruņu apvalks (visbiežāk izveidots no galvanizēta tērauda dzīslām, veciem kabeļiem iespējamas arī Pb dzīslas vai apvalks), 6 (a) un 7 (b) – ārējā kabeļa izolācija (polietilēns (turpmāk tekstā – PE) vai polivinilhlorīds (turpmāk tekstā – *PVC*, angļu val. *Polyvinyl chloride*)) [35]. Starp minētajiem slāņiem bieži tiek uzklāti plāni papildu elektroizolācijas un hidroizolācijas slāņi.



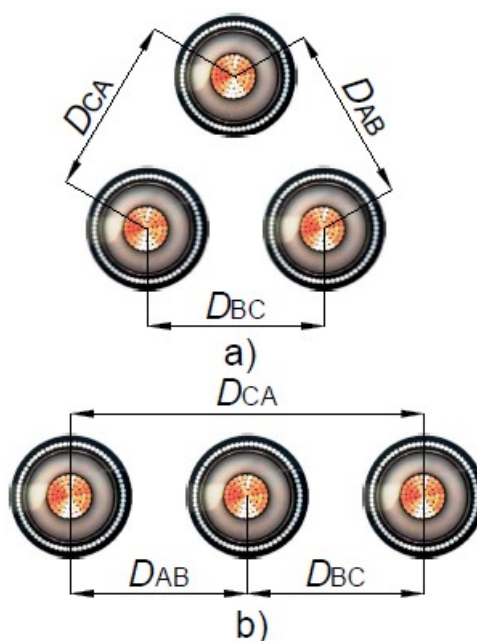
2.13. att. Ekranēta vienfāzes kabeļa bruņu apvalkā šķērsgriezums (a); kopējā bruņu apvalkā iekļauta trīsfāžu kabeļa ar ekranētiem fāžu vadiem šķērsgriezums (b) [35].

Turpinājumā ir lietderīgi aplūkot kabeļu veidus ar būtiskākajiem to izmēriem (2.14. att.).



2.14. att. Neekranēta un ekranēta vienfāzes kabeļa (a), neekranēta un ekranēta trīsfāžu kabeļa ar aplveida dzīslu izvietojumu (b), neekranēta un ekranēta trīsfāžu kabeļa ar sektorveida dzīslu izvietojumu (c) šķērsgriezumi un tos raksturojošie izmēri [8].

AS tīklos plaši izmanto sistēmas ar trim vienfāzes kabeļiem, kurus izvieto trīsstūra konfigurācijā vai vienā plāknē (2.15. (a) un 2.15. (b) att.).



2.15. att. Trīs ekranētu vienfāzes kabeļu bruņu apvalkos sistēmas izvietojums trīsstūra konfigurācijā (a) un vienā plaknē (b) ar to savstarpējiem attālumiem [35].

Aktīvo pretestību fāzes vadam iespējams aprēķināt ar vispārīgās fizikas formulas (2.31.) vai nedaudz modificētās formulas (2.32.) palīdzību. Ekrāna vai bruņu apvalka aktīvās īpatnējās pretestības aprēķinam iespējams (2.31.) ievietot izteiksmi divu riņķu šķērsriezuma laukumu starpības aprēķinam:

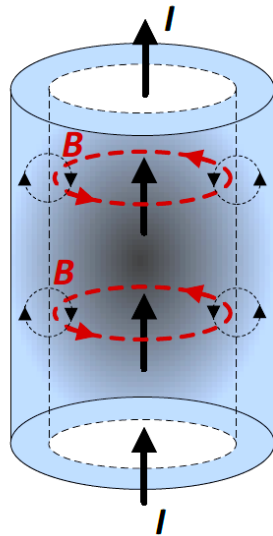
$$R_{\text{EKR0}} = 4000\rho / \left(\pi(d_{\text{EKR2}}^2 - d_{\text{EKR1}}^2) \right) = 1000\rho / \left(\pi(r_{\text{EKR2}}^2 - r_{\text{EKR1}}^2) \right), \quad (2.84.)$$

kur R_{EKR0} – ekrāna vai bruņu apvalka īpatnējā aktīvā pretestība, Ω/km ;

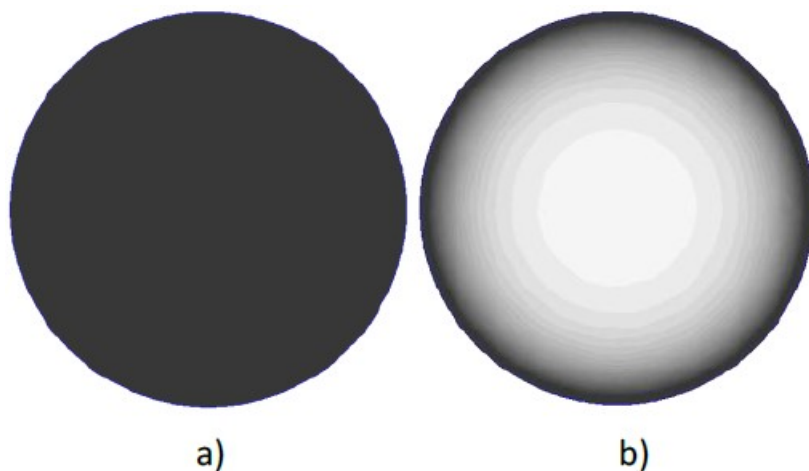
$d_{\text{EKR1}}^2, d_{\text{EKR2}}^2$ – ekrāna vai bruņu apvalka iekšējais un ārējais diametrs, m;

$r_{\text{EKR1}}^2, r_{\text{EKR2}}^2$ – ekrāna vai bruņu apvalka iekšējais un ārējais rādiuss, m.

AC KL aprēķinos var rasties nepieciešamība aplūkot skinefekta ietekmi. Skinefekts kā parādība novērojams AC ķēdēs, jo vadā plūstošā strāva I rada mainīgu magnētisko lauku ar indukciju B , kuras izsuktās virpuļstrāvas virziens vada centrālajos slāņos ir pretējs strāvas I virzienam, bet vada ārējos slāņos sakrīt ar strāvas I virzienu (2.16. att.). Skinefekta ietekme ir ļoti atkarīga no frekvences. Skinefekta rezultātā strāva pie augstām frekvencēm un lieliem vadu šķērsriezumu laukumiem plūst vairāk pa vada ārējo slāni un, samazinoties izmantotajam šķērsriezuma laukumam, palielinās vada ekvivalentā aktīvā pretestība. Salīdzinājumam strāvas blīvuma sadalījumu vadā pie 50 Hz un 5 kHz frekvences iespējams novērtēt, aplūkojot [36] parādītos simulāciju rezultātus (2.17. att.).



2.16. att. Vadā plūstošās strāvas I radītais magnētiskais lauks un tā izsauktās virpuļstrāvas [36].



2.17. att. Strāvas blīvuma sadalījums apaļā Cu AWG-0000 markas vada (diametrs – 11,7 mm, šķērsriezuma laukums – 107 mm^2 un kopējās vadā plūstošās strāvas stiprums – 10 A) šķērsriezumā pie 50Hz (a) un 5 kHz frekvences (b) [36].

Praktiskos aprēķinos skinefektu ievēro, reizinot vada DC īpatnējo pretestību $R_0 = R_{DC}$, kuru iegūst, izmantojot formulu (2.31.) vai (2.32.), ar skinefekta koeficientu K_{SK} . Cu vadiem pie 50 Hz sprieguma frekvences skinefekta koeficients sasniedz vērtību 1,05 (t. i., ja neievēro skinefektu, aktīvās pretestības aprēķinā radīsies 5 % kļūda), sākot no 500 mm^2 šķērsriezuma laukuma [8], [25]. Ņemot vērā, ka Al vadiem skinefekta dziļums ir nedaudz lielāks, arī šim materiālam var neievērot skinefektu vadītājiem vismaz līdz 500 mm^2 šķērsriezuma laukumam un vajadzības gadījumā pieļaujams izmantot Cu atbilstošos K_{SK} . Dažāda šķērsriezuma laukuma vadītāju skinefekta koeficienti parādīti 2.9. tabulā.

Skinefakta koeficienta vērtība Cu vadiem pie 65°C un 50 Hz, 60 Hz frekvences [8]

Vada izmēri		Skinefakta koeficients, K_{SK}	
S_{SK} , mm ²	d_V , mm	$f = 60$ Hz	$f = 50$ Hz
1520,0	50,75	1,4390	1,3360
1267,0	46,40	1,3360	1,2530
1012,0	41,40	1,2390	1,1750
760,0	36,00	1,1450	1,1030
507,0	29,30	1,0680	1,0490
406,0	26,20	1,0460	1,0320
304,0	22,70	1,0260	1,0180
253,4	20,65	1,0180	1,0125
202,7	18,50	1,0120	1,0080
152,0	16,00	1,0060	1,0040

Trīsfāžu kabeļiem bez fāžu ekrāniem TS un PS aktīvo pretestību (neatkarīgi no ārēja bruņu apvalka esamības) var aprēķināt, izmantojot vienādojumu (2.32.) un 2.1. tabulu, bet trīs vienfāzes ekrānētu kabeļu sistēmai un trīsfāžu kabeļiem ar fāžu ekrāniem ir novērojams aktīvās pretestības pieaugums, kas saistāms ar ekrānos inducēto strāvu radītajiem jaudas zudumiem. Šis pieaugums rodas, ja kabeļu ekrāns veido noslēgtu ķēdi, piemēram, zemējot tā abus galus. Kabeļa ekrānos inducētais EDS 1 km garā kabelī, fāzes vados plūstot 1 A stiprai strāvai, skaitliski vienāds ar īpatnējo mijinduktivitātes pretestību starp ekrānu un fāzes vadiem, bet strāvas stiprumu ekrānā iespējams izteikt, izmantojot Oma likumu [6], [8], [25]:

$$I_{EKR0} = E_{EKR0} / \sqrt{R_{EKR0}^2 + X_{EKR0}^2} = X_{MEKR0} / \sqrt{R_{EKR0}^2 + X_{EKR0}^2}, \quad (2.85.)$$

kur I_{EKR0} – īpatnējais fāzes ekrāna strāvas stiprums, A/km;

E_{EKR0} – fāzes ekrānā inducētais īpatnējais EDS, V/km;

R_{EKR0} , X_{EKR0} – fāzes ekrāna īpatnējā aktīvā un induktīvā pretestība, Ω /km;

X_{MEKR0} – īpatnējā fāžu un ekrānu mijinduktivitātes pretestība, Ω /km.

Ekrānos inducētās strāvas dēļ radušies īpatnējie aktīvās jaudas zudumi kabeļa ekrānos ir nosakāmi šādi [6], [8], [25]:

$$\Delta P_{EKR0} = I_{EKR0}^2 R_{EKR0} = X_{MEKR0}^2 R_{EKR0} / (R_{EKR0}^2 + X_{EKR0}^2), \quad (2.86.)$$

kur ΔP_{EKR0} – īpatnējie aktīvās jaudas zudumi ekrānā, W/km.

Mijinduktivitātes pretestību nosaka, modificējot Karsona divu vadu mijinduktivitātes modeli [6], [8], [25]:

$$X_{MEKR0} \approx X_{EKR0} = 2,8938 \cdot 10^{-3} f \cdot \lg(D_{vid}/r_{GEKR}), \quad (2.87.)$$

kur r_{GEKR} – viena ekrāna vidējais ģeometriskais rādiuss, m.

Fāzes ekrāna vidējo ģeometrisko rādiusu nosaka šādi [6], [8], [25]:

$$r_{GEKR} = (r_{FEKR1} + r_{FEKR2})/2 = (d_{FEKR1} + d_{FEKR2})/4, \quad (2.88.)$$

kur r_{FEKR1} , r_{FEKR2} – fāzes ekrāna iekšējais un ārējais rādiuss, m;

d_{FEKR1} , d_{FEKR2} – fāzes ekrāna iekšējais un ārējais diametrs, m.

Ņemot vērā, ka ekrāna pašinduktivitāti nosaka tās pašas plūsmas starp ekrānu un fāžu vadiem, ekrāna pašinduktivitātes pretestība praktiski sakrīt ar mijinduktivitātes pretestību $X_{\text{EKR}} \approx X_{\text{MEKR}}$ [6], [8], [25]. Ekrāna aktīvo pretestību 1 km iespējams aprēķināt ar formulu (2.87.). Attiecīgi TS un PS īpatnējā pretestība trīs vienfāzes kabeļu sistēmai un trīsfāžu kabelim ar zemētiem fāžu ekrāniem būs [6], [8], [25]:

$$R_{L0}^1 = R_{L0}^2 = R_{L0} + X_{\text{MEKR}0}^2 R_{\text{EKR}0} / (R_{\text{EKR}0}^2 + X_{\text{EKR}0}^2). \quad (2.89.)$$

Atbilstoši [8], [25] ekrānos radušos zudumu pretestība var veidot pat 50 % no aktīvās īpatnējās pretestības, kas aprēķināta vadam DC plūšanas gadījumā ar (2.32.), un zināms, ka praksē abpusēji zemētos vienfāzes kabeļu ekrānos inducētās strāvas var radīt kabeļu būtisku sakaršanu.

Turpinājumā aplūkosim KL TS un PS īpatnējās inductīvās pretestības aprēķinu. Induktivitāti un inductīvo pretestību noteiksim sākumā vienam neekranētam vienfāzes kabelim atkarībā no tā izolācijas un vada diametra [37]:

$$X_{L0}^1 = X_{L0}^2 = 2\pi f L^1 = 2\pi f \cdot 2\ln(d_{\text{IZ}}/d_v) \approx 28,903 f \lg(d_{\text{IZ}}/d_v), \quad (2.90.)$$

un vienam ekranētam vienfāzes kabelim, izmantojot formulas, kas izstrādātas koaksiālam kabelim [19], [38], [39]:

$$X_{L0}^1 = X_{L0}^2 = 2\pi f \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} (\ln(d_{\text{EKR}2}/d_v) + 0,25) \approx 0,016 + 0,063 \ln(r_{\text{EKR}2}/r_v), \quad (2.91.)$$

kur X_{L0}^1, X_{L0}^2 – īpatnējā KL TS un PS inductīvā pretestība, Ω/km ;

L^1 – īpatnējā KL TS inductivitāte, H/km ;

μ_0 – magnētiskā konstante ($4\pi \cdot 10^{-7}$), H/m ;

d_{IZ} – izolācijas slāņa diametrs (2.14. (a) att.), m ;

d_v, r_v – fāzes vada diametrs un rādiuss (praktiskos aprēķinos aizvieto ar

ģeometrisko rādiusu r_{Gv} , aprēķinot to ar (2.35.) un tuvināti pieņemot

ekvivalentēšanas koeficientu $k_E = 0,779$ vai izvēloties vērtību no 2.2. tabulas), m .

Trīs vienfāzes ekranētiem kabeļiem un trīsfāžu kabeļiem ar fāžu ekrāniem, nosakot TS un PS īpatnējo inductivitāti, analogiski aktīvai pretestībai ekrāni ievieš korekcijas, vienīgi tagad jāievēro strāvas pretējais virziens atbilstoši Lorenca likumam un ekrāna aktīvās pretestības vietā ekrāna strāvas izteiksme jāreizina ar mijinduktivitātes pretestību [6], [8], [25]:

$$X_{L0}^1 = X_{L0}^2 = 2,8938 \cdot 10^{-3} f \lg(D_{\text{vid}}/r_{\text{Gv}}) - X_{\text{MEKR}0}^3 / (R_{\text{EKR}0}^2 + X_{\text{MEKR}0}^2). \quad (2.92.)$$

Kopīga bruņu apvalka ietekme uz trīsfāžu kabeļu bez fāžu ekrāniem ar simetrisku vadu izvietojuma TS un PS pretestību ir niecīga, un iespējams izmantot vienkāršotu (2.92.) izteiksmes formu [6], [8], [25]:

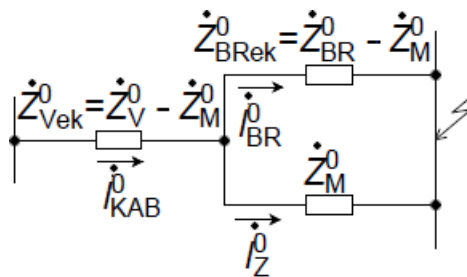
$$X_{L0}^1 = X_{L0}^2 = 2,8938 \cdot 10^{-3} f \lg(D_{\text{vid}}/r_{\text{Gv}}). \quad (2.93.)$$

Aprakstītā ekrāna ietekmes aprēķinu metodika ir izstrādāta teorētiski, un iegūtās pretestības var atšķirties no ražotāju datiem, jo ražotājs, visticamāk, veic precīzu elektriskā lauka modelēšanu vai ignorē ekrānu ietekmi aprēķinos, vai arī veic mērījumus, praktiski nosakot kabeļa parametrus. Kabeļiem ar sektoru dzīslām aktīvo pretestību izmaina tikai atšķirības šķērsgriezuma laukuma aprēķinā, bet reaktīvai pretestībai no [40] zināms, ka pie vienāda

šķērsriezuma laukuma un izolācijas biezuma trīsfāžu kabelim ar sektora veida dzīslām būs par 5–10 % mazāka induktivitāte.

Līdzīgi kā KL TS un PS parametru aprēķinos, arī NS parametri ir atkarīgi no tā, vai fāžu ekrāni un ārējais bruņu apvalks ir abpusēji zemēti. Zemēti fāžu ekrāni un kabeļu bruņu apvalki NS parametru noteikšanā jāievēro līdzīgi kā zibensaizsardzības troses GL, radot zemei paralēlus NS strāvas noslēgšanās ceļus, kas samazina kabeļa novēroto NS pretestību. Mēdz būt kabeļi, kuriem ir papildu dzīslas kabeļa nostiprināšanai vai citu iemeslu dēļ, un šīs dzīslas arī aplūko kā troses GL. Ja kabeļa ekrāni, bruņu apvalks un iespējamās papildu dzīslas ir izolētas, tad NS strāva var noslēgties vienīgi pa zemi un iespējams izmantot trīsfāžu līnijas NS pretestības izteiksmi (2.37.).

Ja veikti divpusēji ekrānu un/vai papildu dzīslu zemējumi, tad, līdzīgi kā GL ar zemētu zibensaizsardzības trosi, pastāv mijinduktivitāte starp kontūriem F–Z un bruņu apvalks–zeme vai ekrāns–zeme, vai arī papildu dzīslas–zeme, kas ļauj izmantot pielāgotu līnijas ar trosi ekvivalento Y veida aizvietošanas shēmu (2.18. att.) [8], [14]. Vispirms jāatzīmē, ka atšķirībā no GL kabeļi visbiežāk tiek guldīti zemē, bet Karsona pētījumi [41] parādīja, ka, kabelim atrodoties zemē, strāvas sadalījums tiek kropļots minimāli un zemē plūstošajai strāvai pretestības izmaiņas ir 5–10 %. Ņemot vērā, ka kabeļu ekrānus un bruņu apvalkus parasti veido strāvu labi vadoši materiāli (Pb, Al, Cu u. c.), zemes pretestības izmaiņu precīzs aprēķins nav obligāts [8].



2.18. att. Kabeļa ar zemētu bruņu apvalku NS aizvietošanas shēma [6], [8], [25].

Šīs aizvietošanas shēmas pretestības nosaka pēc Karsona modeļa ar vidējiem ģeometriskajiem attālumiem, ņemot vērā, ka daļa no visu trīs fāžu NS strāvām noslēdzas bruņu apvalkā [6], [8], [25]:

$$\dot{Z}_{M0}^0 = 2,958 \cdot 10^{-3} f + j8,6814 \cdot 10^{-3} f \lg(D_{Zkab}/r_{GBR}), \quad (2.94.)$$

$$\dot{Z}_{v0}^0 = R_0 + 2,958 \cdot 10^{-3} f + j8,6814 \cdot 10^{-3} f \lg(D_{Zkab}/r_{GV}), \quad (2.95.)$$

$$\dot{Z}_{BR0}^0 = 3R_{BR0} + 2,958 \cdot 10^{-3} f + j8,6814 \cdot 10^{-3} f \lg(D_{Zkab}/r_{GBR}), \quad (2.96.)$$

kur D_{Zkab} – zemē plūstošās strāvas ekvivalentā vada dziļums (nosaka pēc (2.39.)), bet ar

koriģētu proporcionalitātes koeficientu $D_{Zkab} = 563\sqrt{\rho/f}$ [8]), m;

R_0, R_{BR0} – vada un bruņu apvalka īpatnējā aktīvā pretestība (atbilstoši (2.32.) un (2.84.)), Ω/km .

Izteiksmēs (2.94.)–(2.96.) redzams, ka fāžu vada ekvivalentās pretestības aktīvajai daļai nav reizinātāja 3, bet bruņu apvalka pretestības aprēķinos šāds reizinātājs ir. Skaidrojums ir apstākļi, ka NS pretestību aplūko kā sprieguma kritumu uz vienu fāzi, bet faktiski bruņu apvalkā, līdzīgi

kā sazemētā trosē, noslēdzas daļa no visu trīs fāžu NS strāvām $3I_{BR}^0$. Ja kabelī iestrādāta papildu vadoša zemēta dzīsla, tad, izmantojot 2.18. attēlā redzamo aizvietošanas shēmu, dzīslas aktīvo pretestību tāda paša iemesla dēļ reizina ar 3, bet trīs atsevišķu fāžu ekrānu un trīs ekranētu vienfāzes kabeļu gadījumā katrā no ekrāniem noslēdzas daļa no viena fāzes NS strāvas un, līdzīgi fāzes vadiem, nav nepieciešams šāds reizinājums. Balstoties uz 2.18. attēlā redzamo aizvietošanas shēmu, analogiski GL ar trosi iespējams noteikt KL ekvivalento īpatnējo NS pretestību, NS strāvai sadaloties pa bruņu apvalku un zemi:

$$\dot{Z}_{L0}^0 = \dot{Z}_{vekv0}^0 + \dot{Z}_{BRekv0}^0 \dot{Z}_{M0}^0 / (\dot{Z}_{BRekv0}^0 + \dot{Z}_{M0}^0) = \dot{Z}_{v0}^0 - (\dot{Z}_{M0}^0)^2 / \dot{Z}_{BR0}^0. \quad (2.97.)$$

Informācijas trūkuma gadījumā tuvinātiem aprēķiniem vēlams izmantot NS un TS pretestību attiecības: $R^0 \approx 10R^1$ un $X^0 \approx (3,5-4,6)X^1$ [14], [25].

Trīs vienfāzes ekranētu kabeļu sistēmas NS īpatnējās pretestības aprēķinu iespējams veikt, izmantojot 2.18. attēlā parādīto aizvietošanas shēmu, ņemot vērā iepriekš minēto reizinājumu izmantošanas īpatnības un bruņu apvalka vietā nosakot trīs ekrānu ekvivalento NS pretestību, bet vienādojumos (2.94.)–(2.96.) jāizmanto trīs kabeļu vidējie ģeometriskie ekrānu un vadu rādiusi [8]:

$$r_{G3EKR} = \sqrt[9]{r_{GEKR}^3 (D_{AB} D_{BC} D_{CA})^2}, \quad (2.98.)$$

$$r_{G3v} = \sqrt[9]{r_{Gv}^3 (D_{AB} D_{BC} D_{CA})^2}, \quad (2.99.)$$

kur r_{G3EKR} , r_{G3v} – trīs kabeļu ekrānu un vadu vidējie ģeometriskie rādiusi, m;

r_{GEKR} , r_{Gv} – viena kabeļa ekrāna un fāzes vada vidējie ģeometriskie rādiusi, m;

D_{AB} , D_{BC} , D_{AC} – attālumi starp A, B un C fāzes vadu ģeometriskajiem centriem, m.

Ja KL ir gan zemēts bruņu apvalks, gan zemēti fāžu ekrāni ekvivalentās NS pretestības noteikšanai, iespējams izmantot P.9.3. attēlā redzamo NS modeli un aprēķina piemēru. Vairākas paralēlas trīsfāžu KL ar bruņu apvalkiem iespējams apvienot 2.18. attēlā redzamajā aizvietošanas shēmā, ja apvalka un vada pretestības tiek izdalītas ar kabeļu skaitu, un (2.94.)–(2.95.) izmanto ekvivalentos rādījumus, kas noteikti, izmantojot attālumus starp KL, nevis fāzēm: divām KL $r_{G2KL} = \sqrt{r_{Gv} D_{L1L2}}$, trīs KL izmanto (2.98.) un (2.99.), aizstājot fāžu attālumus ar līniju attālumiem, četrām KL izmanto $r_{G4KL} = \sqrt[16]{r_{Gv}^4 D_{L1L2}^6 (D_{L1L2} + D_{L2L3})^4 (D_{L1L2} + D_{L2L3} + D_{L3L4})^2}$. Kabeļu ekrāniem iespējams izmantot iepriekš aplūkotās izteiksmes, aizstājot fāžu vadu vidējo ģeometrisko rādījumu ar ekrāna ģeometrisko rādījumu r_{GEKR} [8]. Paralēlu KL ar bruņu apvalkiem gadījumā atsevišķas līnijas NS pretestības aprēķinam, skaitliski ievērojot paralēlo kabeļu mijinduktivitāti un ekrānu ietekmi, iespējams izmantot paralēlo līniju ar trosēm aprēķina secību. Vispirms tiek noteikta viena kabeļa un ekvivalentā apvalka NS pretestība (vienādojumos (2.94.) un (2.95.) izmanto vidējo ģeometrisko bruņu apvalku rādījumu, bet vadam – viena kabeļa ģeometrisko rādījumu). Tad ar vienādojumu (2.94.) nosaka paralēlo līniju mijinduktivitāti, apvalka rādījumu aizstājot ar vidējo attālumu starp KL (2.41.), kurā var ņemt vērā apvalku ietekmi atbilstoši (2.53.), izmantojot apvalku mijinduktivitātes no viena kabelis–ekvivalentais apvalks aprēķina un troses pretestību

aizvietojo ar ekvivalentā apvalka aktīvo pretestību. Beigās katrai no KL pie sākotnējās pretestības, kura atbilst vienam kabelim ar ekvivalento apvalku, pieskaita mijinduktivitātes pretestību, kura ir pārrēķināta, lai ievērotu šīs pretestības izmaiņas ekvivalentā bruņu apvalka ietekmes dēļ.

Turpinājumā aplūkojams vienfāzes un trīsfāžu KL kapacitāšu aprēķins. Vienfāzes ekrānētiem kabeļiem un trīsfāžu kabeļiem ar fāžu ekrāniem katru fāzi var uzskatīt par izstieptu cilindrisku kondensatoru, kura kapacitāte aprēķināma šādi [37], [42]:

$$C_{L0} = \varepsilon_{IZr} / [18 \ln(r_{IZ}/r_0)], \quad (2.100.)$$

kur C_{L0} – īpatnējā KL kapacitāte, $\mu\text{F}/\text{km}$;

r_{IZ}, r_0 – izolācijas ārējais un vada (ar tam uzklāto pusvadītāja slāni) rādiuss, m;

ε_{IZr} – izolācijas relatīvā dielektriskā caurlaidība attiecībā pret elektrisko konstanti

$\varepsilon_0 = 8,9 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ (vērtības dotas 2.10. tabulā), r. v.

Šādiem kabeļiem visu secību kapacitātes būs vienādas.

Trīsfāžu kabelim, kam ir kopīgs bruņu apvalks un nav fāžu ekrānu, darba jeb TS un PS kapacitāti nosaka formula [37], [42]:

$$C_{L0} = 0,048 \varepsilon_{IZr} / \lg \left(\left[3D_{\text{vid}}^2 (d_{\text{BR1}}^2 - D_{\text{vid}}^2)^3 \right] / \left[d_v^2 (d_{\text{BR1}}^6 - D_{\text{vid}}^6) \right] \right), \quad (2.101.)$$

kur d_{BR1}, d_v – bruņu apvalka iekšējais diametrs un vada diametrs, m.

2.10. tabula

Izolācijas materiālu relatīvā dielektriskā caurlaidība [43]

Materiāls	ε_{IZr} , r. v.
PE	2,28
<i>XPLE</i>	2,50
Polipropilēns	2,25
Butila gumija	2,45
<i>PVC</i>	2,79
Parasts papīrs	2,30
Transformatoru eļļa	2,20

NS kapacitāti šādiem kabeļiem iespējams aptuveni noteikt, izmantojot attiecību starp NS un TS īpatnējām kapacitātēm. Balstoties uz raksturlielēm, kas dotas [8], trīsfāžu KL bez fāžu ekrāniem NS un TS kapacitatīvo pretestību attiecību var pieņemt aptuveni $X_{LC}^0/X_{LC}^1 \approx 1,5 - 1,9$ gan apļveida dzīslu, gan sektorveida dzīslu šķērsriezuma gadījumā vai noteikt ar jau minēto raksturlielņu palīdzību. Attiecīgi var iegūt, ka NS un TS kapacitāšu attiecība $C_L^0/C_L^1 \approx 0,526-0,667$. Trīsfāžu kabeļiem ar sektorveida dzīslu formu [37] norādīts, ka TS īpatnējo kapacitāti iespējams aprēķināt ar (2.101.) formulu, bet jāpieņem, ka šķērsriezuma laukums ir par 50 % lielāks nekā faktiskais, vienlaikus nemainot izolācijas un ekrāna izmērus, bet arī šajā ziņā visdrošākais veids precīzu KL aizvietošanas shēmas parametru noteikšanai ir praktiski mērījumi.

Zemsprieguma (turpmāk tekstā – ZS) kabeļi tipveidā ietver arī neitrāles un zemēšanas vadus vai vienu šim nolūkam apvienotu (turpmāk tekstā – PEN, angļu val. *protective earthing and neutral*) vadu (2.19. att.).



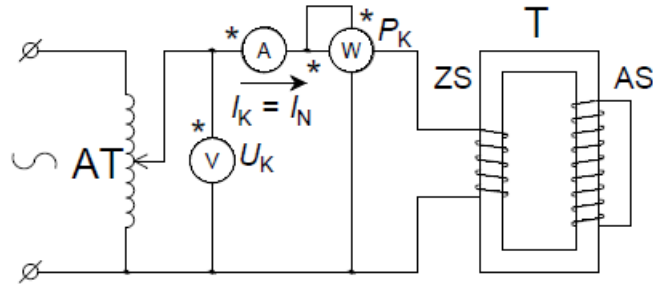
2.19. att. ZS kabelis ar neitrāles un zemēšanas vadiem un kabelis ar neitrāles vadu un bruņu apvalku [44].

Šādos gadījumos TS parametru noteikšanai visērtāk ir izmantot ražotāju datus. NS kapacitāti tuvināti var noteikt, izmantojot iepriekš doto attiecību. NS aktīvo īpatnējo pretestību tuvināti iespējams noteikt no fāzes vada un neitrāles vada īpatnējām pretestībām ($R_{L0}^0 \approx R_{F0} + 3R_{N0}$), bet NS inductīvo pretestību var noteikt kā trīsfāžu GL ar divām trosēm (kabeļiem ar atsevišķu neitrāles un zemēšanas vadu) vai trosi (kabeļiem ar vienu neitrāles vai *PEN* vadu) un bruņu apvalku atbilstoši 2.18. attēlā parādītajai aizvietošanas shēmai, vai jāveido NS mijinduktivitāšu un pretestību modeļi, kā tas parādīts P.9.3. attēlā. Precīzas NS pretestības noteikšanai jāveic kabeļa lauka modelēšana vai eksperimentāli mērījumi.

Dažādu ražotāju publicētie kabeļu elektriskie parametri aprēķinu veikšanai un to savstarpējai salīdzināšanai ar teorētiski noteiktām vērtībām apkopoti 3.–6. pielikumā.

2.3. Spēka transformatori un autotransformatori

Turpinājumā aplūkosim spēka transformatoru un autotransformatoru aizvietošanas shēmas un to parametru noteikšanu. Transformatoru ražotāji norāda transformatora tipveida datus par tukšgaitas režīma un īsslēguma režīma mērījumiem. Bojājumu aprēķinos visbiežāk nepieciešami tieši īsslēguma eksperimenta dati. Īsslēguma eksperimenta mērījumus veic, īsslēdzot transformatora sekundāro tinumu un ar regulējamu sprieguma avotu (piemēram, autotransformatoru) ieregulējot tādu primārā tinuma spriegumu, lai primārā tinuma strāvas stiprums būtu vienāds ar nominālo (2.20. att.). Šajos mērījumos barošanas spriegumu nereti pieslēdz AS transformatoru ZS tinumam, jo regulējama AS avota iegūšana ir salīdzinoši sarežģīta.



2.20. att. Vienfāzes transformatora īsslēguma eksperimenta shēma [10].

Veicot 2.20. attēlā parādīto eksperimentu, iespējams nomērīt ZS tinuma nominālajai strāvai atbilstošo īsslēguma spriegumu U_K un īsslēguma aktīvo jaudu (jeb jaudas zudumus) P_K . Abus lielumus bieži izsaka arī procentos no tinuma nominālā sprieguma ($U_{K\%} = U_K \cdot 100 / U_N$) un transformatora nominālās pilnās jaudas ($P_{K\%} = P_K \cdot 100 / S_N$). Divtinumu transformatoriem $U_{K\%}$ parasti veido 5–13 %. Daudztinumu transformatoriem ir atsevišķs aprēķins un $U_{K\%}$ uzdošanas veids, kas tiks aprakstīts turpmāk. Zinot īsslēguma sprieguma $U_{K\%}$ vērtību, iespējams noteikt transformatora pilnās pretestības moduli ar modificētu Oma likuma pierakstu [2], [18]:

$$Z_T = U_K / I_{NT} = U_{K\%} U_{NT}^2 / (100 S_{NT}), \quad (2.102.)$$

kur Z_T – transformatora pilnās pretestības modulis, Ω ;

$U_K, U_{K\%}$ – īsslēguma spriegums, V un %;

I_{NT} – transformatora nominālā strāva, A;

U_{NT} – transformatora nominālais spriegums (bieži tinuma, kura nomināls ir tuvākais aprēķina spriegumam), V;

S_{NT} – transformatora nominālā pilnā jauda, VA.

Lieljaudas transformatoriem ($S_{NT} > 1$ MVA) relatīvi mazo aktīvās jaudas zudumu dēļ tuvinātos aprēķinos pieļaujams aktīvo pretestību neņemt vērā ($R_T \approx 0 \Omega$ un $X_T \approx Z_T$), bet zemākas jaudas transformatoriem aktīvā pretestība jāņem vērā (it īpaši, ja $S_{NT} < 2$ kVA). Vispārīgi novērojams, ka transformatoram ar mazāku nominālo jaudu atbilst zemāka inductīvās un aktīvās pretestības attiecība X_T / R_T un mazjaudīgiem transformatoriem iespējams, ka $R_T > X_T$. Aktīvo pretestību var noteikt, izmantojot īsslēguma eksperimentā noteiktos aktīvās jaudas zudumus [7]:

$$R_T = P_K U_{NT}^2 / S_{NT}^2 = U_{NT}^2 P_{K\%} / (100 S_{NT}), \quad (2.103.)$$

kur R_T – transformatora aktīvā pretestība, Ω ;

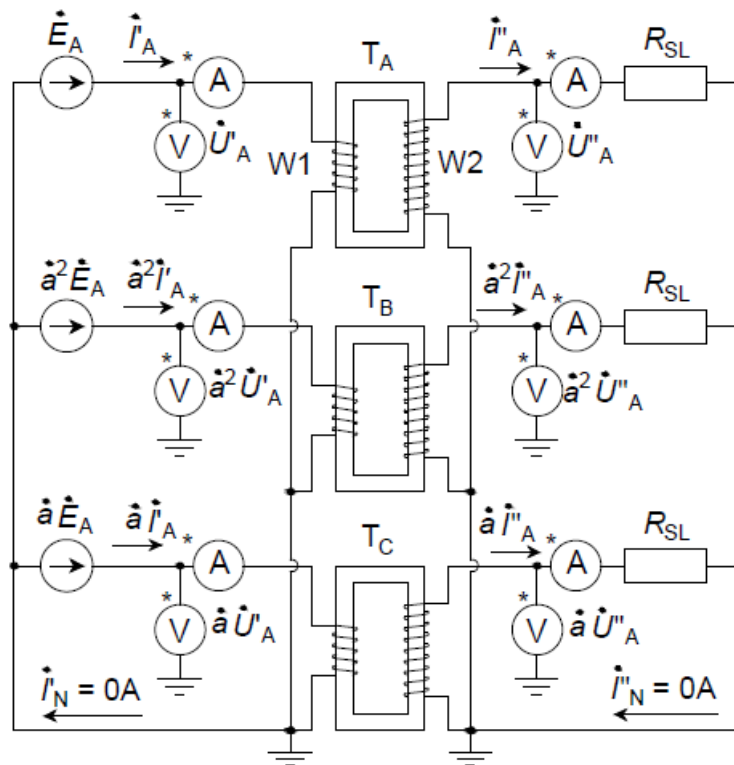
P_K un $P_{K\%}$ – īsslēguma jauda jeb īsslēguma jaudas zudumi, W un %.

Zinot transformatora aktīvo pretestību un pilnās pretestības moduli, iespējams noteikt transformatora inductīvo pretestību no pretestību trijstūra:

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}. \quad (2.104.)$$

Turpinājumā aplūkosim, kādā veidā transformatori jāievēro secību aizvietošanas shēmās. Ilustrācijai sākumā var analizēt trīsfāžu sistēmu, kur slodzes pārestības R_{SL} pieslēdz barošanas avotam ar trīs vienfāzes transformatoru grupu (2.21. att.). Transformatoru primārie tinumi W1

un sekundārie tinumi W2 saslēgti zvaigznes shēma ar zemētu neitrāli. Parādītās vienfāzes transformatoru grupas primārie tinumi pieslēgti simetriskai TS EDS sistēmai $\dot{E}_A, \dot{E}_B = \dot{a}^2 \dot{E}_A, \dot{E}_C = \dot{a} \dot{E}_A$ un sekundārie tinumi pieslēgti simetriskai slodzei. Simetriskai sistēmai, izsakot primārā un sekundārā tinuma neitrālēs plūstošās strāvas kā fāžu strāvu summu, iegūst $\dot{I}'_N = \dot{I}'_A + \dot{a}^2 \dot{I}'_A + \dot{a} \dot{I}'_A = 0$ A un $\dot{I}''_N = \dot{I}''_A + \dot{a}^2 \dot{I}''_A + \dot{a} \dot{I}''_A = 0$ A.



2.21. att. Trīs vienfāzes transformatoru grupas pieslēguma shēma simetriskam TS avotam.

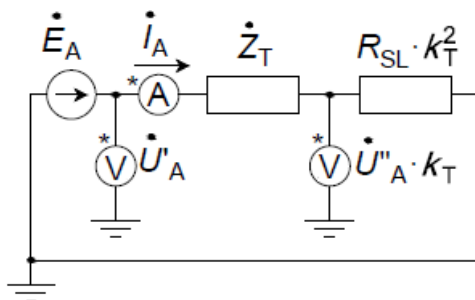
Ņemot vērā, ka SKM trīsfāžu sistēmu aplūko ar vienas fāzes aizvietošanas shēmām, šai analīzei par aprēķina fāzi izvēlēsimies A fāzi. Tad, reducējot abas transformatoru grupas T_A, T_B, T_C puses uz vienu (šeit – primārā tinuma) sprieguma līmeni ar transformācijas koeficientu k_T , iespējams iegūt 2.22. attēlā redzamo TS aizvietošanas shēmu (magnetizācijas zars šajā aizvietošanas shēmā netiek ņemts vērā). Šeit transformācijas koeficients k_T [10]:

$$k_T = W1/W2, \quad (2.105.)$$

kur $W1$ un $W2$ ir transformatoru primāro un sekundāro tinumu vijumu skaits.

Balstoties uz 2.22. attēlā redzamo TS aizvietošanas shēmu, transformatora pretestību iespējams izteikt šādā formā:

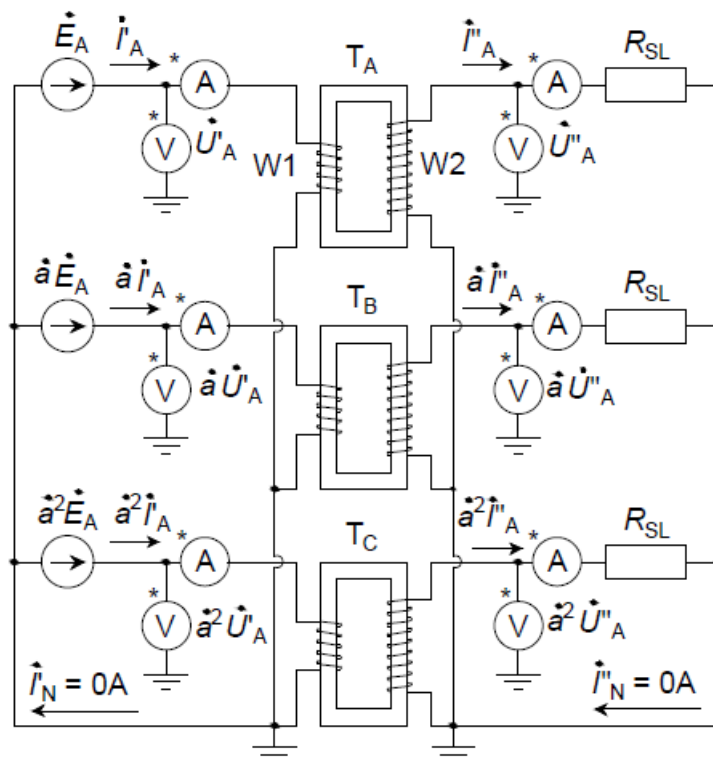
$$\dot{Z}_T = \dot{U}'_A - \dot{U}''_A k_T / \dot{I}_A. \quad (2.106.)$$



2.22. att. Simetriski noslogotas trīs vienfāzes transformatoru grupas TS aizvietošanas shēma.

Lai iegūtu transformatoru grupas īsslēguma režīma aizvietošanas shēmu, pietiek pieņemt $R_{SL} = 0 \Omega$ (tātad arī $\dot{U}''_A = 0 \text{ V}$). Gan slodzes režīma, gan no tā iegūstamā īsslēguma režīma aizvietošanas shēma parāda, ka TS aizvietošanas shēmā transformatora pretestība $\dot{Z}_T^1 = \dot{Z}_T$, kas nosakāma atbilstoši izteiksmēm (2.102.)–(2.104.). Neitrāles režīms šajā gadījumā nerada nekādu ietekmi, jo, kā tika parādīts iepriekš, abu tinumu neitrālēs strāva neplūst.

TS modelim (2.21. att.) līdzīgā veidā iespējams parādīt PS analīzes modeli (2.23. att.).

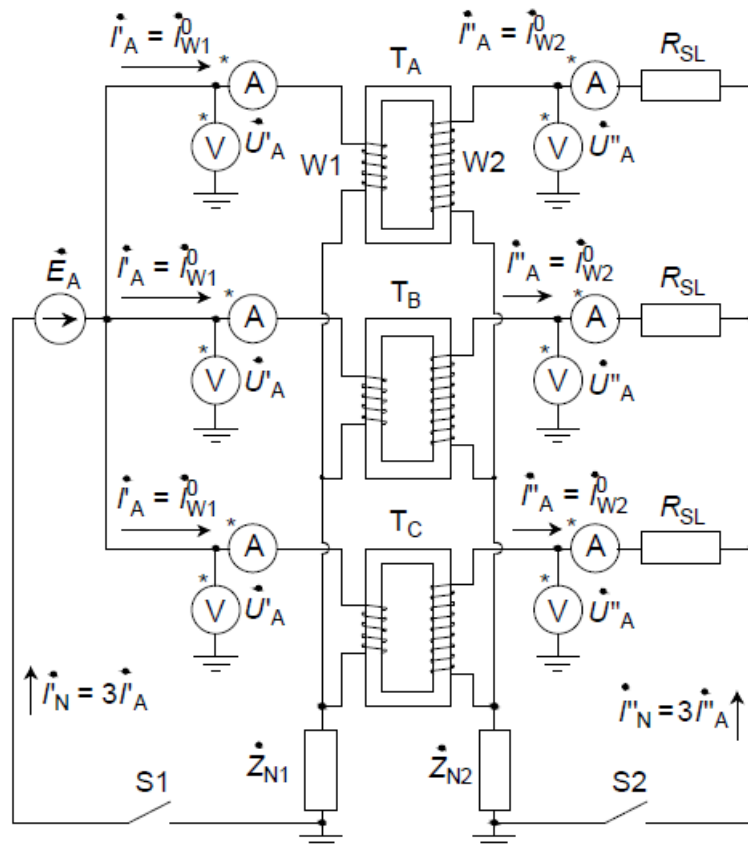


2.23. att. Trīs vienfāzes transformatoru grupas pieslēguma shēmā simetriskam PS avotam.

Ņemot vērā, ka, saskaitot fāžu strāvas, joprojām abās neitrāles strāvas vienādas ar 0 A, šīs vienfāzes transformatoru grupas PS aizvietošanas shēma būs identiska 2.22. attēlā redzamajai. Atbilstoši arī PS aizvietošanas shēmā izmantojamā pretestība būs $\dot{Z}_T^2 = \dot{Z}_T$.

Vienfāzes transformatoru grupas NS režīma analīzei vispirms aplūkosim NS modeli, kurā visām primārā tinuma fāzēm pieslēgts identisks EDS (2.24. att.). Ņemot vērā, ka NS pretestības vērtībai un aizvietošanas shēmai nozīmīgs ir neitrāles režīms [2], [14] šajās shēmās abās transformatoru grupas neitrālēs ieslēgti papildu slēdži S1 un S2 un neitrāles pretestības Z_{N1} un

Z_{N2} , kuras apzīmē zemesslēguma strāvu ierobežojošos reaktorus vai līdzīgus neitrālē ieslēgtus elementus.



2.24. att. Trīs vienfāzes transformatoru grupas pieslēguma shēma NS avotam.

Ja slēdži S1 un S2 ir ieslēgti un nav reaktoru neitrālēs ($Z_{N1} = 0 \Omega$ un $Z_{N2} = 0 \Omega$), A fāzes strāvas NS komponentes vērtību nosaka A fāzes transformatora pretestība, un aizvietošanas shēma sakrītīs ar 2.22. attēlā redzamo, bet pašu transformatoru iespējams aizvietot ar tā pretestību, kā parādīts 2.11. tabulas 1. punktā (konkrētajā gadījumā – $\dot{Z}_T^0 = \dot{Z}_T$). Līdzīgā situācijā ar ieslēgtiem abiem slēdžiem S1 un S2 un ar neitrāles reaktoriem ($Z_{N1} > 0 \Omega$ un $Z_{N2} > 0 \Omega$) NS strāvu noteiks transformatora tinumu pretestības un neitrāles reaktorus plūstošās visu fāžu strāvu NS komponentes, tādēļ, lai ņemtu vērā sprieguma kritumus $3I'_A \dot{Z}_{N1}$, $3I''_A \dot{Z}_{N2}$, aizvietojojt šādu transformatoru, kopējai transformatora pretestībai virknē jāieslēdz papildu trīskāršotas abu neitrāļu reaktoru pretestības, kā tas parādīts 2.11. tabulas 2. punktā.

Nākamais scenārijs ir gadījums, kurā viena no transformatora neitrālēm nav zemēta (piemēram, S2 ir atslēgts, bet S1 ir ieslēgts) un bojājums rodas zemētās neitrāles tinuma (W1) pusē. Šādos gadījumos nezemētajā tinumā NS strāva nevar noslēgties, bet no bojājuma puses NS strāva var noslēgties primārajā tinumā un pa magnetizācijas (vadītspējas) zaru (2.11. tabulas 3. punkts), kura NS pretestība \dot{Z}_μ^0 parasti ir daudzkārt lielāka par tinumu pretestībām un praktiskos aprēķinos to bieži pieņem $\dot{Z}_\mu^0 \approx \infty \Omega$ (šis zars pastāv arī gadījumā, ja zemētas abas neitrāles, bet to neņem vērāniecīgā magnetizācijas zara strāvas stipruma dēļ). Ja nepieciešams, precīzos aprēķinos iespējams noteikt magnetizācijas zara pretestību, balstoties uz

transformatora tukšgaitas eksperimenta datiem. Šajā eksperimentā vienu transformatora tinumu pieslēdz nominālajam spriegumam, kamēr pārējie tinumi ir tukšgaitas režīmā (atslēgti), un tiek nomērīts pieslēgtā tinuma strāvas stiprums un aktīvā jauda jeb jaudas zudumi, līdzīgi īsslēguma eksperimentam. Ražotājs, balstoties uz šiem eksperimentiem, norāda tukšgaitas režīma strāvas stiprumu, kas izteikts procentos no transformatora nominālās strāvas $I_{0\%}$, un aktīvos tukšgaitas zudumus P_0 . Lai aprēķinātu tukšgaitas režīma pretestību, iesākumā jānosaka transformatora nominālā strāva un faktiskais tukšgaitas strāvas stiprums [45]:

$$I_{NT} = S_{NT}/\sqrt{3}U_{NT}, \quad (2.107.)$$

$$I_0 = I_{0\%}I_N/100, \quad (2.108.)$$

kur I_{NT} – transformatora nominālā režīma strāvas stiprums, A;

I_0 – transformatora tukšgaitas režīma strāvas stiprums, A;

$I_{0\%}$ – tukšgaitas režīma strāvas stiprums attiecībā pret transformatora nominālo strāvu, %.

Tad, izmantojot tukšgaitas režīma aktīvās jaudas zudumus un strāvas stiprumu, iespējams noteikt transformatora aktīvo pretestību un pilnās pretestības moduli tukšgaitas režīmam [10]:

$$R_0 = P_0/3I_0^2, \quad (2.109.)$$

$$Z_0 = U_{NT}/I_0, \quad (2.110.)$$

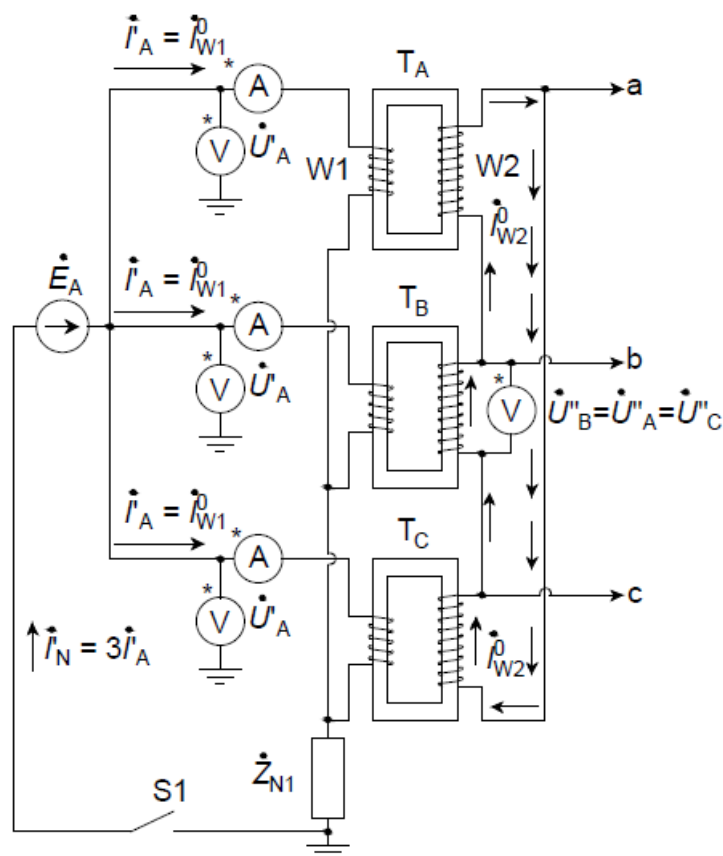
kur R_0 – transformatora aktīvā pretestība tukšgaitas režīmā, Ω ;

P_0 – transformatora aktīvās jaudas zudumi tukšgaitas režīmā, W;

Z_0 – transformatora pilnās pretestības modulis tukšgaitas režīmā, Ω .

Tukšgaitas režīma reaktīvo pretestību iespējams noteikt, izmantojot (2.104.) vienādojumu. Jāatzīmē, ka aktīvās jaudas zudumus visbiežāk norāda kā kopējus visām fāzēm, tādēļ (2.109.) lietots dalījums ar fāžu skaitu (papildu norādījumiem skatīt [10]). Tukšgaitas režīmā transformatora ekvivalento pretestību veido spriegumam pieslēgtā tinuma (piemēram, W_1) aktīvā un induktīvā un magnetizācijas zara aktīvā un induktīvā pretestība, bet, tā kā jaudīgiem transformatoriem $R_\mu \gg R_{W1}$ un $X_\mu \gg X_{W1}$, tad var pieņemt, ka $R_\mu \approx R_0$ un $X_\mu \approx X_0$. Magnetizācijas zara pretestība ir praktiski vienāda visām secībām (šeit svarīgi nejaukt magnetizācijas zara pretestību ar transformatora tinumu vai pilno aizvietošanas shēmas pretestību). Ja magnetizācijas zara pretestību ņem vērā, aizvietošanas shēmās to ieslēdz starp secību aizvietošanas shēmu neitrālēm un punktu starp transformatora primārā un sekundārā tinuma pretestībām (T veida aizvietošanas shēmās) vai pirms kopējās transformatora pretestības (Γ veida aizvietošanas shēmās).

Citu gadījumu analīzei būtu lietderīgi parādīt trīs vienfāzes transformatoru grupas modeli, ja viens no tinumiem (pieņemsim, ka sekundārais) ir savienots trīsstūrī un visām fāzēm pieslēgti identiski EDS (2.25. att.).



2.25. att. Trīs vienfāzes transformatoru grupas ar zvaigznes un trīsstūra slēgumiem pieslēguma shēma NS avotam.

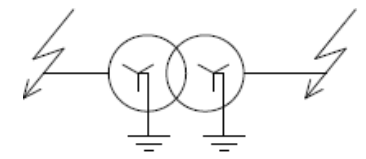
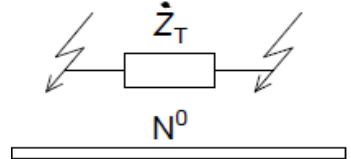
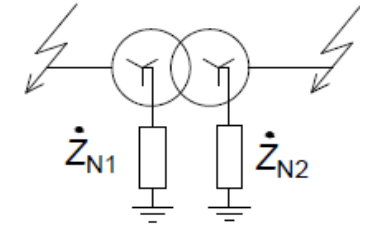
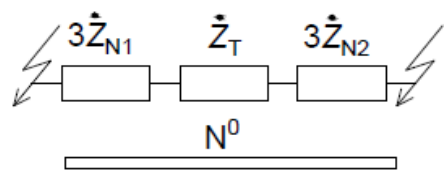
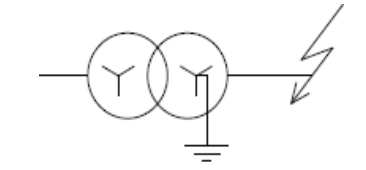
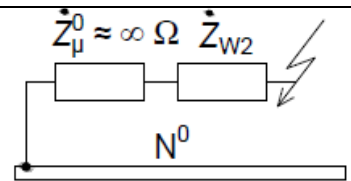
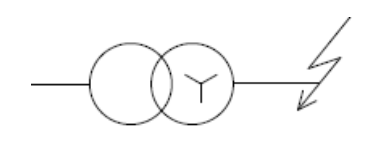
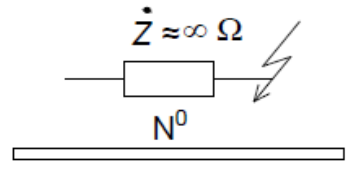
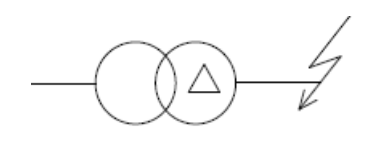
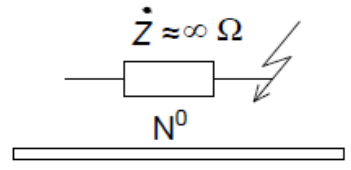
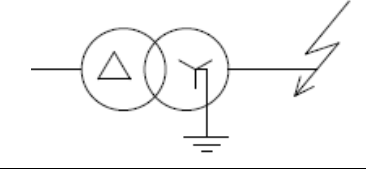
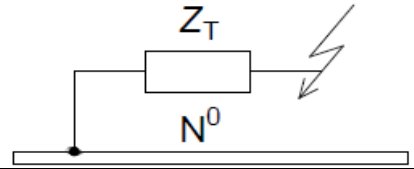
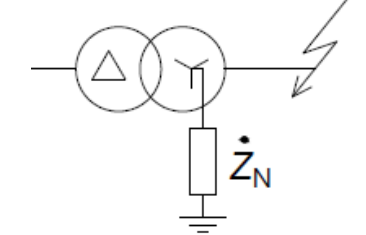
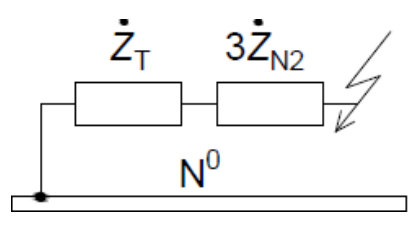
Nākamajos divos šajā analizē aplūkotajos gadījumos bojājums rodas tuvāk transformatora tinumam, kas savienots zvaigznē ar zemētu neitrāli (2.25. attēla primārais tinums, ja S1 ir ieslēgts) ar neitrāles reaktoru vai bez tā, bet sekundārais tinums savienots trīsstūrī. Šajos gadījumos no bojājuma puses NS strāva var noslēgties pa zemēto neitrāli un tās radītā NS plūsma inducēs trīsstūra tinumā NS spriegumus $\dot{U}_A'' = \dot{U}_B'' = \dot{U}_C'' = \dot{U}_{W2}^0$, kā rezultātā trīsstūra slēgumā cirkulēs sekundārā tinuma NS strāva \dot{I}_{W2}^0 (2.25. att.). Šajā attēlā parādīts arī tas, ka NS strāva ir norobežota no tālākā tīkla, jo no trīsstūra slēguma atejošos zaros aizplūstošā strāvu starpība ($\dot{I}_{W2}^0 - \dot{I}_{W2}^0$) būs vienāda ar nulli. NS strāvas ceļa noslēgšanos trīsstūra tinumā NS aizvietošanas shēmā attēlo kā savienojumu ar NS aizvietošanas shēmas neitrāli caur abu tinumu pretestību, kas apvienota vienā transformatora pretestībā $\dot{Z}_T^0 = \dot{Z}_T$ (2.11. tabulas 6. punkts) [2], [8]. Zvaigznes slēgumā ieslēdzot neitrāles reaktoru, transformatora NS aizvietošanas shēmai virknē jāieslēdz arī trīskāršota reaktora pretestība $3\dot{Z}_N$ [6] (2.11. tabulas 7. punkts).

NS aizvietošanas shēmu izveidē sastopami arī divi nākamie scenāriji, kuriem izmanto vienādas aizvietošanas shēmas. Viens no šādiem gadījumiem ir tad, kad bojājums rodas transformatora tinuma, kas savienots trīsstūrī (2.25. attēlā sekundārais tinums), pusē. Otrs gadījums ir bojājumi, kuri rodas transformatora tinuma, kas savienots zvaigznes slēgumā ar izolētu neitrāli (2.25. attēlā primārais tinums, ja S1 ir atslēgts), pusē. Abās minētajās situācijās bojājumam tuvākajā tinumā NS strāva nevar noslēgties, tādēļ arī citos transformatora tinumos tā netiks inducēta, kas NS aizvietošanas shēmā tiek parādīts kā pārrāvums (2.11. tabulas 4. un

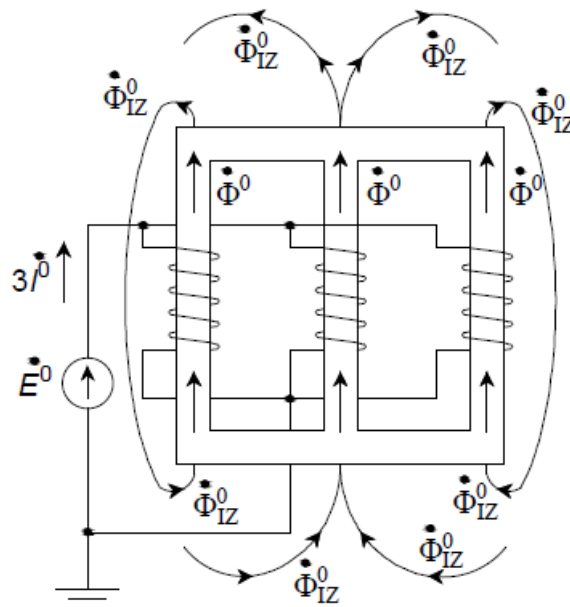
5. punkts). Aprakstītā aizvietošana ar pārrāvumu, bojājumiem rodoties minēto tīnumu pusē, ir spēkā ne tikai trīs vienfāzes transformatoru grupai, bet arī trīsfāžu divtīnumu un daudztīnumu transformatoriem [4], [25].

2.11. tabula

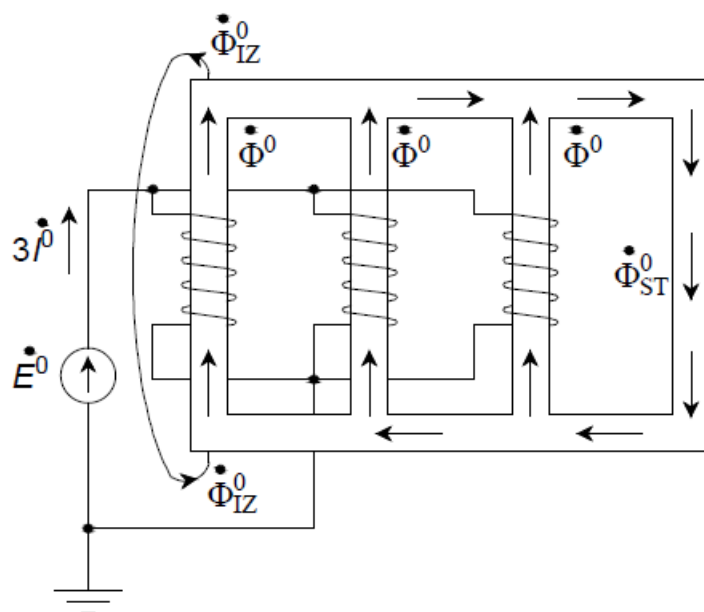
Trīs vienfāzes transformatoru grupas NS aizvietošanas shēmas

Nr.	Gadījuma principiālā shēma	Slēdžu stāvoklis (1/0)		NS aizvietošanas shēma
		S1	S2	
1		1	1	
2		1	1	
3		0	1	
4		-	0	
5		-	-	
6		-	1	
7		-	1	

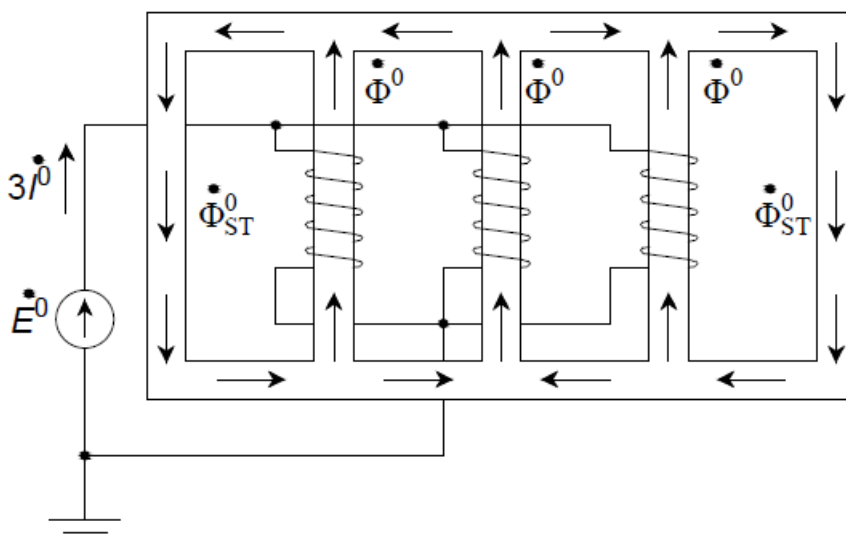
Trīsfažu divtinumu transformatoriem TS un PS aizvietošana notiek identiski trīs vienfāzes transformatoru grupas aizvietošanai. Nosakot NS pretestību, bez transformatoru tinumu slēguma jāņem vērā arī NS magnētisko plūsmu noslēgšanās ceļi transformatora magnētiskajā sistēmā. Izteikti nozīmīga magnētvasda konstrukcija ir transformatoriem ar slēgumu shēmu Y/Y_0 , jo to NS aizvietošanas shēmā noteicoša ir magnetizācijas zara pretestība. Parasti literatūrā [8], [10], [14] u. c. aplūko transformatorus ar magnētvasdiem, kas sastāv no trīs, četriem un pieciem stieņiem (no uzskaitītajām trīs stieņu magnētvasdu konstrukcija ir visizplatītākā). Var minēt, ka transformatorus ar piecu stieņu konstrukciju mēdz saukt par „bruņu” tipa transformatoriem. Neskatoties uz reto lietojumu, NS plūsmu noslēgšanās ceļu analīze būtu lietderīga arī četru un piecu stieņu konstrukcijām, jo tā dod iespēju aprakstīt transformatora serdes konstrukcijas ietekmi uz ekvivalento transformatora NS pretestību. Ņemot vērā, ka NS strāvām sākotnēji nepieciešams noslēgšanās ceļš tinumā ar zemētu neitrāli, lai cirkulētu NS strāva un varētu rasties NS plūsmas serdē, šo plūsmu orientāciju minētajām magnētvasdu konstrukcijām aplūkosim situācijā, kurā tām uzlīts tikai viens zemētas zvaigznes tinums (2.26.–2.28. att.).



2.26. att. Aptuvenš NS plūsmu sadalījums trīsfažu transformatorā ar trīs stieņu magnētvasdu.



2.27. att. Aptuvens NS plūsmu sadalījums trīsfāžu transformatorā ar četrus stienus magnētvažu.



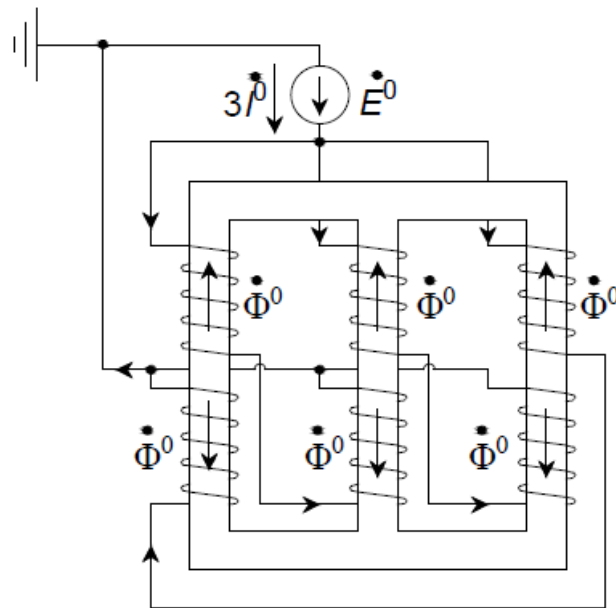
2.28. att. Aptuvens NS plūsmu sadalījums trīsfāžu transformatorā ar piecus stienus magnētvažu.

Līdzīgi fāžu tinumos plūstošajām NS strāvām, ja NS magnētiskajām plūsmām būs iespēja noslēgties, šajā noslēgšanās ceļā NS plūsmu un magnetodzinēj spēku (turpmāk tekstā – MDS) summa nebūs nulle, bet trīskāršota NS plūsma un MDS. Aplūkojot 2.26. attēlu, redzams, ka trīs stienņu transformatoriem fāžu NS plūsmas $\dot{\Phi}^0$ var noslēgties tikai pa apkārtējo vidi izkliedes plūsmas $\dot{\Phi}_{IZ}^0$ veidā. Attiecīgi šīs izkliedes plūsmas parasti noslēdzas pa gaisu sausajiem transformatoriem vai eļļu, transformatora tvertni, tvertnes vāku un tā stiprinājumiem eļļas transformatoriem. Izkliedes plūsmas noslēgšanās ceļam atbilst daudz mazāka magnētiskā vadītspēja nekā magnētvažu stienīiem. Četrus stienņu konstrukcijas gadījumā atbilstoši 2.27. attēlam fāžu NS plūsmas $\dot{\Phi}^0$ pārsvarā noslēgsies pa papildu stieni kā plūsma $\dot{\Phi}_{ST}^0$, jo tā magnētiskā vadītspēja ir lielāka nekā apkārtējai videi, bet izteiktas režīma nesimetrijas apstākļos var izveidoties ceturtā stienņa piesātinājums un daļa plūsmas joprojām var noslēgties

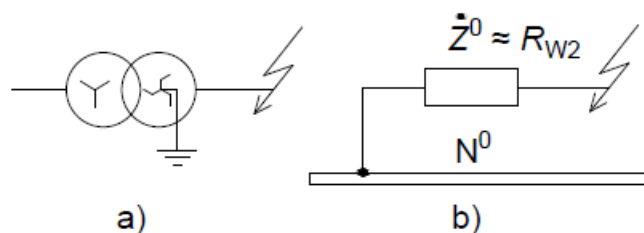
pa apkārtējo vidi izkliedes plūsmas Φ_{IZ}^0 veidā. Saprotams, ka, NS plūsmai noslēdzoties galvenokārt pa ceturto stieni, kopējā magnētiskā vadītspēja ir daudz augstāka nekā trīs stieņu magnētivadam. Aplūkojot 2.28. attēlu, redzams, ka piecu stieņu konstrukcijas gadījumā NS fāžu plūsmas Φ^0 sadalās pa malējiem stieņiem kā papildu stieņu plūsmas Φ_{ST}^0 . Tādam plūsmas ceļam atbilst lielāka magnētiskā vadītspēja nekā četru stieņu konstrukcijai, jo plūsmai ir iespēja sadalīties abos stieņos un to piesātinājums ir zemāks. Apkopojot redzams, ka četru un piecu stieņu konstrukciju gadījumos NS plūsmām pieejami noslēgšanās ceļi ar augstāku magnētisko vadītspēju nekā trīs stieņu konstrukcijai. Minēto atšķirību ietekmi iespējams aprakstīt šādi: lielākai magnētiskai vadītspējai atbilst lielāks fāžu tinumos inducētais NS pret-EDS, kas aizvietošanas shēmās tiek ievērots, palielinot ekvivalento tinuma reaktīvo pretestību, lai iegūtu pret-EDS vērtībai atbilstoša lieluma NS sprieguma kritumu. Tādēļ trīs stieņu magnētivadiem, kuriem ir vismazākā NS magnētiskā vadītspēja no trim aprakstītajām konstrukcijām, atbilst vismazākā transformatora tinumu NS ekvivalentā induktivitāte. Magnetizācijas zara NS induktīvo pretestību X_{μ}^0 un pilno magnetizācijas pretestību Z_{μ}^0 ir sarežģītāk precīzi noteikt, neveicot eksperimentālus mērījumus, jo nepieciešama magnētiskā lauka modelēšana, bet no literatūras zināms, ka četru un piecu stieņu konstrukcijai NS magnētiskā vadītspēja ir tuva trīs vienfāzes transformatoru grupai, un praksē pieņem, ka šiem transformatoriem $Z_{\mu}^0 \approx X_{\mu}^0 \approx \infty \Omega$ vai veic tuvinātu aprēķinu atbilstoši (2.107.)–(2.110.). Savukārt trīs stieņu transformatoriem magnetizācijas un zemētās zvaigznes tinuma kopīgā induktīvā pretestība ir aptuveni $X^0 = X_{\mu}^0 + X_{W2}^0 \approx 4 - 5X_T$ [46]. Šāda gadījumā NS aktīvo pretestību galvenokārt nosaka zemētās zvaigznes tinuma aktīvā pretestība: $R^0 \approx R_{W2}$. Trīsfāžu transformatoru konstrukcijai ir salīdzinoši neliela ietekme uz to NS pretestībām, ja tiem izmantotas citas tipveida slēguma shēmas (2.11. tabulas 1., 2., 4., 5., 6. un 7. punkts), jo magnetizācijas zara induktīvā pretestība ir daudz lielāka par tinumu pretestībām un nav noteicoša lielākajā daļā bojājumu režīmu. Trīsfāžu transformatoriem neitrālē ieslēgto pretestību ietekme ir identiska 2.11. tabulā parādītajai.

Atsevišķos gadījumos tiek izmantoti arī speciāli transformatori ar tinumiem, kas saslēgti zvaigznes un zemēta cikcakslēgumā (dažreiz saukta arī par zigzag zvaigznes slēgumu) Y/Z_0 (Z_0 parasti ir 0,4 kV tinums, kuram katras fāzes tinums sadalīts uz pusēm un uztīts uz diviem dažādiem stieņiem tā, ka uz katra stieņa uztītās fāžu tinumu daļas atrodas pretslēgumā). Rodoties nesimetrijai konkrētā transformatora cikcakslēguma pusē, fāzēs plūstošās NS strāvas radīs NS plūsmas, kuras ir pretēji orientētas, un kompensēs viena otra (2.29. att.). Tādēļ praktiski netiek inducēts NS pret-EDS un transformatora NS induktīvā pretestība būs $X_T^0 \approx 0 \Omega$ un pilnā NS pretestība būs aptuveni vienāda ar cikcakslēguma tinuma fāzes aktīvo pretestību $Z_T^0 \cong R_T^0 \approx R_{W2}$. Dažreiz praktiskos aprēķinos mēdz pieņemt, ka konkrētajā gadījumā $Z_T^0 \approx 0,1Z_T^1$ (grafiska šāda transformatora ievērošana NS aizvietošanas shēmā, rodoties bojājumam Z_0 tinuma pusē, parādīta 2.30. att.). Šādus transformatorus praksē izmanto, jo tinuma konstrukcijas dēļ ir mazākas deformācijas sekundāro spriegumu vektoru sistēmā nesimetriskas slodzes gadījumā un mazākas NS pretestības dēļ ir novērojamas lielākas zemesslēgumu strāvas, kas palielina RA jutību [46].

Divtinumu autotransformatoru dati doti, balstoties uz eksperimentu rezultātiem, kas sakrīt ar divtinumu transformatoriem lietotajiem mērījumiem, tādēļ to pretestību aprēķins un aizvietošanas shēmas tiek veidotas identiski divtinumu transformatoru aizvietošanas shēmām.



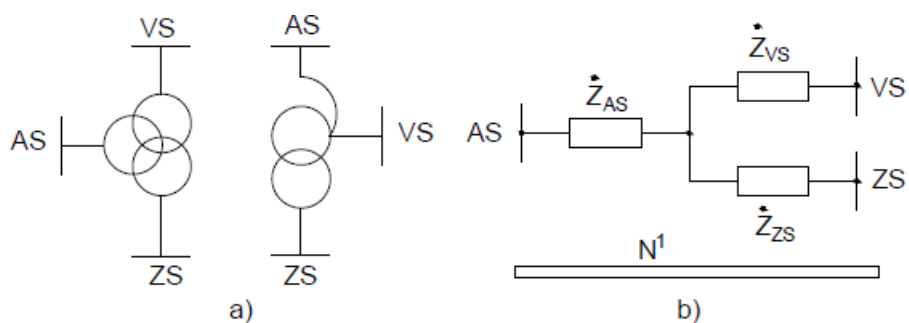
2.29. att. NS plūsmu sadalījums trīsfāžu transformatorā ar trīs stieņu serdi un cikcakslēgumu (primārais zvaigznes slēguma tinums nav parādīts).



2.30. att. Transformatora ar trīs stieņu serdi un Y/ Z_0 tinumu slēgumu shēmu (a) NS aizvietošanas shēma aizvietošana (b), rodoties bojājumam tinuma Z_0 pusē.

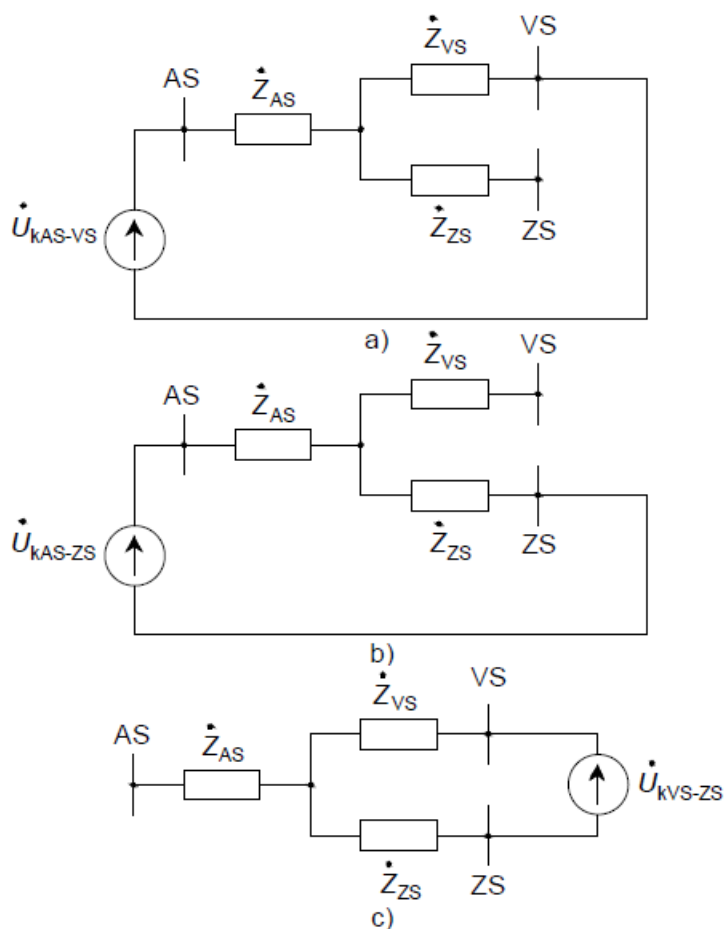
Daudztinumu transformatorus sākotnēji izgatavoja gadījumiem, kad apakšstacijā bija jānodrošina divi dažādi zemāka spriegumu līmeņi, un modificēt divtinumu transformatoru, uztinot papildu tinumu, bija izdevīgāk, nekā uzstādīt divus divtinumu transformatorus [45]. Praksē plaši izmanto arī transformatorus ar divās daļās sašķeltu ZS tinumu. Šādu šķelto tinumu, kuriem var būt zemāka nominālā jauda, izmantošana ļauj ierobežot sagaidāmās īsslēgumu strāvas, lai būtu pieļaujams izmantot tipveida slēgiekārtas ar zemākām komutācijas spējām.

Trīstinumu transformatoriem un autotransformatoriem ar dažādiem spriegumu līmeņiem, TS un tai identisku PS aizvietošanas shēmu veido trīs zaru zvaigzne, kurai katrs zars atbilst vienai no tinumu pretestībām (2.31. att.). Ja tiek ņemtas vērā arī magnetizācijas zara pretestības, tās ieslēdz starp tinumu pretestību zvaigznes centru un secību aizvietošanas shēmu neitrālēm [2], [15].



2.31. att. Trīstinumu transformatora un autotransformatora (a) TS aizvietošanas shēma (b) [2], [14], [18].

Lai noteiktu parādīto aizvietošanas shēmu parametrus, tiek veikti īsslēgumu spriegumu un īsslēgumu jaudas zudumu mērījumi dažādiem tinumu pāriem: AS–vidsprieguma (turpmāk tekstā – VS), AS–ZS, VS–ZS. Attiecīgi pirmajam no konkrētā pāra tinumiem pieslēdz pazeminātu spriegumu, kas nepieciešams, lai tajā plūstu nominālā režīma strāva, otrā tinuma izvadus šuntē, bet trešais tinums atrodas tukšgaitas režīmā. Izmantojot 2.31. attēlā redzamo aizvietošanas shēmu, šos eksperimentus var parādīt, pieslēdzot tinumu pārus avota spriegumam (2.32. att.) [10].



2.32. att. Trīstinumu transformatora un autotransformatora AS–VS (a), AS–ZS (b) un VS–ZS (c) īsslēgumu eksperimentu aizvietošanas shēmas [10].

Minētajos eksperimentos nosaka tinumu pāru īsslēgumu spriegumus ($U_{K\%AS-VS}$, $U_{K\%AS-ZS}$, $U_{K\%VS-ZS}$) un jaudas zudumus (P_{KAS-VS} , P_{KAS-ZS} , P_{KVS-ZS}). No 2.32. attēlā redzamajām eksperimentu aizvietošanas shēmām izriet šāda pretestību vienādojumu sistēma [4], [18]:

$$\begin{cases} \dot{Z}_{AS-VS} = \dot{Z}_{AS} + \dot{Z}_{VS} \\ \dot{Z}_{AS-ZS} = \dot{Z}_{AS} + \dot{Z}_{ZS} \\ \dot{Z}_{VS-ZS} = \dot{Z}_{VS} + \dot{Z}_{ZS}, \end{cases} \quad (2.111.)$$

un no tās iespējams izteikt katra tinuma pretestību [4], [18]:

$$\begin{cases} \dot{Z}_{AS} = 0,5(\dot{Z}_{AS-VS} + \dot{Z}_{AS-ZS} - \dot{Z}_{VS-ZS}) \\ \dot{Z}_{VS} = 0,5(\dot{Z}_{AS-VS} + \dot{Z}_{VS-ZS} - \dot{Z}_{AS-ZS}) \\ \dot{Z}_{ZS} = 0,5(\dot{Z}_{AS-ZS} + \dot{Z}_{VS-ZS} - \dot{Z}_{AS-VS}), \end{cases} \quad (2.112.)$$

kur \dot{Z}_{AS} , \dot{Z}_{VS} , \dot{Z}_{ZS} – trīstinumu transformatora AS, VS un ZS tinumu pilnās pretestības, Ω ;
 \dot{Z}_{AS-VS} , \dot{Z}_{AS-ZS} , \dot{Z}_{VS-ZS} – trīstinumu transformatora kopējās AS–VS, AS–ZS un VS–ZS tinumu pāru pilnās pretestības, Ω .

Vienādojumu sistēmai (2.112.) analogiskas sistēmas var izmantot, lai noteiktu katra tinuma īsslēguma spriegumu un jaudas zudumu vērtības. Šīs vērtības var lietot ar vienādojumiem (2.102.)–(2.104.), lai aprēķinātu katra tinuma pretestības atsevišķi. Alternatīvi iespējams vispirms izmantot (2.102.)–(2.104.), lai noteiktu pretestības tinumu pāriem, kuras tad var ievietot (2.112.). Veicot aprakstītos aprēķinus, bieži tiek iegūts rezultāts, ka viena no tinumu pretestībām vai īsslēguma spriegums ir vienāds ar nulli vai negatīvs. Tādos gadījumos šim shēmas zaram induktīvo pretestību bieži pieņem vienādu ar nulli un izmanto vienīgi tinuma aktīvo pretestību, ja aprēķinā to ņem vērā [2], [18].

Dažreiz ražotāji norāda tikai transformatora maksimālos īsslēguma zudumus (lielākos no trīs tinumu pāru zudumiem). Šādā gadījumā pie vienādām visu tinumu nominālajām jaudām ($S_{AS} = S_{VS} = S_{ZS} = S_{NT}$) vislielākie zudumi ir, ja visa jauda plūst caur transformatora AS un VS tinumiem. Tādēļ VS un ZS tinumu aktīvās pretestības, reducējot uz AS sprieguma līmeni, aprēķina šādi [15], [18]:

$$R_{AS} = R'_{VS} = R'_{ZS} = P_{Kmax} U_{NT}^2 / 2S_{NT}^2, \quad (2.113.)$$

kur P_{Kmax} – ražotāja dotie maksimālie īsslēguma jaudas zudumi, W;

U_{NT} – transformatora nominālais spriegums, V;

S_{NT} – transformatora nominālā pilnā jauda, VA.

Mūsdienās lielākajai daļai transformatoru visu tinumu jaudas ir vienādas ar nominālo, bet praksē mēdz izmantot arī vecākus transformatorus ar atšķirīgām tinumu jaudām. Visbiežāk izplatītie transformatoru tinumu jaudu sadalījumi apkopoti 2.12. tabulā.

Tinumu nominālās jaudas attiecībā pret transformatora nominālo jaudu trīstinumu transformatoriem un divtinumu transformatoriem ar šķeltu ZS tinumu [15], [18]

Variants	S_{AS} , %	S_{VS} (ZS1), %	S_{ZS} (ZS2), %
1	100	100,00	100,00
2	100	100,00	66,67
3	100	66,67	100,00
4	100	66,67	66,67

Ir pierādīts, ka divtinumu transformatoriem ar šķeltiem ZS tinumiem vai trīstinumu transformatoriem, kuru tinumu nominālā jauda ir samazināta ($S_{ZS1} = S_{ZS2} = 0,667S_{NT}$ jeb $S_{VS} = S_{ZS} = 0,667S_{NT}$), vislielākie zudumi atbilst režīmam, kurā no AS tinuma plūstošā jauda sadalās 2/3 VS tinumā un 1/3 ZS tinumā. No šī rezultāta izriet, ka AS tinuma pretestību aprēķina šādi [18]:

$$R_{AS} = P_{Kmax} U_{NT}^2 / 1,83 S_{NT}^2, \quad (2.114.)$$

un VS, ZS tinumu pretestības nosaka, ievērojot tinumu jaudu attiecības [18]:

$$R'_{VS} = R'_{ZS} = R_{AS} S_{AS} / S_{VS} \approx R_{AS} / 0,667 = 1,5 R_{AS}. \quad (2.115.)$$

Ja šādiem transformatoriem doti visu trīs eksperimentu īsslēgumu spriegumi un aktīvās jaudas zudumi, tad tie parasti ir reducēti pie nominālās jaudas un nav nepieciešami iepriekš parādītie papildu aprēķini.

Dažos gadījumos autotransformatoriem ražotāji uzrāda īsslēguma parametrus pie jaudas, kas atšķiras no tinuma nominālās jaudas (pie tipveida jaudas). Šādos gadījumos VS un ZS tinumu parametri jāreducē uz autotransformatora nominālo jaudu [15], [18]:

$$\begin{cases} P_{KAS-VS} = P_{KAS-VS}^t, \\ P_{KAS-ZS} = P_{KAS-ZS}^t (S_{NT}/S_t)^2, \\ P_{KVS-ZS} = P_{KVS-ZS}^t (S_{NT}/S_t)^2, \end{cases} \quad (2.116.)$$

un

$$\begin{cases} U_{K\%AS-VS} = U_{K\%AS-VS}^t, \\ U_{K\%AS-ZS} = U_{K\%AS-ZS}^t (S_{NT}/S_t), \\ U_{K\%VS-ZS} = U_{K\%VS-ZS}^t (S_{NT}/S_t), \end{cases} \quad (2.117.)$$

kur P_{KAS-VS}^t , P_{KAS-ZS}^t , P_{KVS-ZS}^t – tinumu pāru īsslēgumu zudumi, kas uzdoti pie tipveida jaudas, W;

$U_{K\%AS-VS}^t$, $U_{K\%AS-ZS}^t$, $U_{K\%VS-ZS}^t$ – tinumu pāru īsslēgumu spriegumi, kas uzdoti pie tipveida jaudas, %;

S_{NT} , S_t – autotransformatora nominālā un tinuma vai tipveida jauda, pie kuras uzdoti sākotnējie īsslēguma parametri, VA.

Divtinumu transformatoriem ar divās daļās šķeltu ZS tinumu īsslēgumu spriegumus nosaka šķelšanas koeficients [2]:

$$K_{\xi} = U_{K\%ZS1-ZS2} / U_{K\%AS-ZS}, \quad (2.118.)$$

kur K_{ξ} – šķelšanas koeficients;

$U_{K\%ZS1-ZS2}$ – šķelto ZS tinumu pāra kopējais īsslēguma spriegums, %;

$U_{K\%AS-ZS}$ – AS–ZS tinumu pāra kopējais īsslēguma spriegums, %.

Izmantojot šo koeficientu un šķelto tinumu skaitu, iespējams izteikt īsslēguma spriegumu AS un abiem ZS tinumiem [14], [17]:

$$U_{K\%AS} = U_{K\%AS-ZS} (1 - K_{\xi} / 2n_{\xi}), \quad (2.119.)$$

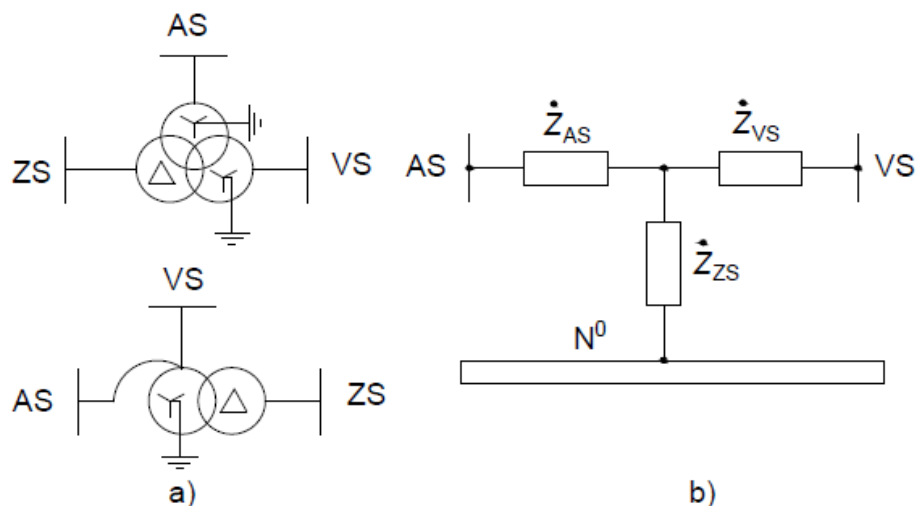
$$U_{K\%ZS1} = U_{K\%ZS2} = U_{K\%ZS1-ZS2} / 2, \quad (2.120.)$$

kur $U_{K\%AS}$ – AS tinuma īsslēguma spriegums, %;

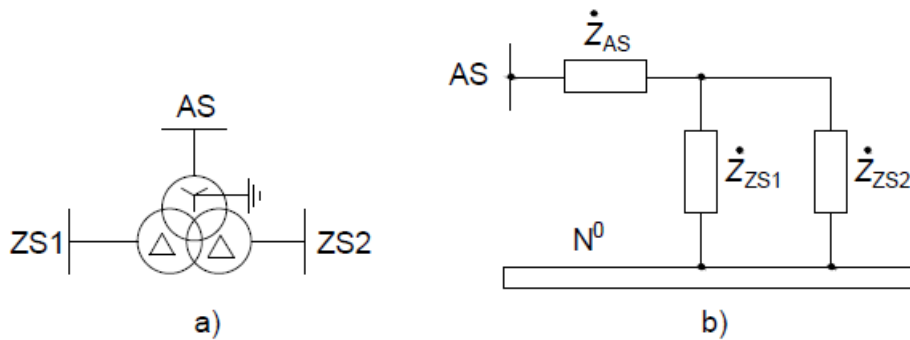
n_{ξ} – šķelšanas rezultātā iegūto ZS tinumu skaits (šajā gadījumā – 2);

$U_{K\%ZS1}, U_{K\%ZS2}$ – abu ZS tinumu īsslēguma spriegums, %.

Daudztinumu transformatoriem tinumu NS pretestības analogiski divtinumu transformatoriem ir aptuveni vienādas ar tinumu TS pretestībām, ja NS strāvai ir iespēja noslēgties šajos tinumos. Var izmantot 2.11. tabulā redzamos paraugus, izņemot atsevišķi aprakstīto gadījumu ar slēguma shēmu Y_0/Y trīsstieņu konstrukcijai. Arī aizvietošanas shēmas sastāda līdzīgā veidā – izskatot NS strāvas noslēgšanās ceļu transformatora tinumos, sākot no bojājuma vietai (turpmāk tekstā – BV) tuvākā tinuma. Kā piemēru iespējams parādīt tipveida trīstinumu transformatora vai autotransformatora ar slēguma shēmu $Y_0/Y_0/\Delta$ NS aizvietošanas shēmu, ja īsslēgums (vai cita nesimetrija) radies AS vai VS tinuma pusē (2.33. att.). Savukārt divtinumu transformatora ar šķeltu ZS tinumu un slēguma shēmu $Y_0/\Delta/\Delta$ NS aizvietošanas shēma, ja īsslēgums radies AS tinuma pusē, parādīta 2.34. attēlā.

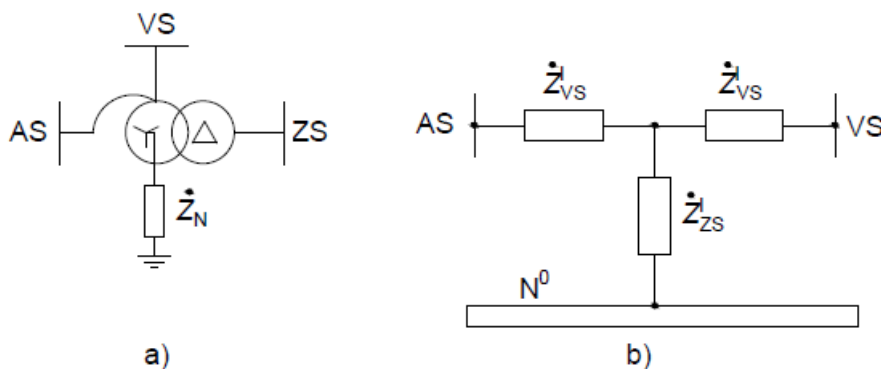


2.33. att. Trīstinumu transformatora un autotransformatora ar slēguma shēmu $Y_0/Y_0/\Delta$ (a) NS aizvietošanas shēma (b), rodoties bojājumam AS vai VS tinumu pusē [4], [14], [15].



2.34. att. Divtinumu transformatora ar šķeltu ZS tinumu un slēguma shēmu $Y_0/\Delta/\Delta$ (a) NS aizvietošanas shēma (b), rodoties bojājumam AS tinuma pusē [4], [14], [15].

Ņemot vērā, ka autotransformatori starp tinumiem ir ne tikai magnētiska, bet arī elektriska saite, NS aizvietošanas shēmas pretestību aprēķinā iespējamas atšķirības, ja autotransformatora neitrālē tiek ieslēgta pretestība. Viens no biežāk sastopamajiem gadījumiem ir autotransformatora $Y_{0\text{ auto}}/\Delta$ AS un VS tinumu kopīgajā neitrālē ieslēgta pretestība (2.35. att.).



2.35. att. Autotransformatora ar slēguma shēmu $Y_{0\text{ auto}}/\Delta$ un AS tinuma neitrālē ieslēgtu pretestību (a) NS aizvietošanas shēma (b), rodoties bojājumam AS vai VS tinuma pusē [14].

Mīnētajā situācijā, pieņemot, ka NS strāvas ieplūst AS tinumā un izplūst no VS tinuma, neitrāles pretestībā plūdis strāva $3(I_{AS}^0 - I_{VS}^0)$. 2.35. attēlā redzamās modificētās tinumu pretestības nosakāmas šādi [14]:

$$\begin{cases} \dot{Z}'_{AS} = \dot{Z}_{AS} + 3\dot{Z}_N(1 - U_{NAS}/U_{NVS}), \\ \dot{Z}'_{VS} = \dot{Z}_{VS} + 3\dot{Z}_N((U_{NAS} - U_{NVS})U_{NAS}/U_{NVS}^2), \\ \dot{Z}'_{ZS} = \dot{Z}_{ZS} + 3\dot{Z}_N(U_{NAS}/U_{NVS}), \end{cases} \quad (2.121.)$$

kur \dot{Z}'_{AS} , \dot{Z}'_{VS} , \dot{Z}'_{ZS} – modificētās tinumu pretestības, kuras izmantojamas aizvietošanas shēmā, Ω ;

\dot{Z}_{AS} , \dot{Z}_{VS} , \dot{Z}_{ZS} – tinumu pretestības, neņemot vērā neitrālē ieslēgtu pretestību, Ω ;

U_{NAS} , U_{NVS} – AS un VS tinuma nominālie spriegumi, kV;

\dot{Z}_N – autotransformatora neitrālē ieslēgtā pretestība, kas reducēta uz AS tinuma spriegumu, Ω .

Ja trīstinumu transformatora vai divtinumu transformatora ar šķeltu ZS tinumu Y_0 tinuma neitrālē ieslēgta pretestība, nav jāveic papildu pretestību pārrēķins atšķirībā no iepriekš

parādītās situācijas ar autotransformatoru. Šādās situācijās ieslēdz trīskāršotu neitrāles pretestību virknē ar konkrētā Y_0 tinuma pretestību [4].

Lai precīzi aprēķinātu transformatora pretestību, vēl jāievēro transformatora sprieguma regulēšanas iestatījums vai jānosaka tā pretestības vērtības regulatora gala stāvokļos, lai aprēķinātu īsslēgumu strāvu maksimālās un minimālās vērtības RA iestatīšanai. Transformatoriem un autotransformatoriem izmanto sprieguma regulēšanu, lai nodrošinātu pietiekami lielu spriegumu patērētājiem, kompensējot sprieguma kritumus tīkla elementos līdz šim transformatoram vai aiz tā, ja pie lielas slodzes šo kompensāciju pilnībā nespēj nodrošināt tipveidā palielinātais transformatoru sekundārās puses nominālais spriegums. Tomēr tukšgaitas vai mazas slodzes režīmos palielinātie transformatoru nominālie sekundārie spriegumi var radīt nepieļaujami lielu faktisko spriegumu, tādēļ transformatoru sprieguma regulatoriem parasti paredzētas gan tinuma spriegumu palielinošas, gan samazinošas pozīcijas [18]. Minētās regulatora pozīcijas faktiski ir transformatora tinuma atzarojumi, pārslēgšanās starp kuriem maina konkrētā tinuma izmantoto vijumu skaitu. AS tīklos visbiežāk šie regulatori izveidoti tā, lai transformatora vai autotransformatora spriegumu varētu regulēt, neatslēdzot slodzi (tā saucamā regulēšana zem slodzes, angļu val. *on-load tap-changing*). Vienlaikus ar paredzēto izejas sprieguma maiņu transformatora vijumu skaita izmaiņas var radīt tā aizvietošanas shēmās pretestību izmaiņas, kas saistītas ne tikai ar aprēķinos izmantojamo tinuma vai tinumu sprieguma izmaiņām, bet arī ar faktiskā īsslēguma sprieguma un potenciāli īsslēguma aktīvās jaudas zudumu izmaiņām (kaut jāmin, ka lieljaudas transformatoriem $X_T \gg R_T$, tādēļ literatūrā parasti pieņem $Z_T \approx X_T$ un aplūko izmaiņas vienīgi inductīvajā pretestībā). No iepriekš minētā viegli saprast, ka faktiskās transformatora pretestības aprēķinam gadījumos, kad sprieguma regulators neatrodas vidējā jeb 0 % pozīcijā, ir jāzina faktiskās īsslēguma sprieguma un, ja iespējams, arī īsslēguma zudumu vērtības pie konkrētās sprieguma regulatora pozīcijas. Šīs vērtības iegūstamas no transformatora ražotāja vai tuvināti jāpieņem no standartos norādītajām (pēc *ГОСТ*, t. i., PSRS valsts standartiem, krievu val. *Государственный стандарт*, ražotājiem transformatoriem vismaz īsslēguma sprieguma robežvērtības var atrast *ГОСТ 12965*, *ГОСТ 17544*). Diemžēl iespējams, ka, neveicot papildu eksperimentālus izmēģinājumus, būs pieejamas vienīgi īsslēguma sprieguma vērtības regulatora galējos stāvokļos $\pm \Delta U_{REGmax\%}$. Atbilstoši [6] minētajam šādos gadījumos tuvināti iespējams izmantot lineāru īsslēguma sprieguma vērtību interpolāciju. Tomēr, ņemot vērā, ka atbilstoši iepriekš minētajos standartos dotajiem datiem īsslēguma sprieguma izmaiņa pie dažādām regulatora pozīcijām starp abiem gala stāvokļiem var nebūt monotona, ieteicams šo interpolāciju sadalīt atkarībā no tā, vai regulators atrodas “pozitīvā” jeb tinuma vijumu skaitu un spriegumu palielinošā pozīcijā vai “negatīvā” jeb tinuma vijumu skaitu un spriegumu samazinošā pozīcijā. Pieņemot īsslēguma sprieguma lineāro izmaiņas raksturu posmiem starp regulatora vidējo un galējiem stāvokļiem un regulēšanas diapazona simetriju, iespējams faktisko īsslēguma spriegumu tuvināti aprēķināt šādi:

$$U_{Kf\%} = \begin{cases} U_{K\%} + \Delta U_{REG\%}(U_{Kmin\%} - U_{K\%})/\Delta U_{REGmax\%}, & \text{ja } \Delta U_{REG\%} < 0 \%, \\ U_{K\%} + \Delta U_{REG\%}(U_{K\%} - U_{Kmax\%})/\Delta U_{REGmax\%}, & \text{ja } \Delta U_{REG\%} > 0 \%, \end{cases} \quad (2.122.)$$

kur $U_{Kf\%}$ – faktiskais īsslēguma spriegums, %;

$U_{K\%}$ – īsslēguma spriegums, regulatoram esot 0 pozīcijā, jeb transformatoram bez

sprieguma regulēšanas, %;

$\Delta U_{REG\%}$ – faktiskā regulatora pozīcija, izteikta kā sprieguma izmaiņa procentos no nominālā sprieguma, %;

$U_{Kmin\%}$ – īsslēguma spriegums, regulatoram esot $-\Delta U_{REGmax\%}$ jeb tālākajā “negatīvajā” pozīcijā, %;

$U_{Kmax\%}$ – īsslēguma spriegums, regulatoram esot $+\Delta U_{REGmax\%}$ jeb tālākajā “pozitīvajā” pozīcijā, %;

$\Delta U_{REGmax\%}$ – maksimālā regulatora pozīcija, izteikta kā lielākā ar regulatoru sasniedzamā sprieguma izmaiņa procentos no nominālā sprieguma, %;

Principā parādīto paņēmieni iespējams izmantot, nosakot gan transformatora īsslēguma spriegumu divtinumu transformatoriem, gan tinumu pāru īsslēguma spriegumus trīstinumu transformatoriem. Lai aprēķinātu transformatora pilno pretestību, vēl jānosaka (uz aprēķina sprieguma pakāpei tuvāko tinuma nominālo spriegumu reducētais) faktiskais tinuma spriegums daudztinumu transformatoriem vai transformatora spriegums divtinumu transformatoriem [47]:

$$U_{Tfred} = U_{TNred}(1 + \Delta U_{REG\%}/100), \quad (2.123.)$$

kur U_{Tfred} – transformatora vai tā konkrētā tinuma faktiskais spriegums, kas reducēts uz aprēķina sprieguma pakāpei tuvāko tinuma nominālo spriegumu, V;

U_{TNred} – aprēķina sprieguma pakāpei tuvākais tinuma nominālais spriegums, V;

$\Delta U_{REG\%}$ – transformatora vai tā konkrētā tinuma faktiskā regulatora pozīcija, izteikta kā sprieguma izmaiņa procentos no nominālā sprieguma, %

(2.123.) formulā, veicot pretestības aprēķinu, piemēram, transformatoram ar nominālajiem spriegumiem 115/10,5 kV pie aprēķina sprieguma 115 kV, U_{TNred} būs vienāds ar AS tinuma nominālo spriegumu 115 kV. Savukārt, ja aprēķina sprieguma vērtība ievērojami atšķiras no visu tinumu nominālajiem spriegumiem, piemēram, 230 kV, iespējams AS tinuma nominālo spriegumu reizināt ar k_T visiem transformatoriem starp AS tinumu un aprēķina sprieguma pakāpi, kā tas parādīts (2.2.). Tuvinātiem aprēķiniem var noteikt AS tinuma sprieguma vērtību relatīvās vienībās (attiecībā pret tuvāko aprēķina sprieguma vērtību, šeit – 115 kV) un reizināt šo vērtību ar nepieciešamo aprēķina sprieguma pakāpi (konkrētajā gadījumā iegūtu 1 r. v. $\cdot 230 \text{ kV} = 230 \text{ kV}$). Jāatzīmē, ka transformatoriem bez sprieguma regulēšanas iepriekš parādītajos pretestības aprēķinos jāizmanto šī transformatora vai tā tinumu faktiskais nominālais spriegums arī gadījumā, ja tie nedaudz atšķiras no tuvākā vai citādi izraudzītā aprēķina sprieguma. Kā parādīts formulas atšifrējumā, $\Delta U_{REG\%}$ vērtība katram tinumam var būt atšķirīga, ja transformators aprīkots ar sprieguma regulēšanu vairākos tinumos. Piemēram, ja aprēķina spriegums ir 115 kV, tad minētajam 115/10,5 kV transformatoram ar regulatoru iestatījumiem $\Delta U_{REG AS\%} = +2,5 \%$ un $\Delta U_{REG ZS\%} = +5 \%$ AS un ZS tinumiem, tad AS tinuma pretestības precīzām aprēķinam izmantojamais spriegums būs $115 \text{ kV} \cdot 1,025 \text{ r. v.} = 117,875 \text{ kV}$ un ZS tinuma pretestības aprēķinam $115 \text{ kV} \cdot 1,05 \text{ r. v.} = 120,75 \text{ kV}$. Šādā situācijā vēlams sadalīt divtinumu transformatora kopējos īsslēguma zudumus un īsslēguma spriegumu pa tinumiem un veikt katra tinuma pretestības atsevišķu aprēķinu.

Zinot divtinumu transformatora faktisko īsslēguma spriegumu un šī transformatora vai tā tinumu reducētos faktiskos spriegumus, iespējams izmantot vispārīgo pilnās pretestības aprēķina formulu ar koriģētajām vērtībām:

$$Z_{Tf} = U_{Kf\%} U_{Tf\text{red}}^2 / (100S_{NT}), \quad (2.124.)$$

kur Z_{Tf} – faktiskā, uz aprēķina sprieguma pakāpi reducētā pilnā transformatora vai tā tinuma pretestība, Ω .

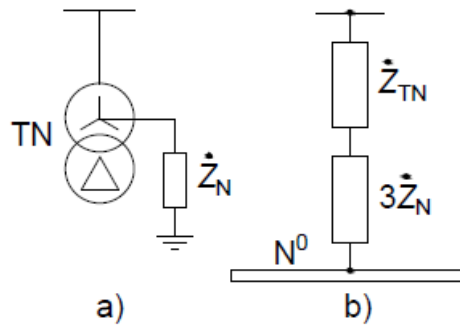
Aktīvās pretestības aprēķinam, ja ir zināmas precīzākas īsslēguma zudumu vērtības ar konkrēto regulatora iestatījumu, izmantojama (2.103.) formula ar faktisko transformatora vai tā tinuma reducēto spriegumu $U_{TN\text{red}}$ un precizēto zudumu vērtību, bet, ja zināma tikai zudumu vērtība regulatora 0 stāvoklī, izmanto šo vērtību un spriegumu $U_{TN\text{red}}$. Līdzīgi iespējams veikt tuvinātu transformatora vai tā tinuma pilnās pretestības aprēķinu, ja pieejama tikai īsslēguma zudumu vērtība regulatora 0 stāvoklī.

Trīstinumu (analoģiski arī citiem daudztinumu) transformatoriem vispirms ir jānoskaidro vai ar interpolācijas palīdzību jānosaka faktiskās tinumu pāru īsslēguma spriegumu vērtības $U_{KAS-VSf\%}$, $U_{KAS-ZSf\%}$, $U_{KVS-ZSf\%}$. Tad var tās izmantot kopā ar (2.112.), pārrakstot šo vienādojumu sistēmu īsslēguma spriegumiem, lai iegūtu faktiskos tinumu īsslēguma spriegumus $U_{KASf\%}$, $U_{KVSf\%}$, $U_{KZSf\%}$. Arī šajos aprēķinos iegūstot, ka kāds no tinumu īsslēgumu spriegumiem ir negatīvs, vēlams pieņemt, ka konkrētajam tinumam aizvietošanas shēma satur vienīgi atsevišķi aprēķināto aktīvo pretestību. Tinumu pilnās pretestības un aktīvās pretestības nosaka atbilstoši iepriekš aplūkotajam divtinumu transformatoru pretestību aprēķinu aprakstam.

Ja ir jāveic īsslēguma strāvu aprēķini pie sprieguma regulatora gala stāvokļiem RA vajadzībām, katram no gala stāvokļiem jāveic savs pretestības aprēķins atbilstoši augstāk izklāstītajai metodikai, pieņemot vispirms $\Delta U_{REG\%} = -\Delta U_{REG\text{max}\%}$ tad $\Delta U_{REG\%} = +\Delta U_{REG\text{max}\%}$ un nepieciešamības gadījumā arī $\Delta U_{REG\%} = 0\%$ [47].

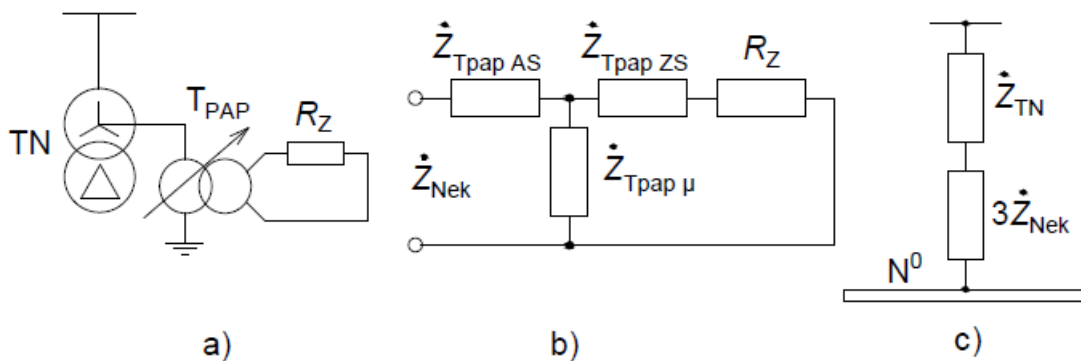
Atsevišķi var aplūkot neitrāli veidojošo jeb neitrāles transformatoru (turpmāk tekstā – NT) aizvietošanu. NT izmanto, lai citādi izolētas neitrāles režīmā esošu tīklu (visbiežāk 6–35 kV tīkli, kuru pusē visi spēka transformatoru tinumi saslēgti trīsstūra slēgumā un/vai zvaigznes slēgumā ar izolētu neitrāli) varētu ekspluatēt kompensētas vai mazrezistīvas, vai lielrezistīvas, vai arī mazinduktīvas neitrāles režīmā [18], [48], [49]. Galvenās šo neitrāles režīmu īpašības apkopotas šīs grāmatas 7. pielikumā. NT, ja tādus izmanto konkrētajā tīklā, parasti veido galvenos NS strāvas noslēgšanās ceļus, rodoties zemesslēgumiem, izņemot gadījumus, kad NT neitrālē ieslēgtas pretestības, kuru lielums ir tuvs tīkla kapacitatīvo vadītspēju pretestībām. Tādā veidā ar NT un to neitrālēs ieslēgtajām pretestībām iespējams kontrolēt tīkla NS strāvas noslēgšanās ceļu pretestības un zemesslēgumu strāvu stiprumu. Visbiežāk par NT kalpo transformators ar slēguma shēmu Y_0/Δ , kura jauda tiek izvēlēta atbilstoši tā neitrālē ieslēdzamā zemētājreaktora (Petersena spoles) vai pretestības jaudai. Šāda NT zvaigznes tinums tiek pieslēgts tīklam, kas pretējā gadījumā darbotos izolētas neitrāles režīmā, un trīsstūra tinums tiek atstāts tukšgaitas režīmā. Tādēļ TS un PS aizvietošanas shēmā šo transformatoru var neievērot vai aizstāt ar tukšgaitas režīma pretestību, kas savienota ar aizvietošanas shēmas neitrāli. NT zvaigznes tinuma neitrālē ieslēgto pretestību vispārīgi iespējams apzīmēt kā neitrāles pretestību

\dot{Z}_N . NS aizvietošanas shēma šādam NT “TN” un neitrāles pretestībai ir analogiska divtinumu transformatoriem ar šādu slēgumu shēmu (2.36. att.).



2.36. att. NT ar slēgumu shēmu $Y_0/\Delta-11$ un tā neitrālē ieslēgtu pretestību (a) NS aizvietošanas shēma (b), rodoties bojājumam Y_0 tinuma pusē.

Nedaudz sarežģītāks pretestības aprēķins jāveic, ja mazrezistīvas neitrāles režīms īstenots, NT neitrālē ieslēdzot zemētājreaktoru un rezistoru ieslēdzot šī reaktora sekundārajā tinumā. Šādā gadījumā aizvietošanas shēmā zemētājreaktoru iespējams aplūkot kā papildu vienfāzes transformatoru T_{PAP} . Šajā situācijā joprojām iespējams izmantot iepriekš parādīto NT aizvietošanas shēmu (2.36. att.), bet \dot{Z}_N vietā lietojama ekvivalentā pretestība, kuru nosaka, balstoties uz T_{PAP} aizvietošanas shēmu (2.37. att.), veicot tā ZS tinuma un rezistora R_Z pretestības reducēšanu uz aprēķina spriegumu. Šādu risinājumu var izmantot arī, ja ar zemētājreaktora (T_{PAP}) palīdzību NT neitrālē ieslēgta kāda cita pretestība.



2.37. att. Neitrāli veidojošā transformatora TN ar zemētājreaktora jeb papildu transformatora T_{pap} palīdzību neitrālē ieslēgtu aktīvo pretestību R_Z (a) ekvivalentās neitrāles pretestības noteikšanas shēma (b) un ievērošana NS aizvietošanas shēmā (c).

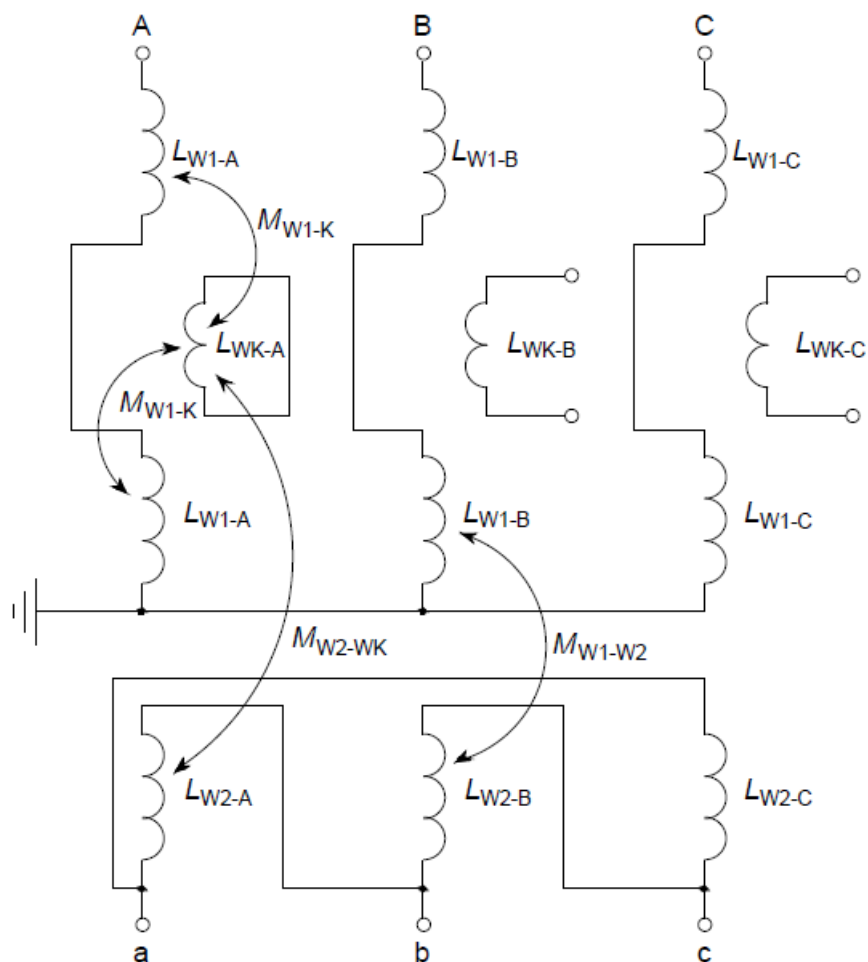
Turklāt, ņemot vērā, ka T_{PAP} patiesībā apzīmē zemētājreaktoru ar regulējamu gaisa spraugu, T_{PAP} izkliedes plūsma var būt ievērojama un bez papildu pārbaudes nedrīkst ignorēt magnetizācijas zara pretestību $\dot{Z}_{T_{pap}\mu}$.

Jāatzīmē, ka agrāk, īstenojot mazinduktīvas neitrāles režīmu, spēka transformatoru neitrālē mēdza pieslēgt NT, kurš saslēgts Z_0 jeb cikcakslēgumā un kuram nav sekundārā tinuma. Šādu NT iespējams parādīt NS aizvietošanas shēmā identiski divtinumu transformatoram ar slēguma shēmu Y/Z_0 , notiekot bojājumam Z_0 saslēgtā tinuma pusē, t. i., kā pretestību, kas savienota ar

NS aizvietošanas shēmas neitrāli un kuras vērtība aptuveni atbilst 10 % Z_0 tinuma TS pretestības vai vienīgi šī tinuma aktīvajai pretestībai [46].

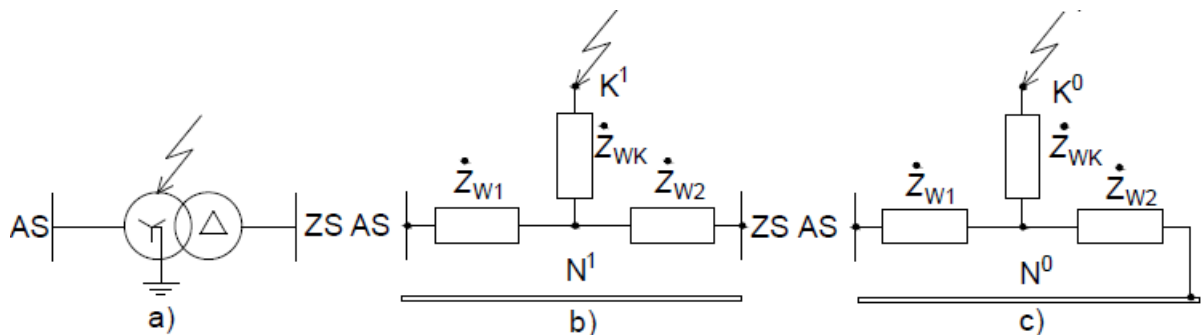
Tālāk īsi aplūkosim iespējamus risinājumus, ja radies transformatora iekšējais bojājums. Iepriekš analizētie scenāriji attiecināmi uz bojājumiem, kas notiek uz transformatora izvadiem, vai ārējiem bojājumiem. Visbiežāk transformatora iekšēji bojājumi sākuma stadijā rodas kā starpvijumu īsslēgumi [50], kas attīstoties kļūst par īsslēgumiem uz zemi (zemēto serdi), retāk par starpfāžu īsslēgumiem vai vēl sliktākā gadījumā – starptinumu īsslēgumiem, kad elektriski savienojas dažādu spriegumu pakāpju tinumi. Visbiežāk no tā, kādā stadijā ir transformatora iekšējais bojājums, citu tīkla elementu pretestību un EDS aprēķina principi nemainās, bet bojātajam transformatoram ir jānosaka lietojamā aizvietošanas shēma un tās pretestības, ievērojot reducēšanu uz vienu sprieguma pakāpi.

Sākotnējo starpvijumu īsslēgumu tuvināti iespējams izdalīt kā atsevišķu tinumu, kas sastāv no īsslēgtajiem vijumiem, kurā viena no fāzēm ir īsslēgta. Kā piemērs 2.38. attēlā parādīts starpvijumu īsslēgums transformatora ar slēguma shēmu Y_0/Δ zvaigznes tinuma A fāzē, kur īsslēgtie vijumi atrodas tinuma vidū. Šajos vijumos arī inducēsies EDS, unniecīgās atsevišķo vijumu pretestības dēļ tajos plūdis stipra atmagnetizējošā strāva. Lielā transformācijas koeficienta (tinumu palikušo vijumu un īsslēgto vijumu attiecības) dēļ primārajā un sekundārajā tinumā novērojamā strāvu izmaiņa būs niecīga. Minēto iemeslu dēļ tinumu starpvijumu īsslēgumu savlaicīga noteikšana ir sarežģīta un tai veltīts daudz pētījumu (piemēram, [51]–[53]). Pārējās fāzes izdalītajam nosacītajam īsslēguma tinumam ir tukšgaitas režīmā, lai ievērotu, ka šīs transformatora fāzes patiesībā nav bojātas. Lai veiktu pietiekamu parādītā transformatora īsslēguma režīma parametru aprēķinu, pat ignorējot aktīvās pretestības, būtu jānosaka palikušās zvaigznes tinuma daļas $W1$, īsslēgto vijumu WK un veselā trīsstūra tinuma $W2$ visu fāžu pašinduktivitātes (L_{W1} , L_{W2} , L_{WK}), kā arī mijinduktivitātes (M_{W1-WK} , M_{W1-W2} , M_{W2-WK}). Precīzam analītiskam aprēķinam jāzina serdes izmēri, veselo tinumu un īsslēgto vijumu izvietojums un tinumu izmēri, kurus var izmantot [54] parādītajā bojājumu modelī, vai, aplūkojot šādu transformatoru kā divtinumu, kur viens tinums ir šķelts, iespējams izmantot [55] aprakstīto metodiku. Vēl viens risinājums ir transformatora magnētiskā lauka precīza modelēšana ar galīgo elementu metodi [56], ko iespējams īstenot arī tādās specializētās modelēšanas programmās kā *QuickField*©.



2.38. att. Transformatora Y_0/Δ ar starpvijumu ģīslēgumu Y_0 tinuma vidū vienkāršots induktivitāšu un mijinduktivitāšu modelis.

Alternatīvs risinājums būtu rīkotiēs līdzīgi trīstinumu transformatoru standarta pretestību aprēķinam. Vispirms veicot trīs simetrisku ģīslēgumu eksperimentus starp tinumiem AS–ZS, AS–WK, ZS–WK, kur ģīslēgtos vijumus WK var ģīstenot, kā papildu uztītas sekcijas vai izmantojot sprieguma regulēšanas atzarojumus. Tad, izmantojot izmērītos ģīslēguma spriegumus un jaudas zudumus, atbilstoši (2.102.) un (2.103.) izrēķina tinumu pāru pretestības un ar (2.112.) pāriet uz katra tinuma atsevišķajām pretestībām. Attiecīgi būtu iespējams izmantot nosacīta trīstinumu transformatora $Y_0/Y_{0-WK}/\Delta$ (Y_{0-WK} ir izdalītais zvaigznes tinums ar vienģāzes ģīslēgumu) aizvietošanas shģemas (2.39. att.).



2.39. att. Transformatora ar slēgumu shēmu Y_0/Δ un starpvijumu īsslēgumu Y_0 tinumā (a) TS (b) un NS (c) aizvietošanas shēma.

Starptinumu īsslēgumiem jāveic speciāla bojājuma modelēšana, jo šādā situācijā viens no tinumiem ir elektriski savienots kā autotransformators, bet vienlaikus pārējās fāzes saglabājas elektriski izolētas. Īsslēgumiem uz zemēto serdi arī vēlams veikt detalizētāku transformatora modelēšanu.

2.4. Sinhronās mašīnas

Rotējošajām elektriskajām mašīnām, tostarp arī sinhronajām mašīnām (turpmāk tekstā – SM), mainās aizvietošanas shēmas parametru vērtības atkarībā no darba režīma, kas nav tik izteikts statistiskiem elementiem (EPL, transformatoriem, strāvu ierobežojošiem reaktoriem un statistiskai slodzei). Turklāt rotējošajām elektriskajām mašīnām darba režīmu lielā mērā nosaka ne tikai pārējā tīkla elektriskie parametri, bet arī mašīnas rotora asij pieliktais slodzes vai piedziņas spēka moments. SM, kuras energosistēmā pārsvarā atrodamas sinhrono ģeneratoru (turpmāk tekstā – SG) veidā, bojājumu aprēķiniem parasti izdala trīs režīmus: statisks jeb nostabilizējies režīms, pārejas režīms, kas raksturīgs, rodoties attālinātiem bojājumiem, un virspārejas režīms, kas raksturīgs, rodoties elektriski tuviem bojājumiem un ko visbiežāk aplūko pie īsslēgumiem uz ģeneratora izvadiem. Papildus tam atkarībā no ģeneratora veida – turboģenerators (turpmāk tekstā – TG) vai hidroģenerators (turpmāk tekstā – HG) – ir būtiskas atšķirības rotora uzbūvē un attiecīgi arī aizvietošanas shēmu elektriskajos parametros. TG rotorus tipveidā izveido apaļus un vienmērīgus, bet HG – ar izvirzītiem poliem. Tādēļ, veicot elektrisko mašīnu analīzi, tās visbiežāk aplūko d, q koordinātu sistēmā, kur d koordinātai atbilst mašīnas garenass, kas sakrīt ar rotora polu asi, bet q koordinātei atbilst mašīnas šķērsass, kas ir perpendikulāra rotora polu asij. Saprota, ka TG rotora simetrijas dēļ abu koordinātu sastāvdaļas sakrīt, bet HG statora strāvu sadala d, q komponentēs [10]:

$$\begin{cases} I_d = I_{Gf} \sin(\psi) \\ I_q = I_{Gf} \cos(\psi) \end{cases} \quad (2.125.)$$

kur I_d, I_q – ģeneratora fāzes strāvas garenkomponente un šķērskomponente, A;

I_{Gf} – ģeneratora fāzes strāva, A;

ψ – leņķis starp ģeneratora fāzes strāvu un ģeneratora šķērsasi, °.

SKM aprēķinos izmanto EDS, kurš sakrīt ar ģeneratora šķērsasi, jo fizikāli statorā inducēto EDS nosaka magnētiskās plūsmas, kuras simetrijas ass sakrīt ar rotora garenasi d , atvasinājums,

kas rada statora EDS vektora nobīdi par 90° no d ass. Abām asīm summārās sinhronās induktīvās statora pretestības, kuras lietojamas aizvietošanas shēmās stabilos sinhronas darbības režīmos, ir [10]:

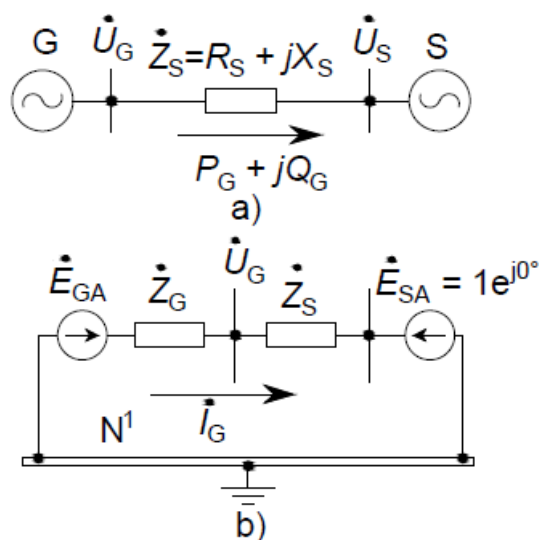
$$\begin{cases} X_d = X_\sigma + X_{ad} \\ X_q = X_\sigma + X_{aq} \end{cases} \quad (2.126.)$$

kur X_d, X_q – summārā sinhronā statora garenass un šķērsass induktīvā pretestība, Ω ;

X_σ – statora izkliedes lauka induktīvā pretestība, Ω ;

X_{ad}, X_{aq} – statora reakcijas plūsmas garenass un šķērsass induktīvā pretestība, Ω

Turpmākai SG analīzei un izpratnei par nepieciešamajiem parametriem un aprēķiniem ir lietderīgi aplūkot ģeneratoru G, kurš ar saites elementu summāro pretestību \dot{Z}_S pieslēgts bezgalīgas jaudas energosistēmai S (2.40. att.). Šajā attēlā redzams, ka ģeneratoru TS aizvietošanas shēmās aizstāj ar virknē saslēgtu aprēķina fāzes EDS avotu \dot{E}_G (parādīts A fāzei) un ģeneratora fāzes pretestību \dot{Z}_G , kur EDS avota viens izvads pieslēgts TS aizvietošanas shēmas neitrālei N^1 . Atkarībā no BV, smaguma un aprēķina laika kopš bojājuma rašanās TS EDS un pretestības vērtības ir atšķirīgas. PS aizvietošanas shēmās SG aizvieto ar ģeneratoram atbilstošo PS pretestību \dot{Z}_G^2 , kuras viens izvads tiek pieslēgts PS aizvietošanas shēmas neitrālei N^2 , bet NS aizvietošanas shēmās atkarībā no BV un ģeneratora slēguma shēmas to aizvieto ar pārrāvumu vai NS pretestību \dot{Z}_G^0 , kuras viens izvads tiek pieslēgts NS aizvietošanas shēmas neitrālei N^0 [8], [17]. Saprotams, ka ir jāaplūko minētā EDS un secību aizvietošanas shēmās izmantoto pretestību noteikšana.



2.40. att. Ģenerators, kas pieslēgts bezgalīgas jaudas sistēmai ar saites elementiem (a), un parādītā tīkla TS aizvietošanas shēma (b) [57].

Vispirms var aplūkot SG TS parametru aprēķinus. Vispārīgā veidā ģeneratora EDS moduli un leņķi iespējams noteikt ar šādām formulām [57]:

$$|\dot{E}_G| = \sqrt{\left(|\dot{U}_S| + \frac{P_G R_\Sigma + Q_G X_\Sigma}{|\dot{U}_S|}\right)^2 + \left(\frac{P_G X_\Sigma - Q_G R_\Sigma}{|\dot{U}_S|}\right)^2}, \quad (2.127.)$$

$$\delta = \arctg([P_G X_\Sigma - Q_G R_\Sigma] / [|\dot{U}_S| + P_G R_\Sigma + Q_G X_\Sigma]), \quad (2.128.)$$

kur R_Σ, X_Σ – summārā aktīvā un induktīvā pretestība starp ģenerators EDS un sistēmas spriegumu, Ω ;

δ – ģenerators slodzes leņķis, kas veidojas starp ģenerators EDS un sistēmas spriegumu, $^\circ$.

Otrs variants – no ģenerators tīkla nodotās jaudas aprēķināt ģenerators strāvu [5]:

$$\dot{I}_G = \hat{S}_G / \sqrt{3} \hat{U}_{SF-F}, \quad (2.129.)$$

kur \dot{I}_G – ģenerators fāzes strāva, A;

\hat{S}_G – ģenerators kompleksi saistītā pilnā jauda, VA;

\hat{U}_{SF-F} – kompleksi saistītais sistēmas kopņu F–F spriegums, V.

Tad sistēmas fāzes spriegumam tiek pieskaitīts sprieguma kritums summārajā pretestībā:

$$\dot{E}_G = \dot{U}_{SF-Z} + \dot{I}_G \dot{Z}_\Sigma = \dot{U}_{SF-Z} + \dot{I}_G (\dot{Z}_G + \dot{Z}_S), \quad (2.130.)$$

kur \dot{E}_G – ģenerators F–Z spriegums jeb EDS, V;

\dot{U}_{SF-Z} – sistēmas kopņu F–Z spriegums, V;

\dot{Z}_G, \dot{Z}_S – ģenerators un saites elementu līdz sistēmai pilnā pretestība, Ω .

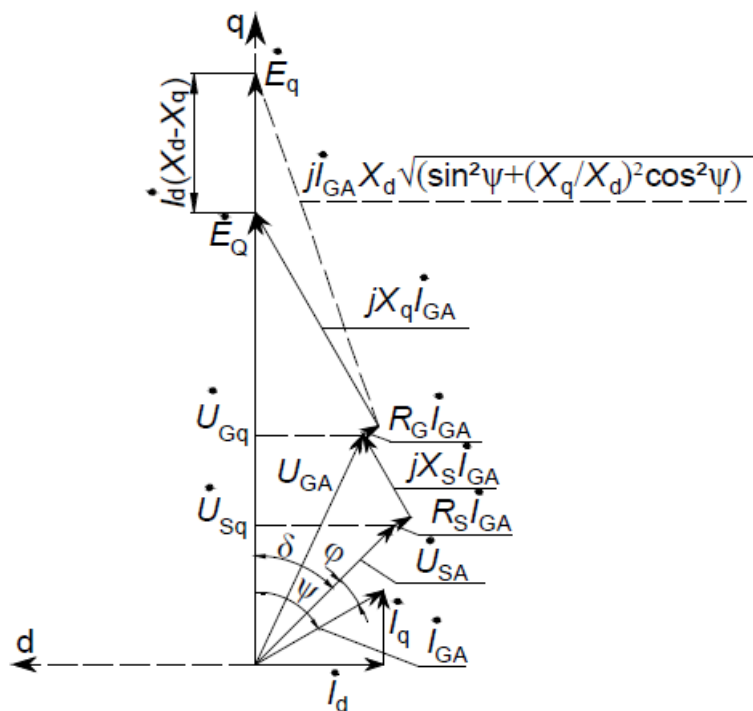
TG($X_d = X_q$) stabilā režīmā formulās (2.127.), (2.128.) un (2.130.) izmanto X_d , kas ļauj noteikt aizvietošanas shēmās izmantojamo šķērsass EDS $\dot{E}_G = \dot{E}_q$, un aizvietošanas shēmās ģenerators pretestību veido statora TS aktīvā pretestība R_G^1 un statora garenass reaktance X_d . Savukārt HG ($X_d \neq X_q$) rotora nesimetrijas dēļ tiešā veidā izmantot EDS \dot{E}_q , kā to dara TG, nav iespējams. Tā vietā nosaka ekvivalentu EDS \dot{E}_Q (2.41. att.), kurš nodrošina \dot{E}_q identisku ģenerators strāvas stiprumu un nemaina ģenerators slodzes leņķi δ . Šajā gadījumā formulās (2.127.), (2.128.) un (2.130.) un aizvietošanas shēmās lieto TS aktīvo pretestību R_G^1 un ģenerators šķērsass reaktanci X_q . Alternatīvu \dot{E}_q iespējams iegūt, pie \dot{E}_Q pieskaitot sprieguma kritumu $\dot{I}_d (X_d - X_q)$. Grāmatā [57] pieminēta iespēja HG X_q vietā izmantot $X_d \xi$, kur:

$$\xi = \sqrt{\sin^2(\psi) + (X_q/X_d)^2 \cos^2(\psi)}, \quad (2.131.)$$

kur ξ – ģenerators reaktances korekcijas koeficients;

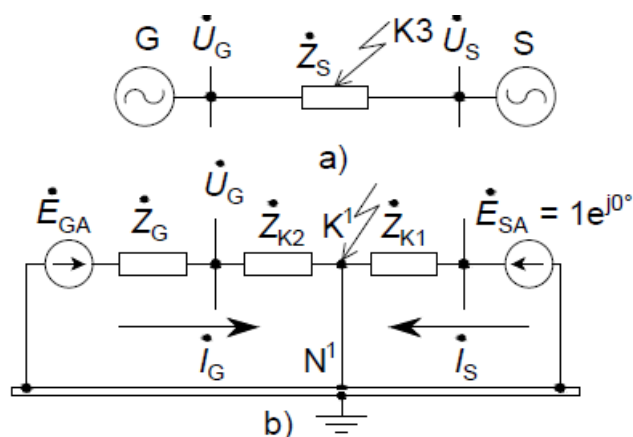
ψ – leņķis starp ģenerators fāzes strāvu un q asi, $^\circ$.

Tomēr, ņemot vērā, ka $X_d \xi$ var mainīt vērtību no X_q līdz X_d , tad atbilstoši [17] \dot{E}_q slodzes leņķis varētu pārsniegt \dot{E}_Q , tādēļ drošāk izmantot \dot{E}_Q . Jāpiebilst, ka formulas (2.127.), (2.128.) un (2.130.) ērti izmantot vienkāršās aizvietošanas shēmās, kur saites elementu starp energosistēmu un ģenerators nav daudz, bet sarežģītākā sazarotā tīklā ar vairākiem ģeneratorsiem vispirms ir jāveic pirmsavārijas režīma parametru aprēķins, lai noteiktu spriegumu uz ģenerators vai tā transformators kopnēm, un tad jāizmanto formulas (2.127.), (2.128.) un (2.130.), bet pieņemot SG vai tā transformators kopni par sistēmas kopni.



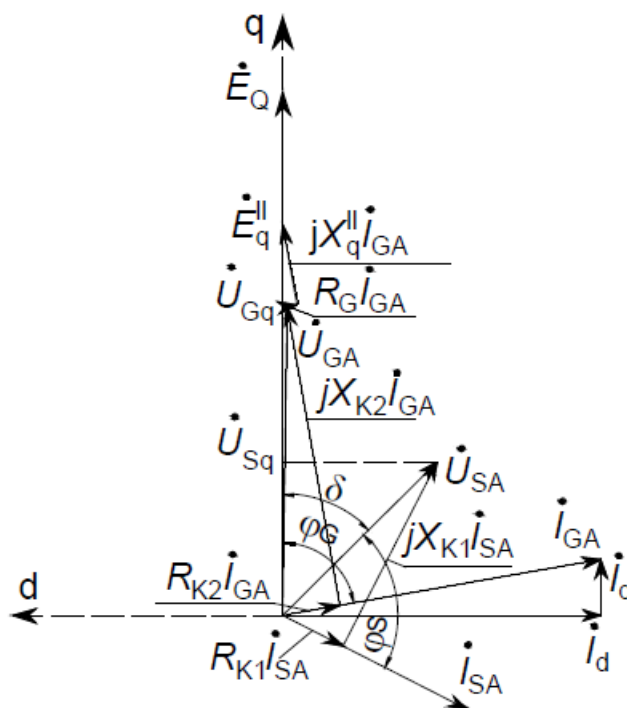
2.41. att. Bezgalīgas jaudas sistēmai pieslēgta HG vektoru diagramma [10].

Bojājumu režīmu parametru aprēķinos atkarībā no bojājuma smaguma un elektriskā attāluma lieto virspārejas, pārejas vai stabila režīma pretestības un EDS moduļu lielumus, kuru tipveida vērtības dod ražotājs. **Ģenerators EDS slodzes leņķis bojājuma sākuma momentā ģenerators rotora inerces dēļ nespēj strauji mainīties.** Papildus jāņem vērā, ka vismaz RA darbības analīzei visbiežāk ir pietiekami izskatīt bojājuma laiku līdz 1–1,5 s, pat aplūkojot rezervējošo aizsardzības zonu darbību un pieņemot salīdzinoši lielu selektivitātes pakāpi (0,5 s [58]). Smagu bojājumu (visbiežāk ģeneratoriem tuvi īsslēgumi) gadījumos iespējams ģenerators elektromehāniskais pārejas process, kura rezultātā ievērojami svārstās ģenerators slodzes leņķis vai ģenerators pat zaudē sinhrono darbību. Tad precīziem aprēķiniem jāveic elektromehāniskā pārejas procesa modelēšana, piemēram, tādās datorprogrammās kā *Simscape Electrical*TM [59], *ETAP*[®] [60] u. c., vai jāizmanto aptuvenas iteratīvas metodes, piemēram, galīgo intervālu metode [57], [61], [62]. Vēl viena alternatīva ir izmantot gatavas tipveida ģenerators slodzes leņķa noteikšanas raksturlīknes [6]. 2.42. attēlā parādīts trīsfāžu īsslēgums ģenerators saites elementā un tam atbilstoša aizvietošanas shēma, kur saites elementa pretestība sadalīta divās daļās \dot{Z}_{K1} un \dot{Z}_{K2} .



2.42. att. Simetrisks trīsfažu īsslēgums saites elementā starp ģeneratoru un bezgalīgas jaudas sistēmu (a) un tam atbilstošā TS aizvietošanas shēma (b).

Elektriski tuva īsslēguma gadījumā \dot{E}_G vietā tiek izmantota q ass EDS virspārejas vērtība \dot{E}_q'' un HG izmanto reaktanci X_q'' , bet TG X_d'' (aktīvo pretestību var pieņemt vienādu ar stabila režīma pretestību). 2.43. attēlā parādīta 2.42. attēlam atbilstoša īsslēguma sākuma momenta vektoru diagramma, kurā redzams, ka īsslēguma sākumā slodzes leņķis δ saglabājis savu vērtību no pirmsavārijas režīma vektoru diagrammas (2.41. att.) un bezgalīgas jaudas sistēmas kopnes spriegums arī nav mainījies, bet HG EDS amplitūda ir ievērojami samazinājusies ($E_Q > E_q''$, līdzīgi arī TG: $E_q > E_Q > E_q''$ [57]). 2.42. attēlā parādītajā aizvietošanas shēmā redzams, ka tagad tīklam ir nodalīti ģeneratora un sistēmas zari, kuros strāvu stiprumi būs daudz lielāki nekā slodzes režīmā, un 2.43. attēlā dotā vektoru diagramma parāda, ka pieaug arī leņķi starp šīm strāvām un sistēmas spriegumu un ģeneratora EDS (īsslēguma režīmā noteicošās ir saites elementu pretestības, kurām parasti piemīt vairāk induktīvs nekā aktīvs raksturs). Šajā režīmā ģeneratora EDS un sistēmas kopņu spriegumu var vektoriāli iegūt no nulles punkta (BV spriegums metāliskam trīsfažu īsslēgumam), pieskaitot spriegumu kritumus saites pretestību \dot{Z}_{K1} un \dot{Z}_{K2} aktīvajā un induktīvajā sastāvdaļās un sprieguma kritumus ģeneratora pretestības \dot{Z}_G aktīvajā un induktīvajā sastāvdaļā (2.43. att.). Ja starp ģeneratoru un sistēmu būtu vēl paralēlas saites (paralēli transformatori un līnijas), tad ģeneratora EDS un sistēmas kopnes spriegumu būtu iespējams vektoriāli konstruēt, gan sākot no īsslēguma punkta, gan no otra elementa kopnes sprieguma (līdzīgi vektoru diagrammai 2.41. att.).



2.43. att. Vektoru diagramma gadījumā, ja rodas elektriski tuvs trīsfāžu īsslēgums saites elementā starp HG un bezgalīgas jaudas sistēmu [10].

TS aizvietošanas shēmā dažādos ģeneratora režīmos lietojamais EDS un reaktance ir apkopoti 2.13. tabulā.

2.13. tabula

SG TS EDS amplitūdu un reaktances vērtību lietojums dažādos ģeneratoru režīmos [2], [57]

Režīms		Stabils	Pārejas	Virspārejas
TG ($X_d = X_q$)	E_G	E_q	E'_q	E''_q
	X_G	X_d	X_d	X''_d
HG ($X_d \neq X_q$)	E_G	E_Q	E'_q	E''_q
	X_G	X_q	X'_d	$X''_q \approx X''_d$

Svarīgi saprast, kura režīma parametri jāizmanto konkrētā aprēķina scenārijam. Viens no kritērijiem ir aprēķina laika moments kopš bojājuma rašanās. Šajā ziņā noteicošās ir ģeneratora laika konstantes. Literatūrā definētas šādas tipveida ģeneratoru laika konstantes [2], [10]:

- ✓ T_{do} – SG ierosmes tinuma laika konstante, kas noteikta, statoram esot tukšgaitas režīmā bez slāpētājtinuma un bez papildu pretestību ieslēgšanas ierosmes ķēdē, un kas parāda laiku, kurā ierosmes tinuma strāva norimst līdz $1/e \approx 0,368$ r. v. no savas sākotnējās vērtības (parasti izmanto ģeneratora magnētiskā lauka dzēšanas aprēķinos);
- ✓ T_d – SG pārejas laika konstante, kas parāda laiku, kurā ierosmes tinuma aperiodiskā strāva norimst līdz $1/e \approx 0,368$ r. v. no savas sākotnējās vērtības pēc pēkšņām SG režīma izmaiņām;

- ✓ T''_d – SG virspārejas laika konstante, kas parāda laiku, kurā slāpētājtinuma aperiodiskā strāva norimst līdz $1/e \approx 0,368$ r. v. no savas sākotnējās vērtības pēc pēkšņām īpaši izteiktām SG režīma izmaiņām;
- ✓ T_a – SG statora tinuma laika konstante, kas parāda laiku, kurā statora tinuma aperiodiskā strāva norimst līdz $1/e \approx 0,368$ r. v. no savas sākotnējās vērtības pēc pēkšņām SG režīma izmaiņām (plaši izmanto īsslēgumu triecienstrāvu aprēķinos);
- ✓ T_J – SG inerces laika konstante, kas parāda laiku, kurā ģenerators no nekustīga stāvokļa ieskriesies līdz nominālajai leņķiskajai frekvencei (šī konstante ir svarīga, veicot ģenerators dinamiskās stabilitātes analīzi).

Precīzam aprēķinam, lai noteiktu atšķirības starp pārejas un virspārejas režīma lietojumu, parasti jānosaka pretestība starp īsslēguma vietu un ģeneratoru un jāizmanto tipveida raksturliķnes konkrētu vērtību noteikšanai (sīkāks skaidrojums dots [6], [14]). Tuvinātos aprēķinos virspārejas vērtības izmanto, ja ģeneratoram ir slāpētājtinums (raksturīgi HG) vai ir dotas virspārejas EDS un reaktances vērtības (arī TG rotora virsmā var inducēties aperiodiska virspārejas strāva, ja ierosmes tinums nav iestrādāts vienmērīgi pa visu rotora virsmu), ja radies īsslēgums uz ģenerators izvadiem vai elektriski tuvu ģeneratoram (piemēram, kabeli līdz transformatoram, transformatora tinumā, kas ir ģenerators pusē) un ja aprēķina laika moments ir robežās no 0 s līdz $3T''_d$, pēc kura slāpētājtinuma aperiodiskā strāva būs norimusi zem 5 % robežas ($1/3e \approx 0,0498$ r. v.) no sākotnējās vērtības. Šādiem smagiem īsslēgumiem, veicot aprēķinu laika momentam intervālā no $3T''_d$ līdz $3T'_d$, pēc kura ierosmes tinuma aperiodiskā strāva norims zem 5 % robežas no sākotnējās vērtības, jālieto pārejas režīma parametru vērtības, bet, veicot aprēķinu laika momentam pēc $3T'_d$, lietojamas stabila režīma EDS un reaktances vērtības. Pārejas režīma vērtības bojājuma sākuma momentam lietojamas, ja ir radies īsslēgums vismaz aiz ģenerators transformatora un starp ģeneratoru un sistēmu ir 1 vai 2 līnijas (pārsvarā mācību uzdevumi), bet sazarota sarežģīta tīkla gadījumā iespējams sākumā veikt bojājuma aprēķinu ar stabila režīma vērtībām un, ja novērojamas vismaz 5 % izmaiņas ģenerators kopņu spriegumā un ir mainījies arī slodzes leņķis, salīdzinot ar slodzes vai pirmsavārijas režīmu, tad bojājuma aprēķinu korigē, izmantojot pārejas režīma vērtības. Šāda bojājuma aprēķinam pārejas režīma vērtības lieto laika posmam no 0 s līdz $3T'_d$, bet, veicot aprēķinu laika momentam pēc $3T'_d$, lietojamas stabila režīma EDS un reaktances vērtības. Aprēķinot režīma parametrus laika momentam, kas atšķiras no bojājuma rašanās brīža, svarīgi atcerēties arī to, ka slodzes leņķis δ ir relatīvs leņķis starp ģenerators EDS un sistēmas spriegumu. Vienlaikus tas, ka slodzes leņķis δ pieņemts konstants aprēķina laikā, nemaina faktu, ka ģenerators EDS un sistēmas sprieguma vektori joprojām rotē kompleksajā plaknē ar nominālo vai, visticamāk, tai tuvu leņķisko frekvenci ω . Tādēļ faktisko bojājuma strāvu un spriegumu komplekso vērtību noteikšanai aizvietošanas shēmās avotu EDS vērtības var nākties korigēt, veicot šo EDS pagriezienus atbilstoši leņķim, ko nosaka aprēķina laiks un leņķiskā frekvence ω .

Zinot, kādas EDS un reaktances vērtības jāizmanto katram SG režīmam un kā tuvināti noteikt ģenerators režīmu, ir lietderīgi apkopot un parādīt vismaz aptuvenas šo parametru skaitliskās vērtības. 2.14. tabulā parādītas aptuvenās pretestību un laika konstanšu vērtības.

SG un kompensatoru pretestību un laika konstanšu aptuvenās vērtības [10]

Parametrs	TG ($X_d = X_q$)	HG ($X_d \neq X_q$)		Sinhronie kompensatori
		Ar slāpētāj- tinumu	Bez slāpētāj- tinuma	
Garenass statora reakcijas induktīvā pretestība X_{ad} , r. v.	1,1–2,5	0,5–1,5	0,5–1,5	1,4–2,3
Šķērsass statora reakcijas induktīvā pretestība X_{aq} , r. v.	1,1–2,5	0,3–0,9	0,3–0,9	0,8–1,3
Statora izkliedes plūsmas induktīvā pretestība X_{σ} , r. v.	0,08–0,25	0,1–0,3	0,1–0,3	0,1–0,2
Statora tinuma aktīvā TS pretestība R^1_G , r. v.	0,002– 0,008	0,002–0,02	0,002–0,02	0,002–0,02
Garenass sinhronā induktīvā pretestība X_d , r. v.	1,2–2,75	0,6–1,8	0,6–1,8	1,5–2,5
Šķērsass sinhronā induktīvā pretestība X_q , r. v.	1,2–2,75	0,4–1,2	0,4–1,2	0,9–1,5
Garenass pārejas induktīvā pretestība X'_d , r. v.	0,2–0,4	0,2–0,5	0,2–0,5	0,3–0,6
Garenass virspārejas induktīvā pretestība X''_d , r. v.	0,12–0,3	0,15–0,35	–	0,15–0,35
Šķērsass virspārejas induktīvā pretestība X''_q , r. v.	0,12–0,3	0,15–0,35	–	0,15–0,35
PS induktīvā pretestība X^2_G , r. v.	0,12–0,3	0,15–0,35	0,3–0,8	0,15–0,35
PS aktīvā pretestība R^2_G , r. v.	0,02–0,05	0,015–0,025	0,02–0,05	0,02–0,07
NS induktīvā pretestība X^0_G , r. v.	0,02–0,1	0,02–0,2	0,04–0,25	0,02–0,2
NS aktīvā pretestība R^0_G , r. v.	0,002– 0,01	0,002–0,02	0,002–0,02	0,002–0,02
Ierosmes tinuma laika konstante T_{do} , s	3–12	–	2–10	4–12
Pārejas laika konstante T'_d , s	0,4–1,6	0,6–3	0,6–3	0,8–3
Virspārejas laika konstante T''_d , s	0,03–0,13	0,02–0,08	–	0,02–0,03
Statora tinuma laika konstante T_a , s	0,04–0,4	0,03–0,4	0,1–0,5	0,1–0,5
Inerces laika konstante T_J , s	7–11	3–9	3–9	2–5

Runājot par EDS vērtībām, ģeneratoriem ar jaudu līdz 100 MW var lietot 2.15. tabulas datus, kas ir atrodami literatūrā.

2.15. tabula

SG ar nominālo aktīvo jaudu līdz 100 MW aptuvenās pārejas un virspārejas EDS un reaktances vērtības [2]

Parametrs	TG ($X_d = X_q$)	HG ($X_d \neq X_q$)
E'_q , r. v.	1,12	1,15
E''_q , r. v.	1,08	1,21
X'_d , r. v.	0,2	0,35
X''_d , r. v.	0,13	0,25

Savukārt, [14], [17] atrodami papildu vidējie dati SM virspārejas režīmos (2.16. tabula).

2.16. tabula

SM aptuvenās virspārejas EDS un reaktances vērtības [14], [17]

SM veids	Parametrs	
	X''_d , r. v.	E''_q , r. v.
TG ($X_d = X_q$) ar jaudu līdz 100 MW	0,125	1,08
TG ($X_d = X_q$) ar jaudu līdz 100–500 MW	0,2	1,13
HG ($X_d \neq X_q$) ar slāpētājtinumu	0,2	1,13
HG ($X_d \neq X_q$) bez slāpētājtinuma	0,27	1,18
Sinhronie kompensatori	0,2	1,20
Sinhronie dzinēji	0,2	1,1

PS pretestības SM nosaka, izmantojot ražotāja datus, vai arī tuvināti iespējams izmantot 2.14. tabulā dotās vērtības, bet, ja ir zināmas precīzas garenass un šķērsass virspārejas vai pārejas reaktances, tad izvīzītu polu SM ar slāpētājtinumu PS pretestību var aptuveni aprēķināt ar formulu [2]:

$$X_G^2 = X_d'' + X_q''/2, \quad (2.132.)$$

bet izvīzītu polu SM bez slāpētājtinuma [17]:

$$X_G^2 = X_d' + X_q'/2. \quad (2.133.)$$

Tuvinātos aprēķinos SM PS reaktanci mēdz noteikt arī ar vienkāršotām formulām (mašīnām ar slāpētājtinumu $X_G^2 \approx 1,22X_d''$, bet bez slāpētājtinuma $X_G^2 \approx 1,45X_d'$ [2]), kamēr aktīvo PS pretestību var aptuveni pieņemt no 2.14. tabulas. Ja SM neitrāle ir zemēta (visbiežāk novērojams mašīnām ar nominālo spriegumu zem 0,66 kV), tad rodas iespēja noslēgties 3. harmonikas strāvām, kas ietekmē arī mašīnas PS pretestību: $X_G^2 \approx \sqrt{X_d'X_q}$ [2]. NS

aizvietošanas shēmās SM ievēro, ja mašīnas neitrāle ir zemēta (izolētas neitrāles gadījumā SM atbilst pārrāvumam). NS plūsma SM pārsvarā noslēdzas kā izkliedes plūsma, tādēļ tām atbilst maza NS reaktance, kā tas redzams arī 2.14. tabulā.

Sinhronajiem kompensatoriem, kuri atkarībā no darbības pārierosinātā vai nepilnas ierosmes režīmā ģenerē vai patērē reaktīvo jaudu, un sinhronajiem dzinējiem aizvietošanas principi ir līdzīgi. Skaitliskās EDS un reaktances vērtības dotas 2.14. un 2.16. tabulā. Tomēr, nosakot sākotnējo EDS moduli vai slodzes leņķi ar (2.127.) un (2.128.) vai (2.130.), jāņem vērā apstākļi, ka pārsvarā šīs mašīnas patērē aktīvo jaudu un atkarībā no ierosmes var patērēt arī reaktīvo jaudu, tādēļ slodzes leņķis bieži būs negatīvs.

Zinot SM parametrus relatīvajās vienībās, praktiskajiem aprēķiniem var būt jānosaka pretestību vērtības arī nosauktajās vienībās. Ģenerators pretestības nosaukto vienību sistēmā neatkarīgi no to veida (aktīvā vai reaktīvā) vai secības, zinot to vērtības r. v. (attiecinātas pret ģenerators nominālo jaudu), iespējams aprēķināt ar formulu [15]:

$$Z_G = Z_{Grv} U_{APR}^2 / S_{GN}, \quad (2.134.)$$

kur Z_G – ģenerators vai citas SM pretestība, reducēta uz aprēķina spriegumu, Ω ;

Z_{Grv} – ģenerators vai citas SM pretestība, attiecināta pret ģenerators nominālo jaudu (ražotāju un norāžu tabulās dotās vērtības), r. v.;

U_{APR} – aprēķina jeb vidējais nominālais (līnijas jeb starpfāžu) spriegums, V;

S_{GN} – ģenerators vai citas SM nominālā pilnā jauda, VA.

Savukārt fāžu EDS vērtības iespējams noteikt, izmantojot pirmsavārijas režīmam aprēķināto ģenerators slodzes leņķi δ attiecībā pret bezgalīgas jaudas sistēmas A fāzes kopnes sprieguma vektoru [4]:

$$\dot{E}_{GA} = E_{TV} U_{APR} (\cos(\delta) + j \sin(\delta)) / \sqrt{3}, \quad (2.135.)$$

kur \dot{E}_G – ģenerators vai citas SM EDS kompleksā vērtība, V;

E_{TV} – ģenerators EDS, kas izvēlēts atbilstoši SM režīmam (2.13. tabula), r. v.

Fāžu B un C EDS kompleksās vērtības iespējams noteikt, ņemot vērā, ka tīklam ar pareizu fāžu secību pieslēgta SG EDS vektoru sistēma atbilst TS vektoru sistēmai, kas ļauj noteikt pārējo fāžu EDS vektorus, veicot A fāzes vektora pagriezienus par -120° un 120° .

Iepriekš aprakstīto ģenerators EDS noteikšanas metodiku izmanto ne tikai skaitliskos bojājumu režīmu parametru aprēķinos, bet arī praktiski asinhronās gaitas novēršanas automātikā, kura vienlaikus nosaka vairāku ģenerators EDS vērtības, pateicoties RAA terminālu savstarpējai komunikācijai [63], [64].

2.5. Lieljaudas energosistēmas

Ar lieljaudas energosistēmām saprot lielu ģenerators, slodžu un saites elementu kopumu, kura kopējā jauda daudzkārt pārsniedz aprēķinam izdalītā tīkla elementu jaudu un kurš aizvietots ar vienu ekvivalentu elementu un tā pieslēguma kopnēm. Vispirms var aplūkot energosistēmas, kuras pieņemtas par bezgalīgas jaudas sistēmām. Šādām sistēmām neatkarīgi no analizējamā tīkla režīma uz kopnēm saglabājas nominālais spriegums un sinhronā darbība

[14], [57]. Bezgalīgas jaudas energosistēmu TS aizvietošanas shēmā aizvieto ar EDS, kura amplitūda ir 1 r. v., un leņķi A fāzei tipveidā pieņem sakrītošu ar kompleksās plaknes reālo asi (t. i., 0°), kā tas parādīts 2.40. attēlā. Jāpiebilst, ka slodzes režīma parametru aprēķinos bezgalīgas jaudas sistēmu mēdz atspoguļot vienkārši kā balansējošu mezglu vai kopni, bet atšķirībā no bojājumu aprēķiniem, pieņemot nominālo spriegumu par bāzes mezgla spriegumu. PS aizvietošanas shēmā bezgalīgas jaudas sistēmu aizvieto kā savienojumu starp PS aizvietošanas shēmas neitrāli un sistēmas pieslēguma kopnēm. Līdzīgu aizvietošanu veic arī NS aizvietošanas shēmās, ja sistēmas neitrāle ir zemēta (izolētas neitrāles gadījumā sistēmas NS aizvietošanas shēma būs pārrāvums). Patiesībā, pat apvienotu lielu energosistēmu jaudas nav bezgalīgas. Šo faktu ievēro aizvietošanas shēmās, energosistēmu ievērojot identiski SG: TS aizvietošanas shēmās kā virknē slēgtu EDS un sistēmas ekvivalento TS pretestību, PS aizvietošanas shēmā kā ekvivalento PS pretestību, kuras viens izvads pieslēgts PS aizvietošanas shēmas neitrālei, un NS aizvietošanas shēmā kā ekvivalento NS pretestību, kuras viens izvads pieslēgts NS aizvietošanas shēmas neitrālei, ja sistēmas neitrāle ir zemēta vai kā pārrāvumu, ja neitrāle ir izolēta [4], [14].

Sistēmas ekvivalento pretestību vērtības visbiežāk aprēķināmas no zināmas sistēmas īsslēguma jaudas S_{KS} vai īsslēguma strāvas I_{KS} [15], [16] pie aprēķina sprieguma:

$$Z_S = U_{APR}/\sqrt{3}I_{KS} = U_{APR}^2/S_{KS}, \quad (2.136.)$$

vai relatīvo vienību sistēmā [15], [16]:

$$Z_{Srv} = I_B/I_{KS} = S_B/S_{KS}, \quad (2.137.)$$

kur Z_S – apvienotās energosistēmas pilnās pretestības modulis Ω ;

S_{KS} – apvienotās energosistēmas īsslēguma jauda, VA;

I_{KS} – apvienotās energosistēmas īsslēguma strāva, A

Ja nav zināma sistēmas īsslēguma strāva vai īsslēguma jauda, to var tuvināti pieņemt vienādu ar jaudas slēdža vai slēdžu, kas savieno sistēmu ar tās kopni, nominālo atslēgšanas strāvu vai atslēgšanas jaudu [15]. Zinot pretestības moduli, atliek noteikt tās komplekso vērtību, kam parasti izmanto reaktīvās (visbiežāk induktīvās) un aktīvās pretestības moduļu attiecību X/R vai sistēmas pretestības leņķi [8]:

$$\varphi_S = \arctg(X/R), \quad (2.138.)$$

$$\dot{Z}_S = Z_S(\cos(\varphi_S) + j \sin(\varphi_S)), \quad (2.139.)$$

kur φ_S – apvienotās energosistēmas pilnās pretestības leņķis, $^\circ$.

Ja nav zināmas apvienotās sistēmas summārās pretestības X/R attiecības vērtības, tad tuvinātiem aprēķiniem var pieņemt spēka transformatoriem, kas atrodas sistēmas kopnei tuvākajā apakšstacijā, identisku X/R vērtību, ja tā iekļauta sistēmas elementā. Attiecīgi X/R vērtību var tuvināti pieņemt 15 un mazāk, 15–30 un 20–40, ja aiz sistēmas kopnēm pieslēgto transformatoru vai autotransformatoru jaudas ir 20 MVA un mazāk, 30–100 MVA un 100 MVA un vairāk [2]). Attiecības X/R vērtības dotas arī, ja par sistēmas kopnēm izvēlētas kopnes, kurām pieslēgtas GL, kas iekļaujamas apvienotajā sistēmas elementā (X/R vērtību var

tuvināti pieņemt 6,3, 6,3–9,4, 9,4–12,6 un 18,8–25,1, ja šādu sistēmas kopņu nominālais spriegums ir 35 kV, 110–150 kV, 220–330 kV un 500–750 kV [17]).

PS un NS pretestība energosistēmai nosakāma ar formulu (2.134.), ja zināmas to vērtības relatīvajās vienībās un katras secības atbilstošā X/R (vai tuvināti TS X/R , ja pārējām secībām šī attiecība nav zināma). Savukārt, ja trūkst informācijas par energosistēmas PS un NS pretestībām relatīvajās vienībās, tad pirmajam tuvinājumam var pieņemt, ka PS pretestība ir vienāda ar TS pretestību, bet NS pretestība ir vienāda ar trīskāršotu TS pretestību.

EDS vērtību A fāzei iespējams noteikt ar vienādojuma (2.135.) palīdzību, pieņemot leņķi 0° un moduli 1 r. v., bet pārējām fāzēm – izmantojot TS vektoru pagriezienus.

2.6. Asinhronās mašīnas un elektriskā slodze

Aplūkojot asinhronās mašīnas, visbiežāk jāanalizē AD. Tās ir elektriskās mašīnas, kurām ir pasīvs rotors (tam visbiežāk nepieslēdz papildu EDS vai strāvas avotus kā SM). Šie dzinēji darbojas, pateicoties tam, ka statora radītais rotējošais magnētiskais lauks inducē rotorā vai rotora tinumos strāvu. Rotorā inducētās strāvas un statora magnētiskā lauka mijiedarbība rada spēku, kas nodrošina rotoram pielikto griezes momentu. Jāņem vērā, ja rotors rotētu ar sinhronajiem apgriezieniem n_s , t. i., vienādi ar statora magnētiskā lauka rotācijas apgriezienu skaitu minūtē, statora magnētiskais lauks attiecībā pret rotoru būtu statisks un rotorā netiktu inducēta strāva. Tādēļ AD darbojas režīmā, kurā rotora rotācijas ātrums ir vismaz nedaudz mazāks par statora magnētiskā lauka rotācijas ātrumu, jeb, citiem vārdiem sakot, starp statora magnētisko lauku un rotoru pastāv slīde. Sīkākam aprakstam par AD uzbūvi un darbību var skatīt [10], [62], [65], [66] u. c. materiālus, bet šajā grāmatā uzreiz tiks aplūkota AD aizvietošana. AD TS un PS aizvietošanas shēma parādīta 2.44. attēlā. Šīs aizvietošanas shēmas sastāv no statora tinuma aktīvās un induktīvās pretestības (R_1 un X_1), no magnetizācijas zara aktīvās un induktīvās pretestības (R_μ un X_μ) un no rotora aktīvās un induktīvās pretestības (R_{2R} un X_{2R}), kuru vērtības reducētas uz statora tinumu. Papildus redzams, ka rotora aktīvo ekvivalento pretestību nosaka slīde s . Slīdi r. v. iespējams aprēķināt, zinot rotora rotācijas frekvenci jeb apgriezienu skaitu minūtē [45]:

$$s = (n_s - n_{AD})/n_s, \quad (2.140.)$$

kur s – slīde (šeit – AD slīde), r. v.;

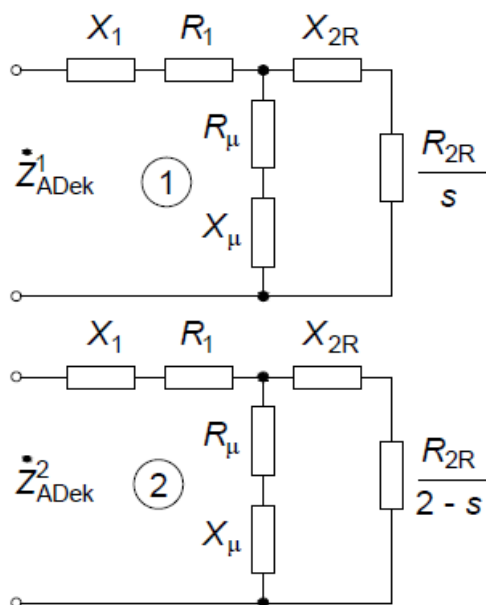
n_{AD} , n_s – AD rotora faktiskā un sinhronā jeb statora magnētiskā lauka rotācijas frekvence, apgr./min.

Sinhrono rotācijas frekvenci var viegli aprēķināt, zinot AD polu pāru skaitu [10]:

$$n_s = 60f_N/p, \quad (2.141.)$$

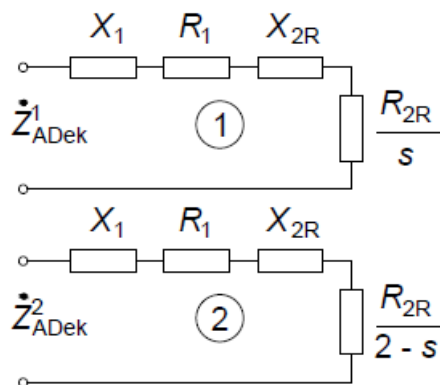
kur f_N – AD pievadītā sprieguma nominālā frekvence, Hz;

p – AD polu pāru skaits.



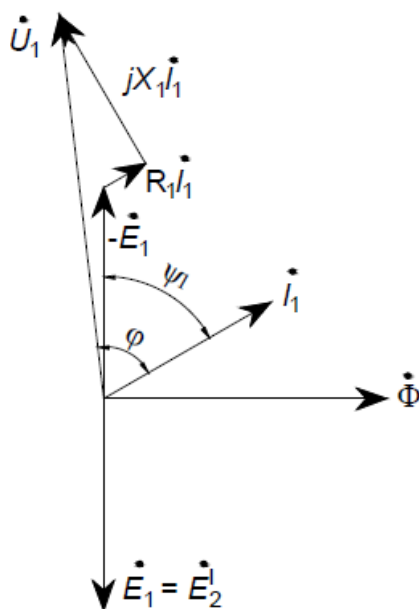
2.44. att. AD T veida TS un PS aizvietošanas shēmas [10].

Normālā darba režīmā AD slīde būs $0 < s \leq 0,05$ r. v. [10], bet slīdei $s = 1$ r. v. atbilst stāvoklis, kurā rotors ir nobloķēts jeb nekustīgs, piemēram, AD palaišanas procesa sākuma momentam, un šāds režīms tiek saukts par AD īsslēguma režīmu [65]. PS aizvietošanas shēmā rotora aktīvo pretestību nosaka dalījums ar starpību $2 - s$, kas skaidrojams ar SKM aprakstā ietverto ideju, ka pretējai fāžu secībai atbilst pretējs statora magnētiskā lauka rotācijas virziens (slīde starp sinhronu TS un PS magnētisko lauku ir 2 r. v.). Atbilstoši [10] parādītajam AD ar jaudu, sākot no dažiem kW, aizvietošanas shēmas parametri ir aptuveni: $R_{\mu} \approx 0,08-0,35$ r. v., $X_{\mu} \approx 2-4$ r. v., $R_1 \approx R_2 \approx 0,01-0,07$ r. v. un $X_1 \approx X_2 \approx 0,08-0,13$ r. v. (detalizētāks AD aizvietošanas shēmas elementu vērtību sadalījums konkrētai AD sērijai tiks parādīts turpinājumā). Līdz ar AD jaudas palielinājumu parasti pieaug to lietderības koeficients un attiecīgi samazinās relatīvie zudumi, kam atbilst aktīvo pretestību relatīvo vērtību kritums. Savukārt, palielinoties AD polu pāru skaitam, samazinās magnetizācijas zaru induktīvā pretestība X_{μ} [10]. Šajā grāmatā veiktais 4A sērijas AD aizvietošanas shēmu pretestību vērtību apskats parādīja arī X_{μ} pieaugumu, palielinoties AD nominālajai jaudai (izteikti jaudas intervālam $0-20$ kW). Tuvinātos aprēķinos un bojājumu režīmu parametru aprēķinos, kuros sagaidāmas lielas bojājumu strāvas (īsslēgumi), magnetizācijas zaru pieļaujams neievērot, jo tā pretestībā, kā parādīts iepriekš, ir daudzkārt lielāka par statora un rotora pretestību. Šādiem aprēķiniem pieļaujams lietot vienkāršotās AD aizvietošanas shēmas (2.45. att.).



2.45. att. AD vienkāršotās TS un PS aizvietošanas shēmas [10].

2.44. un 2.45. attēlā redzamās aizvietošanas shēmas ļauj noteikt AD TS un PS ekvivalentās pretestības \dot{Z}_{ADek}^1 un \dot{Z}_{ADek}^2 gan slodzes režīmā, gan nekustīga rotora režīmā. Šīs pretestības dod iespēju aizvietot AD ar vienu pretestību secību aizvietošanas shēmās, bet, rodoties bojājumiem, kuriem raksturīgs ievērojams strāvas pieaugums un straujš AD pieslēgtā sprieguma kritums (parasti AD tuvi īsslēgumi), īslaicīgi būs novērojama strāva no AD uz BV. Minētā parādība izskaidrojama ar to, ka, pat samazinoties pievadītajam spriegumam, rotorā vai rotora tinumos joprojām plūstošā strāva turpina inducēt statorā pret-EDS, līdz tiek iztērēta uzkrātā AD rotora kinētiskā un magnētiskā lauka enerģija (analoģiska situācija ir, bremzējot AD, to atslēdzot no tīkla un pieslēdzot statoru rezistoru blokam). Minētais pret-EDS arī citos režīmos kopā ar sprieguma kritumiem statora tinumu aktīvajā un induktīvajā pretestībā līdzsvaro AD pieslēgto spriegumu (2.46. att.).



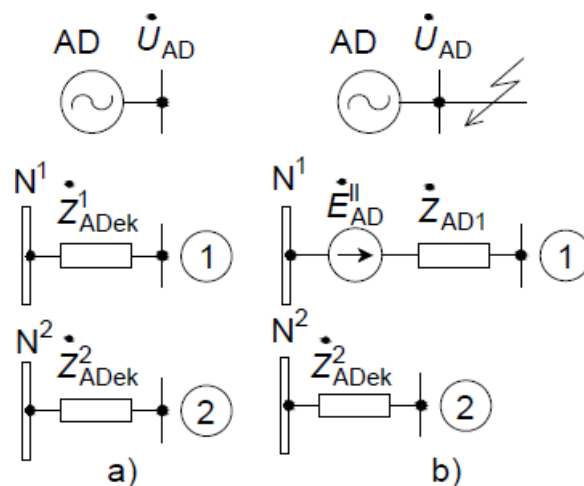
2.46. att. AD vienkāršota vektoru diagramma slodzes režīmā [10].

Zinot statora pretestību, 2.46. attēlā parādītā AD vektoru diagramma dod iespēju aprēķināt TS pret-EDS vērtību slodzes režīmā [10]:

$$\dot{E}_{AD} = -\dot{E}_1 = \dot{U}_1 - \dot{I}_1 \dot{Z}_{AD1} = \dot{U}_1 - \dot{I}_1 (R_1 + jX_1), \quad (2.142.)$$

kur \dot{U}_1, \dot{I}_1 – AD statoram pieslēgtais fāzes spriegums un statora fāzes strāva, V un A;
 R_1, X_1 – statora aktīvā un induktīvā pretestība, Ω .

Sīkāks apraksts par pašu pārejas procesu AD atrodams [67]. Līdzīgi kā SM, arī šajā gadījumā iespējams ievest statora un rotora tinumu virspārejas režīma laika konstantes T''_1 un T''_2 , kuras, kā parādīts [67] dotajā piemērā, ir aptuveni vienādas ar 0,02 s jeb vienu AC periodu 50 Hz sistēmā (lielākas jaudas AD nobremzēšanai nepieciešams vairāk laika un to konstantes būs lielākas). Tātad, ja aprēķins veicams laika momentam vismaz $3T''_2$ pēc bojājuma rašanās, TS aizvietošanas shēmā AD aizvieto tikai ar tā ekvivalento TS pretestību. Atbilstoši [14] un [17] dotajai informācijai AD EDS moduļa vērtību iespējams tuvināti pieņemt 0,9 r. v. Pārrāvumiem un elektriski attālinātiem īsslēgumiem AD EDS var neņemt vērā (detalizētāku analīzi par AD EDS ievērošanas nepieciešamību iespējams atrast grāmatā [14]). Apkopojot iepriekš aprakstīto – gadījumos, kuros AD rotors ir nekustīgs vai AD darbojas slodzes režīmā (tajā skaitā arī nesimetrisku pārrāvumu režīmos), to aizvieto vienīgi ar ekvivalentajām pretestībām, kuras aprēķinātas ar doto slīdes vērtību, bet tuviem īsslēgumiem, ja aprēķins veikts laika momentam pirms trīskāršotas AD virspārejas laika konstantes, TS aizvietošanas shēmā AD jāaizvieto ar tā statora pilno pretestību un tajā inducēto pret-EDS (2.47. att.).



2.47. att. AD TS un PS aizvietošanas shēmas slodzes režīmā un palaišanas brīdī (a) un rodoties tuviem īsslēgumiem (b) [14], [2].

Ja nav datu par AD aizvietošanas shēmas pretestībām, tās var aptuveni noteikt, zinot AD nominālo jaudu un sinhrono rotācijas frekvenci no 2.17. tabulas, kurā apkopoti aizvietošanas shēmas pretestību dati no 4A sērijas AD tehnisko parametru kataloga [68]. Nedaudz precīzāk aizvietošanas shēmas pretestības iespējams noteikt atkarībā no nominālās AD jaudas un sinhronās rotācijas frekvences, izmantojot šīs grāmatas 8. pielikumā parādītās raksturlīknes vai aplūkojot katalogu [68].

4A sērijas AD aizvietošanas shēmu pretestību vērtību apkopojums [68]

n_s , apgr./min.	Nominālās aktīvās jaudas P_N diapazons, kW	Aizvietošanas shēmas parametrs	Minimālā vērtība	Maksimālā vērtība	Vidējā vērtība
3000	0,09–315	X_μ , r. v.	2	6,6	3,817
		R_1 , r. v.	0,012	0,17	0,063
		X_1 , r. v.	0,038	0,097	0,072
		R_2 , r. v.	0,011	0,14	0,043
		X_2 , r. v.	0,067	0,19	0,111
1500	0,06–315	X_μ , r. v.	1,2	5,7	3,139
		R_1 , r. v.	0,012	0,18	0,072
		X_1 , r. v.	0,076	0,17	0,093
		R_2 , r. v.	0,013	0,22	0,061
		X_2 , r. v.	0,11	0,2	0,143
1000	0,18–200	X_μ , r. v.	1,3	4,1	2,681
		R_1 , r. v.	0,019	0,24	0,08
		X_1 , r. v.	0,07	0,15	0,103
		R_2 , r. v.	0,014	0,22	0,062
		X_2 , r. v.	0,1	0,21	0,147
750	0,25–160	X_μ , r. v.	1,2	3,1	2,096
		R_1 , r. v.	0,02	0,22	0,078
		X_1 , r. v.	0,099	0,18	0,128
		R_2 , r. v.	0,016	0,23	0,061
		X_2 , r. v.	0,12	0,32	0,197
600	30–110	X_μ , r. v.	2	3,1	2,4
		R_1 , r. v.	0,024	0,056	0,033
		X_1 , r. v.	0,1	0,12	0,11
		R_2 , r. v.	0,021	0,031	0,025
		X_2 , r. v.	0,14	0,17	0,156
500	45–90	X_μ , r. v.	1,8	2,1	1,95
		R_1 , r. v.	0,024	0,037	0,03
		X_1 , r. v.	0,11	0,14	0,125
		R_2 , r. v.	0,02	0,033	0,27
		X_2 , r. v.	0,16	0,19	0,178

AD NS aizvietošanas shēmās parasti aizvieto ar pārrāvumu, jo AD neitrāles lielākoties tiek izolētas, lai novērstu trešās harmonikas strāvas noslēgšanos statora tinumos un to radītu dzinēja rotora pārkaršanu, kura ir visizteiktākā tukšgaitas režīmā, kad AD magnētiskās sistēma vieglāk nonāk piesātinājuma zonā un rotora slīde attiecībā pret trešās harmonikas radīto statisko pulsējošo magnētisko lauku ir gandrīz 1 r. v. Zemētas AD neitrāles gadījumā jāņem vērā, ka AD, līdzīgi kā SM, statora tinumu simetriskā izvietošana dēļ NS plūsma būs galvenokārt izkliedes plūsma, un visdrošākais veids, kā noteikt NS atbilstošo pretestību, ir eksperimentālā

ceļā [2]. Principā AD NS magnētiskajai plūsmai noslēgšanās ceļā ir tik liela magnētiskā pretestība (attiecīgi mazs NS pašindukcijas EDS un tam atbilstošā NS reaktance), ka tuvinātos aprēķinos AD ar zemēto neitrāli NS aizvietošanas shēmā var aizstāt ar statora tinumu fāzes aktīvo pretestību, kuras viens izvads pieslēgts NS neitrālei.

Vēl viens AD parametru noteikšanas paņēmieni ir izmantot tā palaišanas strāvu vai atbilstoši [10], pieņemot to robežās $5-7I_{NAD}$:

$$Z_{ADrv} = 1/I_{pal} = 1/5 - 7 \approx 0,14 - 0,2 \text{ r. v.}, \quad (2.143.)$$

kur Z_{ADrv} – AD pilnās pretestības modulis, r. v.;

I_{pal} – AD palaišanas strāva (attiecībā pret AD nominālo strāvu I_{NAD}), r. v.

Tad pieņem, ka AD pretestības komponentu attiecība $X/R \approx 13$ [2] un ar (2.138.) un (2.139.) nosaka komplekso pretestību relatīvajās vienībās. Pretestību aprēķinu pabeidz, izmantojot formulas (2.7.) vai (2.24.). Šādam aprēķinam, lai vismaz tuvināti ievērotu slīdes ietekmi, TS un PS pretestības būtu jānosaka šādi: $\dot{Z}_{AD}^1 \approx [(R_{AD} + (R_{AD}/s))/2] + jX_{AD}$, $\dot{Z}_{AD}^2 \approx [(R_{AD} + (R_{AD}/(2-s)))/2] + jX_{AD}$.

Turpinājumā aplūkosim statisko slodzi (vai slodžu grupas ekvivalentu). Statisko slodzi aizvietošanas shēmās aizvieto ar pretestību, kas ieslēgta starp aizvietošanas shēmas neitrāli un slodzes pieslēguma kopnēm. Statisku slodzi aprēķinos visbiežāk pieņem simetrisku, un tās pretestību aptuveni iespējams noteikt, pieņemot, ka uz slodzes kopnēm būs aprēķina spriegums, un balstoties uz slodzes pilno jaudu [6]:

$$\dot{Z}_{SL}^1 \approx U_{APR}^2 / \hat{S}_{SL}, \quad (2.144.)$$

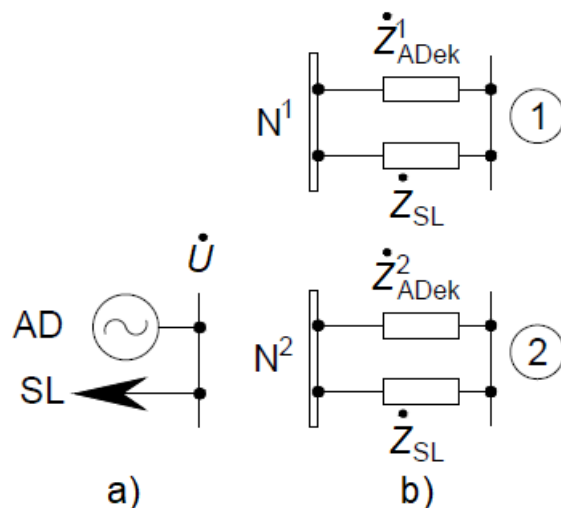
kur \dot{Z}_{SL}^1 – slodzes TS pilnā pretestība, Ω ;

\hat{S}_{SL} – slodzes pilnā kompleksi saistītā jauda, MVA.

Statiskai slodzei, līdzīgi kā citiem statistiskiem tīkla elementiem, PS pretestība sakrīt ar TS pretestību ($\dot{Z}_{SL}^2 = \dot{Z}_{SL}^1$) [15]. NS aizvietošanas shēmās statistiskās slodzes ievērošana ir atkarīga no analizējamās situācijas un šīs slodzes barojošā transformatora ievērošanas veida. Ja aprēķini tiek veikti AS tīklā ar zemētu neitrāli un slodze ir pieslēgta tīklam ar izolētu neitrāli, tad šo slodzi tiešā veidā neievēro aizvietošanas shēmā un tās vietā izmanto to barojošā transformatora NS pretestību, ja tas jau nav speciāli izdalīts kā atsevišķs elements tīkla shēmā. Ja arī slodze pieslēgta tīklam ar zemētu neitrāli (piemēram, 330 kV tīklam par slodzēm pieņemti slodžu grupu ekvivalenti 110 kV tīklā), precīziem aprēķiniem jāievēro ne tikai transformators starp abiem AS tīkliem, bet arī ekvivalentā NS pretestība starp šī transformatora kopnēm un zemāka sprieguma līmeņa tīklam ar izolētu neitrāli. Tuvinātos aprēķinos, kad nav datu par zemētas neitrāles AS tīklu, kas veido slodzes ekvivalentu, iespējams pieņemt slodzes jaudai atbilstošas nominālās jaudas transformatora ar slēguma shēmu Y_0/Δ NS pretestību, kurā noslēgtos NS strāva [25]. Ja bojājums rodas ZS tīklā ar zemētu neitrāli, tad šajā tīklā pieslēgtu simetrisku slodzi ar zemētu neitrāli aizvieto identiski TS ar TS pretestībai vienādu pretestību. Savukārt, ja ir jāveic aprēķins nesimetriskam slodzes režīmam, tad slodzes mezglu iespējams uzskatīt par nesimetriska bojājuma punktu un izveidot kompleksās aizvietošanas shēmas, kuras parādītas [3] un aprakstītas 6. nodaļā. Ja slodzes ekvivalentu veido izolētas neitrāles tīkla daļa, saprotams,

ka NS aizvietošanas shēma šim slodzes ekvivalentam būs pārrāvums starp ekvivalenta kopnēm un NS aizvietošanas shēmas neitrāli.

Dažreiz jāaplūko arī jauktas slodzes mezgli, kuri satur gan AD, gan statisko slodzi. Šādā gadījumā secību aizvietošanas shēmās var izmantot šo elementu paralēlslēgumu (2.48. att.).

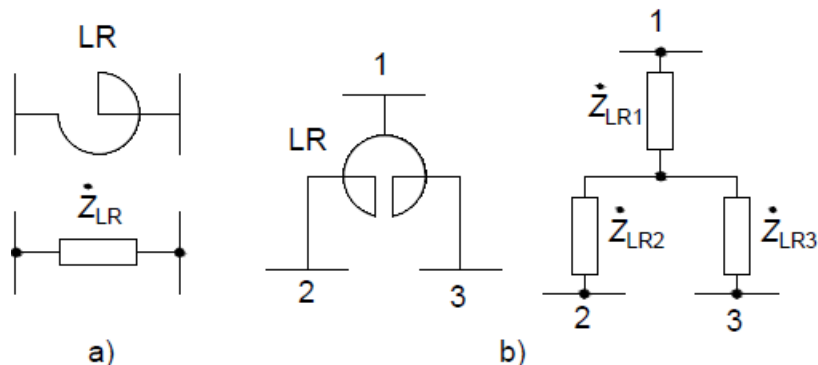


2.48. att. Jauktas AD un statiskās slodzes (a) TS un PS aizvietošanas shēmas (b).

Parādītajās aizvietošanas shēmās AD pārstāvēts ar ekvivalentajām pretestībām, bet tuvu īsslēgumu gadījumā atbilstoši AD aprakstam jālieto aizvietošanas shēma ar statora pretestību un tajā inducēto pret-EDS (2.47. (b) att.). Aizvietošanas shēmu pretestības iespējams noteikt, zinot vai pieņemot AD un statiskās slodzes jaudas attiecību. Tādā gadījumā no jauktās slodzes kopējās jaudas iespējams noteikt kopīgo AD un kopīgo statisko slodžu jaudas, kas arī nosaka pretestību lielumus atbilstoši (2.144.) un (2.134.) vai (2.24.). Aktīvās un reaktīvas pretestības vērtības statiskai slodzei nosaka tās pilnā jauda (dažreiz uzdota kā aktīvās jaudas un $\cos\phi$ vērtības), bet AD iespējams izmantot zināmas vai tuvināti pieņemtas aizvietošanas shēmas parametru vērtības r v. vai X/R attiecību ekvivalentajai AD pretestībai. Analogiski iespējams rīkoties, arī saskaroties ar citiem jaukta sastāva ekvivalentiem mezgliem, bet izmantojot atbilstošus ekvivalentu veidojošo elementu aizvietošanas principus.

2.7. Strāvu ierobežojošie reaktori

Strāvu ierobežojošos jeb virknē slēdzamos reaktorus tipveidā izmanto īsslēgumu strāvu ierobežošanai, ja tā pārsniedz slēgiekārtu termiskās vai dinamiskās izturības robežu. Visbiežāk jāaplūko vienkāršs un dubultreaktors, kurš no vienkārša reaktora atšķiras ar to, ka tā spole sadalās divos atzarojumos. Strāvu ierobežojošie reaktori ir saites elementi, kuru aizvietošanas shēmas sakrīt visām secībām (2.49. att.).



2.49. att. Parasta strāvu ierobežojošā reaktora aizvietošana (a) un dubultreaktora aizvietošana (b) [2].

Strāvu ierobežojošo reaktoru pretestību aprēķinam no ražotāja dotajiem datiem ir jānoskaidro reaktora nominālais spriegums, strāva un nominālā induktīvā pretestība, kā arī reaktora pretestību attiecība X/R . Zinot šos datus, iespējams aprēķināt vienkārša strāvu ierobežojošā reaktora induktīvo pretestību nosauktajās vienībās [15]:

$$X_{LR} = X_{LR\%} U_{NLR} / (100\sqrt{3} I_{NLR}), \quad (2.145.)$$

vai relatīvajās vienībās [15]:

$$X_{LRfv} = X_{LR\%} U_{NLR} I_B / 100\sqrt{3} I_{NLR} U_B, \quad (2.146.)$$

kur X_{LR} – strāvu ierobežojošā reaktora induktīvā pretestība, Ω ;

$X_{LR\%}$ – strāvu ierobežojošā reaktora nominālā induktīvā pretestība, %;

U_{NLR} , I_{NLR} – reaktora nominālais spriegums un strāva, V un A.

Kad aprēķināta induktīvā pretestība, tad ar X/R attiecību iegūstama reaktora aktīvā pretestība R_{LR} . Jāatzīmē, kā šādi aprēķināta reaktora pretestība būs precīza aprēķinam pie reaktora nominālā sprieguma, un aprēķinam pie vidējā nominālā aprēķina sprieguma tā jāreizina ar transformācijas koeficientu kvadrātā ($k_{TR}^2 = (U_{APR}/U_{NLR})^2$).

Dubultreaktora gadījumā aizvietošanas shēma ir trīszaru zvaigzne, kuras induktīvās pretestības nosaka formulas [2]:

$$X_{LR1} = -K_s X_{LR}, \quad (2.147.)$$

$$X_{LR2} = X_{LR3} = (1 + K_s) X_{LR}, \quad (2.148.)$$

kur X_{LR1} , X_{LR2} , X_{LR3} – dubultreaktora zvaigznes aizvietošanas shēmas zaru induktīvās pretestības, Ω

K_s – spoļu mijinduktivitātes saites koeficients (tipveidā robežās 0,4–0,6);

X_{LR} – reaktora viena zara nominālā induktīvā pretestība, ja otrs atzarojums ir atslēgts (nosakāma ar (2.146.)), Ω .

Aktīvo pretestību, līdzīgi kā vienkāršam reaktoram, nosaka, dalot katra zara induktīvo pretestību ar attiecību X/R .

PS pretestības, līdzīgi kā citiem statistiskiem elementiem, ir vienādas ar TS pretestībām [14]. NS pretestību strāvu ierobežojošiem reaktoriem pamatā nosaka pašindukcija, tādēļ var pieņemt,

ka NS pretestība sakrīt ar TS pretestību [2]. Daži agrāk izmantoto reaktoru tipu vidējie dati apkopoti 2.18. tabulā.

2.18. tabula

Vidējie strāvu ierobežojošo reaktoru un dubultreaktoru dati [14]

Reaktora tips	U_N , kV	I_N , kA	$X_{LR\%}$, %	X/R	K_s
Reaktori: <i>PB</i> un <i>PBA</i>	6	0,15–0,75	3–10	14–42	–
		1	4–10	30–40	–
		1,5	5–10	42–54	–
		2	6–12	51–63	–
		3–4	8–12	66–78	–
	10	0,15–0,5	3–8	17–35	–
		0,6	3–10	30–39	–
		0,75–1	5–10	28–87	–
		1,5	5–10	51–59	–
		2	6–12	66–76	–
		3–4	8–12	75–94	–
Dubultreaktori: <i>PBAC</i>	6	0,6	4–6	26–28	0,46
		1	4–10	33–47	0,44–0,53
		1,5	6–10	41–54	0,57–0,62
		2	8–12	54–58	0,5–0,55
		2,5	10–15	60–64	0,47–0,49
		3	12–15	66–82	0,41–0,44
	10	0,6	4–6	35–53	0,48–0,51
		1	4–10	42–52	0,47–0,6
		1,5	6–10	51–62	0,41–0,63
		2	8–12	63–69	0,55–0,58
		2,5	10–15	75–81	0,53–0,54
	3	12–15	81–89	0,47–0,49	

2.8. Ar pārveidotājiem saistītie elementi

Ar pārveidotājiem saistītie elementi ir uz elektronikas bāzes izveidotas *AC* un *DC* pārveidotāju iekārtas (piemēram, *AD* frekvences pārveidotāji, kas maina vienu maiņspriegumu uz maiņspriegumu ar citu frekvenci, taisngriezis, kas izpilda *AC–DC* pārveidi, invertors, kas veic *DC–AC* pārveidojumu u. c.). Šos elementus iespējams aplūkot kopīgi, jo, neskatoties uz dažādo lietojumu, to reprezentācijas bojājumu aprēķiniem bieži ir līdzīgas. Vispārīgi pēc shematiskā atainojuma pārveidotāju elementus iespējams iedalīt strāvas un sprieguma avotu pārveidotājos [69], ko lielākoties nosaka pārveidotāja vadības sistēmas stratēģija. Atbilstoši nosaukumam pārveidotājus iespējams aizvietot kā EDS vai strāvas avotus, kuru vērtības nosaka pārveidotāja vadības likumi (vadības loģikā īstenota funkcija pārveidotāja strāvas avotam $J_P = f(U_P)$ vai EDS avotam $E_P = f(I_P)$). Viena no vadības stratēģijām ir uzturēt pārveidotāja izejā nemainīgu spriegumu $U_P = \text{const}$, kuru aizvietošanas shēmas ievēro ar EDS avotu, bet šādas kontroles stratēģijas gadījumā, neieviešot papildu korekcijas, pārveidotāja patērēto vai tīklam

nodoto jaudu noteiktu AC tīkla spriegums. Attiecīgi biežāk izmanto pārveidotāju vadības stratēģijas, kas nodrošina tīklam nododamo vai nepieciešamo patērēto jaudu ($P_p, Q_p = \text{const}$ vai $U_p, P_p = \text{const}$), tādēļ šajā grāmatā tiks aplūkoti pārveidotāji ar šīm stratēģijām. Pārveidotājus ar nemainīgas jaudas stratēģiju iespējams atainot kā strāvas avotus.

Bieži pārveidotāju vadības likumi jeb raksturlīkne $J_p = f(U_p)$ ietver strāvu ierobežojošu režīmu, kas paredz pārveidotāja strāvas ierobežošanu līdz pieļaujamam līmenim $I_{p\text{piel}}$, lai aizsargātu pārveidotāju pusvadītāju elementus no pārkaršanas. Šādu ierobežojumu parasti paredz, novērojot pazeminātu AC tīkla sprieguma vai fiksējot īsslēgumus, bet šāds ierobežojums iespējams arī slodzes režīmā kā aizsardzība pret pārveidotāja pārslodzi. Līdz robežai $I_p \leq I_{p\text{piel}}$ tuvināti iespējams noteikt pārveidotāja strāvas avota vērtību, balstoties uz pārveidotāja patērēto vai tīklam nodoto jaudu:

$$J_p = \hat{U}_p / \sqrt{3} \hat{S}_p, \quad (2.149.)$$

kur \hat{U}_p – pārveidotāja AC puses līnijas sprieguma kompleksi saistītā vērtība, V;

\hat{S}_p – pārveidotāja AC puses pilnas trīsfāžu jaudas kompleksi saistītā vērtība, VA.

Pārveidotāja strāvai, pārsniedzot pieļaujamo, var pieņemt J_p moduli vienādu ar pieļaujamo strāvu $I_{p\text{piel}}$ ($I_{p\text{piel}}$ mēdz pieņemt attiecībā pret pārveidotāja nominālo strāvu: $1,5I_{PN}$ [60]). Savukārt leņķi tuvināti iespējams pieņemt identisku tam, ko iegūst, aprēķinot J_p ar (2.149.), jo režīmā $P_p, Q_p = \text{const}$ automātiski tiek uzturēts arī nemainīgs $\cos \varphi$. Precīzākam aprēķinam ir jāizmanto iteratīvs sistēmas režīma parametru pārrēķins, kura gaitā J_p vērtības tiek automātiski koriģētas atbilstoši sakarībai $J_p = f(U_p)$. Sīkāk šāda aprēķina principi aprakstīti [70].

Analizējot tīklu ar pārveidotāju elementiem, iespējams saskarties ar ļoti mainīgas jaudas avotiem, kas pieslēgti tīklam ar šo pārveidotāju palīdzību (piemēram, saules paneļi, kas nodod AC tīklā elektroenerģiju ar invertora palīdzību, vai vēja turbīnas, kuras arī pieslēgtas tīklam ar pārveidotājiem). Ja pārveidotāju pieslēgtos avotus ņem vērā, RAA vajadzībām visbiežāk ir jāanalizē bojājumi pārveidotāju maksimālas jaudas režīmā (ar lielāko strāvas stiprumu) iestatījumu aprēķinam un minimālās jaudas režīmā aizsardzības jutības pārbaudei. Slodzes režīmam iespējams izmantot [60] parādīto slodzes jaudas aprēķinu:

$$P_{\text{psl}} = P_{\text{PN}} K_{\text{nosl}} K_{\text{piep}}, \quad (2.150.)$$

kur P_{PN} – pārveidotāja nominālā aktīvā jauda, W;

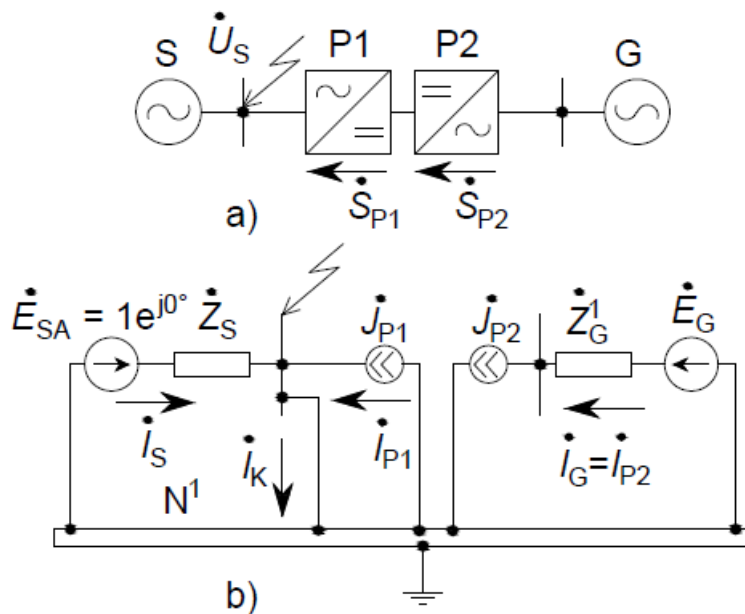
K_{nosl} – noslodzes koeficients, kas parāda faktisko pārveidotājam pieslēgtā avota vai slodzes jaudas attiecību pret nominālo, r. v.;

K_{piep} – pieprasījuma koeficients, kas atbilstoši statistikas datiem parāda, cik lielu daļu no laika pārveidotājs ir noslogots, r. v.

Jāatzīmē, ka dažos gadījumos viena tīkla elementa ietvaros tiek veikti divu veidu pārveidojumi, t. i., AC – DC un DC – AC (piemēram, AS DC līnijas), kuros katra pārveidotāja strāvas avota vērtību nosaka, izmantojot (2.149.), bet pārveidotājam, kurš nodod jaudu otram pārveidotājam, pilnajai jaudai jāievēro jaudas zudumi DC saitē starp abiem pārveidotājiem un pašu pārveidotāju jaudas zudumi. Turklāt ir svarīgi ņemt vērā pārveidotājam paredzēto jaudas plūšanas virzienu, jo taisngriežu bloki bieži nav bipolāri, tātad nepieļauj strāvas plūšanu pretēji paredzētajam virzienam. Ja pārveidotāju bloki ir bipolāri, to maiņa no taisngrieža uz invertora

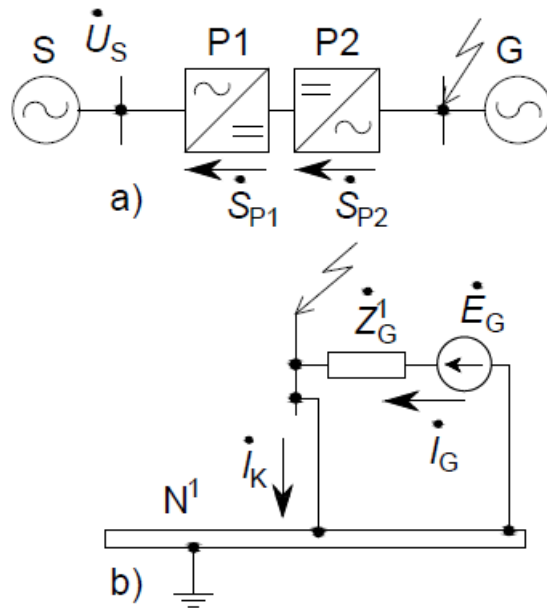
režīmu vai otrādi arī var nebūt automātiska. Pārveidotāji jāaplūko vienīgi TS aizvietošanas shēmā, jo to vadības sistēmas parasti uzspiež simetrisku darbību. Precīzos aprēķinos NS aizvietošanas shēmā iespējams ievērot pārveidotāju ieejas filtrs esošo kapacitāti uz zemi.

Kā piemērs aplūkota ar $AC-DC$ un $DC-AC$ pārveidotāju blokiem AC sistēmai pieslēgtas vēja turbīnas, kas parādīta ar ģeneratoru G , TS aizvietošanas shēma iekšēja un ārēja īsslēguma gadījumā (2.50. un 2.51. att.). Rodoties bojājumam AC sistēmas S pusē, strāvas plūšanas virziens saglabāsies no G uz pārējās sistēmas pusi, bet, ņemot vērā īsslēgumiem raksturīgo (ar slodzes režīmu salīdzinoši) lielo strāvu, var sagaidīt, ka pārveidotāji $P1$ un $P2$ pāries strāvas ierobežošanas režīmā. AC sistēmas pusē kopīgo īsslēguma strāvu veido sistēmas S un pārveidotāja $P1$ strāva, bet ģeneratora strāvu ierobežo pārveidotājs $P2$. Iespējams piebilst, ka jaudas zudumu dēļ pārveidotāju izejas jauda $\dot{S}_{P2} > \dot{S}_{P1}$ gan pirms, gan pēc īsslēguma. Neskatoties uz to, ka aizvietošanas shēmā pārveidotājus atainojošie strāvas avoti \dot{J}_{P1} un \dot{J}_{P2} ir atdalīti un to skaitliskās vērtības nedaudz atšķiras, tie ir funkcionāli saistīti ($\dot{J}_{P2} = f(\dot{S}_{P1} + \Delta P)$).



2.50. att. Ārējs īsslēgums aiz invertora P1 un taisngrieža P2 blokiem, kuri izmantoti ģeneratora G pieslēgšanai AC tīklam (a) un šim bojājumam atbilstošā TS aizvietošanas shēma (b).

Rodoties īsslēgumam starp ģeneratoru un pārveidotājiem, īsslēguma strāva no AC sistēmas puses plūst nevar, jo strāvas virziens ir pretējs normālā režīmā paredzētajam un īsslēguma strāva sastāv vienīgi no vēja turbīnas ģeneratora G strāvas.



2.51. att. Iekšējs īsslēgums starp invertora P1 un taisngrieža P2 blokiem un ģeneratoru G, kuru tie pieslēdz AC tīklam (a), un šim bojājumam atbilstošā TS aizvietošanas shēma (b).

Līdzīgi iespējams veikt arī citu AC–DC un DC–AC pārveidotāju kombināciju aizvietošanu. Sīkāks pārveidotāju apraksts atrodams [70] un [71].

3. SIMETRISKO KOMPONENŠU METODES AIZVIETOŠANAS SHĒMU SASTĀDĪŠANA

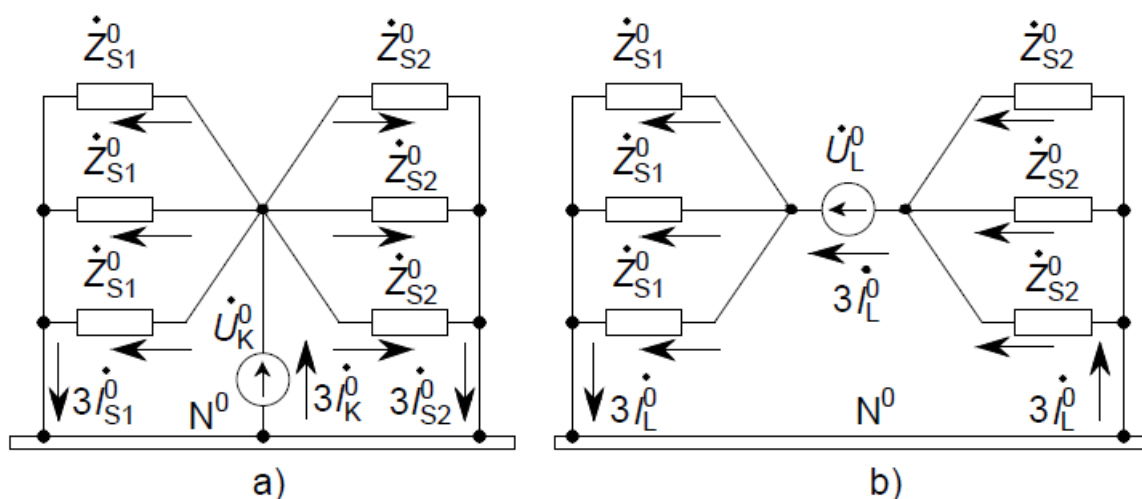
Veicot aprēķinus ar SKM, atkarībā no bojājuma veida var rasties nepieciešamība katrai no secībām sastādīt savu atsevišķu aizvietošanas shēmu. Atbilstoši 1. nodaļā sniegtajam šīs metodes aprakstam tā ļauj aplūkot nesimetriskus elektrisko sistēmu režīmus kā vairāku simetrisku sistēmu režīmu summu. Līdz ar to visu secību aizvietošanas shēmas principā ir dažādu simetrisku trīsfāžu sistēmu reprezentācijas, kas ļauj katrai secībai izvēlēties vienu aprēķina fāzi, jo pārējo fāžu strāvas un spriegumi konkrētajai secībai būs nosakāmi no simetrijas nosacījumiem.

TS aizvietošanas shēmu veido gan simetriska slodzes režīma parametru aprēķinam, gan visiem nesimetriskas slodzes un nesimetrisku bojājumu režīmu parametru aprēķiniem. Tā atbilst shēmai, kuru veido jebkuram simetriska sistēmas režīma parametru aprēķinam [2]. Ar aprēķina fāzes EDS un pretestībām TS aizvietošanas shēmā aizvieto apvienotas energosistēmas, SM un atkarībā no aprēķina laika momenta un elektriskā attāluma līdz bojājumam – arī AD, ja tie pieslēgti tīklam ar tiešu fāžu secību (ABC) un to rotora rotācijas virziens atbilst šādai fāžu secībai (pretējs pulksteņa rādītāja virzienam). Papildus jāmin, ka, ja iespējama strāvas plūšana no AC–DC pārveidotāju elementiem, tad TS aizvietošanas shēma tos visbiežāk aizvieto ar strāvas avotiem. Pārējie statistiskie elementi tiek parādīti ar atbilstošajām fāzes pretestībām un vadītspējām, ja tās ņem vērā. Reālā tīkla zemes potenciāls atbilst TS aizvietošanas shēmas neitrālei N^1 , tādēļ to parasti zemē, gan izdalot atsevišķas secību aizvietošanas shēmas, gan kompleksajās aizvietošanas shēmās. Starp nesimetrijas punktu un TS neitrāli (šķērsnesimetrijai) vai punktiem (garennesimetrijai) TS aizvietošanas shēmā ieslēdz EDS avotu ar vērtību, kura atbilst faktiskā sprieguma krituma starp šiem nesimetrijas punktiem TS komponentei [8], [14].

PS aizvietošanas shēmu veido visu nesimetrisko režīmu parametru aprēķiniem. Tā kā PS strāvu noslēgšanās ceļi ir tādi paši kā TS strāvām, PS aizvietošanas shēma vizuāli ir līdzīga TS aizvietošanas shēmai. Galvenā atšķirība ir tajā, ka elementi, kuri TS aizvietošanas shēmā atainoti ar strāvas vai EDS avotiem, tiek aizvietoti vienīgi ar savu ekvivalento PS pretestību vai neparādās PS aizvietošanas shēmā [25]. Izņēmums būtu, ja kāds no šiem avotiem būtu pieslēgts ar pretēju fāžu secību (CBA) vai ja elektriskās mašīnas rotoram būtu pretējs rotācijas virziens (pulksteņa rādītāja virziens, piemēram, AD mehāniskas bremzes režīmā, kurā slīde ir $1 < s < \infty$ r. v.). Šāds avots jāaizvieto ar EDS avotu PS aizvietošanas shēmā, bet TS aizvietošanas shēmā – tikai ar tā ekvivalento pretestību. PS aizvietošanas shēmā analogiski TS aizvietošanas shēmai starp nesimetrijas punktu un PS neitrāli (šķērsnesimetrijai) vai punktiem (garennesimetrijai) ieslēdz EDS avotu, kura vērtība atbilst faktiskā aprēķina fāzes sprieguma krituma starp nesimetrijas punktiem PS komponentei. PS aizvietošanas shēmas neitrāli N^2 shematiski pieslēdz aizvietošanas shēmas elementiem, līdzīgi kā TS aizvietošanas shēmu pieslēdz tās neitrālei N^1 .

NS aizvietošanas shēma jāveido, veicot režīma parametru aprēķinus garennesimetriju, nesimetrisku īsslēgumu uz zemi rašanās un nesimetriskas slodzes gadījumiem, ja slodzes neitrāle ir zemēta. Sastādot NS aizvietošanas shēmu, jāņem vērā, ka NS strāvām noslēgšanās

ceļus visbiežāk veido elementi, kuru neitrāles ir zemētas, zeme, zemētas GL zibensaizsardzības troses, zemēti KL ekrāni, tīkla elementu aizvietošanas shēmu vadītspējas uz zemi un citi kontūri, kuriem ir saite ar zemi [14], [15]. NS aizvietošanas shēmu sāk veidot no nesimetrijas punkta vai punktiem. Šajā punktā (šķērsnesimetrijai) pret NS neitrāli vai starp nesimetrijas punktiem (garennesimetrijai) ieslēdz EDS avotu, kura vērtība atbilst faktiskā sprieguma krituma BV NS komponentei. Tad jāpārbauda, vai strāvai no šī avota ir iespēja noslēgties pa zemētiem kontūriem (3.1. att.).



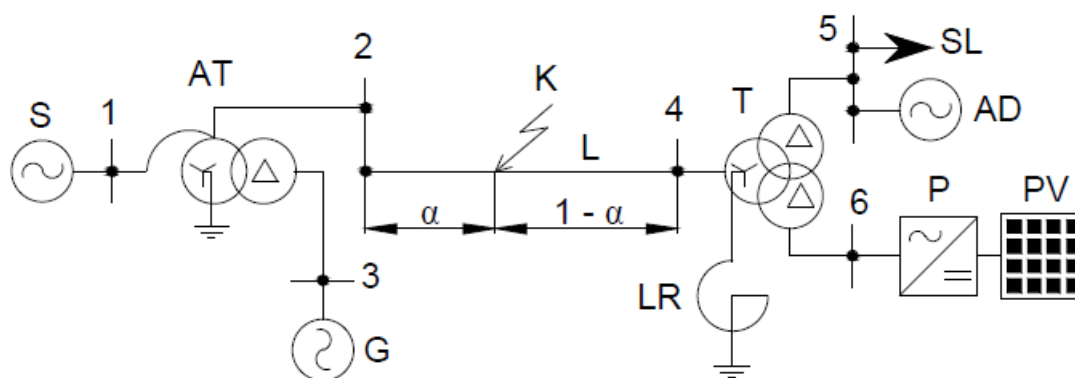
3.1. att. NS sprieguma kritumam ekvivalentā EDS avota ieslēgšana aizvietošanas shēmā, rodoties bojājumam starp divām sistēmām S1 un S2 ar zemētām neitrālēm, šķērsnesimetrijas (a) un garennesimetrijas (b) gadījumos [25].

Pastāvot NS strāvas noslēgšanās ceļiem, elementu, kuri veido šos noslēgšanās ceļus, NS pretestības un/vai vadītspējas jāparāda NS aizvietošanas shēmā. Īsslēgumiem bieži neaplūko strāvas noslēgšanās ceļus tīkla elementu vadītspējās, bet ņem vērā vienīgi garenvirziena pretestības tīkla elementiem ar zemētām neitrālēm, izņemot, ja strāva vadītspējās nav samērojama ar īsslēguma strāvu un tās neievērošana rada ievērojamas kļūdas aprēķinu rezultātos. Kā piemērus šādiem izņēmumiem var minēt AS EPL kapacitatīvās vadītspējas aprēķiniem tīklos ar spriegumu 330 kV un vairāk, kā arī EPL kapacitatīvās vadītspējas tīklos ar izolētu neitrāli, rodoties vienfāzes īsslēgumam. NS aizvietošanas shēmas neitrāli N^0 shematiski pieslēdz aizvietošanas shēmas elementiem līdzīgi TS un PS aizvietošanas shēmu neitrālēm. Papildus jāmin, ka sarežģītu bojājumu gadījumos, t. i., rodoties vairākām vienlaicīgām nesimetrijām, iespējamas situācijas, kurās jāveido NS aizvietošanas shēma, neskatoties uz to, ka kādai no nesimetrijām nav acīmredzama NS strāvas noslēgšanās ceļa, piemēram, pie divfāžu īsslēguma, kurš radies vienlaicīgi ar nesimetrisku pārrāvumu. Jāmin, ka detalizēta NS aizvietošanas shēmas un NS strāvu noslēgšanās ceļu analīze ir nozīmīga un bieži kalpo par pamatu vairāku zemesslēgumu aizsardzības algoritmu izstrādei un īstenošanai (piemēram, virzītai zemesslēguma strāvas aizsardzībai [72]).

Jāatzīmē, ka, veidojot kompleksās aizvietošanas shēmas, iepriekš minētos papildu EDS avotus starp nesimetrijas punktiem neieslēdz, jo nesimetrijas robežnosacījumus tad ievēro, īstenojot atsevišķo secību aizvietošanas shēmu savienojumus. Izņēmums ir sarežģīto

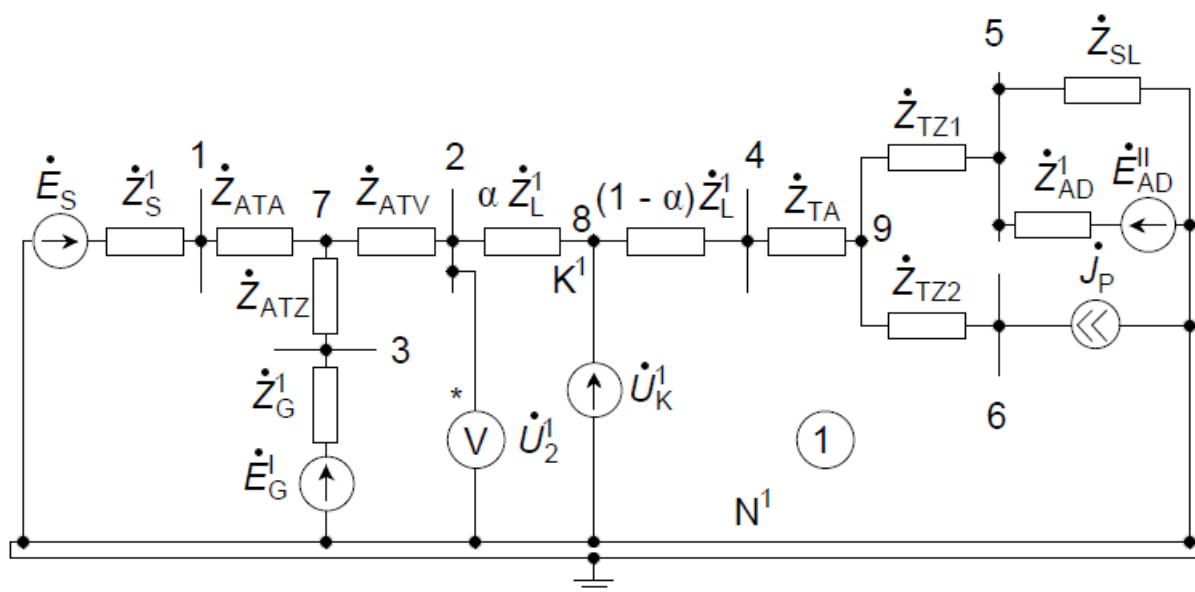
bojājumu aprēķini, kuros izmanto gan elektriskus savienojumus starp secību aizvietošanas shēmām, gan papildu EDS avotus. Citādi, sastādot kompleksās aizvietošanas shēmas, tās veidojošo atsevišķo secību aizvietošanas shēmu sastādīšanas pamatprincipi nemainās. Galvenās izmaiņas, izņemot papildu EDS avotu neiekļaušanu šajās shēmas vienas nesimetrijas gadījumos un vienīgi TS aizvietošanas shēmas neitrāles zemēšanu, ir savienojumos starp mezgliem, kuri secību aizvietošanas shēmās apzīmē nesimetrijas punktus (dažreiz dēvēti par secību aizvietošanas shēmu ieejas un izejas punktiem).

Kā piemēru aplūkosim atsevišķu secību aizvietošanas shēmu sastādīšanu 3.2. attēlā parādītajai energosistēmai. Šajā piemērā apvienotā energosistēma S un ģenerators G pieslēgti tīklam ar autotransformatora AT palīdzību. GL L radies īsslēgums attālumā α r. v. no 2. kopnes. Līnijai L pieslēgts trīstinumu transformators T ar strāvu ierobežojošo reaktoru LR tā neitrālē. Transformatora T ZS tinumiem pieslēgta jaukta statiskā un AD slodze, kā arī saules paneļu grupa PV ar invertora P palīdzību. Shēmas tiks sastādītas atbilstoši aprēķinam īsslēguma rašanās brīdī, pieņemot, ka ģenerators G nonāks pārejas režīmā un ka AD jāievēro ar to pret-EDS. Veidojot šī piemēra aizvietošanas shēmas, netiks parādītas elementu vadītspējas.



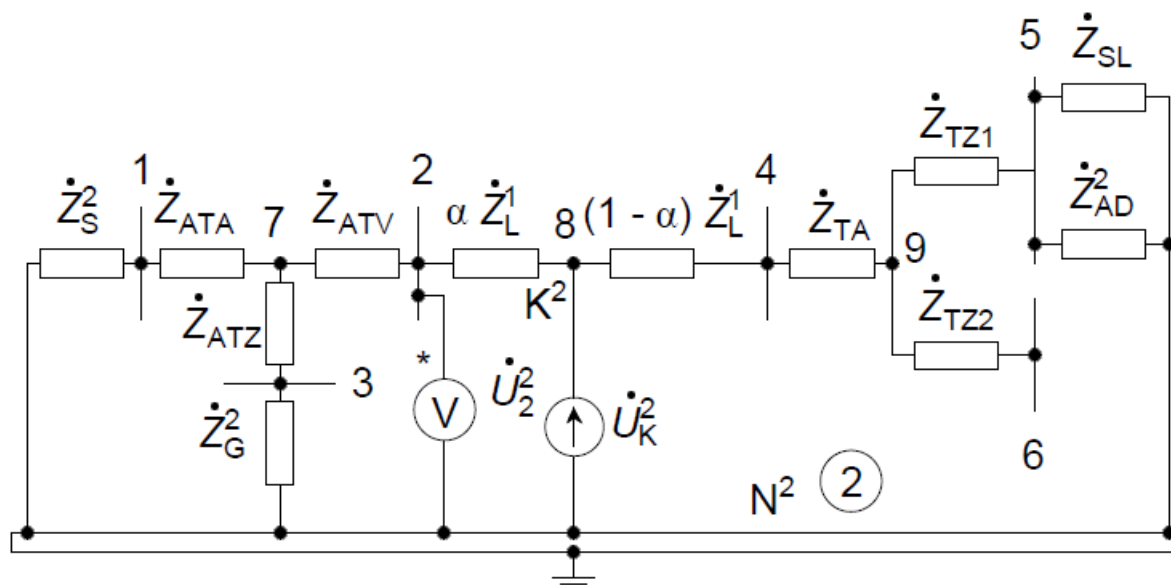
3.2. att. Piemēra energosistēmas vienlīnijas shēma ar īsslēgumu K līnijā L.

Aprakstītajam piemēram atbilstoša TS aizvietošanas shēma parādīta 3.3. attēlā. Redzams, ka šajā shēmā visi avoti paredzēti ar tiešu fāžu secību un G, AD rotācijas virziens ir pozitīvs, jo aizvietošanas shēma ietver to EDS avotus. Strāvu ierobežojošais reaktors LR shēmā neparādās, jo TS aizvietošanas shēmas režīmā neitrāles strāva būs nulle. Īsslēguma punktā K^1 "nomērāmā" sprieguma TS komponente atainota ar identiska lieluma EDS avotu attiecībā pret TS aizvietošanas shēmas neitrāli N^1 . Šajā attēlā parādīts arī 2. kopnes sprieguma TS komponentes noteikšanas veids (starp kopni atainojošo mezglu un TS neitrāli N^1).



3.3. att. Piemēra energosistēmas ar īsslēgumu līnijā L TS aizvietošanas shēma.

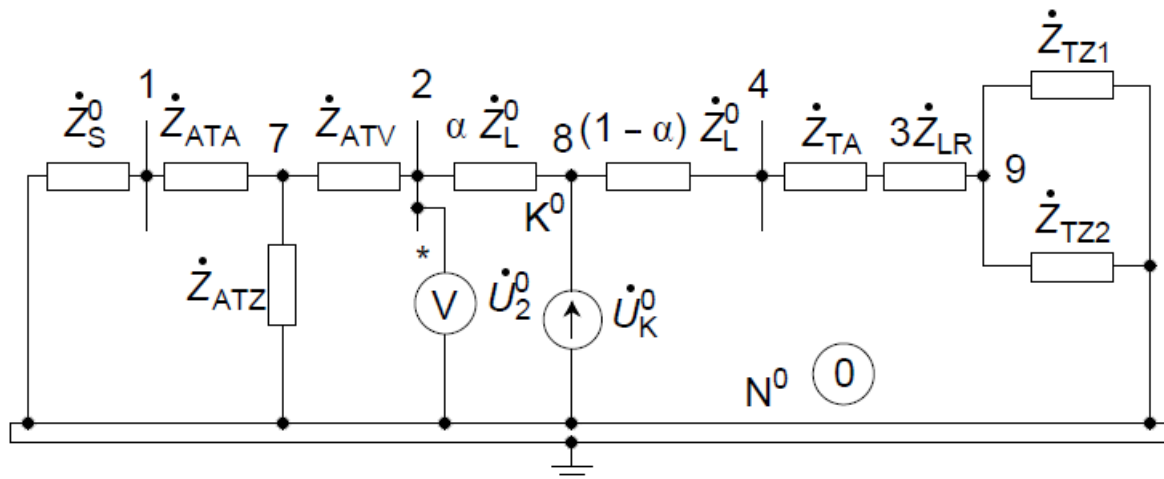
Piemēra PS aizvietošanas shēma parādīta 3.4. attēlā. PS aizvietošanas shēmā, kā tika skaidrots iepriekš, TS avotus pārstāv tikai to pretestības vai tie neparādās vispār. Invertora strāvas avots J_P aizstāts ar pārrāvumu, nevis savienojumu ar PS neitrāli, jo invertora vadība parasti nodrošina, ka tīklā no invertora plūst tikai simetriskas TS strāvas. Vienlaikus 6. kopnes spriegumam tomēr būs novērojama PS sprieguma komponente. Īsslēguma punktā K^2 “nomērāmā” sprieguma PS komponente atainota ar identiska lieluma EDS avotu attiecībā pret PS aizvietošanas shēmas neitrāli N^2 . Attēlā parādīts arī 2. kopnes sprieguma PS komponentes noteikšanas veids (starp kopni atainojošo mezglu un PS aizvietošanas shēmas neitrāli N^2).



3.4. att. Piemēra energosistēmas ar īsslēgumu līnijā L PS aizvietošanas shēma.

Aprakstītajam piemēram atbilstoša NS aizvietošanas shēma parādīta 3.5. attēlā. Daļa NS strāvas noslēgsies autotransformatora AT un transformatora T trīsstūra slēguma tīnumos, bet

pārējā īsslēguma NS strāvas daļa noslēgsies sistēmas NS pretestībā, kā tas parādīts NS aizvietošanas shēmā (sistēmas pretestība savienota ar NS neitrāli). Var redzēt, ka strāvu ierobežojošā reaktora LR pretestība parādās virknē ar transformatora T AS tinuma pretestību, kura neitrālē šis reaktors ir ieslēgts. Šīs pretestības vērtība ir trīskāršota, jo T visu trīs fāžu NS strāvas plūdis AS tinuma neitrālē un attiecīgi arī tajā ieslēgtajā reaktorā. Īsslēguma punktā K^0 “nomērāmā” sprieguma NS komponente atainota ar identiska lieluma EDS avotu attiecībā pret NS aizvietošanas shēmas neitrāli N^0 . Šajā attēlā parādīts arī 2. kopnes sprieguma NS komponentes noteikšanas veids (starp kopni atainojošo mezglu un NS aizvietošanas shēmas neitrāli N^0). Jāatzīmē, ka, aprēķiniem izmantojot atsevišķas secību aizvietošanas shēmas, iespējamas tādas situācijas kā NS aizvietošanas shēmai šajā piemērā, kurās mezglu skaits secību aizvietošanas shēmām atšķiras. 3.5. attēlā vizuāli saglabāta TS un PS aizvietošanas shēmai atbilstošā numerācija, bet, **veidojot aprēķinu ieejas matricas, jāatceras, ka tajās mezglu un zaru numerācija nesatur pārtraukumus, tādēļ aizvietošanas shēmas un aprēķina matricu mezglu un zaru numerācijas atbilstība konkrētiem tīkla elementiem jāatceras aprēķinu veicējam.**



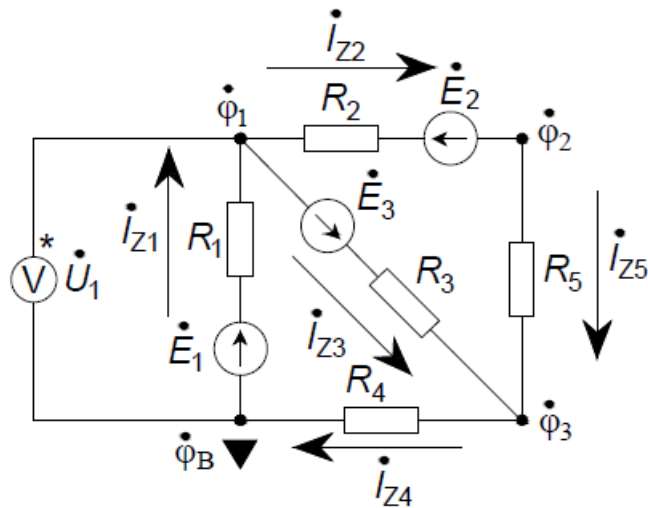
3.5. att. Piemēra energosistēmas ar īsslēgumu līnijā L NS aizvietošanas shēma.

Parādītajā piemērā aplūkots īsslēgums, bet pārrāvuma vai citas garennesimetrijas gadījumā īsslēgumu punktu K^1 , K^2 un K^0 vietā katrā secību aizvietošanas shēmā būtu divi atsevišķi nesimetrijas punkti starp līnijas posmu pretestībām (αZ_L un $(1 - \alpha) Z_L$) L^1 un M^1 , L^2 un M^2 , L^0 un M^0 , starp kuriem būtu pieslēgti nomērāmo fāžu spriegumu kritumu simetriskajām komponentēm atbilstoši EDS avoti ΔU_L^1 , ΔU_L^2 , ΔU_L^0 . Otrā vērā ņemamā atšķirība secību aizvietošanas shēmās garennesimetrijas gadījumā būtu vismaz līnijas kapacitatīvo vadītspēju iekļaušana, jo tajās plūstošajai strāvai būtu daudz lielāka ietekme, salīdzinot ar īsslēguma režīmu. Garennesimetrijas gadījumā TS aizvietošanas shēmā netiktu ieviests arī AD pret-EDS, bet pārējās izmaiņas būtu vienīgi pretestību un ģeneratora EDS vērtībās.

4. ELEKTRISKO SISTĒMU REŽĪMU PARAMETRU APRĒĶINI AR TOPOLOĢISKO METODI

Nelielām elektrisko sistēmu daļām vai sistēmām, kuras jau ir reducētas līdz rezultējošo secību aizvietošanas shēmu summārajām pretestībām un EDS, režīma parametrus iespējams aprēķināt, uzreiz sastādot un atrisinot nepieciešamos Oma likuma un/vai Kirhofa likumu vienādojumus. Tomēr realitātē elektriskās sistēmas ir sazarotas un nereti ar sarežģītām konfigurācijām, kurām pakāpenisks shēmas vienkāršošanas ceļš var kļūt ļoti laikietilpīgs, tādēļ ir noderīgi aplūkot aizvietošanas shēmu režīma parametru aprēķinu topoloģisko metodi, kas balstīta uz grafu teoriju un ļauj salīdzinoši vienkārši aprēķināt aizvietošanas shēmu režīma parametrus bez papildu vienkāršojumiem. Lineāru ķēžu režīma parametru aprēķinos visbiežāk izmanto no Oma likuma un pirmā Kirhofa likuma (mezglam pieslēgto zaru strāvu summa ir vienāda ar nulli $\sum I = 0$ A [73]) iegūto mezglu potenciālu metodi (turpmāk tekstā – MPM) vai no Oma likuma un otrā Kirhofa likuma (slēgta kontūra spriegumu kritumu summa ir vienāda ar EDS avotu summu $\sum U = \sum E$ [73]) iegūto kontūrstrāvu metodi. Šajā grāmatā tiks izklāstīta un topoloģiskajiem režīma parametru aprēķiniem izmantota MPM.

Par mezglu definēsim jebkuru sistēmas punktu, kurā iespējams nomērīt spriegumu (parasti par tādiem pieņem vismaz sistēmā esošās kopnes). Starp elektriskās shēmas mezgliem ir saites elementi jeb zari, kurus vispārīgi aplūkosim kā sastāvošus no EDS avota $0 < \dot{E} < \infty$ V un pretestības $0 < \dot{Z} < \infty$ Ω . **Jāatceras ka praktiskiem aprēķiniem zara pastāvēšanai svarīgākais nosacījums ir galīgas pretestības esamība ($0 < \dot{Z} < \infty$ Ω), jo pretējā gadījumā, vēlāk nosakot šo zaru vadītspējas, parādās dalījumi ar nulli, kas var pilnībā izjaukt skaitlisko aprēķina procesu, un šāds zars principā kļūst par vienu mezglu (starp zara sākuma un beigu mezglu nepastāvēs potenciālu atšķirība, ja tas nesaturēs EDS avotu).** Katram zaram piešķir kārtas numuru – veselu skaitli no 1 līdz shēmas zaru skaitam m un pozitīvu virzienu. Mezgliem arī piešķir kārtas numuru, izņemot vienu mezglu, kuru pagaidām apzīmēsim ar simbolu \blacktriangledown . Tas ir bāzes mezgls, un tieši attiecībā pret šo mezglu tiks mērīti vai noteikti mezglu spriegumi. Piemēram aplūkosim vienkāršu elektrisko shēmu (4.1. att.), kurā mezgli parādīti ar to potenciālu apzīmējumiem ϕ_B, ϕ_1 utt., zari, kas apzīmēti ar zaru strāvām $\dot{I}_{Z1}, \dot{I}_{Z2}$ utt., un 1. mezglā sprieguma \dot{U}_1 mērīšanas princips.



4.1. att. MPM analīzei izmantotā elektriskā shēma.

Tā kā patērētājam piegādātā enerģija nes peļņu un bilancē tiek ierakstīta ar zīmi “+”, rakstot pirmo Kirhofa likumu, tradicionāli virzienu „uz līniju” jeb prom no mezgla uzskata par pozitīvu (vienlaikus jāatzīmē, ka ārzemju literatūrā mēdz izmantot arī pretēju zīmes pieņemšanas principu). Balstoties uz šo virziena apzīmēšanas pieņēmumu, iespējams uzrakstīt pirmo Kirhofa likumu 1., 2. un 3. mezglam:

$$\begin{cases} -\dot{I}_{Z1} + \dot{I}_{Z2} + \dot{I}_{Z3} = 0 \text{ A.} \\ -\dot{I}_{Z2} + \dot{I}_{Z5} = 0 \text{ A.} \\ -\dot{I}_{Z3} + \dot{I}_{Z4} - \dot{I}_{Z5} = 0 \text{ A.} \end{cases} \quad (4.1.)$$

Redzams, ka nelielai shēmai pirmā Kirhofa likuma pieraksts ir samērā vienkāršs, bet lielāku aizvietošanas shēmu aprēķiniem ir lietderīgāk pāriet uz matricu formu. Iesākumā var parādīt pirmo Kirhofa likumu vispārinātas summas veidā:

$$\sum_{j=1}^m a_{ij} \dot{I}_{Zj} = 0 \text{ A, } i = 1, \dots, n, \quad (4.2.)$$

kur a – mezglu un zaru saites virziena koeficienti, $a \in \{-1, 0, 1\}$;

m – zaru skaits;

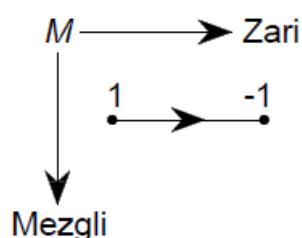
n – numurēto mezglu skaits.

Elements $a_{ij} = -1$, ja zars j pieslēgts mezglam i un tā virziens ir uz mezglu i , $a_{ij} = 1$, ja zars j pieslēgts mezglam i un tā virziens ir prom no mezgla i , un $a_{ij} = 0$, ja zars j nav savienots ar mezglu i . Koeficientus a_{ij} var apvienot matricā, kura būtībā ir aizvietošanas shēmas “skeleta”, t. i., mezglu un zaru saišu, atspoguļojums. Tāda veida shēmu “skeletus” ar mezgliem un tos savienošiem zariem sauc par grafiem, un tos apraksta atsevišķa matemātikas sadaļa – grafu teorija. Mezglu un zaru savienojumu matricu grafu teorijā ir pieņemts saukt par pirmās incidences matricu, respektīvi, piederības vai saistījuma matricu, un apzīmēt ar burtiem M , A vai Γ . Balstoties uz iepriekš definēto zaru virzienu ievērošanu pirmā Kirhofa likuma pierakstā, matricas M sastādīšanai izmanto šādus noteikumus:

- 1) zaru virzienus norāda no sākuma mezgla (grafa virsotnes) uz beigu mezglu (grafa virsotni);
- 2) matricas M rindas numurē atbilstoši mezglu numuriem, bet kolonnas – atbilstoši zaru numuriem;

- 3) ja zara virziens ir uz mezglu, tad attiecīgajam matricas M elementam piešķir vērtību -1 , ja zara virziens ir prom no mezgla, tad $-$ vērtību 1 , bet, ja zars nav savienots ar šo mezglu, tad piešķir vērtību 0 ;
- 4) ja zars savienots ar bāzes mezglu, kuru neiekļauj M matricā, tad tam piešķir vērtību 1 vai -1 vienīgi šī zara nebāzes mezgla pozīcijai atbilstoši 3. noteikumam, bet pārējās zaram atbilstošās kolonas pozīcijas aizpilda ar 0 .

Shematiski matricas M sastādīšana ir parādīta 4.2. attēlā.



4.2. att. Pirmās incidences matricas M sastādīšanas princips.

Izvēloties zaru virzienu, jāsaprot, ka tas pats par sevi nenosaka faktiskās strāvas virzienu, kuram esot pretējam pieņemtajam zara virzienam, rezultātā tiks iegūta negatīva strāvas stipruma vērtība. Lietderīgi izvēlēties zaru virzienus, kas atbilst analizētās aizsardzības vai citas iekārtas mērīšanas virzienam, un šādu virzienu saglabāt visām secību aizvietošanas shēmām. Saprotams, ka lielu tīklu gadījumos ar simtiem mezglu un zaru manuāla pirmās incidences matricas sastādīšana var kļūt ļoti laikietilpīga un pieaug kļūdu risks. Šo problēmu var daļēji atrisināt, izveidojot palīgfunkciju, kura automātiski sastāda pirmās incidences matricu no zara sākuma un beigu mezglu numuru vektoriem, kuri var noderēt arī grafa vizualizēšanai, ja tādu iespēju paredz programmēšanas vide.

Numurēto mezglu spriegumu apzīmēšanai iespējams ieviest vektoru $U = \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dots \\ \dot{U}_n \end{bmatrix}$, bet spriegumu bāzes mezglā apzīmēsim ar U_B . Shēmas zaros plūstošo strāvu stiprumu apzīmēšanai

iespējams izveidot zaru strāvu vektoru $I_z = \begin{bmatrix} \dot{I}_{z1} \\ \dot{I}_{z2} \\ \dots \\ \dot{I}_{zm} \end{bmatrix}$. Tagad vienādojumu sistēmu (4.1.) var

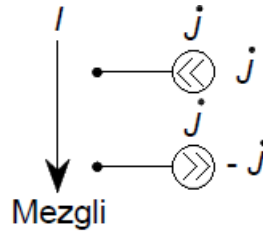
uzrakstīt matricu formā:

$$MI_z = 0 \text{ A}, \quad (4.3.)$$

kur 0 – vektors, kurš satur vienīgi nulles un kura izmēri sakrīt ar mezglu skaitu.

Vienādojumu sistēma (4.3.) ir formulēta, neņemot vērā strāvas avotus, kuru esamība aizvietošanas shēmās ir iespējama. Tādēļ ieviesīsim strāvas avotu vektoru I , kurš numurēts identiski mezglu numerācijai un kurā uz mezgliem virzīto strāvas avotu strāvas stipruma vērtību rakstīsim ar plusa zīmi, bet izplūstošo strāvu avotu strāvas stiprumu vērtību $-$ ar mīnusa zīmi

(4.3. att.) [18], [74]. Mezgliem, kuriem nav pieslēgti strāvas avoti, atbilstošajā vektorā I pozīcijā ieraksta 0 A.



4.3. att. Strāvas avotu vektora I sastādīšanas princips.

Ņemot vērā strāvās avotus un vektora I sastādīšanas principu, sistēmu (4.3.) var pārrakstīt formā:

$$MI_z = I. \quad (4.4.)$$

Tagad pirmā Kirhoha likuma vienādojumu sistēma ir formulēta matricu formā, ņemot vērā arī strāvas avotus. Tomēr, lai iegūtu MPM vienādojumus, ir nepieciešami tālāki pārveidojumi. Pagaidām pieņemot, ka bāzes mezgls ir zemēts ($\dot{\varphi}_B = 0$ V), zaru strāvas var izteikt ar Oma likuma palīdzību šādā veidā:

$$\begin{cases} \dot{I}_{Z1} = (\dot{\varphi}_B - \dot{\varphi}_1 + \dot{E}_1)/R_1 = (\dot{E}_1 - \dot{\varphi}_1)G_1, \\ \dot{I}_{Z2} = (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2 - \dot{E}_2)/R_2 = (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2 - \dot{E}_2)G_2, \\ \dot{I}_{Z3} = (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_3 + \dot{E}_3)/R_3 = (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_3 + \dot{E}_3)G_3, \\ \dot{I}_{Z4} = (\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_B)/R_4 = \dot{\varphi}_3 G_4, \\ \dot{I}_{Z5} = (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3)/R_5 = (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3)G_5, \end{cases} \quad (4.5.)$$

kur $G_j = 1/R_j - j$ -tā zara aktīvā vadītspēja, S.

Ievietojot (4.5.) vienādojumu sistēmā (4.1.), iespējams uzrakstīt jaunu vienādojumu sistēmu, kas ļauj aprēķināt mezglu potenciālus:

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_1(G_1 + G_2 + G_3) - \dot{\varphi}_2 G_2 - \dot{\varphi}_3 G_3 = \dot{E}_1 G_1 + \dot{E}_2 G_2 - \dot{E}_3 G_3, \\ \dot{\varphi}_2(G_2 + G_5) - \dot{\varphi}_1 G_2 - \dot{\varphi}_3 G_5 = -\dot{E}_2 G_2, \\ \dot{\varphi}_3(G_3 + G_4 + G_5) - \dot{\varphi}_1 G_3 - \dot{\varphi}_2 G_5 = \dot{E}_3 G_3. \end{cases} \quad (4.6.)$$

Vienādojumu sistēmas (4.6.) kreiso pusi var izteikt kā zaru aktīvo vadītspēju matricas G

reizinājumu ar spriegumu vektoram U analogisku potenciālu vektoru $\varphi = \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_1 \\ \dot{\varphi}_2 \\ \dots \\ \dot{\varphi}_n \end{bmatrix}$. Matricā G

diagonāles elementi G_{ii} , $i = 1, \dots, n$ ir vienādi ar visu zaru, kuri pievienoti mezglam i , vadītspēju summu ($G_{ii} = \sum_{j=1; i \neq j}^n G_{ij}$). Pārējie nediagonāles elementi G_{ij} ($i \neq j$) ir tā saucamās mezglu savstarpējās vadītspējas. Tās atbilst to zaru vadītspēju summai, kuri savieno mezglus i un j , un tiek ņemtas ar “-” zīmi. Lineāras ķēdes gadījumā zaru vadītspēja nav atkarīga no strāvas virziena, t. i., $G_{ij} = G_{ji}$, kā rezultātā, matricai G piemīt diagonāla simetrija. Tāpat viegli saprast, ka visiem matricas G diagonāles elementiem jābūt lielākiem par 0 S (pretējā gadījumā aizvietošanas shēma saturētu mezglu bez pieslēgtiem zariem). Izmantojot definēto vadītspēju matricu G un potenciālu vektoru φ vienādojumu sistēmas (4.6.) kreiso pusi, var uzrakstīt kā

$G\phi$, kurai atbilst strāvas, kas rodas konkrēti mezgla potenciālu starpības dēļ. Tā kā piemēra shēmā nav strāvas avotu, izteiksmes (4.6.) labā puse satur summu $\sum_i E_j G_j$ visiem zariem, kas pieslēgti pie mezgla i , t. i., strāvas, kas rodas konkrēti EDS avotu dēļ:

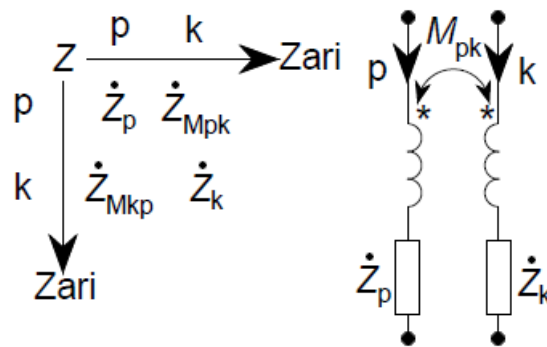
$$I_{EDS\ i} = \sum_{j=1, \dots, n}^m E_j G_j (-1 \cdot M_{ij}) \text{ vai } I_{EDS} = -MZ^{-1}E, \quad (4.7.)$$

kur I_{EDS} – vektors, kas satur EDS radīto strāvu, kas ieplūst mezglos no tiem pieslēgtajiem zariem, summas, A;

Z – zaru pretestību matrica, Ω ;

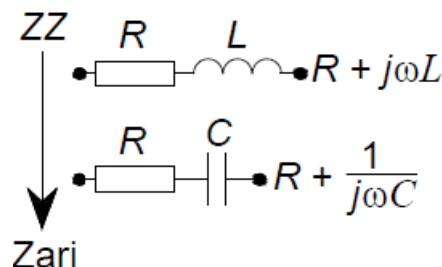
E – EDS avotu vektors, V.

Zaru pretestību matrica tiek numurēta identiski zaru numuriem, un tās diagonāles elementi ($Z_{ij}, i = j$) satur zaru pretestības, bet nediagonāles elementi $Z_{ij}, i \neq j$ satur zaru i un j savstarpējās mijinduktivitātes pretestības $\dot{Z}_{Mij} = \dot{Z}_{Mji} = j\omega M_{ij}$ ar plusa zīmi, ja abi pieņemtie zaru strāvu virzieni vienādi ieplūst spoļu vai citu induktīvi saistīto elementu aizvietošanas shēmā vai vienādi izplūst no šo elementu shēmām vai ar mīnusa zīmi pārējos gadījumos. Z matricas sastādīšanas skaidrojums ar zariem p un k , starp kuriem pastāv mijinduktivitāte M_{pk} , parādīts 4.4. attēlā.



4.4. att. Zaru pretestību matricas Z sastādīšanas princips.

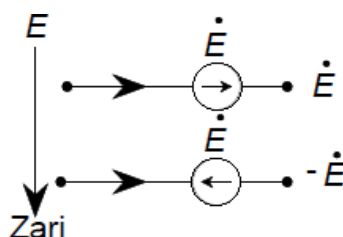
Ja starp shēmas zariem nepastāv mijinduktīvas saites vai tās netiek ņemtas vērā, iespējams sastādīt vienkāršāku zaru pretestību palīgvektoru ZZ , kas satur Z matricas diagonāles elementus, t. i., vienīgi zaru pretestības (4.5. att.). Attiecīgi no palīgvektora ZZ viegli iespējams iegūt zaru pretestību matricu, ja pieejama diagonālas matricas sastādīšanas funkcija: $Z = \text{diag}(ZZ)$.



4.5. att. Zaru pretestību palīgvektora ZZ sastādīšanas princips.

EDS avotu vektoru sastāda ar zariem identisku numerāciju, un pozitīvu EDS vērtību izmanto, ja pieņemtais zara virziens un EDS avota virziens sakrīt, bet, ja tie ir pretēji, tad

izmanto negatīvu EDS vērtību. Savukārt, ja zars nesatur EDS avotu, tad šim vektora elementam piešķir vērtību 0 V (4.6. att.).



4.6. att. Zaru EDS avotu vektora E sastādīšanas princips.

Ieviešot shēmā strāvas avotus, tie, līdzīgi EDS avotiem, ir neatkarīgi mainīgie, un parādīsies vienādojumu sistēmas (4.6.) labajā pusē. Tādēļ, atainojot sistēmas (4.6.) labo pusi, kā parādīts (4.7.), pēc strāvas avotu vektora I (4.3. att.) ieviešanas, iegūst vektoru ar strāvām, kuras rada visi shēmas avoti:

$$I_{AVi} = I - MZ^{-1}E, \quad (4.8.)$$

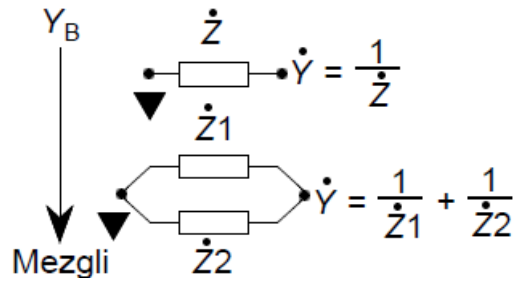
kur I_{AV} – vektors, kas satur EDS un strāvas avotu kopējo radīto strāvu, kura ieplūst mezglos no tiem pieslēgtajiem zariem, summas, A.

Izmantojot (4.8.) un iepriekš parādīto (4.6.) kreisās puses pārveidojumu, iespējams pārrakstīt vienādojumu sistēmu (4.6.) matricu formā:

$$Y\varphi = I - MZ^{-1}E, \quad (4.9.)$$

kur Y – pilno vadītspēju matrica, kas pēc uzbūves sakrīt ar matricu G , bet satur pilnās vadītspējas ($Y = G + jB$), S.

Vienādojumu sistēma (4.9.) ir pareiza, ja bāzes mezgls ir zemēts ($\varphi_B = 0$ V). Vispārīgā gadījumā jāaplūko bāzes mezgls, kuram ir no nulles atšķirīgs potenciāls $\varphi_B = \text{const} \neq 0$ V. Zariem, kuri nav savienoti ar bāzes mezglu, šāda potenciāla ieviešana bāzes mezglā tiešā veidā neko nemaina, jo strāvu šajos zaros joprojām nosaka potenciālu starpības starp to mezgliem un zaru vadītspējas. Zariem, kas savienoti ar bāzes mezglu, vienādojumos (4.5.) saglabāsies potenciāls φ_B (piemēram, $\dot{I}_{Z4} = (\varphi_3 - \varphi_B)G_4$) un vienādojumu sistēmas (4.6.) kreisajā pusē parādīsies tāda veida locekļi kā $-G_{i-B}\varphi_B$, kur G_{i-B} ir vadītspēja starp i -to un bāzes mezglu, $i=1, \dots, n$ jeb strāvas, kas rodas potenciālu starpības starp i -to un bāzes mezglu dēļ. Ja $\varphi_B = \text{const}$, arī $-G_{i-B}\varphi_B$ ir konstante, un ir loģiski to pārnest uz vienādojumu sistēmas labo pusi kā pārējos brīvos mainīgos. Ērtībai ieviešim bāzes mezgla vadītspējas vektoru Y_B , kas numurēts atbilstoši mezgliem un satur pilnās zaru vadītspēju vērtības starp bāzes un pārējiem mezgliem. Ja saites starp konkrēto mezglu un bāzes mezglu nav, tad atbilstošajā šī vektora pozīcijā ieraksta vērtību 0 S. Ja mezgls ir saistīts ar bāzes mezglu ar vairākiem paralēliem zariem, tad to vadītspējas summējas (4.7. att.).



4.7. att. Bāzes mezgla vadītspēju vektora Y_B sastādīšanas princips.

Tagad vienādojumu sistēmu (4.9.) ir iespējams uzrakstīt universālā formā:

$$Y\varphi = I - MZ^{-1}E + Y_B\varphi_B. \quad (4.10.)$$

Šādu aizvietošanas shēmu režīma parametru aprēķinu mērķis parasti ir noteikt zaru strāvu un/vai mezglu spriegumu vērtības. Sistēma (4.10.) būs pareiza arī tad, ja potenciālu vektors tiks nomainīts pret spriegumu vektoru, jo aprakstītajā veidā noteiktie potenciāli jau atbilst šo mezglu spriegumiem relatīvi shēmas bāzes mezglam, kas jāņem vērā, ja ir jānosaka spriegums starp diviem nebāzes mezgliem. Pārveidojot izteiksmi (4.10.) mezglu spriegumu aprēķinam, iegūst [74]:

$$YU = I - MZ^{-1}E + Y_B U_B. \quad (4.11.)$$

Sistēma (4.11.) ir LVS ar diagonāli simetrisku koeficientu matricu Y , kas satur n vienādojumus. Atrisinot LVS (4.11.), nosakāmi mezglu spriegumi, kurus iespējams izmantot zaru strāvu stiprumu aprēķinam, izmantojot Oma likumu matricu formā [74]:

$$I_Z = Z^{-1}(E + M^T(U - U_B)), \quad (4.12.)$$

kur E, U – EDS avotu un mezglu F–Z spriegumu vektori, V ;

U_B – vektors, kas satur vienīgi bāzes mezgla F–Z sprieguma vērtības, V ;

M^T – transponēta pirmās incidences matrica M .

Nelielām shēmām MPM vienādojumu manuāla sastādīšana grūtības nerada, bet, pieaugot mezglu skaitam, šāds risinājums ātri kļūst ļoti darbietilpīgs, it īpaši vadītspēju (koeficientu) matricas Y gadījumā. Daudz ērtāk būtu izskaitļot Y matricu formā, izmantojot iepriekš aprakstītās ieejas matricas un vektorus. Uz brīdi aplūkosim teorētisku shēmu bez EDS avotiem (visi E elementi ir 0 V) un ar zemētu bāzes mezglu ($U_B = 0$ V). Strāvas tādā shēmā faktiski noteiktu vienīgi strāvas avotu vērtībās un zaru pretestības. Šādai shēmai vienādojumu sistēma (4.11.) ir izsakāma formā $YU = I$. Aizvietojot strāvas avotu vektoru ar pirmā Kirhofa likuma (4.4.) palīdzību, var iegūt vienādojumu sistēmu $YU = MI_Z$. Tad, aizvietojot zaru strāvas ar to vadītspēju un spriegumu starpības reizinājumu $Z^{-1}M^T U$, ir iespējams iegūt vienādojumu sistēmu formā $YU = MZ^{-1}M^T U$. Parādīto vienādojumu sistēmu izdalot ar mezglu spriegumu vektoru U , iegūst, ka:

$$Y = MZ^{-1}M^T. \quad (4.13.)$$

Šis mezglu vadītspēju matricas Y aprēķins derīgs arī shēmām ar EDS avotiem, jo tās elementus, līdzīgi aktīvo vadītspēju matricai G , nosaka vienīgi shēmas struktūra un zaru

vadītspējas. Tādējādi, lai aprēķinātu shēmas režīma parametrus, manuāli ir jāastāda vienīgi matricas M, Z (vai vienkāršāku vektoru ZZ shēmām bez mijinduktivitātēm) un vektori E, I un Y_B (kad $U_B \neq 0$ V), kas, saprotams, ir daudz vienkāršāk nekā manuāla vienādojumu sistēmu sastādīšana, it īpaši veicot aprēķinus lielām un sarežģītām aizvietošanas shēmām. Vajadzības gadījumā pēc mezglu spriegumu un zaru strāvu aprēķina iespējams noteikt zaros plūstošās jaudas, izmantojot kompleksi saistītās zaru strāvu vērtības [73]:

$$\dot{S}_{Z,j} = \sqrt{3} \dot{U}_i \hat{I}_{Zj}, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m, M_{ij} \neq 0, \quad (4.14.)$$

un jaudas zudumus zaru pretestībās:

$$\Delta \dot{S}_{Z,j} = 3 \dot{I}_{Z,j} \hat{I}_{Z,j} \dot{Z}_j, j = 1, \dots, m. \quad (4.15.)$$

Saprotams, ka saglabājas jautājums par iegūtas LVS (4.11.) atrisināšanu. Šim nolūkam iespējams izmantot dažādas metodes, ieskaitot inversās matricas metodi, Gausa metodi un dažādas skaitliskas metodes [74], [75]. Ņemot vērā, ka lielākā daļa aprēķinu piemēru šajā grāmatā ir īstenoti *MATLAB*© programmas teksta veidā, šiem aprēķiniem tiks izmantota iebūvēta LVS risināšanas funkcija (balstīta uz Gausa metodi) vai skaitliska Zeideļa metodes versija. Klasiskā formā Zeideļa jeb Gausa–Zeideļa metode risina LVS ar n vienādojumiem formā $AX = B$ ar pakāpeniskiem nezināmo vektora X vērtību tuvinājumiem. Zeideļa metode iegūst nākamā tuvinājuma soļa $k + 1$ vērtību i -tajam elementam X_i^{k+1} , izmantojot soli $k + 1$ jau pārrēķinātās nezināmo vērtības $X_{1 \dots (i-1)}^{k+1}$ un iepriekšējā solī k noteiktās i -tajam elementam sekojošās vektora X nezināmo vērtības $X_{(i+1) \dots n}^k$. Zeideļa metodes skaitliskā aprēķinu forma atbilstoši iepriekš minētajam ir [76]:

$$X_i^{k+1} = \sum_{j=1}^{i-1} C_{ij} X_j^{k+1} + \sum_{m=i+1}^n C_{im} X_m^k + D_i, i = 1, \dots, n, \quad (4.16.)$$

kur C un D – palīgmaticas, kuras izsakāmas no koeficientu matricas A un brīvo mainīgo vektora B .

Palīgmaticu noteikšanai izmantojamas šādas formulas [76]:

$$C_{ij} = -A_{ij}/A_{ii}, C_{ii} = 0, i, j = 1, \dots, n, \quad (4.17.)$$

$$D_i = -B_i/A_{ii}, i = 1, \dots, n. \quad (4.18.)$$

Zeideļa metodes skaitliskās formas īstenošana *MATLAB*© ārējās funkcijas programmas teksta veidā, kurai ieejā dod koeficientu matricu A , brīvo mainīgo vektoru B un precizitātes kritērija robežas vērtību EPS , parādīta turpmāk:

```
function X=zeidel(A,B,EPS)
n=size(A,1); %Mezglu skaits
E=inf; %Si briza precizitates kriterija vertiba, kas lielaka par
EPS
D=B;
C=A;
%Paligmaticu vertibu aprekini
for i=1:n
    D(i)=B(i)/A(i,i);
    for j=1:n
```



```

        C(i,j)=-A(i,j)/A(i,i);
    end
    C(i,i)=0;
end
%Zeidela metodes nezinamo apreķina galvenais cikls
X=B;
while E>EPS
    E=0;
    for i=1:n
        X1=D(i);
        for j=1:n
            X1=X1+C(i,j)*X(j);
        end
        T=abs(X(i)-X1);
        if T>E
            E=T;
        end
        X(i)=X1;
    end
end
end

```

Vienādojumu sistēmu (4.11.) arī ir iespējams aplūkot formā $AX = B$, bet matricas A vietā jāizmanto vadītspēju matrica Y , un brīvo mainīgo vektoru B veido visa (4.11.) labā puse: $B = I - MZ^{-1}E + Y_B U_B$. Vienādojumu (4.17.) un (4.18.) īstenošana no tā nemainās. Tagad iespējams pārrakstīt (4.16.) formā, kas izteikta mezglu spriegumu aprēķinam:

$$U_i^{k+1} = \sum_{j=1}^{i-1} C_{ij} U_j^{k+1} + \sum_{m=i+1}^n C_{im} U_m^k + D_i, i = 1, \dots, n. \quad (4.19.)$$

Vienādojuma (4.19.) aprēķinu atkārto līdz mezglu spriegumu izmaiņas starp tuvinājumu soļiem k un $k+1$ samazinās zem vēlamās kļūdas robežas ε (iepriekš programmas tekstā – “EPS”) V : $\varepsilon \leq \max_i (|U_i^{k+1} - U_i^k|)$.

Parādītais aprēķina paņēmiens parasti izmantojams tieši bojājumu režīmu parametru noteikšanai. Sastādot bojājumu aizvietošanas shēmas, jāņem vērā, ka bieži par bāzes mezglu pieņem TS aizvietošanas shēmas neitrāli un to zemē ($U_B = 0$ V, piemēram, 3.3. att.). Tādā gadījumā vektoru B nosaka šādi: $B = I - MZ^{-1}E$. Līdzīgā veidā iespējams veikt aprēķinus arī aizvietošanas shēmām, kas izveidotas (reālajās) fāžu koordinātās, bet shēmā par bāzes mezglu pieņem zemi, kuras potenciāls, protams, pieņemams vienāds ar 0 V. Šādiem aprēķiniem ir jāievēro konkrēto fāžu parametri (pretestības, mijinduktivitātes, kapacitātes u. c.), **kuru vērtības parasti atšķiras no secību aizvietošanas shēmu parametru vērtībām** [77]. Tādēļ šāds detalizētāks tīkla elementu režīmu parametru aprēķinu veids ir izdevīgs, galvenokārt aplūkojot atsevišķus elementus vai tīkla daļu, kas sastāv no dažiem elementiem. Tomēr iespējams izmantot hibrīda jeb jauktu modeļu režīma parametru aprēķināšanas metodi. Sākumā tuvināti aprēķina visa tīkla režīmu, izmantojot SKM, un tad var ievadīt iegūtos mezglu spriegumus konkrēta elementa vai tīkla daļas detalizētākā fāžu koordinātu modelī kā elementam vai tīkla daļai pieslēgtus EDS avotus [78]. Atskaitot tiešu režīma parametru aprēķinu rezultātu analīzi, grāmatā dotos bojājumu režīmu parametru aprēķinus var izmantot arī reālu RAA

terminālu testēšanai, ja no iegūtajiem rezultātiem izrēķina stacionārā režīma parametru momentānās vērtības atbilstoši 1. pielikumam vai ja atbilstoši 9. nodaļas piemēriem nosaka pārejas procesa fāžu strāvu un spriegumu momentānās vērtības. Iegūtās momentānās vērtības pēc reducēšanas uz mērmaiņu sekundāro pusi var padot RAA terminālim ar vadāma signālu ģeneratora palīdzību manuāli vai izmantojot pārejas procesu digitālo ierakstu formātu *COMTRADE* vai tam līdzīgus digitālo oscilogrammu datņu formātus, lai novērtētu minētā termināla darbību [79], [80]. Bojājumu režīmu skaitlisko aprēķinu metodiku iespējams izmantot arī mācību stendu izveidei, piemēram, RA darbības analīzei [81].

Slodzes režīma parametru aprēķinus parasti veic, aplūkojot jaudas un jaudu plūsmas zaru strāvu vietā, un vispārīgā gadījumā aprēķins jāveic, izmantojot slodžu jaudu raksturlīknes $P_{SL} = f(U_{SL})$ un $Q_{SL} = f(U_{SL})$ [57], kur vismaz reaktīvās jaudas raksturlīknes parasti ir nelineāras. Tomēr iespējams tuvināti pieņemt šīs jaudas par konstantām (laika posmam, kurā nav izmainījusies pieslēgto patērēju jauda un tās raksturs), jo elektrisko sistēmu transformatoriem bieži izmanto sprieguma regulēšanu un sistēmas normālā darba režīmā uz tās kopnēm jāuztur sprieguma līmenis 95–105 % U_N vai vēl striktākās robežās [18]. Ģeneratorus, izņemot balansējošo mezglu vai apvienotu balansējošo sistēmu, vai arī balansējošo ģeneratoru, aptuvenam slodzes režīma parametru aprēķinam arī iespējams uzskatīt par konstantas jaudas avotiem, pieņemot, ka to regulēšanas princips ir $P_G, Q_G = \text{const}$ vai $P_G, |\dot{U}_G| = \text{const}$. Ņemot vērā, ka jauda ar spriegumu saistīti nelineāri, shēmas avoti, izņemot balansējošo elementu, un slodzes tiks aizvietoti ar nemainīgas vērtības strāvas avotiem. Šādu strāvas avotu vērtības nosaka to patērētās vai tīklā nodotās jaudas ar slodzes strāvas aprēķina formulu [20]:

$$\dot{I}_{SL} = \hat{S}_{SL} / \sqrt{3} \hat{U}_{SL}, \quad (4.20.)$$

kur \dot{I}_{SL} – slodzes fāzes strāva, A;

\hat{S}_{SL} – kompleksi saistītā slodzes trīsfāžu pilnā jauda, VA;

\hat{U}_{SL} – kompleksi saistītais slodzes kopņu līnijas jeb F–F spriegums, V.

Attiecīgi slodzes režīma parametru aprēķinos mezglu spriegumus parasti nosaka kā līnijas jeb F–F spriegumus, un, tā kā ģeneratorus aizvieto ar strāvas avotiem, tad šajā režīmā parasti vektors E satur vienīgi vērtības 0 V. Vēl viena atšķirība ir tajā, ka par bāzes mezglu parasti pieņem reālā tīkla balansējošā elementa (visbiežāk lielas energosistēmas vai spēkstacijas) pieslēguma kopnes. Attiecīgi bāzes mezgla spriegums ir nominālais vai vidējais nominālais, nevis 0 V, un tā leņķi aprēķina fāzei A parasti pieņem 0° . Vienlaikus jāatzīmē, ka, rīkojoties ar F–F spriegumiem slodzes režīma parametru aprēķinos, kas domāti A fāzes spriegumu un strāvu noteikšanai, paredzot, ka bojājuma režīmu parametru aprēķinos balansējošās sistēmas A fāzes EDS leņķim jābūt 0° , korektāk būtu pieņemt bāzes sprieguma leņķi 30° , jo simetriska zvaigznes slēguma gadījumā $\dot{U}_{AB} = \sqrt{3} \dot{U}_A e^{j30^\circ}$ [82]. Līdz ar to pēc mezglu faktisko F–F spriegumu noteikšanas fāžu spriegumu aprēķinam būtu jāveic šo F–F spriegumu rezultātu pretēja vektoru rotācija (par -30°), tādēļ, lai vienkāršotu aprēķinu gaitu, tradicionāli uzreiz mēdz pieņemt balansējošās kopnes sprieguma leņķi ar 0° un, veicot pārrēķinu uz F–Z spriegumu vērtībām, ņem vērā vienīgi F–F un F–Z spriegumu moduļu atšķirību. Ņemot vērā iepriekš aprakstīto, slodzes režīmam (4.11.) iespējams pārrakstīt formā [83]:

$$YU = I + Y_B U_B = \hat{S}/\sqrt{3}\hat{U} + Y_B U_B = \hat{D}_S \hat{U}^{-1} + Y_B U_B, \quad (4.21.)$$

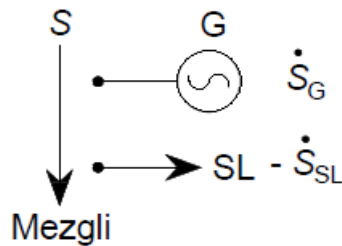
kur \hat{U}^{-1} – inverso, kompleksi saistīto mezglu spriegumu vērtību vektors;

$$\hat{U}^{-1} = 1/\hat{U}_i, i = 1, \dots, n, V;$$

\hat{D}_S – diagonāla kompleksi saistītu jaudu matrica, $\hat{D}_{Sij} = \hat{S}_i/\sqrt{3}, i = j;$

$$\hat{D}_{Sij} = 0(i \neq j), i, j = 1, \dots, n.$$

Kompleksi saistīto jaudu matricas \hat{D}_S noteikšanai ir jāizveido mezglu jaudu vektors S , kuru numurē identiski mezgliem, un tajā pieņem pozitīvu jaudas vērtību, ja mezglam pieslēgts avots, un negatīvu, ja mezglam pieslēgta slodze (4.8. att.), vai vērtību 0 VA, ja mezglam nav pieslēgts ne avots, ne slodze.



4.8. att. Mezglu jaudu vektora S sastādīšanas princips.

Izmantojot Zeideļa metodi vienādojumu sistēmai (4.21.), iegūstama skaitliska mezglu spriegumu aprēķina formula [83]:

$$U_i^{k+1} = \sum_{j=1}^{i-1} C_{ij} U_j^{k+1} + \sum_{m=i+1}^n C_{im} U_m^k + [\hat{D}_{Sii} \hat{U}_i^{-1k} + Y_{Bi} U_B] / Y_{ii}, i = 1, \dots, n. \quad (4.22.)$$

Vienādojuma (4.22.) aprēķina īstenošanu atkārti, līdz sasniegta vēlāmā aprēķina precizitāte $\varepsilon \leq \max_i (|U_i^{k+1} - U_i^k|)$. Jāatzīst, ka Zeideļa metodei pie ievērojamas tīkla noslodzes vai režīmam, kas tuvs statistiskās stabilitātes zaudēšanai, iespējamas skaitliskā aprēķina konverģences problēmas. Šādās situācijās iespējams izmēģināt citas LVS risināšanas metodes, piemēram, izmantojot inversās matricas metodi (reizinājums ar Y^{-1}), iegūstot:

$$U = Y^{-1} \text{diag}(\hat{S}/\sqrt{3}) \hat{U}^{-1} + U_B. \quad (4.23.)$$

Vienādojumu sistēmas (4.23.) skaitliskais risinājums iespējams, arī izmantojot šādu formulu:

$$U_i^{k+1} = \sum_{j=1}^{i-1} (Y_{ij}^{-1} \hat{S}_j / (\sqrt{3} \hat{U}_j^{k+1})) + \sum_{m=i}^n (Y_{im}^{-1} \hat{S}_m / \sqrt{3} \hat{U}_m^k) + U_B, \quad (4.24.)$$

kur $i = 1, \dots, n$.

Arī slodzes režīma parametru skaitlisko aprēķinu var īstenot *MATLAB*© vidē kā ārēju funkciju, kurai ieejā dod pirmās incidences matricu M , zaru pretestību vektoru ZZ , mezglu jaudu vektoru S , bāzes mezgla spriegumu Ub un precizitātes kritērija robežas vērtību EPS :

```
function U = ZeidelSL(M, ZZ, S, Ub, EPS)
MS=size(M, 1); %Mezglu skaits
ZS=size(M, 2); %Zaru skaits
```

```

U=ones (MS,1) *Ub; %Pirmaja tuvinajuma pienemam mezglos nominalos
spriegumus
Sc=conj (S)/sqrt (3); %Kompleksi saistita mezglu jauda
%Pretestibu matricas sastadisana
Z=diag (ZZ);
%Pretestibu matricas vienkarsota inversija
Z1=Z;
for i=1:ZS
    Z1 (i,i)=1/Z (i,i);
end
%Mezglu vaditspeju matricas Y iegusana
Mt=M';
Y=M*Z1*Mt;
%Y inversija ar Zordana metodi
Y1=Y;
IK=ones (MS);
KJ=ones (MS);
for k=1:MS
    VE=1/Y1 (k,k);
    for i=1:MS
        IK (i)=Y1 (i,k);
        KJ (i)=-Y1 (k,i);
    end
    for i=1:MS
        for j=1:MS
            Y1 (i,j)=Y1 (i,j)+IK (i)*KJ (j)*VE;
        end
    end
    for i=1:MS
        Y1 (i,k)=IK (i)*VE;
        Y1 (k,i)=KJ (i)*VE;
    end
    Y1 (k,k)=VE;
end
E=inf; %Si briza precizitates kriterija vertiba, kas lielaka par
EPS
N=1; %Tuvinajumu solu skaits
%Zeidela metodes nezinamo mezglu spriegumu aprekinu galvenais
cikls
while E>EPS
    E=0;
    for i=1:MS
        U1=Ub;
        for j=1:i-1
            U1=U1+Y1 (i,j) *Sc (j) /conj (U (j));
        end
        for m=i:MS
            U1=U1+Y1 (i,m) *Sc (m) /conj (U (m));
        end
        T=abs (U1-U (i));
        if T>E

```

```

        E=T;
    end
    U(i)=U1;
end
N=N+1;
if N>1e4 %Lietotāja izraudzīta maksimāla pieļaujamo solu
skaits pārbaude
    disp 'Sasniegts maksimālais atļautais tuvinājumu solu
skaits 10000'
    break
end
end
end
end

```

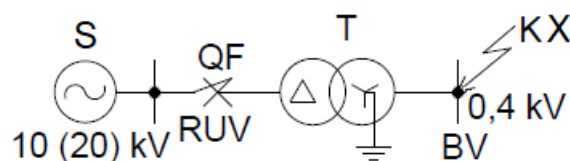
Parādītie skaitliskie bojājumu un slodzes jeb pirmsavārijas režīmu parametru aprēķini ir izteikti noderīgi, ja tie kalpo par pamatu optimizācijai (parasti mērķa funkcijas noteikšanai) vai citiem analīzes algoritmiem, kas pieprasa automātiski atkārtot lielu skaitu ar režīmu parametru aprēķiniem (piemēram, [76], [83], [84]). Atsevišķus slodzes režīma parametru aprēķinus izmanto arī elektroapgādes kvalitātes novērtēšanai dažādos elektrisko sistēmu režīmos (piemēram, analizējot vadāmas slodzes ietekmi [85]). Pat Zeideļa metodes konverģenci slodzes režīma parametru aprēķina gaitā var izmantot, lai tuvināti novērtētu elektriskās sistēmas režīma iespējamību un attiecīgi arī statisko stabilitāti [86].

5. STRĀVU UN SPRIEGUMU SIMETRISKO KOMPOENŠU TRANSFORMĀCIJA BOJĀJUMIEM AIZ TRANSFORMATORA

Pirms dažādu uz SKM balstītu nesimetrisku tīkla režīmu modelēšanas paņēmieniun aprakstiem noteikti ir jāaplūko arī spēka transformatoru ar kompleksu transformācijas koeficientu (notiek ne tikai spriegumu un strāvu amplitūdu izmaiņas, bet arī to leņķa izmaiņas) ietekme uz releja uzstādīšanas vietā (turpmāk tekstā – RUV) novērojamo spriegumu un strāvu simetrisko komponentu vērtībām. Ja starp BV vai nesimetrijas vietu un RUV atrodas šāds transformators, tad minētās simetrisko komponentu un atbilstoši arī fāžu lielumu atšķirības ir būtiskas, kā tas tiks parādīts turpinājumā.

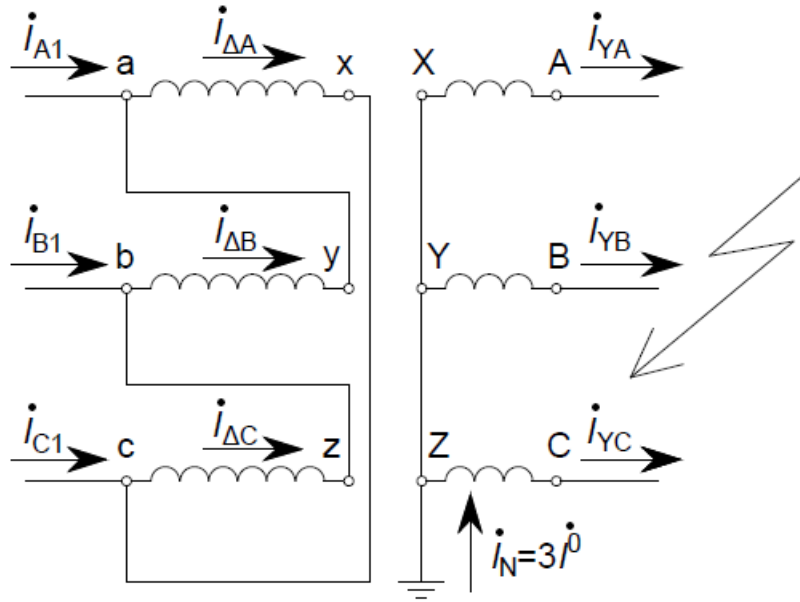
Komplekss transformācijas koeficients ir transformatoriem, kuru slēguma grupa atšķiras no 0. un 12. grupas jeb kuru slēguma grupa ir robežās no 1. līdz 11. grupai ieskaitot. Slēguma shēmu ar grupu parāda, sākot ar tinumu slēgumu shēmām, pēc kurām seko slēguma grupu numuri (piemēram, $Y_0/\Delta/\Delta-11-11$) attiecībā pret pirmo tinumu, ko izmanto kā bāzes tinumu (parasti AS tinums, bet praksē par bāzes tinumu mēdz izvēlēties arī citus tinumus). Slēguma shēmas un grupas ietekmi visuzskatāmāk iespējams paskaidrot, izmantojot vektora analogiju ar pulksteņa rādītāja stāvokli. Simetriska tīkla režīma gadījumā, pieņemot, ka transformatora slēguma shēmas pirmā tinuma kopņu A fāzes sprieguma vektors ir virzīts kompleksajā plaknē uz pulksten 12.00, t. i., sakrīt ar imagināro asi, A fāzes spriegums uz otrā un trešā tinuma kopnēm būs virzīts uz pulksteņa stundas pozīciju, kas norādīta konkrētā tinuma grupā [10], [87] ($Y_0/\Delta/\Delta-11-11$ gadījumā, Y_0 A fāzes spriegumam esot virzienā uz pulksten 12.00, abu Δ tinumu pusē tas būtu virzīts uz pulksten 11.00).

Ilustratīvam piemēram sīkāk aplūkosim, kā mainīsies RUV nomērāmās simetrisko komponentu vērtības izolētas neitrāles VS tīkla pusē, ja rodas nesimetrisks īsslēgums uz zemi aiz sadales transformatora 10 (20) / 0,4 kV ar slēguma shēmu un grupu $Y_0/\Delta-11$ (5.1. att.).



5.1. att. Īsslēgums aiz transformatora ar slēguma shēmu un grupu $Y_0/\Delta-11$.

Kā saprotams no 5.1. attēla, īsslēguma strāva plūdis no VS sadales tīkla apvienotās sistēmas S puses caur transformatoru T. Šeit, līdzīgi kā piemērā iepriekš, simetriska režīma gadījumā A fāzes spriegumu Y tinuma pusē \dot{U}_{YA} pieņemot virzītu kompleksajā plaknē uz pulksten 12.00, A fāzes spriegums T Δ tinuma pusē $\dot{U}_{\Delta A}$ kompleksajā plaknē būtu virzīts uz pulksten 11.00 jeb apsteigtu \dot{U}_{YA} par 30° . Iespējams ievērot, ka atbilstoši slēguma shēmai un grupai par atskaites tinumu izmantots Y tinums, neskatoties uz to, ka tas ir ZS tinums. Šajā piemērā ar nesimetrisko īsslēgumu uz zemi KX noteiksim spriegumu un strāvu simetrisko komponentu vērtības RUV jeb transformatora T AS, t. i., 10 (20) kV, tinuma pusē. Turpmākai analīzei ir lietderīgi parādīt arī detalizētāku transformatora savienojumu shēmu ar tajā plūstošajām fāžu strāvām (5.2. att.).



5.2. att. Transformatora ar slēguma shēmu un grupu $Y_0/\Delta-11$ un nesimetrisku īsslēgumu uz zemi zvaigznes tinuma pusē analīzes shēma [14].

Pieņemot, ka zvaigznes un trīsstūra slēguma tinumiem katrā fāzē ir w_Y un w_Δ vijumi, T transformācijas koeficienta modulis aprēķināms šādi [14], [17]:

$$k_T = U_{AB}/U_{ab} = \sqrt{3}w_Y/w_\Delta, \quad (5.1.)$$

kur U_{AB} , U_{ab} – spriegums starp zvaigznes un trīsstūra slēgumā esošo tinumu A un B fāzes izvadiem, V;

w_Y , w_Δ – zvaigznes un trīsstūra slēgumā savienoto fāzes tinumu vijumu skaits.

Izmantojot transformācijas koeficienta moduli, iespējams izteikt trīsstūrī saslēgtā tinuma puses izvadu fāzes strāvas [2], [14]:

$$I_{A1} = I_{\Delta A} - I_{\Delta B} = w_Y(I_{YA} - I_{YB})/w_\Delta = k_T(I_{YA} - I_{YB})/\sqrt{3}, \quad (5.2.)$$

$$I_{B1} = I_{\Delta B} - I_{\Delta C} = w_Y(I_{YB} - I_{YC})/w_\Delta = k_T(I_{YB} - I_{YC})/\sqrt{3}, \quad (5.3.)$$

$$I_{C1} = I_{\Delta C} - I_{\Delta A} = w_Y(I_{YC} - I_{YA})/w_\Delta = k_T(I_{YC} - I_{YA})/\sqrt{3}, \quad (5.4.)$$

kur $I_{\Delta A}$, $I_{\Delta B}$, $I_{\Delta C}$ – trīsstūra slēgumā esošā tinuma A, B un C fāzes strāva, A;

I_{YA} , I_{YB} , I_{YC} – zvaigznes slēgumā savienotā tinuma A, B un C fāzes strāva, A;

I_{A1} , I_{B1} , I_{C1} – aiz trīsstūrī saslēgtā tinuma izvadiem plūstošā A, B un C fāzes strāva, A.

Analoģiski var iegūt arī formulas trīsstūrī savienotā tinuma puses spriegumiem [14]:

$$\dot{U}_{\Delta A} = (\dot{U}_{YA} - \dot{U}_{YB})/\sqrt{3}k_T, \quad (5.5.)$$

$$\dot{U}_{\Delta B} = (\dot{U}_{YB} - \dot{U}_{YC})/\sqrt{3}k_T, \quad (5.6.)$$

$$\dot{U}_{\Delta C} = (\dot{U}_{YC} - \dot{U}_{YA})/\sqrt{3}k_T, \quad (5.7.)$$

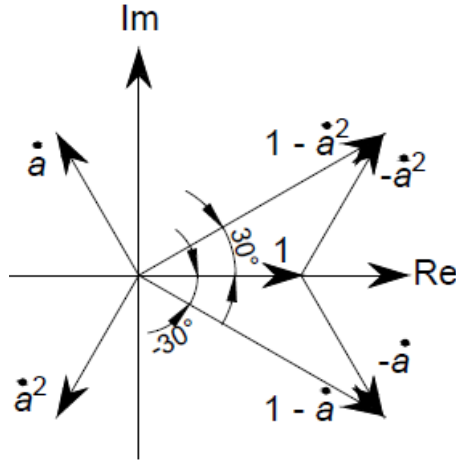
kur $\dot{U}_{\Delta A}$, $\dot{U}_{\Delta B}$, $\dot{U}_{\Delta C}$ – trīsstūra slēgumā esošā tinuma izvadu F–Z spriegums, V;

\dot{U}_{YA} , \dot{U}_{YB} , \dot{U}_{YC} – zvaigznes slēgumā savienotā tinuma izvadu F–Z spriegums, V.

Izsakot A fāzes strāvu trīsstūrī saslēgtā tinuma izvados no (5.2.) ar zvaigznes puses strāvas simetriskajām komponentēm, izmantojot vienādojumus (1.4.)–(1.6), iegūst [14]:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A1} &= k_T \left((\dot{I}_{YA}^1 + \dot{I}_{YA}^2 + \dot{I}_{YA}^0) - (\dot{a}^2 \dot{I}_{YA}^1 + \dot{a} \dot{I}_{YA}^2 + \dot{I}_{YA}^0) \right) / \sqrt{3} = \\ &= k_T \left((1 - \dot{a}^2) \dot{I}_{YA}^1 (1 - \dot{a}) \dot{I}_{YA}^2 \right) / \sqrt{3}. \end{aligned} \quad (5.8.)$$

Komplekso reizinātāju $1 - \dot{a}^2$ un $1 - \dot{a}$ vērtību noteikšanai iespējams izmantot 5.3. attēlā parādīto vektoru diagrammu.



5.3. att. Komplekso reizinātāju $1 - \dot{a}^2$ un $1 - \dot{a}$ vērtību noteikšana.

Balstoties uz 5.3. attēlā redzamo diagrammu, iespējams izteikt minētos reizinātājus kā $1 - \dot{a}^2 = \sqrt{3}e^{j30^\circ}$ un $1 - \dot{a} = \sqrt{3}e^{-j30^\circ}$. Ievietojot pārveidotos reizinātājus (5.8.), iegūst [14]:

$$\dot{I}_{A1} = k_T (\dot{I}_{YA}^1 e^{j30^\circ} + \dot{I}_{YA}^2 e^{-j30^\circ}). \quad (5.9.)$$

Analoģiski iespējams izteikt A fāzes spriegumu uz trīsstūrī saslēgtā tinuma izvadiem [14]:

$$\dot{U}_{\Delta A} = (\dot{U}_{YA}^1 e^{j30^\circ} + \dot{U}_{YA}^2 e^{-j30^\circ}) / k_T. \quad (5.10.)$$

No parādītās analīzes var secināt, ka spriegumi uz trīsstūrī saslēgtā tinuma izvadiem un aiz šī tinuma plūstošās strāvas nesatur NS komponentes, neskatoties uz to, ka ZS tinuma pusē noticis nesimetrisks īsslēgums uz zemi, kas atbilst 2.3. apakšnodaļā aprakstītajam. Ievērojot šo secinājumu, iespējams parādīt trīsstūrī saslēgtā tinuma izvadu A fāzes strāvu un spriegumu kā to TS un PS komponentu summu [14]:

$$\dot{I}_{A1} = \dot{I}_{A1}^1 + \dot{I}_{A1}^2 = k_T (\dot{I}_{YA}^1 e^{j30^\circ} + \dot{I}_{YA}^2 e^{-j30^\circ}), \quad (5.11.)$$

$$\dot{U}_{\Delta A} = \dot{U}_{\Delta A}^1 + \dot{U}_{\Delta A}^2 = (\dot{U}_{YA}^1 e^{j30^\circ} + \dot{U}_{YA}^2 e^{-j30^\circ}) / k_T. \quad (5.12.)$$

No vienādojumiem (5.11.) un (5.12.) redzams, ka pāreja no transformatora T ar slēguma shēmu un grupu Y_0/Δ –11 zvaigznes slēgumā esošā tinuma puses uz trīsstūrī saslēgtā tinuma pusi izraisītu aprēķina fāzes sprieguma un strāvas TS komponentu vektoru nobīdi par 30° un PS komponentu vektoru nobīdi par -30° :

$$\begin{cases} \dot{I}_{A1}^1 = k_T \dot{I}_{YA}^1 e^{j30^\circ}, \\ \dot{U}_{\Delta A}^1 = \dot{U}_{YA}^1 e^{j30^\circ} / k_T, \end{cases} \quad (5.13.)$$

$$\begin{cases} i_{A1}^2 = k_T i_{YA}^2 e^{-j30^\circ} \\ \dot{U}_{\Delta A}^2 = \dot{U}_{YA}^2 e^{-j30^\circ} / k_T \end{cases} \quad (5.14.)$$

Vispārinot parādīto analīzi transformatoram ar slēguma shēmām $W1$, $W2$ un grupu N ($W1/W2-N$), kuram, pārrēķinot $W1$ slēgumā esošā tinuma puses parametrus uz $W2$ slēgumā savienotā tinuma puses vērtībām, $W1$ saslēgtā tinuma puses fāžu un strāvu TS komponentu vektoriem jāveic papildu pagrieziens pulksteņa rādītāja virzienā par $N \cdot 30^\circ$. PS komponentu vektoriem jāveic papildu pagrieziens pretēji pulksteņa rādītāja virzienam par $N \cdot 30^\circ$. Savukārt NS komponentu vektoriem, ja NS strāvas noslēgšanās ceļš netiek pārtraukts gan tinumā ar slēgumu $W1$, gan $W2$ saslēgtajā tinumā, pagriezienus neveic [50], [87]:

$$\begin{cases} i_{W2A}^1 = k_T i_{W1A}^1 e^{-jN30^\circ} \\ i_{W2A}^2 = k_T i_{W1A}^2 e^{jN30^\circ} \\ i_{W2A}^0 = k_T i_{W1A}^0 \end{cases} \quad (5.15.)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{W2A}^1 = \dot{U}_{W1A}^1 e^{-jN30^\circ} / k_T \\ \dot{U}_{W2A}^2 = \dot{U}_{W1A}^2 e^{jN30^\circ} / k_T \\ \dot{U}_{W2A}^0 = \dot{U}_{W1A}^0 / k_T \end{cases} \quad (5.16.)$$

kur \dot{U}_{W2A}^1 , \dot{U}_{W2A}^2 , \dot{U}_{W2A}^0 – A fāzes sprieguma TS, PS un NS komponentes vērtība $W2$ saslēgtā tinuma pusē, V;

\dot{U}_{W1A}^1 , \dot{U}_{W1A}^2 , \dot{U}_{W1A}^0 – A fāzes sprieguma TS, PS un NS komponentes vērtība $W1$ slēgumā savienotā tinuma pusē, V;

i_{W2A}^1 , i_{W2A}^2 , i_{W2A}^0 – A fāzes strāvas TS, PS un NS komponentes vērtība $W2$ slēgumā esošā tinuma pusē, V;

i_{W1A}^1 , i_{W1A}^2 , i_{W1A}^0 – A fāzes strāvas TS, PS un NS komponentes vērtība $W1$ saslēgtā tinuma pusē, V;

k_T – transformācijas koeficients, izteikts kā $W1$ un $W2$ slēgumos esošo tinumu līnijas (F–F) spriegumu attiecība.

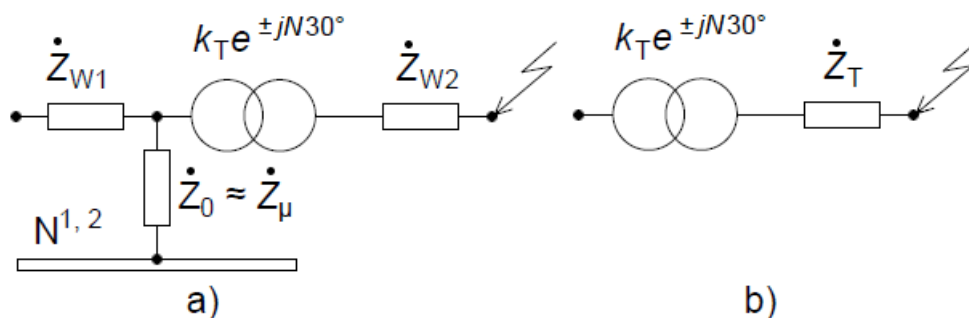
Pārrēķinot parametru vērtības no $W2$ slēgumā savienotā tinuma puses uz $W1$ saslēgtā tinuma pusi, saprotams, ka fāžu spriegumu un strāvu TS un PS komponentēm jāveic pretēji pagriezieni iepriekš parādītajiem, bet NS komponentei, ja NS strāvas var plūst abās transformatora pusēs, joprojām pagriezieni nav jāveic:

$$\begin{cases} i_{W1A}^1 = k_T i_{W2A}^1 e^{jN30^\circ} \\ i_{W1A}^2 = k_T i_{W2A}^2 e^{-jN30^\circ} \\ i_{W1A}^0 = k_T i_{W2A}^0 \end{cases} \quad (5.17.)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{W1A}^1 = \dot{U}_{W2A}^1 e^{jN30^\circ} / k_T \\ \dot{U}_{W1A}^2 = \dot{U}_{W2A}^2 e^{-jN30^\circ} / k_T \\ \dot{U}_{W1A}^0 = \dot{U}_{W2A}^0 / k_T \end{cases} \quad (5.18.)$$

Jāatceras, ka arī simetriskas slodzes režīmā, kurā praktiski novērojamas vienīgi strāvu un spriegumu TS komponentes, arī jāņem vērā transformatora slēguma grupa, jo 4. nodaļā parādītais slodzes un bojājumu režīmu parametru aprēķins nosaka mezglu spriegumus un strāvas kā reducētas pie aprēķina sprieguma pakāpes, ignorējot

transformatoru slēguma grupas. Attiecīgi, veicot režīma parametru aprēķinus bojājumam sistēmas punktā, starp kuru un sistēmas EDS avotiem ir transformatori ar kompleksu transformācijas koeficientu, arī pirms aprēķina jāveic atbilstošo EDS vektoru pagriezieni [6]. Iespējamās arī situācijas, kurās jāveic vēl viens pārrēķins ar šādiem vektoru pagriezieniem, pārejot no mērmaiņu primārās puses uz relejam pieejamajām simetrisko komponentu vērtībām sekundārajā pusē. Iepriekš parādītā analīze atbilst gadījumam, kurā tīkla režīma parametri jau iepriekš ir aprēķināti abās transformatora pusēs pie vienas no sprieguma pakāpēm. Papildu uzmanība jāpievērš gadījumos, kuros zināmas režīma parametru vērtības tikai vienai no transformatora pusēm (piemēram, BV). Tādās situācijās vienlaikus ar sprieguma un strāvas simetrisko komponentu amplitūdu transformāciju, ja nav vairs paredzēts izmantot aprēķina spriegumu, un pagriezieniem jāievēro arī sprieguma kritumi transformatora tinumu pretestībās. Veicot šādu pāreju, transformatora vai tā tinumu pretestības nosacīti izdala atsevišķi, tādā veidā nodalot sprieguma kritumus pretestībās, bet spriegumu un strāvu pagriezienus ar moduļu transformāciju vai bez tās veic idejiski izdalīts ideāls transformators. 5.4. (a) attēlā parādīta precīza tinumu un magnetizācijas zara pretestību ievērošanas shēma (tukšgaitas pretestību ieslēdz barošanas avota pusē, kas attēlā ir pieņemta kā primārā tinuma puse), bet tuvinātos aprēķinos pieļaujams ievērot vienīgi sprieguma kritumu kopējā transformatora pretestībā pirms amplitūdu transformācijas un pagriezienu veikšanas (5.4. (b) att.).



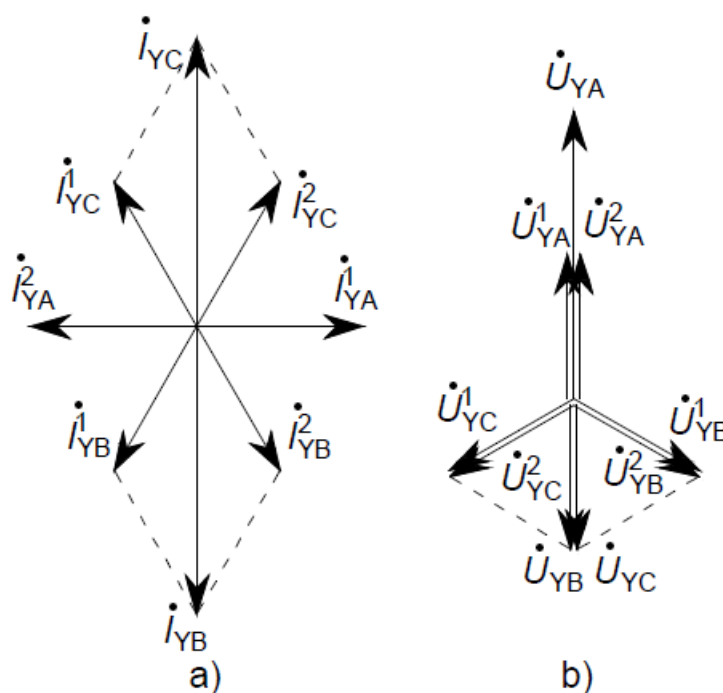
5.4. att. Precīza transformatora tinumu un magnetizācijas zara pretestību ievērošana (a) un vienkāršota transformatora pretestības ievērošana (b), veicot režīma parametru pārrēķinu no BV sekundārā tinuma puses uz primārā tinuma pusi.

Tipveidā lietotās divtinumu transformatoru slēgumu shēmas (neitrāles izvads nav norādīts) ar slēgumu grupām atbilstoši Starptautiskās elektrotehniskās komisijas (turpmāk tekstā – IEC, angļu val. *International Electrotechnical Commission*) standartam IEC 60076 (pirmajai versijai) apkopotas 5.1. tabulā.

Tipveida divtinumu transformatoru slēgumu shēmas ar slēgumu grupām [87]

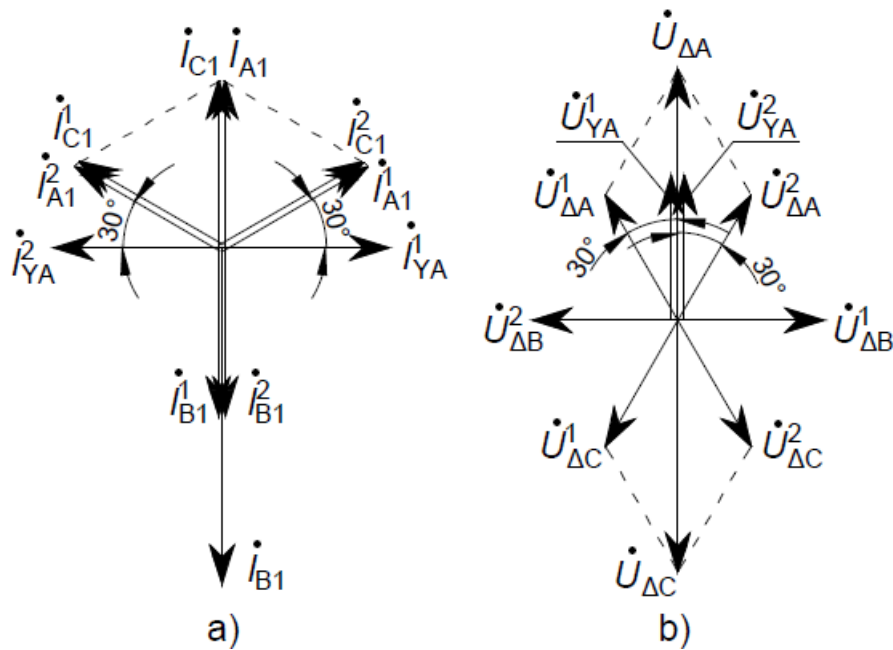
Slēguma grupa	Izmantotās slēgumu shēmas		
	Primārais tinums saslēgts Y	Primārais tinums saslēgts Δ	Sekundārais tinums saslēgts cikcakslēgumā
0	Y/Y-0	Δ/Δ -0	Δ/Z -0
1	Y/ Δ -1	Δ/Y -1	Y/Z-1
5	Y/ Δ -5	Δ/Y -5	Y/Z-5
6	Y/Y-6	Δ/Δ -6	Δ/Z -6
11	Y/ Δ -11	Δ/Y -11	Y/Z-11

Vienādojumu (5.15.) un (5.16.) ietekmes nozīmīguma ilustrācijai aplūkots gadījums, kurā 5.1. un 5.2. attēla shēmās parādītais īsslēgums ir metālisks divfāžu īsslēgums starp fāzēm B un C. Šādam īsslēgumam no teorijas zināmās fāžu strāvu, spriegumu un to simetrisko komponentu vektoru diagrammas zvaigznes slēgumā savienotā tinuma pusē parādītas 5.5. attēlā.



5.5. att. Fāžu strāvu, to simetrisko komponentu (a) un fāžu spriegumu, to simetrisko komponentu (b) vektoru diagrammas transformatora zvaigznes slēgumā esošā tinuma pusē, rodoties fāžu B un C metāliskam īsslēgumam aiz šī tinuma [14].

Tālāk iespējams konstruēt vektoru diagrammas RUV jeb transformatora trīsstūra slēguma tinuma pusē (5.6. att.). Uzskatāmībai pagaidām pieņemsim, ka abās transformatora pusēs parametri reducēti uz vienu sprieguma līmeni (vektoru garumi nemainās, un tiks parādīta vienīgi leņķa nobīdes ietekme).



5.6. att. Fāžu strāvu, to simetrisko komponentu (a) un fāžu spriegumu, to simetrisko komponentu (b) vektoru diagrammas transformatora trīsstūrī saslēgtā tinuma izvados, rodoties fāžu B un C metāliskam īsslēgumam transformatora zvaigznes slēgumā savienotā tinuma pusē.

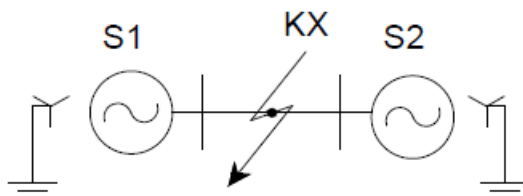
Salīdzinot 5.5. un 5.6. attēlā dotās vektoru diagrammas, redzams, ka RUV nomērītie fāžu spriegumi, strāvas un to simetriskās komponentes ir ievērojami mainījušās. Saprotams, ka bez rūpīgas analīzes, balstoties tikai uz mērījumiem RUV, būtu iespējams sajaukt īsslēgumu fāzēs B un C ar B fāzes īsslēgumu uz zemi, kas būtu pilnīgi aplami. Tādēļ bojājumu aiz transformatora ar kompleksu transformācijas koeficientu analīzei jāpievērš papildu uzmanība.

6. ELEKTRISKĀS SISTĒMAS REŽĪMA PARAMETRU APRĒĶINI VIENAS ŠĶĒRSNESIMETRIJAS RAŠANĀS GADĪJUMOS

6.1. Vienas šķērsnesimetrijas režīmu analīze un parametru aprēķinu metodika

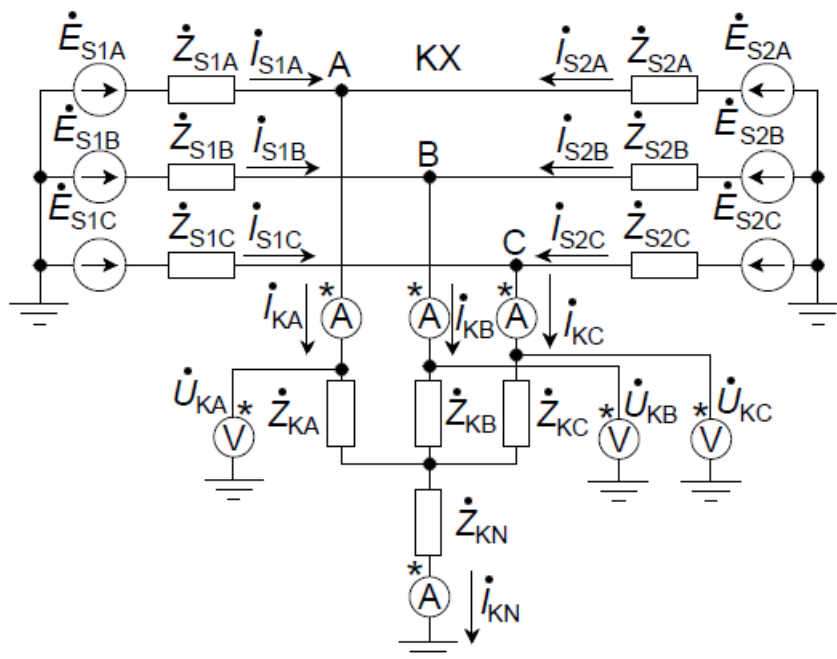
6.1.1. Vispārīgas šķērsnesimetrijas gadījums

Trīsfāžu elektriskās sistēmas šķērsnesimetriju, nesimetrijas vai BV (tradicionāli uzrādītu ar īsslēgumiem izmantoto apzīmējuma burtu K), vispārīgas nesimetrijas rašanās gadījumā iespējams parādīt, kā punktā K pret zemi ieslēgtas atšķirīgas fāžu pārejas pretestības \dot{Z}_{KA} , \dot{Z}_{KB} , \dot{Z}_{KC} ($\dot{Z}_{KA} \neq \dot{Z}_{KB} \neq \dot{Z}_{KC}$) un pretestību saitei uz zemi jeb neitrāles pārejas pretestību \dot{Z}_{KN} . Vispārīgā gadījumā nesimetrijas punktam barošana iespējama no abām pusēm, tādēļ šķērsnesimetrijas analīzei pieņemsim, ka tā radusies starp divām energosistēmām S1 un S2 ar cieši zemētām neitrālēm (6.1. att.), lai analīzes gaitā varētu parādīt arī NS komponentes.



6.1. att. Vienlīnijas shēma, vispārīgai šķērsnesimetrijai rodas starp sistēmām S1 un S2.

Šādam scenārijam trīsfāžu analīzes shēma fāžu koordinātās parādīta 6.2. attēlā.



6.2. att. Vispārīgas šķērsnesimetrijas starp sistēmām S1 un S2 analīzes shēma fāžu koordinātās.

Īsslēgumu pārejas pretestību starpfāžu bojājumiem visbiežāk nosaka elektriskā loka pretestība. Īsslēgumiem uz zemi kopējo pārejas pretestību veido loka pretestība un zemējuma pretestība (piemēram, EPL bojājumiem balsta konstrukcijas un zemējuma kontūra pretestība) [6], [58]. Elektriskā loka spriegumu pamatā nosaka tā galvenais kanāls, un sprieguma kritumus loka sākuma un beigu punktā parasti ignorē [88]. Eksperimentālu pētījumu ceļā noskaidrots, ka īsslēguma primārā elektriskā loka (ar strāvas stiprumu vairāki simti ampēri un vairāk), kas pastāv līdz jaudas slēdžu atslēgšanai, pretestībai ir aktīvs raksturs. Zināms arī, ka loka sprieguma gradients ir praktiski nemainīgs ($U_{10} = 1500 \text{ V/m}$) AC cikla laikā un praktiski neatkarīgs no loka strāvas stipruma, izņemot laika posmu, kad loka strāvas stiprums ir mazāks par 27 % no amplitūdas vērtības. Attiecīgi nosakot ekvivalento loka pretestību, stacionāro īsslēgumu režīmu parametru aprēķiniem parasti pieņem, ka sprieguma gradients ir nemainīgs visa cikla laikā [6], [58], [88]. Viegli saprast, ka loka ekvivalento pretestību šajā gadījumā nosaka loka garums, kas ļauj noteikt kopējo spriegumu jeb sprieguma kritumu uz loka galvenā kanāla, un loka strāva [6], [58]:

$$R_1 = U_{10}l_1/I_{1 \max} = 1500l_1/I_{1 \max} \approx 1050l_1/I_1 \quad (6.1.)$$

kur R_1 – loka ekvivalentā aktīvā pretestība, Ω ;

U_{10} – loka galvenā kanāla sprieguma gradients, V/m;

l_1 – loka galvenā kanāla garums, m;

$I_{1 \max}$ – loka strāvas stipruma amplitūda, A;

I_1 – loka strāvas stipruma efektīvā vērtība, ņemot vērā, ka primārā loka strāva forma saglabājas tuva sinusoīdai, A.

Loka strāvas stipruma efektīvās vērtības vai amplitūdas noteikšanai pieļaujams veikt identisku metāliska īsslēguma aprēķinu [88], bet vajadzības gadījumā iespējams veikt pakāpenisku loka strāvas stipruma un ekvivalentās pretestības pārrēķinu, līdz izmaiņas to vērtībās kļūst nenozīmīgas.

Elektriskā loka garumu starpfāžu īsslēgumiem nosaka attālums starp fāzēm punktā, kurā notikusi izolācijas caursite. Savukārt īsslēgumiem uz zemi (bieži loka rašanās starp vietu, kur vadītājs pievienots izolatoram, un tuvāko sazemēto balsta daļu) iespējams pieņemt, ka loka garums ir vienāds ar 120 % no fāzes izolatora garuma. Vismaz EPL šādu loka garumu iespējams izmantot aptuveni īsslēguma pirmajiem 4–5 periodiem, kad vēja, gaisa konvekcijas un elektromagnētisko spēku ietekmē loks var strauji izstiepties, palielinot tā garumu. GL ar tērauda vai dzelzsbetona balstiem to balstu un zemējumu kopējā pretestība, visticamāk, nepārsniedz 10–20 Ω un līnijām ar bieži zemētām zibensaizsardzības trosēm 3–5 Ω [6], [58].

Ja EPL iegāzies koks, tad jārēķinās, ka atkarībā no koka sugas un stāvokļa koka izdegšanas laikā ekvivalentā pārejas pretestība uz zemi var būt ievērojami palielināta [79], un pēc koka izdegšanas un pilnīgas caursites stabilā loka garumu var pieņemt aptuveni vienādu attālumu starp punktu, kur koka stumbrs pieskaras līnijas fāzei, un punktu, kur tas saskaras vai savienojas ar zemi. Turklāt jārēķinās, ka šādiem bojājumiem kopējā pārejas pretestība var sasniegt simtiem omu.

Neskatoties uz to, ka īsslēgumiem pārejas pretestības raksturs ir aktīvs, tālākam izvedumam joprojām tiks izmantotas vispārīgās pilnās pārejas pretestības \dot{Z}_{KA} , \dot{Z}_{KB} , \dot{Z}_{KC} , \dot{Z}_{KN} , jo

turpinājumā parādītās formulas ir lietojamas, arī analizējot scenārijus ar nesimetriskām slodzēm, kuras var patērēt arī reaktīvo jaudu.

Fāžu spriegumus nesimetrijas punktā K (6.2. att.) iespējams izteikt, izmantojot šķērsnesimetrijas fāžu strāvas \dot{I}_{KA} , \dot{I}_{KB} , \dot{I}_{KC} , tās saites ar zemi jeb neitrāles strāvu \dot{I}_{KN} un atbilstošās pārejas pretestības \dot{Z}_{KA} , \dot{Z}_{KB} , \dot{Z}_{KC} , \dot{Z}_{KN} [3]:

$$\begin{cases} \dot{U}_{KA} = \dot{I}_{KA}\dot{Z}_{KA} + \dot{I}_{KN}\dot{Z}_{KN}, \\ \dot{U}_{KB} = \dot{I}_{KB}\dot{Z}_{KB} + \dot{I}_{KN}\dot{Z}_{KN}, \\ \dot{U}_{KC} = \dot{I}_{KC}\dot{Z}_{KC} + \dot{I}_{KN}\dot{Z}_{KN}, \end{cases} \quad (6.2.)$$

kur \dot{U}_{KA} , \dot{U}_{KB} , \dot{U}_{KC} – fāžu spriegumi šķērsnesimetrijas vietā, V;

\dot{I}_{KA} , \dot{I}_{KB} , \dot{I}_{KC} – fāžu strāvas šķērsnesimetrijas vietā, A;

\dot{I}_{KN} – neitrāles jeb fāžu saites ar zemi strāva šķērsnesimetrijas vietā, A;

\dot{Z}_{KA} , \dot{Z}_{KB} , \dot{Z}_{KC} – fāžu pilnās pretestības šķērsnesimetrijas vietā, Ω ;

\dot{Z}_{KN} – neitrāles jeb fāžu saites ar zemi pilnā pretestība šķērsnesimetrijas vietā, Ω .

Pirmais Kirhoha likums dod iespēju izteikt šķērsnesimetrijas neitrāles strāvu kā tās fāžu strāvu summu. Fāžu strāvas aizstājot ar to simetriskajām komponentēm un ņemot vērā, ka $(1 + \dot{a}^2 + \dot{a}) = 0$, iegūst [8]:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{KN} &= \dot{I}_{KA} + \dot{I}_{KB} + \dot{I}_{KC} = \\ &= (1 + \dot{a}^2 + \dot{a})\dot{I}_{KA}^1 + (1 + \dot{a} + \dot{a}^2)\dot{I}_{KA}^2 + (1 + 1 + 1)\dot{I}_{KA}^0 = 3\dot{I}_{KA}^0 = 3\dot{i}^0, \end{aligned} \quad (6.3.)$$

kur \dot{I}_{KA}^1 , \dot{I}_{KA}^2 , \dot{I}_{KA}^0 – šķērsnesimetrijas vietā plūstošās A fāzes strāvas TS, PS un NS komponentes, A.

Izmantojot SKM, ievērojot, ka $\dot{a}^2 \cdot \dot{a} = 1$, $(1 + \dot{a}^2 + \dot{a}) = 0$ un $\dot{a}^2 \cdot \dot{a}^2 = \dot{a}$, un lietojot vienādojumu sistēmu (6.2.), iespējams izteikt šķērsnesimetrijas A fāzes sprieguma simetriskās komponentes no tās A fāzes strāvas simetriskajām komponentēm:

$$\begin{cases} \dot{U}_{KA}^1 = (1/3)(\dot{U}_{KA} + \dot{a}\dot{U}_{KB} + \dot{a}^2\dot{U}_{KC}) \\ \dot{U}_{KA}^2 = (1/3)(\dot{U}_{KA} + \dot{a}^2\dot{U}_{KB} + \dot{a}\dot{U}_{KC}) \Rightarrow \\ \dot{U}_{KA}^0 = (1/3)(\dot{U}_{KA} + \dot{U}_{KB} + \dot{U}_{KC}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{KA}^1 = (1/3)([\dot{I}_{KA}\dot{Z}_{KA} + \dot{I}_{KN}\dot{Z}_{KN}] + \dot{a}[\dot{I}_{KB}\dot{Z}_{KB} + \dot{I}_{KN}\dot{Z}_{KN}] + \dot{a}^2[\dot{I}_{KC}\dot{Z}_{KC} + \dot{I}_{KN}\dot{Z}_{KN}]) \\ \dot{U}_{KA}^2 = (1/3)([\dot{I}_{KA}\dot{Z}_{KA} + \dot{I}_{KN}\dot{Z}_{KN}] + \dot{a}^2[\dot{I}_{KB}\dot{Z}_{KB} + \dot{I}_{KN}\dot{Z}_{KN}] + \dot{a}[\dot{I}_{KC}\dot{Z}_{KC} + \dot{I}_{KN}\dot{Z}_{KN}]) \Rightarrow \\ \dot{U}_{KA}^0 = (1/3)([\dot{I}_{KA}\dot{Z}_{KA} + \dot{I}_{KN}\dot{Z}_{KN}] + [\dot{I}_{KB}\dot{Z}_{KB} + \dot{I}_{KN}\dot{Z}_{KN}] + [\dot{I}_{KC}\dot{Z}_{KC} + \dot{I}_{KN}\dot{Z}_{KN}]) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{KA}^1 = (1/3)(\dot{I}_{KA}\dot{Z}_{KA} + \dot{a}\dot{I}_{KB}\dot{Z}_{KB} + \dot{a}^2\dot{I}_{KC}\dot{Z}_{KC} + [1 + \dot{a} + \dot{a}^2]\dot{I}_{KN}\dot{Z}_{KN}) \\ \dot{U}_{KA}^2 = (1/3)(\dot{I}_{KA}\dot{Z}_{KA} + \dot{a}^2\dot{I}_{KB}\dot{Z}_{KB} + \dot{a}\dot{I}_{KC}\dot{Z}_{KC} + [1 + \dot{a} + \dot{a}^2]\dot{I}_{KN}\dot{Z}_{KN}) \Rightarrow \\ \dot{U}_{KA}^0 = (1/3)(\dot{I}_{KA}\dot{Z}_{KA} + \dot{I}_{KB}\dot{Z}_{KB} + \dot{I}_{KC}\dot{Z}_{KC} + 3\dot{I}_{KN}\dot{Z}_{KN}) \end{cases}$$

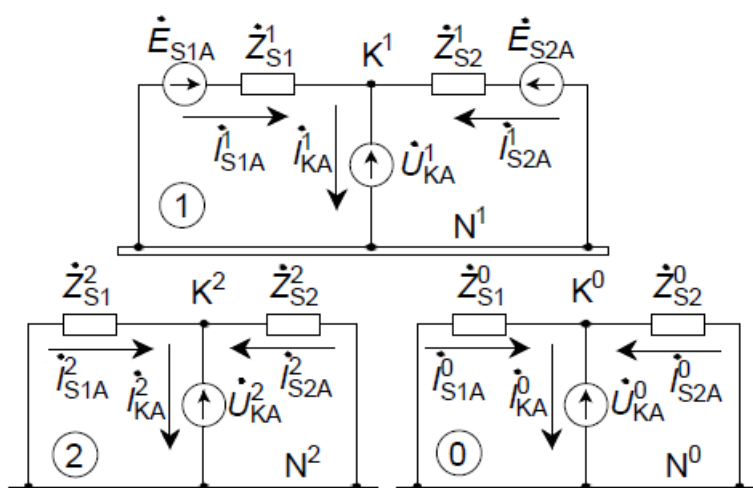
$$\begin{cases} \dot{U}_{KA}^1 = (1/3)([\dot{I}_{KA}^1 + \dot{I}_{KA}^2 + \dot{I}_{KA}^0]\dot{Z}_{KA} + \dot{a}[\dot{a}^2\dot{I}_{KA}^1 + \dot{a}\dot{I}_{KA}^2 + \dot{I}_{KA}^0]\dot{Z}_{KB} + \\ \dot{U}_{KA}^2 = (1/3)([\dot{I}_{KA}^1 + \dot{I}_{KA}^2 + \dot{I}_{KA}^0]\dot{Z}_{KA} + \dot{a}^2[\dot{a}^2\dot{I}_{KA}^1 + \dot{a}\dot{I}_{KA}^2 + \dot{I}_{KA}^0]\dot{Z}_{KB} + \\ \dot{U}_{KA}^0 = (1/3)([\dot{I}_{KA}^1 + \dot{I}_{KA}^2 + \dot{I}_{KA}^0]\dot{Z}_{KA} + [\dot{a}^2\dot{I}_{KA}^1 + \dot{a}\dot{I}_{KA}^2 + \dot{I}_{KA}^0]\dot{Z}_{KB} + \\ + \dot{a}^2[\dot{a}\dot{I}_{KA}^1 + \dot{a}^2\dot{I}_{KA}^2 + \dot{I}_{KA}^0]\dot{Z}_{KC}) \\ + \dot{a}[\dot{a}\dot{I}_{KA}^1 + \dot{a}^2\dot{I}_{KA}^2 + \dot{I}_{KA}^0]\dot{Z}_{KC}) \Rightarrow \\ + [\dot{a}\dot{I}_{KA}^1 + \dot{a}^2\dot{I}_{KA}^2 + \dot{I}_{KA}^0]\dot{Z}_{KC} + 9\dot{I}_{KA}^0\dot{Z}_{KN}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{KA}^1 = (1/3)(\dot{I}_{KA}^1[\dot{Z}_{KA} + \dot{Z}_{KB} + \dot{Z}_{KC}] + \dot{I}_{KA}^2[\dot{Z}_{KA} + \dot{a}^2\dot{Z}_{KB} + \dot{a}\dot{Z}_{KC}] + \\ \dot{U}_{KA}^2 = (1/3)(\dot{I}_{KA}^1[\dot{Z}_{KA} + \dot{a}\dot{Z}_{KB} + \dot{a}^2\dot{Z}_{KC}] + \dot{I}_{KA}^2[\dot{Z}_{KA} + \dot{Z}_{KB} + \dot{Z}_{KC}] + \\ \dot{U}_{KA}^0 = (1/3)(\dot{I}_{KA}^1[\dot{Z}_{KA} + \dot{a}^2\dot{Z}_{KB} + \dot{a}\dot{Z}_{KC}] + \dot{I}_{KA}^2[\dot{Z}_{KA} + \dot{a}\dot{Z}_{KB} + \dot{a}^2\dot{Z}_{KC}] + \\ + \dot{I}_{KA}^0[\dot{Z}_{KA} + \dot{a}\dot{Z}_{KB} + \dot{a}^2\dot{Z}_{KC}]), \\ + \dot{I}_{KA}^0[\dot{Z}_{KA} + \dot{a}^2\dot{Z}_{KB} + \dot{a}\dot{Z}_{KC}]), \\ + \dot{I}_{KA}^0[\dot{Z}_{KA} + \dot{Z}_{KB} + \dot{Z}_{KC} + 9\dot{Z}_{KN}]), \end{cases} \quad (6.4.)$$

kur $\dot{U}_{KA}^1, \dot{U}_{KA}^2, \dot{U}_{KA}^0$ – šķērsnesimetrijas vietas A fāzes sprieguma TS, PS un NS komponentes, V.

Vienādojumu sistēma (6.4.) un tās izvedums būtībā parāda bojājuma aprēķina pāreju no fāžu lielumiem uz aprēķina fāzes (šeit – A fāzes) simetrisko komponentu aprēķinu, un tās pēdējā versija atbilst vispārīgas šķērsnesimetrijas ar saiti uz zemi robežnosacījumiem (BV fāžu spriegumu vai strāvu, vai arī to simetrisko komponentu vērtības, vai tās saistošie vienādojumi, kurus uzspiež fāžu un neitrāles jeb saistes ar zemi pārejas pretestības).

Redzams, ka (6.4.) vienādojumu sistēmā ir seši nezināmie ($\dot{U}_{KA}^1, \dot{U}_{KA}^2, \dot{U}_{KA}^0, \dot{I}_{KA}^1, \dot{I}_{KA}^2, \dot{I}_{KA}^0$), bet tikai trīs vienādojumi, tādēļ ir jāiegūst vēl trīs vienādojumi, lai varētu rast risinājumu. Tos iespējams sastādīt, balstoties uz atbilstošām secību aizvietošanas shēmām (6.3. att.).



6.3. att. Šķērsnesimetrijas analīzes piemēra secību aizvietošanas shēmas.

Pirms parādīt 6.3. attēlā redzamo aprēķina fāzes A sprieguma simetrisko komponentu $\dot{U}_{KA}^1, \dot{U}_{KA}^2, \dot{U}_{KA}^0$ vienādojumus, būtu lietderīgi secību aizvietošanas shēmas reducēt līdz universālām (TS – Tevenena ekvivalents, kas noteikts attiecībā pret punktiem K^1 un N^1 , ar summāro aprēķina fāzes TS rezultējošās aizvietošanas shēmas EDS $\dot{E}_{AK\Sigma}^1$, kas saslēgts virknē ar summāro TS rezultējošās aizvietošanas shēmas pilno pretestību $\dot{Z}_{K\Sigma}^1$; PS un NS aizvietošanas shēmu vienkāršošanas princips ir līdzīgs, bet šo secību aizvietošanas shēmu summārie EDS visbiežāk $\dot{E}_{AK\Sigma}^2 = \dot{E}_{AK\Sigma}^0 = 0$ V):

$$\dot{E}_{AK\Sigma}^1 = (\dot{E}_{AS1}^1 \dot{Z}_{S2}^1 + \dot{E}_{AS2}^1 \dot{Z}_{S1}^1) / (\dot{Z}_{S2}^1 + \dot{Z}_{S1}^1), \quad (6.5.)$$

$$\dot{Z}_{K\Sigma}^1 = \dot{Z}_{S1}^1 \dot{Z}_{S2}^1 / (\dot{Z}_{S2}^1 + \dot{Z}_{S1}^1), \quad (6.6.)$$

$$\dot{Z}_{K\Sigma}^2 = \dot{Z}_{S1}^2 \dot{Z}_{S2}^2 / (\dot{Z}_{S2}^2 + \dot{Z}_{S1}^2), \quad (6.7.)$$

$$\dot{Z}_{K\Sigma}^0 = \dot{Z}_{S1}^0 \dot{Z}_{S2}^0 / (\dot{Z}_{S2}^0 + \dot{Z}_{S1}^0), \quad (6.8.)$$

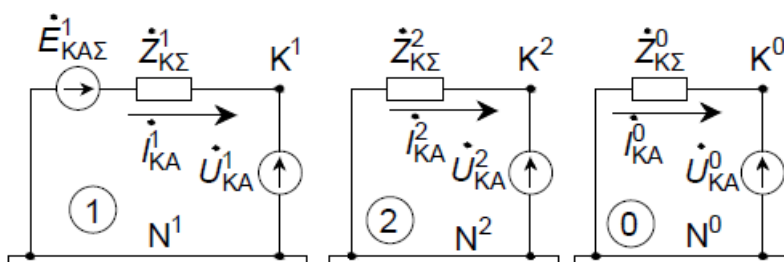
kur $\dot{E}_{AK\Sigma}^1$ – šķērsnesimetrijas TS rezultējošās aizvietošanas shēmas summārais EDS A fāzei, V;

$\dot{Z}_{K\Sigma}^1, \dot{Z}_{K\Sigma}^2, \dot{Z}_{K\Sigma}^0$ – šķērsnesimetrijas TS, PS un NS rezultējošo aizvietošanas shēmu summārās fāzes pilnās pretestības, Ω ;

$\dot{Z}_{S1}^1, \dot{Z}_{S1}^2, \dot{Z}_{S1}^0$ – sistēmas S1 TS, PS un NS pilnās pretestības, Ω ;

$\dot{Z}_{S2}^1, \dot{Z}_{S2}^2, \dot{Z}_{S2}^0$ – sistēmas S2 TS, PS un NS pilnās pretestības, Ω .

Šādi iegūst rezultējošās secību aizvietošanas shēmas ar tīkla Tevenena ekvivalentiem, kuras parādītas 6.4. attēlā [2], [14].



6.4. att. Šķērsnesimetrijas rezultējošās secību aizvietošanas shēmas ar tīkla Tevenena ekvivalentiem.

No 6.4. attēlā redzamajām shēmām ar otrā Kirhofa likuma palīdzību iespējams uzrakstīt trīs vispārīgus vienādojumus jebkurai aprēķina fāzei, pieņemot, ka PS un NS aizvietošanas shēmas nesatur EDS avotus [2], [14], [17]:

$$\begin{cases} \dot{U}_K^1 = \dot{E}_{K\Sigma}^1 - i_K^1 \dot{Z}_{K\Sigma}^1 = \dot{E}_{K\Sigma}^1 - i_K^1 \dot{Z}_{K\Sigma}^1, \\ \dot{U}_K^2 = \dot{E}_{K\Sigma}^2 - i_K^2 \dot{Z}_{K\Sigma}^2 = 0 - i_K^2 \dot{Z}_{K\Sigma}^2, \\ \dot{U}_K^0 = \dot{E}_{K\Sigma}^0 - i_K^0 \dot{Z}_{K\Sigma}^0 = 0 - i_K^0 \dot{Z}_{K\Sigma}^0, \end{cases} \quad (6.9.)$$

kur $\dot{U}_K^1, \dot{U}_K^2, \dot{U}_K^0$ – šķērsnesimetrijas vietas aprēķina fāzes sprieguma TS, PS un NS komponentes, V;

$\dot{E}_{K\Sigma}^1, \dot{E}_{K\Sigma}^2, \dot{E}_{K\Sigma}^0$ – šķērsnesimetrijas rezultējošo TS, PS un NS aizvietošanas shēmu summārie aprēķina fāzes EDS, V;

i_K^1, i_K^2, i_K^0 – šķērsnesimetrijas vietā plūstošās aprēķina fāzes strāvas TS, PS un NS komponentes, A.

Pielīdzinot vienādojumu sistēmas (6.4.) un (6.9.), iespējams iegūt vienas vispārīgas šķērsnesimetrijas aprēķina vienādojumu sistēmu, kas ļauj aprēķināt A fāzes strāvas simetriskās komponentes:

$$\begin{cases} i_{KA}^1 \left(\frac{1}{3} [\dot{Z}_{KA} + \dot{Z}_{KB} + \dot{Z}_{KC}] + \dot{Z}_{K\Sigma}^1 \right) + i_{KA}^2 \left(\frac{1}{3} [\dot{Z}_{KA} + \dot{a}^2 \dot{Z}_{KB} + \dot{a} \dot{Z}_{KC}] \right) + \\ i_{KA}^1 \left(\frac{1}{3} [\dot{Z}_{KA} + \dot{a} \dot{Z}_{KB} + \dot{a}^2 \dot{Z}_{KC}] \right) + i_{KA}^2 \left(\frac{1}{3} [\dot{Z}_{KA} + \dot{Z}_{KB} + \dot{Z}_{KC}] + \dot{Z}_{K\Sigma}^2 \right) + \\ i_{KA}^1 \left(\frac{1}{3} [\dot{Z}_{KA} + \dot{a}^2 \dot{Z}_{KB} + \dot{a} \dot{Z}_{KC}] \right) + i_{KA}^2 \left(\frac{1}{3} [\dot{Z}_{KA} + \dot{a} \dot{Z}_{KB} + \dot{a}^2 \dot{Z}_{KC}] \right) + \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
& +i_{KA}^0 \left(\frac{1}{3} [\dot{Z}_{KA} + a\dot{Z}_{KB} + a^2\dot{Z}_{KC}] \right) = \dot{E}_{KA\Sigma}^1. \\
& +i_{KA}^0 \left(\frac{1}{3} [\dot{Z}_{KA} + a^2\dot{Z}_{KB} + a\dot{Z}_{KC}] \right) = \dot{E}_{KA\Sigma}^2 = 0 \text{ V.} \\
& +i_{KA}^0 \left(\frac{1}{3} [\dot{Z}_{KA} + \dot{Z}_{KB} + \dot{Z}_{KC} + 9\dot{Z}_{KN}] + \dot{Z}_{K\Sigma}^0 \right) = \dot{E}_{KA\Sigma}^0 = 0 \text{ V.}
\end{aligned} \tag{6.10.}$$

Skaitliskiem aprēķiniem vienādojumu sistēmu (6.10.) var pārveidot matricu formā:

$$A_K i_K^S = \dot{E}_K, \tag{6.11.}$$

kur I_K^S – šķērsnesimetrijas A fāzes strāvas simetrisko komponentu vektors, A;

E_K – šķērsnesimetrijas rezultējošo aizvietošanas shēmu summāro EDS vektors, V;

A_K – šķērsnesimetrijas pretestību matrica, Ω .

Vienādojumu sistēmā (6.11.) izmantojamās matricas iespējams parādīt šādi:

$$i_K^S = \begin{bmatrix} i_{KA}^1 \\ i_{KA}^2 \\ i_{KA}^0 \end{bmatrix}, \tag{6.12.}$$

$$\dot{E}_K = \begin{bmatrix} \dot{E}_{KA\Sigma}^1 \\ \dot{E}_{KA\Sigma}^2 \\ \dot{E}_{KA\Sigma}^0 \end{bmatrix} \text{ visbiežāk formā } \begin{bmatrix} \dot{E}_{KA\Sigma}^1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \tag{6.13.}$$

$$A_K = (1/3) \begin{bmatrix} (\dot{Z}_{KA} + \dot{Z}_{KB} + \dot{Z}_{KC}) + 3\dot{Z}_{K\Sigma}^1 & (\dot{Z}_{KA} + a^2\dot{Z}_{KB} + a\dot{Z}_{KC}) \\ (\dot{Z}_{KA} + a\dot{Z}_{KB} + a^2\dot{Z}_{KC}) & (\dot{Z}_{KA} + \dot{Z}_{KB} + \dot{Z}_{KC}) + 3\dot{Z}_{K\Sigma}^2 \\ (\dot{Z}_{KA} + a^2\dot{Z}_{KB} + a\dot{Z}_{KC}) & (\dot{Z}_{KA} + a\dot{Z}_{KB} + a^2\dot{Z}_{KC}) \\ (\dot{Z}_{KA} + a\dot{Z}_{KB} + a^2\dot{Z}_{KC}) & \\ (\dot{Z}_{KA} + a^2\dot{Z}_{KB} + a\dot{Z}_{KC}) & \\ (\dot{Z}_{KA} + \dot{Z}_{KB} + \dot{Z}_{KC}) + 9\dot{Z}_{KN} + 3\dot{Z}_{K\Sigma}^0 & \end{bmatrix} \tag{6.14.}$$

Apzīmējot matricas elementus ar fāžu pārejas pretestību kombinācijām $(\dot{Z}_{KA} + \dot{Z}_{KB} + \dot{Z}_{KC}) = \dot{Z}_{KABC1}$, $(\dot{Z}_{KA} + a\dot{Z}_{KB} + a^2\dot{Z}_{KC}) = \dot{Z}_{KABC2}$, $(\dot{Z}_{KA} + a^2\dot{Z}_{KB} + a\dot{Z}_{KC}) = \dot{Z}_{KABC3}$, matricu A_K var pārrakstīt uzskatāmākā formā:

$$A_K = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \dot{Z}_{KABC1} + 3\dot{Z}_{K\Sigma}^1 & \dot{Z}_{KABC3} & \dot{Z}_{KABC2} \\ \dot{Z}_{KABC2} & \dot{Z}_{KABC1} + 3\dot{Z}_{K\Sigma}^2 & \dot{Z}_{KABC3} \\ \dot{Z}_{KABC3} & \dot{Z}_{KABC2} & \dot{Z}_{KABC1} + 9\dot{Z}_{KN} + 3\dot{Z}_{K\Sigma}^0 \end{bmatrix}. \tag{6.15.}$$

Analoģisku izvedumu var iegūt, uzsākot matricu formas pierakstu pirms vienādojumu sistēmu (6.4.) un (6.9.) pielīdzināšanas. Vienādojumu sistēma (6.4.) matricu formā:

$$U_K^S = \left(\frac{1}{3} \mathcal{K}_A Z_{KDF} k_A + 3Z_{KDN} \right) I_K^S, \tag{6.16.}$$

kur U_K^S – šķērsnesimetrijas A fāzes sprieguma simetrisko komponentu vektors, V;

k_A – Forteskju tiešās transformācijas matrica A fāzei;

\mathcal{K}_A – Forteskju apgrieztās transformācijas matrica A fāzei;

Z_{KDF} – diagonāla šķērsnesimetrijas fāžu pārejas pretestību matrica, Ω ;

Z_{KDN} – diagonāla šķērsnesimetrijas neitrāles pārejas pretestību palīgmatrixa, Ω .

Vienādojumu sistēmā (6.16.) lietojamās iepriekš neatšifrētās matricas iespējams parādīt šādi:

$$U_K^S = \begin{bmatrix} \dot{U}_{KA}^1 \\ \dot{U}_{KA}^2 \\ \dot{U}_{KA}^0 \end{bmatrix}, \quad (6.17.)$$

$$Z_{KDF} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{KA} & 0 & 0 \\ 0 & \dot{Z}_{KB} & 0 \\ 0 & 0 & \dot{Z}_{KC} \end{bmatrix}, \quad (6.18.)$$

$$Z_{KDN} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{Z}_{KN} \end{bmatrix}. \quad (6.19.)$$

Vienlaikus arī (6.9.) sistēmu iespējams pārveidot matricu formā

$$U_K^S = E_K - Z_{KD\Sigma} I_K^S, \quad (6.20.)$$

kur $Z_{KD\Sigma}$ – diagonāla secību rezultējošo aizvietošanas shēmu summāro pretestību matrica, Ω .

Minētās rezultējošo aizvietošanas shēmu summāro pretestību matricas saturs ir

$$Z_{KD\Sigma} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{K\Sigma}^1 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{Z}_{K\Sigma}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{Z}_{K\Sigma}^0 \end{bmatrix}. \quad (6.21.)$$

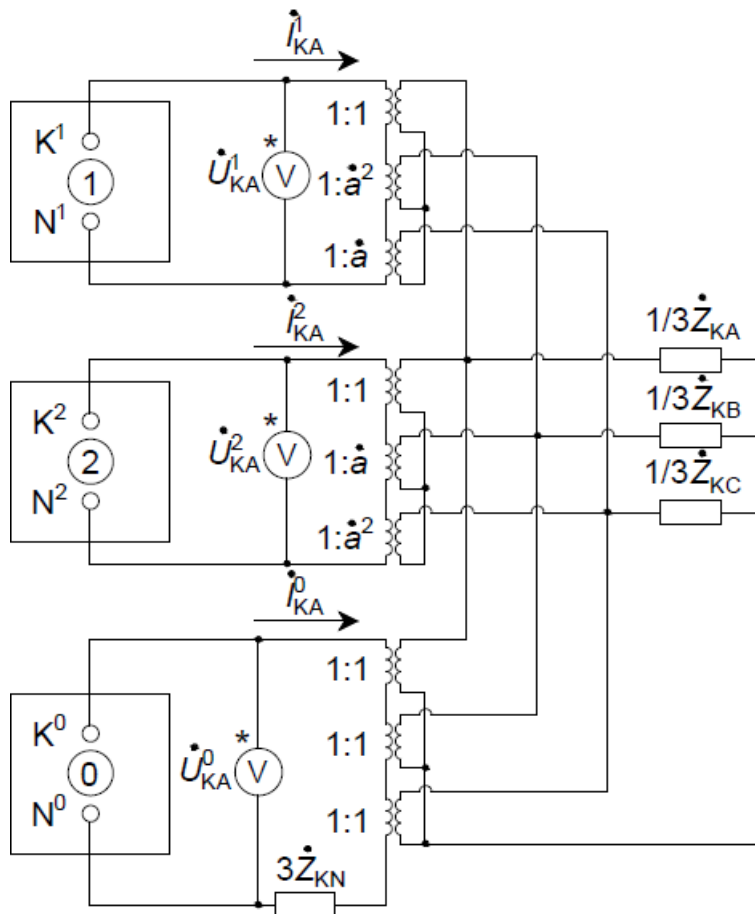
Pielīdzinot vienādojumu sistēmas (6.16.) un (6.20.) matricu formā, iegūstama alternatīva vienas vispārīgas šķērsnesimetrijas risinājuma pieraksta forma:

$$\begin{aligned} E_K - Z_{KD\Sigma} I_K^S &= \left(\frac{1}{3} \mathcal{K}_A Z_{KDF} k_A + 3Z_{KDN} \right) I_K^S \Rightarrow \\ \left(\left(\frac{1}{3} \mathcal{K}_A Z_{KDF} k_A + 3Z_{KDN} \right) + Z_{KD\Sigma} \right) I_K^S &= E_K. \end{aligned} \quad (6.22.)$$

Redzams, ka principā vienādojumu sistēma (6.22.) dod iespēju ar matricu pierakstu sastādīt koeficientu matricu $A_K = \left(\frac{1}{3} \mathcal{K}_A Z_{KDF} k_A + 3Z_{KDN} \right) + Z_{KD\Sigma}$, aizvietojot A_K manuālu sagatavošanu atbilstoši (6.14.). Attiecīgi analītisku risinājumu iespējams iegūt, matricu formā atrisinot LVS (6.11.) vai (6.22.). Šis risinājums ļauj iegūt A fāzes strāvas simetriskās komponentes $\dot{I}_{KA}^1, \dot{I}_{KA}^2, \dot{I}_{KA}^0$ šķērsnesimetrijas vietā, ar kurām var noteikt A fāzes sprieguma komponentes BV $\dot{U}_{KA}^1, \dot{U}_{KA}^2, \dot{U}_{KA}^0$ ar (6.9.) vai (6.20.) palīdzību. Tad atkarībā no darba uzdevuma var nākties noteikt citu tīkla elementu strāvu un/vai spriegumu simetriskās komponentes, manuāli rēķinot tās, izmantojot zināmās simetrisko komponentu vērtības nesimetrijas vietā un secību aizvietošanas shēmas.

Saprotams, ka reāliem tīkliem aizvietošanas shēmas var būt lielas un ar sarežģītu struktūru un to reducēšana līdz 6.4. attēlā parādītajām rezultējošajām aizvietošanas shēmām pati par sevi būtu ilga un darbietilpīga. Šādos gadījumos vieglāk izmantot kompleksās aizvietošanas shēmas, kuras apvieno secību aizvietošanas shēmas vienā kopīgā shēmā, bet vienlaikus neprasa to vienkāršošanu, ja tiek veikts visas shēmas režīma parametru topoloģiskais aprēķins. Balstoties uz vienādojumu sistēmu (6.4.), iespējams izveidot teorētisku komplekso aizvietošanas shēmu, izmantojot ideālus transformatorus (transformatori bez aktīvās jaudas zudumiem un izkliedes

plūsmas) ar kompleksiem transformācijas koeficientiem (6.5. att.). Kvadrāti ar riņķa līnijās ievilktajiem skaitļiem 1, 2, 0 šajā gadījumā vispārīgi apzīmē 6.3. attēlā redzamās secību aizvietošanas shēmas, kurām parādīti vienīgi mezgli K^1 , K^2 , K^0 un N^1 , N^2 , N^0 , starp kuriem nosakāmas nesimetriskās vietas sprieguma simetriskās komponentes \dot{U}_{KA}^1 , \dot{U}_{KA}^2 , \dot{U}_{KA}^0 .



6.5. att. Vienas vispārīgas šķērsnesimetriskās kompleksās aizvietošanas shēma [3].

Skaitlisku aprēķinu mēģinājumi parādīja, ka ideālus transformatorus ir sarežģīti precīzi atspoguļot gan matemātisko modeļu veidā, gan reālā analogā modelī, ko minējuši arī citi autori [3], [14]. Vienlaikus jāatzīmē, ka agrāk tika veiktas nesimetrisko režīmu simulācijas ar analogiem energosistēmu modeļu stendiem, kuriem izmantoja speciāli izgatavotus (relatīvi stenda jaudai) lieljaudas transformatorus, lai iegūtu tuvinātas režīma parametru vērtības. Tomēr šādiem transformatoriem, kaut arī minimizēti, bet piemīt jaudas zudumi un izkliedes plūsma, un to izgatavošana, visticamāk, ir dārga. Ievērojot minētos apstākļus, tiek piedāvāts izmantot skaitlisku aprēķinu metodi, kur katrai no 6.3. attēlā redzamajām secību aizvietošanas shēmām sastāda topoloģiskajam režīma parametru aprēķinam nepieciešamās ieejas matricas atbilstoši 4. nodaļas aprakstam. Šādā veidā tiek atrisināti trīs vienādojumi, ko analītiskā risinājumā realizē kā secību aizvietošanas shēmu vienkāršošanu un izteikšanu ar (6.9.). Secību aizvietošanas shēmu režīma parametru aprēķina gaitā tiek pārrēķinātas īpašās fāzes sprieguma simetriskās komponentes \dot{U}_{KA}^1 , \dot{U}_{KA}^2 , \dot{U}_{KA}^0 (shēmās ieviestas kā EDS avoti). Visu secību aizvietošanas shēmu režīmu parametru aprēķini tiek veikti vienlaicīgi, t. i., katrai no secību

aizvietošanas shēmām atsevišķi izdara aprēķinus vienam tuvinājuma solim. Tad, izmantojot iegūtās A fāzes strāvas simetrisko komponentu vērtības, pārrēķina šīs fāzes sprieguma simetriskās komponentes $\dot{U}_{KA}^1, \dot{U}_{KA}^2, \dot{U}_{KA}^0$ ar vienādojumu sistēmas (6.4.) pēdējo formu vai (6.16.) un atkārto režīma parametru aprēķinu soli visām trim secību aizvietošanas shēmām. Alternatīvi iespējams pārrēķināt $\dot{U}_{KA}^1, \dot{U}_{KA}^2, \dot{U}_{KA}^0$ vērtības arī starp katras secību aizvietošanas shēmas atsevišķajiem režīma parametru aprēķina tuvinājuma soļiem. Šādu kombinētu aprēķinu procesu atkārto līdz precizitātes robežai, kuru nosaka atbilstoši 4. nodaļas aprakstam, bet mezglu spriegumu starpību starp tuvinājumu soļiem pieņem kā lielāko no visu secību aizvietošanas shēmu aprēķinos iegūstamo (metodikas ideja sīkāk izklāstīta [89]). Šāda veida specializēti risinājumi ir obligāti jāizmanto vienīgi, veicot režīma parametru aprēķinus nesimetrisku īsslēgumu vai nesimetriskas slodzes gadījumos, kuros visu fāžu pārejas pretestības ir savstarpēji atšķirīgas: $\dot{Z}_{KA} \neq \dot{Z}_{KB} \neq \dot{Z}_{KC}$ (6.2. att.). Citiem šķērsnesimetrijas veidiem iespējams izmantot iepriekš aprakstītos vispārīgās šķērsnesimetrijas risinājumus vai turpinājumā dotās kompleksās aizvietošanas shēmas un formulas. Jāmin, ka ievērojamu fāžu pārejas pretestību gadījumos, iespējama šāda atdalīto secību aizvietošanas shēmu kopējā skaitliskā aprēķina diverģence, bet tādā gadījumā tuvināti iespējams izmantot kādu no kompleksajām aizvietošanas shēmām, kura izmantojama līdzīgam nesimetrijas veidam (piemēram, pieņemot divu līdzīgāko fāžu pārejas pretestību vērtības par vienādām), vai izmēģināt citu iegūtās LVS risināšanas paņēmieni.

Ja nesimetrijas vietā vismaz divas fāzes atrodas vienādos apstākļos (to pārejas pretestības ir vienādas), zinātniekiem savos darbos [3], [8], [9], [14] izdevās izvest analītiskas formulas vai tām atbilstošas kompleksās aizvietošanas shēmas, veicot analīzi analogiski iepriekš parādītajai. Minētās kompleksās aizvietošanas shēmas tika iegūtas, modificējot 6.5. attēlā redzamo shēmu tā, lai visiem ideālajiem transformatoriem būtu reāli transformācijas koeficienti 1:1, kurus iespējams aizstāt ar elektriskiem savienojumiem vai, balstoties uz robežnosacījumiem, izvestajām analītiskajām formulām. Minētie gadījumi tiks aplūkoti nākamajos apakšpunktos.

6.1.2. Trīsfāžu īsslēgumi

Simetriska trīsfāžu īsslēguma un simetriska trīsfāžu īsslēguma uz zemi rašanās gadījumā sistēmas režīma parametrus iespējams aprēķināt, izmantojot 6.3. attēlā redzamo TS aizvietošanas shēmu un šuntējot papildu EDS avotu \dot{U}_{K1}^1 metāliska trīsfāžu īsslēguma gadījumā (6.2. attēls ar pārejas pretestībām $\dot{Z}_{KA} = \dot{Z}_{KB} = \dot{Z}_{KC} = 0 \Omega$) vai aizstājot to ar fāzes pārejas pretestību, ja visās fāzēs ir vienādas īsslēguma pārejas pretestības ($0 < \dot{Z}_{KA} = \dot{Z}_{KB} = \dot{Z}_{KC} < \infty \Omega$). Simetriska trīsfāžu īsslēguma gadījumā par aprēķina fāzi vienlīdz ērti pieņemt jebkuru no fāzēm, bet, izvēloties fāzi B vai C, vispirms ir jāpagriež EDS avotu vektoru \dot{E}_{S1A} un \dot{E}_{S2A} par 240° vai 120° , ja to vērtības ir aprēķinātas vienīgi A fāzei. Izpildot (6.5.) un (6.6.) atbilstošos shēmas vienkāršojumus, līdz noteikts rezultējošās TS aizvietošanas shēmas summārais EDS un pretestība, iespējams izteikt īsslēguma aprēķina fāzes (šeit – A fāzes) TS strāvu, kura šim bojājumam sakrīt ar aprēķina fāzes strāvu:

$$\dot{I}_{KA}^1 = \dot{I}_{KA} = \dot{E}_{KA\Sigma}^1 / (\dot{Z}_{K\Sigma}^1 + \dot{Z}_{KA}). \quad (6.23.)$$

Savukārt aprēķina fāzes īsslēguma TS spriegumu īsslēguma punktā K^1 iespējams noteikt no (6.9.):

$$\dot{U}_{KA}^1 = \dot{U}_{KA} = \dot{E}_{A\Sigma}^1 - i_{KA}^1 \dot{Z}_{K\Sigma}^1. \quad (6.24.)$$

Ievērojot, ka šim simetriskajam trīsfāžu īsslēguma gadījumam fāzes strāvas un to TS komponentes sakrīt, iespējams arī sareizināt šo strāvu ar fāzes pārejas pretestību. B un C fāzes īsslēguma spriegumus un strāvas iespējams noteikt, pagriežot A fāzes vektoru par 240° un 120° .

Nesimetriskam trīsfāžu īsslēgumam ar vienādām īsslēguma pārejas pretestībām divās no fāzēm (piemēram, 6.2. attēls ar pārejas pretestībām $0 \leq \dot{Z}_{KA} \neq \dot{Z}_{KB} < \infty \Omega$, $0 < \dot{Z}_{KB} = \dot{Z}_{KC} < \infty \Omega$, $\dot{Z}_{KN} = \infty \Omega$) vai šādam trīsfāžu īsslēguma uz zemi (piemēram, 6.2. attēls ar pārejas pretestībām $0 \leq \dot{Z}_{KA} \neq \dot{Z}_{KB} < \infty \Omega$, $0 \leq \dot{Z}_{KB} = \dot{Z}_{KC} < \infty \Omega$, $0 \leq \dot{Z}_{KN} < \infty \Omega$) par aprēķina fāzi daudz izdevīgāk izvēlēties fāzi, kurā ir atšķirīga pārejas pretestība (iepriekš minētajos piemēros tā būtu A fāze). Šis apsvērums skaidrojams ar to, ka, izsakot atšķirīgās fāzes sprieguma simetrisko komponentu atkarību no tās strāvas komponentēm, kā tas parādīts A fāzes komponentēm (6.4.), iespējams iznest sakrītošās pretestības pirms iekavām un saīsināt reizinātājus ar kompleksajiem pagriezienu operatoriem \dot{a} un \dot{a}^2 . Tas dod iespēju īstenot īsslēguma robežnosacījumus, izmantojot vienīgi elektriskus savienojumus starp secību aizvietošanas shēmām, līdzīgi kā ideālus transformatorus ar transformācijas koeficientu 1:1 var aizvietot ar šādiem savienojumiem.

Pirmais no šādiem bojājumiem, ko varētu aplūkot, ir nesimetrisks trīsfāžu īsslēgums uz zemi, ja visās fāzēs un saitē uz zemi jeb neitrālē ir pārejas pretestības un fāžu B un C pārejas pretestības ir vienādas (6.2. attēls ar pārejas pretestībām $0 \leq \dot{Z}_{KA} \neq \dot{Z}_{KB} < \infty \Omega$, $0 \leq \dot{Z}_{KB} = \dot{Z}_{KC} = \dot{Z}_{KF} < \infty \Omega$, $0 \leq \dot{Z}_{KN} < \infty \Omega$). Vienkāršībai tās apzīmētas vispārīgi kā īsslēguma fāžu pārejas pretestība ($\dot{Z}_{KB} = \dot{Z}_{KC} = \dot{Z}_{KF}$). Šādā gadījumā var izmantot analītisku risinājumu ar (6.11.) vai (6.22.) vienādojumu sistēmām, ja ir iespējams viegli reducēt secību aizvietošanas shēmas, bet tad lietojama modificēta koeficientu matricas A_K versija (iegūstama no (6.15.), ievērojot, ka $\dot{a}^2 + \dot{a} = -1$):

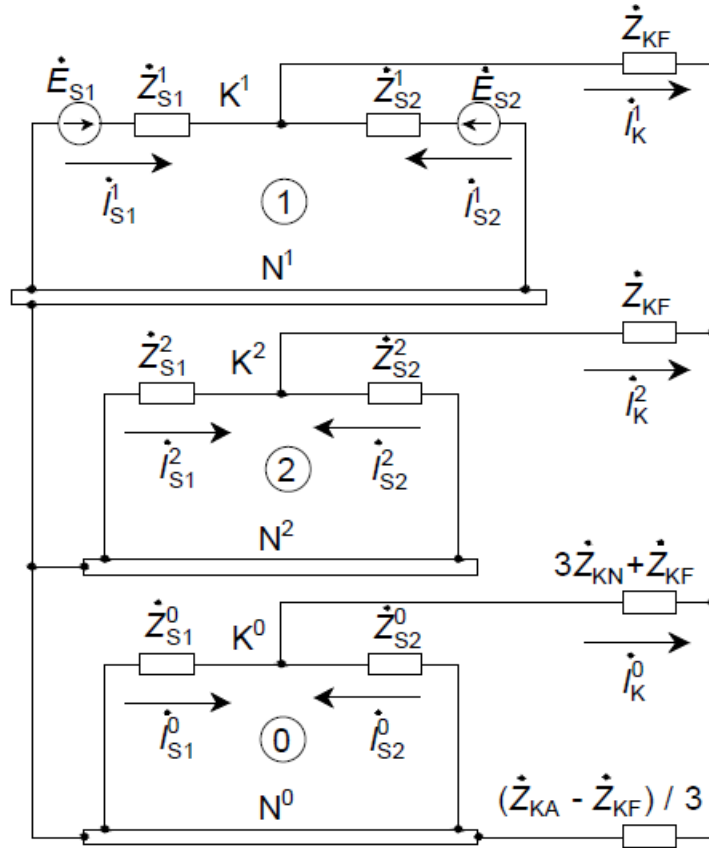
$$A_K = (1/3) \begin{bmatrix} \dot{Z}_{KA} + 2\dot{Z}_{KF} + 3\dot{Z}_{K\Sigma}^1 & \dot{Z}_{KA} - \dot{Z}_{KF} & \dot{Z}_{KA} - \dot{Z}_{KF} \\ \dot{Z}_{KA} - \dot{Z}_{KF} & \dot{Z}_{KA} + 2\dot{Z}_{KF} + 3\dot{Z}_{K\Sigma}^2 & \dot{Z}_{KA} - \dot{Z}_{KF} \\ \dot{Z}_{KA} - \dot{Z}_{KF} & \dot{Z}_{KA} - \dot{Z}_{KF} & \dot{Z}_{KA} + 2\dot{Z}_{KF} + 9\dot{Z}_{KN} + 3\dot{Z}_{K\Sigma}^0 \end{bmatrix}, \quad (6.25.)$$

kur \dot{Z}_{KF} – pilnā pārejas pretestība, fāzēm, kurās pārejas pretestības sakrīt (šeit B un C fāzes), trīsfāžu īsslēguma vietā, Ω .

Ja shēmas vienkāršošana ir sarežģīta, tad joprojām iespējams izmantot 6.1.1. apakšpunkta beigās aprakstīto aprēķinu metodiku ar modificētu (6.4.) vienādojumu sistēmu:

$$\begin{cases} \dot{U}_{KA}^1 = (1/3)(i_{KA}^1[\dot{Z}_{KA} + 2\dot{Z}_{KF}] + i_{KA}^2[\dot{Z}_{KA} - \dot{Z}_{KF}] + i_{KA}^0[\dot{Z}_{KA} - \dot{Z}_{KF}]), \\ \dot{U}_{KA}^2 = (1/3)(i_{KA}^1[\dot{Z}_{KA} - \dot{Z}_{KF}] + i_{KA}^2[\dot{Z}_{KA} + 2\dot{Z}_{KF}] + i_{KA}^0[\dot{Z}_{KA} - \dot{Z}_{KF}]), \\ \dot{U}_{KA}^0 = (1/3)(i_{KA}^1[\dot{Z}_{KA} - \dot{Z}_{KF}] + i_{KA}^2[\dot{Z}_{KA} - \dot{Z}_{KF}] + i_{KA}^0[\dot{Z}_{KA} + 2\dot{Z}_{KF} + 9\dot{Z}_{KN}]). \end{cases} \quad (6.26.)$$

Vienlaikus šādam nesimetriskam trīsfāžu īsslēgumam jau iespējams īstenot komplekso aizvietošanas shēmu ar elektriskajiem savienojumiem (6.6. att.).



6.6. att. Kompleksā aizvietošanas shēma trīsfāžu īsslēgumam uz zemi ar vienādām pārejas pretestībām \dot{Z}_{KF} B un C fāzē un atšķirīgu pārejas pretestību \dot{Z}_{KA} A fāzē [3].

Ja atšķirīgajos apstākļos esošajā fāzē pārejas pretestības nebūs ($\dot{Z}_{KA} = 0 \Omega$), bet B un C fāzēs saglabāsies vienādas pretestības ($0 < \dot{Z}_{KB} = \dot{Z}_{KC} = \dot{Z}_{KF} < \infty \Omega$), tad analītiskam risinājumam iespējams izmantot koeficientu matricas A_K versiju:

$$A_K = (1/3) \begin{bmatrix} 2\dot{Z}_{KF} + 3\dot{Z}_{K\Sigma}^1 & -\dot{Z}_{KF} & -\dot{Z}_{KF} \\ -\dot{Z}_{KF} & 2\dot{Z}_{KF} + 3\dot{Z}_{K\Sigma}^2 & -\dot{Z}_{KF} \\ -\dot{Z}_{KF} & -\dot{Z}_{KF} & 2\dot{Z}_{KF} + 9\dot{Z}_{KN} + 3\dot{Z}_{K\Sigma}^0 \end{bmatrix} \quad (6.27.)$$

vai atsevišķas secību aizvietošanas shēmas ar modificētu (6.4.):

$$\begin{cases} \dot{U}_{KA}^1 = (1/3)(i_{KA}^1[2\dot{Z}_{KF}] + i_{KA}^2[-\dot{Z}_{KF}] + i_{KA}^0[-\dot{Z}_{KF}]). \\ \dot{U}_{KA}^2 = (1/3)(i_{KA}^1[-\dot{Z}_{KF}] + i_{KA}^2[2\dot{Z}_{KF}] + i_{KA}^0[-\dot{Z}_{KF}]). \\ \dot{U}_{KA}^0 = (1/3)(i_{KA}^1[-\dot{Z}_{KF}] + i_{KA}^2[-\dot{Z}_{KF}] + i_{KA}^0[2\dot{Z}_{KF} + 9\dot{Z}_{KN}]). \end{cases} \quad (6.28.)$$

Iespējams veikt arī režīma parametru aprēķinu 6.6. attēlā redzamajai kompleksajai aizvietošanas shēmai, iepriekš korigējot pretestību zaram, kas satur \dot{Z}_{KA} .

Ja divās no īsslēgtajām fāzēm, kurās pārejas pretestības sakrīt, tās būtu vienādas ar 0Ω , bet trešajā fāzē pārejas pretestība būtu (piemēram, 6.2. attēls ar pārejas pretestībām $0 < \dot{Z}_{KB} < \infty \Omega$, $\dot{Z}_{KA} = \dot{Z}_{KC} = 0 \Omega$, $0 < \dot{Z}_{KN} < \infty \Omega$), režīma parametru analītiskam aprēķinam joprojām par aprēķina fāzi var izvēlēties A fāzi, izmantojot (6.15.) modifikāciju:

$$A_K = (1/3) \begin{bmatrix} \dot{Z}_{KB} + 3\dot{Z}_{K\Sigma}^1 & \dot{a}^2 \dot{Z}_{KB} & \dot{a} \dot{Z}_{KB} \\ \dot{a} \dot{Z}_{KB} & \dot{Z}_{KB} + 3\dot{Z}_{K\Sigma}^2 & \dot{a}^2 \dot{Z}_{KB} \\ \dot{a}^2 \dot{Z}_{KB} & \dot{a} \dot{Z}_{KB} & \dot{Z}_{KB} + 9\dot{Z}_{KN} + 3\dot{Z}_{K\Sigma}^0 \end{bmatrix} \quad (6.29.)$$

vai veicot atsevišķu secību aizvietošanas shēmu skaitlisko režīma parametru aprēķinu ar modificētu (6.4.):

$$\begin{cases} \dot{U}_{KA}^1 = (1/3)(i_{KA}^1[\dot{Z}_{KB}] + i_{KA}^2[\dot{a}^2 \dot{Z}_{KB}] + i_{KA}^0[\dot{a} \dot{Z}_{KB}]), \\ \dot{U}_{KA}^2 = (1/3)(i_{KA}^1[\dot{a} \dot{Z}_{KB}] + i_{KA}^2[\dot{Z}_{KB}] + i_{KA}^0[\dot{a}^2 \dot{Z}_{KB}]), \\ \dot{U}_{KA}^0 = (1/3)(i_{KA}^1[\dot{a}^2 \dot{Z}_{KB}] + i_{KA}^2[\dot{a} \dot{Z}_{KB}] + i_{KA}^0[\dot{Z}_{KB} + 9\dot{Z}_{KN}]). \end{cases} \quad (6.30.)$$

Iespējams veikt arī režīma parametru aprēķinu 6.6. attēlā redzamajai kompleksajai aizvietošanas shēmai, bet tad vispirms jāpagriež abu sistēmu EDS avotu vektori par 240° TS un 120° PS, ja tajā eksistē EDS avots un zināmas vienīgi A fāzes EDS vērtības $\dot{E}_{S1} = \dot{E}_{SA1}$ ($\dot{E}_{SB1}^1 = \dot{a}^2 \dot{E}_{SA1}^1, \dot{E}_{SB1}^2 = \dot{a} \dot{E}_{SA1}^2$). Ievērojot, ka konkrētajā situācijā komplekso aizvietošanas shēmu bez ideāliem transformatoriem var īstenot vienīgi, ja īpašā jeb aprēķina fāze ir B fāze ar pārejas pretestību \dot{Z}_{KB} , zara pretestība $(\dot{Z}_{KA} - \dot{Z}_{KF})/3$ jāpārveido uz $\dot{Z}_{KB}/3$, un, zinot to, ka fāzēs A un C pārejas pretestību nav, 6.6. attēlā redzamajā shēmā jākorrigē pretestības zariem, kuri satur \dot{Z}_{KF} . Jāņem vērā arī, ka šī īsslēguma gadījumā kompleksās aizvietošanas shēmas režīma parametru aprēķina rezultātā tiktu iegūtas B fāzes strāvu un spriegumu simetriskās komponentes.

Būtu lietderīgi īsumā aplūkot nesimetriskus trīsfāžu īsslēgumus bez saites ar zemi, bet saglabājoties vienādām pretestībām divās no fāzēm (piemēram, 6.2. attēls ar pārejas pretestībām $0 \leq \dot{Z}_{KA} \neq \dot{Z}_{KB} < \infty \Omega, 0 < \dot{Z}_{KB} = \dot{Z}_{KC} = \dot{Z}_{KF} < \infty \Omega, \dot{Z}_{KN} = \infty \Omega$). Šādā gadījumā teorētiski nav iespējama NS strāvas plūšana ($3\dot{I}_{KA}^0 = \dot{I}_{KN} = 0$ A), jo īsslēguma punktā tās noslēgšanās ceļš ir pārtraukts. Attiecīgi vienādojumos netiks uzrādīta NS komponente kā tāda un analītiska risinājuma iegūšanai ir jāaprēķina četri nezināmie: $\dot{U}_{KA}^1, \dot{U}_{KA}^2, \dot{I}_{KA}^1, \dot{I}_{KA}^2$. Šim nolūkam ievērojami jāmodificē (6.4.) izvedums, ko sākuma iespējams veikt vispārīgas šķērsnesimetrijas gadījumam ($0 < \dot{Z}_{KA} \neq \dot{Z}_{KB} \neq \dot{Z}_{KC} < \infty \Omega$):

$$\begin{cases} \dot{U}_{KA}^1 = (1/3)([i_{KA}^1 + i_{KA}^2]\dot{Z}_{KA} + \dot{a}[\dot{a}^2 i_{KA}^1 + \dot{a} i_{KA}^2]\dot{Z}_{KB} + \dot{a}^2[\dot{a} i_{KA}^1 + \dot{a}^2 i_{KA}^2]\dot{Z}_{KC}) \\ \dot{U}_{KA}^2 = (1/3)([i_{KA}^1 + i_{KA}^2]\dot{Z}_{KA} + \dot{a}^2[\dot{a}^2 i_{KA}^1 + \dot{a} i_{KA}^2]\dot{Z}_{KB} + \dot{a}[\dot{a} i_{KA}^1 + \dot{a}^2 i_{KA}^2]\dot{Z}_{KC}) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{U}_{KA}^1 = (1/3)(i_{KA}^1[\dot{Z}_{KA} + \dot{Z}_{KB} + \dot{Z}_{KC}] + i_{KA}^2[\dot{Z}_{KA} + \dot{a}^2 \dot{Z}_{KB} + \dot{a} \dot{Z}_{KC}]), \\ \dot{U}_{KA}^2 = (1/3)(i_{KA}^1[\dot{Z}_{KA} + \dot{a} \dot{Z}_{KB} + \dot{a}^2 \dot{Z}_{KC}] + i_{KA}^2[\dot{Z}_{KA} + \dot{Z}_{KB} + \dot{Z}_{KC}]). \end{cases} \quad (6.31.)$$

No iepriekš minētā iespējams iegūt analītisku risinājumu A fāzes īsslēguma strāvas simetriskajām komponentēm, izmantojot (6.9.) pirmos divus vienādojumus un pieņemot, ka PS aizvietošanas shēmā nav papildu EDS avotu:

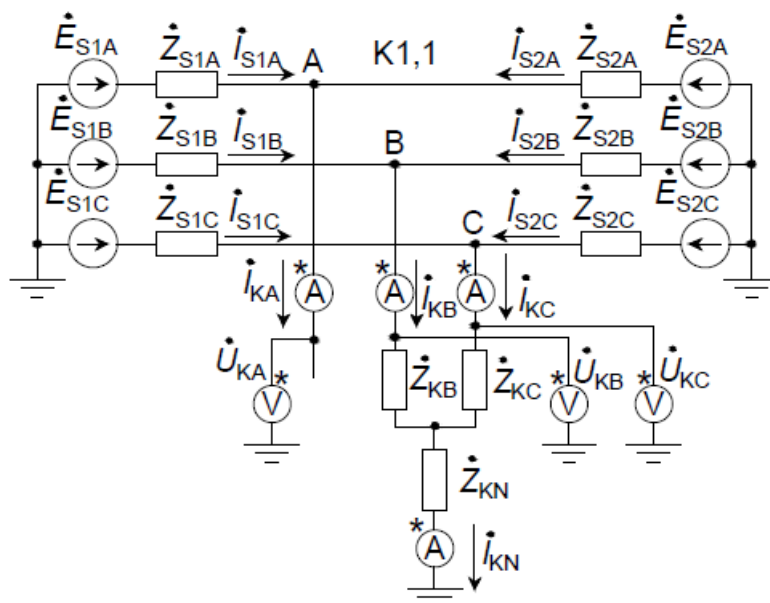
$$\begin{aligned} & \left\{ i_{KA}^1 \left((1/3)[\dot{Z}_{KA} + \dot{Z}_{KB} + \dot{Z}_{KC}] + \dot{Z}_{K\Sigma}^1 \right) + i_{KA}^2 \left((1/3)[\dot{Z}_{KA} + \dot{a}^2 \dot{Z}_{KB} + \dot{a} \dot{Z}_{KC}] \right) = \right. \\ & \left. \left\{ i_{KA}^1 \left((1/3)[\dot{Z}_{KA} + \dot{a} \dot{Z}_{KB} + \dot{a}^2 \dot{Z}_{KC}] \right) + i_{KA}^2 \left((1/3)[\dot{Z}_{KA} + \dot{Z}_{KB} + \dot{Z}_{KC}] + \dot{Z}_{K\Sigma}^2 \right) = \right. \right. \\ & \quad = \dot{E}_{KA\Sigma}^1. \\ & \quad = \dot{E}_{KA\Sigma}^2 = 0 \text{ V}. \end{aligned} \quad (6.32.)$$

Tad iespējams atrisināt vienādojumu sistēmu (6.32.) vai veikt TS un PS aizvietošanas shēmu režīma parametru aprēķinus, izmantojot (6.31.), lai pārrēķinātu papildu EDS avotu \dot{U}_{KA}^1 un \dot{U}_{KA}^2 vērtības starp tuvinājumu soļiem. Ja vismaz divas no fāžu pārejas pretestībām ir vienādas, tad iespējams izmantot 6.6. attēlā redzamo komplekso aizvietošanas shēmu, iepriekš ievērojot, ka $\dot{Z}_{KN} = \infty \Omega$ jeb atslēdzot NS aizvietošanas shēmu un zaru ar pretestību $3\dot{Z}_{KN} + \dot{Z}_{KF}$, bet saglabājot zaru $(\dot{Z}_{KA} - \dot{Z}_{KF})/3$, NS aizvietošanas shēmas neitrāles N^0 vietā zara izvadu pieslēdzot TS neitrālei N^1 . Neskatoties uz augstāk veikto pieņēmumu, ka īsslēguma vietā strāva uz zemi neplūst, jāsaprot, ka realitātē BV arī eksistē galīga pārejas pretestība (piemēram, izolācijas un/vai kapacitatīvas vadītspējas starp fāzēm un zemi). Attiecīgi pastāv vismaz niecīga NS strāva, kuru kā tādu šādiem īsslēgumiem praktiski vienmēr var ignorēt, jo tā nerada nozīmīgu kļūdu aprēķinātajās strāvu vērtībās. Tomēr, kā tiks parādīts turpmāk, metāliska divfāžu īsslēguma apraksta beigās (6.1.3. apakšpunkts), rodoties nesimetriskiem īsslēgumiem bez tiešas saites ar zemi tīklos, kuriem BV tuvumā nav NS strāvu noslēgšanās ceļu ar mazām pretestībām (relatīvi minētajām vadītspējām), t. i., tīklos ar izolētu neitrāli, NS spriegums vismaz BV teorētiski varētu atbilst vērā ņemamai daļai no TS un PS komponentēm. Galvenais iemesls, kādēļ pat šādos gadījumos NS sprieguma ignorēšana parasti nerada ievērojamas kļūdas, ir tādēļ, ka, salīdzinot ar izolācijas un/vai kapacitātes vadītspēju BV, pārējā tīkla vadītspējas uz zemi kopā joprojām ir daudz lielākas. **Vienlaikus ļoti svarīgi atzīmēt, ka situācijā, kad rodas nesimetrisks trīsfāžu īsslēgums uz zemi tīklā ar izolētu neitrāli, ignorēt sprieguma NS komponenti bez rūpīgas analīzes nedrīkst, jo tādā gadījumā gan BV, gan RUV šī komponente var veidot lielu daļu no faktiskajiem fāžu spriegumiem.** Kā skaidrojums jāmin tas, ka starp BV un RUV esošās aizvietošanas shēmu garenvirziena pretestības ir niecīgas, salīdzinot ar pretestībām, kas atbilst tīkla vadītspējām uz zemi, kā rezultātā NS sprieguma kritums starp BV un RUV arī būs salīdzinoši nenozīmīgs.

Iepriekš dotie trīsfāžu īsslēgumu aprēķinu paņēmieni apraksti parāda arī to, ka 6.6. attēlā redzamā kompleksā aizvietošanas shēma ir viegli pārveidojama dažādu trīsfāžu īsslēgumu aprēķiniem, **izņemot vispārīgas šķērsnesimetrijas gadījumu ($0 < \dot{Z}_{KA} \neq \dot{Z}_{KB} \neq \dot{Z}_{KC} < \infty \Omega$) un vienfāzes īsslēgumus, par kuriem aprakstīts 6.1.4. apakšpunktā.**

6.1.3. Divfāžu īsslēgumi

Turpinājumā pāriesim pie īsslēgumiem starp divām fāzēm (literatūrā reizēm apzīmēts $K^{(2)}$ vai divfāžu īsslēgumam ar saiti uz zemi $K_{1,1}$). Divfāžu īsslēgumu gadījumos par īpašo jeb aprēķina fāzi visizdevīgāk pieņemt nebojāto fāzi un robežnosacījumus pārveidot šīs fāzes simetriskajām komponentēm. Vispārīga divfāžu īsslēguma analīzes shēma fāžu koordinātās parādīta 6.7. attēlā.



6.7. att. Divfāžu īsslēgumu analīzes shēma fāžu koordinātās.

Vispirms aplūkosim robežgadījumu, kurā radies metālisks divfāžu īsslēgums starp fāzēm B un C bez saites ar zemi ($\dot{Z}_{KB} = \dot{Z}_{KC} = 0 \Omega$, $\dot{Z}_{KA} = \dot{Z}_{KN} = \infty \Omega$). Šāda īsslēguma vietā, saprotams, ka A fāzē un īsslēguma neitrālē jeb saitē ar zemi īsslēguma strāvas praktiski neplūst ($\dot{I}_{KA} = \dot{I}_{KN} = 0 \text{ A}$), tādēļ, vispārīgā veidā izsakot neitrāles strāvu, iegūstams, ka $\dot{I}_{KA} + \dot{I}_{KB} + \dot{I}_{KC} = \dot{I}_{KN} = \dot{I}_{KB} + \dot{I}_{KC} = 0 \text{ A}$. Turklāt īsslēguma punktā spriegums jeb sprieguma kritums starp fāzēm B un C būs 0 V , jo $\dot{Z}_{KB} = \dot{Z}_{KC} = 0 \Omega$. No šiem apsvērumiem iespējams uzrakstīt metālisks divfāžu īsslēguma raksturīgos fāžu spriegumu un strāvu lielumus, kurus uzspiež īsslēguma veids un kuri jāievēro aprēķinā (literatūrā parasti nosaukti par robežnosacījumiem) [2], [14]:

$$\begin{cases} \dot{I}_{KA} = \dot{I}_{KA}^1 + \dot{I}_{KA}^2 + \dot{I}_{KA}^0 = 0 \text{ A.} \\ \dot{I}_{KB} + \dot{I}_{KC} = 0 \text{ A.} \\ \dot{U}_{KB} - \dot{U}_{KC} = 0 \text{ V.} \end{cases} \quad (6.33.)$$

Līdzīgi kā situācijās, kad radies trīsfāžu īsslēgums bez saites uz zemi, arī šajā gadījumā praktiski nav iespējama NS strāvas noslēgšanās ($\dot{I}_{KA}^0 \approx 0 \text{ A}$, $\dot{U}_{KA}^0 \approx 0 \text{ V}$), un no (6.33.) pirmā vienādojuma izriet, ka

$$\dot{I}_{KA}^1 = -\dot{I}_{KA}^2. \quad (6.34.)$$

Iespējams izteikt (6.33.) pēdējo vienādojumu ar A fāzes sprieguma simetriskajām komponentēm [2], [14]:

$$\begin{aligned} (\dot{a}^2 \dot{U}_{KA}^1 + \dot{a} \dot{U}_{KA}^2) - (\dot{a} \dot{U}_{KA}^1 + \dot{a}^2 \dot{U}_{KA}^2) &= 0 \text{ V} \Rightarrow \\ \dot{U}_{KA}^1 &= \dot{U}_{KA}^2. \end{aligned} \quad (6.35.)$$

Ievietojot (6.35.) vienādojumu sistēmas (6.9.) pirmo un otro vienādojumu, iegūst

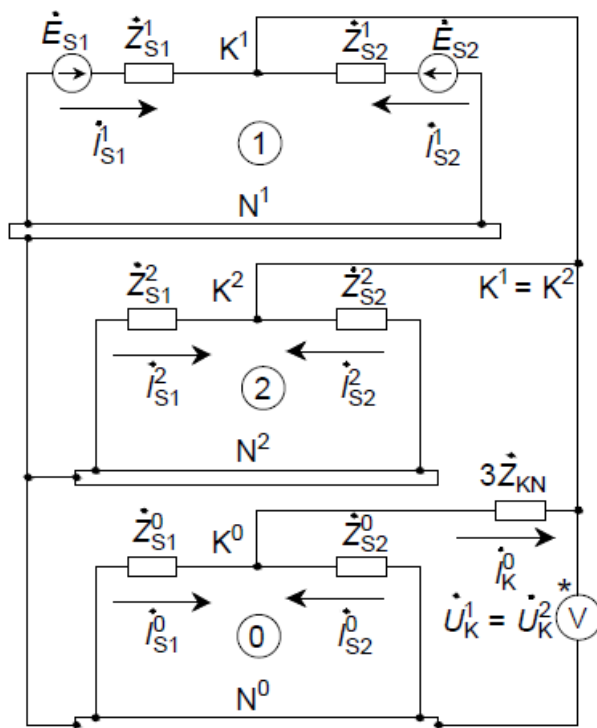
$\dot{E}_{KA\Sigma}^1 - \dot{I}_{KA}^1 \dot{Z}_{K\Sigma}^1 = 0 - \dot{I}_{KA}^2 \dot{Z}_{K\Sigma}^2$, kur, ievietojot vienādojumu (6.34.), iespējams izteikt A fāzes TS strāvu [6], [14]:

$$I_{KA}^1 = -I_{KA}^2 = \dot{E}_{KA\Sigma}^1 / (\dot{Z}_{K\Sigma}^1 + \dot{Z}_{K\Sigma}^2). \quad (6.36.)$$

Zinot I_{KA}^1 un I_{KA}^2 , var viegli aprēķināt \dot{U}_{KA}^1 , \dot{U}_{KA}^2 , izmantojot jau minētos vienādojumu sistēmas (6.9.) pirmos divus vienādojumus.

Ja tīklam ir sarežģīta konfigurācija un shēmas ekvivalentēšana būtu pārāk laikietilpīga, tad iespējams izmantot 6.12. attēlā redzamo komplekso aizvietošanas shēmu, no tās dzēšot NS aizvietošanas shēmu, zaru ar pretestību $3\dot{Z}_{KN} + \dot{Z}_{KF}/2$ un šuntējot pretestības $\dot{Z}_{KF}/2$. Var ievērot, ka vienādojumi (6.35.) un (6.36.) skaidri parāda, ka šādam īsslēguma veidam kompleksajā aizvietošanas shēmā TS un PS aizvietošanas shēmas jāsaslēdz paralēli.

Jāatzīmē, ka šādiem bojājumiem, līdzīgi kā trīsfāžu īsslēgumiem, bez kontakta ar zemi, kur teorētiski nav iespējama NS strāvas noslēgšanās (tiek pieņemts $\dot{Z}_{K\Sigma}^0 = \infty \Omega$ un $\dot{I}_K^0 = 0$ A), NS spriegums īsslēguma vietā atbilstoši literatūrā dotajai teorijai sanāk $\dot{U}_K^0 = -\dot{Z}_{K\Sigma}^0 \dot{I}_K^0 = -\infty \cdot 0 = \text{nenoteiktība}$ [2], [14]. Attiecīgi, pamatojoties uz nenozīmīgās faktiskās NS strāvas stipruma vērtību, NS komponenti parasti neņem vērā. Tomēr svarīgi atcerēties, ka realitātē NS pretestība nav bezgalīgi liela, kā jau bija minēts iepriekš. Attiecīgi nesimetriska īsslēguma gadījumā vienmēr ir vismaz niecīga NS strāva un $\dot{U}_K^0 \neq \text{nenoteiktība}$. Protams, NS strāvas neievērošana pati par sevi starpfāžu īsslēgumiem bez saites ar zemi nerada ievērojamu kļūdu fāžu strāvu vērtībām pat BV, bet NS sprieguma vērtība vismaz BV ir atkarīga no pārējā tīkla NS strāvas noslēgšanās ceļiem. Lai šo atkarību paskaidrotu, vispirms var minēt, ka, rodoties metāliskam divfāžu īsslēgumam uz zemi bez pārejas pretestībām, var iegūt augstāk analizētajam divfāžu īsslēgumam bez saites uz zemi līdzīgu robežnosacījumu, kurš tiks iegūts nedaudz vēlāk ($\dot{U}_{KA}^1 = \dot{U}_{KA}^2 = \dot{U}_{KA}^0 = \dot{U}_{KA}/3$) un no kura lielā mērā izriet arī 6.12. attēlā redzamais secību aizvietošanas shēmu paralēlslēgums. Vienlaikus divfāžu īsslēgumu bez tiešas saites ar zemi idejiski iespējams aplūkot kā divfāžu īsslēgumu uz zemi, bet ar ļoti lielu faktisko pārejas pretestību uz zemi \dot{Z}_{KN} , tādēļ var izmantot 6.12. attēlā redzamo komplekso aizvietošanas shēmu, vispirms šuntējot pretestības $\dot{Z}_{KF}/2$ (B un C fāzēs pārejas pretestības šajā analīzes piemērā nav) un zaram, kas sākas no mezgla K^0 , atstājot vienīgi pretestību $3\dot{Z}_{KN}$. Tomēr atšķirībā no parasta metāliska divfāžu īsslēguma uz zemi šoreiz TS un PS identiskais NS spriegums $\dot{U}_{KA}^0 = \dot{U}_{KA}^1 = \dot{U}_{KA}^2$ būs novērojams nevis starp NS aizvietošanas shēmas neitrāli N^0 un īsslēguma mezglu K^0 , bet starp NS neitrāli N^0 un TS un PS aizvietošanas shēmu kopīgo mezglu $K^1 = K^2$ (6.8. att.).



6.8. att. Kompleksā aizvietošanas shēma, rodoties metāliskam divfāžu īsslēgumam uz zemi ar pārejas pretestību vienīgi saitē uz zemi.

Balstoties uz šiem apsvērumiem un 6.8. attēlā redzamo shēmu, var secināt, ka NS spriegumu BV metāliskam divfāžu īsslēgumam bez tiešas saites ar zemi nosaka attiecība starp rezultējošo NS aizvietošanas shēmas pretestību $\dot{Z}_{K\Sigma}^0$, ko konkrētajā tīklā veido sistēmu pretestību \dot{Z}_{S1}^0 un \dot{Z}_{S2}^0 paralēlslēgums, un trīskāršoto pārejas pretestību uz zemi BV ($3\dot{Z}_{KN}$), ko veido izolācijas, kapacitīvā u. tml. vadītspēja uz zemi. Tātad tīklā, kur vismaz vienai no sistēmām jeb tīkla daļām kādā no bojājuma pusēm pastāv NS strāvas noslēgšanās ceļš ar salīdzinoši mazu pretestību relatīvi aprakstītajām vadītspējām (piemēram, transformators ar slēguma shēmu Y_0/Δ), sprieguma kritums $3\dot{I}_K^0\dot{Z}_{KN}$ būs daudzreiz lielāks par sprieguma kritumu $\dot{I}_K^0\dot{Z}_{K\Sigma}^0$ un BV, kā arī RUV novērojamais NS spriegums būs niecīgs. Savukārt tīklā, kur NS strāvas noslēgšanās ceļiem piemīt vienīgi lielas un ar pārejas pretestību BV salīdzināmas pretestības uz zemi, kā tas varētu būt tīklā ar izolētu neitrāli, tad arī minētie sprieguma kritumi var kļūt samērojami un NS spriegums vismaz BV varētu būt vienāds ar vērā ņemamu daļu no sprieguma $\dot{U}_{KA}^1 = \dot{U}_{KA}^2$. Vienlaikus saprotams, ka pat tīklā ar izolētu neitrāli abās bojājuma pusēs tīkla elementiem piemīt līdzīgas vadītspējas, kuras, ignorējot salīdzinoši niecīgās tīkla elementu aizvietošanas shēmu garenvirziena pretestības, summējas un tādā veidā ievērojami samazina $\dot{Z}_{K\Sigma}^0$ salīdzinājumā ar BV esošo vadītspēju ekvivalento pretestību \dot{Z}_{KN} . Tādēļ praktiskos aprēķinos pat tīklos ar izolētu neitrāli var sagaidīt, ka, neskatoties uz to, ka $\dot{U}_K^0 \neq$ nenoteiktība, NS sprieguma komponentes neņemšana vērā, rodoties nesimetriskiem īsslēgumiem bez tiešas saites uz zemi, neradīs ievērojamas kļūdas.

Diametrāli pretēja situācija ir, izveidojoties īsslēgumiem uz zemi tīklos ar izolētu neitrāli. Neskatoties uz to, ka, rodoties metāliskam divfāžu īsslēgumam uz zemi tīklā ar izolētu neitrāli, pirmajā brīdī var šķist, ka, salīdzinot ar fāžu strāvām, mazās strāvas NS

komponentes dēļ var neņemt vērā arī sprieguma NS komponenti, tomēr šāds pieņēmums var novest pie vērā ņemamām kļūdām aprēķinātajos fāžu spriegumos gan BV, gan RUV!

Šī apgalvojuma pamatojumam var atgriezties pie 6.8. attēlā ietvertās aizvietošanas shēmas, kurā redzams, ka mazas neitrāles pārejas pretestības \dot{Z}_{KN} gadījumā sprieguma kritums $3\dot{I}_K^0\dot{Z}_{KN}$ būs daudzkārt mazāks nekā pārējā tīkla vadītspējās uz zemi, kuras šajā shēmā nosacīti aizvieto ekvivalentās S1 un S2 NS pretestības. No tā izriet, ka BV jeb starp punktiem K_0 un N_0 pastāvēs spriegums $\dot{U}_{KA}^0 \approx \dot{U}_{KA}^1 = \dot{U}_{KA}^2$. Atliek iztēloties sistēmu S1 un S2 pretestību vietā, piemēram, bojātās līnijas posmus atainojošas II veida aizvietošanas shēmas, lai saprastu, kaniecīgās NS strāvas dēļ spriegumu kritumi garenvirzienu pretestībās būs nenozīmīgi, salīdzinot ar sprieguma kritumiem vadītspēju ekvivalentajās pretestībās, un tā rezultātā NS spriegums gan šādas bojātās līnijas abos galos, gan daļā no pārējā tīkla būs tuvs BV novērojamam jeb līdz pat trešdaļai no nebojātās fāzes sprieguma.

Otrs robežgadījums ir metālisks divfāžu īsslēgums uz zemi fāzēs B un C (6.7. attēls ar pārejas pretestībām $\dot{Z}_{KB} = \dot{Z}_{KC} = \dot{Z}_{KN} = 0 \Omega$, $\dot{Z}_{KA} = \infty \Omega$). Arī šādam īsslēgumam BV A fāzē strāva neplūdis, bet atšķirībā no iepriekšējā īsslēguma veida bojātās fāzes tiešā veidā savienotas ar zemi, kurai tiek pieņemts potenciāls 0 V, un līdz ar to arī šajās fāzēs spriegums būs 0 V. No minētajiem apsvērumiem iespējams uzrakstīt robežnosacījumus metālisksam divfāžu īsslēgumam uz zemi [2], [14]:

$$\begin{cases} \dot{I}_{KA} = \dot{I}_{KA}^1 + \dot{I}_{KA}^2 + \dot{I}_{KA}^0 = 0 \text{ A.} \\ \dot{U}_{KB} = 0 \text{ V.} \\ \dot{U}_{KC} = 0 \text{ V.} \end{cases} \quad (6.37.)$$

Ievietojot (6.37.) pēdējos divus vienādojumus (6.4.) pirmajā formā, viegli iegūt, ka A fāzes sprieguma simetriskās komponentes būs vienādas [2], [14]:

$$\dot{U}_{KA}^1 = \dot{U}_{KA}^2 = \dot{U}_{KA}^0 = \frac{1}{3} \dot{U}_{KA}. \quad (6.38.)$$

Turpmākajam risinājumam lietderīgi pārveidot vienādojumu sistēmas (6.9.) pēdējos divus vienādojumus, lai tajos būtu izteiktas PS un NS strāvas, un tad ievietot šajos vienādojumos (6.38.):

$$\begin{cases} \dot{U}_K^1 = \dot{E}_{K\Sigma} - \dot{Z}_{K\Sigma}^1 \dot{I}_K^1. \\ \dot{I}_K^2 = -\dot{U}_K^2 / \dot{Z}_{K\Sigma}^2 = -\dot{U}_K^1 / \dot{Z}_{K\Sigma}^2. \\ \dot{I}_K^0 = -\dot{U}_K^0 / \dot{Z}_{K\Sigma}^0 = -\dot{U}_K^1 / \dot{Z}_{K\Sigma}^0. \end{cases} \quad (6.39.)$$

Ievietojot (6.39.) pēdējos divus vienādojumus robežnosacījumu (6.37.) pirmajā vienādojumā, iespējams izteikt A fāzes sprieguma TS komponenti atkarībā no strāvas TS komponentes formā:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{KA}^1 - (\dot{U}_{KA}^1 / \dot{Z}_{K\Sigma}^2) - (\dot{U}_{KA}^1 / \dot{Z}_{K\Sigma}^0) &= 0 \text{ A} \Rightarrow \\ \dot{U}_{KA}^1 &= \dot{I}_{KA}^1 \dot{Z}_{K\Sigma}^2 \dot{Z}_{K\Sigma}^0 / (\dot{Z}_{K\Sigma}^2 + \dot{Z}_{K\Sigma}^0). \end{aligned} \quad (6.40.)$$

Pielīdzinot (6.40.) vienādojumu un (6.39.) pirmo vienādojumu, iespējams iegūt formulu aprēķina (šeit – A) fāzes strāvas TS komponentes analītiskam aprēķinam [2], [14]:

$$\dot{E}_{KA\Sigma}^1 - \dot{Z}_{K\Sigma}^1 \dot{I}_{KA}^1 = \dot{I}_{KA}^1 \dot{Z}_{K\Sigma}^2 \dot{Z}_{K\Sigma}^0 / (\dot{Z}_{K\Sigma}^2 + \dot{Z}_{K\Sigma}^0) \Rightarrow$$

$$\dot{I}_{KA}^1 = \frac{\dot{E}_{KA\Sigma}^1}{\dot{Z}_{K\Sigma}^1 + \frac{\dot{Z}_{K\Sigma}^2 \dot{Z}_{K\Sigma}^0}{\dot{Z}_{K\Sigma}^2 + \dot{Z}_{K\Sigma}^0}}. \quad (6.41.)$$

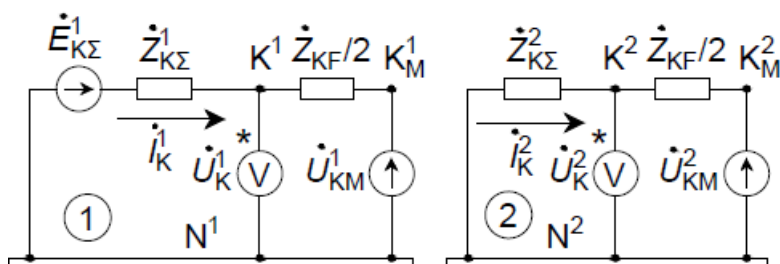
Ievietojot (6.40.) vienādojumu sistēmas (6.39.) pēdējos divos vienādojumos, iespējams izteikt A fāzes strāvas PS un NS komponentes no iepriekš aprēķinātas TS komponentes [2], [14]:

$$\dot{I}_{KA}^2 = -\dot{U}_{KA}^2 / \dot{Z}_{K\Sigma}^2 = -\dot{U}_{KA}^1 / \dot{Z}_{K\Sigma}^2 = -\dot{I}_{KA}^1 \dot{Z}_{K\Sigma}^0 / (\dot{Z}_{K\Sigma}^2 + \dot{Z}_{K\Sigma}^0), \quad (6.42.)$$

$$\dot{I}_{KA}^0 = -\dot{U}_{KA}^0 / \dot{Z}_{K\Sigma}^0 = -\dot{U}_{KA}^1 / \dot{Z}_{K\Sigma}^0 = -\dot{I}_{KA}^1 \dot{Z}_{K\Sigma}^2 / (\dot{Z}_{K\Sigma}^2 + \dot{Z}_{K\Sigma}^0). \quad (6.43.)$$

Zinot A fāzes strāvas simetriskās komponentes īsslēguma punktā, iespējams noteikt īsslēguma punkta A fāzēs sprieguma simetriskās komponentes ar vienādojumu sistēmas (6.9.) palīdzību. Ja tīkla konfigurācija ir tik sarežģīta, ka aizvietošanas shēmu manuāla vienkāršošana būs pārāk laikietilpīga, tad iespējams aprēķināt režīma parametrus 6.12. attēlā parādītajai kompleksajai aizvietošanas shēmai, iepriekš šuntējot pretestības $\dot{Z}_{KF}/2$ un $3\dot{Z}_{KN} + (\dot{Z}_{KF}/2)$. Arī divfāžu īsslēgumam uz zemi no (6.38.) un (6.41.) var secināt, ka kompleksās aizvietošanas shēmas iegūšanai secību aizvietošanas shēmas jāslēdz paralēli, kas atbilst 6.12. attēlā redzamajai shēmai.

Turpinājumā tiks aplūkoti divfāžu īsslēgumi ar pārejas pretestībām, sākot ar divfāžu īsslēgumu bez tieša kontakta ar zemi starp fāzēm B un C (atbilstoši 6.7. attēlam ar pārejas pretestībām $0 < \dot{Z}_{KB} = \dot{Z}_{KC} = \dot{Z}_{KF}/2 < \infty \Omega$, $\dot{Z}_{KA} = \dot{Z}_{KN} = \infty \Omega$, kur ar \dot{Z}_{KF} apzīmēta kopējā pārejas pretestība starp fāzēm). Šādam īsslēgumam BV A fāzē un neitrālē īsslēguma strāvas praktiski neplūst ($\dot{I}_{KA} = \dot{I}_{KN} = 0$ A), tādēļ, izsakot īsslēguma neitrāles strāvu, joprojām iegūstams, ka īsslēgto fāžu strāvas ir vienādas pēc moduļa un pretēji vērstas ($\dot{I}_{KA} + \dot{I}_{KB} + \dot{I}_{KC} = \dot{I}_{KN} = \dot{I}_{KB} + \dot{I}_{KC} = 0$ A). Toties atšķirībā no metāliska īsslēguma spriegumu starpība īsslēguma punktā K starp fāzēm B un C nebūs nulle, jo starp tām pastāv pārejas pretestība \dot{Z}_{KF} . Tomēr iespējams nosacīti modificēt analīzes shēmu, ieslēdzot arī A fāzē pretestību $\dot{Z}_{KF}/2$ (kā 6.10. attēlā, bet bez saites ar zemi), kas nerada analīzes shēmas režīma izmaiņas, jo $\dot{I}_{KA} = 0$ A $\Rightarrow \dot{I}_{KA}(\dot{Z}_{KF}/2) = 0$ V [14]. Tas ļauj pārnest analizējamo punktu no faktiskās īsslēguma vietas (punkta K) uz metāliska īsslēguma punktu K_M , jo visās fāzēs tagad ir vienādas jeb simetriskas pretestības un tās var slēgt virknē ar simetrisko tīkla daļu atainojošajiem TS un PS rezultējošo shēmu ekvivalentiem (6.9. att.).



6.9. att. Divfāžu īsslēguma modificētās rezultējošās TS un PS aizvietošanas shēmas gadījumā, ja starp īsslēgtajām fāzēm pastāv pārejas pretestība \dot{Z}_{KF} .

Turpmākai analīzei nepieciešami vienādojumi metāliskā īsslēguma punkta īpašās fāzes sprieguma simetriskajām komponentēm:

$$\begin{cases} \dot{U}_{KM}^1 = \dot{E}_{K\Sigma}^1 - (\dot{Z}_{K\Sigma}^1 + \dot{Z}_{KF}/2)i_K^1, \\ \dot{U}_{KM}^2 = \dot{E}_{K\Sigma}^2 - (\dot{Z}_{K\Sigma}^2 + \dot{Z}_{KF}/2)i_K^2 = 0 - (\dot{Z}_{K\Sigma}^2 + \dot{Z}_{KF}/2)i_K^2, \end{cases} \quad (6.44.)$$

kur $\dot{U}_{KM}^1, \dot{U}_{KM}^2$ – metāliskā īsslēguma punkta aprēķina fāzes sprieguma TS un PS komponentes, V;

\dot{Z}_{KF} – pilnā kopējā pārejas pretestība starp īsslēgtajām fāzēm divfāžu īsslēguma vietā, Ω ;

Ņemot vērā, ka arī metāliska īsslēguma punktā A fāzē un neitrālē plūstošās strāvas būs praktiski 0 A, iespējams uzrakstīt robežnosacījumus metāliskā īsslēguma punktam K_M :

$$\begin{cases} \dot{I}_{KA} = \dot{I}_{KA}^1 + \dot{I}_{KA}^2 + \dot{I}_{KA}^0 = 0 \text{ A}, \\ \dot{I}_{KB} + \dot{I}_{KC} = 0 \text{ A}, \\ \dot{U}_{KMB} - \dot{U}_{KMC} = 0 \text{ V}, \end{cases} \quad (6.45.)$$

kur $\dot{U}_{KMB}, \dot{U}_{KMC}$ – metāliskā īsslēguma punkta B un C fāzes spriegums, V.

No (6.45.) izriet, ka joprojām ir spēkā (6.34.), kas nosaka, ka $\dot{I}_{KA}^1 = -\dot{I}_{KA}^2$ un modificēta (6.35.) forma:

$$\dot{U}_{KMA}^1 = \dot{U}_{KMA}^2. \quad (6.46.)$$

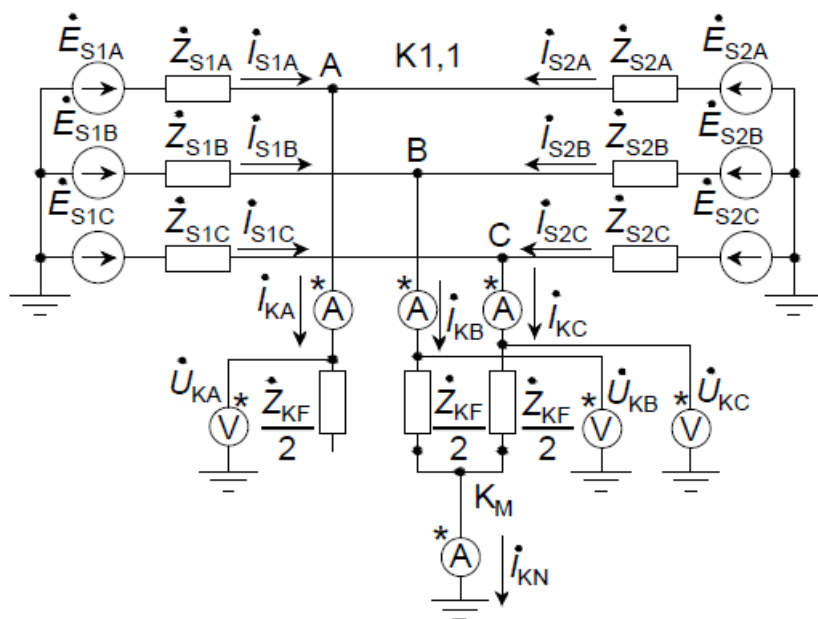
Attiecīgi iespējams ievietot (6.46.) vienādojumus (6.44.) un, ievērojot (6.34.), izteikt A fāzes strāvas TS komponentes analītiskā aprēķina formulu [14]:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{KA\Sigma}^1 - (\dot{Z}_{K\Sigma}^1 + \dot{Z}_{KF}/2)\dot{I}_{KA}^1 &= -(\dot{Z}_{K\Sigma}^2 + \dot{Z}_{KF}/2)\dot{I}_{KA}^2 = (\dot{Z}_{K\Sigma}^2 + \dot{Z}_{KF}/2)\dot{I}_{KA}^1 \Rightarrow \\ \dot{I}_{KA}^1 &= -\dot{I}_{KA}^2 = \dot{E}_{KA\Sigma}^1 / (\dot{Z}_{KF} + \dot{Z}_{K\Sigma}^1 + \dot{Z}_{K\Sigma}^2). \end{aligned} \quad (6.47.)$$

Zinot īpašās fāzes īsslēguma strāvas simetriskās komponentes, iespējams aprēķināt sprieguma simetriskās komponentes metāliskā īsslēguma punktā $\dot{U}_{KMA}^1, \dot{U}_{KMA}^2$ un pieskaitīt tiem sprieguma kritumus $\dot{I}_{KA}^1(\dot{Z}_{KF}/2)$ un $\dot{I}_{KA}^2(\dot{Z}_{KF}/2)$ vai uzreiz noteikt patiesā īsslēguma punkta K sprieguma simetriskās komponentes, izmantojot (6.9.) pirmo un otro vienādojumu. Ja tīkla konfigurācija ir tik sarežģīta, ka aizvietošanas shēmu manuāla vienkāršošana būs pārāk laikietilpīga, iespējams aprēķināt režīma parametrus 6.12. attēlā parādītajai kompleksajai aizvietošanas shēmai, iepriekš no tās izņemot NS aizvietošanas shēmu, kuras neņemšana vērā, kā jau

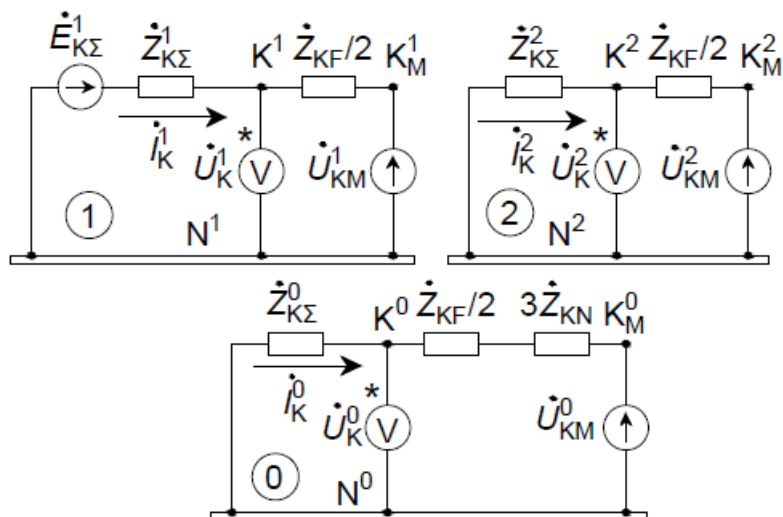
paskaidrots iepriekš, visbiežāk neradīs vērā ņemamas aprēķinu rezultātu kļūdas šādu īsslēgumu gadījumos.

Pēdējais no analizējamajiem divfāžu īsslēgumiem ir divfāžu īsslēgums starp fāzēm B un C un zemi ar pārejas pretestībām gan fāzēs, gan neitrālē jeb saitē uz zemi (6.7. attēls ar pārejas pretestībām $0 < \dot{Z}_{KB} = \dot{Z}_{KC} = \dot{Z}_{KF}/2 < \infty \Omega$, $0 < \dot{Z}_{KN} < \infty \Omega$, $\dot{Z}_{KA} = \infty \Omega$). Šādam īsslēgumam joprojām BV A fāzē strāva praktiski neplūdis. Tomēr atšķirībā no metāliska divfāžu īsslēguma uz zemi B un C fāzēs spriegums nebūs 0 V, jo no zemes līdz punktam K pastāv sprieguma kritumi: $\dot{I}_{KB}\dot{Z}_{KB}$, $\dot{I}_{KC}\dot{Z}_{KC}$, $\dot{I}_{KN}\dot{Z}_{KN}$ (atbilstoši 6.7. att.). Šajā gadījumā arī ir iespējams A fāzē ieslēgt pusi no pārejas pretestības starp B un C fāzēm ($\dot{Z}_{KF}/2$), jo $\dot{I}_{KA} = 0 \text{ A} \Rightarrow \dot{I}_{KA}(\dot{Z}_{KF}/2) = 0 \text{ V}$. Tātad analogiski iepriekšējai divfāžu īsslēguma analīzei ir iespējams ieviest $\dot{Z}_{KF}/2$ TS un PS rezultējošajās aizvietošanas shēmās kā virknes pretestību, bet šoreiz tas jādara arī NS rezultējošajā aizvietošanas shēmā, jo iespējama NS strāvas plūšana, un katrā fāzē potenciāli rodas sprieguma kritums $\dot{I}_{KA}^0(\dot{Z}_{KF}/2)$. Papildus tam tagad arī neitrālē jeb saitē uz zemi ir īsslēguma pārejas pretestība \dot{Z}_{KN} , ko iespējams ieviest NS rezultējošajā aizvietošanas shēmā, ieslēdzot to virknē ar pretestību \dot{Z}_{KS}^0 , bet, līdzīgi kā ar transformatora neitrālē ieslēgtu pretestību, tās vērtību vispirms trīskāršo, lai ievērotu visu trīs fāžu NS strāvu radītos sprieguma kritumus. Šādā veidā var pāriet no analīzes faktiskajā īsslēguma punktā K uz metāliska divfāžu īsslēguma uz zemi analīzi punktā K_M (skatīt 6.10. attēlu, kur saites ar zemi pārejas pretestība \dot{Z}_{KN} jau nosacīti pārnests uz tīkla NS aizvietošanas shēmu).



6.10. att. Divfāžu īsslēguma uz zemi ar pārejas pretestībām modificētā analīzes shēma fāžu koordinātās.

Šādai pārejai uz metāliska divfāžu īsslēgumu uz zemi punktu atbilst 6.11. attēlā parādītās modificētās rezultējošās secību aizvietošanas shēmas.



6.11. att. Divfāžu īsslēguma uz zemi modificētās rezultējošās secību aizvietošanas shēmas gadījumā, ja bojātās fāzēs un neitrālē jeb saitē uz zemi ir pārejas pretestības.

Turpmākam izvedumam nepieciešami vienādojumi, kas ļauj noteikt metāliskā īsslēguma punkta aprēķina fāzes sprieguma simetriskās komponentes atbilstoši 6.11. attēlam:

$$\begin{cases} \dot{U}_{KM}^1 = \dot{E}_{K\Sigma}^1 - (\dot{Z}_{K\Sigma}^1 + \dot{Z}_{KF}/2) \dot{i}_K^1 \\ \dot{U}_{KM}^2 = 0 - (\dot{Z}_{K\Sigma}^2 + \dot{Z}_{KF}/2) \dot{i}_K^2 \\ \dot{U}_{KM}^0 = 0 - (\dot{Z}_{K\Sigma}^0 + 3\dot{Z}_{KN} + \dot{Z}_{KF}/2) \dot{i}_K^0 \end{cases} \quad (6.48.)$$

Metāliska īsslēguma punktam K_M iespējams uzrakstīt šādus robežnosacījumus:

$$\begin{cases} \dot{i}_{KA} = \dot{i}_{KA}^1 + \dot{i}_{KA}^2 + \dot{i}_{KA}^0 = 0 \text{ A.} \\ \dot{U}_{KMB} = 0 \text{ V.} \\ \dot{U}_{KMC} = 0 \text{ V.} \end{cases} \quad (6.49.)$$

Attiecīgi joprojām ir spēkā (6.38.), bet šoreiz punktam K_M :

$$\dot{U}_{KMA}^1 = \dot{U}_{KMA}^2 = \dot{U}_{KMA}^0 = \dot{U}_{KMA}/3, \quad (6.50.)$$

kur \dot{U}_{KMA} – metāliskā īsslēguma punkta A fāzes spriegums, V;

$\dot{U}_{KMA}^1, \dot{U}_{KMA}^2, \dot{U}_{KMA}^0$ – metāliskā īsslēguma punkta A fāzes sprieguma TS, PS un NS komponentes, V;

Analoģiski iepriekš veiktajai metāliska divfāžu īsslēguma uz zemi analīzei, izteiksim (6.48.) otro un trešo vienādojumu, vienlaikus strāvām ievērojot (6.50.):

$$\begin{cases} \dot{U}_{KM}^1 = \dot{E}_{K\Sigma}^1 - (\dot{Z}_{K\Sigma}^1 + \dot{Z}_{KF}/2) \dot{i}_K^1 \\ \dot{i}_K^2 = -\dot{U}_{KM}^2 / (\dot{Z}_{K\Sigma}^2 + \dot{Z}_{KF}/2) = -\dot{U}_{KM}^1 / (\dot{Z}_{K\Sigma}^2 + \dot{Z}_{KF}/2) \\ \dot{i}_K^0 = -\dot{U}_{KM}^0 / (\dot{Z}_{K\Sigma}^0 + 3\dot{Z}_{KN} + \dot{Z}_{KF}/2) = -\dot{U}_{KM}^1 / (\dot{Z}_{K\Sigma}^0 + 3\dot{Z}_{KN} + \dot{Z}_{KF}/2) \end{cases} \quad (6.51.)$$

Ievietojot (6.51.) pēdējos divus vienādojumus (6.49.), iespējams izteikt aprēķina fāzes TS spriegumu formā:

$$\dot{i}_{KA}^1 - \dot{U}_{KMA}^1 / (\dot{Z}_{K\Sigma}^2 + \dot{Z}_{KF}/2) - \dot{U}_{KMA}^1 / (\dot{Z}_{K\Sigma}^0 + 3\dot{Z}_{KN} + \dot{Z}_{KF}/2) = 0 \text{ A} \Rightarrow$$

$$\dot{U}_{KMA}^1 = \dot{I}_{KA}^1 \frac{(\dot{Z}_{K\Sigma}^2 + \dot{Z}_{KF}/2)(\dot{Z}_{K\Sigma}^0 + 3\dot{Z}_{KN} + \dot{Z}_{KF}/2)}{(\dot{Z}_{K\Sigma}^2 + \dot{Z}_{KF}/2) + (\dot{Z}_{K\Sigma}^0 + 3\dot{Z}_{KN} + \dot{Z}_{KF}/2)}. \quad (6.52.)$$

Pielīdzinot (6.51.) pirmo vienādojumu un (6.52.), iespējams izteikt formulu īpašās fāzes TS strāvas analītiskam aprēķinam:

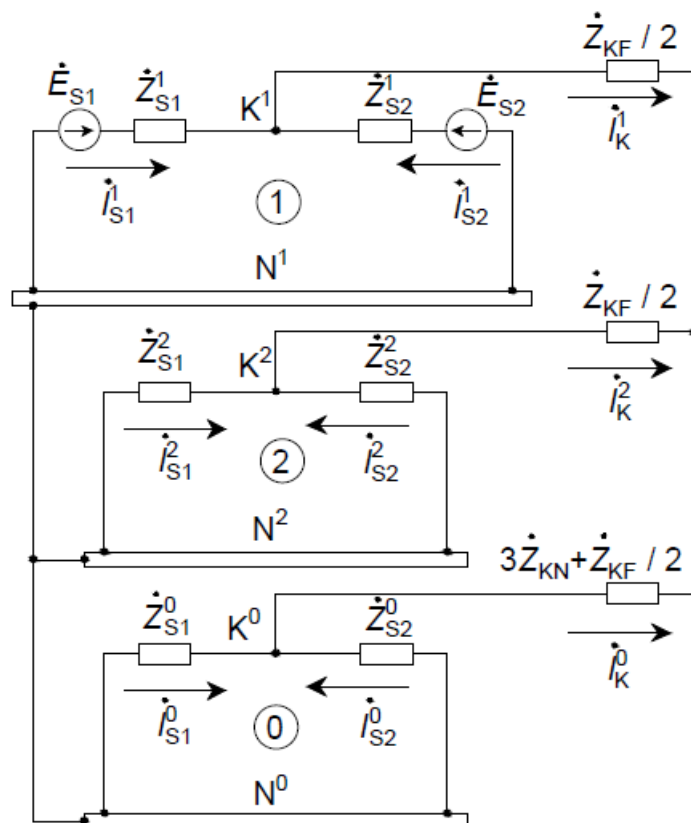
$$\begin{aligned} \dot{E}_{KA\Sigma}^1 - (\dot{Z}_{K\Sigma}^1 + \dot{Z}_{KF}/2)\dot{I}_{KA}^1 &= \dot{I}_{KA}^1 \frac{(\dot{Z}_{K\Sigma}^2 + \dot{Z}_{KF}/2)(\dot{Z}_{K\Sigma}^0 + 3\dot{Z}_{KN} + \dot{Z}_{KF}/2)}{(\dot{Z}_{K\Sigma}^2 + \dot{Z}_{KF}/2) + (\dot{Z}_{K\Sigma}^0 + 3\dot{Z}_{KN} + \dot{Z}_{KF}/2)} \Rightarrow \\ \dot{I}_{KA}^1 &= \frac{\dot{E}_{KA\Sigma}^1}{\dot{Z}_{K\Sigma}^1 + (\dot{Z}_{KF}/2) + \frac{(\dot{Z}_{K\Sigma}^2 + \dot{Z}_{KF}/2)(\dot{Z}_{K\Sigma}^0 + 3\dot{Z}_{KN} + \dot{Z}_{KF}/2)}{(\dot{Z}_{K\Sigma}^2 + \dot{Z}_{KF}/2) + (\dot{Z}_{K\Sigma}^0 + 3\dot{Z}_{KN} + \dot{Z}_{KF}/2)}}. \end{aligned} \quad (6.53.)$$

Ievietojot (6.51.) otrajā un trešajā vienādojumā (6.52.), var izteikt īpašās fāzes PS un NS strāvu aprēķina formulas atkarībā no strāvas TS komponentes:

$$\dot{I}_{KA}^2 = -\frac{\dot{U}_{KMA}^1}{(\dot{Z}_{K\Sigma}^2 + \dot{Z}_{KF}/2)} = -\dot{I}_{KA}^1 \frac{(\dot{Z}_{K\Sigma}^0 + 3\dot{Z}_{KN} + \dot{Z}_{KF}/2)}{(\dot{Z}_{K\Sigma}^2 + \dot{Z}_{KF}/2) + (\dot{Z}_{K\Sigma}^0 + 3\dot{Z}_{KN} + \dot{Z}_{KF}/2)}. \quad (6.54.)$$

$$\dot{I}_{KA}^0 = -\frac{\dot{U}_{KMA}^1}{(\dot{Z}_{K\Sigma}^0 + 3\dot{Z}_{KN} + \dot{Z}_{KF}/2)} = -\dot{I}_{KA}^1 \frac{(\dot{Z}_{K\Sigma}^2 + \dot{Z}_{KF}/2)}{(\dot{Z}_{K\Sigma}^2 + \dot{Z}_{KF}/2) + (\dot{Z}_{K\Sigma}^0 + 3\dot{Z}_{KN} + \dot{Z}_{KF}/2)}. \quad (6.55.)$$

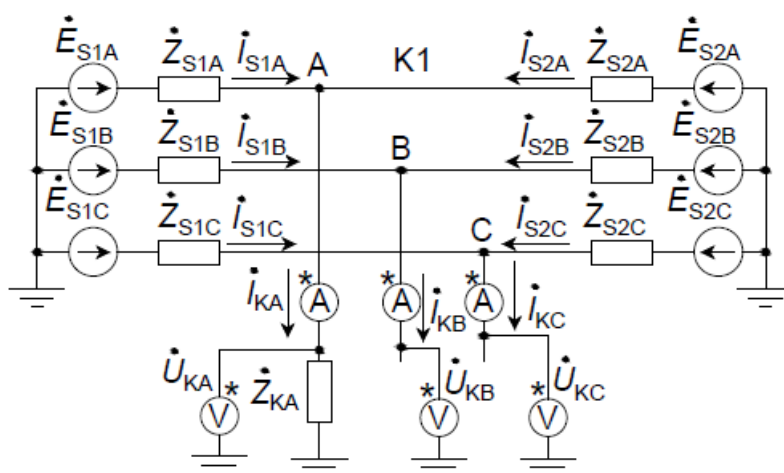
Attiecīgi pēc īpašās fāzes strāvu simetrisko komponentu aprēķina iespējams noteikt īpašās fāzes sprieguma simetriskās komponentes faktiskajā īsslēguma punktā, izmantojot vienādojumu sistēmu (6.9.), kas automātiski ļauj ievērot sprieguma kritumus pārejas pretestībās $\dot{Z}_{KF}/2$ un \dot{Z}_{KN} . Ja tīkla konfigurācija ir tik sarežģīta, ka aizvietošanas shēmu ekvivalentēšana jeb vienkāršošana būtu pārāk laikietilpīga, var veikt režīma parametru aprēķinu 6.12. attēlā redzamajai kompleksajai aizvietošanas shēmai. Iespējams izcelt to, kā šī aizvietošanas shēma atbilst modificētajām rezultējošajām secību aizvietošanas shēmām (6.11. att.) un augstāk izteiktajai TS strāvas aprēķina formulai.



6.12. att. Divfāžu īsslēguma uz zemi kompleksā aizvietošanas shēma, ja īsslēgtajās fāzēs ir pārejas pretestības $\dot{Z}_{KF}/2$ un neitrālē jeb saitē uz zemi pastāv pārejas pretestība \dot{Z}_{KN} [3].

6.1.4. Vienfāzes īsslēgumi

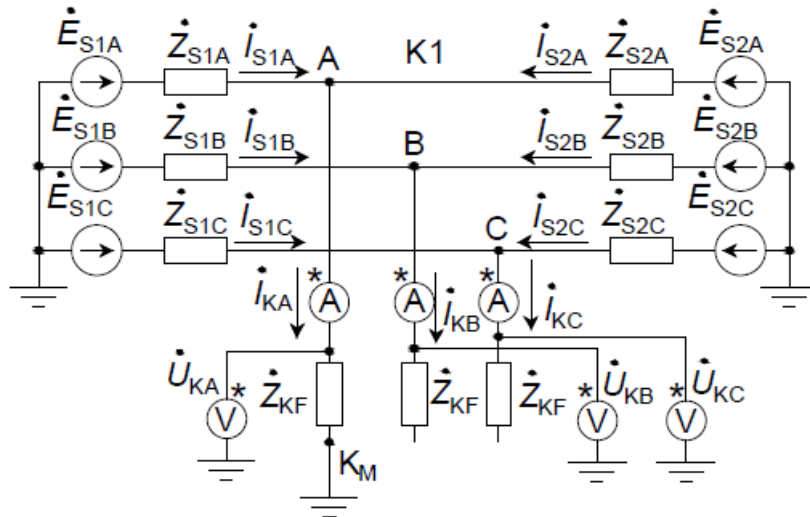
Turpmāk aplūkosim vienfāzes īsslēgumus (piemēram, A fāzes īsslēgums ar pārejas pretestībām $\dot{Z}_{KB} = \dot{Z}_{KC} = \infty \Omega$, $0 \leq \dot{Z}_{KA} < \infty \Omega$, $\dot{Z}_{KN} = 0 \Omega$), kuru analīzes shēma parādīta 6.13. attēlā. Vienfāzes īsslēguma gadījumā par īpašo jeb aprēķina fāzi izdevīgi pieņemt bojāto fāzi, kas šajā piemērā ir A fāze.



6.13. att. Vienfāzes īsslēguma analīzes shēma fāžu koordinātās.

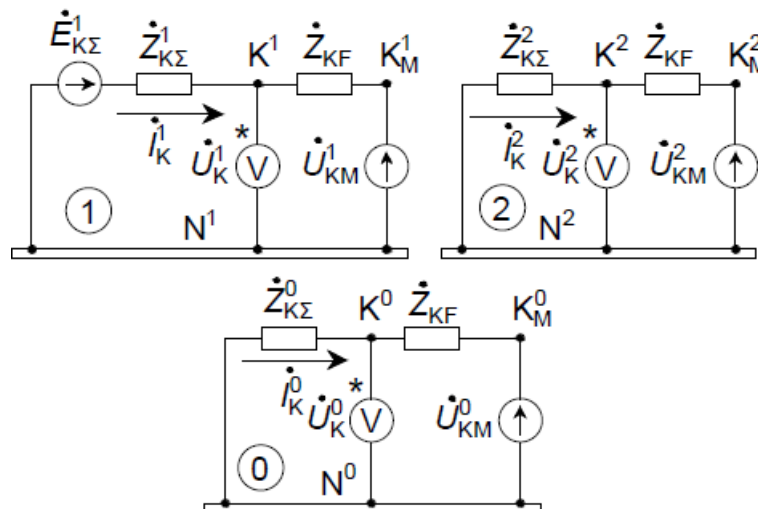
Uzreiz iespējams analizēt gadījumu, kurā bojātajā fāzē ir pārejas pretestība uz zemi. Apzīmēsim šo bojātās fāzes un neitrāles kopējo pārejas pretestību līdz zemei vispārīgā veidā kā īsslēgtās

fāzes pretestību \dot{Z}_{KF} : $0 \leq \dot{Z}_{KA} = \dot{Z}_{KF} < \infty \Omega$. Šādā gadījumā analīzes shēmā arī B un C fāzēs iespējams ieslēgt īsslēgtās fāzes pretestību \dot{Z}_{KF} , jo $\dot{I}_{KB} = 0 \text{ A} \Rightarrow \dot{I}_{KB}\dot{Z}_{KF} = 0 \text{ V}$, $\dot{I}_{KC} = 0 \text{ A} \Rightarrow \dot{I}_{KC}\dot{Z}_{KF} = 0 \text{ V}$ [14] un var izdalīt simetriskās fāžu pārejas pretestības \dot{Z}_{KF} secību rezultējošajās aizvietošanas shēmās kā virknes pretestības, tādā veidā pārejot pie metāliska vienfāzes īsslēguma analīzes punktā K_M (6.14. att.).



6.14. att. Vienfāzes īsslēguma uz zemi ar pārejas pretestību \dot{Z}_{KF} modificētā analīzes shēma fāžu koordinātās.

6.14. attēlā parādītajai analīzes pārejai no punkta K uz metāliska īsslēguma punktu K_M atbilstošās rezultējošās secību aizvietošanas shēmas parādītas 6.15. attēlā.



6.15. att. Vienfāzes īsslēguma uz zemi modificētās rezultējošās secību aizvietošanas shēmas, ja bojātajā fāzē ir pārejas pretestība \dot{Z}_{KF} .

Turpmākai analīzei nepieciešami vienādojumi metāliskā īsslēguma punkta aprēķina fāzes sprieguma simetriskajām komponentēm atbilstoši 6.15. attēlam:

$$\begin{cases} \dot{U}_{KM}^1 = \dot{E}_{K\Sigma}^1 - (\dot{Z}_{K\Sigma}^1 + \dot{Z}_{KF})i_K^1, \\ \dot{U}_{KM}^2 = \dot{E}_{K\Sigma}^2 - (\dot{Z}_{K\Sigma}^2 + \dot{Z}_{KF})i_K^2 = 0 - (\dot{Z}_{K\Sigma}^2 + \dot{Z}_{KF})i_K^2, \\ \dot{U}_{KM}^0 = \dot{E}_{K\Sigma}^0 - (\dot{Z}_{K\Sigma}^0 + \dot{Z}_{KF})i_K^0 = 0 - (\dot{Z}_{K\Sigma}^0 + \dot{Z}_{KF})i_K^0, \end{cases} \quad (6.56.)$$

kur \dot{Z}_{KF} – vienfāzes īsslēguma bojātās (aprēķina) fāzes un saites uz zemi kopējā pilnā pretestība, Ω .

Ievērojot, ka metāliska vienfāzes īsslēguma punktā K_M bojātās fāzes spriegums būs 0 V, jo tajā bojātā fāze metāliski pieslēgta zemei, un ka gan punktam K, gan K_M nebojāto fāžu strāvās $\dot{I}_{KB} = \dot{I}_{KC} = 0$ A, ir iespējams uzrakstīt šādus robežnosacījumus:

$$\begin{cases} \dot{I}_{KB} = 0 \text{ A.} \\ \dot{I}_{KC} = 0 \text{ A.} \\ \dot{U}_{KMA} = \dot{U}_{KMA}^1 + \dot{U}_{KMA}^2 + \dot{U}_{KMA}^0 = 0 \text{ V.} \end{cases} \quad (6.57.)$$

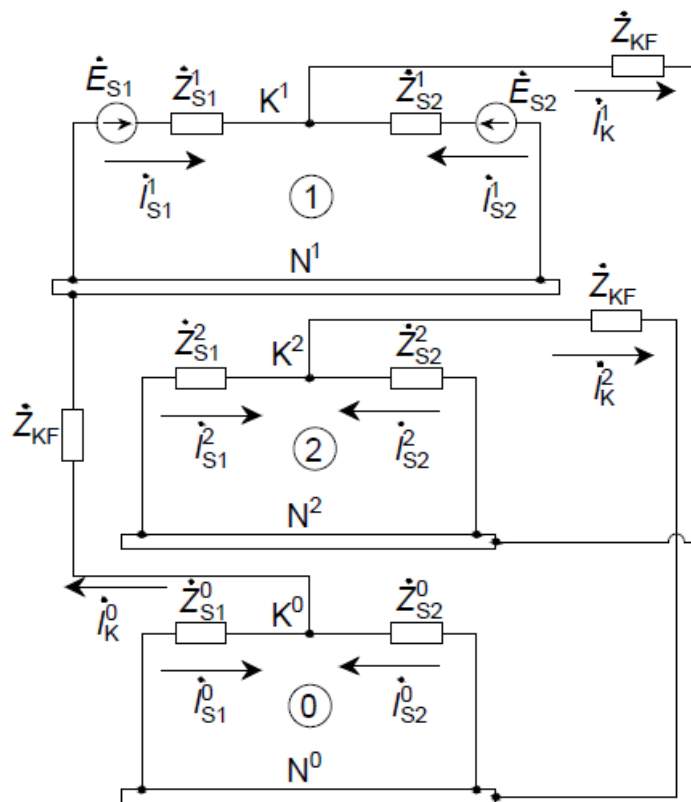
Īpašās fāzes strāvas simetriskās komponentes iespējams izteikt analogiski sprieguma komponentēm (6.4.) sākuma formā, kas, ievietojot (6.57.), ļauj iegūt:

$$\dot{I}_{KA}^1 = \dot{I}_{KA}^2 = \dot{I}_{KA}^0 = \dot{I}_{KA}/3. \quad (6.58.)$$

Ievietojot (6.56.) vienādojumus (6.57.) pēdējā izteiksmē un ievērojot (6.58.), iespējams izteikt īpašās fāzes strāvas simetrisko komponentu aprēķina formulu [14]:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{KA\Sigma}^1 - (\dot{Z}_{K\Sigma}^1 + \dot{Z}_{KF})\dot{I}_{KA}^1 - (\dot{Z}_{K\Sigma}^2 + \dot{Z}_{KF})\dot{I}_{KA}^2 - (\dot{Z}_{K\Sigma}^0 + \dot{Z}_{KF})\dot{I}_{KA}^0 &= 0 \text{ V} \Rightarrow \\ \dot{I}_{KA}^1 = \dot{I}_{KA}^2 = \dot{I}_{KA}^0 &= \dot{E}_{KA\Sigma}^1 / (\dot{Z}_{K\Sigma}^1 + \dot{Z}_{K\Sigma}^2 + \dot{Z}_{K\Sigma}^0 + 3\dot{Z}_{KF}). \end{aligned} \quad (6.59.)$$

Īpašās fāzes sprieguma simetriskās komponentes var aprēķināt, izmantojot vienādojumu sistēmu (6.9.), kas uzreiz ļauj ievērot strāvas simetrisko komponentu $\dot{I}_{KA}^1 = \dot{I}_{KA}^2 = \dot{I}_{KA}^0$ radītos sprieguma kritumus pārejas pretestībā \dot{Z}_{KF} . Ja tīkla konfigurācija ir tik sarežģīta, ka aizvietošanas shēmu ekvivalentēšana būtu pārāk laikietilpīga, tad iespējams aprēķināt režīma parametrus 6.16. attēlā redzamajai kompleksajai aizvietošanas shēmai. No vienādojuma (6.58.) uzreiz redzams, ka, veidojot komplekso aizvietošanas shēmu vienfāzes īsslēgumiem, secību aizvietošanas shēmas jāslēdz virknē, lai nodrošinātu bojātās fāzes strāvas simetrisko komponentu vienādību, ko arī var redzēt 6.16. attēlā ietvertajā shēmā.



6.16. att. Vienfāzes īsslēguma A fāzē ar kopējo pārejas pretestību uz zemi \dot{Z}_{KF} kompleksā aizvietošanas shēma [3], [7].

Saprotams, ka, rodoties metāliskam vienfāzes īsslēgumam, analītiskam aprēķinam nav nepieciešama pāreja uz metālisko īsslēguma punktu un arī kompleksā aizvietošanas shēma kļūst vienkāršāka. Metāliska vienfāzes īsslēguma gadījumā īpašās fāzes strāvas simetriskās komponentes aprēķināmas ar (6.59.), ievietojot $\dot{Z}_{KF} = 0 \Omega$ [2], [17]:

$$\dot{i}_{KA}^1 = \dot{i}_{KA}^2 = \dot{i}_{KA}^0 = \dot{E}_{KA\Sigma}^1 / (\dot{Z}_{K\Sigma}^1 + \dot{Z}_{K\Sigma}^2 + \dot{Z}_{K\Sigma}^0). \quad (6.60.)$$

Īpašās fāzes sprieguma simetriskās komponentes BV joprojām nosaka saskaņā ar (6.9.). Analogiski, izmantojot šo komplekso aizvietošanas shēmu, arī jāievēro, ka $\dot{Z}_{KF} = 0 \Omega$, jeb jāšuntē zari, kuri satur šīs pretestības.

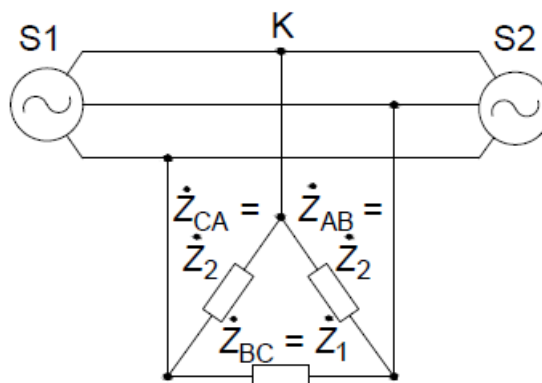
Rodoties vienfāzes īsslēgumiem tīklā ar izolētu neitrāli, aprēķina metodika principā nemainās, bet šādos gadījumos vienlīdz nozīmīgi ņemt vērā gan strāvas, gan sprieguma NS komponentes, jo saprotams, ka tīklam ar izolētu neitrāli rezultējošās NS aizvietošanas shēmas summārā pretestība $\dot{Z}_{K\Sigma}^0$ būs daudz lielāka par TS un PS rezultējošo aizvietošanas shēmu summārajām pretestībām. Tādēļ atbilstoši (6.60.) dažādo tīkla vadītspēju uz zemi ekvivalentās pretestības lielā mērā noteiks visu BV strāvas simetrisko komponentu vērtības. Šajās vadītspēju pretestībās radītais sprieguma kritums nodrošinās arī salīdzinoši ievērojamu NS spriegumu BV jeb starp mezgliem K^0 un N^0 , un, kā jau paskaidrots 6.1.3. apakšpunktā, ja tīkla neitrāle ir izolēta, arī RUV var sagaidīt sprieguma NS komponentes vērtību tuvu BV novērojamajai salīdzinoši niecīgo tīkla elementu aizvietošanas shēmu garenvirziena pretestību dēļ. Uzskaitīto iemeslu dēļ, analizējot vienfāzes īsslēgumus tīklos ar izolētu neitrāli, dažreiz analizē vienīgi NS aizvietošanas shēmu. Svarīgi arī atzīmēt, ka faktisko fāžu strāvu RUV precīzai noteikšanai

gadījumā, ja rodas vienfāzes īsslēgums tīklā ar izolētu neitrāli, ir jāievēro arī tīkla slodzes, jo to strāva var pat pārsniegt bojātās fāzes īsslēguma strāvu.

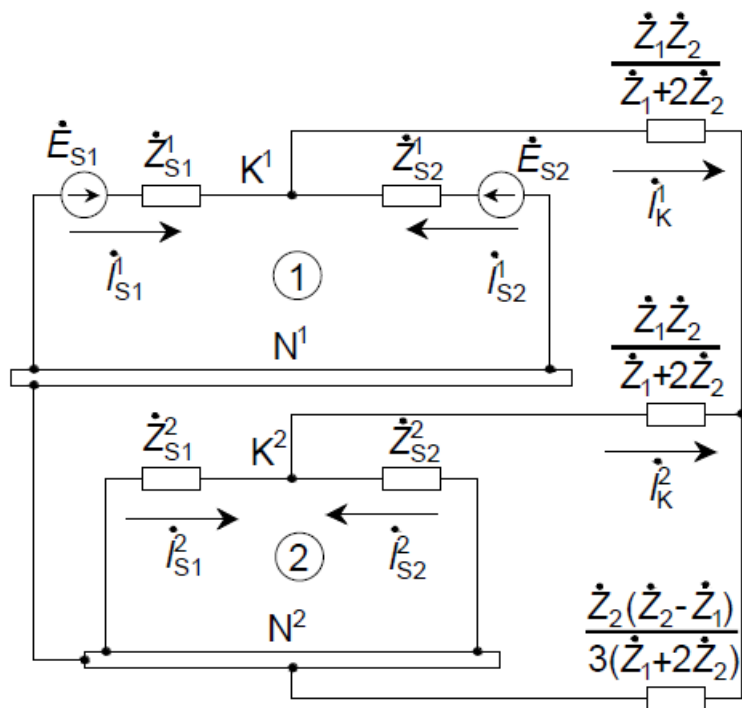
6.1.5. Nesimetriskas slodzes režīms

Nesimetriska slodzes režīma parametru aprēķinam, ja slodze saslēgta nesimetriskā zvaigznes slēgumā, iespējams izmantot 6.1.1.–6.1.4. apakšpunktā parādītās aizvietošanas shēmas un analītiskās formulas, pieņemot slodzes pieslēguma kopnes par nesimetrijas jeb nosacītu īsslēguma punktu K un pretestībām \dot{Z}_{KA} , \dot{Z}_{KB} , \dot{Z}_{KC} , \dot{Z}_{KN} piešķirot atbilstošās slodzes fāžu un neitrāles pretestību vērtības.

Ja starp sistēmām S1 un S2 ieslēgta nesimetriska slodze, kas saslēgta trīsstūra slēgumā, tad vispirms iespējams noteikt ekvivalentas zvaigznes slēguma fāžu pretestības atbilstoši šīs grāmatas 1. pielikumā ietvertajām formulām un tad izmantot 6.1.1.–6.1.4. apakšpunktā aprakstītās aprēķinu metodes. Savukārt, ja trīsstūra slēgumā atšķiras viena no starpfāžu pretestībām (piemēram, $0 \leq \dot{Z}_{AB} = \dot{Z}_{CA} \neq \dot{Z}_{BC} < \infty \Omega$, kur šīs pretestības vispārīgi apzīmētas kā $\dot{Z}_1 = \dot{Z}_{BC}$ un $\dot{Z}_2 = \dot{Z}_{AB} = \dot{Z}_{CA}$, kā tas parādīts 6.17. attēlā) var izmantot jau gatavu 6.6. attēlā redzamās trīsfāžu īsslēgumu kompleksās aizvietošanas shēmas modifikāciju (6.18. att.). Šajā piemērā kompleksās aizvietošanas shēmas režīma parametru aprēķina jeb īpašā fāze ir A fāze (tās aprēķina rezultātā iegūtu A fāzes strāvu un spriegumu simetriskās komponentes).



6.17. att. Nesimetriska, trīsstūrī saslēgta slodze starp sistēmām S1 un S2 [3].

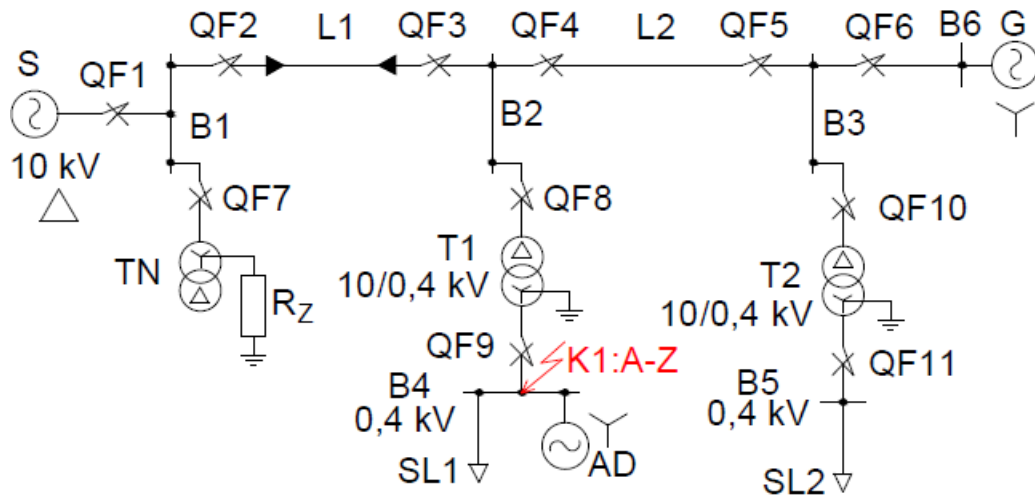


6.18. att. Nesimetriskas, trīsstūrī saslēgtas slodzes kompleksā aizvietošanas shēma [3].

Svarīgi minēt, ka 6.1. apakšnodaļā parādīto komplekso aizvietošanas shēmu struktūra kopumā nemainās, mainoties analizētā tīkla struktūrai no 6.1. attēlā redzamās uz sarežģītākām, t. i., princips, kādā tiek ievērotas nesimetrijas pārejas pretestības šķērsnesimetrijas vietā, un savstarpēji savienotas secību aizvietošanas shēmas saglabājas. Aprēķinot režīma parametrus lielākiem tīkliem, sarežģītākas kļūst vienīgi sistēmu S1 un S2 jeb tīkla simetriskās daļas aizvietošanas shēmas.

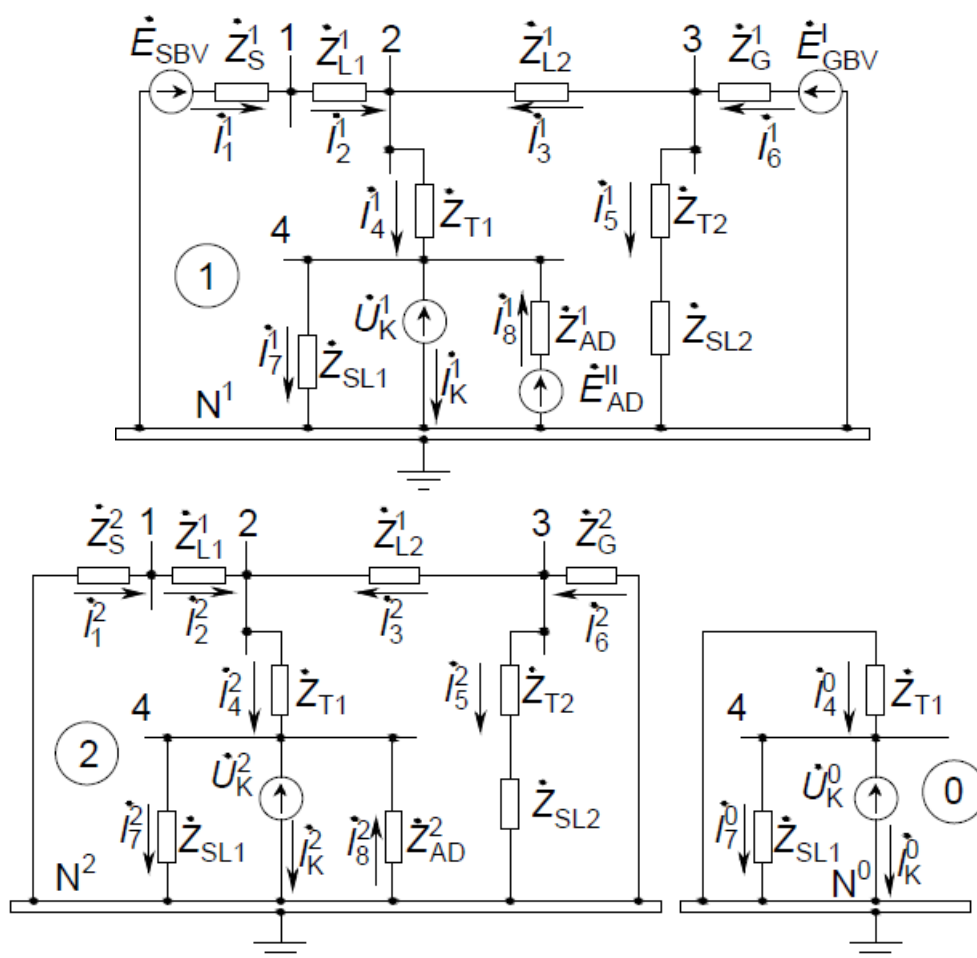
6.2. Pirmais elektriskās sistēmas režīma parametru aprēķina piemērs vienas šķērsnesimetrijas rašanās gadījumā ar analītisku risinājumu

Pirmajā režīma parametru aprēķina piemērā, rodoties vienai šķērsnesimetrijai, tiks parādīts analītisks risinājums šādam uzdevumam: aprēķināt fāžu spriegumus un strāvas BV un jaudas slēdzim QF8 piesaistīto aizsardzību nomērītos fāžu spriegumus un strāvas, kā arī uzzīmēt fāžu spriegumu un strāvu vektoru diagrammas BV un QF8 jeb RUV, izveidojoties A fāzes īsslēgumam uz pirmā aprēķinu piemēru tīkla kopnēm B4 (6.19. att.).



6.19. att. Vienfāzes īsslēguma uz pirmā aprēķinu piemēru tīkla kopnēm B4 režīma parametru aprēķina vienlīnijas izejas shēma.

Īsslēgtās fāzes kopējā pārejas pretestība uz zemi ir $Z_{KA} = 10 \Omega$. Dati par konkrētā tīkla elementu un slodzes režīma parametriem atrodami šīs grāmatas 9. pielikumā. Aprēķins jāveic īsslēguma sākuma momentam, pieņemot, ka tā rašanās brīdī sistēmas A fāzes sprieguma jeb EDS vektora leņķis ir 0° , t. i., atbilstoši slodzes režīma parametru aprēķina momentam. Analītiskam aprēķinam lietderīgi sastādīt atsevišķas secību aizvietošanas shēmas, kuras šim piemēram parādītas 6.20. attēlā. Šajā gadījumā, ņemot vērā īsslēguma elektrisko attālumu no ģenerators G īsslēguma sākumā nonāks pārejas režīmā. Tā kā īsslēgums radies tieši uz AD kopnēm, šis dzinējs TS aizvietošanas shēmā tiks ņemts vērā ar savu pret-EDS un statora fāzes pretestību. Tā kā slodze ir simetriska un ir ieslēgta ZS tīklā ar zemētu neitrāli un īsslēgums radies tieši šajā tīkla daļā, tad NS aizvietošanas shēmā ievērota arī slodze ar tās pretestību kā viens no NS strāvas noslēgšanās ceļiem. Aprēķins tiks veikts pie aprēķina sprieguma 10,5 kV.



6.20. att. Vienfāzes īsslēguma uz pirmā aprēķinu piemēru tīkla B4 kopnēm secību aizvietošanas shēmas.

Vispirms, ņemot vērā to, ka starp BV un avotiem ir transformators T1 ar kompleksu transformācijas koeficientu (slēguma shēma un grupa $Y_0/\Delta-11$), ir jāpagriež sistēmas un ģenerators TS EDS par -30° , lai nodrošinātu, ka BV aprēķinātajām spriegumu un strāvu simetriskajām komponentēm būtu pareizi faktiskie leņķi:

$$\dot{E}'_{GBV} = \dot{E}'_G e^{-j30^\circ} = (4,24 + j5,31)(0,866 - j0,5) \approx 6,327 + j2,479 \text{ kV},$$

$$\dot{E}'_{SBV} = \dot{E}'_S e^{-j30^\circ} = 6,062(0,866 - j0,5) \approx 5,250 - j3,031 \text{ kV}.$$

AD šāds pārrēķins nav nepieciešams, jo tā pret-EDS noteikts, izmantojot slodzes režīma kopņu spriegumu un AD strāvu pēc līdzīga pārrēķina veikšanas uz ZS tīkla pusi.

Analītiska risinājuma iegūšanai ir jānosaka summārie rezultējošo secību aizvietošanas shēmu EDS un pretestības. Iesākumā veiks TS aizvietošanas shēmas ekvivalentēšanu. Paralēlo G un SL2 zaru ekvivalentais EDS un pretestība:

$$\begin{aligned} \dot{E}'_{Gek} &= \frac{\dot{E}'_{GBV}(Z_{T2} + Z_{SL2}) + 0Z_G^1}{Z_{T2} + Z_{SL2} + Z_G^1} = \\ &= \frac{(6,327 + j2,479)((0,38 + j2,57) + (43,66 + j22,37))}{(0,38 + j2,57) + (43,66 + j22,37) + (0,07 + j2,53)} \approx 6,257 + j2,155 \text{ kV}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{\text{Gek}}^1 &= \frac{\dot{Z}_{\text{G}}^1(\dot{Z}_{\text{T}2} + \dot{Z}_{\text{SL}2})}{\dot{Z}_{\text{T}2} + \dot{Z}_{\text{SL}2} + \dot{Z}_{\text{G}}^1} = \\ &= \frac{(0,07 + j2,53)((0,38 + j2,57) + (43,66 + j22,37))}{(0,38 + j2,57) + (43,66 + j22,37) + (0,07 + j2,53)} \approx 0,171 + j2,459 \Omega.\end{aligned}$$

Līnijas L2 pretestības virknes slēguma ar G + SL2 ekvivalento pretestību kopējā pretestība:

$$\dot{Z}_{\text{Gek}2}^1 = \dot{Z}_{\text{Gek}}^1 + \dot{Z}_{\text{L}2}^1 = (0,171 + j2,459) + (0,76 + j1,81) = 0,931 + j4,269 \Omega.$$

Paralēlā sistēmas S un līnijas L1 zara un apvienotā G + SL2 + L2 zara ekvivalentais EDS un pretestība:

$$\begin{aligned}\dot{E}_{\text{GS}}^1 &= \frac{\dot{E}_{\text{SBV}} \dot{Z}_{\text{Gek}2}^1 + \dot{E}_{\text{Gek}}(\dot{Z}_{\text{S}} + \dot{Z}_{\text{L}1}^1)}{\dot{Z}_{\text{S}} + \dot{Z}_{\text{L}1}^1 + \dot{Z}_{\text{Gek}2}^1} = \\ &= \frac{(5,250 - j3,031)(0,931 + j4,269) + (6,257 + j2,155)((0,02 + j0,11) + (0,309 + j0,309))}{(0,02 + j0,11) + (0,309 + j0,309) + (0,931 + j4,269)} \approx \\ &\approx 5,575 + j2,551 \text{ kV},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{\text{GS}}^1 &= \frac{\dot{Z}_{\text{Gek}2}^1(\dot{Z}_{\text{S}} + \dot{Z}_{\text{L}1}^1)}{\dot{Z}_{\text{S}} + \dot{Z}_{\text{L}1}^1 + \dot{Z}_{\text{Gek}2}^1} = \\ &= \frac{[(0,931 + j4,269)((0,02 + j0,11) + (0,309 + j0,309))]}{[(0,02 + j0,11) + (0,309 + j0,309) + (0,931 + j4,269)]} \approx 0,278 + j0,391 \Omega.\end{aligned}$$

Transformatora T1 pretestības un apvienotā zara S + G + SL2 + L2 ekvivalentās pretestības virknes slēguma kopējā pretestība:

$$\dot{Z}_{\text{GS}2}^1 = \dot{Z}_{\text{GS}}^1 + \dot{Z}_{\text{T}1}^1 = (0,278 + j0,391) + (0,38 + j2,57) = 0,658 + j2,961 \Omega.$$

Paralēlo AD un SL1 zaru ekvivalentais EDS un pretestība:

$$\begin{aligned}\dot{E}_{\text{ADek}} &= \frac{\dot{E}_{\text{AD}}'' \dot{Z}_{\text{SL}1} + 0(\dot{Z}_{\text{AD}1}^1)}{\dot{Z}_{\text{SL}1} + \dot{Z}_{\text{AD}}^1} = \frac{(4,24 - j2,96)(155,45 + j66,33)}{(155,45 + j66,33) + (4,88 + j6,3)} \approx \\ &\approx 4,008 + j2,931 \text{ kV}, \\ \dot{Z}_{\text{ADek}}^1 &= \frac{\dot{Z}_{\text{SL}1} \dot{Z}_{\text{AD}}^1}{\dot{Z}_{\text{SL}1} + \dot{Z}_{\text{AD}}^1} = \frac{(155,45 + j66,33)(4,88 + j6,3)}{(155,45 + j66,33) + (4,88 + j6,3)} \approx 4,814 + j5,943 \Omega.\end{aligned}$$

Paralēlo AD + SL1 un S + G + SL2 + L2 zaru ekvivalentais EDS un pretestība, kas atbilst TS rezultējošās aizvietošanas shēmas summārajam EDS un pretestībai:

$$\begin{aligned}\dot{E}_{\text{KA}\Sigma}^1 &= \frac{\dot{E}_{\text{GS}}^1 \dot{Z}_{\text{ADek}}^1 + \dot{E}_{\text{ADek}} \dot{Z}_{\text{GS}2}^1}{\dot{Z}_{\text{ADek}}^1 + \dot{Z}_{\text{GS}2}^1} = \\ &= \frac{(5,575 + j2,551)(4,814 + j5,943) + (4,008 + j2,931)(0,658 + j2,961)}{(4,814 + j5,943) + (0,658 + j2,961)} \approx \\ &\approx 5,181 - j2,804 \text{ kV}, \\ \dot{Z}_{\text{KA}\Sigma}^1 &= \frac{\dot{Z}_{\text{ADek}}^1 \dot{Z}_{\text{GS}2}^1}{\dot{Z}_{\text{ADek}}^1 + \dot{Z}_{\text{GS}2}^1} = \frac{(4,814 + j5,943)(0,658 + j2,961)}{(4,814 + j5,943) + (0,658 + j2,961)} \approx 0,758 + j2,086 \Omega.\end{aligned}$$

Analoģiski jāaprēķina PS rezultējošās aizvietošanas shēmas ekvivalentā pretestība (šajā piemērā PS aizvietošanas shēmā nav tīkla elementus atainojošu EDS avotu). Paralēlo zaru G un SL2 ekvivalentā pretestība:

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{\text{Gek}}^2 &= \frac{\dot{Z}_{\text{G}}^2(\dot{Z}_{\text{T2}}+\dot{Z}_{\text{SL2}})}{\dot{Z}_{\text{T2}}+\dot{Z}_{\text{SL2}}+\dot{Z}_{\text{G}}^2} = \\ &= \frac{(0,59+j2,13)((0,38+j2,57)+(43,66+j22,37))}{(0,38+j2,57)+(43,66+j22,37)+(0,59+j2,13)} \approx 0,634 + j2,047 \Omega.\end{aligned}$$

Līnijas L2 pretestības virknes slēguma ar G + SL2 ekvivalento pretestību kopējā pretestība:

$$\dot{Z}_{\text{Gek2}}^2 = \dot{Z}_{\text{Gek}}^2 + \dot{Z}_{\text{L2}}^1 = (0,634 + j2,047) + (0,76 + j1,81) = 1,394 + j3,857 \Omega.$$

Paralēlā sistēmas S un līnijas L1 zara un apvienotā G + SL2 + L2 zara ekvivalentā pretestība:

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{\text{GS}}^2 &= \frac{\dot{Z}_{\text{Gek2}}^2(\dot{Z}_{\text{S}}+\dot{Z}_{\text{L1}}^1)}{\dot{Z}_{\text{S}}+\dot{Z}_{\text{L1}}^1+\dot{Z}_{\text{Gek2}}^2} = \\ &= \frac{[(1,394+j3,857)((0,02+j0,11)+(0,309+j0,309))]}{[(0,02+j0,11)+(0,309+j0,309)+(1,394+j3,857)]} \approx 0,279 + j0,383 \Omega.\end{aligned}$$

Transformatora T1 pretestības un apvienotā zara S + G + SL2 + L2 ekvivalentās pretestības virknes slēguma kopējā pretestība:

$$\dot{Z}_{\text{GS2}}^2 = \dot{Z}_{\text{GS}}^2 + \dot{Z}_{\text{T1}}^1 = (0,279 + j0,383) + (0,38 + j2,57) = 0,659 + j2,953 \Omega.$$

Paralēlo AD un SL1 zaru ekvivalentā pretestība:

$$\dot{Z}_{\text{ADek}}^2 = \frac{\dot{Z}_{\text{SL1}}\dot{Z}_{\text{AD}}^2}{\dot{Z}_{\text{SL1}}+\dot{Z}_{\text{AD}}^2} = \frac{(155,45+j66,33)(6,84+j15,58)}{(155,45+j66,33)+(6,84+j15,58)} \approx 7,274 + j14,048 \Omega.$$

Paralēlo AD + SL1 un S + G + SL2 + L2 zaru ekvivalentā pretestība, kas atbilst PS rezultējošās aizvietošanas shēmas summārajai pretestībai:

$$\dot{Z}_{\text{KA}\Sigma}^2 = \frac{\dot{Z}_{\text{ADek}}^2\dot{Z}_{\text{GS2}}^2}{\dot{Z}_{\text{ADek}}^2+\dot{Z}_{\text{GS2}}^2} = \frac{(7,274+j14,048)(0,659+j2,953)}{(7,274+j14,048)+(0,659+j2,953)} \approx 0,658 + j2,465 \Omega.$$

NS arī jānosaka rezultējošās aizvietošanas shēmas summārā pretestība. Šajā piemērā tās noteikšanai jāapvieno vienīgi paralēlie SL1 un T1 zari (pieņemts, ka AD neitrāle ir izolēta):

$$\dot{Z}_{\text{KA}\Sigma}^0 = \frac{\dot{Z}_{\text{SL1}}\dot{Z}_{\text{T1}}}{\dot{Z}_{\text{SL1}}+\dot{Z}_{\text{T1}}} = \frac{(155,45+j66,33)(0,38+j2,57)}{(155,45+j66,33)+(0,38+j2,57)} \approx 0,410 + j2,544 \Omega.$$

Zinot rezultējošo secību aizvietošanu shēmu Tevenena ekvivalentus, iespējams ar teorētiskajā daļā iegūto formulu aprēķināt īsslēgtās fāzēs strāvas simetrisko komponentu vērtības un tad izmantot tās, lai noteiktu šīs fāzes sprieguma simetrisko komponentu vērtības BV, balstoties uz vienādojumiem no rezultējošajām secību aizvietošanas shēmām:

$$\begin{aligned}\dot{I}_{\text{KA}}^1 &= \dot{I}_{\text{KA}}^2 = \dot{I}_{\text{KA}}^0 = \frac{\dot{E}_{\text{KA}\Sigma}^1}{\dot{Z}_{\text{KA}\Sigma}^1+\dot{Z}_{\text{KA}\Sigma}^2+\dot{Z}_{\text{KA}\Sigma}^0+3\dot{Z}_{\text{KA}}} = \\ &= \frac{5,181-j2,804}{(0,758+j2,086)+(0,658+j2,465)+(0,410+j2,544)+3\cdot 10} \approx 0,136 - j0,119 \text{ kA},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{\text{KA}}^1 &= \dot{E}_{\text{KA}\Sigma}^1 - \dot{I}_{\text{KA}}^1\dot{Z}_{\text{KA}\Sigma}^1 = (5,181 - j2,804) - (0,136 - j0,119)(0,758 + j2,086) \approx \\ &\approx 4,830 - j2,999 \text{ kV},\end{aligned}$$

$$\dot{U}_{\text{KA}}^2 = 0 - \dot{I}_{\text{KA}}^2\dot{Z}_{\text{KA}\Sigma}^2 = 0 - (0,136 - j0,119)(0,658 + j2,465) \approx -0,382 - j0,258 \text{ kV},$$

$$\dot{U}_{\text{KA}}^0 = 0 - \dot{I}_{\text{KA}}^0\dot{Z}_{\text{KA}\Sigma}^0 = 0 - (0,136 - j0,119)(0,410 + j2,544) \approx 0,357 - j0,298 \text{ kV}.$$

Turpinājumā jāpārreķina BV iegūtās simetriskās komponentes uz transformatora T1 primārā tinuma jeb QF8 pusi (RUV). Šim nolūkam jānoskaidro transformatora zarā plūstošās strāvas TS un PS komponentu (I_4^1 un I_4^2) vērtības, kuras nosakāmas ar pirmā Kirhoha likuma palīdzību, bet pirms tam vēl jāaprēķina nepieciešamās AD un SL1 strāvu simetrisko komponentu ($I_7^1, I_8^1, I_7^2, I_8^2$) vērtības:

$$\begin{aligned} I_7^1 &= \dot{U}_{KA}^1 / \dot{Z}_{SL1} = (4,830 - j2,999) / (155,45 + j66,33) \approx 0,019 - j0,028 \text{ kA}, \\ I_7^2 &= \dot{U}_{KA}^2 / \dot{Z}_{SL1} = (-0,382 - j0,258) / (155,45 + j66,33) \approx -0,003 - j0,001 \text{ kA}, \\ I_8^1 &= (\dot{E}_{AD}'' - \dot{U}_{KA}^1) / \dot{Z}_{AD}^1 = ((4,24 - j2,96) - (4,830 - j2,999)) / (4,88 + j6,3) \approx \\ &\approx -0,042 + j0,062 \text{ kA}, \\ I_8^2 &= (0 - \dot{U}_{KA}^2) / \dot{Z}_{AD}^2 = (0 - (-0,382 - j0,258)) / (6,84 + j15,58) \approx 0,023 - j0,014 \text{ kA}, \\ I_4^1 &= I_{KA}^1 + I_7^1 - I_8^1 = (0,136 - j0,119) + (0,019 - j0,028) - (-0,042 + j0,062) = \\ &= 0,197 - j0,208 \text{ kA}, \\ I_4^2 &= I_{KA}^2 + I_7^2 - I_8^2 = (0,136 - j0,119) + (-0,003 - j0,001) - (0,023 - j0,014) = \\ &= 0,111 - j0,105 \text{ kA}. \end{aligned}$$

Zinot transformatora T1 zarā plūstošās strāvas TS un PS komponentu vērtības, iespējams ņemt vērā sprieguma kritumus apvienotā T1 tinumu pretestībā, tādā veidā nosakot sprieguma simetrisko komponentu vērtības pirms pagriezienu veikšanas (nosacīti joprojām zvaigznē saslēgtā tinuma pusē):

$$\begin{aligned} \dot{U}_{B2AY}^1 &= \dot{U}_{KA}^1 + I_4^1 \dot{Z}_{T1} = (4,830 - j2,999) + (0,197 - j0,208)(0,38 + j2,57) \approx \\ &\approx 5,439 - j2,570 \text{ kV}, \\ \dot{U}_{B2AY}^2 &= \dot{U}_{KA}^2 + I_4^2 \dot{Z}_{T1} = (-0,382 - j0,258) + (0,111 - j0,105)(0,38 + j2,57) \approx \\ &\approx -0,071 - j0,013 \text{ kV}. \end{aligned}$$

Aprēķina spriegums (10,5 kV) atbilst RUV sprieguma pakāpei, tādēļ jāpagriež vienīgi Y_0 pusei noteikto TS un PS komponentu vērtības par 30° un -30° , lai ievērotu pāreju uz transformatora ar slēguma shēmu Y_0/Δ -11 trīsstūrī saslēgtā tinuma pusi (NS komponente netiek aplūkota, jo tā noslēdzas transformatora Δ tinumā):

$$\begin{aligned} I_{QF8A}^1 &= I_4^1 e^{j30^\circ} = (0,197 - j0,208)(0,866 + j0,5) \approx 0,275 - j0,081 \text{ kA}, \\ I_{QF8A}^2 &= I_4^2 e^{-j30^\circ} = (0,111 - j0,105)(0,866 - j0,5) \approx 0,044 - j0,146 \text{ kA}, \\ \dot{U}_{QF8A}^1 &= \dot{U}_{B2AY}^1 e^{j30^\circ} = (5,439 - j2,570)(0,866 + j0,5) \approx 5,995 + j0,493 \text{ kV}, \\ \dot{U}_{QF8A}^2 &= \dot{U}_{B2AY}^2 e^{-j30^\circ} = (-0,071 - j0,013)(0,866 - j0,5) \approx -0,068 + j0,024 \text{ kV}. \end{aligned}$$

Nākamais solis ir noteikt fāžu lielumus BV un RUV, izmantojot aprēķina (šeit – A) fāzes simetriskās komponentes pie 10,5 kV sprieguma pakāpes, izmantojot Forteskuju transformāciju:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{U}_{KA} \\ \dot{U}_{KB} \\ \dot{U}_{KC} \end{bmatrix} &= k_A \begin{bmatrix} \dot{U}_{KA}^1 \\ \dot{U}_{KA}^2 \\ \dot{U}_{KA}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 4,830 - j2,999 \\ -0,382 - j0,258 \\ -0,357 - j0,298 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 4,091 - j3,555 \\ -4,955 - j3,184 \\ -0,209 + j5,844 \end{bmatrix} \approx \\ &\approx \begin{bmatrix} 5,420 e^{-j40,99^\circ} \\ 5,890 e^{-j147,28^\circ} \\ 5,848 e^{j92,04^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV}, \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{KA} \\ \dot{I}_{KB} \\ \dot{I}_{KC} \end{bmatrix} = k_A \begin{bmatrix} \dot{I}_{KA}^1 \\ \dot{I}_{KA}^2 \\ \dot{I}_{KA}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,136 - j0,119 \\ 0,136 - j0,119 \\ 0,136 - j0,119 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0,409 - j0,356 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \approx$$

$$\approx \begin{bmatrix} 0,542e^{-j40,99^\circ} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ kA,}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{QF8A} \\ \dot{U}_{QF8B} \\ \dot{U}_{QF8C} \end{bmatrix} = k_A \begin{bmatrix} \dot{U}_{QF8A}^1 \\ \dot{U}_{QF8A}^2 \\ \dot{U}_{QF8A}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5,995 + j0,493 \\ -0,068 + j0,024 \\ 0 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 5,927 + j0,517 \\ -2,557 - j5,510 \\ -3,370 + j4,993 \end{bmatrix} \approx$$

$$\approx \begin{bmatrix} 5,950e^{j4,99^\circ} \\ 6,074e^{-j114,90^\circ} \\ 6,024e^{j124,02^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{QF8A} \\ \dot{I}_{QF8B} \\ \dot{I}_{QF8C} \end{bmatrix} = k_A \begin{bmatrix} \dot{I}_{QF8A}^1 \\ \dot{I}_{QF8A}^2 \\ \dot{I}_{QF8A}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,275 - j0,081 \\ 0,044 - j0,146 \\ 0 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0,318 - j0,227 \\ -0,103 - j0,087 \\ -0,215 + j0,314 \end{bmatrix} \approx$$

$$\approx \begin{bmatrix} 0,391e^{-j35,51^\circ} \\ 0,135e^{-j139,99^\circ} \\ 0,380e^{j124,47^\circ} \end{bmatrix} \text{ kA.}$$

Faktisko BV režīma parametru vērtību, kas tiks parādītas vektoru diagrammā, noteikšanai vēl jāievēro, ka īsslēgums radās 0,4 kV sprieguma pakāpē, nevis aprēķina sprieguma pakāpē (transformācijas koeficients $k_T = 10 / 0,4 = 25$):

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{KA, 0,4 \text{ kV}} \\ \dot{U}_{KB, 0,4 \text{ kV}} \\ \dot{U}_{KC, 0,4 \text{ kV}} \end{bmatrix} = 1/k_T \begin{bmatrix} \dot{U}_{KA} \\ \dot{U}_{KB} \\ \dot{U}_{KC} \end{bmatrix} = 1/25 \begin{bmatrix} 5,420e^{-j40,99^\circ} \\ 5,890e^{-j147,28^\circ} \\ 5,848e^{j92,04^\circ} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0,2168e^{-j40,99^\circ} \\ 0,2356e^{-j147,28^\circ} \\ 0,2339e^{j92,04^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV} \approx$$

$$\approx \begin{bmatrix} 216,8e^{-j40,99^\circ} \\ 235,6e^{-j147,28^\circ} \\ 233,9e^{j92,04^\circ} \end{bmatrix} \text{ V,}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{KA, 0,4 \text{ kV}} \\ \dot{I}_{KB, 0,4 \text{ kV}} \\ \dot{I}_{KC, 0,4 \text{ kV}} \end{bmatrix} = k_T \begin{bmatrix} \dot{I}_{KA} \\ \dot{I}_{KB} \\ \dot{I}_{KC} \end{bmatrix} = 25 \begin{bmatrix} 0,542e^{-j40,99^\circ} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 13,550e^{-j40,99^\circ} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ kA.}$$

Alternatīvi bija iespējams veikt moduļu transformācijas simetriskajām komponentēm pirms pārejas uz fāžu lielumiem, kas tiks parādīts citos piemēros.

Ievērojot, ka slodzes režīmā T1 strāva pie aprēķina sprieguma 10,5 kV bija $|\dot{I}_{T1SL}| = |0,112 - j0,066| \approx 0,130 \text{ kA}$, var secināt, ka Y saslēgtā tinuma īsslēguma strāva, neskatoties uz pārejas pretestību īsslēgtajā A fāzē, ir aptuveni 4 reizes lielāka par slodzes režīma strāvu un ka Δ slēgumā esošā tinuma pusē A un C fāzēs strāva ir aptuveni 3 reizes lielāka par slodzes režīma strāvu, ar ko vajadzētu pietikt maksimālstrāvas aizsardzības (turpmāk tekstā – MSA) nostrādei.

Ņemot vērā, ka jau ir izrēķināti rezultējošo secību aizvietošanas shēmu ekvivalenti, iespējams pārbaudīt aprēķinu ar vispārīgās šķērsnesimetrijas risinājumu matricu formā, šim īsslēgumam tuvināti pieņemot pārejas pretestības $\dot{Z}_{KA} = 10 \Omega$, $\dot{Z}_{KN} = 0 \Omega$, $\dot{Z}_{KB} = 5 M\Omega$, $\dot{Z}_{KC} = 5 M\Omega$, kas veselajām fāzēm, protams, nav tik augsta kā patiesā izolācijas pretestība, bet tā pārsniedz rezultējošo secību aizvietošanas shēmu summārās pretestības par vairākām pakāpēm, tādēļ neradīs ievērojamas kļūdas. Jāpiebilst, ka šim aprēķinam izmantota *MATLAB*® iebūvēta LVS risināšanas funkcija (balstīta uz Gausa metodi), jo lielo koeficientu matricas A_K vērtību dēļ Zeideļa metodes rezultāti saturēja kļūdas. Ņemot vērā pieņemtās tuvinātās īsslēguma pārejas pretestību vērtības, koeficientu matrica A_K atbilstoši (6.15.) ir

$$A_K = (1/3) \begin{bmatrix} \dot{Z}_{KABC1} + 3\dot{Z}_{K\Sigma}^1 & \dot{Z}_{KABC3} & \dot{Z}_{KABC2} \\ \dot{Z}_{KABC2} & \dot{Z}_{KABC1} + 3\dot{Z}_{K\Sigma}^2 & \dot{Z}_{KABC3} \\ \dot{Z}_{KABC3} & \dot{Z}_{KABC2} & \dot{Z}_{KABC1} + 3\dot{Z}_{K\Sigma}^0 + 9\dot{Z}_{KN} \end{bmatrix} \approx$$

$$\approx \begin{bmatrix} 3,333 + j0 & -1,667 + j0 & -1,667 + j0 \\ -1,667 + j0 & 3,333 + j0 & -1,667 + j0 \\ -1,667 + j0 & -1,667 + j0 & 3,333 + j0 \end{bmatrix} M\Omega.$$

un rezultējošo secību aizvietošanas shēmu ekvivalento EDS vektors ir

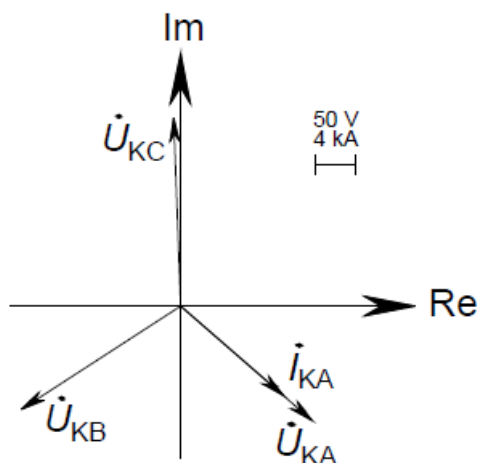
$$E_K = \begin{bmatrix} \dot{E}_{K\Sigma}^1 \\ \dot{E}_{K\Sigma}^2 \\ \dot{E}_{K\Sigma}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5,181 - j2,804 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ kV.}$$

Atrisinot vienādojumu sistēmu (6.11.), iegūstamas šādas A fāzes strāvas simetriskās komponentes BV:

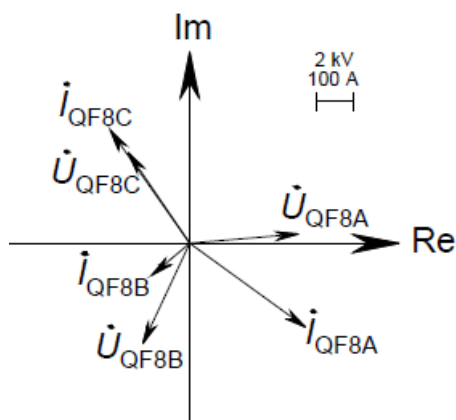
$$I_K^S = \begin{bmatrix} \dot{i}_{KA}^1 \\ \dot{i}_{KA}^2 \\ \dot{i}_{KA}^0 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0,136 - j0,119 \\ 0,136 - j0,119 \\ 0,136 - j0,119 \end{bmatrix} \text{ kA.}$$

Kā redzams, pat ar modificētajām pārejas pretestībām A fāzes strāvas simetrisko komponentu vērtības BV ir identiskas tām, kas iegūtas, izmantojot speciāli šim īsslēguma veidam izveidotās formulas.

Šī piemēra uzdevumu pilnīgai izpildei, ir jāparāda fāžu spriegumu un strāvu vektoru diagrammas BV (6.21. att.) un RUV (6.22. att.). RUV šie lielumi norādīti primārajos A un V, t. i., pirms mērmaiņiem.



6.21. att. Vienfāzes īsslēguma pirmā aprēķinu piemēru tīkla B4 kopnēs fāžu spriegumu un strāvu vektoru diagramma BV pēc reducēšanas uz 0,4 kV sprieguma pakāpi.



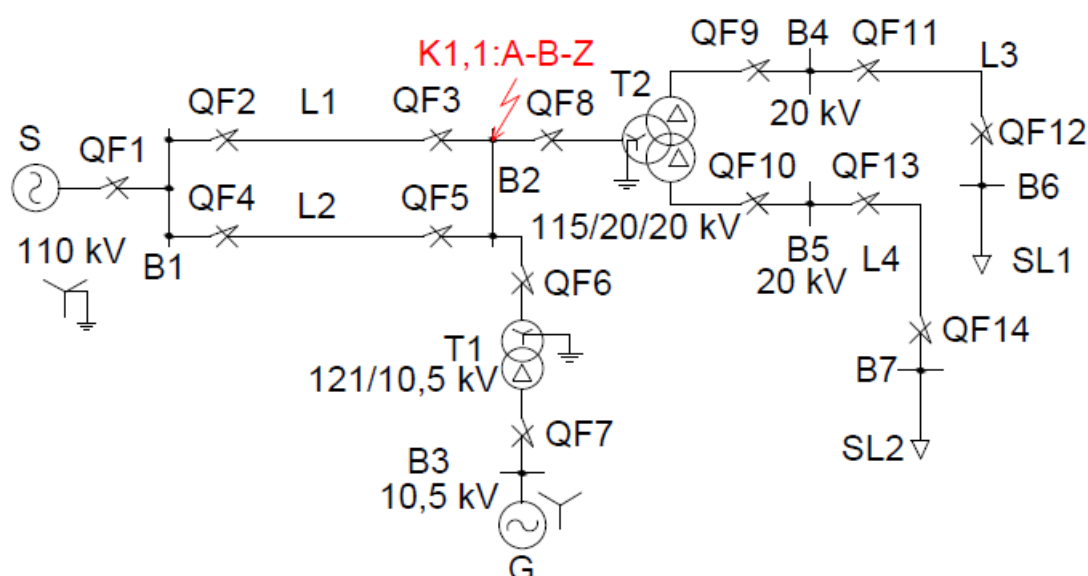
6.22. att. Vienfāzes īsslēguma pirmā aprēķinu piemēru tīkla B4 kopnēs fāžu spriegumu un strāvu vektoru diagramma aizsardzības QF8 uzstādīšanas vietā.

6.21. attēlā redzamā vektoru diagramma parāda, ka aktīvās pārejas pretestības dēļ īsslēgtajā A fāzē spriegums un strāva sakrīt fāzē, neskatoties uz to, ka bieži saites elementu pretestībai ir izteikti induktīvs raksturs, tādēļ teorijā, aplūkojot metāliskus īsslēgumus, iegūtā īsslēguma strāva nereti tiek parādīta atpakaļ no sprieguma par gandrīz 90° [2]. Šajā vektoru diagrammā redzams arī, ka ir spēkā robežnosacījums, kas paredz, ka veselajās fāzēs (šeit – B un C fāze) BV strāva neplūst. Papildus jāatzīmē, ka BV elektriski tuvu atrodas arī AD, kura ekvivalents pret-EDS kopā ar pārejas pretestību bojājuma sākuma momentam devis bojātajā fāzē spriegumu tuvu nominālajam, neskatoties uz ievērojamo īsslēguma strāvu. Savukārt 6.22. attēlā redzamā vektoru diagramma parāda, kā fāžu spriegumu un strāvu sistēma kļuvusi simetriskāka elektriskā attāluma no BV un transformatora T1 trīsstūrī saslēgtā tinuma simetriju uzlabojošās iedarbības dēļ. No fāžu spriegumiem abās diagrammās redzams arī, kā pāreja no zvaigznes uz trīsstūra slēgumā esošā tinuma pusi ieviesusi gandrīz 30° pagriezienu (precīzi 30° pagriezienu uz priekšu vai atpakaļ šajā gadījumā attiecas nevis uz fāžu lielumiem, bet uz TS un PS komponentēm). Vienlaikus iespējams ievērot, ka transformatora T1 kompleksā transformācijas koeficienta dēļ fāžu strāvu sistēma aiz transformatora vairāk atgādina fāžu A

un C īsslēgumu nekā patieso A fāzes īsslēgumu uz zemi. Tas vēlreiz apliecina 5. nodaļā minēto, ka šādi bojājumi aiz transformatora jāanalizē ļoti uzmanīgi.

6.3. Otrās elektriskās sistēmas režīma parametru aprēķina piemērs vienas šķērsnesimetrijas rašanās gadījumā ar topoloģisku risinājumu

Otrajā režīma parametru aprēķina piemērā, rodoties vienai šķērsnesimetrijai, tiks parādīts topoloģisks risinājums šādam uzdevumam: aprēķināt fāžu spriegumus un strāvas īsslēguma vietā un jaudas slēdzim QF2 piesaistītās aizsardzības nomērītos fāžu spriegumus un strāvas, izveidojoties divfāžu īsslēgumam uz zemi starp fāzēm A un B otrā aprēķinu piemēru tīkla kopnēs B2 (6.23. att.). Papildus jāuzzīmē fāžu spriegumu un strāvu vektoru diagrammas BV un QF2 aizsardzības RUV, kā arī jāaprēķina QF2 distantaizsardzības (turpmāk tekstā – DA) fiksētā šķietamā pretestība atbilstošajai bojājuma cilpai. Dati par konkrētā tīkla elementu un slodzes režīma parametriem doti 10. pielikumā.



6.23. att. Otrā aprēķinu piemēru tīkla kopņu B2 divfāžu īsslēguma uz zemi starp fāzēm A un B režīma parametru aprēķina vienlīnijas izejas shēma.

Īsslēguma pārejas pretestības fāzēs ir $\dot{Z}_{KA} = \dot{Z}_{KB} = 6 \Omega$ (kopējā pretestība starp īsslēgtajām fāzēm ir $\dot{Z}_{KF} = \dot{Z}_{KA} + \dot{Z}_{KB} = 12 \Omega$) un neitrāles jeb saites ar zemi pretestība ir $\dot{Z}_{KN} = 1 \Omega$. Aprēķins jāveic īsslēguma sākuma momentam, pieņemot, ka tā rašanās brīdī sistēmas A fāzes sprieguma jeb EDS leņķis ir 0° , t. i., atbilstoši slodzes režīma parametru aprēķina momentam. Šajā gadījumā, ņemot vērā īsslēguma elektrisko attālumu no ģenerators, ko veido transformators T1, ģeneratoram tiek pieņemts, ka tas nonāks pārejas režīmā. Aprēķins tiks veikts pie aprēķina sprieguma 115 kV.

Pirmais solis, līdzīgi analītiskajam risinājumam, ir sastādīt aizvietošanas shēmu, kas šajā piemērā būs kompleksā aizvietošanas shēma divfāžu īsslēgumiem, balstoties uz 6.12. attēlā parādīto paraugu. Atšķirībā no analītiskā risinājuma šoreiz secību aizvietošanas shēmas ir

savstarpēji savienotas, tādēļ tajās BV robežnosacījumu ievērošanai nav jāieslēdz papildu EDS avoti. Minētā kompleksā aizvietošanas shēma parādīta 6.24. attēlā.

Vispirms precīzam BV parametru aprēķinam jāņem vērā, ka starp BV un ģeneratoru G ir transformators T1 ar slēguma shēmu un grupu $Y_0/\Delta-11$, tādēļ tā pārejas režīma EDS ir jāpagriež par -30° , pārejot uz zvaigznē saslēgtā tinuma pusi. Šāda korekcija jāņem vērā, jo pēc slodzes režīma parametru aprēķina šīs grāmatas piemēros avotiem atbilstošie EDS noteikti ar to leņķi, kāds tas būtu šo avotu pieslēgšanas vietā, t. i., ņemot vērā pretēju pāreju turpmāk parādītajai. Attiecīgi A fāzei uz BV attiecinātais ģeneratora G EDS būs

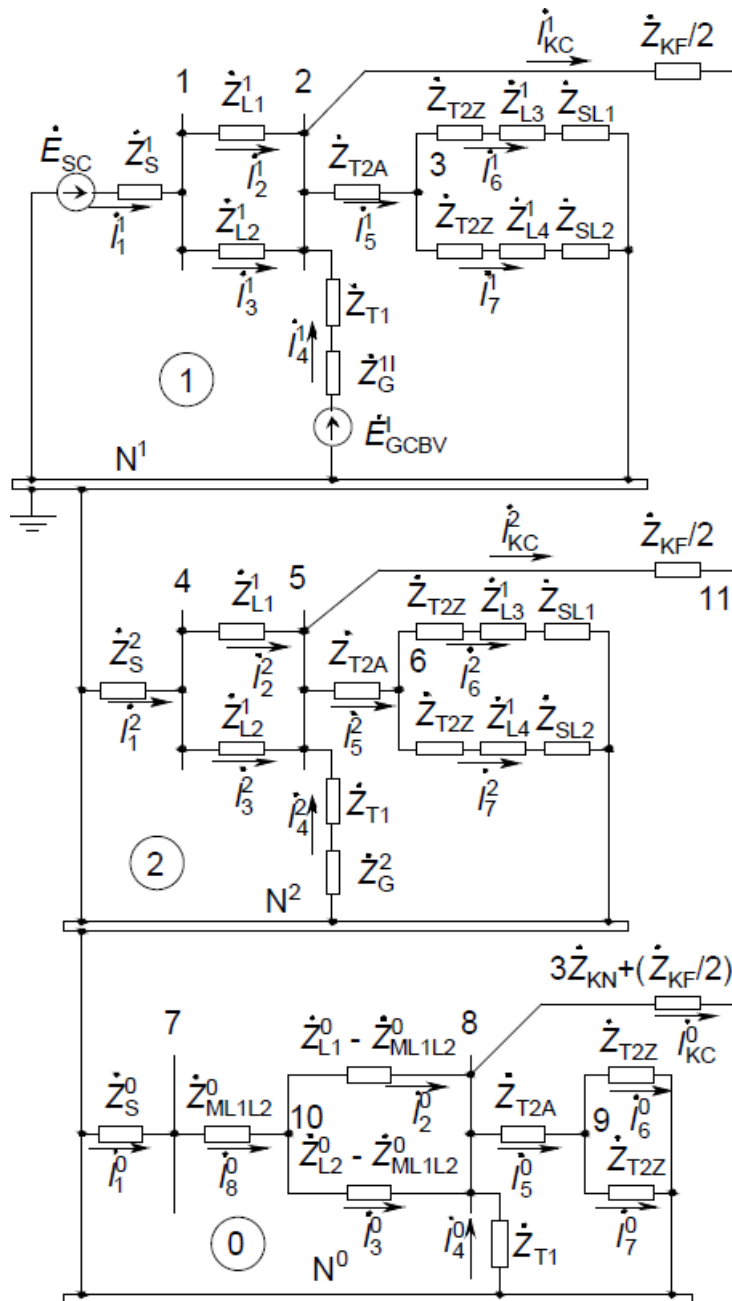
$$\dot{E}'_{GABV} = \dot{E}'_{GA} e^{-j30^\circ} = (28,25 + j68,79)(0,866 - j0,5) \approx 58,86 + j45,45 \text{ kV}.$$

Tā kā īpašā jeb aprēķina fāze šajā gadījumā ir C fāze, TS aizvietošanas shēmā sistēmas un ģeneratora pārejas režīma EDS norādīts C fāzei:

$$\dot{E}'_{SC} = \dot{E}'_{SA} \dot{a} = 66,40(-0,5 + j0,866) \approx -33,2 + j57,5 \text{ kV},$$

$$\dot{E}'_{GCBV} = \dot{E}'_{GABV} \dot{a} = (58,86 + j45,45)(-0,5 + j0,866) \approx -68,79 + j28,25 \text{ kV}.$$

Piemēra nolūkos NS aizvietošanas shēmā līniju L1 un L2 NS savstarpējā mijinduktivitāte ievērota ar shēmas elementu (šādā gadījumā skaitliski neierēķina mijindukciju līniju pretestībās un to neparāda pretestību matricā Z kā nediagonāles elementu, kas būtu vēl viens alternatīvs risinājums).



6.24. att. Otrā aprēķinu piemēru tīkla kopņu B2 divfāžu īsslēguma uz zemi starp fāzēm A un B kompleksā aizvietošanas shēma.

Atbilstoši 6.24. attēlā parādītajai kompleksajai aizvietošanas shēmai iespējams sastādīt šādu pirmās incidences matricu:

M	i_1^1	i_2^1	i_3^1	i_4^1	i_5^1	i_6^1	i_7^1	i_{KC}^1	i_1^2	i_2^2	i_3^2	i_4^2	i_5^2	i_6^2	i_7^2	i_{KC}^2
1	-1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	-1	-1	-1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	-1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	1	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	1	0	0	1
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	1	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1

M	i_1^0	i_2^0	i_3^0	i_4^0	i_5^0	i_6^0	i_7^0	i_8^0	i_{KC}^0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	-1	0	0	0	0	0	0	1	0
8	0	-1	-1	-1	1	0	0	0	1
9	0	0	0	0	-1	1	1	0	0
10	0	1	1	0	0	0	0	-1	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	-1

Iespējams sastādīt arī aizvietošanas shēmas pretestību matricu Z vai šajā gadījumā – zaru pretestību vektoru ZZ (mijinduktivitātes netiek ievērotas matricā Z kā nediaagonāles elementi):

ZZ			
i_1^1	\dot{Z}_S^1		$1,37 + j10,94$
i_2^1	\dot{Z}_{L1}^1		$9,4 + j17,18$
i_3^1	\dot{Z}_{L2}^1		$9,4 + j17,18$
i_4^1	$\dot{Z}_{T1}^1 + \dot{Z}_G^{1'}$		$4,21 + j146,03$
i_5^1	\dot{Z}_{T2A}		$0,45 + j6,27$
i_6^1	$\dot{Z}_{T2Z} + \dot{Z}_{L3}^1 + \dot{Z}_{SL1}$		$1416,4 + j884,15$
i_7^1	$\dot{Z}_{T2Z} + \dot{Z}_{L4}^1 + \dot{Z}_{SL2}$		$1005,3 + j566,51$
i_{KC}^1	$\dot{Z}_{KF}/2$	=	$6 \quad \Omega$
i_1^2	\dot{Z}_S^1		$1,37 + j10,94$
i_2^2	\dot{Z}_{L1}^1		$9,4 + j17,18$
i_3^2	\dot{Z}_{L2}^1		$9,4 + j17,18$
i_4^2	$\dot{Z}_{T1}^1 + \dot{Z}_G^2$		$22,72 + j124,87$
i_5^2	\dot{Z}_{T2A}		$0,45 + j6,27$
i_6^2	$\dot{Z}_{T2Z} + \dot{Z}_{L3}^1 + \dot{Z}_{SL1}$		$1416,4 + j884,15$
i_7^2	$\dot{Z}_{T2Z} + \dot{Z}_{L4}^1 + \dot{Z}_{SL2}$		$1005,3 + j566,51$
i_{KC}^2	$\dot{Z}_{KF}/2$		6

$$\begin{array}{l}
ZZ \\
i_1^0 \quad \dot{Z}_S^0 \quad 1,37 + j10,94 \\
i_2^0 \quad \dot{Z}_{L1}^0 - \dot{Z}_{ML1L2}^0 \quad 9,41 + j18,77 \\
i_3^0 \quad \dot{Z}_{L2}^0 - \dot{Z}_{ML1L2}^0 \quad 9,41 + j18,77 \\
i_4^0 \quad \dot{Z}_{T1} \quad 1,56 + j40,23 \\
i_5^0 \quad \dot{Z}_{T2A} \quad = \quad 0,45 + j6,27 \quad \Omega. \\
i_6^0 \quad \dot{Z}_{T2Z} \quad 0,68 + j36,39 \\
i_7^0 \quad \dot{Z}_{T2Z} \quad 0,68 + j36,39 \\
i_8^0 \quad \dot{Z}_{ML1L2}^0 \quad 6,24 + j24,2 \\
i_{KC}^0 \quad 3\dot{Z}_{KN} + (\dot{Z}_{KF}/2) \quad 9
\end{array}$$

Tīkla aizvietošanas shēmas pretestību matricu šajā gadījumā iespējams iegūt ar operāciju $Z = \text{diag}(ZZ)$, kas rada diagonālu matricu no vektora ZZ . Tālāk jā sastāda arī zaru EDS vektors:

$$\begin{array}{l}
E \\
i_1^1 \quad \dot{E}_{SC} \quad -33,2 + j57,5 \\
i_2^1 \quad 0 \quad 0 \\
i_3^1 \quad 0 \quad 0 \\
i_4^1 \quad E'_{GCBV} \quad -68,79 + j28,25 \\
i_5^1 \quad 0 \quad 0 \\
i_6^1 \quad 0 \quad 0 \\
i_7^1 \quad 0 \quad 0 \\
i_{KC}^1 \quad 0 \quad 0 \\
i_1^2 \quad 0 \quad 0 \\
i_2^2 \quad 0 \quad 0 \\
i_3^2 \quad 0 \quad 0 \\
i_4^2 \quad 0 \quad 0 \\
i_5^2 \quad 0 \quad = \quad 0 \quad \text{kV.} \\
i_6^2 \quad 0 \quad 0 \\
i_7^2 \quad 0 \quad 0 \\
i_{KC}^2 \quad 0 \quad 0 \\
i_1^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_2^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_3^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_4^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_5^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_6^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_7^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_8^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_{KC}^0 \quad 0 \quad 0
\end{array}$$

Ja aizvietošanas shēma saturētu arī strāvas avotus, tiktu parādīts arī strāvas avotu vektora I saturs, bet šajā piemērā šis vektors jā aizpilda ar nullēm. Tagad no parādītajām matricām un

vektoriem jānosaka tīkla vadītspēju matrica Y un brīvo mainīgo vektors B , ņemot vērā, ka $U_B = 0$ V, jo par bāzes mezglu pieņemta TS aizvietošanas shēmas neitrāle, kura ir nosacīti zemēta:

$$Y = MZ^{-1}M^T,$$

$$B = I - MZ^{-1}E + Y_B U_B = -MZ^{-1}E.$$

Izmantojot vadītspēju matricu Y un brīvo mainīgo vektoru B , kuriem aprēķina formulas uzrādītas iepriekš, iespējams noteikt aizvietošanas shēmas mezglu spriegumus, lietojot (4.19.). Aprēķina īstenošana programmas tekstā parādīta šīs grāmatas 12. pielikumā. Aprēķinu rezultātā iegūtie mezglu spriegumi ir šādi:

U	
1	$-15,541 + j45,484$
2	$-4,875 + j29,799$
3	$-4,626 + j29,679$
4	$-7,757 + j5,033$
5	$-12,524 + j11,720$
6	$-12,370 + j11,753$ kV.
7	$-3,428 + j0,951$
8	$-13,634 + j6,022$
9	$-10,197 + j4,339$
10	$-10,860 + j4,080$
11	$-9,933 + j17,075$

Zaru strāvas, ievērojot, ka mezglu spriegumi noteikti ar F–Z EDS vērtībām, aprēķina ar formulu $I_Z = Z^{-1}(E + M^T U)$. Šeit redzamas aprēķinātās zaru strāvas:

$$\begin{aligned}
I_Z & \\
i_1^1 & 0,882 + j1,725 \\
i_2^1 & 0,441 + j0,862 \\
i_3^1 & 0,441 + j0,862 \\
i_4^1 & -0,023 + j0,437 \\
i_5^1 & 0,016 + j0,041 \\
i_6^1 & 0,007 + j0,017 \\
i_7^1 & 0,009 + j0,024 \\
i_{KC}^1 & 0,843 + j2,121 \\
i_1^2 & -0,366 - j0,755 \\
i_2^2 & -0,183 - j0,377 \\
i_3^2 & -0,183 - j0,377 \\
i_4^2 & -0,073 - j0,114 \\
i_5^2 & -0,007 + j0,024 \text{ kA.} \\
i_6^2 & -0,003 + j0,010 \\
i_7^2 & -0,004 + j0,014 \\
i_{KC}^2 & -0,432 - j0,893 \\
i_1^0 & -0,047 - j0,319 \\
i_2^0 & -0,024 - j0,160 \\
i_3^0 & -0,024 - j0,160 \\
i_4^0 & -0,136 - j0,344 \\
i_5^0 & 0,228 + j0,565 \\
i_6^0 & 0,114 + j0,282 \\
i_7^0 & 0,114 + j0,282 \\
i_8^0 & -0,047 - j0,319 \\
i_{KC}^0 & -0,411 - j1,228
\end{aligned}$$

Iegūtie rezultāti jau satur C fāzes spriegumu un strāvu simetriskās komponentes gan BV, gan RUV, bet ērtībai šīs vērtības vispirms tiks izdalītas no rezultātu vektoriem. **Šeit svarīgi atgādināt, ka, neskatoties uz iepriekš redzamajā aprakstā zariem piešķirtajiem apzīmējumiem, aprēķina datorrealizācijā matricu elementi arī zariem numurēti identiskā stilā kā mezgliem jeb ar secīgiem kārtas numuriem.** Tādēļ turpmāk ne tikai mezglu spriegumu, bet arī zaru strāvu vērtību iegūšanai no vektoriem U un I_Z norādīti skaitliski indeksi, ar kuriem pieejamas konkrētās elementu vērtības. Papildus var atzīmēt, ka šajā piemērā sprieguma PS un NS komponentēm uzreiz iespējams izmantot tīkla kopnēm atbilstošo mezglu spriegumus no vektora U , nevis šo mezglu un atbilstošo secības aizvietošanas shēmu neitrāļu spriegumu starpību. Tas ir pieļaujams, jo šim īsslēguma veidam kompleksajā aizvietošanas shēmā visu secību aizvietošanas shēmu neitrāles savienotas bez pārejas pretestības, tādēļ to potenciāls arī vienāds ar 0 V. Minētā uzdevumam nepieciešamo simetrisko komponentu izdalīšana parādīta šeit:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{KC}^1 \\ \dot{U}_{KC}^2 \\ \dot{U}_{KC}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U(2) \\ U(5) \\ U(8) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4,875 + j29,799 \\ -12,524 + j11,720 \\ -13,634 + j6,022 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 30,195e^{j99,29^\circ} \\ 17,153e^{j136,90^\circ} \\ 14,905e^{j156,17^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{KC}^1 \\ \dot{I}_{KC}^2 \\ \dot{I}_{KC}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_Z(8) \\ I_Z(16) \\ I_Z(25) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,843 + j2,121 \\ -0,432 - j0,893 \\ -0,411 - j1,228 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 2,282e^{j68,32^\circ} \\ 0,992e^{-j115,82^\circ} \\ 1,295e^{-j108,51^\circ} \end{bmatrix} \text{ kA,}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{QF2C}^1 \\ \dot{U}_{QF2C}^2 \\ \dot{U}_{QF2C}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U(1) \\ U(4) \\ U(7) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -15,541 + j45,484 \\ -7,757 + j5,033 \\ -3,428 + j0,951 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 48,065e^{j108,86^\circ} \\ 9,247e^{j147,03^\circ} \\ 3,557e^{j164,49^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{QF2C}^1 \\ \dot{I}_{QF2C}^2 \\ \dot{I}_{QF2C}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_Z(2) \\ I_Z(10) \\ I_Z(18) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,441 + j0,862 \\ -0,183 - j0,377 \\ -0,024 - j0,160 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0,969e^{j62,90^\circ} \\ 0,419e^{-j115,84^\circ} \\ 0,161e^{-j98,37^\circ} \end{bmatrix} \text{ kA.}$$

Nākamais solis ir pāreja no C fāzes simetriskajām komponentēm uz fāžu lielumiem:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{KA} \\ \dot{U}_{KB} \\ \dot{U}_{KC} \end{bmatrix} = k_C \begin{bmatrix} \dot{U}_{KC}^1 \\ \dot{U}_{KC}^2 \\ \dot{U}_{KC}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -4,875 + j29,799 \\ -12,524 + j11,720 \\ -13,634 + j6,022 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 10,721 - j21,361 \\ -20,591 - j8,113 \\ -31,033 + j47,541 \end{bmatrix} \approx$$

$$\approx \begin{bmatrix} 23,901e^{-j63,35^\circ} \\ 22,132e^{-j158,50^\circ} \\ 56,773e^{j123,14^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{KA} \\ \dot{I}_{KB} \\ \dot{I}_{KC} \end{bmatrix} = k_C \begin{bmatrix} \dot{I}_{KC}^1 \\ \dot{I}_{KC}^2 \\ \dot{I}_{KC}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,843 + j2,121 \\ -0,432 - j0,893 \\ -0,411 - j1,228 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1,993 - j2,946 \\ -3,226 - j0,738 \\ 0 \end{bmatrix} \approx$$

$$\approx \begin{bmatrix} 3,557e^{-j55,93^\circ} \\ 3,310e^{-j167,11^\circ} \\ 0 \end{bmatrix} \text{ kA,}$$

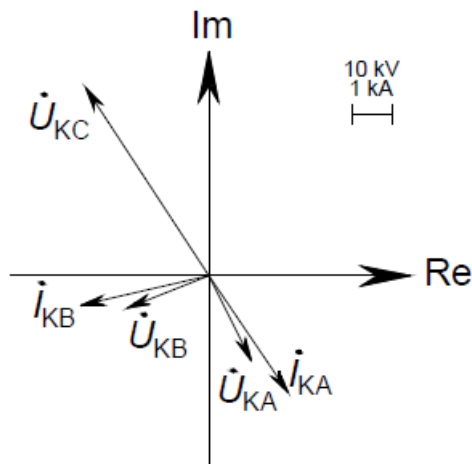
$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{QF2A} \\ \dot{U}_{QF2B} \\ \dot{U}_{QF2C} \end{bmatrix} = k_C \begin{bmatrix} \dot{U}_{QF2C}^1 \\ \dot{U}_{QF2C}^2 \\ \dot{U}_{QF2C}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -15,541 + j45,484 \\ -7,757 + j5,033 \\ -3,428 + j0,951 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 43,253 - j17,566 \\ -26,810 - j31,048 \\ -26,726 + j51,467 \end{bmatrix} \approx$$

$$\approx \begin{bmatrix} 46,684e^{-j22,10^\circ} \\ 41,021e^{-j130,81^\circ} \\ 57,993e^{j117,44^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

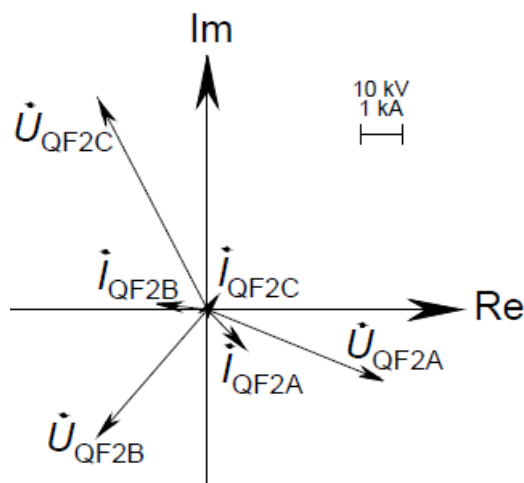
$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{QF2A} \\ \dot{I}_{QF2B} \\ \dot{I}_{QF2C} \end{bmatrix} = k_C \begin{bmatrix} \dot{I}_{QF2C}^1 \\ \dot{I}_{QF2C}^2 \\ \dot{I}_{QF2C}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,441 + j0,862 \\ -0,183 - j0,377 \\ -0,024 - j0,160 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0,921 - j0,942 \\ -1,226 + j0,138 \\ 0,235 + j0,325 \end{bmatrix} \approx$$

$$\approx \begin{bmatrix} 1,318e^{-j45,66^\circ} \\ 1,234e^{j173,56^\circ} \\ 0,401e^{j54,15^\circ} \end{bmatrix} \text{ kA.}$$

Atbilstoši iepriekš iegūtajiem fāžu spriegumiem un strāvām iespējams uzzīmēt vektoru diagrammas BV (6.25. att.) un QF2 RUV (6.26. att.). RUV norādītās strāvu un spriegumu vērtības dotas primārajos A un V, t. i., pirms mērmaiņiem.



6.25. att. Otrā aprēķinu piemēru tīkla B2 kopņu divfāžu īsslēguma uz zemi starp fāzēm A un B fāžu spriegumu un strāvu vektoru diagramma BV.



6.26. att. Otrā aprēķinu piemēru tīkla B2 kopņu divfāžu īsslēguma uz zemi starp fāzēm A un B fāžu spriegumu un strāvu vektoru diagramma QF2 piesaistītās aizsardzības RUV.

BV iegūtā vektoru diagramma (6.25. att.) vispirms parāda, ka konkrētajam īsslēgumam izpildīts acīmredzamais robežnosacījums, ka nebojātajā fāzē C strāva neplūst. Redzams arī tas, ka īsslēgtajās fāzēs to strāvas un spriegumi gandrīz sakrīt fāzē, bet tomēr ir neliels nobīdīt. Papildus tam A fāzes strāva neliels apstādz tās pašas fāzes spriegumu, bet B fāzē strāva atpaliek no sprieguma. Šis pirmajā brīdī šķietami neparastais rezultāts ar vienu apstādzošu un vienu atpaliekošu īsslēgtās fāzes strāvu radies pārejas pretestības neitrālē jeb saitē uz zemi dēļ, kurai aizvietošanas shēma uzspiedusi strāvas un sprieguma sakrītību fāzē, ko nodrošinājušas šādi nobīdītās strāvas. Par to iespējams pārliecināties, nosakot BV neitrālē plūstošo strāvu pēc pirmā Kirhofa likuma un spriegumu starp zemi un neitrāles pārejas pretestību, atņemot no A fāzes sprieguma BV šīs fāzes pārejas pretestībā radušos sprieguma kritumu:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{KN} &= \dot{I}_{KA} + \dot{I}_{KB} = (1,993 - j2,946) + (-3,226 - j0,738) \approx -1,234 - j3,684 \text{ kA}, \\ \dot{U}_{KN} &= \dot{U}_{KA} - \dot{I}_{KA} \dot{Z}_{KA} = (10,721 - j21,361) - 6(1,993 - j2,946) \approx -1,234 - j3,684 \text{ kV}. \end{aligned}$$

Vienlaikus jāievēro, ka $\dot{U}_{KN} \neq 0 \text{ V}$, tādēļ fāžu spriegumi BV vairs neatbilst spriegumu kritumiem fāžu pārejas pretestībās, bet to summai ar \dot{U}_{KN} . Attiecīgi var iegūt, ka spriegumu kritumi fāžu pretestībās būs

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{KA} &= \dot{U}_{KA} - \dot{U}_{KN} = (10,721 - j21,361) - (-1,234 - j3,684) \approx 11,955 - j17,68 \approx \\ &\approx 21,34e^{-j55,93^\circ} \text{ kV}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{KB} &= \dot{U}_{KB} - \dot{U}_{KN} = (-20,591 - j8,113) - (-1,234 - j3,684) = -19,358 - j4,429 \approx \\ &\approx 19,858e^{-j167,11^\circ} \text{ kV}. \end{aligned}$$

Salīdzinot ar iepriekš iegūtajiem rezultātiem, iespējams pārlicināties, ka šie spriegumu kritumi sakrīt fāzē ar fāžu A un B strāvām un ka spriegums \dot{U}_{KN} sakrīt ar sprieguma kritumu $\dot{I}_{KN} \dot{Z}_{KN}$, jo \dot{Z}_{KN} vērtība ir 1Ω . Izmantojot aprēķina realizācijas programmas tekstu un ievadot BV neitrālē nullei tuvu pretestības vērtību, var pārlicināties, ka tādā gadījumā bojātajām fāzēm strāvas un spriegumi pilnībā sakristu fāzē. QF2 aizsardzības novēroto fāžu spriegumu un strāvu diagramma (6.26. att.) galvenokārt vēlreiz parāda, ka, elektriski attālinoties no nesimetrijas punkta (šeit – īsslēguma vietas), fāžu spriegumu PS un NS komponentu vērtības samazinās, un līdz ar to fāžu spriegumu sistēma kļūst simetriskāka. Līdzīgu situāciju iespējams novērot arī fāžu strāvām, ja starp RUV un BV ir atzarojumi un/vai bojājuma otrā pusē arī ir elektroenerģijas avoti, kā tas ir šajā gadījumā. Izmantojot iepriekš iegūtos skaitliskos rezultātus, iespējams pārlicināties arī par to, ka, neskatoties uz īsslēgumu, uz slodzēm joprojām plūst neliela strāva un pa nebojāto fāzi iespējama arī strāvas plūšana no abiem tīkla avotiem. Minēto iemeslu un pārejas pretestību dēļ RUV nomērāmie fāžu spriegumi, strāvas un to simetriskās komponentes bieži vien ievērojami atšķiras no idealizētajām vērtībām BV, kuras dažreiz redzamas literatūrā ([2], [14] u. c.), kā to parāda arī 6.25. un 6.26. attēlā redzamo vektoru diagrammu atšķirības.

Pilnīgai darba uzdevuma izpildei vēl jānosaka QF2 piesaistītās DA fiksēto šķietamo pretestību atbilstošajai starpfāžu cilpai, t. i., cilpai A–B. Principā iespējama DA palaišanās un potenciāli nostrāde arī cilpām uz zemi A–Z un B–Z, bet, visticamāk, tā nostrādās pēc starpfāžu cilpas pretestības, tādēļ darba uzdevumā paredzēts noteikt vienīgi šīs cilpas šķietamo pretestību. DA noteikto šķietamo pretestību minētajai F–F cilpai iespējams aprēķināt šādi [3], [16]:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{\text{relAB}} &= \frac{\dot{U}_{\text{rel}}}{\dot{I}_{\text{rel}}} = \frac{\dot{U}_{QF2A} - \dot{U}_{QF2B}}{\dot{I}_{QF2A} - \dot{I}_{QF2B}} = \frac{(43,253 - j17,566) - (-26,810 - j31,048)}{(0,921 - j0,942) - (-1,226 + j0,138)} \approx \\ &\approx 23,51 + j18,14 \Omega. \end{aligned}$$

Pieņemot, ka DA II zona paredzēta līnijas L2 aizsardzību QF5 rezervēšanai, ir iespējams tuvināti noteikt šīs zonas iestatījumu primāros omos (k_{dr} pieņemts 0,9, t. i., TA un TV kļūdām nepārsniedzot 5 %) [90]:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{\text{II}} &= k_{\text{dr}}(\dot{Z}_{L1}^1 + k_{\text{dr}}\dot{Z}_{L2}^1) = 0,9((9,4 + j17,18) + 0,9(9,4 + j17,18)) \approx \\ &\approx 16,07 + j29,38 \Omega. \end{aligned}$$

Redzams, ka aktīvās īsslēguma pārejas pretestības dēļ DA nenostādās ar šim īsslēgumam paredzēto II zonu, jo tās fiksētās pretestības Z_{relAB} reālā daļa pārsniedz II zonas iestatījuma Z_{II} reālo daļu. Attiecīgi, lai nostrādātu DA II zona, tās iestatījuma reālā daļa būtu jāpalielina vismaz par 7,44 Ω . Saprotams, ka praksē DA iestatījumu reālajai daļai tipveidā paredz papildu rezervi, kas pārsniedz šim piemēram nepieciešamo, lai ievērotu iespējamās īsslēgumu pārejas pretestības.

6.4. Trešais elektriskās sistēmas režīma parametru aprēķina piemērs vienas šķērsnesimetrijas rašanās gadījumā ar topoloģisku risinājumu

Trešajā režīma parametru aprēķina piemērā, rodoties vienai šķērsnesimetrijai, tiks parādīts topoloģisks risinājums šādam uzdevumam: aprēķināt fāžu spriegumus un strāvas īsslēguma vietā un jaudas slēdzim QF12 piesaistītās aizsardzības nomērītos fāžu spriegumus un strāvas, rodoties vispārīgam trīsfāžu īsslēgumam uz zemi trešā aprēķinu piemēru tīkla līnijā L5 60 % ($\alpha = 0,6$ r. v.) attālumā no kopnēm B4 (6.27. att.). Dati par konkrētā tīkla elementu un slodzes režīma parametriem parādīti šīs grāmatas 11. pielikumā. Papildus jāuzzīmē fāžu spriegumu un strāvu vektoru diagrammas BV un RUV, kā arī jāaprēķina QF12 DA fiksētā šķietamā pretestība visām F–F un F–Z cilpām.

Šī piemēra īsslēguma pārejas pretestības šim piemēram ir $Z_{KA} = 20 \Omega$, $Z_{KB} = 10 \Omega$, $Z_{KC} = Z_{KN} = 0 \Omega$. Aprēķins jāveic laika momentam 1,5 periodus pēc īsslēguma rašanās ($t_{APR} = 30 \text{ ms} = 0,03 \text{ s}$), pieņemot, ka tā rašanās brīdī sistēmas A fāzes sprieguma leņķis bijis 0° , t. i., atbilstošs slodzes režīma parametru aprēķina momentam. Ievērojot, ka t_{APR} ir lielāks par 1 periodu, var uzskatīt, ka AD pret-EDS būs norimis un neparādīsies TS aizvietošanas shēmā. Ņemot vērā, ka aprēķins veicams trīsfāžu īsslēgumam, kuram raksturīgas, salīdzinot ar slodzes režīmu, vairākas reizes stiprākas strāvas, slodžu un AD pretestības, kā arī līniju kapacitātes šajā piemērā netiks ņemtas vērā (kaut praksē īsslēgumu režīmu parametru aprēķiniem 330 kV un augstāka sprieguma tīklos rekomendējams pārbaudīt vismaz kapacitāšu iespējamo ietekmi). Neskatoties uz iepriekš minēto, tiks ņemtas vērā TS īsslēguma strāvas no saules paneļu grupu PV1, PV2 pārveidotājiem attiecīgi P1, P2, lai iegūtu iespēju parādīt īsslēguma aprēķinu, kurā aizvietošanas shēma satur arī strāvas avotus, kaut saprotams, ka to patiesā ietekme uz īsslēguma kopējo strāvu būs nenozīmīga. Runājot par ģeneratoru režīmu, var redzēt, ka $T_d'' = 0,05 \text{ s} > t_{APR}$ un elektriski tuvam īsslēgumam ģeneratori atrastos virspārejas režīmā, bet īsslēguma elektriskā attāluma no ģeneratora dēļ šajā scenārijā pieņemts, ka tas atrodas pārejas režīmā. Jāatzīmē, ka šajā piemērā NS aizvietošanas shēmā līniju L1 un L2 savstarpējā NS mijinduktivitāte neparādīsies kā pretestības elements, jo tiks izmantotas šo līniju NS pretestības, kurās jau ierēķināta mijinduktivitātes iedarbība. Aprēķins tiks veikts pie aprēķina sprieguma 340 kV.

Pirms avotu vektoru pagriešanas, lai ievērotu aprēķina momentu, lietderīgi vispirms ņemt vērā transformatoru slēgumu shēmu un grupu ieviestos pagriezienus ģeneratoriem G1 un G2 un pārveidotajiem P1 un P2. Šāda korekcija jāņem vērā, jo šajos piemēros pēc slodzes režīma parametru aprēķina avotiem atbilstošie EDS un strāvas avoti noteikti ar to leņķi, kāds tas būtu avotu pieslēgšanas vietā, t. i., izpildot pretēju parametru pārrēķinu turpmāk parādītajam. Sistēmai S šāda korekcija nav jāveic, jo to ar BV savieno AT1 un AT2 AS–VS kopējais tinums, kam vismaz šajā piemērā atbilst 0. slēguma grupa. Pārējos avotus savieno T1, T2 un T5, kur pārejas uz BV notiek no transformatora ar slēgumu shēmu un grupu Y_0/Δ -11 trīsstūrī slēgtā tinuma uz zvaigznē savienotā tinuma pusi, tādēļ šo avotu ekvivalentie EDS un strāvas avoti jāpagriež par -30° :

$$\begin{aligned} \dot{E}'_{GABV} &= \dot{E}'_{GA} e^{-j30^\circ} = (90,69 + j206,73)(0,866 - j0,5) \approx 181,90 + j133,68 \text{ kV}, \\ \dot{J}_{PKABV} &= \dot{J}_{PKA} e^{-j30^\circ} = (0,0141 + j0,0016)(0,866 - j0,5) \approx 0,0130 - j0,0057 \text{ kA}. \end{aligned}$$

Attiecīgi sistēmas A fāzes EDS, ģeneratoru A fāzes pārejas režīma EDS un pārveidotāju strāvas avotu vērtības laika momentā t_{APR} būs

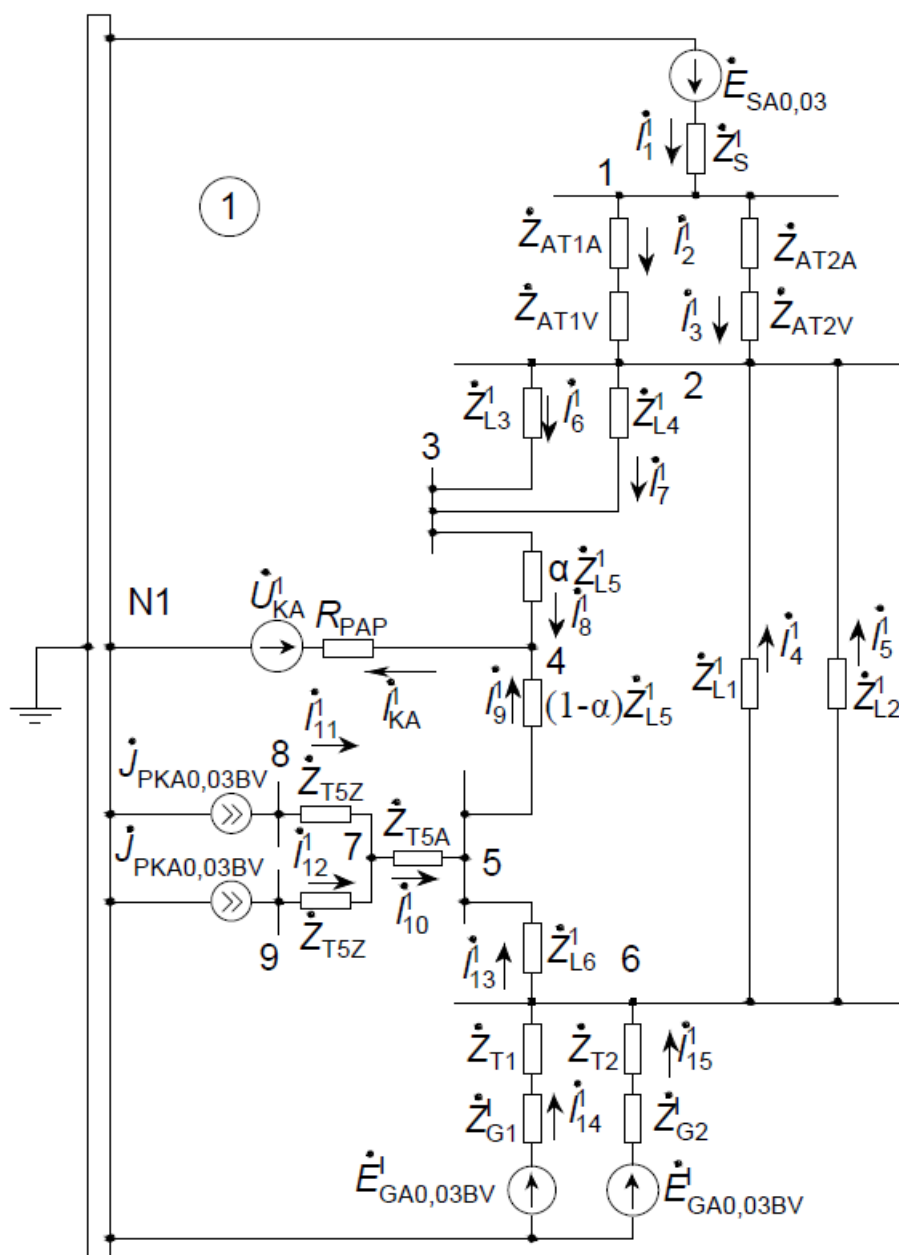
$$\begin{aligned} \dot{E}_{SA0,03} &= \dot{E}_{SA}(\cos(\Delta\delta) + j \sin(\Delta\delta)) = 196,3(\cos(180^\circ) + j \sin(180^\circ)) = -196,3 \text{ kV}, \\ \dot{E}'_{GA0,03BV} &= \dot{E}'_{GABV}(\cos(\Delta\delta) + j \sin(\Delta\delta)) = -1(181,90 + j133,68) = \\ &= -181,90 - j133,68 \text{ kV}, \\ \dot{J}_{PKA0,03BV} &= \dot{J}_{PKABV}(\cos(\Delta\delta) + j \sin(\Delta\delta)) = -1(0,0130 - j0,0057) \approx \\ &\approx -0,013 + j0,006 \text{ kA}. \end{aligned}$$

Ņemot vērā, ka BV visās fāzēs ir savstarpēji atšķirīgas pārejas pretestības, var saprast, ka jāaprēķina vispārīgas šķērsnesimetrijas režīma parametri, bet tik lielam tīklam veikt secību aizvietošanas shēmu ekvivalentēšanu būtu laikietilpīgi. Tādēļ tiks veikts vienlaicīgs skaitlisks secību aizvietošanas shēmu režīmu parametru aprēķins, kurā BV aprēķina fāzes spriegumu atainojošo EDS avotu vērtības tiks pārrēķinātas starp tuvinājuma soļiem, izmantojot (6.4.) vienādojumu sistēmu. Pirmajam aprēķina solim brīvi tiks pieņemtas šādas aprēķina fāzes BV sprieguma simetrisko komponentu vērtības:

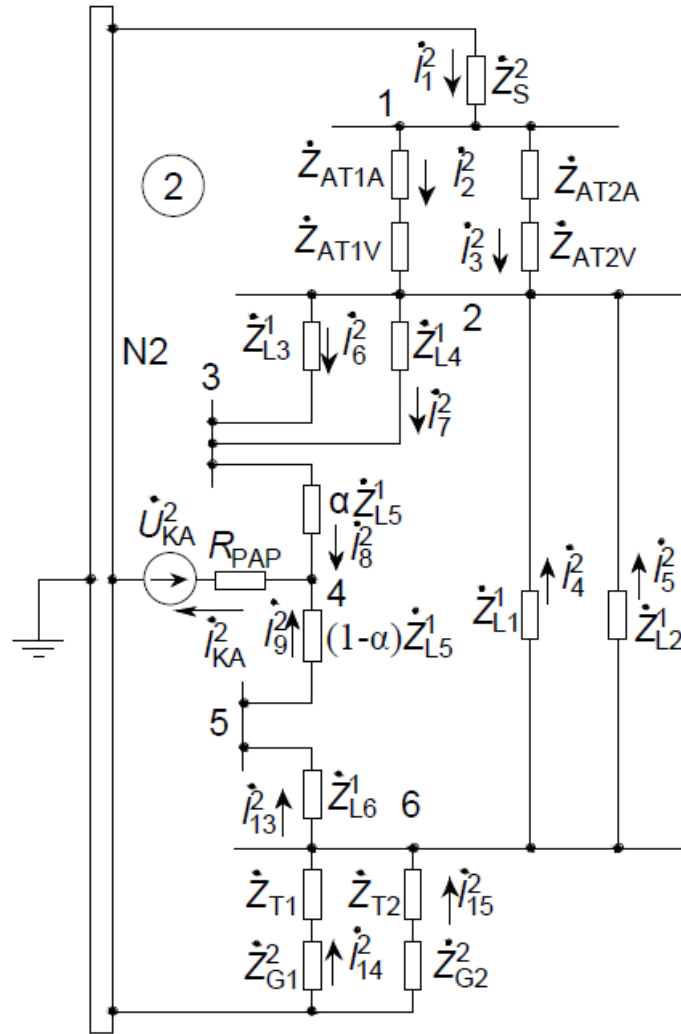
$$\dot{U}_{KA}^1 = \dot{U}_{KA}^2 = \dot{U}_{KA}^0 = \dot{E}_{SA0,03}/2 = -98,15 \text{ kV}.$$

Robežnosacījumu (6.4.) izmantošana nozīmē arī to, ka par aprēķina fāzi tiks izraudzīta A fāze, jo šie robežnosacījumi iegūti A fāzes simetriskajām komponentēm. Nākamais solis ir atsevišķo secību aizvietošanas shēmu sastādīšana, kur TS aizvietošanas shēma parādīta 6.28. attēlā, PS aizvietošanas shēma – 6.29. attēlā un NS aizvietošanas shēma – 6.30. attēlā. Var ievērot, ka atsevišķajām secību aizvietošanas shēmām neitrāles parādītas sazēmētas. Tas izdarīts tādēļ, ka katrai no secību aizvietošanas shēmām veic atsevišķu režīma parametru aprēķinu, kaut arī tās sasaista ar robežnosacījumu (6.4.) palīdzību starp tuvinājumu soļiem un katrai no aizvietošanas shēmām nepieciešams bāzes mezgls. Secību aizvietošanas shēmu īsslēgumu zaros būs redzamas arī necīgas aktīvās papildu pretestības $R_{PAP} = 0,0001 \Omega$, lai šiem zariem nodrošinātu skaitliskajam aprēķinam nepieciešamo galīgo pretestību (skaidrojumam skatīt 4. nodaļas sākumu). PS aizvietošanas shēmā arī neparādās pārveidotāju un T5 zari, jo to strāvu PS komponentēm, visticamāk, jābūt 0 A pārveidotāju vadības loģikas dēļ, tādēļ to

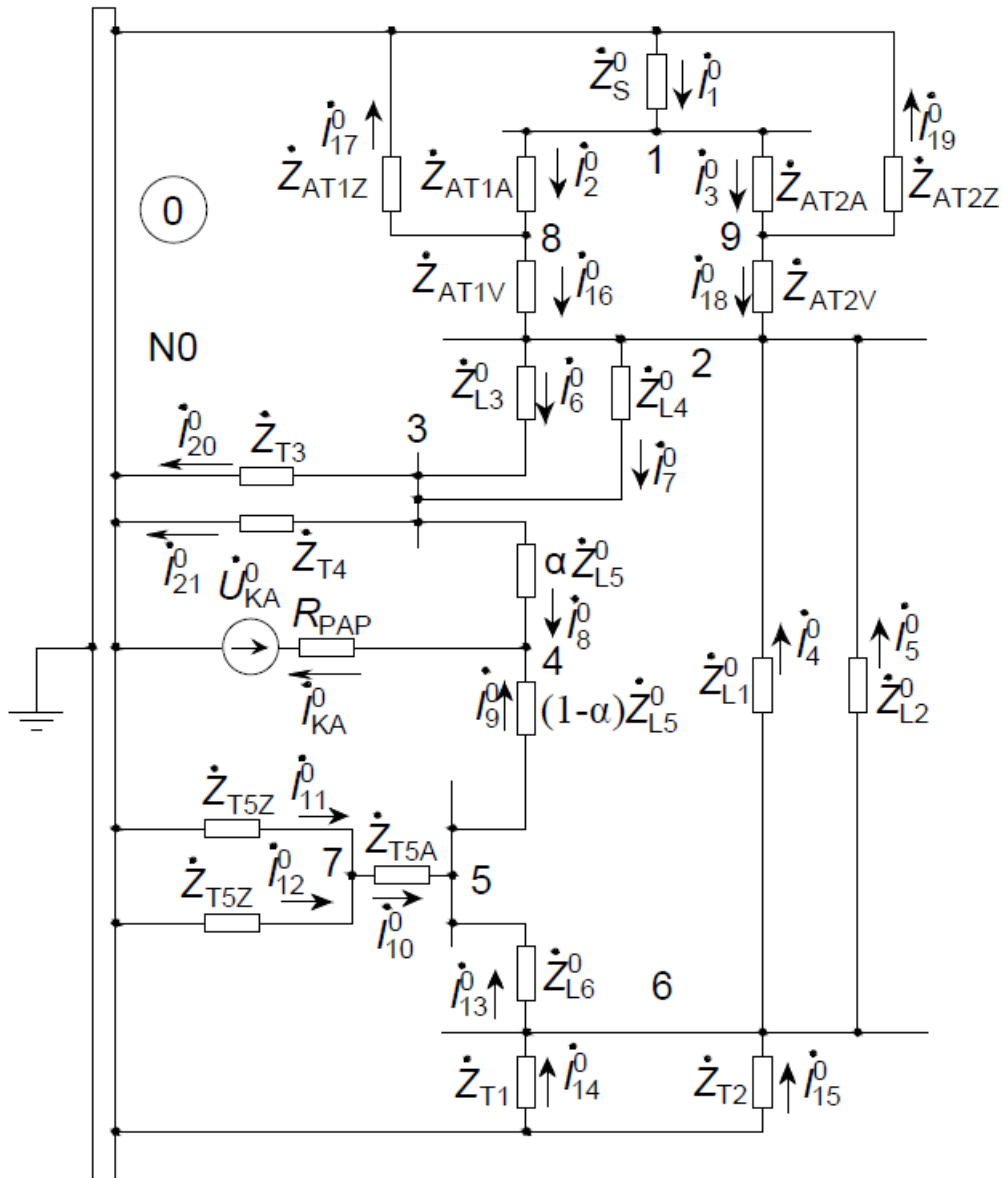
sprieguma PS komponentes nepieciešamības gadījumā var pieņemt vienādas ar 5. mezgla PS spriegumu, jo starp pārveidotāju pieslēguma kopnēm un 5. mezglu neveidosies PS sprieguma kritumi.



6.28. att. Trešā aprēķinu piemēru tīkla nesimetriska trīsfāžu īsslēguma uz zemi līnijā L5 TS aizvietošanas shēma.



6.29. att. Trešā aprēķinu piemēru tīkla nesimetriska trīsfāžu īsslēguma uz zemi līnijā L5 PS aizvietošanas shēma.



6.30. att. Trešā aprēķinu piemēru tīkla nesimetriska trīsfasu īsslēguma uz zemi līnijā L5 NS aizvietošanas shēma.

Nākamais solis ir sagatavot aprēķina ieejas matricas:

- TS aizvietošanas shēmas režīma parametru aprēķinam nepieciešama pirmās incidences matrica $M1$, zaru pretestību vektors $ZZ1$, zaru EDS vektors $E1$ un mezglu strāvas avotu vektors $I1$;
- PS aizvietošanas shēmas režīma parametru aprēķinam nepieciešama pirmās incidences matrica $M2$, zaru pretestību vektors $ZZ2$, zaru EDS vektors $E2$ (PS mezglu strāvas avotu vektoru $I2$ aizpilda ar nullēm);
- NS aizvietošanas shēmas režīma parametru aprēķinam nepieciešama pirmās incidences matrica $M0$, zaru pretestību vektors $ZZ0$, zaru EDS vektors $E0$ (NS mezglu strāvas avotu vektoru $I0$ aizpilda ar nullēm).

TS aizvietošanas shēmas režīma parametru aprēķinam nepieciešamās ieejas matricas:

$M1$	i_1^1	i_2^1	i_3^1	i_4^1	i_5^1	i_6^1	i_7^1	i_8^1	i_9^1	i_{10}^1	i_{11}^1	i_{12}^1	i_{13}^1	i_{14}^1	i_{15}^1	i_{KA}^1
1	-1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	-1	-1	-1	-1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	-1	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	1
5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	-1	0	0	0
6	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0

ZZ1

i_1^1	\dot{Z}_{S1}^1	$2,3 + j23,01$
i_2^1	$\dot{Z}_{AT1A} + \dot{Z}_{AT1V}$	$0,36 + j27,42$
i_3^1	$\dot{Z}_{AT2A} + \dot{Z}_{AT2V}$	$0,36 + j27,42$
i_4^1	\dot{Z}_{L1}^1	$10,33 + j56,88$
i_5^1	\dot{Z}_{L2}^1	$10,33 + j56,88$
i_6^1	\dot{Z}_{L3}^1	$5,88 + j32,61$
i_7^1	\dot{Z}_{L4}^1	$5,88 + j32,61$
i_8^1	$\alpha \dot{Z}_{L5}^1$	$= 0,6(4,11 + j22,83) \Omega.$
i_9^1	$(1 - \alpha) \dot{Z}_{L5}^1$	$0,4(4,11 + j22,83)$
i_{10}^1	\dot{Z}_{T5A}	$6,13 + j108,73$
i_{11}^1	\dot{Z}_{T5Z}	$6,13 + j381,1$
i_{12}^1	\dot{Z}_{T5Z}	$6,13 + j381,1$
i_{13}^1	\dot{Z}_{L6}^1	$4,7 + j26,09$
i_{14}^1	$\dot{Z}_{T1} + \dot{Z}_{G1}^{1'}$	$8,77 + j249,59$
i_{15}^1	$\dot{Z}_{T2} + \dot{Z}_{G2}^{1'}$	$8,77 + j249,59$
i_{KA}^1	R_{PAP}	$0,0001$

$E1$			
i_1^1	$\dot{E}_{SA0,03}$	-196,3	
i_2^1	0	0	
i_3^1	0	0	
i_4^1	0	0	
i_5^1	0	0	
i_6^1	0	0	
i_7^1	0	0	
i_8^1	0	= 0	kV.
i_9^1	0	0	
i_{10}^1	0	0	
i_{11}^1	0	0	
i_{12}^1	0	0	
i_{13}^1	0	0	
i_{14}^1	$\dot{E}'_{GA0,03BV}$	-181,90 - j133,68	
i_{15}^1	$\dot{E}'_{GA0,03BV}$	-181,90 - j133,68	
i_{KA}^1	$-\dot{U}_{KA}^1$	98,15	
$I1$			
1	0	0	
2	0	0	
3	0	0	
4	0	0	
5	0	= 0	kA.
6	0	0	
7	0	0	
8	$\dot{J}_{PKA0,03BV}$	-0,013 + j0,006	
9	$\dot{J}_{PKA0,03BV}$	-0,013 + j0,006	

PS aizvietošanas shēmas režīma parametru aprēķinam nepieciešamās matricas:

$M2$	i_1^2	i_2^2	i_3^2	i_4^2	i_5^2	i_6^2	i_7^2	i_8^2	i_9^2	i_{13}^2	i_{14}^2	i_{15}^2	i_{KA}^2
1	-1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	-1	-1	-1	-1	1	1	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	-1	-1	1	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	1
5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0
6	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	-1	-1	0

ZZ2

$$\begin{array}{lll}
 i_1^2 & \dot{Z}_{S1}^2 & 2,3 + j23,01 \\
 i_2^2 & \dot{Z}_{AT1A} + \dot{Z}_{AT1V} & 0,36 + j27,42 \\
 i_3^2 & \dot{Z}_{AT2A} + \dot{Z}_{AT2V} & 0,36 + j27,42 \\
 i_4^2 & \dot{Z}_{L1}^1 & 10,33 + j56,88 \\
 i_5^2 & \dot{Z}_{L2}^1 & 10,33 + j56,88 \\
 i_6^2 & \dot{Z}_{L3}^1 & 5,88 + j32,61 \\
 i_7^2 & \dot{Z}_{L4}^1 & 5,88 + j32,61 \\
 i_8^2 & \alpha \dot{Z}_{L5}^1 & 0,6(4,11 + j22,83) \\
 i_9^2 & (1 - \alpha) \dot{Z}_{L5}^1 & 0,4(4,11 + j22,83) \\
 i_{13}^2 & \dot{Z}_{L6}^1 & 4,7 + j26,09 \\
 i_{14}^2 & \dot{Z}_{T1} + \dot{Z}_{G1}^2 & 14,67 + j162,48 \\
 i_{15}^2 & \dot{Z}_{T2} + \dot{Z}_{G2}^2 & 14,67 + j162,48 \\
 i_{KA}^2 & R_{PAP} & 0,0001
 \end{array} = \Omega.$$

E2

$$\begin{array}{lll}
 i_1^2 & 0 & 0 \\
 i_2^2 & 0 & 0 \\
 i_3^2 & 0 & 0 \\
 i_4^2 & 0 & 0 \\
 i_5^2 & 0 & 0 \\
 i_6^2 & 0 & 0 \\
 i_7^2 & 0 & 0 \\
 i_8^2 & 0 & 0 \\
 i_9^2 & 0 & 0 \\
 i_{13}^2 & 0 & 0 \\
 i_{14}^2 & 0 & 0 \\
 i_{15}^2 & 0 & 0 \\
 i_{KA}^2 & -\dot{U}_{KA}^2 & 98,15
 \end{array} = \text{kV}.$$

NS aizvietošanas shēmas režīma parametru aprēķinam nepieciešamās matricas:

$M0$	i_1^0	i_2^0	i_3^0	i_4^0	i_5^0	i_6^0	i_7^0	i_8^0	i_9^0	i_{10}^0	i_{11}^0
1	-1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	-1	-1	1	1	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	-1	-1	1	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0
6	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1
8	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
$M0$	i_{12}^0	i_{13}^0	i_{14}^0	i_{15}^0	i_{16}^0	i_{17}^0	i_{18}^0	i_{19}^0	i_{20}^0	i_{21}^0	i_{KA}^0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	-1	0	-1	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
5	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0
7	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0

ZZ0

i_1^0	\dot{Z}_{S1}^0	$2,3 + j23,01$	
i_2^0	\dot{Z}_{AT1A}^0	$0,18 + j27,42$	
i_3^0	\dot{Z}_{AT2A}^0	$0,18 + j27,42$	
i_4^0	$\dot{Z}_{L1+ML1L2}^0$	$50,58 + j228,73$	
i_5^0	$\dot{Z}_{L2+ML1L2}^0$	$50,58 + j228,73$	
i_6^0	\dot{Z}_{L3}^0	$19,15 + j71,70$	
i_7^0	\dot{Z}_{L4}^0	$19,15 + j71,70$	
i_8^0	$\alpha \dot{Z}_{L5}^0$	$0,6(13,41 + j50,19)$	
i_9^0	$(1 - \alpha) \dot{Z}_{L5}^0$	$0,4(13,41 + j50,19)$	
i_{10}^0	\dot{Z}_{T5A}^0	$6,13 + j108,73$	
i_{11}^0	\dot{Z}_{T5Z}^0	$6,13 + j381,1$	$\Omega.$
i_{12}^0	\dot{Z}_{T5Z}^0	$6,13 + j381,1$	
i_{13}^0	\dot{Z}_{L6}^0	$15,32 + j57,36$	
i_{14}^0	\dot{Z}_{T1}^0	$1,57 + j66,2$	
i_{15}^0	\dot{Z}_{T2}^0	$1,57 + j66,2$	
i_{16}^0	\dot{Z}_{AT1V}^0	$0,18$	
i_{17}^0	\dot{Z}_{AT1Z}^0	$0,18 + j45,70$	
i_{18}^0	\dot{Z}_{AT2V}^0	$0,18$	
i_{19}^0	\dot{Z}_{AT2Z}^0	$0,18 + j45,70$	
i_{20}^0	\dot{Z}_{T3}^0	$1,57 + j66,2$	
i_{21}^0	\dot{Z}_{T4}^0	$1,57 + j66,2$	
i_{KA}^0	R_{PAP}	$0,0001$	

$$\begin{array}{l}
E0 \\
i_1^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_2^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_3^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_4^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_5^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_6^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_7^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_8^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_9^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_{10}^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_{11}^0 \quad 0 = 0 \quad \text{kV.} \\
i_{12}^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_{13}^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_{14}^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_{15}^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_{16}^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_{17}^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_{18}^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_{19}^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_{20}^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_{KA}^0 \quad -\dot{U}_{KA}^0 \quad 98,15
\end{array}$$

No zaru pretestību vektoriem $ZZ1$, $ZZ2$ un $ZZ0$ šajā piemērā iespējams iegūt pretestību matricas $Z1$, $Z2$ un $Z0$, izmantojot minētos vektors kā diagonāles elementus un pārējās matricu pozīcijas aizpildot ar vērtībām 0Ω . Pēc ieejas matricu ievades un matricu $Z1$, $Z2$ un $Z0$ sastādīšanas nosaka secību aizvietošanas shēmu vadītspēju matricas $Y1$, $Y2$ un $Y0$ un brīvo mainīgo vektorus $B1$, $B2$ un $B0$ ar šādām formulām:

$$\begin{aligned}
Y1 &= M1 \cdot Z1^{-1} M1^T, Y2 = M2 \cdot Z2^{-1} M2^T, Y0 = M0 \cdot Z0^{-1} M0^T, \\
B1 &= I1 - M1 \cdot Z1^{-1} E1, B2 = -M2 \cdot Z2^{-1} E2, B0 = -M0 \cdot Z0^{-1} E0.
\end{aligned}$$

Aplūkotajā piemērā skaitliskā aprēķina konverģences uzlabošanai bojājuma aprēķinam tiks invertētas iegūtās vadītspēju matricas un izmantots (4.24.) līdzīgs risinājums. Ērtībai iespējams atsevišķi noteikt arī īsslēguma fāžu pārejas pretestību kombināciju vērtības un parādīt faktisko vienādojumu sistēmu, kas tiks izmantota īsslēguma robežnosacījumu ievērošanai aizvietošanas shēmās ieslēgto EDS avotu vērtību atjaunināšanai starp aprēķinu soļiem:

$$\begin{aligned}
\dot{Z}_{KABC1} &= \dot{Z}_{KA} + \dot{Z}_{KB} + \dot{Z}_{KC} = 30 \Omega, \\
\dot{Z}_{KABC2} &= \dot{Z}_{KA} + a\dot{Z}_{KB} + a^2\dot{Z}_{KC} \approx 15 + j8,66 \Omega, \\
\dot{Z}_{KABC3} &= \dot{Z}_{KA} + a^2\dot{Z}_{KB} + a\dot{Z}_{KC} \approx 15 - j8,66 \Omega,
\end{aligned}$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{KA}^1 = (1/3)(i_{KA}^1[30] + i_{KA}^2[15 - j8,66] + i_{KA}^0[15 + j8,66]). \\ \dot{U}_{KA}^2 = (1/3)(i_{KA}^1[15 + j8,66] + i_{KA}^2[30] + i_{KA}^0[15 - j8,66]). \\ \dot{U}_{KA}^0 = (1/3)(i_{KA}^1[15 - j8,66] + i_{KA}^2[15 + j8,66] + i_{KA}^0[30]). \end{cases}$$

Veicot skaitlisko aprēķinu, kā paskaidrots teorijā, risinājums ar precizitātes robežu 0,001 kV tika iegūts ar 21 tuvinājuma soli. Aprēķina īstenošanas programmas teksts parādīts šīs grāmatas 13. pielikumā. Aprēķinu rezultātā iegūtie secību aizvietošanas shēmu mezglu spriegumi un zaru strāvas matricu formā ir

$U1$			$U0$	
1	$-130,98 + j8,28$		1	$-0,54 + j1,29$
2	$-92,81 + j16,52$	$U2$	2	$-0,91 + j2,03$
3	$-54,60 + j24,27$	1	3	$-1,89 + j7,01$
4	$-22,49 + j30,78$	2	4	$-2,90 + j18,04$
5	$-36,81 + j24,42$	3	5	$-2,57 + j13,78$
6	$-77,29 + j6,88$	4	6	$-1,52 + j4,35$
7	$-38,20 + j21,66$	5	7	$-1,77 + j8,74$
8	$-40,44 + j16,74$	6	8	$-0,93 + j2,02$
9	$-40,44 + j16,74$		9	$-0,93 + j2,02$
				I_{Z0}
				i_1^0
				$-0,053 - j0,029$
				i_2^0
				$-0,027 - j0,014$
				i_3^0
				$-0,027 - j0,014$
				i_4^0
				$0,009 + j0,005$
				i_5^0
				$0,009 + j0,005$
				i_6^0
				$-0,062 - j0,030$
				i_7^0
				$-0,062 - j0,030$
				i_8^0
				$-0,334 - j0,123$
				i_9^0
				$-0,194 - j0,068$
				i_{10}^0
				$-0,046 - j0,010$
				i_{11}^0
				$-0,023 - j0,005$, kA.
				i_{12}^0
				$-0,023 - j0,005$
				i_{13}^0
				$-0,149 - j0,058$
				i_{14}^0
				$-0,065 - j0,024$
				i_{15}^0
				$-0,065 - j0,024$
				i_{16}^0
				$-0,071 - j0,035$
				i_{17}^0
				$0,044 + j0,020$
				i_{18}^0
				$-0,071 - j0,035$
				i_{19}^0
				$0,044 + j0,020$
				i_{20}^0
				$0,105 + j0,031$
				i_{21}^0
				$0,105 + j0,031$
				i_{KA}^0
				$-0,528 - j0,191$

Šie rezultāti jau satur fāžu spriegumu un strāvu simetriskās komponentes gan BV, gan RUV, bet šīs vērtības vispirms lietderīgi izdalīt no rezultātu vektoriem vēlākai pārejai uz fāžu lielumiem. Šajā piemērā arī var izmantot konkrētajām kopnēm atbilstošos mezglu spriegumus, jo katrai no secību aizvietošanas shēmām neitrāle pieņemta par tās bāzes mezglu un zemēta. Minētā simetrisko komponentu izdalīšana parādīta turpmāk:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{KA}^1 \\ \dot{U}_{KA}^2 \\ \dot{U}_{KA}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U1(4) \\ U2(4) \\ U0(4) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -22,49 + j30,78 \\ -23,73 + j7,45 \\ -2,90 + j18,05 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 38,13e^{j126,15^\circ} \\ 24,87e^{j162,57^\circ} \\ 18,28e^{j99,13^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{KA}^1 \\ \dot{I}_{KA}^2 \\ \dot{I}_{KA}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{Z1}(16) \\ I_{Z2}(13) \\ I_{Z0}(22) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1,818 + j3,584 \\ -0,110 - j0,580 \\ -0,528 - j0,191 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 4,019e^{j116,89^\circ} \\ 0,590e^{-j100,76^\circ} \\ 0,561e^{-j160,14^\circ} \end{bmatrix} \text{ kA,}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{QF12A}^1 \\ \dot{U}_{QF12A}^2 \\ \dot{U}_{QF12A}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U1(2) \\ U2(2) \\ U0(2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -92,81 + j16,52 \\ -14,01 + j3,71 \\ -0,91 + j2,03 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 94,27e^{j169,91^\circ} \\ 14,50e^{j165,17^\circ} \\ 2,22e^{j114,27^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{QF12A}^1 \\ \dot{I}_{QF12A}^2 \\ \dot{I}_{QF12A}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{Z1}(6) \\ I_{Z2}(6) \\ I_{Z0}(6) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,435 + j1,094 \\ -0,032 - j0,168 \\ -0,062 - j0,030 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1,177e^{j111,68^\circ} \\ 0,171e^{-j100,83^\circ} \\ 0,069e^{-j153,92^\circ} \end{bmatrix} \text{ kA.}$$

Nākamais solis ir pāreja no A fāzes simetriskajām komponentēm uz fāžu lielumiem, izmantojot Forteskju transformāciju:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{KA} \\ \dot{U}_{KB} \\ \dot{U}_{KC} \end{bmatrix} = k_A \begin{bmatrix} \dot{U}_{KA}^1 \\ \dot{U}_{KA}^2 \\ \dot{U}_{KA}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -22,49 + j30,78 \\ -23,73 + j7,45 \\ -2,90 + j18,05 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} -49,118 + j56,28 \\ 40,42 - j2,14 \\ 0 \end{bmatrix} \approx$$

$$\approx \begin{bmatrix} 74,70e^{j131,11^\circ} \\ 40,48e^{-j3,03^\circ} \\ 0 \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{KA} \\ \dot{I}_{KB} \\ \dot{I}_{KC} \end{bmatrix} = k_A \begin{bmatrix} \dot{I}_{KA}^1 \\ \dot{I}_{KA}^2 \\ \dot{I}_{KA}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1,818 + j3,584 \\ -0,110 - j0,580 \\ -0,528 - j0,191 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} -2,456 + j2,814 \\ 4,042 - j0,214 \\ -3,170 - j3,172 \end{bmatrix} \approx$$

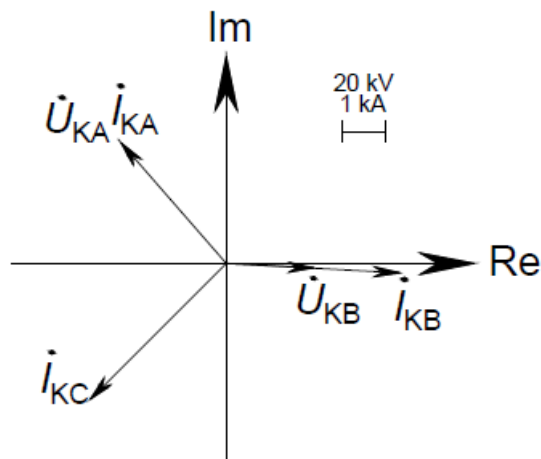
$$\approx \begin{bmatrix} 3,735e^{j131,11^\circ} \\ 4,048e^{-j3,03^\circ} \\ 4,484e^{-j134,98^\circ} \end{bmatrix} \text{ kA,}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{QF12A} \\ \dot{U}_{QF12B} \\ \dot{U}_{QF12C} \end{bmatrix} = k_A \begin{bmatrix} \dot{U}_{QF12A}^1 \\ \dot{U}_{QF12A}^2 \\ \dot{U}_{QF12A}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -92,81 + j16,52 \\ -14,01 + j3,71 \\ -0,91 + j2,03 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} -107,74 + j22,25 \\ 63,59 + j60,16 \\ 41,41 - j76,33 \end{bmatrix} \approx$$

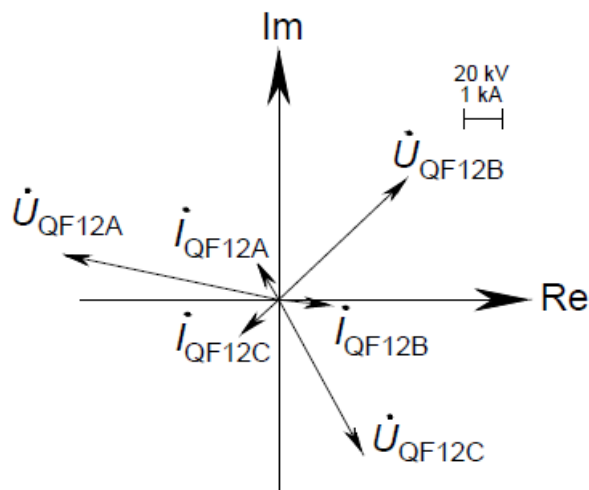
$$\approx \begin{bmatrix} 110,02e^{j168,33^\circ} \\ 87,54e^{j43,41^\circ} \\ 86,84e^{-j61,52^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

$$\begin{bmatrix} i_{QF12A} \\ i_{QF12B} \\ i_{QF12C} \end{bmatrix} = k_A \begin{bmatrix} i_{QF12A}^1 \\ i_{QF12A}^2 \\ i_{QF12A}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0,435 + j1,094 \\ -0,032 - j0,168 \\ -0,062 - j0,030 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} -0,528 + j0,896 \\ 1,264 - j0,144 \\ -0,920 - j0,842 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1,040e^{j120,54^\circ} \\ 1,272e^{-j6,51^\circ} \\ 1,247e^{-j137,55^\circ} \end{bmatrix} \text{ kA.}$$

Atbilstoši iegūtajiem fāžu spriegumiem un strāvām iespējams uzzīmēt vektoru diagrammas BV (6.31. att.) un RUV (6.32. att.).



6.31. att. Trešā aprēķinu piemēru tīkla nesimetriska trīsfāžu īsslēguma uz zemi līnijā L5 fāžu spriegumu strāvu vektoru diagramma BV 30 ms pēc īsslēguma rašanās.



6.32. att. Trešā aprēķinu piemēru tīkla nesimetriska trīsfāžu īsslēguma uz zemi līnijā L5 fāžu spriegumu un strāvu vektoru diagramma QF12 aizsardzības uzstādīšanas vietā 30 ms pēc īsslēguma rašanās.

6.31. attēlā redzamā vektoru diagramma parāda, ka aktīvās pārejas pretestības dēļ BV A un B fāzes sprieguma un strāvas vektoru leņķi sakrīt fāzē, bet C fāzē spriegums ir praktiski vienāds ar 0 V, jo pārejas pretestība C fāzē un starp neitrāles punktu un zemi ir 0 Ω. Savukārt 6.32. attēlā redzamā (no īsslēguma vietas elektriski attālinātās) aizsardzības QF12 fāžu strāvu un spriegumu

vektoru diagramma parāda, ka lieljaudas sistēmas tuvumā spriegumi bieži saglabājas praktiski simetriski un ka atšķirībā no BV līnijā L3 plūstošajai strāvai ir izteikta induktīva komponente, tādēļ fāžu strāvas atpaliek no spriegumiem. Abās vektoru diagrammās arī redzams, ka aprēķina veikšanas momentam 30 ms pēc īsslēguma rašanās brīža dēļ visu fāžu spriegumu vektori ir praktiski pretēji to ierastajām pozīcijām kompleksajā plaknē, piemēram, tā vietā, lai A fāzes sprieguma vektora virziens būtu tuvs reālās ass pozitīvajam virzienam (leņķim 0°), tas virzīts tuvāk reālai asij pretējam virzienam (leņķim 180° , kuram šajā laika momentā atbilst sistēmas A fāzes EDS virziens). Attiecīgi par QF12 uzstādītās aizsardzības mazo elektrisko attālumu līdz sistēmai liecina arī tās nomērītā A fāzes sprieguma vektora leņķa vērtības tuvums 180° .

Pilnīgai darba uzdevuma izpildei vēl jānosaka DA releja fiksētā šķietamā pretestība. Ņemot vērā neparasto īsslēguma veidu, uzdevumā paredzēts aprēķināt DA noteikto šķietamo pretestību visām F–F un F–Z cilpām. F–F cilpām šķietamā pretestība būs [3], [16]:

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{\text{relAB}} &= \frac{\dot{U}_{\text{QF12A}} - \dot{U}_{\text{QF12B}}}{i_{\text{QF12A}} - i_{\text{QF12B}}} = \frac{(-107,74 + j22,25) - (63,59 + j60,16)}{(-0,528 + j0,896) - (1,264 - j0,144)} \approx \\ &\approx 62,33 + j57,31 \, \Omega, \\ \dot{Z}_{\text{relBC}} &= \frac{\dot{U}_{\text{QF12B}} - \dot{U}_{\text{QF12C}}}{i_{\text{QF12B}} - i_{\text{QF12C}}} = \frac{(63,59 + j60,16) - (41,41 - j76,33)}{(1,264 - j0,144) - (-0,920 - j0,842)} \approx \\ &\approx 27,32 + j53,76 \, \Omega, \\ \dot{Z}_{\text{relCA}} &= \frac{\dot{U}_{\text{QF12C}} - \dot{U}_{\text{QF12A}}}{i_{\text{QF12C}} - i_{\text{QF12A}}} = \frac{(41,41 - j76,33) - (-107,74 + j22,25)}{(-0,920 - j0,842) - (-0,528 + j0,896)} \approx \\ &\approx 36,56 + j93,86 \, \Omega.\end{aligned}$$

F–Z cilpu pretestības aprēķina veikšanai vispirms jānosaka arī līnijas L3 NS kompensācijas koeficients:

$$\begin{aligned}k_0 &= (\dot{Z}_{\text{L3}}^0 - \dot{Z}_{\text{L3}}^1) / \dot{Z}_{\text{L3}}^1 = ((19,15 + j71,7) - (5,88 + j32,61)) / (5,88 + j32,61) \approx \\ &\approx 1,232 - j0,185, \\ \dot{Z}_{\text{relAZ}} &= \frac{\dot{U}_{\text{QF12A}}}{i_{\text{QF12A}} + k_0 i_{\text{QF12A}}^0} = \frac{(-107,74 + j22,25)}{(-0,528 + j0,896) + (1,232 - j0,185)(-0,062 - j0,030)} \approx \\ &\approx 75,35 + j71,02 \, \Omega, \\ \dot{Z}_{\text{relBZ}} &= \frac{\dot{U}_{\text{QF12B}}}{i_{\text{QF12B}} + k_0 i_{\text{QF12B}}^0} = \frac{(63,59 + j60,16)}{(1,264 - j0,144) + (1,232 - j0,185)(-0,062 - j0,030)} \approx \\ &\approx 45,51 + j57,40 \, \Omega, \\ \dot{Z}_{\text{relCZ}} &= \frac{\dot{U}_{\text{QF12C}}}{i_{\text{QF12C}} + k_0 i_{\text{QF12C}}^0} = \frac{(41,41 - j76,33)}{(-0,920 - j0,842) + (1,232 - j0,185)(-0,062 - j0,030)} \approx \\ &\approx 14,09 + j64,00 \, \Omega.\end{aligned}$$

Pieņemot, ka DA II zona paredzēta līnijas L5 QF16 piesaistītās aizsardzības rezervēšanai ($\dot{Z}_{\text{L5}}^1 < \dot{Z}_{\text{L4}}^1$), ir iespējams tuvināti noteikt šīs zonas iestatījumu primāros Ω (k_{dr} pieņemts 0,9, t. i., TA un TV kļūda nepārsniedz 5 %, un pieņemts, ka, iestatījumu rēķinot, pieskaitīta papildu pārejas pretestības ievērošanas rezerve 50 Ω) [90]:

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{\text{II}} &= 50 + k_{\text{dr}}(\dot{Z}_{\text{L3}}^1 + k_{\text{dr}}\dot{Z}_{\text{L5}}^1) = 50 + 0,9((5,88 + j32,61) + 0,9(4,11 + j22,83)) \approx \\ &\approx 58,62 + j47,84 \, \Omega.\end{aligned}$$

Salīdzinot \dot{Z}_{II} ar DA releja fiksētajām šķietamajām pretestībām, redzams, ka neviena no cilpām ar II zonu nenostādātu, jo visām cilpām DA releja fiksētās pretestības imaginārā daļa X_{rel} pārsniedz iestatījuma imaginārās daļas robežu $47,84 \Omega$ reaktances efekta dēļ, par kuru vairāk aprakstīts [79], [90] u. c. No četrām DA bieži izmantotajām nostrādes zonām nākamā ir III zona, kurai arī, pieskaitot 50Ω rezerves pretestību (praksē šī rezerve var atšķirties) un pieņemot, ka tā rezervē L6 jaudas slēdzim QF18 piesaistīto aizsardzību, III zonas iestatījums primāros Ω būs šādas [90]:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{III} &= 50 + k_{dr}(\dot{Z}_{L3}^1 + \dot{Z}_{L5}^1 + k_{dr}\dot{Z}_{L6}^1) = \\ &= 50 + 0,9((5,88 + j32,61) + (4,11 + j22,83) + 0,9(4,7 + j26,09)) \approx \\ &\approx 62,80 + j71,03 \Omega. \end{aligned}$$

Ar DA III zonu var nostrādāt cilpas: A–B, B–C, B–Z, C–Z. Šis rezultāts kopā ar aprēķinātajām DA šķietamajām pretestībām (it īpaši to aktīvajām komponentēm R_{rel}) acīmredzami arī atbilst darba uzdevumā minētajām atšķirīgajām fāžu pārejas pretestībām $\dot{Z}_{KA} = 20 \Omega$, $\dot{Z}_{KB} = 10 \Omega$, $\dot{Z}_{KC} = \dot{Z}_{KN} = 0 \Omega$.

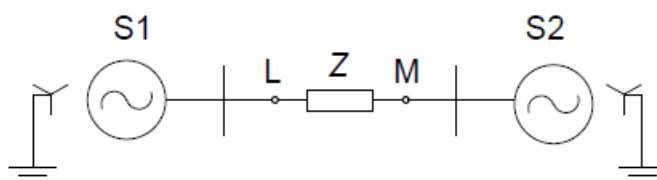
Jāatzīmē arī novērojums, ka šis nosacīti atdalītais secību aizvietošanas shēmu aprēķina paņēmieni konkrētajā skaitliskā risinājuma veidā ir jutīgs pret īsslēguma pārejas pretestību vērtībām, un, aplūkojot vēl lielākas pārejas pretestību vērtības šim piemēram, tā skaitlisks aprēķins var diverģēt. Nonākot šādā situācijā, ieteicams izmēģināt citu LVS risināšanas metodi vai citādi ievērot robežnosacījums, vai aptuveni izmantot kādu no kompleksajām aizvietošanas shēmām, vai arī izmantot kādu specializētu elektrisko sistēmu modelēšanas programmatūru. Potenciāli iespējams izmēģināt robežnosacījumu ievērošanai ieviesto EDS pārrēķināšanu izpildīt arī starp katras secību aizvietošanas shēmas režīma parametru aprēķina tuvinājumu soļiem vai aizvietot pārrēķināšanu starp tuvinājumu soļiem pret pārrēķināšanu starp katras secību aizvietošanas shēmas pilna režīma parametru aprēķina. Spriežot pēc analītiskā aprēķina piemēra rezultātiem, salīdzinoši labāka aprēķina konverģence lielu pārejas pretestību gadījumā iespējama arī, nosakot rezultējošo aizvietošanas shēmu summāros EDS un pretestības un lietojot universālo matricu pieraksta risinājumu (6.11.). Tomēr jāatceras, ka tas dos iespēju automatizēti aprēķināt vienīgi BV strāvas simetriskās komponentes.

7. ELEKTRISKĀS SISTĒMAS REŽĪMA PARAMETRU APRĒĶINI VIENAS GARENESIMETRIJAS RAŠANĀS GADĪJUMOS

7.1. Vienas garnessimetrijas režīmu analīze un parametru aprēķinu metodika

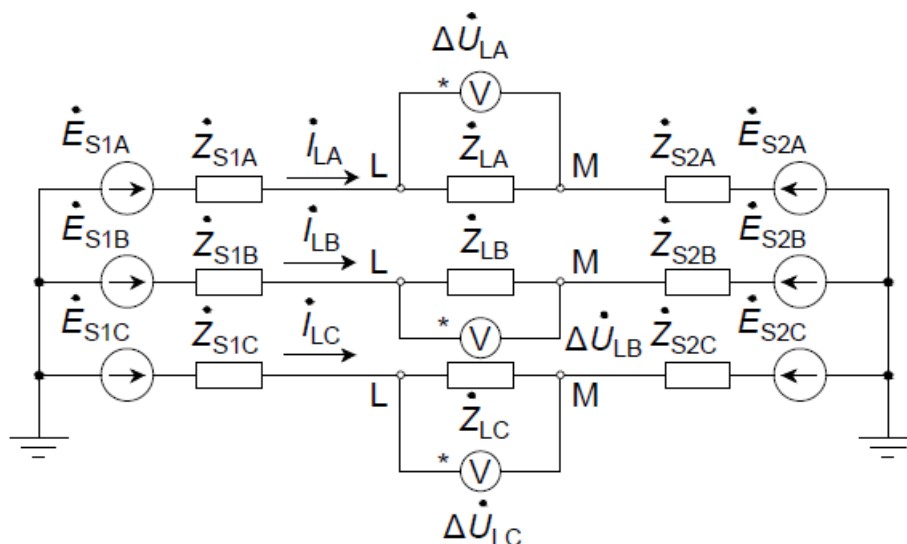
7.1.1. Vispārīgas garnessimetrijas gadījums

Trīsfāžu elektrisko sistēmu garnessimetriju literatūrā mēdz apzīmēt ar burtu L [5]. Vispārīgā gadījumā tā var izpausties kā starp nesimetrijas punktiem, piemēram, L un M, ieslēgtas atšķirīgas fāžu pretestības $\dot{Z}_{LA} \neq \dot{Z}_{LB} \neq \dot{Z}_{LC}$, un, vispārinot analīzi, var pieņemt, ka nesimetrijas vietai pieslēgti barošanas avoti no abām pusēm. Tādēļ turpmākai analīzei aplūkosim garnessimetrijas rašanos starp divām sistēmām S1 un S2 ar cieši zemētām neitrālēm (7.1. att.).



7.1. att. Garnessimetrija starp punktiem L un M divpusēji barotā tīklā.

Atbilstoša trīsfāžu analīzes shēma fāžu koordinātās vispārīgas garnessimetrijas gadījumā parādīta 7.2. attēlā.



7.2. att. Garnessimetrijas starp punktiem L un M divpusēji barotā tīklā analīzes shēma fāžu koordinātās.

7.2. attēla shēmā redzams, ka garnessimetriju apraksta nevis F–Z spriegumi, kā tas ir šķērsnesimetrijai, bet sprieguma kritumi starp nesimetrijas punktiem L un M (konkrētajā shēmā – sprieguma kritumi fāžu pretestībās). Attiecīgi vispirms iespējams izteikt šos spriegumu

kritumus ($\Delta\dot{U}_{LA} = \dot{U}_{LA} - \dot{U}_{MA}$, $\Delta\dot{U}_{LB} = \dot{U}_{LB} - \dot{U}_{MB}$, $\Delta\dot{U}_{LC} = \dot{U}_{LC} - \dot{U}_{MC}$), izmantojot starp nesimetrijas punktiem plūstošo strāvu un fāžu pretestības [3], [14]:

$$\begin{cases} \Delta\dot{U}_{LA} = \dot{I}_{LA}\dot{Z}_{LA}, \\ \Delta\dot{U}_{LB} = \dot{I}_{LB}\dot{Z}_{LB}, \\ \Delta\dot{U}_{LC} = \dot{I}_{LC}\dot{Z}_{LC}, \end{cases} \quad (7.1.)$$

kur $\Delta\dot{U}_{LA}$, $\Delta\dot{U}_{LB}$, $\Delta\dot{U}_{LC}$ – A, B un C fāzes sprieguma kritums garenesimetrijas vietā, V;

\dot{I}_{LA} , \dot{I}_{LB} , \dot{I}_{LC} – A, B un C fāzes strāva garenesimetrijas vietā, A;

\dot{Z}_{LA} , \dot{Z}_{LB} , \dot{Z}_{LC} – A, B un C fāzes pārejas pretestības garenesimetrijas vietā, Ω .

Analoģiski šķērsnesimetrijas analīzei iespējams pieņemt A fāzi par aprēķina fāzi un izteikt A fāzes sprieguma krituma simetrisko komponentu atkarību no A fāzes strāvas simetriskajām komponentēm, ņemot vērā, ka $\dot{a}^2 \cdot \dot{a}^2 = \dot{a}$, $\dot{a}^2 \cdot \dot{a} = 1$ un lietojot (7.1.) un pārveidojumus no fāžu lielumiem uz simetriskajām komponentēm:

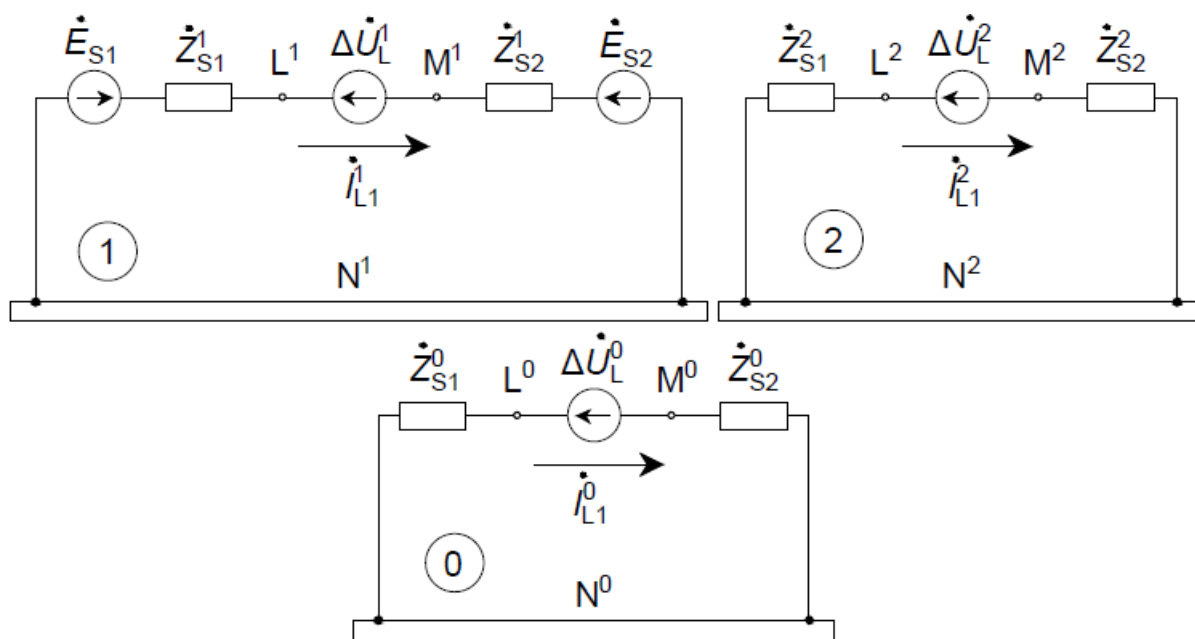
$$\begin{cases} \Delta\dot{U}_{LA}^1 = (1/3)(\Delta\dot{U}_{LA} + \dot{a}\Delta\dot{U}_{LB} + \dot{a}^2\Delta\dot{U}_{LC}) \\ \Delta\dot{U}_{LA}^2 = (1/3)(\Delta\dot{U}_{LA} + \dot{a}^2\Delta\dot{U}_{LB} + \dot{a}\Delta\dot{U}_{LC}) \Rightarrow \\ \Delta\dot{U}_{LA}^0 = (1/3)(\Delta\dot{U}_{LA} + \Delta\dot{U}_{LB} + \Delta\dot{U}_{LC}) \\ \Delta\dot{U}_{LA}^1 = (1/3)(\dot{I}_{LA}\dot{Z}_{LA} + \dot{a}\dot{I}_{LB}\dot{Z}_{LB} + \dot{a}^2\dot{I}_{LC}\dot{Z}_{LC}) \\ \Delta\dot{U}_{LA}^2 = (1/3)(\dot{I}_{LA}\dot{Z}_{LA} + \dot{a}^2\dot{I}_{LB}\dot{Z}_{LB} + \dot{a}\dot{I}_{LC}\dot{Z}_{LC}) \Rightarrow \\ \Delta\dot{U}_{LA}^0 = (1/3)(\dot{I}_{LA}\dot{Z}_{LA} + \dot{I}_{LB}\dot{Z}_{LB} + \dot{I}_{LC}\dot{Z}_{LC}) \\ \left\{ \begin{array}{l} \Delta\dot{U}_{LA}^1 = (1/3)([\dot{I}_{LA}^1 + \dot{I}_{LA}^2 + \dot{I}_{LA}^0]\dot{Z}_{LA} + \dot{a}[\dot{a}^2\dot{I}_{LA}^1 + \dot{a}\dot{I}_{LA}^2 + \dot{I}_{LA}^0]\dot{Z}_{LB} + \\ \Delta\dot{U}_{LA}^2 = (1/3)([\dot{I}_{LA}^1 + \dot{I}_{LA}^2 + \dot{I}_{LA}^0]\dot{Z}_{LA} + \dot{a}^2[\dot{a}^2\dot{I}_{LA}^1 + \dot{a}\dot{I}_{LA}^2 + \dot{I}_{LA}^0]\dot{Z}_{LB} + \\ \Delta\dot{U}_{LA}^0 = (1/3)([\dot{I}_{LA}^1 + \dot{I}_{LA}^2 + \dot{I}_{LA}^0]\dot{Z}_{LA} + [\dot{a}^2\dot{I}_{LA}^1 + \dot{a}\dot{I}_{LA}^2 + \dot{I}_{LA}^0]\dot{Z}_{LB} + \\ \quad + \dot{a}^2[\dot{a}\dot{I}_{LA}^1 + \dot{a}^2\dot{I}_{LA}^2 + \dot{I}_{LA}^0]\dot{Z}_{LC}) \\ \quad + \dot{a}[\dot{a}\dot{I}_{LA}^1 + \dot{a}^2\dot{I}_{LA}^2 + \dot{I}_{LA}^0]\dot{Z}_{LC}) \Rightarrow \\ \quad + [\dot{a}\dot{I}_{LA}^1 + \dot{a}^2\dot{I}_{LA}^2 + \dot{I}_{LA}^0]\dot{Z}_{LC}) \\ \left\{ \begin{array}{l} \Delta\dot{U}_{LA}^1 = (1/3)(\dot{I}_{LA}^1[\dot{Z}_{LA} + \dot{Z}_{LB} + \dot{Z}_{LC}] + \dot{I}_{LA}^2[\dot{Z}_{LA} + \dot{a}^2\dot{Z}_{LB} + \dot{a}\dot{Z}_{LC}] + \\ \Delta\dot{U}_{LA}^2 = (1/3)(\dot{I}_{LA}^1[\dot{Z}_{LA} + \dot{a}\dot{Z}_{LB} + \dot{a}^2\dot{Z}_{LC}] + \dot{I}_{LA}^2[\dot{Z}_{LA} + \dot{Z}_{LB} + \dot{Z}_{LC}] + \\ \Delta\dot{U}_{LA}^0 = (1/3)(\dot{I}_{LA}^1[\dot{Z}_{LA} + \dot{a}^2\dot{Z}_{LB} + \dot{a}\dot{Z}_{LC}] + \dot{I}_{LA}^2[\dot{Z}_{LA} + \dot{a}\dot{Z}_{LB} + \dot{a}^2\dot{Z}_{LC}] + \\ \quad + \dot{I}_{LA}^0[\dot{Z}_{LA} + \dot{a}\dot{Z}_{LB} + \dot{a}^2\dot{Z}_{LC}]), \\ \quad + \dot{I}_{LA}^0[\dot{Z}_{KA} + \dot{a}^2\dot{Z}_{KB} + \dot{a}\dot{Z}_{KC}]), \\ \quad + \dot{I}_{LA}^0[\dot{Z}_{LA} + \dot{Z}_{LB} + \dot{Z}_{LC}]), \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (7.2.)$$

kur $\Delta\dot{U}_{LA}^1$, $\Delta\dot{U}_{LA}^2$, $\Delta\dot{U}_{LA}^0$ – A fāzes sprieguma krituma garenesimetrijas vietā TS, PS un NS komponentes, V;

\dot{I}_{LA}^1 , \dot{I}_{LA}^2 , \dot{I}_{LA}^0 – A fāzes strāvas garenesimetrijas vietā TS, PS un NS komponentes, A.

Vienādojumu sistēma (7.2.) un tās izvedums šim nesimetrijas veidam būtībā parāda bojājuma aprēķina pāreju no fāžu lielumiem uz īpašās fāzes (šeit – A fāzes) simetrisko komponentu aprēķinu, un tās pēdējā versija atbilst vispārīgas garenesimetrijas robežnosacījumiem (BV fāžu spriegumu vai strāvu, vai arī to simetrisko komponentu vērtības vai šos lielumus saistošie vienādojumi, kurus uzspiež fāžu pārejas pretestības). Redzams, ka,

līdzīgi šķērsnesimetrijai, arī garensimetriju aprakstošajā vienādojumu sistēmā (7.2.) ir seši nezināmie ($\Delta\dot{U}_{LA}^1$, $\Delta\dot{U}_{LA}^2$, $\Delta\dot{U}_{LA}^0$, \dot{I}_{LA}^1 , \dot{I}_{LA}^2 , \dot{I}_{LA}^0), bet ir tikai trīs neatkarīgi vienādojumi. Tādēļ no secību aizvietošanas shēmām ir jāiegūst vēl trīs vienādojumi, lai atrisinātu režīma parametru aprēķina uzdevumu. 7.1. attēlā redzamā tīkla secību aizvietošanas shēmas garensimetrijas gadījumā parādītas 7.3. attēlā. Runājot par garensimetriju aprēķiniem nepieciešamo aizvietošanas shēmu sastādīšanu, ir jāatzīmē, ka precīzu rezultātu iegūšanai, līdzīgi kā slodzes režīma parametru aprēķinos, ļoti nozīmīgi ņemt vērā slodzes un bieži arī vismaz EPL kapacitatīvas vadītspējas (it īpaši AS tīklos), bet nesimetrijas dēļ tās jāņem vērā ne vien TS, bet arī PS un NS komponentu aprēķinos.



7.3. att. Garensimetrijas analīzes piemēra tīkla secību aizvietošanas shēmas.

Pirms parādīt 7.3. attēlā redzamo aprēķina fāzes sprieguma kritumu simetrisko komponentu $\Delta\dot{U}_{LA}^1$, $\Delta\dot{U}_{LA}^2$, $\Delta\dot{U}_{LA}^0$ vienādojumus, būtu lietderīgi secību aizvietošanas shēmas reducēt līdz universālām (TS: Tevenena ekvivalents, kas noteikts attiecībā pret punktiem L^1 un M^1 , ar summāro aprēķina fāzes garensimetrijas TS rezultējošās aizvietošanas shēmas EDS $\dot{E}_{AL\Sigma}^1$, kas saslēgts virknē ar summāro TS rezultējošās aizvietošanas shēmas garensimetrijas pretestību $Z_{L\Sigma}^1$; PS un NS ekvivalentēšanas princips ir līdzīgs, bet šo secību rezultējošo aizvietošanas shēmu summārie EDS visbiežāk būs $\dot{E}_{AL\Sigma}^2 = \dot{E}_{AL\Sigma}^0 = 0$ V). Papildus jāmin, ka, salīdzinot ar šķērsnesimetriju, nesimetrijas punktu novietojums ir mainījies un attiecībā pret tiem aizvietošanas shēmu garenvirziena pretestības un EDS avoti bieži ir virknes slēgumā (veidojas kontūri $L^1-N^1-M^1$, $L^2-N^2-M^2$, $L^0-N^0-M^0$), un, pieņemot A fāzi par īpašo jeb aprēķina fāzi, ekvivalentēšana veicama šādi:

$$\dot{E}_{AL\Sigma}^1 = \dot{E}_{S1A}^1 - \dot{E}_{S2A}^1, \quad (7.3.)$$

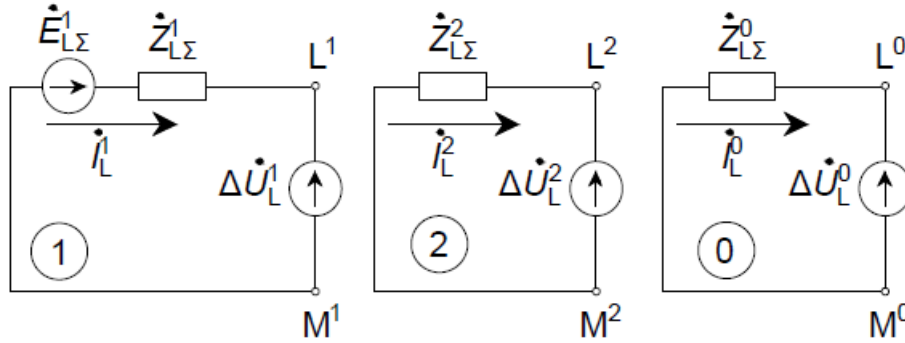
$$\dot{Z}_{L\Sigma}^1 = \dot{Z}_{S2}^1 + \dot{Z}_{S1}^1, \quad (7.4.)$$

$$\dot{Z}_{L\Sigma}^2 = \dot{Z}_{S2}^2 + \dot{Z}_{S1}^2, \quad (7.5.)$$

$$\dot{Z}_{K\Sigma}^0 = \dot{Z}_{S2}^0 + \dot{Z}_{S1}^0, \quad (7.6.)$$

kur $\dot{E}_{AL\Sigma}^1$ – garennesimetrijas TS rezultējošās aizvietošanas shēmas summārais EDS A fāzei, V;
 $\dot{Z}_{L\Sigma}^1, \dot{Z}_{L\Sigma}^2, \dot{Z}_{L\Sigma}^0$ – garennesimetrijas TS, PS un NS rezultējošo aizvietošanas shēmu
 summārās fāzes pilnās pretestības, Ω .

Veicot pārveidojumus (7.3.)–(7.6.), tiek iegūtas rezultējošās secību aizvietošanas shēmas, kuras parādītas 7.4. attēlā.



7.4. att. Garennesimetrijas rezultējošās secību aizvietošanas shēmas ar tīkla Tevenena ekvivalentiem.

No 7.4. attēlā redzamajām rezultējošajām secību aizvietošanas shēmām atbilstoši otrajam Kirhofa likumam iespējams uzrakstīt trīs vispārīgus vienādojumus jebkurai aprēķina fāzei, pieņemot PS un NS rezultējošos EDS vienādus ar 0 V [2], [14]:

$$\begin{cases} \Delta\dot{U}_L^1 = \dot{E}_{L\Sigma}^1 - \dot{i}_L^1 \dot{Z}_{L\Sigma}^1 = \dot{E}_{L\Sigma}^1 - \dot{i}_L^1 \dot{Z}_{L\Sigma}^1. \\ \Delta\dot{U}_L^2 = \dot{E}_{L\Sigma}^2 - \dot{i}_L^2 \dot{Z}_{L\Sigma}^2 = 0 - \dot{i}_L^2 \dot{Z}_{L\Sigma}^2. \\ \Delta\dot{U}_L^0 = \dot{E}_{L\Sigma}^0 - \dot{i}_L^0 \dot{Z}_{L\Sigma}^0 = 0 - \dot{i}_L^0 \dot{Z}_{L\Sigma}^0. \end{cases} \quad (7.7.)$$

kur $\Delta\dot{U}_L^1, \Delta\dot{U}_L^2, \Delta\dot{U}_L^0$ – garennesimetrijas vietas aprēķina fāzes sprieguma krituma TS, PS un NS komponentes, V;

$\dot{E}_{L\Sigma}^1, \dot{E}_{L\Sigma}^2, \dot{E}_{L\Sigma}^0$ – garennesimetrijas rezultējošo TS, PS un NS aizvietošanas shēmu summārie EDS aprēķina fāzei, V;

$\dot{i}_L^1, \dot{i}_L^2, \dot{i}_L^0$ – garennesimetrijas vietā plūstošās aprēķina fāzes strāvas TS, PS un NS komponentes, A.

Pielīdzinot vienādojumu sistēmas (7.2.) un (7.7.), iespējams iegūt universālu vienas garennesimetrijas režīma parametru aprēķina vienādojumu sistēmu, kas ļauj aprēķināt A fāzes strāvas simetriskās komponentes nesimetrijas vietā:

$$\begin{aligned} & \dot{i}_{LA}^1 \left(\frac{1}{3} [\dot{Z}_{LA} + \dot{Z}_{LB} + \dot{Z}_{LC}] + \dot{Z}_{L\Sigma}^1 \right) + \dot{i}_{LA}^2 \left(\frac{1}{3} [\dot{Z}_{LA} + \dot{a}^2 \dot{Z}_{LB} + \dot{a} \dot{Z}_{LC}] \right) + \\ & \dot{i}_{LA}^1 \left(\frac{1}{3} [\dot{Z}_{LA} + \dot{a} \dot{Z}_{LB} + \dot{a}^2 \dot{Z}_{LC}] \right) + \dot{i}_{LA}^2 \left(\frac{1}{3} [\dot{Z}_{LA} + \dot{Z}_{LB} + \dot{Z}_{LC}] + \dot{Z}_{L\Sigma}^2 \right) + \\ & \dot{i}_{LA}^1 \left(\frac{1}{3} [\dot{Z}_{LA} + \dot{a}^2 \dot{Z}_{LB} + \dot{a} \dot{Z}_{LC}] \right) + \dot{i}_{LA}^2 \left(\frac{1}{3} [\dot{Z}_{LA} + \dot{a} \dot{Z}_{LB} + \dot{a}^2 \dot{Z}_{LC}] \right) + \\ & + \dot{i}_{LA}^0 \left(\frac{1}{3} [\dot{Z}_{LA} + \dot{a} \dot{Z}_{LB} + \dot{a}^2 \dot{Z}_{LC}] \right) = \dot{E}_{LA\Sigma}^1. \\ & + \dot{i}_{LA}^0 \left(\frac{1}{3} [\dot{Z}_{LA} + \dot{a}^2 \dot{Z}_{LB} + \dot{a} \dot{Z}_{LC}] \right) = 0 \text{ V.} \\ & + \dot{i}_{LA}^0 \left(\frac{1}{3} [\dot{Z}_{LA} + \dot{Z}_{LB} + \dot{Z}_{LC}] + \dot{Z}_{L\Sigma}^0 \right) = 0 \text{ V.} \end{aligned} \quad (7.8.)$$

Skaitliskiem aprēķiniem vienādojumu sistēmu (7.8.) var pārveidot matricu formā:

$$A_L I_L^S = E_L, \quad (7.9.)$$

kur I_L^S – garennesimetrijas vietas A fāzes strāvas simetrisko komponentu vektors, A;

E_L – garennesimetrijas rezultējošo secību aizvietošanas shēmu summāro EDS vektors, V;

A_L – garennesimetrijas pretestību koeficientu matrica, Ω .

Vienādojumu sistēmā (7.9.) lietojamās matricas iespējams parādīt šādi:

$$I_L^S = \begin{bmatrix} i_{LA}^1 \\ i_{LA}^2 \\ i_{LA}^0 \end{bmatrix}, \quad (7.10.)$$

$$E_L = \begin{bmatrix} \dot{E}_{LA\Sigma}^1 \\ \dot{E}_{LA\Sigma}^2 \\ \dot{E}_{LA\Sigma}^0 \end{bmatrix} \text{ visbiežāk formā } \begin{bmatrix} \dot{E}_{LA\Sigma}^1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (7.11.)$$

$$A_L = (1/3) \begin{bmatrix} (\dot{Z}_{LA} + \dot{Z}_{LB} + \dot{Z}_{LC}) + 3\dot{Z}_{L\Sigma}^1 & (\dot{Z}_{LA} + \dot{a}^2\dot{Z}_{LB} + \dot{a}\dot{Z}_{LC}) \\ (\dot{Z}_{LA} + \dot{a}\dot{Z}_{LB} + \dot{a}^2\dot{Z}_{LC}) & (\dot{Z}_{LA} + \dot{Z}_{LB} + \dot{Z}_{LC}) + 3\dot{Z}_{L\Sigma}^2 \\ (\dot{Z}_{LA} + \dot{a}^2\dot{Z}_{LB} + \dot{a}\dot{Z}_{LC}) & (\dot{Z}_{LA} + \dot{a}\dot{Z}_{LB} + \dot{a}^2\dot{Z}_{LC}) \\ & (\dot{Z}_{LA} + \dot{a}\dot{Z}_{LB} + \dot{a}^2\dot{Z}_{LC}) \\ & (\dot{Z}_{LA} + \dot{a}^2\dot{Z}_{LB} + \dot{a}\dot{Z}_{LC}) \\ & (\dot{Z}_{LA} + \dot{Z}_{LB} + \dot{Z}_{LC}) + 3\dot{Z}_{L\Sigma}^0 \end{bmatrix}. \quad (7.12.)$$

Apzīmējot matricas A_L elementus $\dot{Z}_{LABC1} = \dot{Z}_{LA} + \dot{Z}_{LB} + \dot{Z}_{LC}$, $\dot{Z}_{LABC2} = \dot{Z}_{LA} + \dot{a}\dot{Z}_{LB} + \dot{a}^2\dot{Z}_{LC}$, $\dot{Z}_{LABC3} = \dot{Z}_{LA} + \dot{a}^2\dot{Z}_{LB} + \dot{a}\dot{Z}_{LC}$, to var pārrakstīt uzskatāmākā formā:

$$A_L = (1/3) \begin{bmatrix} \dot{Z}_{LABC1} + 3\dot{Z}_{L\Sigma}^1 & \dot{Z}_{LABC3} & \dot{Z}_{LABC2} \\ \dot{Z}_{LABC2} & \dot{Z}_{LABC1} + 3\dot{Z}_{L\Sigma}^2 & \dot{Z}_{LABC3} \\ \dot{Z}_{LABC3} & \dot{Z}_{LABC2} & \dot{Z}_{LABC1} + 3\dot{Z}_{L\Sigma}^0 \end{bmatrix}. \quad (7.13.)$$

Analoģisku izvedumu var iegūt, uzsākot matricu formas pierakstu pirms vienādojumu sistēmu (7.2.), (6.4.) un (7.7.) pielīdzināšanas. Vienādojumu sistēma (7.2.) matricu formā:

$$U_L^S = (1/3)\mathcal{K}_A Z_{LDF} k_A I_L^S, \quad (7.14.)$$

kur U_L^S – A fāzes sprieguma krituma simetrisko komponentu vektors garennesimetrijas vietā, V;

k_A – Forteskju tiešās transformācijas matrica A fāzei (skatīt (1.7.)), r. v.;

\mathcal{K}_A – Forteskju apgrieztās transformācijas matrica A fāzei (skatīt (1.12)), r. v.;

Z_{LDF} – diagonāla garennesimetrijas fāžu pārejas pretestību matrica, Ω .

Vienādojumu sistēmai (7.14.) ieviestās matricas iespējams parādīt šādi:

$$U_L^S = \begin{bmatrix} \Delta\dot{U}_{LA}^1 \\ \Delta\dot{U}_{LA}^2 \\ \Delta\dot{U}_{LA}^0 \end{bmatrix}, \quad (7.15.)$$

$$Z_{LDF} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{LA} & 0 & 0 \\ 0 & \dot{Z}_{LB} & 0 \\ 0 & 0 & \dot{Z}_{LC} \end{bmatrix}. \quad (7.16.)$$

Vienlaikus arī (7.7.) vienādojumu sistēmu iespējams pārveidot matricu formā

$$U_L^S = E_L - Z_{LD\Sigma} I_L^S, \quad (7.17.)$$

kur $Z_{LD\Sigma}$ – diagonāla garennesimetrijas rezultējošo secību aizvietošanas shēmu summāro pretestību matrica, Ω .

Minēto garennesimetrijas rezultējošo secību aizvietošanas shēmu summāro pretestību matricu iespējams parādīt šādi:

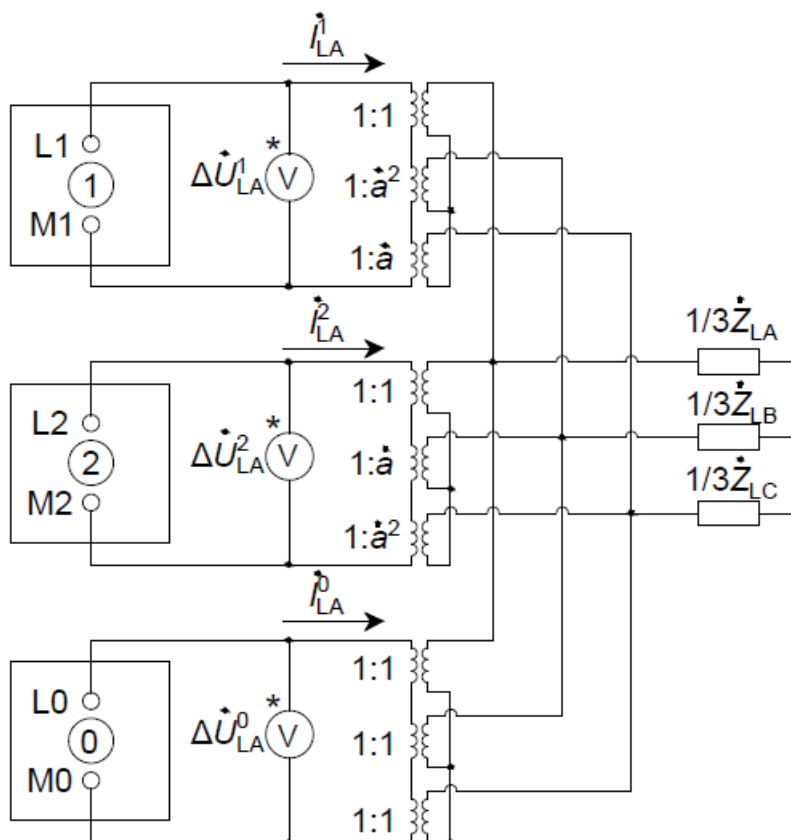
$$Z_{LD\Sigma} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{L\Sigma}^1 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{Z}_{L\Sigma}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{Z}_{L\Sigma}^0 \end{bmatrix}. \quad (7.18.)$$

Pielīdzinot vienādojumu sistēmas (7.17.) un (7.14.) matricu formā, iegūstama alternatīva vispārīgas vienas garennesimetrijas risinājuma pieraksta forma:

$$\begin{aligned} E_L - Z_{LD\Sigma} I_L^S &= \frac{1}{3} \mathcal{K}_A Z_{LDF} k_A I_L^S \Rightarrow \\ \left(\frac{1}{3} \mathcal{K}_A Z_{LDF} k_A + Z_{LD\Sigma} \right) I_L^S &= E_L. \end{aligned} \quad (7.19.)$$

Redzams, ka principā vienādojumu sistēma (7.19.) dod iespēju ar matricu pierakstu sastādīt koeficientu matricu $A_L = \left(\frac{1}{3} \mathcal{K}_A Z_{LDF} k_A + Z_{LD\Sigma} \right)$, aizvietojot A_L manuālu sagatavošanu atbilstoši (7.12.).

Analītisku režīma parametru risinājumu iespējams iegūt, matricu formā atrisinot LVS (7.9.) vai (7.19.). Šo vienādojumu sistēmu atrisināšana ļauj iegūt A fāzes strāvas simetriskās komponentes garennesimetrijas vietā $I_{LA}^1, I_{LA}^2, I_{LA}^0$. Zinot tās, viegli noteikt A fāzes sprieguma krituma simetriskās komponentes, izmantojot vienādojumu sistēmu (7.7.) vai (7.17.). Tad atbilstoši darba uzdevumam var nākties noteikt citu tīkla elementu strāvu un/vai spriegumu simetriskās komponentes, manuāli rēķinot tās, izmantojot zināmās komponentu vērtības nesimetrijas vietā un secību aizvietošanas shēmas. Saprotams, ka reāliem tīkliem var būt raksturīgas sarežģītas secību aizvietošanas shēmas, kuru reducēšana līdz 7.4. attēlā parādītajām būtu laikietilpīga un darbietilpīga. Šādos gadījumos vieglāk izmantot kompleksās aizvietošanas shēmas, kuras apvieno secību aizvietošanas shēmas vienā kopīgā shēmā, bet vienlaikus neprasa to vienkāršošanu, ja tiek izmantots visas shēmas režīma parametru topoloģiskais aprēķins. Balstoties uz vienādojumu sistēmu (7.2.), iespējams izveidot teorētisku komplekso aizvietošanas shēmu, izmantojot ideālus transformatorus (transformatori bez aktīvās jaudas zudumiem un izkliedes plūsmas) ar kompleksiem transformācijas koeficientiem (7.5. att.). Līdzīgi kā vispārīgās šķērsnesimetrijas aizvietošanas shēmā, kvadrāti ar riņķa līnijās ievilktajiem skaitļiem 1, 2, 0 vispārīgi apzīmē 7.3. attēla secību aizvietošanas shēmas, izdalot vienīgi nesimetrijas punktus L^1, L^2, L^0 un M^1, M^2, M^0 , starp kuriem nosakāmas nesimetrijas vietas aprēķina fāzes sprieguma krituma simetriskās komponentes $\Delta \dot{U}_{LA}^1, \Delta \dot{U}_{LA}^2, \Delta \dot{U}_{LA}^0$.



7.5. att. Vispārīgas garensimetrijas kompleksā aizvietošanas shēma [3].

Jau 6.1.1. apakšpunktā paskaidrots, ka ideālus transformatorus ir sarežģīti īstenot gan skaitliskos modeļos, gan analogos standos. Ievērojot, ka 7.5. attēlā redzamās kompleksās aizvietošanas shēmas lietošana arī nav praktiska, iespējams izmantot skaitlisku aprēķinu metodi, kur katrai no 7.3. attēlā redzamajām secību aizvietošanas shēmām sastāda režīma parametru aprēķiniem nepieciešamās matricas atbilstoši 4. nodaļā ietvertajam aprakstam. Šādā veidā tiek atrisināti trīs vienādojumi, ko analītiskā risinājumā īsteno kā secību aizvietošanas shēmu vienkāršošanu uz izteikšanu ar (7.7.). Piedāvātā metode tad izpilda secību aizvietošanas shēmu režīma parametru aprēķinus un aprēķina gaitā pārrēķina aizvietošanas shēmās redzamos aprēķina fāzes sprieguma kritumus $\Delta\dot{U}_{LA}^1$, $\Delta\dot{U}_{LA}^2$, $\Delta\dot{U}_{LA}^0$ (parādīti kā EDS avoti starp nesimetrijas punktiem L^1 , L^2 , L^0 un M^1 , M^2 , M^0). Visu secību aizvietošanas shēmu režīmu parametru aprēķinus veic vienlaicīgi, t. i., katrai secību aizvietošanas shēmai atsevišķi izdara aprēķinus vienam tuvinājuma solim. Tad, izmantojot iegūtās A fāzes strāvas simetrisko komponentu vērtības, pārrēķina īpašās jeb aprēķina fāzes sprieguma krituma simetriskās komponentes $\Delta\dot{U}_{LA}^1$, $\Delta\dot{U}_{LA}^2$, $\Delta\dot{U}_{LA}^0$, izmantojot vienādojumu sistēmas (7.2.) pēdējo formu vai (7.14.), un atkārtu režīma parametru aprēķinu soli visām trim secību aizvietošanas shēmām. Alternatīvi iespējams pārrēķināt īpašās fāzes sprieguma krituma simetrisko komponentu vērtības $\Delta\dot{U}_{LA}^1$, $\Delta\dot{U}_{LA}^2$, $\Delta\dot{U}_{LA}^0$ arī starp katras secību aizvietošanas shēmas atsevišķajiem aprēķina tuvinājuma soļiem. Šādu kombinētu aprēķinu atkārtu līdz precizitātes robežai, kuru nosaka atbilstoši 4. nodaļā parādītajai, bet mezglu spriegumu starpību starp tuvinājumu soļiem pieņem kā lielāko no triju secību aizvietošanas shēmu aprēķinos iegūstamo. Šāda veida specializēti risinājumi ir obligāti jāizmanto tikai tad, ja aplūko garensimetriju, kurai visu fāžu pretestības

ir savstarpēji atšķirīgas: $\dot{Z}_{LA} \neq \dot{Z}_{LB} \neq \dot{Z}_{LC}$ (7.2. att.). Citiem garenesimetrijas scenārijiem iespējams izmantot parādītos vispārīgās šķērsnesimetrijas risinājumus vai iegūtās analītiskās formulas, vai parādītās kompleksās aizvietošanas shēmas. Jāatzīmē, ka, līdzīgi vienas vispārīgas šķērsnesimetrijas skaitliskam aprēķinam, arī garenesimetrijas gadījumā pie ievērojamām fāžu pārejas pretestībām iespējamas aprakstītā skaitliskā risinājuma, kuram izmantota Zeideļa metode, konverģences problēmas. Arī šajā gadījumā ieteicams tuvināti izmantot kompleksas aizvietošanas shēmas vai citas LVS risināšanas metodes.

Ja vismaz divas fāzes atrodas vienādos apstākļos (to pārejas pretestības ir vienādas), zinātnieki savos pētījumos ([3], [8], [9], [14] u. c.) ieguva analītiskas formulas vai tām atbilstošas kompleksās aizvietošanas shēmas arī vienas garenesimetrijas rašanās gadījumiem, veicot analīzi analogiski iepriekš parādītajai. Minētās kompleksās aizvietošanas shēmas iegūtas, modificējot 7.5. attēlā redzamo shēmu tā, lai ideāliem transformatoriem būtu vienīgi transformācijas koeficienti 1:1, kurus iespējams aizstāt ar elektriskiem savienojumiem. Minētie gadījumi tiks aplūkoti nākamajos apakšpunktos.

7.1.2. Trīsfāžu garenesimetrija ar pretestībām visās fāzēs

Ieslēdzot 7.2. attēla shēmā vienādas pretestības visās fāzēs, t. i., $0 < \dot{Z}_{LA} = \dot{Z}_{LB} = \dot{Z}_{LC} < \infty \Omega$, tīkla režīma parametrus iespējams noteikt, veicot 7.3. attēlā redzamās TS aizvietošanas shēmas aprēķinu, aizvietojojot aprēķina fāzes sprieguma krituma TS komponenti atainojošo EDS avotu $\Delta\dot{U}_L^1$ ar vienas fāzes pārejas pretestību starp punktiem L un M. Šādam simetriskam režīmam par īpašo jeb aprēķina fāzi bez ievērojamiem apgrūtinājumiem iespējams pieņemt jebkuru no fāzēm, bet, izvēloties fāzi B vai C, ir jāpagriež tīkla elementu aizvietošanai izmantoto EDS un strāvas avotu vektori (analīzes tīklam \dot{E}_{S1} un \dot{E}_{S2}) par 240° vai 120° , ja to vērtības ir aprēķinātas vienīgi A fāzei. Aprakstītajam režīmam viegli izteikt A fāzes strāvas TS komponenti ar Oma likumu, ņemot vērā (7.3.) un (7.4.):

$$\dot{I}_{LA}^1 = \dot{I}_{LA} = \dot{E}_{L\Sigma A}^1 / (\dot{Z}_{L\Sigma}^1 + \dot{Z}_{LA}) = (\dot{E}_{S1A}^1 - \dot{E}_{S2A}^1) / (\dot{Z}_{S2}^1 + \dot{Z}_{S1}^1 + \dot{Z}_{LA}). \quad (7.20.)$$

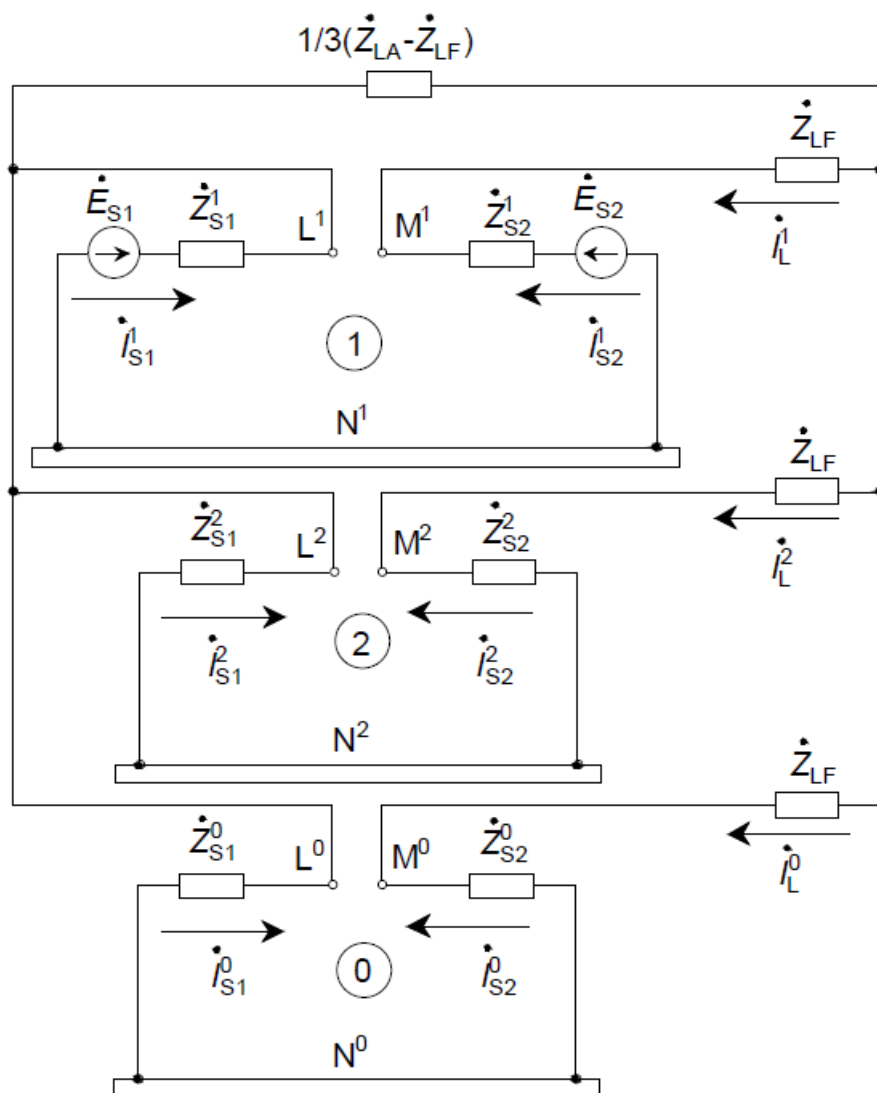
Savukārt A fāzes garenesimetrijas sprieguma krituma starp punktiem L un M TS komponenti iespējams noteikt atbilstoši (7.7.):

$$\Delta\dot{U}_{LA}^1 = \Delta\dot{U}_{LA} = \dot{E}_{AL\Sigma}^1 - \dot{I}_{LA}^1 \dot{Z}_{L\Sigma}^1. \quad (7.21.)$$

Alternatīvi ievērojot, ka šim simetriskajam garenesimetrijas gadījumam fāzes strāvas un to TS komponentes sakrīt, iespējams sareizināt šo strāvu ar fāzes pretestību. B un C fāzes garenesimetrijas spriegumu kritumus un strāvas iespējams noteikt, veicot TS simetrisko komponentu pagriezienus A fāzes rezultātiem.

Ieslēdzot nesimetriskas pretestības starp punktiem L un M, kur divās fāzēs pretestības joprojām ir vienādas, piemēram, fāzēs B un C (atbilstoši 7.2. attēlam ar fāžu pretestībām $0 \leq \dot{Z}_{LA} \neq \dot{Z}_{LB} < \infty \Omega$, $0 \leq \dot{Z}_{LB} = \dot{Z}_{LC} < \infty \Omega$) par īpašo jeb aprēķina fāzi izdevīgi pieņemt fāzi, kurā ir atšķirīga pārejas pretestība (šajā piemērā – A fāzi). Šis apsvērums skaidrojams ar to, ka, izsakot atšķirīgās fāzes sprieguma krituma simetrisko komponentu atkarību no strāvas komponentēm, kā tas parādīts A fāzes komponentēm (7.2.), iespējams iznest sakrītošās pretestības pirms iekavām un saīsināt kompleksos pagriezienu operatorus \dot{a} un \dot{a}^2 , kas dod

iespēju īstenot robežnosacījumus, izmantojot vienīgi elektriskus savienojumus starp secību aizvietošanas shēmām, līdzīgi kā ideālus transformatorus ar transformācijas koeficientu 1:1 var aizvietot ar šādiem savienojumiem. Konkrētajam garensimetrijas režīmam minētā kompleksā aizvietošanas shēma parādīta 7.6. attēlā.



7.6. att. Garensimetrijas ar vienādām pārejas pretestībām \dot{Z}_{LF} fāzēs B un C un atšķirīgu pārejas pretestību \dot{Z}_{LA} fāzē A kompleksā aizvietošanas shēma [3].

Atkarībā no garensimetrijas fāžu pretestībām konkrētajam garensimetrijas veidam nedaudz mainās analītiskajā aprēķinā izmantojamās matricas. Pirmais no šādiem garensimetrijas paveidiem ir režīms, kurā visās fāzēs ir ieslēgtas pretestības starp L un M punktiem un B un C fāzes ieslēgtās pretestības ir vienādas, kuras iespējams apzīmēt kā garensimetrijas fāžu pretestību \dot{Z}_{LF} ($0 < \dot{Z}_{LA} \neq \dot{Z}_{LB} < \infty \Omega$, $0 < \dot{Z}_{LB} = \dot{Z}_{LC} = \dot{Z}_{LF} < \infty \Omega$). Šāda režīma analītisks risinājums iegūstams, izmantojot (7.9.) vai (7.19.) vienādojumu sistēmas matricu formā, ja iespējams viegli reducēt secību aizvietošanas shēmas. Iespējams parādīt šim gadījumam atbilstošu koeficientu matricas A_L modifikāciju. Tā iegūstama no (7.12.), ievērojot, ka $\dot{a}^2 + \dot{a} = -1$, un tās saturs ir šāds:

$$A_L = (1/3) \begin{bmatrix} \dot{Z}_{LA} + 2\dot{Z}_{LF} + 3\dot{Z}_{L\Sigma}^1 & \dot{Z}_{LA} - \dot{Z}_{LF} & \dot{Z}_{LA} - \dot{Z}_{LF} \\ \dot{Z}_{LA} - \dot{Z}_{LF} & \dot{Z}_{LA} + 2\dot{Z}_{LF} + 3\dot{Z}_{L\Sigma}^2 & \dot{Z}_{LA} - \dot{Z}_{LF} \\ \dot{Z}_{LA} - \dot{Z}_{LF} & \dot{Z}_{LA} - \dot{Z}_{LF} & \dot{Z}_{LA} + 2\dot{Z}_{LF} + 3\dot{Z}_{L\Sigma}^0 \end{bmatrix}, \quad (7.22.)$$

kur \dot{Z}_{LF} – pilnā pārejas pretestība fāzēs, kurās pārejas pretestības sakrīt (šeit – B un C fāzes), garennesimetrijas vietā, Ω .

Ja secību aizvietošanas shēmu ekvivalentēšana ir sarežģīta, tad iespējams izmantot 7.1.1. apakšpunkta beigās minēto aprēķinu metodiku ar analogiski (7.22.) modificētu (7.2.) vienādojumu sistēmu:

$$\begin{cases} \Delta\dot{U}_{LA}^1 = (1/3)(i_{LA}^1[\dot{Z}_{LA} + 2\dot{Z}_{LF}] + i_{LA}^2[\dot{Z}_{LA} - \dot{Z}_{LF}] + i_{LA}^0[\dot{Z}_{LA} - \dot{Z}_{LF}]). \\ \Delta\dot{U}_{LA}^2 = (1/3)(i_{LA}^1[\dot{Z}_{LA} - \dot{Z}_{LF}] + i_{LA}^2[\dot{Z}_{LA} + 2\dot{Z}_{LF}] + i_{LA}^0[\dot{Z}_{LA} - \dot{Z}_{LF}]). \\ \Delta\dot{U}_{LA}^0 = (1/3)(i_{LA}^1[\dot{Z}_{LA} - \dot{Z}_{LF}] + i_{LA}^2[\dot{Z}_{LA} - \dot{Z}_{LF}] + i_{LA}^0[\dot{Z}_{LA} + 2\dot{Z}_{LF}]). \end{cases} \quad (7.23.)$$

Režīma parametru noteikšanai, rodoties konkrētajam garennesimetrijas veidam, iespējams jau izmantot 7.6. attēlā parādīto komplekso aizvietošanas shēmu.

Ja A fāzes pārejas pretestība būs nulle ($\dot{Z}_{LA} = 0 \Omega$), bet B un C fāzēs saglabāsies vienādas pārejas pretestības ($0 < \dot{Z}_{LB} = \dot{Z}_{LC} = \dot{Z}_{LF} < \infty \Omega$ atbilstoši 7.2. attēlam), analītiskam risinājumam iespējams lietot (7.22.) modifikāciju:

$$A_L = (1/3) \begin{bmatrix} 2\dot{Z}_{LF} + 3\dot{Z}_{L\Sigma}^1 & -\dot{Z}_{LF} & -\dot{Z}_{LF} \\ -\dot{Z}_{LF} & 2\dot{Z}_{LF} + 3\dot{Z}_{L\Sigma}^2 & -\dot{Z}_{LF} \\ -\dot{Z}_{LF} & -\dot{Z}_{LF} & 2\dot{Z}_{LF} + 3\dot{Z}_{L\Sigma}^0 \end{bmatrix}. \quad (7.24.)$$

vai atsevišķas secību aizvietošanas shēmas ar modificētu vienādojumu sistēmu (7.23.):

$$\begin{cases} \Delta\dot{U}_{LA}^1 = (1/3)(i_{LA}^1[2\dot{Z}_{LF}] + i_{LA}^2[-\dot{Z}_{LF}] + i_{LA}^0[-\dot{Z}_{LF}]). \\ \Delta\dot{U}_{LA}^2 = (1/3)(i_{LA}^1[-\dot{Z}_{LF}] + i_{LA}^2[2\dot{Z}_{LF}] + i_{LA}^0[-\dot{Z}_{LF}]). \\ \Delta\dot{U}_{LA}^0 = (1/3)(i_{LA}^1[-\dot{Z}_{LF}] + i_{LA}^2[-\dot{Z}_{LF}] + i_{LA}^0[2\dot{Z}_{LF}]). \end{cases} \quad (7.25.)$$

Alternatīvi iespējams aprēķināt režīma parametrus 7.6. attēlā redzamajai kompleksajai aizvietošanas shēmai, iepriekš mainot zara $1/3 (\dot{Z}_{LA} - \dot{Z}_{LF})$ pretestību uz $-\dot{Z}_{LF}/3$.

Iespējams arī gadījums, kad divās fāzēs starp punktiem L un M nav pārejas pretestības, bet trešajā pastāv pārejas pretestība. Piemēra nolūkos var aplūkot scenāriju, kurā pārejas pretestība pastāv vienīgi C fāzē (atbilstoši 7.2. attēlam pārejas pretestības $0 < \dot{Z}_{LC} < \infty \Omega$, $\dot{Z}_{LA} = \dot{Z}_{LB} = 0 \Omega$). Šajā situācijā analītiskam risinājumam joprojām iespējams aprēķināt režīma parametrus, par īpašo jeb aprēķina fāzi pieņemot A fāzi, izmantojot modificētu koeficientu matricas A_L formu

$$A_L = (1/3) \begin{bmatrix} \dot{Z}_{LC} + 3\dot{Z}_{L\Sigma}^1 & \dot{a}\dot{Z}_{LC} & \dot{a}^2\dot{Z}_{LC} \\ \dot{a}^2\dot{Z}_{LC} & \dot{Z}_{LC} + 3\dot{Z}_{L\Sigma}^2 & \dot{a}\dot{Z}_{LC} \\ \dot{a}\dot{Z}_{LC} & \dot{a}^2\dot{Z}_{LC} & \dot{Z}_{LC} + 3\dot{Z}_{L\Sigma}^0 \end{bmatrix} \quad (7.26.)$$

vai skaitlisko atsevišķo secību aizvietošanas shēmu režīmu parametru aprēķina paņēmieni kopā ar modificētu (7.2.) vienādojumu sistēmu:

$$\begin{cases} \Delta\dot{U}_{LA}^1 = (1/3)(i_{LA}^1[\dot{Z}_{LC}] + i_{LA}^2[\dot{a}\dot{Z}_{LC}] + i_{LA}^0[\dot{a}^2\dot{Z}_{LC}]), \\ \Delta\dot{U}_{LA}^2 = (1/3)(i_{LA}^1[\dot{a}^2\dot{Z}_{LC}] + i_{LA}^2[\dot{Z}_{LC}] + i_{LA}^0[\dot{a}\dot{Z}_{LC}]), \\ \Delta\dot{U}_{LA}^0 = (1/3)(i_{LA}^1[\dot{a}\dot{Z}_{LC}] + i_{LA}^2[\dot{a}^2\dot{Z}_{LC}] + i_{LA}^0[\dot{Z}_{LC}]). \end{cases} \quad (7.27.)$$

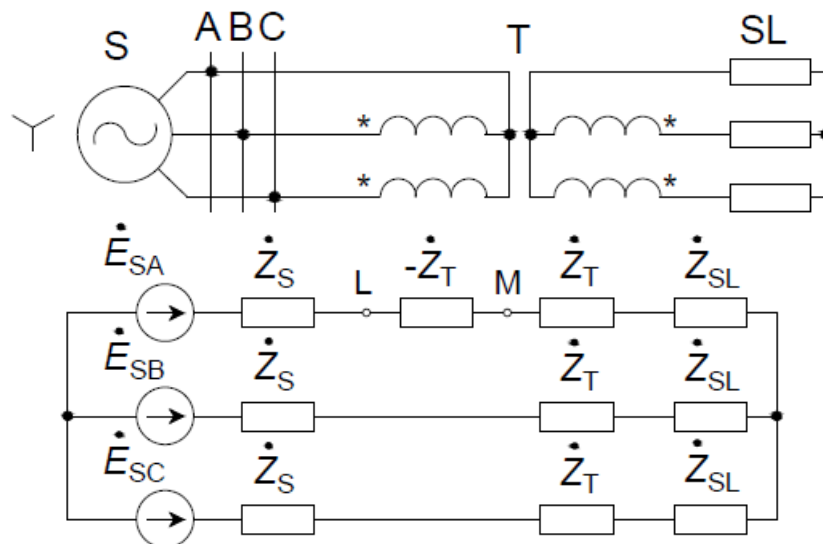
Ja arī C fāzei analītiski būtu izteikta spriegumu krituma un strāvas simetrisko komponentu vienādojumu sistēma (7.2.) līdzīgā veidā, tad varētu izvairīties no komplekso reizinātāju izmantošanas koeficientu matricā A_L vai garennesimetrijas sprieguma krituma simetrisko komponentu vienādojumu sistēmas labajā pusē. Tomēr lietderīgi atgādināt, ka, pieņemot C fāzi par īpašo jeb aprēķina fāzi, vismaz TS aizvietošanas shēmā A fāzei aprēķinātos tīkla elementu (ģeneratoru, sistēmas u. c.) atainošanai ieviestos EDS un strāvas avotus vispirms jāpagriež par 120° (PS par 240° , ja tajā parādās kāds tīkla elementu ieviests EDS vai strāvas avots). Ja zināmas vienīgi A fāzes EDS vērtības ($\dot{E}_{S1} = \dot{E}_{S1A}$), piemēram, sistēmai S1: $\dot{E}_{S1C}^1 = \dot{a}\dot{E}_{S1A}^1$, $\dot{E}_{S1C}^2 = \dot{a}^2\dot{E}_{S1A}^2$. Alternatīvi iespējams aprēķināt režīma parametrus 7.6. attēlā redzamajai kompleksajai aizvietošanas shēmai. Saprota, ka, izmantojot komplekso aizvietošanas shēmu, aprēķina fāzei jābūt atšķirīgos apstākļos esošajai fāzei (šeit – C fāzei), un šajā scenārijā arī būs jāpagriež EDS avotu vektori. Vienlaikus, ja C fāzē esošā pārejas pretestība ir \dot{Z}_{LC} , tad 7.6. attēlā redzamajai shēmai pirms režīmā parametru aprēķina arī jāpārveido zara pretestība $(1/3)(\dot{Z}_{LA} - \dot{Z}_{LF})$ uz $\dot{Z}_{LC}/3$, un, tā kā fāzēs A un B pārejas pretestību nav, tad 7.6. attēla shēmā sakrītošās fāžu pretestības \dot{Z}_{LF} jāšuntē zaros, kas pieslēgti punktiem M^1, M^2, M^0 . Jāatceras arī tas, ka šādi modificētās kompleksās aizvietošanas shēmas parametru aprēķina rezultātā tiks iegūtas C fāzes simetriskās komponentes, kas jāņem vērā, pārejot uz fāžu lielumiem.

Iespējams īsumā apspriest NS komponentes ievērošanu, rodoties garennesimetrijai tīklos ar dažādiem neitrāles režīmiem, līdzīgi kā tas bija darīts, raksturojot šķērsnesimetrijas. Kā redzams jau šīs nodaļas sākumā (7.2. att.), garennesimetrijas gadījumā nav jāaplūko pārejas pretestības uz zemi BV ietekme uz strāvas un sprieguma NS komponentēm, bet garennesimetrija var rasties tīklos ar izolētu neitrāli. Balstoties uz 7.6. attēlā redzamo komplekso aizvietošanas shēmu, iespējams secināt, ka atkarībā no pārejas pretestību vērtībām starp nesimetrijas punktiem (L^1, L^2, L^0 un M^1, M^2, M^0) būs novērojamas līdzīgas vai pat vienādas aprēķina fāzes sprieguma simetriskās komponentes. Sagaidāms, ka tīklā ar izolētu neitrāli galvenie NS strāvas noslēgšanās ceļi būs tīkla elementu vadītspējās uz zemi, un attiecīgi NS strāvas stiprums, līdzīgi kā īsslēgumiem, šādos tīklos būs mazs. Vienlaikus sprieguma kritumi šajās vadītspējās, kuras šajā shēmā ataino ekvivalentās S1 un S2 NS pretestības, var būt vērā ņemami. Līdz ar to attiecībā pret NS aizvietošanas neitrāli abās garennesimetrijas pusēs (punktos L^0 un M^0) arī iespējamas ievērojamas sprieguma NS komponentu vērtībās, kuras bez rūpīgas analīzes ignorēt nedrīkst. Turklāt atšķirībā no šķērsnesimetrijas garennesimetrijas aizvietošanas shēmās robežnosacījumu ievērošanai ieslēgtie EDS avoti atrodas virknes slēgumā ar sistēmu S1 un S2 zariem (7.3. att.). Tādēļ, rodoties garennesimetrijai, pat ja, piemēram, S1 pusē ieslēgtu neitrāli veidojošo transformatoru, NS strāvas stiprums joprojām būtu niecīgs, jo S2 pusē NS strāva var noslēgties vienīgi caur vadītspējām starp fāzēm un zemi. Galvenā atšķirība, ja tikai S1 pusē parādās NS strāvas noslēgšanās ceļš ar mazu pretestību, ir tajā, ka sprieguma kritums $i_{S1}^0\dot{Z}_{S1}^0$ un attiecīgi sprieguma NS komponente punktā L^0 būtu maza, bet

punktā M^0 tā joprojām var būt vērā ņemama vadītspēju lielās ekvivalentās pretestības (Z_{S2}^0) S2 pusē dēļ. Protams, ja abās nesimetrijas pusēs pastāv NS strāvas noslēgšanās ceļi ar salīdzinoši mazām pretestībām, NS komponentes tāpat jāievēro, jo tad iespējamas vismaz vērā ņemamas strāvas NS komponentu vērtības.

Iepriekš dotie apraksti garenesimetrijām ar pārejas pretestībām parāda arī to, ka 7.6. attēlā redzamā kompleksā aizvietošanas shēma ir viegli pārveidojama citu garenesimetrijas veidu režīmu parametru aprēķiniem, **izņemot vispārīgo garenesimetrijas gadījumu ($0 < Z_{LA} \neq Z_{LB} \neq Z_{LC} < \infty \Omega$) un divfāžu pārrāvumu režīmus, kuri tiks apspriesti 7.1.4. apakšpunktā.**

Viens no neparastākajiem aprakstīto garenesimetriju gadījumiem parādīts [5], kur izskatīts tīkls, kurā sistēma baro slodzi ar transformatoru, kura tinumi izveidoti atvērta trīsstūra slēgumā (gan AS, gan ZS tinumiem viena fāze uzreiz pieslēgta pie zvaigznes slēguma centra bez fāzes tinuma). Šo situāciju iespējams analizēt, aplūkojot ekvivalentu tīklu, kurā transformatora tinumi ir simetriski, bet atšķirīgajā fāzē tiem virknē ieslēgta arī negatīva tinuma pretestība (7.7. att.).

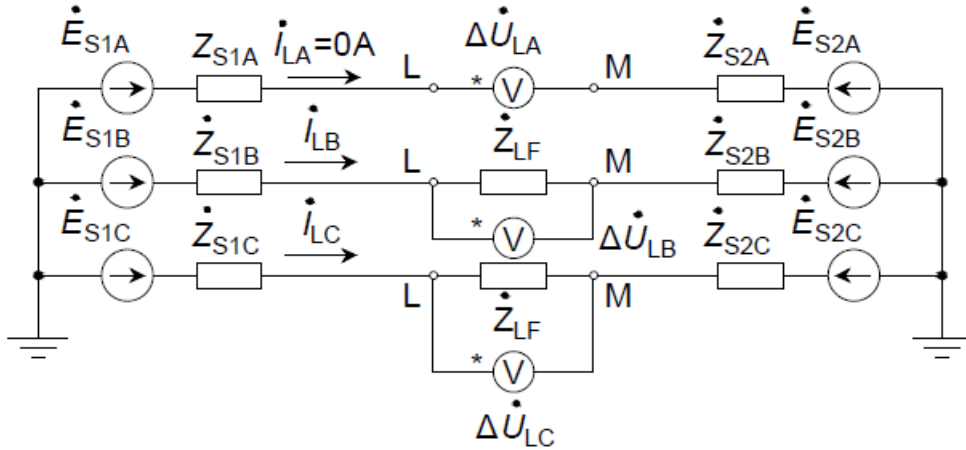


7.7. att. Sistēma, kurai pieslēgta slodze ar transformatoru, kura tinumi saslēgti atvērta trīsstūra slēgumā, un to ekvivalenta analīzes shēma ar nesimetriskas pretestības ieslēgšanu atšķirīgajā fāzē [5].

7.1.3. Vienfāzes pārrāvumi

Viens no speciālajiem gadījumiem ir garenesimetrijas režīms, kurā viena no fāzēm ir pārrauta, t. i., $Z_{LA} = \infty \Omega$ vai $Z_{LB} = \infty \Omega$, vai $Z_{LC} = \infty \Omega$. Teorētiski iespējams izmantot vispārīgas šķērsnesimetrijas aprēķinu metodiku, pārrautās fāzes pretestību pieņemot nevis par bezgalīgu, bet par ļoti lielu (piemēram, $M\Omega$ pakāpē $Z_{LA} = \infty \approx 100 M\Omega$). Svarīgi saprast, ka šāds pieņēmums dod aptuvenu rezultātu un tik ievērojamu pretestību vērtību izmantošana potenciāli var radīt vienādojumu sistēmas skaitliskā aprēķina svārstības, kuru rezultātā meklēto nezināmo (mezglu spriegumu) vērtības nespēj stabilizēties pie konkrēta risinājuma. Šīs svārstības var izsaukt kļūdas aprēķina rezultātos vai pat tā diverģenci, tādēļ atsevišķi aplūkosim vienfāzes un divfāžu pārrāvumu režīmus.

Vienfāzes pārrāvumu režīmos izdevīgi par īpašo jeb aprēķina fāzi pieņemt pārrauto fāzi. Analīzei aplūkosim A fāzes pārrāvumus ($\dot{Z}_{LA} = \infty \Omega$, papildus apzīmēsim veselo fāžu pārejas pretestību kā garensimetrijas fāzes pretestību $0 \leq \dot{Z}_{LF} = \dot{Z}_{LB} = \dot{Z}_{LC} < \infty \Omega$). Vienfāzes pārrāvumu režīmu analīzes shēma fāžu koordinātās parādīta 7.8. attēlā (šeit var atgādināt, ka voltmetram teorētiski iekšējā pretestība ir bezgalīga, tādēļ to vizuāli iespējams izmantot pārrāvuma vietā).



7.8. att. Vienfāzes pārrāvumu analīzes shēma fāžu koordinātās.

Iesākumā aplūkosim robežgadījumu, kurā B un C fāzēs nav pārejas pretestību (7.2. attēls ar fāžu pretestībām $\dot{Z}_{LB} = \dot{Z}_{LC} = 0 \Omega$, $\dot{Z}_{LA} = \infty \Omega$). Šajā pārrāvuma režīmā uzreiz saprotams, ka pārrautajā fāzē $\dot{I}_{LA} = 0 \text{ A}$, jo $\dot{Z}_{LA} = \infty \Omega$. Ņemot vērā, ka $\dot{Z}_{LB} = \dot{Z}_{LC} = 0 \Omega$, iespējams secināt arī, ka nebojātajās fāzēs sprieguma kritumi nepastāv $\Delta \dot{U}_{LB} = \dot{I}_{LB} \dot{Z}_{LB} = \Delta \dot{U}_{LC} = \dot{I}_{LC} \dot{Z}_{LC} = 0 \text{ V}$. No šiem apsvērumiem iespējams uzrakstīt šādus robežnosacījumus [7]:

$$\begin{cases} \dot{I}_{LA} = \dot{I}_{LA}^1 + \dot{I}_{LA}^2 + \dot{I}_{LA}^0 = 0 \text{ A.} \\ \Delta \dot{U}_{LB} = 0 \text{ V.} \\ \Delta \dot{U}_{LC} = 0 \text{ V.} \end{cases} \quad (7.28.)$$

No robežnosacījumu (7.28.) otrās un trešās izteiksmes un (7.2.) pirmās formas iespējams pārliicināties, ka šādam vienfāzes pārrāvumam bojātās fāzes sprieguma krituma simetriskās komponentes būs vienādas [2], [14]:

$$\Delta \dot{U}_{LA}^1 = \Delta \dot{U}_{LA}^2 = \Delta \dot{U}_{LA}^0 = (1/3) \Delta \dot{U}_{LA}. \quad (7.29.)$$

Tālāk iespējams pārveidot vienādojumu sistēmu (7.7.), lai otrais un trešais vienādojums izteiktu aprēķina fāzes strāvas PS un NS komponentes, papildus ievietojot tajos (7.29.):

$$\begin{cases} \Delta \dot{U}_L^1 = \dot{E}_{L\Sigma} - \dot{Z}_{L\Sigma}^1 \dot{I}_L^1. \\ \dot{I}_L^2 = -\Delta \dot{U}_L^2 / \dot{Z}_{L\Sigma}^2 = -\Delta \dot{U}_L^1 / \dot{Z}_{L\Sigma}^2. \\ \dot{I}_L^0 = -\Delta \dot{U}_L^0 / \dot{Z}_{L\Sigma}^0 = -\Delta \dot{U}_L^1 / \dot{Z}_{L\Sigma}^0. \end{cases} \quad (7.30.)$$

Vienādojumu sistēmas (7.30.) pēdējos divus vienādojumus iespējams ievietot (7.28.) pirmajā vienādojumā un izteikt TS sprieguma kritumu formā:

$$\dot{I}_{LA}^1 - (\Delta \dot{U}_{LA}^1 / \dot{Z}_{L\Sigma}^2) - (\Delta \dot{U}_{LA}^1 / \dot{Z}_{L\Sigma}^0) = 0 \text{ A} \Rightarrow$$

$$\Delta \dot{U}_{LA}^1 = \dot{i}_{LA}^1 \dot{Z}_{L\Sigma}^2 \dot{Z}_{L\Sigma}^0 / (\dot{Z}_{L\Sigma}^2 + \dot{Z}_{L\Sigma}^0). \quad (7.31.)$$

Pielīdzinot (7.31.) un (7.30.) pirmo vienādojumu, iespējams izteikt aprēķina (šeit – A) fāzes TS strāvu [2], [14]:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{L\Sigma A}^1 - \dot{Z}_{L\Sigma}^1 \dot{i}_{LA}^1 &= \dot{i}_{LA}^1 \dot{Z}_{L\Sigma}^2 \dot{Z}_{L\Sigma}^0 / (\dot{Z}_{L\Sigma}^2 + \dot{Z}_{L\Sigma}^0) \Rightarrow \\ \dot{i}_{LA}^1 &= \dot{E}_{L\Sigma A}^1 / (\dot{Z}_{L\Sigma}^1 + [\dot{Z}_{L\Sigma}^2 \dot{Z}_{L\Sigma}^0 / (\dot{Z}_{L\Sigma}^2 + \dot{Z}_{L\Sigma}^0)]). \end{aligned} \quad (7.32.)$$

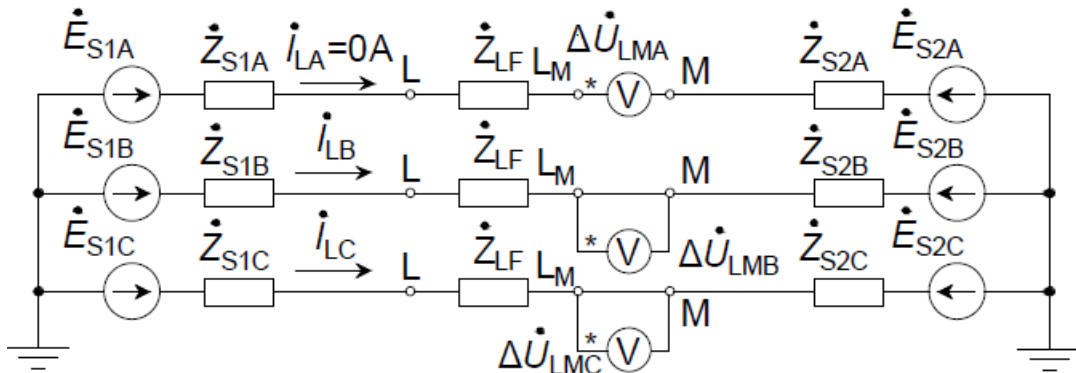
Savukārt A fāzes strāvas PS un NS komponentes iespējams izteikt no TS komponentes, (7.30.) pēdējos divos vienādojumos ievietojot (7.31.) [14], [17]:

$$\dot{i}_{LA}^2 = -\Delta \dot{U}_{LA}^2 / \dot{Z}_{L\Sigma}^2 = -\Delta \dot{U}_{LA}^1 / \dot{Z}_{L\Sigma}^2 = -\dot{i}_{LA}^1 \dot{Z}_{L\Sigma}^0 / (\dot{Z}_{L\Sigma}^2 + \dot{Z}_{L\Sigma}^0), \quad (7.33.)$$

$$\dot{i}_{LA}^0 = -\Delta \dot{U}_{LA}^0 / \dot{Z}_{L\Sigma}^0 = -\Delta \dot{U}_{LA}^1 / \dot{Z}_{L\Sigma}^0 = -\dot{i}_{LA}^1 \dot{Z}_{L\Sigma}^2 / (\dot{Z}_{L\Sigma}^2 + \dot{Z}_{L\Sigma}^0). \quad (7.34.)$$

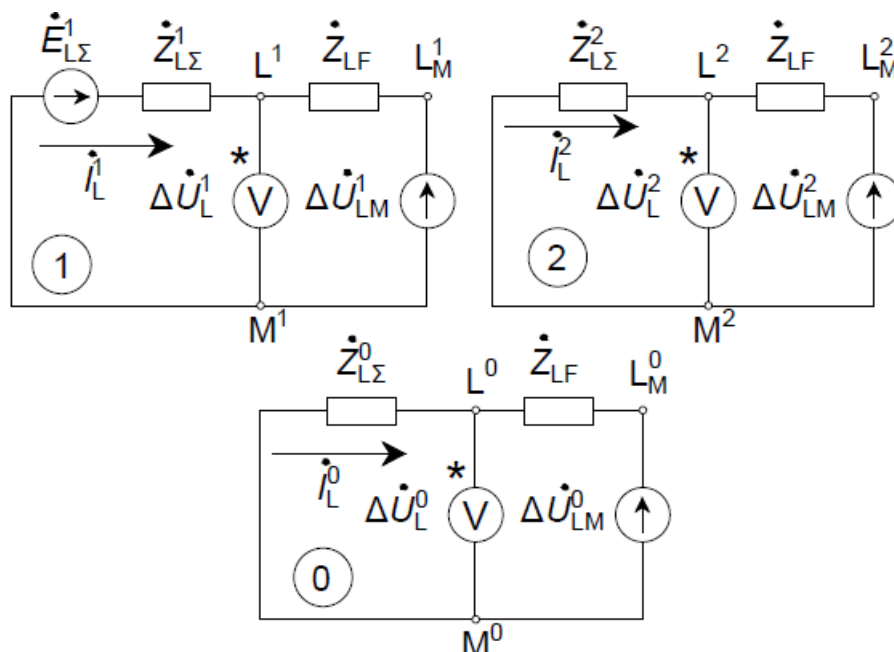
Zinot A fāzes strāvas simetriskās komponentes, iespējams noteikt A fāzes sprieguma krituma simetriskās komponentes, izmantojot vienādojumu sistēmu (7.7.). Ja tīkla konfigurācija ir tik sarežģīta, ka atsevišķu aizvietošanas shēmu ekvivalentēšana būtu pārāk laikietilpīga, tad iespējams aprēķināt režīma parametrus 7.6. attēlā parādītajai kompleksajai aizvietošanas shēmai, iepriekš no tās dzēšot zaru ar pretestību $1/3 (\dot{Z}_{LA} - \dot{Z}_{LF})$, jo $\dot{Z}_{LA} = \infty \Omega$, un šuntējot pretestības $\dot{Z}_{LF} = 0 \Omega$.

Iespējams aplūkot arī vienfāzes pārrāvumu režīmu, kurā B un C fāzēs ir vienādas pārejas pretestības, t. i., 7.8. attēls ar pārejas pretestībām: $0 < \dot{Z}_{LB} = \dot{Z}_{LC} = \dot{Z}_{LF} < \infty \Omega$, $\dot{Z}_{LA} = \infty \Omega$. Šādam pārrāvuma režīmam joprojām pārrautajā fāzē $\dot{I}_{LA} = 0 \text{ A}$, jo $\dot{Z}_{LA} = \infty \Omega$. Atšķirībā no iepriekšēja vienfāzes pārrāvuma scenārija nepārrautajās fāzēs sprieguma kritumi būs novērojami ($\Delta \dot{U}_{LB} = \dot{I}_{LB} \dot{Z}_{LB} \neq 0 \text{ V}$ un $\Delta \dot{U}_{LC} = \dot{I}_{LC} \dot{Z}_{LC} \neq 0 \text{ V}$). Pirms turpināt šāda režīma parametru aprēķinu, iespējams veikt nesimetriskiem īsslēgumiem analogisku modifikāciju, pārrautajā A fāzē nosacīti ieslēdzot B un C fāzēs esošo pretestību \dot{Z}_{LF} , kas ir pieļaujami, jo $\dot{I}_{LA} = 0 \text{ A} \Rightarrow \dot{I}_{LA} \dot{Z}_{LF} = 0 \text{ V}$ [14]. Šādas simetriskās fāžu pretestības \dot{Z}_{LF} iespējams ieslēgt virknē ar 7.4. attēlā redzamajām rezultējošo aizvietošanas shēmu summārajām pretestībām. Ar šādu modifikāciju principā var pāriet no faktiskās nesimetrijas analīzes starp punktiem L un M uz garennesimetrijas analīzes starp punktiem L_M un M, kur fāzēm B un C ir metālisks savienojums $\dot{Z}_{LMB} = \dot{Z}_{LMC} = 0 \Omega$ (7.9. att.).



7.9. att. Vienfāzes pārrāvuma A fāzē ar pārejas pretestībām \dot{Z}_{LF} fāzēs B un C modificētā analīzes shēma fāžu koordinātās.

Attiecīgi, pārejot uz jauno nesimetrijas punktu, ir jāparāda arī atbilstošās rezultējošās secību aizvietošanas shēmas, ieslēdzot tajās pārejas pretestību \dot{Z}_{LF} (7.10. att.).



7.10. att. Vienfāzes pārrāvuma ar pārejas pretestībām nepārrautajās fāzēs modificētās rezultējošās secību aizvietošanas shēmas.

Balstoties uz modificētajām rezultējošajām aizvietošanas shēmām, iespējams izteikt aprēķina fāzes sprieguma krituma simetriskās komponentes starp punktiem L_M un M :

$$\begin{cases} \Delta\dot{U}_{LM}^1 = \dot{E}_{L\Sigma}^1 - (\dot{Z}_{L\Sigma}^1 + \dot{Z}_{LF})\dot{i}_L^1. \\ \Delta\dot{U}_{LM}^2 = \dot{E}_{L\Sigma}^2 - (\dot{Z}_{L\Sigma}^2 + \dot{Z}_{LF})\dot{i}_L^2 = 0 - (\dot{Z}_{L\Sigma}^2 + \dot{Z}_{LF})\dot{i}_L^2. \\ \Delta\dot{U}_{LM}^0 = \dot{E}_{L\Sigma}^0 - (\dot{Z}_{L\Sigma}^0 + \dot{Z}_{LF})\dot{i}_L^0 = 0 - (\dot{Z}_{L\Sigma}^0 + \dot{Z}_{LF})\dot{i}_L^0. \end{cases} \quad (7.35.)$$

kur $\Delta\dot{U}_{LM}^1, \Delta\dot{U}_{LM}^2, \Delta\dot{U}_{LM}^0$ – vienfāzes pārrāvuma punktu bez pārejas pretestībām nepārrautajās fāzēs aprēķina fāzes sprieguma krituma TS, PS un NS komponentes, V;
 \dot{Z}_{LF} – pilnās pārejas pretestības nepārrautajās fāzēs vienfāzes pārrāvuma vietā, Ω .

7.9. attēla shēmā redzams, ka A fāzes pārrāvums paliek spēkā neatkarīgi no analīzes punkta pārņemšanas no L uz L_M , bet fāzēs B un C starp punktiem L_M un M nepastāv sprieguma kritumi, jo $\dot{Z}_{LMB} = \dot{Z}_{LMC} = 0 \Omega$. Attiecīgi iespējams uzdot (7.28.) līdzīgus robežnosacījumus:

$$\begin{cases} \dot{i}_{LA} = \dot{i}_{LA}^1 + \dot{i}_{LA}^2 + \dot{i}_{LA}^0 = 0 \text{ A.} \\ \Delta\dot{U}_{LMB} = 0 \text{ V.} \\ \Delta\dot{U}_{LMC} = 0 \text{ V.} \end{cases} \quad (7.36.)$$

No robežnosacījumu (7.36.) otrās un trešās izteiksmes un (7.2.) pirmās formas var pārliacināties, ka starp punktiem L_M un M aprēķina fāzes sprieguma krituma simetriskās komponentes sakrīt:

$$\Delta\dot{U}_{LMA}^1 = \Delta\dot{U}_{LMA}^2 = \Delta\dot{U}_{LMA}^0 = \Delta\dot{U}_{LMA}/3. \quad (7.37.)$$

Tālāk iespējams pārveidot (7.35.), lai otrais un trešais vienādojums izteiktu aprēķina fāzes strāvas PS un NS komponentes, papildus ievietojot tajos (7.37.):

$$\begin{cases} \Delta\dot{U}_{LM}^1 = \dot{E}_{L\Sigma}^1 - (\dot{Z}_{L\Sigma}^1 + \dot{Z}_{LF})i_L^1 \\ i_L^2 = -\Delta\dot{U}_{LM}^2/(\dot{Z}_{L\Sigma}^2 + \dot{Z}_{LF}) = -\Delta\dot{U}_{LM}^1/(\dot{Z}_{L\Sigma}^2 + \dot{Z}_{LF}) \\ i_L^0 = -\Delta\dot{U}_{LM}^0/(\dot{Z}_{L\Sigma}^0 + \dot{Z}_{LF}) = -\Delta\dot{U}_{LM}^1/(\dot{Z}_{L\Sigma}^0 + \dot{Z}_{LF}) \end{cases} \quad (7.38.)$$

Vienādojumu sistēmas (7.38.) pēdējos divus vienādojumus iespējams ievietot (7.36.) pirmajā vienādojumā un izteikt aprēķina fāzes sprieguma krituma starp punktiem L_M un M TS komponenti formā:

$$\begin{aligned} i_{LA}^1 - \Delta\dot{U}_{LMA}^1/(\dot{Z}_{L\Sigma}^2 + \dot{Z}_{LF}) - \Delta\dot{U}_{LMA}^1/(\dot{Z}_{L\Sigma}^0 + \dot{Z}_{LF}) &= 0 \text{ A} \Rightarrow \\ \Delta\dot{U}_{LMA}^1 &= i_{LA}^1 (\dot{Z}_{L\Sigma}^2 + \dot{Z}_{LF})(\dot{Z}_{L\Sigma}^0 + \dot{Z}_{LF})/(\dot{Z}_{L\Sigma}^2 + \dot{Z}_{L\Sigma}^0 + 2\dot{Z}_{LF}). \end{aligned} \quad (7.39.)$$

Pielīdzinot (7.39.) un (7.38.) pirmo vienādojumu, iespējams izteikt aprēķina (šeit – A) fāzes strāvas TS komponenti:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{L\Sigma A}^1 - (\dot{Z}_{L\Sigma}^1 + \dot{Z}_{LF})i_{LA}^1 &= i_{LA}^1 (\dot{Z}_{L\Sigma}^2 + \dot{Z}_{LF})(\dot{Z}_{L\Sigma}^0 + \dot{Z}_{LF})/(\dot{Z}_{L\Sigma}^2 + \dot{Z}_{L\Sigma}^0 + 2\dot{Z}_{LF}) \Rightarrow \\ i_{LA}^1 &= \dot{E}_{L\Sigma A}^1/(\dot{Z}_{L\Sigma}^1 + \dot{Z}_{LF} + [(\dot{Z}_{L\Sigma}^2 + \dot{Z}_{LF})(\dot{Z}_{L\Sigma}^0 + \dot{Z}_{LF})/(\dot{Z}_{L\Sigma}^2 + \dot{Z}_{L\Sigma}^0 + 2\dot{Z}_{LF})]). \end{aligned} \quad (7.40.)$$

Savukārt aprēķina fāzes strāvas PS un NS komponentes iespējams izteikt no TS komponentes (7.38.), pēdējos divos vienādojumos ievietojot (7.39.):

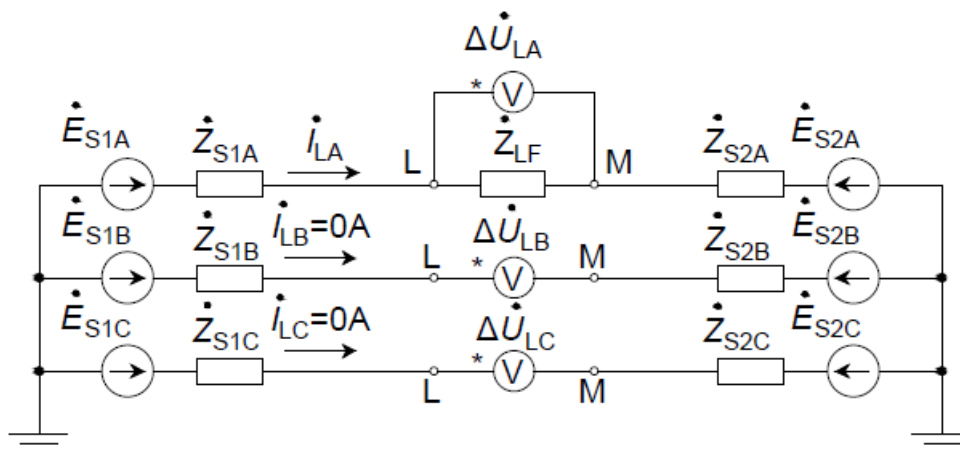
$$i_{LA}^2 = -\Delta\dot{U}_{LMA}^2/(\dot{Z}_{L\Sigma}^2 + \dot{Z}_{LF}) = -i_{LA}^1 (\dot{Z}_{L\Sigma}^0 + \dot{Z}_{LF})/(\dot{Z}_{L\Sigma}^2 + \dot{Z}_{L\Sigma}^0 + 2\dot{Z}_{LF}), \quad (7.41.)$$

$$i_{LA}^0 = -\Delta\dot{U}_{LMA}^0/(\dot{Z}_{L\Sigma}^0 + \dot{Z}_{LF}) = -i_{LA}^1 (\dot{Z}_{L\Sigma}^2 + \dot{Z}_{LF})/(\dot{Z}_{L\Sigma}^2 + \dot{Z}_{L\Sigma}^0 + 2\dot{Z}_{LF}). \quad (7.42.)$$

Zinot aprēķina fāzes strāvas simetriskās komponentes, var uzreiz noteikt sprieguma kritumus starp faktiskajiem pārrāvuma punktiem L un M , izmantojot vienādojumu sistēmu (7.7.), kas automātiski ievēro strāvas simetrisko komponentu radītos sprieguma kritumus pretestībā \dot{Z}_{LF} (7.10. att.). Ja tīkla konfigurācija ir tik sarežģīta, ka atsevišķu aizvietošanas shēmu ekvivalentēšana būtu pārāk laikietilpīga, tad iespējams aprēķināt režīma parametrus 7.6. attēlā redzamajai kompleksajai aizvietošanas shēmai, iepriekš no tās dzēšot zaru ar pretestību $1/3 (\dot{Z}_{LA} - \dot{Z}_{LF})$, jo arī šim režīmam $\dot{Z}_{LA} = \infty \Omega$, bet šoreiz jāatstāj fāžu pārejas pretestības \dot{Z}_{LF} , kuru zari pieslēgti mezgliem M^1 , M^2 un M^0 .

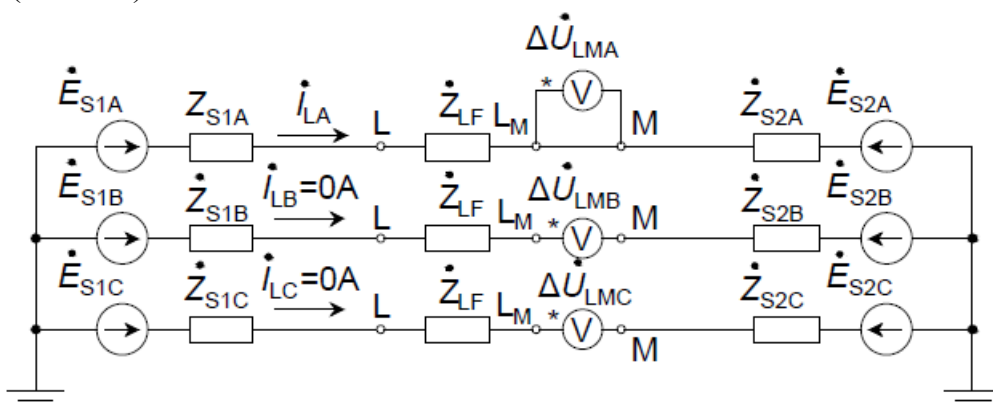
7.1.4. Divfāžu pārrāvumi

Turpinājumā tiks parādīti divfāžu pārrāvumu režīmu parametru aprēķini. Kā piemēru aplūkosim B un C fāžu pārrāvumus (jeb garennesimetriju ar fāžu pretestībām $\dot{Z}_{LB} = \dot{Z}_{LC} = \infty \Omega$, $0 \leq \dot{Z}_{LA} < \infty \Omega$). Divfāžu pārrāvumu gadījumā par aprēķina jeb īpašo fāzi izdevīgi izvēlēties nepārrauto fāzi (šajā piemērā – fāzi A). Līdzīgi kā vienfāzes īsslēgumiem, uzreiz aplūkosim gadījumu, kurā aprēķina fāzē ir ieslēgta pārejas pretestība (apzīmēta kā garennesimetrijas fāzes pretestība $0 \leq \dot{Z}_{LA} = \dot{Z}_{LF} < \infty \Omega$). Vispārīga divfāžu pārrāvumu analīzes shēma fāžu koordinātās parādīta 7.11. attēlā.



7.11. att. Divfāžu pārrāvuma B un C fāzēs ar pārejas pretestību \dot{Z}_{LF} fāzē A analīzes shēma fāžu koordinātās.

Ja nepārrautajā A fāzē ir pārejas pretestība, pirms turpmākās analīzes iespējams B un C fāzēs ielēgt identisku pretestību \dot{Z}_{LF} , jo tajās BV strāva neplūst un neradīsies sprieguma kritumi ($\dot{I}_{LB}\dot{Z}_{LF} = \dot{I}_{LC}\dot{Z}_{LF} = 0 \text{ V}$). Tas ļauj atkal pāriet pie alternatīvu pārrāvuma punktu L_M un M analīzes (7.12. att.).



7.12. att. Divfāžu pārrāvuma B un C fāzē ar pārejas pretestību \dot{Z}_{LF} fāzē A modificētā analīzes shēma fāžu koordinātās.

Tādas pārejas gadījumā atkal jāievieš pretestība \dot{Z}_{LF} rezultējošajās secību aizvietošanas shēmās, kā tas parādīts 7.10. attēlā. Saprotams, ka šajā situācijā iespējams izmantot arī (7.35.) parādītās aprēķina fāzes sprieguma krituma simetrisko komponentu aprēķinu formulas punktiem L_M un M. 7.11. un 7.12. attēlā parādītajās analīzes shēmās redzams, ka neatkarīgi no analīzes punktiem B un C fāzēs strāva neplūdīs, bet A fāzē starp punktiem L_M un M nebūs sprieguma krituma, jo $\dot{Z}_{LMA} = 0 \Omega$. Atbilstoši iepriekš izklāstītajam var uzrakstīt šādus robežnosacījumus:

$$\begin{cases} \Delta\dot{U}_{LMA} = \Delta\dot{U}_{LMA}^1 + \Delta\dot{U}_{LMA}^2 + \Delta\dot{U}_{LMA}^0 = 0 \text{ V}, \\ \dot{I}_{LB} = 0 \text{ A}, \\ \dot{I}_{LC} = 0 \text{ A}, \end{cases} \quad (7.43.)$$

kur $\Delta\dot{U}_{LM}^1, \Delta\dot{U}_{LM}^2, \Delta\dot{U}_{LM}^0$ – divfāžu pārrāvuma punktu bez pārejas pretestības nepārrautajā fāzē aprēķina fāzes sprieguma krituma TS, PS un NS komponentes, V.

Izsakot A fāzes strāvas simetriskās komponentes, līdzīgi kā tas izdarīts (7.2.), iespējams iegūt, ka divfāžu pārrāvuma gadījumā nepārrautās fāzes strāvas simetriskās komponentes ir vienādas:

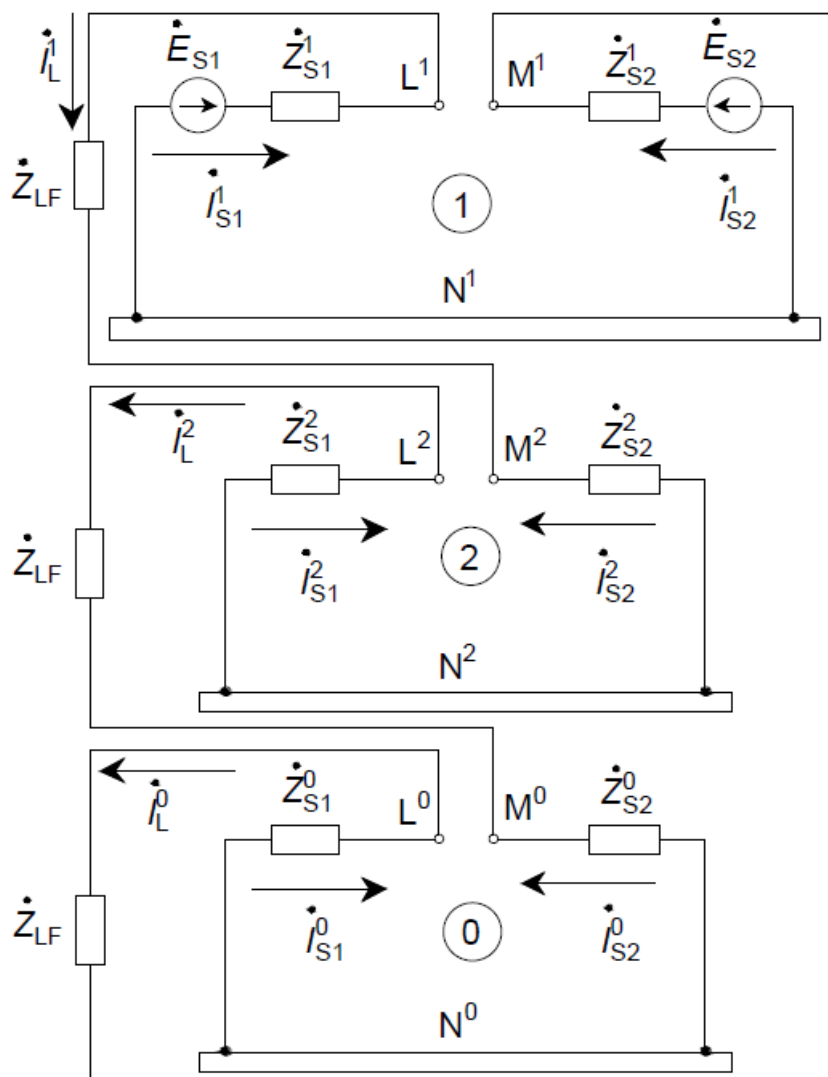
$$i_{LA}^1 = i_{LA}^2 = i_{LA}^0 = I_{LA}/3. \quad (7.44.)$$

Tālāk iespējams (7.43.) pirmajā vienādojumā ievietot vienādojumus no (7.35.) un tad iegūt pārrāvuma vietas aprēķina (šeit – A) fāzes strāvas TS komponentes aprēķina formulu, ņemot vērā (7.44.):

$$\begin{aligned} & \dot{E}_{L\Sigma A}^1 - (\dot{Z}_{L\Sigma}^1 + \dot{Z}_{LF})i_{LA}^1 - (\dot{Z}_{L\Sigma}^2 + \dot{Z}_{LF})i_{LA}^2 - (\dot{Z}_{L\Sigma}^0 + \dot{Z}_{LF})i_{LA}^0 = \\ & = \dot{E}_{L\Sigma A}^1 - (\dot{Z}_{L\Sigma}^1 + \dot{Z}_{LF})i_{LA}^1 - (\dot{Z}_{L\Sigma}^2 + \dot{Z}_{LF})i_{LA}^1 - (\dot{Z}_{L\Sigma}^0 + \dot{Z}_{LF})i_{LA}^1 = 0 \text{ V} \Rightarrow \\ & i_{LA}^1 = i_{LA}^2 = i_{LA}^0 = \dot{E}_{L\Sigma A}^1 / (\dot{Z}_{L\Sigma}^1 + \dot{Z}_{L\Sigma}^2 + \dot{Z}_{L\Sigma}^0 + 3\dot{Z}_{LF}), \end{aligned} \quad (7.45.)$$

kur \dot{Z}_{LF} – pilnā pārejas pretestība nepārrautajā fāzē divfāžu pārrāvuma vietā, Ω .

Zinot aprēķina fāzes strāvas simetriskās komponentes, analogiski iepriekšējiem pārrāvumiem ar pārejas pretestībām fāzēs, iespējams noteikt aprēķina fāzes sprieguma krituma starp faktiskajiem pārrāvuma punktiem L un M simetriskās komponentes, izmantojot vienādojumu sistēmu (7.7.). Ja tīkla konfigurācija ir tik sarežģīta, ka atsevišķu aizvietošanas shēmu ekvivalentēšana būtu pārāk laikietilpīga, iespējams aprēķināt režīma parametrus 7.13. attēlā redzamajai kompleksajai aizvietošanas shēmai.



7.13. att. Divfāžu pārrāvumu ar pārejas pretestību nepārrautajā fāzē \dot{Z}_{LF} kompleksā aizvietošanas shēma [3].

Viegli secināt, ka, rodoties divfāžu pārrāvumam bez pārejas pretestības nepārrautajā fāzē, nebūs nepieciešama pāreja uz punktu L_M un M analīzi un gan analītiskais, gan komplekso aizvietošanas shēmu izmantošanas risinājums vienkāršojas. Analītiskam aprēķinam (7.45.) jāievēro, ka $Z_{LF} = 0 \Omega$:

$$i_{LA}^1 = i_{LA}^2 = i_{LA}^0 = \dot{E}_{L\Sigma A}^1 / (\dot{Z}_{L\Sigma}^1 + \dot{Z}_{L\Sigma}^2 + \dot{Z}_{L\Sigma}^0). \quad (7.46.)$$

Īpašās fāzes sprieguma krituma simetriskās komponentes arī šim gadījumam nosaka ar (7.7.). Kompleksajā aizvietošanas shēmā arī jāievēro $Z_{LF} = 0 \Omega$, jeb jāšuntē zari, kas satur šīs pretestības. Iespējams norādīt arī uz to, ka divfāžu pārrāvuma kompleksajai aizvietošanas shēmai secību aizvietošanas shēmas tiek slēgtas virknē, lai nodrošinātu (7.44.) spēkā esamību, kas arī rada ievērojamo atšķirību, salīdzinot ar citu garennesimetriju kompleksajām aizvietošanas shēmām.

Rodoties divfāžu pārrāvumam tīklos ar izolētu neitrāli, līdzīgi kā vienfāzes īsslēguma gadījumā, garennesimetrijas vietā nebojātās (aprēķina) fāzes strāvas simetrisko komponentu

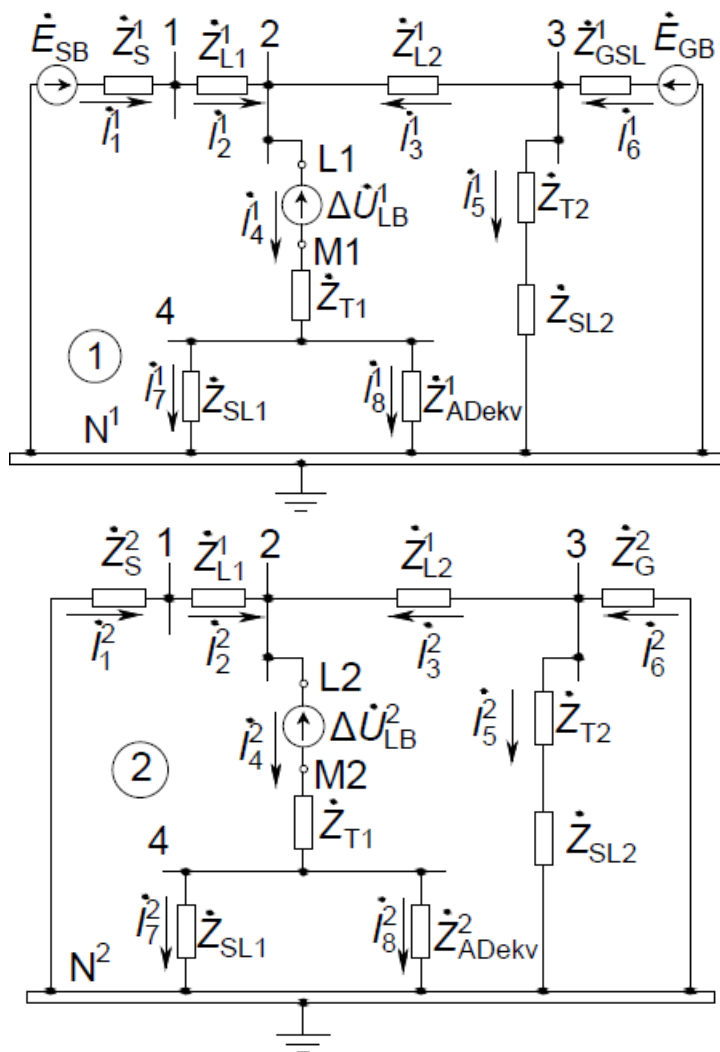
garensimetrijai, iespējamas ievērojamas rezultātu kļūdas, ja neievēro slodžu pretestības un līniju kapacitātes, bet konkrēti šajā piemērā kapacitatīvās vadītspējas netiks ņemtas vērā. Šāds pieņēmums veikts, jo šim tīklam salīdzinoši zemā nominālā sprieguma un niecīgo kapacitatīvo vadītspēju dēļ līniju ģenerētās jaudas ir daudzreiz mazākas par slodžu jaudām, tādēļ tās nav ņemtas vērā arī slodzes režīma parametru aprēķinā. Jāatzīmē, ka vienfāzes pārrāvuma gadījumā par aprēķina fāzi parasti izvēlas pārrauto fāzi, kas šoreiz ir fāze B. Aprēķins tiks veikts pie aprēķina sprieguma 10,5 kV.

Šajā piemērā, atšķirībā no analītiskā šķērsnesimetrijas aprēķina piemēra, starp sistēmu S un ģeneratoru G, un BV nav transformatoru ar kompleksu transformācijas koeficientu, tādēļ nav nepieciešami to EDS pagriezieni transformatoru dēļ, bet, ņemot vērā, ka aprēķina fāze šim bojājumam ir B fāze, jānoskaidro šo avotu B fāžu EDS vērtības:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{GB} &= \dot{E}_{qGA} \dot{a}^2 = (6,92 + j8,67)(-0,5 - j0,866) \approx 4,048 - j10,328 \text{ kV}, \\ \dot{E}_{SB} &= \dot{E}_{SA} \dot{a}^2 = 6,062(-0,5 - j0,866) \approx -3,031 - j5,250 \text{ kV}. \end{aligned}$$

AD pret-EDS TS aizvietošanas shēmā neparādās, jo tā režīms būs tuvs slodzes režīmam, salīdzinot ar īsslēgumu režīmiem.

Sākumā, līdzīgi kā īsslēguma analītiskajam risinājumam, jāastāda atsevišķās secību aizvietošanas shēmas (pagaidām vienīgi TS un PS), bet šoreiz bojājuma robežnosacījumu ievērošanai ieviestie EDS avoti jāieslēdz starp pārrāvuma punktiem L un M (7.15. att.).



7.15. att. Pirmā piemēru tīkla QF8 vienfāzes pārrāvuma TS un PS aizvietošanas shēmas.

Lai iegūtu analītisku risinājumu, ir jānosaka rezultējošo aizvietošanas shēmu summārie EDS un pretestības. Iesākumā veiksīm TS aizvietošanas shēmas ekvivalentēšanu.

TS rezultējošās aizvietošanas shēmas summārā EDS un pretestības noteikšanai sākumā tiks noteikta T1, SL1 un AD zaru ekvivalentā pretestība:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{T1ek}^1 &= \dot{Z}_{T1} + \frac{\dot{Z}_{SL1}\dot{Z}_{ADek}^1}{\dot{Z}_{SL1} + \dot{Z}_{ADek}^1} = (0,38 + j2,57) + \frac{(155,45 + j66,33)(70,29 + j38,74)}{(155,45 + j66,33) + (70,29 + j38,74)} \approx \\ &\approx 48,916 + j27,310 \Omega. \end{aligned}$$

Paralēlo zaru G un SL2 ekvivalentā EDS un pretestības aprēķins:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{Gek} &= \frac{\dot{E}_{GB}(\dot{Z}_{T2} + \dot{Z}_{SL2}) + 0\dot{Z}_{GSL}}{\dot{Z}_{T2} + \dot{Z}_{SL2} + \dot{Z}_{GSL}} = \frac{(4,048 - j10,328)((0,38 + j2,57) + (43,66 + j22,37))}{(0,38 + j2,57) + (43,66 + j22,37) + (0,07 + j25,14)} \approx \\ &\approx 0,34 - j8,41 \text{ kV}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{Gek}^1 &= \frac{\dot{Z}_{GSL}(\dot{Z}_{T2} + \dot{Z}_{SL2})}{\dot{Z}_{T2} + \dot{Z}_{SL2} + \dot{Z}_{GSL}} = \frac{(0,07 + j25,14)((0,38 + j2,57) + (43,66 + j22,37))}{(0,38 + j2,57) + (43,66 + j22,37) + (0,07 + j25,14)} \approx \\ &\approx 6,29 + j18,00 \Omega. \end{aligned}$$

Līnijas L2 pretestības un G + SL2 ekvivalentās pretestības virknes slēguma kopējā pretestība:

$$\dot{Z}_{\text{Gek2}}^1 = \dot{Z}_{\text{Gek}}^1 + \dot{Z}_{\text{L2}}^1 = (6,29 + j18,00) + (0,76 + j1,81) = 7,05 + j19,81 \Omega.$$

Paralēlo zaru S + L1 un G + SL2 + L2 ekvivalentās pretestības un EDS, kurš atbilst B fāzes TS rezultējošās aizvietošanas shēmas summārajam EDS, noteikšana:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{\text{GS}}^1 &= \dot{E}_{\text{L}\Sigma\text{B}}^1 = \frac{\dot{E}_{\text{SB}}\dot{Z}_{\text{Gek2}}^1 + \dot{E}_{\text{Gek}}(\dot{Z}_{\text{S}} + \dot{Z}_{\text{L1}}^1)}{\dot{Z}_{\text{S}} + \dot{Z}_{\text{L1}}^1 + \dot{Z}_{\text{Gek2}}^1} = \\ &= \frac{(-3,031 - j5,250)(7,05 + j19,81) + (0,34 - j8,41)((0,02 + j0,11) + (0,309 + j0,309))}{(0,02 + j0,11) + (0,309 + j0,309) + (7,05 + j19,81)} \approx \\ &\approx -2,98 - j5,35 \text{ kV}, \end{aligned}$$

$$\dot{Z}_{\text{GS}}^1 = \frac{\dot{Z}_{\text{Gek2}}^1(\dot{Z}_{\text{S}} + \dot{Z}_{\text{L1}}^1)}{\dot{Z}_{\text{S}} + \dot{Z}_{\text{L1}}^1 + \dot{Z}_{\text{Gek2}}^1} = \frac{(7,05 + j19,81)((0,02 + j0,11) + (0,309 + j0,309))}{(0,02 + j0,11) + (0,309 + j0,309) + (7,05 + j19,81)} \approx 0,318 + j0,418 \Omega.$$

TS rezultējošās aizvietošanas shēmas summārās pretestības iegūšanai jāskaita virknes slēgumā esošās pretestības zaram SL1 + AD + T1 un apvienotajam ģeneratora un sistēmas puses zaram G + S:

$$\dot{Z}_{\text{L}\Sigma}^1 = \dot{Z}_{\text{T1ek}}^1 + \dot{Z}_{\text{GS}}^1 = (48,916 + j27,310) + (0,318 + j0,418) = 49,234 + j27,722 \Omega.$$

Analoģiski jānosaka PS rezultējošās aizvietošanas shēmas summārā pretestība:

Sākumā tiks noteikta T1, SL1 un AD zaru ekvivalentā PS pretestība:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{\text{T1ek}}^2 &= \dot{Z}_{\text{T1}} + \frac{\dot{Z}_{\text{SL1}}\dot{Z}_{\text{ADek}}^2}{\dot{Z}_{\text{SL1}} + \dot{Z}_{\text{ADek}}^2} = (0,38 + j2,57) + \frac{(155,45 + j66,33)(6,84 + j15,58)}{(155,45 + j66,33) + (6,84 + j15,58)} \approx \\ &\approx 7,654 + j16,618 \Omega. \end{aligned}$$

Paralēlo zaru G + SL2 ekvivalentās PS pretestības aprēķins:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{\text{Gek}}^2 &= \frac{\dot{Z}_{\text{G}}^2(\dot{Z}_{\text{T2}} + \dot{Z}_{\text{SL2}})}{\dot{Z}_{\text{T2}} + \dot{Z}_{\text{SL2}} + \dot{Z}_{\text{G}}^2} = \frac{(0,59 + j2,13)((0,38 + j2,57) + (43,66 + j22,37))}{(0,38 + j2,57) + (43,66 + j22,37) + (0,59 + j2,13)} \approx \\ &\approx 0,634 + j2,047 \Omega. \end{aligned}$$

Līnijas L2 pretestības un G + SL2 ekvivalentās pretestības virknes slēguma kopējā pretestība:

$$\dot{Z}_{\text{Gek2}}^2 = \dot{Z}_{\text{Gek}}^2 + \dot{Z}_{\text{L2}}^1 = (0,634 + j2,047) + (0,76 + j1,81) = 1,394 + j3,857 \Omega.$$

Paralēlo zaru S + L1 un G + SL2 + L2 ekvivalentās pretestības noteikšana:

$$\dot{Z}_{\text{GS}}^2 = \frac{\dot{Z}_{\text{Gek2}}^2(\dot{Z}_{\text{S}} + \dot{Z}_{\text{L1}}^1)}{\dot{Z}_{\text{S}} + \dot{Z}_{\text{L1}}^1 + \dot{Z}_{\text{Gek2}}^2} = \frac{(1,394 + j3,857)((0,02 + j0,11) + (0,309 + j0,309))}{(0,02 + j0,11) + (0,309 + j0,309) + (1,394 + j3,857)} \approx 0,279 + j0,383 \Omega.$$

PS rezultējošās aizvietošanas shēmas summārās pretestības iegūšanai jāskaita virknes slēgumā esošās pretestības zaram SL1 + AD + T1 un apvienotajam ģeneratora un sistēmas puses zaram G + S:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{\text{L}\Sigma}^2 &= \dot{Z}_{\text{T1ek}}^2 + \dot{Z}_{\text{GS}}^2 = (7,654 + j16,618) + (0,279 + j0,383) = \\ &= 7,933 + j17,001 \Omega. \end{aligned}$$

Tā kā, neievērojot NS komponentes, tiek pieņemts $\dot{Z}_{\text{L}\Sigma}^0 = \infty \Omega$, nav iespējams uzreiz izmantot teorijā parādīto formulu (7.32.), samainot aprēķina fāzes apzīmējumu, tādēļ

jāmodificē robežnosacījumi un no jauna jāizsaka aprēķina fāzes strāvas simetrisko komponentu formulas. Jaunie robežnosacījumi B fāzes pārrāvumam bez pārejas pretestībām A un C fāzēs būs šādi:

$$\begin{cases} i_{LB} = i_{LB}^1 + i_{LB}^2 = 0 \text{ A.} \\ \Delta \dot{U}_{LA} = 0 \text{ V.} \\ \Delta \dot{U}_{LC} = 0 \text{ V.} \end{cases}$$

No parādīto robežnosacījumu otrā un trešā vienādojuma, izsakot fāžu spriegumu kritumus ar to TS un PS komponentēm, iespējams iegūt, ka

$$\Delta \dot{U}_{LA} = \dot{a} \Delta \dot{U}_{LB}^1 + \dot{a}^2 \Delta \dot{U}_{LB}^2 = 0 \text{ V,}$$

$$\Delta \dot{U}_{LC} = \dot{a}^2 \Delta \dot{U}_{LB}^1 + \dot{a} \Delta \dot{U}_{LB}^2 = 0 \text{ V.}$$

Pielīdzinot abas izteiksmes, var iegūt vienādojumu:

$$(\dot{a} - \dot{a}^2) \Delta \dot{U}_{LB}^1 + (\dot{a}^2 - \dot{a}) \Delta \dot{U}_{LB}^2 = j\sqrt{3} \Delta \dot{U}_{LB}^1 - j\sqrt{3} \Delta \dot{U}_{LB}^2 = 0 \text{ V,}$$

kas parāda, ka šādā gadījumā joprojām aprēķina fāzes sprieguma krituma TS un PS komponentes būs savstarpēji vienādas:

$$\Delta \dot{U}_{LB}^1 = \Delta \dot{U}_{LB}^2 = \Delta \dot{U}_{LB} / 2.$$

Savukārt no pārveidoto robežnosacījumu pirmā vienādojuma viegli pierādīt, ka $i_L^1 = -i_L^2$. Iespējams modificēt arī no rezultējošajām secību aizvietošanas shēmām iegūtos vienādojumus:

$$\begin{cases} \Delta \dot{U}_L^1 = \dot{E}_{L\Sigma}^1 - \dot{Z}_{L\Sigma}^1 i_L^1. \\ \Delta \dot{U}_L^2 = 0 - \dot{Z}_{L\Sigma}^2 i_L^2. \end{cases}$$

Šos vienādojumus ievietojot izteiksmē $\Delta \dot{U}_{LB}^1 = \Delta \dot{U}_{LB}^2$, var iegūt vienādojumu:

$$\dot{E}_{L\Sigma}^1 - \dot{Z}_{L\Sigma}^1 i_L^1 = 0 - \dot{Z}_{L\Sigma}^2 i_L^2,$$

kurā ievietojot $i_L^1 = -i_L^2$ viegli izteikt aprēķina fāzes strāvas TS komponentes aprēķina formulu:

$$i_{LB}^1 = -i_{LB}^2 = \dot{E}_{LB\Sigma}^1 / (\dot{Z}_{L\Sigma}^1 + \dot{Z}_{L\Sigma}^2).$$

Tagad ar šo formulu var aprēķināt B fāzes strāvas TS un PS komponentu vērtības:

$$i_{LB}^1 = -i_{LB}^2 = \frac{\dot{E}_{LB\Sigma}^1}{\dot{Z}_{L\Sigma}^1 + \dot{Z}_{L\Sigma}^2} = \frac{(-2,98 - j5,35)}{(49,234 + j27,722) + (7,933 + j17,001)} \approx -0,078 - j0,033 \text{ kA.}$$

Iegūtās garennesimetrijas aprēķina fāzes strāvas simetriskās komponentes šajā piemērā jau atbilst tām, kuras nomērītu QF8 aizsardzība ($i_{QF8}^1 = i_{LB}^1$, $i_{QF8}^2 = i_{LB}^2$). Nākamais solis ir noteikt īpašās jeb aprēķina fāzes sprieguma krituma simetriskās komponentes:

$$\begin{cases} \Delta \dot{U}_{LB}^1 = \dot{E}_{LB\Sigma}^1 - \dot{Z}_{L\Sigma}^1 i_{LB}^1 = \\ \Delta \dot{U}_{LB}^2 = 0 - \dot{Z}_{L\Sigma}^2 i_{LB}^2 = \\ = (-2,98 - j5,35) - (49,234 + j27,722)(-0,078 - j0,033) \approx -0,059 - j1,581 \text{ kV.} \\ = 0 - (7,933 + j17,001)(0,078 + j0,033) \approx -0,059 - j1,581 \text{ kV.} \end{cases}$$

Tagad iespējams noteikt punkta M sprieguma TS un PS komponentu vērtības, kuras ir vienādas ar spriegumu kritumiem apvienotā T1 + AD + SL1 zara ekvivalentajās pretestībās \dot{Z}_{T1ek}^1 un \dot{Z}_{T1ek}^2 :

$$\dot{U}_M^1 = \dot{Z}_{T1ek}^1 \dot{I}_{LB}^1 = (48,916 + j27,310)(-0,078 - j0,033) \approx -2,906 - j3,726 \text{ kV},$$

$$\dot{U}_M^2 = \dot{Z}_{T1ek}^2 \dot{I}_{LB}^2 = (7,654 + j16,618)(0,078 + j0,033) \approx 0,050 + j1,542 \text{ kV}.$$

Šiem TS un PS aizvietošanas shēmu spriegumiem pieskaitot garensimetrijas spriegumu krituma simetriskās komponentes, iegūstamas kopņu B2, kuru spriegumu izmanto arī QF8 aizsardzība, aprēķina fāzes sprieguma simetriskās komponentes (šajā piemērā VS puses parametru noteikšanai pagriezieni nav jāveic, jo garensimetrija radās pirms T1 trīsstūrī saslēgtā tinuma):

$$\dot{U}_{B2}^1 = \dot{U}_M^1 + \Delta \dot{U}_{LB}^1 = (-2,906 - j3,726) + (-0,59 - j1,581) \approx -2,965 - j5,308 \text{ kV},$$

$$\dot{U}_{B2}^2 = \dot{U}_M^2 + \Delta \dot{U}_{LB}^2 = (0,050 + j1,542) + (-0,059 - j1,581) \approx -0,009 - j0,039 \text{ kV}.$$

Turpinājumā tiks noteiktas kopņu B4 aprēķina fāzes sprieguma TS un PS komponentu vērtības pirms pagriezienu ievērošanas, pagaidām tās saglabājot reducētas pie 10 kV sprieguma pakāpes:

$$\dot{U}_{B4}^1 = \dot{U}_M^1 - \dot{I}_{LB}^1 \dot{Z}_{T1} = (-2,906 - j3,726) - (-0,078 - j0,033)(0,38 + j2,57) \approx -2,961 - j3,514 \text{ kV},$$

$$\dot{U}_{B4}^2 = \dot{U}_M^2 - \dot{I}_{LB}^2 \dot{Z}_{T1} = (0,050 + j1,542) - (0,078 + j0,033)(0,38 + j2,57) \approx 0,105 + j1,330 \text{ kV}.$$

Lai noteiktu AD aprēķina fāzes strāvas un sprieguma faktiskās simetriskās komponentes pie 0,4 kV sprieguma pakāpes, iespējams izvēlēties divus paņēmienus:

- veikt transformatora T1 radītos pagriezienus un amplitūdas izmaiņas, iegūstot kopņu B4 faktiskās sprieguma simetriskās komponentes, tad noteikt AD ekvivalentās pretestības pie 0,42 kV (vidējā nominālā) sprieguma un beigās izrēķināt aprēķina fāzes strāvas simetriskās komponentes, neveicot tālākus pagriezienus;
- aprēķināt AD strāvas, izmantojot pretestību vērtības, kas noteiktas pie 10 kV sprieguma pakāpes, un kopņu B4 sprieguma komponentu vērtības pirms pagriezienu veikšanas. Tad veikt amplitūdu transformācijas un pagriezienus gan iegūtajam sprieguma, gan strāvas simetriskajām komponentēm.

Šajā piemērā ir izmantots otrais paņēmiens:

$$\dot{I}_{AD10kV}^1 = \dot{U}_{B4}^1 / \dot{Z}_{ADek}^1 = (-2,961 - j3,514) / (70,29 + j38,74) \approx -0,053 - j0,021 \text{ kA},$$

$$\dot{I}_{AD10kV}^2 = \dot{U}_{B4}^2 / \dot{Z}_{ADek}^2 = (0,105 + j1,330) / (6,84 + j15,58) \approx 0,074 + j0,026 \text{ kA}.$$

T1 transformācijas koeficients pārejai no 10 kV uz 0,4 kV pusi $k_T = 10/0,4 = 25$. Šajā gadījumā jāveic arī parametru pārrēķins no transformatora ar slēgumu shēmu un grupu Y_0/Δ -11 trīsstūrī slēgtā tinuma uz zvaigznē savienotā tinuma pusi, tādēļ šoreiz TS simetriskās komponentes būs jāpagriež par -30° un PS komponentes par 30° , kas kopā ar amplitūdu transformāciju dod šādas AD aizsardzības novērojamās aprēķina fāzes simetrisko komponentu vērtības:

$$\begin{aligned}
\dot{U}_{AD0,4kV}^1 &= (\dot{U}_{B4}^1/k_T)e^{-j30^\circ} = (-2,961 - j3,514)(0,866 - j0,5)/25 \approx \\
&\approx -0,173 - j0,063 \text{ kV} \approx -172,8 - j62,5 \text{ V}, \\
\dot{U}_{AD0,4kV}^2 &= (\dot{U}_{B4}^2/k_T)e^{j30^\circ} = (0,105 + j1,330)(0,866 + j0,5)/25 \approx \\
&\approx -0,023 + j0,048 \text{ kV} \approx -23,0 + j48,2 \text{ V}, \\
i_{AD0,4kV}^1 &= k_T i_{AD10kV}^1 e^{-j30^\circ} = 25(-0,053 - j0,021)(0,866 - j0,5) \approx \\
&\approx -1,414 + j0,223 \text{ kA} \approx -1414,0 + j223,3 \text{ A}, \\
i_{AD0,4kV}^2 &= k_T i_{AD10kV}^2 e^{j30^\circ} = 25(0,074 + j0,026)(0,866 + j0,5) \approx \\
&\approx 1,281 + j1,484 \text{ kA} \approx 1280,9 + j1484,2 \text{ A}.
\end{aligned}$$

Nākamais solis ir noteikt QF8 un AD (AD NS komponenti šajā piemērā var ignorēt, jo tā noslēgsies T1 trīsstūrī saslēgtā tinuma un savienojumu kapacitātēs uz zemi un nerasniegs ZS pusi) aizsardzību fiksētos fāžu spriegumus un strāvas no noteiktajām B fāzes simetriskajām komponentēm:

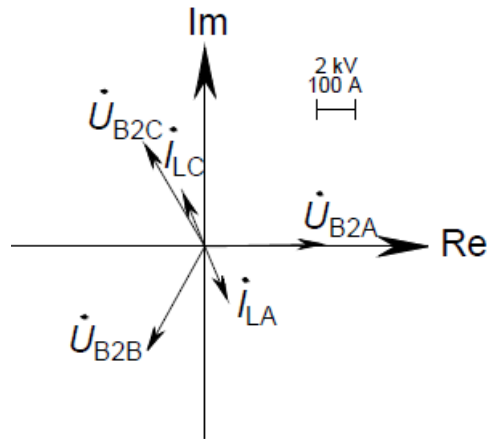
$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \dot{U}_{B2A} \\ \dot{U}_{B2B} \\ \dot{U}_{B2C} \end{bmatrix} &= k_B \begin{bmatrix} \dot{U}_{B2}^1 \\ \dot{U}_{B2}^2 \\ \dot{U}_{B2}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2,965 - j5,308 \\ -0,009 - j0,039 \\ 0 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 6,050 + j0,114 \\ -2,974 - j5,347 \\ -3,076 + j5,233 \end{bmatrix} \approx \\
&\approx \begin{bmatrix} 6,051e^{j1,08^\circ} \\ 6,118e^{-j119,08^\circ} \\ 6,070e^{j120,45^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} i_{QF8A} \\ i_{QF8B} \\ i_{QF8C} \end{bmatrix} &= k_B \begin{bmatrix} i_{QF8}^1 \\ i_{QF8}^2 \\ i_{QF8}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0,078 - j0,033 \\ 0,078 + j0,033 \\ 0 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0,057 - j0,135 \\ 0 \\ -0,057 + j0,135 \end{bmatrix} \approx \\
&\approx \begin{bmatrix} 0,146e^{-j67,12^\circ} \\ 0 \\ 0,146e^{j112,88^\circ} \end{bmatrix} \text{ kA},
\end{aligned}$$

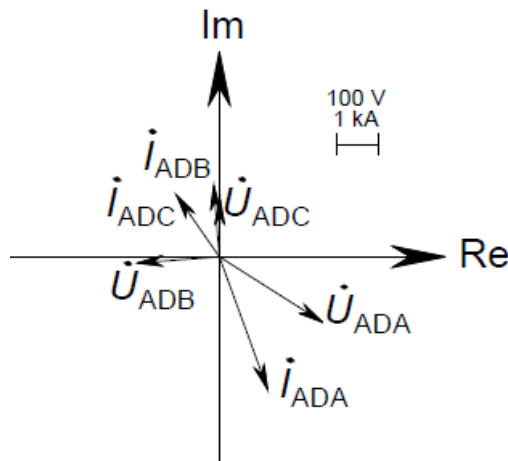
$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \dot{U}_{ADA} \\ \dot{U}_{ADB} \\ \dot{U}_{ADC} \end{bmatrix} &= k_B \begin{bmatrix} \dot{U}_{AD0,4kV}^1 \\ \dot{U}_{AD0,4kV}^2 \\ \dot{U}_{AD0,4kV}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -172,8 - j62,5 \\ -23,0 + j48,2 \\ 0 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 193,8 - j122,61 \\ -195,8 - j14,4 \\ 2,1 + j137,0 \end{bmatrix} \approx \\
&\approx \begin{bmatrix} 229,3e^{-j32,32^\circ} \\ 196,3e^{-j175,81^\circ} \\ 137,0e^{j89,14^\circ} \end{bmatrix} \text{ V},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} i_{ADA} \\ i_{ADB} \\ i_{ADC} \end{bmatrix} &= k_B \begin{bmatrix} i_{AD0,4kV}^1 \\ i_{AD0,4kV}^2 \\ i_{AD0,4kV}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1414,0 + j223,3 \\ 1280,9 + j1484,2 \\ 0 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1158,4 - j3187,4 \\ -132,9 + j1707,4 \\ -1025,5 + j1480,0 \end{bmatrix} \approx \\
&\approx \begin{bmatrix} 3391,4e^{-j70,03^\circ} \\ 1712,6e^{j94,45^\circ} \\ 1800,5e^{j124,72^\circ} \end{bmatrix} \text{ A}.
\end{aligned}$$

Atbilstoši aprēķinātajiem fāžu spriegumiem un strāvām, iespējams uzzīmēt vektoru diagrammas tīkla 10 kV puses bojātajam jaudas slēdzim piesaistītajai aizsardzībai jeb nosacīti BV (7.16. att.) un AD aizsardzībai 0,4 kV pusē (7.17. att.).



7.16. att. QF8 piesaistītās aizsardzības fiksēto fāžu spriegumu un strāvu vektoru diagramma, neņemot vērā NS komponenti, rodoties pirmā aprēķinu piemēru tīkla jaudas slēdža QF8 vienfāzes pārrāvumam.



7.17. att. Fāžu spriegumu un strāvu vektoru diagramma dzinēju ekvivalenta AD aizsardzībai, rodoties pirmā aprēķinu piemēru tīkla jaudas slēdža QF8 vienfāzes pārrāvumam.

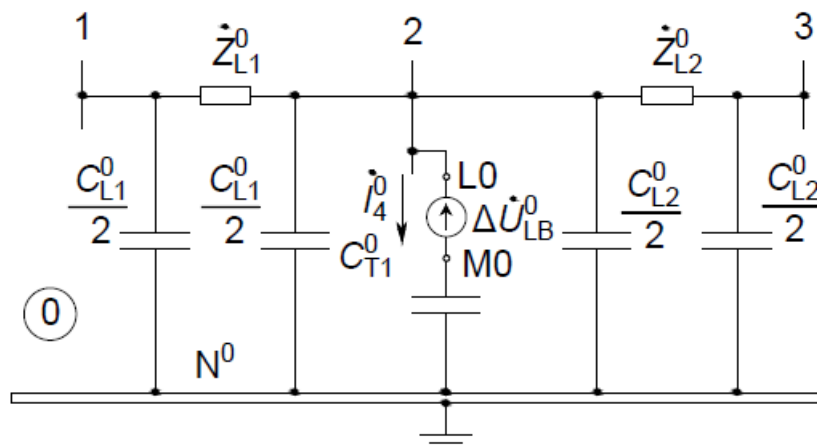
Iegūto rezultātu analīzei slodzes režīmam aprēķināto AD strāvu iespējams reducēt uz 0,4 kV sprieguma pakāpi:

$$\dot{I}_{AD0,4kV} = k_T \dot{I}_{AD} \approx 25(0,043 - j0,082) = 1,075 + j2,050 \text{ kA} \approx 2314,8e^{j62,33^\circ} \text{ A.}$$

Dalot fāžu strāvas stiprumus pārrāvuma režīmā ar slodzes strāvas stiprumu, iegūstams, ka pārrāvuma fāžu strāvas ir 146,5 %, 74,0 % un 77,8 % no slodzes režīma vērtības, kas ļauj secināt, ka iespējamība nostrādāt bojājumiem paredzētai MSA ir maza [16], ja tā neiekļauj vienā aizsardzības ierīcē arī pārslodzes aizsardzību, kuras nostrāde vēl ir iespējama pie 120–190 % no nominālā strāvas stipruma [91], bet pirms tās nostrādes iespējams vērā ņemams laika kavējums. Vienlaikus jāatceras, ka šī pārrāvuma laikā AD statorā plūst ievērojama PS strāva (šajā piemērā – $\dot{I}_{AD}^2 / \dot{I}_{AD}^1 \approx 1,37$ r. v.), kuras ievērojamo lielumu attiecībā pret TS komponenti iespējams izskaidrot ar to, ka pārrāvuma elektriskā tuvuma dēļ uz AD kopnēm novērojama ar TS salīdzināma PS komponente un slodzes režīmā PS ekvivalentā pretestība ir daudz mazāka nekā TS ekvivalentā pretestība. Turklāt no literatūras zināms, ka šo strāvas simetrisko

komponenšu attiecību var izteikt kā sprieguma komponenšu attiecības $\dot{U}_{AD}^2/\dot{U}_{AD}^1$ un attiecības starp palaišanas un slodzes režīma strāvu (tipiski vienādu ar 5–8 r. v.) reizinājumu, kas pastiprina nesimetrijas ietekmi [71]. Šī ievērojamā strāvas PS komponente rada rotoram pretēji rotējošu elektromagnētisko lauku. Slīde rotoram pret šādu lauku ir $2 - 0,05 = 1,95$ r. v., un rotorā tiek inducēta ievērojama PS strāva, kas var ātri pārkarsēt rotoru un radīt neatgriezeniskus bojājumus. Zināms, ka pat 3,5 % liela sprieguma nesimetrija ($\dot{U}_{AD}^2/\dot{U}_{AD}^1 = 0,035$ r. v.), var izsaukt AD temperatūras pieaugumu vismaz par 25 % [16]. Tādēļ [91] parādīts AD aizsardzības relejs, kura nostrāde notiek, fāžu spriegumu sistēmā parādoties PS komponentes īpatsvaram 5–10 % atkarībā no iestatījuma. Konkrētajā piemērā sprieguma PS komponente ir aptuveni vienāda ar 29 % no TS komponentes, kas, saprotams, ir bīstami analizētajiem AD. Kopumā redzams, ka AD fāžu strāvas šādos gadījumos var būt ļoti tuvas MSA iestatījumam vai nepārsniegt to un fāžu spriegumi arī var saglabāt pietiekami augstas vērtības, salīdzinot ar īsslēgumiem (šeit – 99,7 %, 85,4 % un 59,6 % no fāzes nomināla jeb 230 V), bet AD var tikt neatgriezeniski bojāti PS strāvas dēļ. Minētā riska novēršanai ieteicams lietot strāvas un/vai jau minēto sprieguma nesimetrijas aizsardzību, kuras kā funkcijas bieži iekļauj arī AD frekvenču pārveidotāju vadības loģikā.

Turpinājumā aplūkosim šī bojājuma aprēķinu, ievērojot strāvu un spriegumu NS komponentes. Atbilstoši teorijai, tā kā garennesimetrija ir radusies blakus transformatora T1 tinumam ar trīsstūra slēguma shēmu, NS strāvai noslēgšanās ceļam nevajadzētu pastāvēt. Tomēr realitātē pat T1 trīsstūra tinumam un savienojumiem piemīt kapacitātes uz zemi, kas kopā ar līniju L1 un L2 kapacitātēm dod iespēju noslēgtiesniecīgai NS strāvai. Ņemot vērā, ka konkrētajā piemērā pieņemts, ka neitrāli veidojošais transformators TN ir atslēgts (tīkls nonāk izolētas neitrāles režīmā), iespējams sastādīt 7.18. attēlā redzamo vienkāršoto NS aizvietošanas shēmu. Kā redzams NS aizvietošanas shēmā, šī ilustratīvā aprēķina vienkāršošanai netiks aplūkotas G statora un T2 AS tinuma potenciālās vadītspējas uz zemi.



7.18. att. Pirmā aprēķinu piemēru tīkla QF8 vienfāzes pārrāvuma NS aizvietošanas shēma.

Šajā aprēķinā pieņemsim, ka transformatora T1 trīsstūra tinuma un tā savienojumu ar kopnēm B2 kopējā NS kapacitāte uz vienu fāzi ir $0,5 \mu\text{F} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ F}$ (salīdzināma ar L1 un L2 NS kapacitātēm). Kapacitātes var aizvietot ar tām atbilstošām kapacitatīvām pretestībām (līnijām uzreiz ievērots kapacitāšu dalījums uz pusēm):

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{CT1}^0 &= 1/j\omega C_{T1}^0 = 1/j(100\pi \cdot 5 \cdot 10^{-7}) \approx 0 - j6366,2 \Omega, \\ \dot{Z}_{CL1}^0 &= 2/j\omega C_{L1}^0 = 2/j(100\pi \cdot 7,09 \cdot 10^{-7}) \approx 0 - j8979,1 \Omega, \\ \dot{Z}_{CL2}^0 &= 2/j\omega C_{L2}^0 = 2/j(100\pi \cdot 0,21 \cdot 10^{-7}) \approx 0 - j303150 \Omega.\end{aligned}$$

Tālāk iespējams noteikt ekvivalentās NS pretestības L1 un L2 Π veida aizvietošanas shēmām:

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{CL1ek}^0 &= \dot{Z}_{CL1}^0 + \dot{Z}_{L1}^0 = (0 - j8979,1) + (1,338 + j0,51) \approx 1,3 - j8978,6 \Omega, \\ \dot{Z}_{L1ek}^0 &= \frac{\dot{Z}_{CL1ek}^0 \dot{Z}_{CL1}^0}{\dot{Z}_{CL1ek}^0 + \dot{Z}_{CL1}^0} = \frac{(1,3 - j8978,6)(0 - j8979,1)}{(1,3 - j8978,6) + (0 - j8979,1)} \approx 0,3 - j4489,4 \Omega, \\ \dot{Z}_{CL2ek}^0 &= \dot{Z}_{CL2}^0 + \dot{Z}_{L2}^0 = (0 - j303150) + (1,5 + j7,47) \approx 1,5 - j303142,5 \Omega, \\ \dot{Z}_{L2ek}^0 &= \frac{\dot{Z}_{CL2ek}^0 \dot{Z}_{CL2}^0}{\dot{Z}_{CL2ek}^0 + \dot{Z}_{CL2}^0} = \frac{(1,5 - j303142,5)(0 - j303150)}{(1,5 - j303142,5) + (0 - j303150)} \approx 0,4 - j151570 \Omega.\end{aligned}$$

Abu paralēlo EPL zaru ekvivalentā pretestība:

$$\dot{Z}_{L1L2ek}^0 = \frac{\dot{Z}_{L1ek}^0 \dot{Z}_{L2ek}^0}{\dot{Z}_{L1ek}^0 + \dot{Z}_{L2ek}^0} = \frac{(0,3 - j4489,4)(0,4 - j151570)}{(0,3 - j4489,4) + (0,4 - j151570)} \approx 0,3 - j4360,3 \Omega.$$

Rezultējošās NS aizvietošanas shēmas summārās pretestības noteikšanai atliek saskaitīt abu līniju kopējo ekvivalento un T1 ekvivalento NS pretestību:

$$\dot{Z}_{L\Sigma}^0 = \dot{Z}_{L1L2ek}^0 + \dot{Z}_{CT1}^0 = (0 - j6366,2) + (0,3 - j4360,3) = 0,3 - j10726,5 \Omega.$$

Redzams, ka $\dot{Z}_{L\Sigma}^0 \gg \dot{Z}_{L\Sigma}^1$ un $\dot{Z}_{L\Sigma}^0 \gg \dot{Z}_{L\Sigma}^2$, bet tomēr $\dot{Z}_{L\Sigma}^0 \neq \infty \Omega$. Tālāk, izmantojot teorijā iegūtās formulas, iespējams no jauna aprēķināt pārrāvuma aprēķina fāzes strāvas simetriskās komponentes:

$$\begin{aligned}\dot{I}_{LB}^1 &= \frac{\dot{E}_{LB\Sigma}^1}{\dot{Z}_{L\Sigma}^1 + [\dot{Z}_{L\Sigma}^2 \dot{Z}_{L\Sigma}^0 / (\dot{Z}_{L\Sigma}^2 + \dot{Z}_{L\Sigma}^0)]} = \\ &\approx \frac{(-2,98 - j5,35)}{(49,23 + j27,72) + [(7,93 + j17,00)(0,3 - j10726,5) / [(7,93 + j17,00) + (0,3 - j10726,5)]]} \approx \\ &\approx -0,078 - j0,033 \text{ kA.} \\ \dot{I}_{LB}^2 &= -\dot{I}_{LB}^1 \frac{\dot{Z}_{L\Sigma}^0}{\dot{Z}_{L\Sigma}^2 + \dot{Z}_{L\Sigma}^0} = -(-0,078 - j0,033) \frac{(0,3 - j10726,5)}{(7,93 + j17,00) + (0,3 - j10726,5)} \approx \\ &\approx 0,078 + j0,033 \text{ kA.} \\ \dot{I}_{LB}^0 &= -\dot{I}_{LB}^1 \frac{\dot{Z}_{L\Sigma}^2}{\dot{Z}_{L\Sigma}^2 + \dot{Z}_{L\Sigma}^0} = -(-0,078 - j0,033) \frac{(7,93 + j17,00)}{(7,93 + j17,00) + (0,3 - j10726,5)} \approx \\ &\approx -0,000148 + j0,000006 \text{ kA.}\end{aligned}$$

Kā to varēja prognozēt, atbilstoši teorijai B fāzes strāvas NS komponente ir necīga, tomēr tagad to kopā ar TS un PS komponentēm var izmantot B fāzes spriegumu krituma simetrisko komponentu noteikšanai:

$$\begin{cases} \Delta \dot{U}_{LB}^1 = \dot{E}_{LB\Sigma}^1 - \dot{Z}_{L\Sigma}^1 i_{LB}^1 = \\ \Delta \dot{U}_{LB}^2 = 0 - \dot{Z}_{L\Sigma}^2 i_{LB}^2 = \\ \Delta \dot{U}_{LB}^0 = 0 - \dot{Z}_{L\Sigma}^0 i_{LB}^0 = \end{cases}$$

$$= (-2,98 - j5,35) - (49,234 + j27,722)(-0,078 - j0,033) \approx -0,060 - j1,583 \text{ kV.}$$

$$= 0 - (7,933 + j17,001)(0,078 + j0,033) \approx -0,060 - j1,583 \text{ kV.}$$

$$= 0 - (0,3 - j10726,5)(-0,000148 + j0,000006) \approx -0,060 - j1,583 \text{ kV.}$$

Turpinājumā var pārrēķināt punkta M (starp T1 un pārrāvumu) B fāzes sprieguma simetriskās komponentes:

$$\dot{U}_M^1 = \dot{Z}_{T1ek}^1 i_{LB}^1 \approx -2,905 - j3,725 \text{ kV,}$$

$$\dot{U}_M^2 = \dot{Z}_{T1ek}^2 i_{LB}^2 \approx 0,051 + j1,544 \text{ kV,}$$

$$\dot{U}_M^0 = \dot{Z}_{CT1}^0 i_{LB}^0 = (0 - j6366,2)(-0,000148 + j0,000006) \approx 0,036 + j0,940 \text{ kV.}$$

Šīs punktam M noteiktās vērtības iespējams izmantot, lai pārrēķinātu kopņu B2 B fāzes sprieguma simetriskās komponentes:

$$\dot{U}_{B2}^1 = \dot{U}_M^1 + \Delta \dot{U}_{LB}^1 = (-2,905 - j3,725) + (-0,060 - j1,583) \approx -2,965 - j5,308 \text{ kV,}$$

$$\dot{U}_{B2}^2 = \dot{U}_M^2 + \Delta \dot{U}_{LB}^2 = (0,051 + j1,544) + (-0,060 - j1,583) \approx -0,009 - j0,039 \text{ kV,}$$

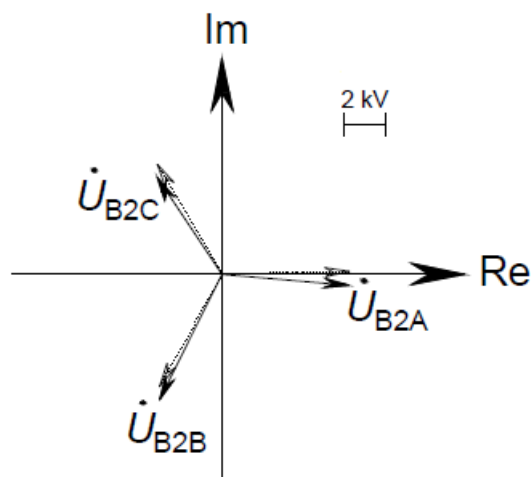
$$\dot{U}_{B2}^0 = \dot{U}_M^0 + \Delta \dot{U}_{LB}^0 = (0,036 + j0,940) + (-0,060 - j1,583) \approx -0,025 - j0,644 \text{ kV.}$$

Iegūtie rezultāti jau parāda, ka, neskatoties uzniecīgo strāvas NS komponenti, šajā piemērā B2 sprieguma NS komponente veido aptuveni 19,9 % no TS komponentes uz T1 trīsstūrī savienotā tinuma izvadiem un 10,6 % no TS komponentes uz kopnēm B2. Tagad iespējams pārrēķināt arī kopņu B2 fāžu spriegumus (QF8 aizsardzības nomērītajām fāžu strāvām izmaiņas būs nenozīmīgas):

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{B2A} \\ \dot{U}_{B2B} \\ \dot{U}_{B2C} \end{bmatrix} = k_B \begin{bmatrix} \dot{U}_{B2}^1 \\ \dot{U}_{B2}^2 \\ \dot{U}_{B2}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2,965 - j5,308 \\ -0,009 - j0,039 \\ -0,025 - j0,644 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 6,025 - j0,530 \\ -2,999 - j5,990 \\ -3,100 + j4,590 \end{bmatrix} \approx$$

$$\approx \begin{bmatrix} 6,049e^{-j5,03^\circ} \\ 6,699e^{-j116,59^\circ} \\ 5,539e^{j124,04^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV.}$$

Šie rezultāti ļauj pārzīmēt 7.16. attēlā redzamo spriegumu vektoru diagrammu (7.19. att.).



7.19. att. QF8 aizsardzības fiksēto fāžu spriegumu diagramma, rodoties pirmā aprēķinu piemēru tīkla jaudas slēdža QF8 vienfāzes pārrāvumam, ņemot vērā NS komponenti (melnās līnijas) un ignorējot to (punktotās līnijas ar neaizkrāsotajām bultām).

Iegūtie fāžu spriegumi parāda, ka NS komponentes ievērošana radījusi ne tikai B2 kopņu fāžu spriegumu vektoru nobīdes par 2,5–6,1°, bet arī moduļu atšķirības par 8,7 % B fāzē un 9,6 % C fāzē, neskatoties uz kopņu B2 elektrisko tuvumu sistēmai S. 7.19. attēlā redzamā vektoru diagramma parāda, ka šīs atšķirības padara fāžu spriegumu sistēmu nesimetriskāku. Aprēķina kļūdas, ignorējot NS komponentes, protams, strauji sarūk, samazinoties T1 vadītspējas kapacitātei salīdzinājumā L1 un L2 kapacitātēm (tādā gadījumā lielāko daļu no NS sprieguma veido sprieguma kritums $\dot{Z}_{CT1}^0 \dot{I}_{LB}^0$), bet jāatzīmē, ka kopņu sprieguma NS komponente sanākusi lielāka par PS komponenti, kas liecina, ka šajā piemērā 10 kV pusē NS komponenti ir svarīgāk ņemt vērā nekā PS komponenti. Pat ja patiesā T1 un savienojumu NS kapacitāte ir daudz mazāka un tādēļ konkrētajā scenārijā patiesās kļūdas nebūtu tik izteiktas, no parādītā aprēķina viegli redzēt, ka, rodoties šādam pārrāvumam līnijā L1 vai L2, vismaz vienā no pārrāvuma pusēm (atkarībā no to vadītspēju ekvivalento pretestību attiecības) būtu novērojama būtiska sprieguma NS komponente.

Ņemot vērā, ka jau ir aprēķināti rezultējošo secību aizvietošanas shēmu ekvivalenti, iespējams pārbaudīt šī pārrēķina rezultātu, izmēģinot arī vispārīgo garennesimetrijas risinājumu matricu formā. Aizvietojot pārrāvumu ar galīgu pretestību $\dot{Z}_{LB} = 5 \text{ M}\Omega \gg \dot{Z}_{L\Sigma}^0$, iespējams iegūt koeficientu matricu A_L atbilstoši (7.12.) modificētajam pierakstam:

$$A_L = (1/3) \begin{bmatrix} \dot{Z}_{LABC1} + 3\dot{Z}_{L\Sigma}^1 & \dot{Z}_{LABC3} & \dot{Z}_{LABC2} \\ \dot{Z}_{LABC2} & \dot{Z}_{LABC1} + 3\dot{Z}_{L\Sigma}^2 & \dot{Z}_{LABC3} \\ \dot{Z}_{LABC3} & \dot{Z}_{LABC2} & \dot{Z}_{LABC1} + 3\dot{Z}_{L\Sigma}^0 \end{bmatrix} \approx$$

$$\approx \begin{bmatrix} 1,667 + j0 & -0,833 - j1,443 & -0,833 + j1,443 \\ -0,833 + j1,443 & 1,667 + j0 & -0,833 - j1,443 \\ -0,833 - j1,443 & -0,833 + j1,443 & 1,667 - j0,011 \end{bmatrix} \text{ M}\Omega.$$

Rezultējošo secību aizvietošanas shēmu summāro A fāzes EDS vektors ir

$$E_L = \begin{bmatrix} \dot{E}_{LA\Sigma}^1 \\ \dot{E}_{LA\Sigma}^2 \\ \dot{E}_{LA\Sigma}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6,121 + j0,098 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ kV.}$$

Atrisinot vienādojumu sistēmu (7.9.) ar *MATLAB*® iebūvēto LVS risināšanas funkciju, iegūstamas šādas A fāzes strāvas simetriskās komponentes BV:

$$I_{LA}^S = \begin{bmatrix} \dot{I}_{LA}^1 \\ \dot{I}_{LA}^2 \\ \dot{I}_{LA}^0 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0,067 - j0,051 \\ 0,011 - j0,084 \\ -0,000148 + j0,000006 \end{bmatrix} \text{ kA.}$$

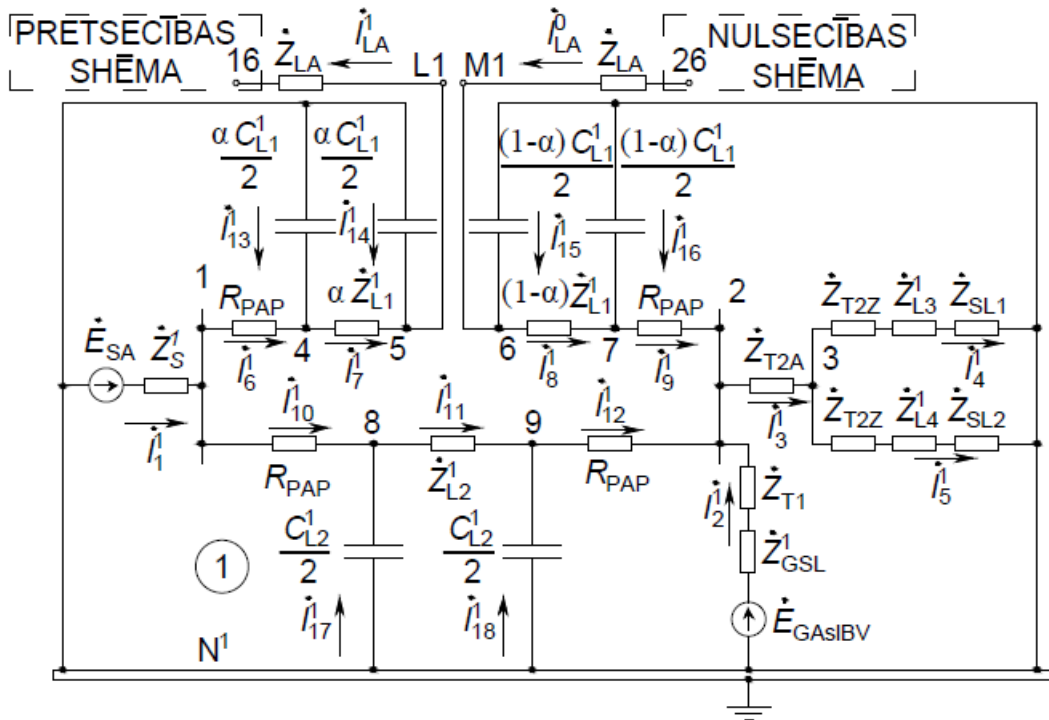
B fāzes simetriskās komponentes salīdzināšanai ar iepriekšējiem rezultātiem būs šādas:

$$I_{LB}^S = \begin{bmatrix} \dot{I}_{LB}^1 \\ \dot{I}_{LB}^2 \\ \dot{I}_{LB}^0 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} (0,067 - j0,051)\dot{a}^2 \\ (0,011 - j0,084)\dot{a} \\ -0,000148 + j0,000006 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} -0,078 - j0,033 \\ 0,078 + j0,033 \\ -0,000148 + j0,000006 \end{bmatrix} \text{ kA.}$$

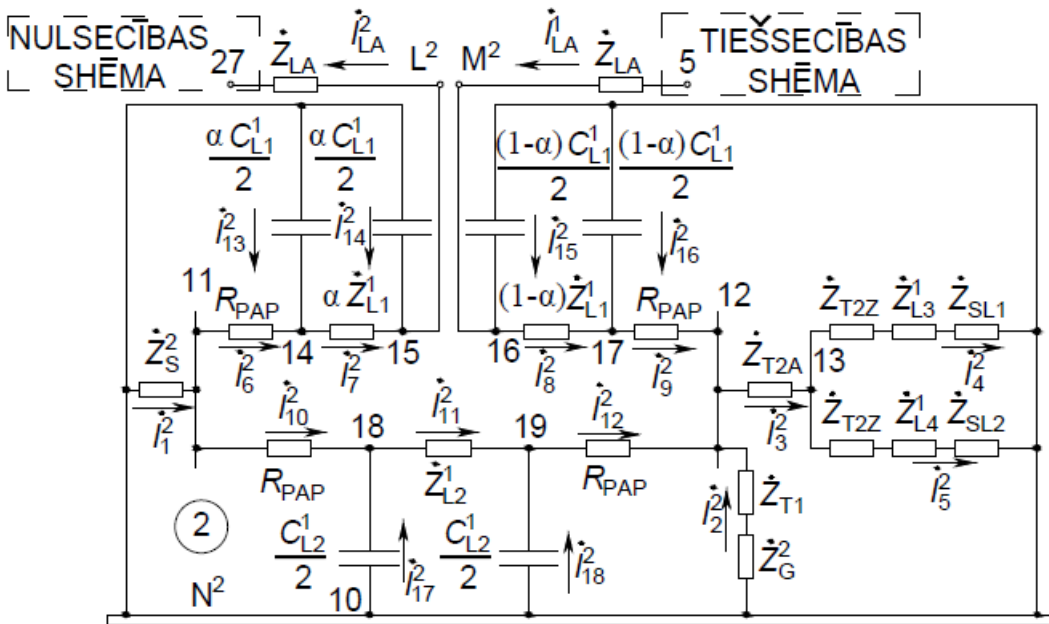
Viegli pārliccināties, ka iepriekš ar analītiski iegūtajām formulām aprēķinātās B fāzes strāvas simetriskās komponentes sakrīt ar šiem rezultātiem. Turklāt iespējams atzīmēt, ka ar abām metodēm iegūtās strāvas simetriskās komponentes liecina, ka bojātajā B fāzē strāva praktiski neplūdis, kas ir viens no šī bojājuma robežnosacījumiem. Vienlaikus var atzīmēt, ka, pateicoties iepriekš noteikto sprieguma krituma simetrisko komponentu sakrīšanai, nepārrautajās fāzēs nebūs novērojams papildu sprieguma kritums, kas saskan ar faktu, ka šajās fāzēs nav pārejas pretestību.

7.3. Otrais elektriskās sistēmas režīma parametru aprēķina piemērs vienas garennesimetrijas rašanās gadījumā ar topoloģisku risinājumu

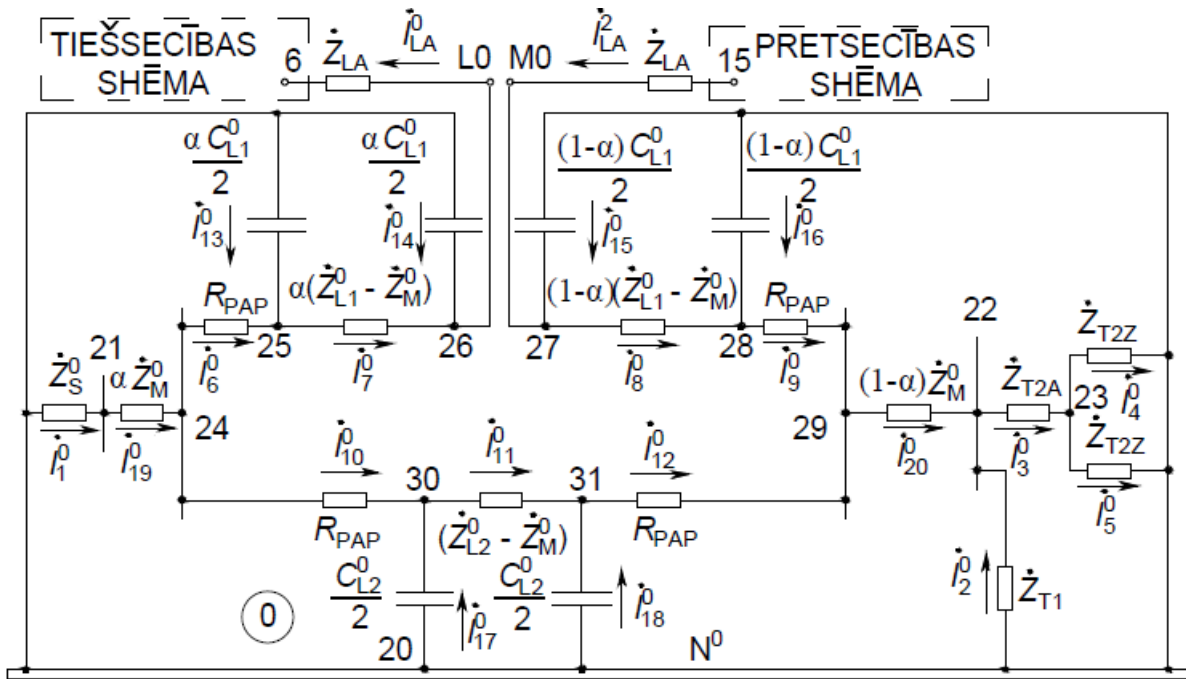
Otrajā režīma parametru aprēķina piemērā, rodoties vienai garennesimetrijai, tiks parādīts topoloģisks risinājums šādam uzdevumam: aprēķināt jaudas slēdžiem QF2 un QF3 piesaistīto aizsardzību nomērītos fāžu spriegumus un strāvas, kā arī uzzīmēt fāžu spriegumu un strāvu vektoru diagrammas abu aizsardzību RUV, ja otrā aprēķinu piemēru tīkla līnijas L1 vidū radies fāžu B un C pārrāvums ar pārejas pretestību A fāzē $\dot{Z}_{LA} = 5 \Omega$ (7.20. att.). Dati par konkrētā tīkla elementu un slodzes režīma parametriem doti 10. pielikumā.



7.21. att. Otrā aprēķinu piemēru tīkla līnijas L1 fāžu B un C pārrāvuma TS aizvietošanas shēma.



7.22. att. Otrā aprēķinu piemēru tīkla līnijas L1 fāžu B un C pārrāvuma PS aizvietošanas shēma.



7.23. att. Otrā aprēķinu piemēru tīkla līnijas L1 fāžu B un C pārrāvuma NS aizvietošanas shēma.

Atbilstoši 7.21.–7.23. attēlā parādītajai kompleksajai aizvietošanas shēmai ir iespējams sastādīt šādu pirmās incidences matricu:

M	i_1^1	i_2^1	i_3^1	i_4^1	i_5^1	i_6^1	i_7^1	i_8^1	i_9^1	i_{10}^1	i_{11}^1	i_{12}^1	i_{13}^1	i_{14}^1	i_{15}^1	i_{16}^1	i_{17}^1	i_{18}^1	i_{LA}^1
1	-1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	-1	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	-1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	1
6	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	-1	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	-1	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

M	i_1^2	i_2^2	i_3^2	i_4^2	i_5^2	i_6^2	i_7^2	i_8^2	i_9^2	i_{10}^2	i_{11}^2	i_{12}^2	i_{13}^2	i_{14}^2	i_{15}^2	i_{16}^2	i_{17}^2	i_{18}^2	i_{LA}^2
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	1	1	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
11	-1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	-1	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	-1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	1
16	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	-1	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	-1	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

M	i_1^0	i_2^0	i_3^0	i_4^0	i_5^0	i_6^0	i_7^0	i_8^0	i_9^0	i_{10}^0	i_{11}^0	i_{12}^0	i_{13}^0	i_{14}^0	i_{15}^0	i_{16}^0	i_{17}^0	i_{18}^0	i_{19}^0	i_{20}^0	i_{LA}^0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	1	1	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0
21	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
22	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
23	0	0	-1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
25	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	1
27	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	-1	0	0	0	0

Turpinājumā iespējams izveidot pretestību matricu Z vai šajā gadījumā – vispirms tīkla zaru pretestību vektoru ZZ (aizvietošanas shēmā \dot{Z}_{ML1L2}^0 apzīmēta ar \dot{Z}_M^0):

ZZ			
i_1^1	\dot{Z}_S^1		1,37 + j10,94
i_2^1	$\dot{Z}_{T1} + \dot{Z}_{GSL}^1$		4,21 + j1135,26
i_3^1	\dot{Z}_{T2A}		0,45 + j6,27
i_4^1	$\dot{Z}_{T2Z} + \dot{Z}_{L3}^1 + \dot{Z}_{SL1}$		1416,40 + j884,15
i_5^1	$\dot{Z}_{T2Z} + \dot{Z}_{L4}^1 + \dot{Z}_{SL2}$		1005,30 + j566,51
i_6^1	R_{PAP}		0,001
i_7^1	$\alpha \dot{Z}_{L1}^1$		4,70 + j8,59
i_8^1	$(1 - \alpha) \dot{Z}_{L1}^1$		4,70 + j8,59
i_9^1	R_{PAP}	=	0,001 Ω
i_{10}^1	R_{PAP}		0,001
i_{11}^1	\dot{Z}_{L2}^1		9,40 + j17,18
i_{12}^1	R_{PAP}		0,001
i_{13}^1	$2/(j\omega\alpha C_{L1}^1)$		0 - j39176,60
i_{14}^1	$2/(j\omega\alpha C_{L1}^1)$		0 - j39176,60
i_{15}^1	$2/(j(1 - \alpha)\omega C_{L1}^1)$		0 - j39176,60
i_{16}^1	$2/(j(1 - \alpha)\omega C_{L1}^1)$		0 - j39176,60
i_{17}^1	$2/(j\omega C_{L2}^1)$		0 - j19588,30
i_{18}^1	$2/(j\omega C_{L2}^1)$		0 - j19588,30
i_{LA}^1	\dot{Z}_{LA}		5
ZZ			
i_1^2	\dot{Z}_S^2		1,37 + j10,94
i_2^2	$\dot{Z}_{T1} + \dot{Z}_G^2$		22,72 + j124,87
i_3^2	\dot{Z}_{T2A}		0,45 + j6,27
i_4^2	$\dot{Z}_{T2Z} + \dot{Z}_{L3}^1 + \dot{Z}_{SL1}$		1416,40 + j884,15
i_5^2	$\dot{Z}_{T2Z} + \dot{Z}_{L4}^1 + \dot{Z}_{SL2}$		1005,30 + j566,51
i_6^2	R_{PAP}		0,001
i_7^2	$\alpha \dot{Z}_{L1}^1$		4,70 + j8,59
i_8^2	$(1 - \alpha) \dot{Z}_{L1}^1$		4,70 + j8,59
i_9^2	R_{PAP}	=	0,001 Ω
i_{10}^2	R_{PAP}		0,001
i_{11}^2	\dot{Z}_{L2}^1		9,40 + j17,18
i_{12}^2	R_{PAP}		0,001
i_{13}^2	$2/(j\omega\alpha C_{L1}^1)$		0 - j39176,60
i_{14}^2	$2/(j\omega\alpha C_{L1}^1)$		0 - j39176,60
i_{15}^2	$2/(j(1 - \alpha)\omega C_{L1}^1)$		0 - j39176,60
i_{16}^2	$2/(j(1 - \alpha)\omega C_{L1}^1)$		0 - j39176,60
i_{17}^2	$2/(j\omega C_{L2}^1)$		0 - j19588,30
i_{18}^2	$2/(j\omega C_{L2}^1)$		0 - j19588,30
i_{LA}^2	\dot{Z}_{LA}		5

ZZ			
i_1^0	\dot{Z}_S^0		$1,37 + j10,94$
i_2^0	\dot{Z}_{T1}		$1,56 + j40,23$
i_3^0	\dot{Z}_{T2A}		$0,45 + j6,27$
i_4^0	\dot{Z}_{T2Z}		$0,68 + j36,39$
i_5^0	\dot{Z}_{T2Z}		$0,68 + j36,39$
i_6^0	R_{PAP}		$0,001$
i_7^0	$\alpha(\dot{Z}_{L1}^0 - \dot{Z}_{ML1L2}^0)$		$4,71 + j9,39$
i_8^0	$(1 - \alpha)(\dot{Z}_{L1}^0 - \dot{Z}_{ML1L2}^0)$		$4,71 + j9,39$
i_9^0	R_{PAP}		$0,001$
i_{10}^0	R_{PAP}		$0,001$
i_{11}^0	$\dot{Z}_{L2}^0 - \dot{Z}_{ML1L2}^0$	$=$	$9,41 + j18,77 \quad \Omega.$
i_{12}^0	R_{PAP}		$0,001$
i_{13}^0	$2/(j\omega\alpha C_{L1}^0)$		$0 - j69197,80$
i_{14}^0	$2/(j\omega\alpha C_{L1}^0)$		$0 - j69197,80$
i_{15}^0	$2/(j(1 - \alpha)\omega C_{L1}^0)$		$0 - j69197,80$
i_{16}^0	$2/(j(1 - \alpha)\omega C_{L1}^0)$		$0 - j69197,80$
i_{17}^0	$2/(j\omega C_{L2}^0)$		$0 - j34598,90$
i_{18}^0	$2/(j\omega C_{L2}^0)$		$0 - j34598,90$
i_{19}^0	$\alpha\dot{Z}_{ML1L2}^0$		$3,12 + j12,10$
i_{20}^0	$(1 - \alpha)\dot{Z}_{ML1L2}^0$		$3,12 + j12,10$
i_{LA}^0	\dot{Z}_{LA}		5

Tagad iespējams iegūt tīkla pretestību matricu, izveidojot diagonālu matricu no ZZ vektora elementiem: $Z = \text{diag}(ZZ)$. Tālāk jā sastāda zaru EDS vektors, kuram EDS avoti ieslēgti pirmajos divos zaros, bet pārējo zaru EDS avotu vērtība ir 0 V. Tādēļ šo vektoru iespējams parādīt saīsinātā veidā:

$$\begin{matrix} E \\ i_1^1 \\ i_2^1 \\ i_3^1 - i_{LA}^0 \end{matrix} \begin{matrix} \dot{E}_{SA} \\ \dot{E}_{GASIBV} \\ 0 \end{matrix} = \begin{matrix} 66,4 \\ 138,29 + j106,76 \\ 0 \end{matrix} \text{ kV.}$$

Ja tīklā būtu elementi, kurus aizvieto ar strāvas avotiem, tad būtu jā sastāda strāvas avotu vektoru I , bet konkrētajā piemērā šo vektoru aizpilda ar nullēm. Attiecīgi no parādītajām matricām un vektoriem nosaka tīkla vadītspēju matricu Y un brīvo mainīgo vektoru B :

$$Y = MZ^{-1}M^T,$$

$$B = I - MZ^{-1}E + Y_B U_B = -MZ^{-1}E.$$

Vektors $Y_B U_B$ satur vienīgi nulles, jo par bāzes mezglu tiek pieņemta TS aizvietošanas shēmas neitrāle, kura tiek zemēta. Uzreiz iespējams atzīmēt, ka PS un NS aizvietošanas shēmas neitrāles nav zemētas, tādēļ to potenciāls nav nulle attiecībā pret TS aizvietošanas shēmas neitrāli, un, nosakot patiesos tīkla mezglu PS un NS spriegumus, tie būs jānosaka kā starpības

starp mezgla un konkrētās aizvietošanas shēmas neitrāles potenciālu, kas TS ir 0 V, un to parasti neparāda.

Šoreiz aprēķina īstenošanai izmantota *MATLAB*© iebūvētā uz Gausa metodes balstīta LVS risināšanas funkcija, jo tīkliem, kuriem ir maz zaru, kas sasaistīti ar bāzes mezglu (TS aizvietošanas shēmas neitrāli), un kuri satur kapacitatīvus elementus, ir iespējama Zeideļa metodes diverģence. Konkrētā piemēra programmas realizācijas teksts parādīts 14. pielikumā. Programmas izvadītie kompleksās aizvietošanas shēmas mezglu spriegumi:

U		U	
1	$66,694 + j0,077$	16	$66,753 + j0,057$
2	$67,050 + j0,069$	17	$66,788 + j0,060$
3	$66,698 - j0,435$	18	$66,848 + j0,066$
4	$66,694 + j0,077$	19	$66,788 + j0,060$
5	$66,743 + j0,072$	20	$66,958 + j0,064$
6	$67,030 + j0,058$	21	$66,970 + j0,067$
7	$67,050 + j0,069$	22	$66,943 + j0,059$
8	$66,694 + j0,077$	23	$66,947 + j0,060$ kV.
9	$67,050 + j0,069$	24	$66,983 + j0,069$
10	$66,843 + j0,065$	25	$66,983 + j0,069$
11	$66,848 + j0,066$	26	$67,020 + j0,073$
12	$66,788 + j0,060$	27	$66,893 + j0,054$
13	$66,788 + j0,060$	28	$66,930 + j0,058$
14	$66,848 + j0,066$	29	$66,930 + j0,058$
15	$66,883 + j0,069$	30	$66,983 + j0,069$
		31	$66,930 + j0,058$

Zaru strāvas, ievērojot, ka mezglu spriegumi noteikti ar F–Z EDS vērtībām, aprēķina, izmantojot vienādojumu sistēmu $I_z = Z^{-1}(E + M^T U)$:

I_Z		I_Z		I_Z	
i_1^1	$-0,010 + j0,026$	i_1^2	$-0,000 + j0,001$	i_1^0	$-0,000 + j0,001$
i_2^1	$0,094 - j0,062$	i_2^2	$0,000 - j0,000$	i_2^0	$0,000 - j0,000$
i_3^1	$0,084 - j0,050$	i_3^2	$-0,000 + j0,000$	i_3^0	$-0,000 + j0,001$
i_4^1	$0,034 - j0,021$	i_4^2	$-0,000 + j0,000$	i_4^0	$-0,000 + j0,000$
i_5^1	$0,050 - j0,029$	i_5^2	$-0,000 + j0,000$	i_5^0	$-0,000 + j0,000$
i_6^1	$-0,002 + j0,006$	i_6^2	$-0,002 + j0,003$	i_6^0	$-0,002 + j0,003$
i_7^1	$-0,002 + j0,005$	i_7^2	$-0,002 + j0,003$	i_7^0	$-0,002 + j0,003$
i_8^1	$-0,002 + j0,001$	i_8^2	$-0,002 + j0,003$	i_8^0	$-0,002 + j0,003$
i_9^1	$-0,002 - j0,000$	i_9^2	$-0,002 + j0,003$	i_9^0	$-0,002 + j0,003$
i_{10}^1	$-0,008 + j0,020$	i_{10}^2	$0,002 - j0,003$	i_{10}^0	$0,002 - j0,002$
i_{11}^1	$-0,008 + j0,016$	i_{11}^2	$0,002 - j0,003$	i_{11}^0	$0,002 - j0,002$
i_{12}^1	$-0,008 + j0,013$	i_{12}^2	$0,002 - j0,003$	i_{12}^0	$0,002 - j0,002$
i_{13}^1	$0,000 - j0,002$	i_{13}^2	$0,000 - j0,000$	i_{13}^0	$0,000 - j0,000$
i_{14}^1	$0,000 - j0,002$	i_{14}^2	$0,000 - j0,000$	i_{14}^0	$0,000 - j0,000$
i_{15}^1	$0,000 - j0,002$	i_{15}^2	$-0,000 + j0,000$	i_{15}^0	$-0,000 + j0,000$
i_{16}^1	$0,000 - j0,002$	i_{16}^2	$-0,000 + j0,000$	i_{16}^0	$-0,000 + j0,000$
i_{17}^1	$0,000 - j0,003$	i_{17}^2	$0,000 - j0,000$	i_{17}^0	$0,000 - j0,000$
i_{18}^1	$0,000 - j0,003$	i_{18}^2	$-0,000 + j0,000$	i_{18}^0	$-0,000 + j0,000$
i_{LA}^1	$-0,002 + j0,003$	i_{LA}^2	$-0,002 + j0,003$	i_{LA}^0	$-0,000 + j0,001$
				i_{LA}^0	$-0,002 + j0,003$

kA.

Iegūtie rezultāti satur fāžu spriegumu un strāvu simetriskās komponentes gan QF2 aizsardzībai, gan QF3 aizsardzībai, bet šīs vērtības lietderīgi vispirms izdalīt no rezultātu vektoriem vēlākai pārejai pie fāžu lielumiem. Papildus jāņem vērā, ka pieņemtais strāvas virziens līnijā L1 ir pretējs QF3 aizsardzības mērīšanas virzienam un, ka konkrētajā piemērā PS un NS neitrāļu potenciāls nav 0 V, tādēļ mezglu spriegumu PS un NS komponentes nosakāmas, kā starpība starp to potenciāliem šajās aizvietošanas shēmās un atbilstošās neitrāles potenciāliem. Minētā simetrisko komponentu izdalīšana parādīta turpmāk:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{QF2A}^1 \\ \dot{U}_{QF2A}^2 \\ \dot{U}_{QF2A}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U(1) \\ U(11) - U(10) \\ U(21) - U(20) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 66,694 + j0,077 \\ 0,005 + j0,001 \\ 0,011 + j0,003 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 66,694e^{j0,07^\circ} \\ 0,005e^{j15,53^\circ} \\ 0,012e^{j13,55^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

$$\begin{bmatrix} i_{QF2A}^1 \\ i_{QF2A}^2 \\ i_{QF2A}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_Z(6) \\ I_Z(25) \\ I_Z(44) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,002 + j0,006 \\ -0,002 + j0,003 \\ -0,002 + j0,003 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0,007e^{j106,98^\circ} \\ 0,004e^{j123,08^\circ} \\ 0,004e^{j123,08^\circ} \end{bmatrix} \text{ kA,}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{QF3A}^1 \\ \dot{U}_{QF3A}^2 \\ \dot{U}_{QF3A}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U(2) \\ U(12) - U(10) \\ U(22) - U(20) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 67,050 + j0,069 \\ -0,055 - j0,005 \\ -0,015 - j0,005 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 67,050e^{j0,06^\circ} \\ 0,055e^{-j174,90^\circ} \\ 0,016e^{-j161,30^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

$$\begin{bmatrix} i_{\text{QF3A}}^1 \\ i_{\text{QF3A}}^2 \\ i_{\text{QF3A}}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_Z(9) \\ -I_Z(28) \\ -I_Z(47) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,002 + j0,000 \\ 0,002 - j0,003 \\ 0,002 - j0,003 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0,002e^{j12,39^\circ} \\ 0,004e^{-j56,94^\circ} \\ 0,004e^{-j56,92^\circ} \end{bmatrix} \text{ kA.}$$

Nākamais solis ir pāreja no A fāzes simetriskajām komponentēm uz fāžu lielumiem, izmantojot Forteskju transformāciju:

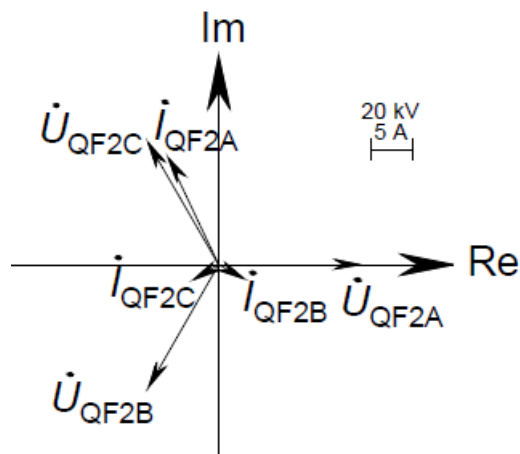
$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{\text{QF2A}} \\ \dot{U}_{\text{QF2B}} \\ \dot{U}_{\text{QF2C}} \end{bmatrix} = k_A \begin{bmatrix} \dot{U}_{\text{QF2A}}^1 \\ \dot{U}_{\text{QF2A}}^2 \\ \dot{U}_{\text{QF2A}}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 66,694 + j0,077 \\ 0,005 + j0,001 \\ 0,011 + j0,003 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 66,710 + j0,081 \\ -33,273 - j57,791 \\ -33,404 + j57,717 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 66,710e^{j0,07^\circ} \\ 66,684e^{-j119,93^\circ} \\ 66,685e^{j120,06^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

$$\begin{bmatrix} i_{\text{QF2A}} \\ i_{\text{QF2B}} \\ i_{\text{QF2C}} \end{bmatrix} = k_A \begin{bmatrix} i_{\text{QF2A}}^1 \\ i_{\text{QF2A}}^2 \\ i_{\text{QF2A}}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0,002 + j0,006 \\ -0,002 + j0,003 \\ -0,002 + j0,003 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} -0,006 + j0,012 \\ 0,003 - j0,002 \\ -0,003 - j0,002 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0,014e^{j115,30^\circ} \\ 0,003e^{-j29,94^\circ} \\ 0,003e^{-j149,94^\circ} \end{bmatrix} \text{ kA,}$$

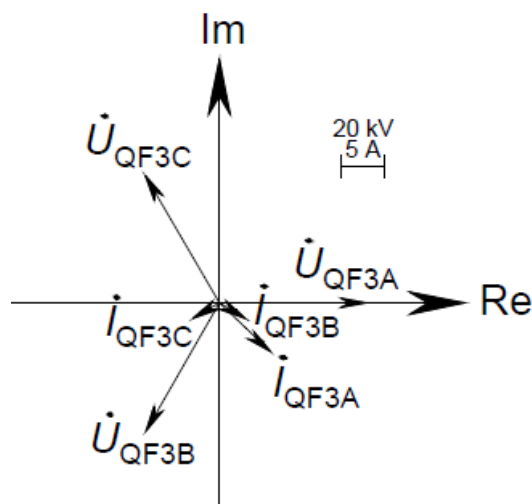
$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{\text{QF3A}} \\ \dot{U}_{\text{QF3B}} \\ \dot{U}_{\text{QF3C}} \end{bmatrix} = k_A \begin{bmatrix} \dot{U}_{\text{QF3A}}^1 \\ \dot{U}_{\text{QF3A}}^2 \\ \dot{U}_{\text{QF3A}}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 67,050 + j0,069 \\ -0,055 - j0,005 \\ -0,015 - j0,005 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 66,980 + j0,058 \\ -33,449 - j58,152 \\ -33,576 + j58,078 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 66,980e^{j0,05^\circ} \\ 67,085e^{-j119,91^\circ} \\ 67,085e^{j120,03^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

$$\begin{bmatrix} i_{\text{QF3A}} \\ i_{\text{QF3B}} \\ i_{\text{QF3C}} \end{bmatrix} = k_A \begin{bmatrix} i_{\text{QF3A}}^1 \\ i_{\text{QF3A}}^2 \\ i_{\text{QF3A}}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,002 + j0,000 \\ 0,002 - j0,003 \\ 0,002 - j0,003 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0,006 - j0,006 \\ 0,003 - j0,002 \\ -0,003 - j0,002 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0,008e^{-j43,57^\circ} \\ 0,003e^{-j29,91^\circ} \\ 0,003e^{-j149,98^\circ} \end{bmatrix} \text{ kA.}$$

Atbilstoši iegūtajiem fāžu spriegumiem un strāvām iespējams uzzīmēt vektoru diagrammas QF2 aizsardzībai (7.24. att.) un QF3 aizsardzībai (7.25. att.).



7.24. att. QF2 piesaistītās aizsardzības fāžu spriegumu un strāvu vektoru diagramma, rodoties otrā aprēķinu piemēru tīkla līnijas L1 fāžu B un C pārrāvumam.



7.25. att. QF3 piesaistītās aizsardzības fāžu spriegumu un strāvu vektoru diagramma, rodoties otrā aprēķinu piemēru tīkla līnijas L1 fāžu B un C pārrāvumam.

Vispirms, aplūkojot QF2 un QF3 aizsardzību novērotās B un C fāžu strāvas un spriegumus, redzams, ka kapacitatīvo vadītspēju dēļ šo fāžu strāvas ir lielākas par 0 A un apstieidz atbilstošos spriegumus praktiski par 90°. Šī iemesla dēļ arī abu aizsardzību noteiktajām A fāzes simetriskajām komponentēm RUV nav spēkā robežnosacījums $I_L^1 = I_L^2 = I_L^0$ (atbilstoši I_Z parādītajiem rezultātiem pārrāvuma vietā šis nosacījums izpildās). Iegūtie fāžu lielumi un to vektoru diagrammas (7.24. un 7.25. att.) parāda arī, ka atšķirībā no literatūrā [2], [14], [17] tipveidā aplūkoti vienpusēji barota tīkla pārrāvumu scenārijiem divpusējas barošanas gadījumā, it īpaši, ja pastāv paralēlas saites bojātajam elementam, pārrāvumi nerada ievērojamus fāžu spriegumu sistēmas kropļojumus. Savukārt fāžu strāvu sistēmai iespējami vērā ņemami kropļojumi, it īpaši pārrāvumu gadījumos, bet tie būs patiešām izteikti, ja bojātajam elementam nepastāv paralēlas saites un tā noslodze ir augsta.

Balstoties uz iepriekšējā piemēra analīzi, iespējams pārbaudīt ģenerators G strāvas PS komponentes īpatsvaru:

$$|I_{GA}^2|/|I_{GA}^1| = |I_Z(21)|/|I_Z(2)| \approx 0,004 \text{ r. v.} = 0,4 \text{ \%}.$$

Ņemot vērā, ka Amerikas Valsts standartu institūta (turpmāk tekstā – *ANSI*, angļu val. *American National Standards Institute*) standartos paredzēts, ka ģeneratoriem jāspēj darboties ilgstoši pat pie 5–10 % fāžu strāvu PS komponentes īpatsvara [16], var sagaidīt, ka šī bojājuma dēļ plūstošā PS strāva sliktākajā gadījumā radīs nedaudz pastiprinātu ģeneratora silšanu.

Papildus iespējams novērtēt kapacitatīvo un slodzes strāvu ievērošanas nozīmīgumu šim piemēram. Vispirms jāaprēķina 13. un 14. zara strāvu summas komponentes (kapacitatīvajām vadītspējām līdz pārrāvuma vietai):

$$\begin{aligned} i_{13-14}^1 &= i_{13}^1 + i_{14}^1 = I_Z(13) + I_Z(14) \approx 0 - j0,0034 \text{ kA}, \\ i_{13-14}^2 &= i_{13}^2 + i_{14}^2 = I_Z(32) + I_Z(33) \approx (0,14 - j1,16) \cdot 10^{-6} \text{ kA}, \\ i_{13-14}^0 &= i_{13}^0 + i_{14}^0 = I_Z(51) + I_Z(52) \approx (0,18 - j1,24) \cdot 10^{-6} \text{ kA}. \end{aligned}$$

Kapacitatīvo strāvu simetrisko komponentu attiecības pret QF2 piesaistītās aizsardzības fiksētajām strāvām būs:

$$\begin{aligned} |i_{13-14}^1|/|i_{QF2A}^1| &\approx 0,509 \text{ r. v.} = 50,90 \%, \\ |i_{13-14}^2|/|i_{QF2A}^2| &\approx 3,26 \cdot 10^{-4} \text{ r. v.} = 0,03 \%, \\ |i_{13-14}^0|/|i_{QF2A}^0| &\approx 3,51 \cdot 10^{-4} \text{ r. v.} = 0,04 \%. \end{aligned}$$

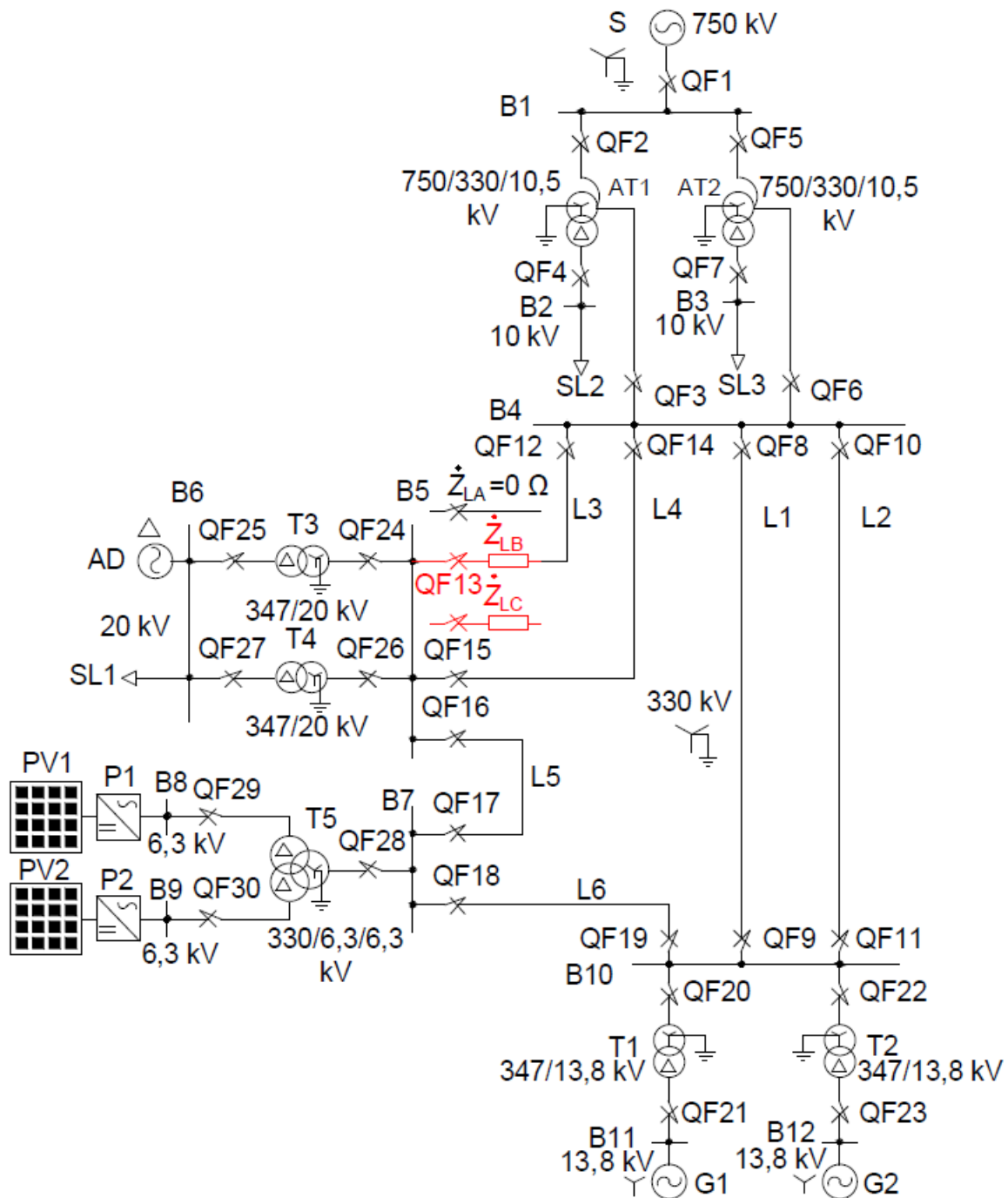
No šīm attiecībām iespējams pārliecināties, ka konkrētajā uzdevumā TS kapacitātes noteikti jāņem vērā. PS un NS kapacitātes šajā piemērā nespēlē nozīmīgu lomu, jo PS un NS spriegumi ir sanākuši niecīgi un fāžu spriegumu sistēma ir gandrīz simetriska. Lai pārbaudītu slodzes ievērošanas nozīmīgumu, iespējams aprēķināt, cik lielu daļu no G strāvas TS komponentes veido T3 AS tinumā plūstošā kopējā slodzes strāva:

$$|i_{T3}^1|/|i_G^1| = |I_Z(3)|/|I_Z(2)| \approx 0,865 \text{ r. v.} = 86,5 \%.$$

Attiecīgi redzams, ka vismaz šajā piemērā slodzes lielā mērā nosaka TS strāvu ģeneratora zarā un līdz ar to arī strāvu līnijās L1 un L2, un tās ir jāņem vērā.

7.4. Trešais elektriskās sistēmas režīma parametru aprēķina piemērs vienas garensimetrijas rašanās gadījumā ar topoloģisku risinājumu

Trešajā režīma parametru aprēķina piemērā, rodoties vienai garensimetrijai, tiks parādīts topoloģisks risinājums šādam uzdevumam: aprēķināt jaudas slēdžiem QF12 un QF13 piesaistīto aizsardzību nomērītos fāžu spriegumus un strāvas, kā arī uzzīmēt to vektoru diagrammas abu aizsardzību RUV, ja notikusi neveiksmīga trešā aprēķinu piemēru tīkla jaudas slēdža QF13 ieslēgšana (7.26. att.), kuras rezultātā B un C fāzēs izveidojies slikts kontakts (radušās pārejas pretestības: $\dot{Z}_{LA} = 0 \Omega$, $\dot{Z}_{LB} = 10 \Omega$, $\dot{Z}_{LC} = 50 \Omega$). Dati par konkrētā tīkla elementu un slodzes režīma parametriem doti 11. pielikumā.



7.26. att. Trešā aprēķinu piemēru tīkla jaudas slēdža QF13 vispārīgas garennesimetrijas režīma parametru aprēķina vienlīnijas izejas shēma.

Jānosaka arī 20 kV tīklam pieslēgtā AD strāvu PS un TS komponentu attiecība. Aprēķins jāveic garennesimetrijas rašanās momentam, pieņemot, ka tās rašanās brīdī sistēmas A fāzes EDS leņķis ir 0° , t. i., atbilstoši slodzes režīma parametru aprēķina momentam. Ņemot vērā, ka šajā scenārijā nav sagaidāmas tādas ievērojamas režīma izmaiņas, rodoties nesimetrijai, kā straujš strāvas stipruma lēcienš, tiek pieņemts, ka AD, ģeneratori un pārveidotāji P1, P2 atradīsies slodzes režīmā. Tādēļ AD TS aizvietošanas shēmā tiks ievērots vienīgi ar ekvivalento pretestību. Līdzīgi kā trešajā šķērsnesimetrijas piemērā, arī šajā aprēķinā līniju L1 un L2 NS

mijinduktivitāte neparādīsies kā tīkla elements, jo tiks izmantotas līniju pretestības, kurās jau ierēķināta mijinduktivitātes iedarbība.

Ievērojot, ka visām fāzēm ir atšķirīgas pārejas pretestības, var secināt, ka jāizmanto kāds no vispārīgās garensimetrijas risinājuma veidiem. Tik apjomīgai shēmai veikt secību aizvietošanas shēmu ekvivalentēšanu būs laukietilpīgi, tādēļ tiks veikts vienlaicīgs skaitlisks atsevišķo secību aizvietošanas shēmu režīmu aprēķins, kur garensimetrijas īpašās fāzes sprieguma krituma simetriskās komponentes tiks pārrēķinātas starp tuvinājuma soļiem, izmantojot vienādojumu sistēmu (7.2.). Attiecīgi par aprēķina fāzi tiks izraudzīta A fāze. Pirmā soļa aprēķinam, brīvi tiks pieņemtas šādas garensimetrijas īpašās fāzes spriegumu krituma simetrisko komponentu vērtības:

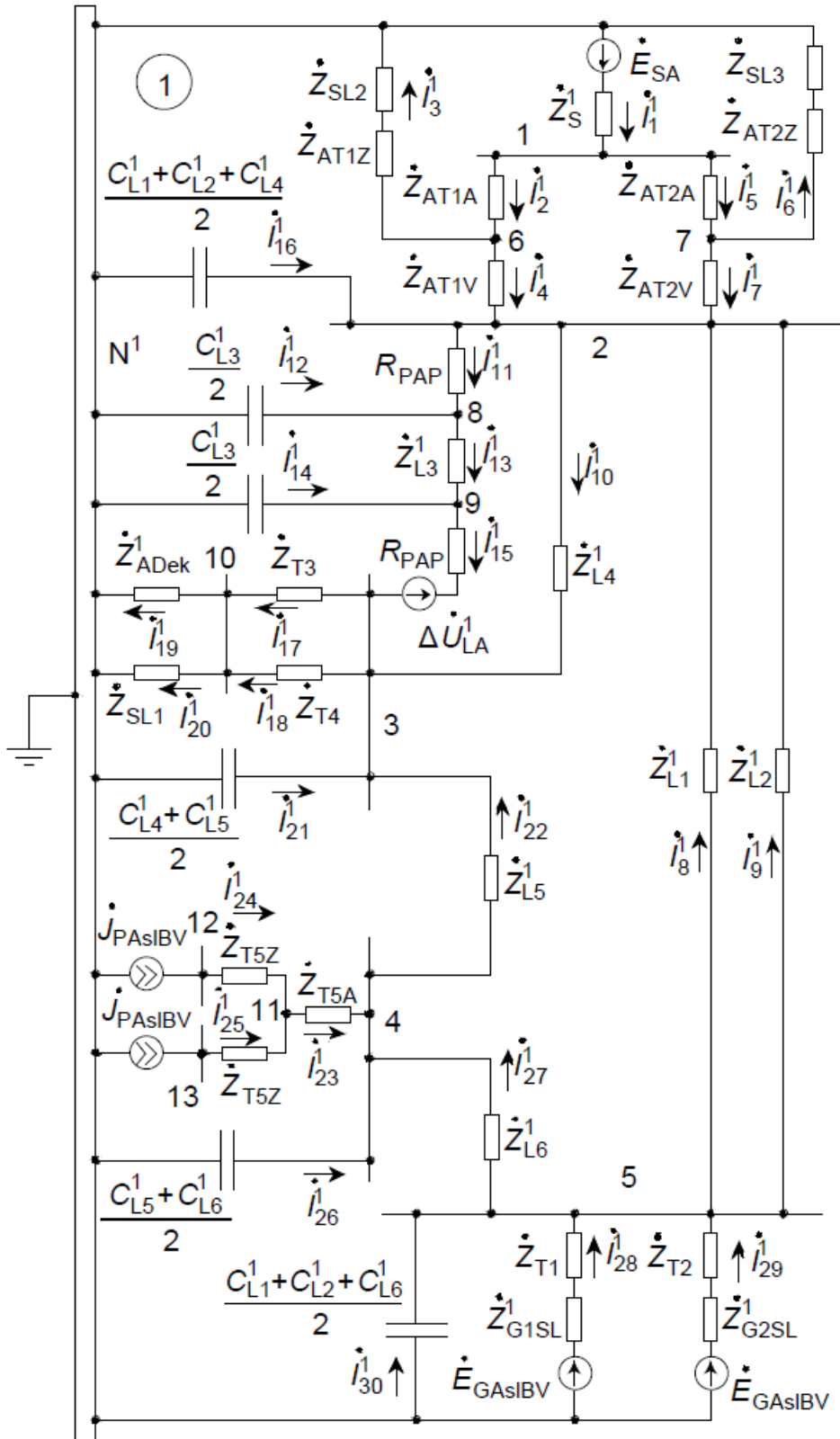
$$\Delta\dot{U}_{LA}^1 = \Delta\dot{U}_{LA}^2 = \Delta\dot{U}_{LA}^0 = 0,5\dot{E}_{SA} = 98,15 \text{ kV}.$$

Pirms veikt turpmākos aprēķinus, svarīgi ņemt vērā transformatoru slēgumu shēmu un grupu ieviestos pagriezienus ģeneratoriem G1 un G2 un pārveidotajiem P1 un P2. Šāda korekcija jāņem vērā, jo pēc slodzes režīma parametru aprēķina šajos piemēros avotiem atbilstošie EDS un strāvas avoti noteikti ar to leņķi, kāds tas būtu avotu pieslēgšanas vietā, t. i., veicot pretēju pārrēķinu zemāk parādītajam pirms avotu vērtību noteikšanas. Sistēmai šāda korekcija nav jāveic, jo to ar BV savieno AT1 un AT2 AS–VS kopējais tinums, kam šajā piemērā atbilst 0. slēguma grupa. Pārējos avotus ar BV savieno T1, T2 un T5, kuriem pārejas uz BV pusi notiek no slēgumu shēmas un grupas $Y_0/\Delta-11$ trīsstūrī savienotā tinuma uz zvaigznē saslēgtā tinuma pusi, tādēļ šo avotu ekvivalentie EDS un strāvas avoti jāpagriež par -30° :

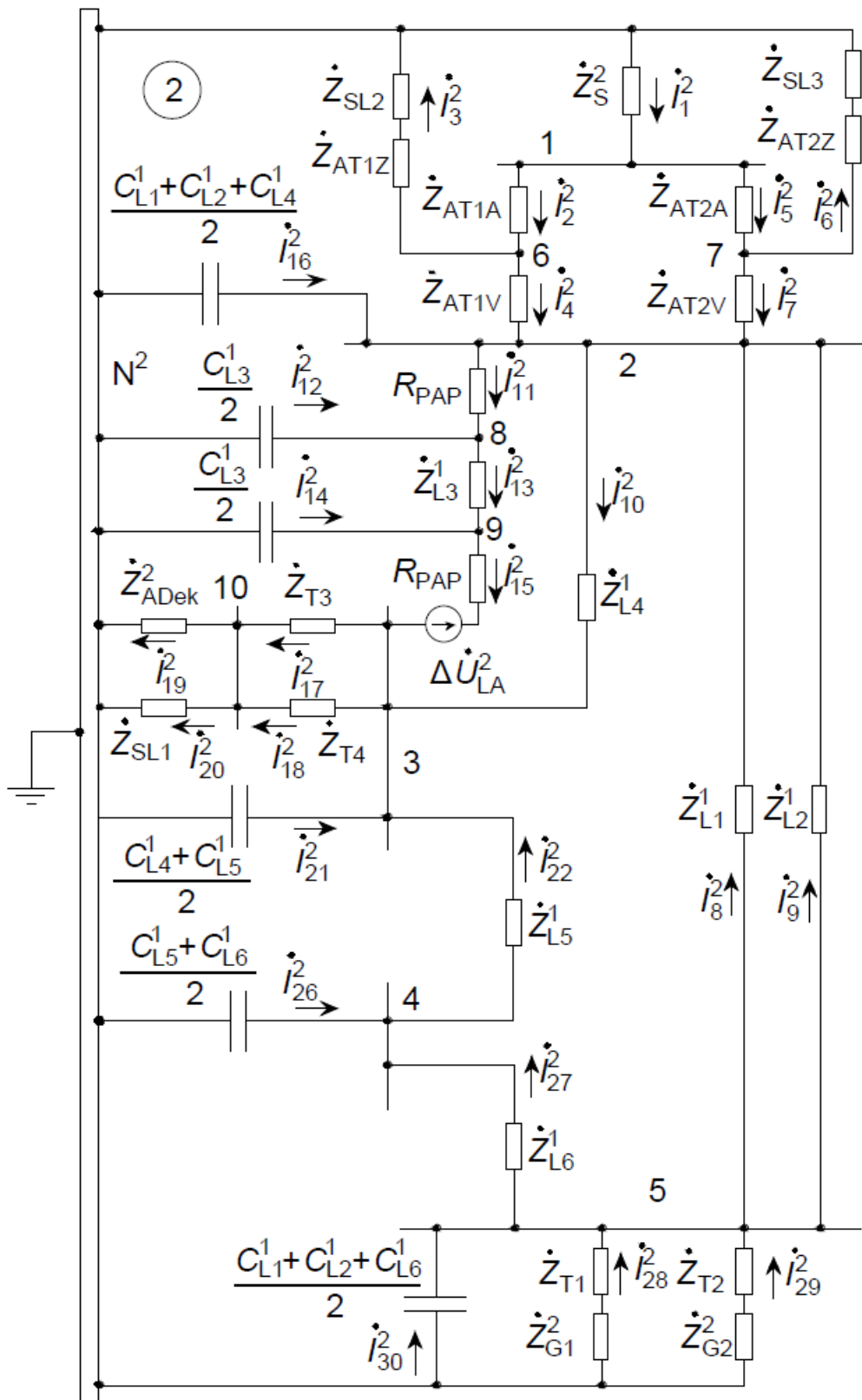
$$\dot{E}_{GASIBV} = \dot{E}_{qG1} e^{-j30^\circ} = (102,63 + j233,95)(0,866 - j0,5) \approx 205,85 + j151,29 \text{ kV},$$

$$\dot{J}_{PASIBV} = \dot{J}_{P1SL} e^{-j30^\circ} = (0,009 + j0,001)(0,866 - j0,5) \approx 0,008 - j0,004 \text{ kA}.$$

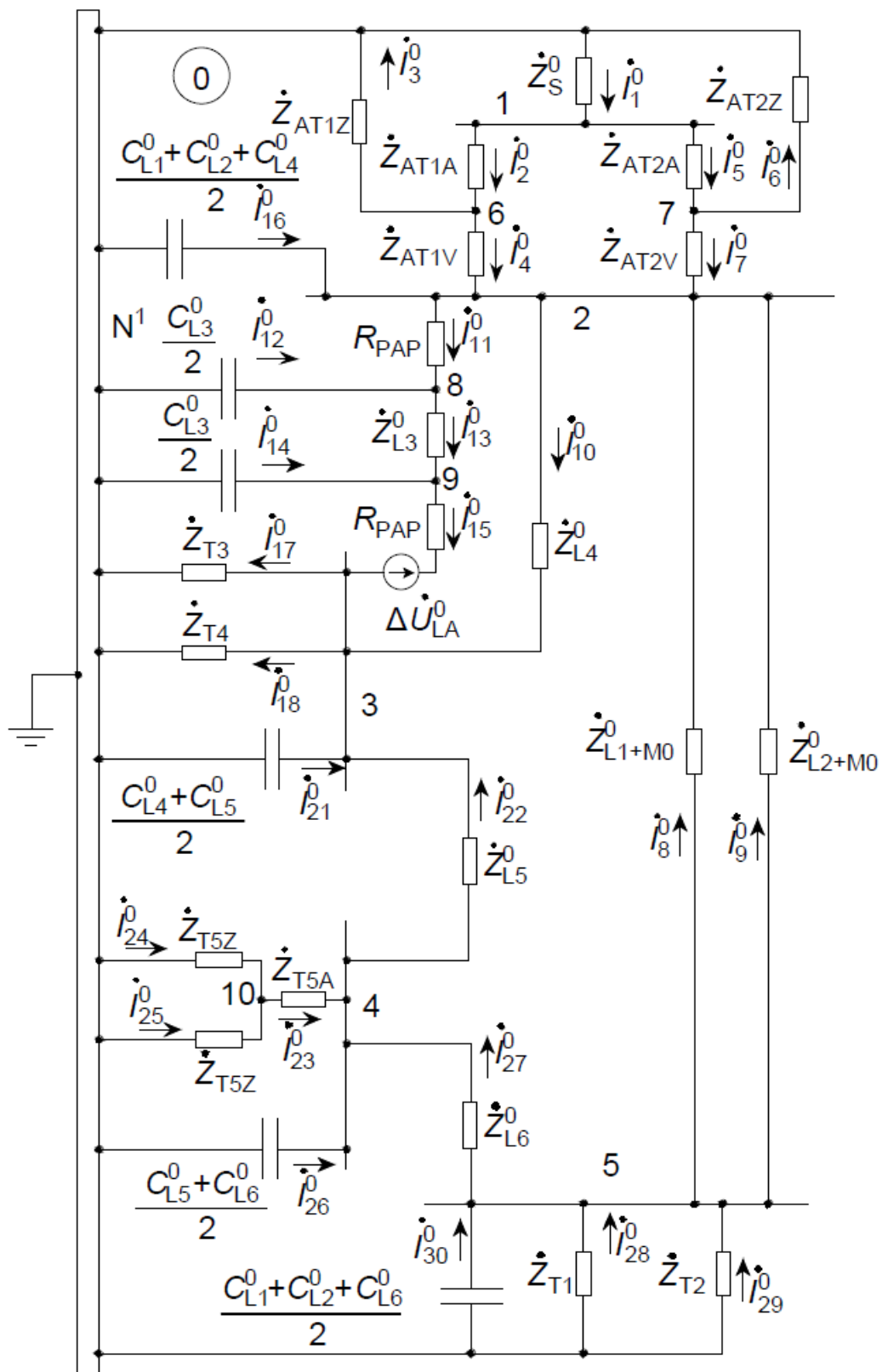
Nākamais solis ir atsevišķo aizvietošanas shēmu sastādīšana, kur TS aizvietošanas shēma parādīta 7.27. attēlā, PS aizvietošanas shēma – 7.28. attēlā un NS aizvietošanas shēma – 7.29. attēlā. Šajā piemērā jānosaka līnijas L3 aizsardzību fiksētie spriegumi un strāvas, tādēļ tai realizēta precīzāka II veida aizvietošanas shēma, izmantojot niecīgu papildu pretestību $R_{PAP} = 0,001 \Omega$, lai precīzi ievērotu kapacitatīvo strāvu plūšanu. Pārējo līniju kapacitātes ievērotas tuvināti, nosacīti tās pieslēdzot uzreiz pie līnijas kopnēm (šim uzdevumam precīzu līnijas II–veida aizvietošanas shēmu ir svarīgi izveidot vienīgi līnijai L3). Tā kā šajā situācijā katrai secību aizvietošanas shēmai idejiski tiks veikts savs režīma parametru aprēķins (tos ārēji sasaista robežnosacījumu ievērošanai ieviestie papildu EDS avoti), tad katrai no tām par bāzes mezglu pieņemta konkrētās shēmas neitrāle.



7.27. att. Trešā aprēķinu piemēru tīkla jaudas slēdža QF13 vispārīgas garennesimetrijas TS aizvietošanas shēma.



7.28. att. Trešā aprēķinu piemēru tīkla jaudas slēdža QF13 vispārīgas garensimetrijas PS aizvietošanas shēma.



7.29. att. Trešā aprēķinu piemēra tīkla jaudas slēdža QF13 vispārīgas garensimetrijas NS aizvietošanas shēma.

Otrais solis ir sagatavot aprēķina ieejas matricas:

- TS aizvietošanas shēmas režīma parametru aprēķinam nepieciešama pirmās incidences matrica $M1$, zaru pretestību vektors $ZZ1$, zaru EDS vektors $E1$ un mezglu strāvas avotu vektors $I1$;
- PS aizvietošanas shēmas režīma parametru aprēķinam nepieciešama pirmās incidences matrica $M2$, zaru pretestību vektors $ZZ2$, zaru EDS vektors $E2$ (PS mezglu strāvas avotu vektoru $I2$ aizpilda ar nullēm);
- NS aizvietošanas shēmas režīma parametru aprēķinam nepieciešama pirmās incidences matrica $M0$, zaru pretestību vektors $ZZ0$, zaru EDS vektors $E0$ (NS mezglu strāvas avotu vektoru $I0$ aizpilda ar nullēm).

TS aizvietošanas shēmas režīma parametru aprēķina ieejas matricas:

$M1$	i_1^1	i_2^1	i_3^1	i_4^1	i_5^1	i_6^1	i_7^1	i_8^1	i_9^1	i_{10}^1	i_{11}^1	i_{12}^1	i_{13}^1	i_{14}^1	i_{15}^1
1	-1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	-1	0	0	-1	-1	-1	1	1	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	-1
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
6	0	-1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	-1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	1	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$M1$	i_{16}^1	i_{17}^1	i_{18}^1	i_{19}^1	i_{20}^1	i_{21}^1	i_{22}^1	i_{23}^1	i_{24}^1	i_{25}^1	i_{26}^1	i_{27}^1	i_{28}^1	i_{29}^1	i_{30}^1
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	1	1	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	-1	-1	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	-1
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	-1	-1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0

ZZ1

i_1^1	\dot{Z}_S^1	$2,3 + j23,01$	
i_2^1	\dot{Z}_{AT1A}	$0,18 + j27,42$	
i_3^1	$\dot{Z}_{AT1Z} + \dot{Z}_{SL2}$	$2341,08 + j1179,4$	
i_4^1	\dot{Z}_{AT1V}	$0,18$	
i_5^1	\dot{Z}_{AT2A}	$0,18 + j27,42$	
i_6^1	$\dot{Z}_{AT2Z} + \dot{Z}_{SL3}$	$2341,08 + j1179,4$	
i_7^1	\dot{Z}_{AT2V}	$0,18$	
i_8^1	\dot{Z}_{L1}^1	$10,33 + j56,88$	
i_9^1	\dot{Z}_{L2}^1	$10,33 + j56,88$	
i_{10}^1	\dot{Z}_{L4}^1	$5,88 + j32,61$	
i_{11}^1	R_{pap}	$0,001$	
i_{12}^1	$2/(j\omega C_{L3}^1)$	$0 - j5894,63$	
i_{13}^1	\dot{Z}_{L3}^1	$5,88 + j32,61$	
i_{14}^1	$2/(j\omega C_{L3}^1)$	$0 - j5894,63$	
i_{15}^1	R_{pap}	$0,001$	$\Omega,$
i_{16}^1	$2/(j\omega(C_{L1}^1 + C_{L2}^1 + C_{L4}^1)) =$	$0 - j1314,24$	
i_{17}^1	\dot{Z}_{T3}	$1,57 + j66,2$	
i_{18}^1	\dot{Z}_{T4}	$1,57 + j66,2$	
i_{19}^1	\dot{Z}_{ADek}^1	$2000,4 + j1102$	
i_{20}^1	\dot{Z}_{SL1}	$639,4 + j345,1$	
i_{21}^1	$2/(j\omega(C_{L4}^1 + C_{L5}^1))$	$0 - j3478,80$	
i_{22}^1	\dot{Z}_{L5}^1	$4,11 + j22,83$	
i_{23}^1	\dot{Z}_{T5A}	$6,13 + j108,73$	
i_{24}^1	\dot{Z}_{T5Z}	$6,13 + j381,1$	
i_{25}^1	\dot{Z}_{T5Z}	$6,13 + j381,1$	
i_{26}^1	$1/(j\omega(C_{L5}^1 + C_{L6}^1))$	$0 - j3951,16$	
i_{27}^1	\dot{Z}_{L6}^1	$4,7 + j26,09$	
i_{28}^1	$\dot{Z}_{T1} + \dot{Z}_{G1SL}^1$	$8,77 + j590,17$	
i_{29}^1	$\dot{Z}_{T2} + \dot{Z}_{G2SL}^1$	$8,77 + j590,17$	
i_{30}^1	$2/(j\omega(C_{L1}^1 + C_{L2}^1 + C_{L6}^1))$	$0 - j1376,77$	

$E1$			
i_1^1	\dot{E}_{SA}	196,3	
i_2^1	0	0	
i_3^1	0	0	
i_4^1	0	0	
i_5^1	0	0	
i_6^1	0	0	
i_7^1	0	0	
i_8^1	0	0	
i_9^1	0	0	
i_{10}^1	0	0	
i_{11}^1	0	0	
i_{12}^1	0	0	
i_{13}^1	0	0	
i_{14}^1	0	0	
i_{15}^1	$-\Delta\dot{U}_{LA}^1 =$	-98,15	kV,
i_{16}^1	0	0	
i_{17}^1	0	0	
i_{18}^1	0	0	
i_{19}^1	0	0	
i_{20}^1	0	0	
i_{21}^1	0	0	
i_{22}^1	0	0	
i_{23}^1	0	0	
i_{24}^1	0	0	
i_{25}^1	0	0	
i_{26}^1	0	0	
i_{27}^1	0	0	
i_{28}^1	\dot{E}_{GASIBV}	205,85 + j151,29	
i_{29}^1	\dot{E}_{GASIBV}	205,85 + j151,29	
i_{30}^1	0	0	

$$\begin{array}{l}
I1 \\
1 \quad 0 \quad 0 \\
2 \quad 0 \quad 0 \\
3 \quad 0 \quad 0 \\
4 \quad 0 \quad 0 \\
5 \quad 0 \quad 0 \\
6 \quad 0 \quad 0 \\
7 \quad 0 \quad = \quad 0 \quad \text{kA.} \\
8 \quad 0 \quad 0 \\
9 \quad 0 \quad 0 \\
10 \quad 0 \quad 0 \\
11 \quad 0 \quad 0 \\
12 \quad \dot{J}_{\text{PASIBV}} \quad 0,008 - j0,004 \\
13 \quad \dot{J}_{\text{PASIBV}} \quad 0,008 - j0,004
\end{array}$$

PS aizvietošanas shēmas režīma parametru aprēķina ieejas matricas:

$$\begin{array}{l}
M2 \quad i_1^2 \quad i_2^2 \quad i_3^2 \quad i_4^2 \quad i_5^2 \quad i_6^2 \quad i_7^2 \quad i_8^2 \quad i_9^2 \quad i_{10}^2 \quad i_{11}^2 \quad i_{12}^2 \quad i_{13}^2 \quad i_{14}^2 \quad i_{15}^2 \\
1 \quad -1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\
2 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad -1 \quad 0 \quad 0 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\
3 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad -1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad -1 \\
4 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\
5 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\
6 \quad 0 \quad -1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\
7 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad -1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\
8 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad -1 \quad -1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \\
9 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad -1 \quad -1 \quad 1 \\
10 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\
M2 \quad i_{16}^2 \quad i_{17}^2 \quad i_{18}^2 \quad i_{19}^2 \quad i_{20}^2 \quad i_{21}^2 \quad i_{22}^2 \quad i_{26}^2 \quad i_{27}^2 \quad i_{28}^2 \quad i_{29}^2 \quad i_{30}^2 \\
1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\
2 \quad -1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\
3 \quad 0 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad -1 \quad -1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\
4 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad -1 \quad -1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\
5 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \\
6 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\
7 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\
8 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\
9 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\
10 \quad 0 \quad -1 \quad -1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0
\end{array}$$

ZZ2		
i_1^2	\dot{Z}_S^2	$2,3 + j23,01$
i_2^2	\dot{Z}_{AT1A}	$0,18 + j27,42$
i_3^2	$\dot{Z}_{AT1Z} + \dot{Z}_{SL2}$	$2341,08 + j1179,4$
i_4^2	\dot{Z}_{AT1V}	$0,18$
i_5^2	\dot{Z}_{AT2A}	$0,18 + j27,42$
i_6^2	$\dot{Z}_{AT2Z} + \dot{Z}_{SL3}$	$2341,08 + j1179,4$
i_7^2	\dot{Z}_{AT2V}	$0,18$
i_8^2	\dot{Z}_{L1}^1	$10,33 + j56,88$
i_9^2	\dot{Z}_{L2}^1	$10,33 + j56,88$
i_{10}^2	\dot{Z}_{L4}^1	$5,88 + j32,61$
i_{11}^2	R_{pap}	$0,001$
i_{12}^2	$2/(j\omega C_{L3}^1)$	$0 - j5894,63$
i_{13}^2	\dot{Z}_{L3}^1	$5,88 + j32,61$
i_{14}^2	$2/(j\omega C_{L3}^1)$	$0 - j5894,63$
i_{15}^2	R_{pap}	$0,001$
i_{16}^2	$2/(j\omega(C_{L1}^1 + C_{L2}^1 + C_{L4}^1))$	$0 - j1314,24$
i_{17}^2	\dot{Z}_{T3}	$1,57 + j66,2$
i_{18}^2	\dot{Z}_{T4}	$1,57 + j66,2$
i_{19}^2	\dot{Z}_{ADek}^2	$194,64 + j442,93$
i_{20}^2	\dot{Z}_{SL1}	$639,4 + j345,1$
i_{21}^2	$2/(j\omega(C_{L4}^1 + C_{L5}^1))$	$0 - j3478,80$
i_{22}^2	\dot{Z}_{L5}^1	$4,11 + j22,83$
i_{26}^2	$2/(j\omega(C_{L4}^1 + C_{L5}^1))$	$0 - j3951,16$
i_{27}^2	\dot{Z}_{L6}^1	$4,7 + j26,09$
i_{28}^2	$\dot{Z}_{T1} + \dot{Z}_{G1}^2$	$14,67 + j162,48$
i_{29}^2	$\dot{Z}_{T2} + \dot{Z}_{G2}^2$	$14,67 + j162,48$
i_{30}^2	$2/(j\omega(C_{L1}^1 + C_{L2}^1 + C_{L6}^1))$	$0 - j1376,77$

= Ω

M0	i_{16}^0	i_{17}^0	i_{18}^0	i_{21}^0	i_{22}^0	i_{23}^0	i_{24}^0	i_{25}^0	i_{26}^0	i_{27}^0	i_{28}^0	i_{29}^0	i_{30}^0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	-1	-1	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	-1	-1	-1
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	1	-1	-1	0	0	0	0	0

ZZ0

i_1^0	\dot{Z}_{S1}^0	$2,3 + j23,01$
i_2^0	\dot{Z}_{AT1A}	$0,18 + j27,42$
i_3^0	\dot{Z}_{AT1Z}	$0,18 + j45,7$
i_4^0	\dot{Z}_{AT1V}	$0,18$
i_5^0	\dot{Z}_{AT2A}	$0,18 + j27,42$
i_6^0	\dot{Z}_{AT2Z}	$0,18 + j45,7$
i_7^0	\dot{Z}_{AT2V}	$0,18$
i_8^0	$\dot{Z}_{L1+ML1L2}^0$	$50,58 + j228,73$
i_9^0	$\dot{Z}_{L2+ML1L2}^0$	$50,58 + j228,73$
i_{10}^0	\dot{Z}_{L4}^0	$19,15 + j71,70$
i_{11}^0	R_{PAP}	$0,001$
i_{12}^0	$2/(j\omega C_{L3}^0)$	$0 - j8376,58$
i_{13}^0	\dot{Z}_{L3}^0	$19,15 + j71,70$
i_{14}^0	$2/(j\omega C_{L3}^0)$	$= 0 - j8376,58 \quad \Omega,$
i_{15}^0	R_{PAP}	$0,001$
i_{16}^0	$2/(j\omega(C_{L1}^0 + C_{L2}^0 + C_{L4}^0))$	$0 - j2199,79$
i_{17}^0	\dot{Z}_{T3}	$1,57 + j66,2$
i_{18}^0	\dot{Z}_{T4}	$1,57 + j66,2$
i_{21}^0	$2/(j\omega(C_{L4}^0 + C_{L5}^0))$	$0 - j4935,04$
i_{22}^0	\dot{Z}_{L5}^0	$13,41 + j50,19$
i_{23}^0	\dot{Z}_{T5A}	$6,13 + j108,73$
i_{24}^0	\dot{Z}_{T5Z}	$6,13 + j38,11$
i_{25}^0	\dot{Z}_{T5Z}	$6,13 + j38,11$
i_{26}^0	$2/(j\omega(C_{L5}^0 + C_{L6}^0))$	$0 - j5584,38$
i_{27}^0	\dot{Z}_{L6}^0	$15,32 + j57,36$
i_{28}^0	\dot{Z}_{T1}	$1,57 + j66,2$
i_{29}^0	\dot{Z}_{T2}	$1,57 + j66,2$
i_{30}^0	$2/(j\omega(C_{L1}^0 + C_{L2}^0 + C_{L6}^0))$	$0 - j2320,04$

$$\begin{array}{l}
E0 \\
i_1^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_2^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_3^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_4^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_5^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_6^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_7^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_8^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_9^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_{10}^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_{11}^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_{12}^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_{13}^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_{14}^0 \quad 0 = 0 \quad \text{kV.} \\
i_{15}^0 \quad -\Delta U_{LA}^0 \quad -98,15 \\
i_{16}^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_{17}^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_{18}^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_{21}^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_{22}^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_{23}^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_{24}^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_{25}^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_{26}^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_{27}^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_{28}^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_{29}^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_{30}^0 \quad 0 \quad 0
\end{array}$$

Pēc ieejas matricu ievades var iegūt secību aizvietošanas shēmām atbilstošās pretestību matricas $Z1$, $Z2$, $Z0$ no zaru pretestību vektoriem $ZZ1$, $ZZ2$, $ZZ0$, izmantojot to vērtības kā minēto matricu diagonāles elementus. Aprēķinu turpinājumā tiek noteiktas secību aizvietošanas shēmu vadītspēju matricas $Y1$, $Y2$, $Y0$ (tās vēlāk tiek invertētas skaitliskā risinājuma konverģences uzlabošanai) un brīvo mainīgo vektori $B1$, $B2$, $B0$:

$$\begin{aligned}
Y1 &= M1 \cdot Z1^{-1} M1^T, Y2 = M2 \cdot Z2^{-1} M2^T, Y0 = M0 \cdot Z0^{-1} M0^T, \\
B1 &= I1 - M1 \cdot Z1^{-1} E1, B2 = -M2 \cdot Z2^{-1} E2, B0 = -M0 \cdot Z0^{-1} E0.
\end{aligned}$$

Iespējams noteikt arī garennesimetrijas pretestību kombināciju vērtības un parādīt faktisko vienādojumu sistēmu, kas tiks izmantota garennesimetrijas spriegumu kritumu (aizvietošanas shēmā ievēroti kā papildu EDS avoti) vērtību pārrēķinam:

$$\dot{Z}_{LABC1} = \dot{Z}_{LA} + \dot{Z}_{LB} + \dot{Z}_{LC} = 60 \, \Omega,$$

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{LABC2} &= \dot{Z}_{LA} + \dot{a}\dot{Z}_{LB} + \dot{a}^2\dot{Z}_{LC} \approx -30 - j34,64 \, \Omega, \\ \dot{Z}_{LABC3} &= \dot{Z}_{LA} + \dot{a}^2\dot{Z}_{LB} + \dot{a}\dot{Z}_{LC} \approx -30 + j34,64 \, \Omega, \\ \begin{cases} \Delta \dot{U}_{LA}^1 &= (1/3)(\dot{I}_{LA}^1[60] + \dot{I}_{LA}^2[-30 + j34,64] + \dot{I}_{LA}^0[-30 - j34,64]). \\ \Delta \dot{U}_{LA}^2 &= (1/3)(\dot{I}_{LA}^1[-30 - j34,64] + \dot{I}_{LA}^2[60] + \dot{I}_{LA}^0[-30 + j34,64]). \\ \Delta \dot{U}_{LA}^0 &= (1/3)(\dot{I}_{LA}^1[-30 + j34,64] + \dot{I}_{LA}^2[-30 - j34,64] + \dot{I}_{LA}^0[60]). \end{cases} \end{aligned}$$

Veicot skaitlisko aprēķinu, kā tas paskaidrots teorijā, risinājumu ar precizitāti 0,001 kV var iegūt, veicot 41 tuvinājuma soli. Tomēr šoreiz programmas īstenošanā tiks parādīta nedaudz modificēta risinājuma versija, kurā, sākot ar otro tuvinājuma soli, A fāzes sprieguma krituma simetrisko komponentu pārrēķinu veic arī starp atsevišķo secību aizvietošanas shēmu aprēķinu soļiem, kas uzlabo aprēķina konvergenci un ļauj šādu aprēķinu veikt ar 21 tuvinājuma soli. Programmas teksts parādīts 15. pielikumā. Aprēķinu rezultātā iegūti šādi secību aizvietošanas shēmu mezglu spriegumu un zaru strāvu vektori:

$U1$				$U0$	
1	$201,56 + j0,86$			1	$-0,03 + j0,03$
2	$204,63 + j1,63$	1	$-0,01 - j0,02$	2	$-0,05 + j0,04$
3	$203,97 + j0,12$	2	$-0,02 - j0,03$	3	$0,09 - j0,09$
4	$207,06 + j4,55$	3	$0,14 + j0,14$	4	$0,05 - j0,04$
5	$208,92 + j9,45$	4	$0,09 + j0,09$	5	$0,01 - j0,01$ kV,
6	$204,62 + j1,65$	5	$0,03 + j0,03$ kV,	6	$-0,06 + j0,04$
7	$204,62 + j1,65$ kV,	6	$-0,02 - j0,03$	7	$-0,05 + j0,04$
8	$204,63 + j1,63$	7	$-0,02 - j0,03$	8	$-0,05 + j0,04$
9	$204,86 + j0,01$	8	$-0,02 - j0,03$	9	$-0,40 + j0,48$
10	$197,56 - j9,87$	9	$-0,26 - j0,30$	10	$-0,03 + j0,03$
11	$208,02 + j6,25$	10	$0,14 + j0,12$		
12	$209,60 + j9,27$				
13	$209,60 + j9,27$				

I_{Z1}		I_{Z2}		I_{Z0}	
i_1^1	$-0,060 + j0,223$	i_1^2	$0,001 - j0,001$	i_1^0	$-0,001 - j0,001$
i_2^1	$-0,030 + j0,111$	i_2^2	$0,001 - j0,000$	i_2^0	$-0,001 - j0,001$
i_3^1	$0,070 - j0,035$	i_3^2	$-0,000 - j0,000$	i_3^0	$0,001 + j0,001$
i_4^1	$-0,100 + j0,146$	i_4^2	$0,001 - j0,000$	i_4^0	$-0,002 - j0,002$
i_5^1	$-0,030 + j0,111$	i_5^2	$0,001 - j0,000$	i_5^0	$-0,001 - j0,001$
i_6^1	$0,070 - j0,035$	i_6^2	$0,000 - j0,000$	i_6^0	$0,001 + j0,001$
i_7^1	$-0,100 + j0,146$	i_7^2	$0,001 - j0,000$	i_7^0	$-0,002 - j0,002$
i_8^1	$0,147 - j0,049$	i_8^2	$0,001 - j0,001$	i_8^0	$-0,000 - j0,000$
i_9^1	$0,147 - j0,049$	i_9^2	$0,001 - j0,001$	i_9^0	$-0,000 - j0,000$
i_{10}^1	$0,048 - j0,012$	i_{10}^2	$-0,006 + j0,004$	i_{10}^0	$0,001 + j0,002$
i_{11}^1	$0,047 + j0,050$	i_{11}^2	$0,009 - j0,006$	i_{11}^0	$-0,004 - j0,006$
i_{12}^1	$0,000 - j0,035$	i_{12}^2	$-0,000 + j0,000$	i_{12}^0	$0,000 + j0,000$
i_{13}^1	$0,047 + j0,015$	i_{13}^2	$0,009 - j0,006$	i_{13}^0	$-0,004 - j0,006$
i_{14}^1	$0,000 - j0,035$	i_{14}^2	$-0,000 + j0,000$	i_{14}^0	$0,000 + j0,000$
i_{15}^1	$0,047 - j0,020$	i_{15}^2	$0,009 - j0,006$	i_{15}^0	$-0,004 - j0,006$
i_{16}^1	$0,001 - j0,156$	i_{16}^2	$-0,000 + j0,000$	i_{16}^0	$0,000 + j0,000$
i_{17}^1	$0,153 - j0,093$	i_{17}^2	$0,009 - j0,006$	i_{17}^0	$-0,001 - j0,001$
i_{18}^1	$0,153 - j0,093$	i_{18}^2	$-0,000 + j0,000$	i_{18}^0	$-0,001 - j0,001$
i_{19}^1	$0,074 - j0,046$	i_{19}^2	$0,000 - j0,000$	i_{19}^0	$-0,001 - j0,001$
i_{20}^1	$0,233 - j0,141$	i_{20}^2	$0,000 - j0,000$	i_{20}^0	$-0,000 - j0,000$
i_{21}^1	$0,000 - j0,059$	i_{21}^2	$0,000 - j0,000$	i_{21}^0	$0,001 + j0,001$
i_{22}^1	$0,212 - j0,097$	i_{22}^2	$0,000 + j0,000$	i_{22}^0	$0,001 + j0,001$
i_{23}^1	$0,016 - j0,008$	i_{23}^2	$0,000 - j0,000$	i_{23}^0	$0,000 + j0,000$
i_{24}^1	$0,008 - j0,004$	i_{24}^2	$0,000 - j0,000$	i_{24}^0	$-0,000 - j0,000$
i_{25}^1	$0,008 - j0,004$	i_{25}^2	$-0,003 + j0,002$	i_{25}^0	$0,000 + j0,000$
i_{26}^1	$0,001 - j0,052$	i_{26}^2	$0,000 + j0,000$	i_{26}^0	$-0,000 - j0,000$
i_{27}^1	$0,194 - j0,037$	i_{27}^2	$-0,003 + j0,002$	i_{27}^0	$0,001 + j0,001$
i_{28}^1	$0,240 + j0,009$	i_{28}^2	$-0,000 + j0,000$	i_{28}^0	$0,000 + j0,000$
i_{29}^1	$0,240 + j0,009$	i_{29}^2	$-0,000 + j0,000$	i_{29}^0	$0,000 + j0,000$
i_{30}^1	$0,007 - j0,152$	i_{30}^2	$0,000 - j0,000$	i_{30}^0	$-0,000 - j0,000$

Iegūtie rezultāti jau satur fāžu spriegumu un strāvu simetriskās komponentes gan QF1, gan QF13 piesaistītajai aizsardzībai, bet šīs vērtības vispirms lietderīgi izdalīt no rezultātu vektoriem. Šajā piemērā spriegumu PS un NS komponentu noteikšanai var uzreiz izmantot atbilstošo mezglu potenciālus, jo visu secību aizvietošanas shēmu neitrāles pieņemtās zemētas. Attiecīgi nepieciešamie simetrisko komponentu vektori doti šeit:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{QF12A}^1 \\ \dot{U}_{QF12A}^2 \\ \dot{U}_{QF12A}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U1(2) \\ U2(2) \\ U0(2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 204,63 + j1,63 \\ -0,02 - j0,03 \\ -0,05 + j0,04 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 204,64e^{j0,46^\circ} \\ 0,04e^{-j119,84^\circ} \\ 0,06e^{j136,66^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

$$\begin{bmatrix} i_{QF12A}^1 \\ i_{QF12A}^2 \\ i_{QF12A}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{Z1}(11) \\ I_{Z2}(11) \\ I_{Z0}(11) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,047 + j0,050 \\ 0,009 - j0,006 \\ -0,004 - j0,006 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0,068e^{j47,02^\circ} \\ 0,011e^{-j30,82^\circ} \\ 0,008e^{-j126,09^\circ} \end{bmatrix} \text{ kA,}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{QF13A}^1 \\ \dot{U}_{QF13A}^2 \\ \dot{U}_{QF13A}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U1(3) \\ U2(3) \\ U0(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 203,97 + j0,12 \\ 0,14 + j0,14 \\ 0,09 - j0,09 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 203,97e^{j0,04^\circ} \\ 0,20e^{j45,59^\circ} \\ 0,13e^{-j43,72^\circ} \end{bmatrix}, \text{ kV}$$

$$\begin{bmatrix} i_{QF13A}^1 \\ i_{QF13A}^2 \\ i_{QF13A}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_{Z1}(15) \\ -I_{Z2}(15) \\ -I_{Z0}(15) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,047 + j0,020 \\ -0,009 + j0,06 \\ 0,004 + j0,006 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0,051e^{j157,41^\circ} \\ 0,011e^{j149,23^\circ} \\ 0,007e^{j54,06^\circ} \end{bmatrix} \text{ kA.}$$

Turpinājumā jāpāriet no A fāzes simetriskajām komponentēm uz fāžu lielumiem, izmantojot Forteskju transformāciju:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{QF12A} \\ \dot{U}_{QF12B} \\ \dot{U}_{QF12C} \end{bmatrix} = k_A \begin{bmatrix} \dot{U}_{QF12A}^1 \\ \dot{U}_{QF12A}^2 \\ \dot{U}_{QF12A}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 204,63 + j1,63 \\ -0,02 - j0,03 \\ -0,05 + j0,04 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 204,57 + j1,64 \\ -100,92 - j177,99 \\ -103,79 + j176,48 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 204,58e^{j0,46^\circ} \\ 204,61e^{-j119,55^\circ} \\ 204,74e^{j120,46^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

$$\begin{bmatrix} i_{QF12A} \\ i_{QF12B} \\ i_{QF12C} \end{bmatrix} = k_A \begin{bmatrix} i_{QF12A}^1 \\ i_{QF12A}^2 \\ i_{QF12A}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,047 + j0,050 \\ 0,009 - j0,006 \\ -0,004 - j0,006 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0,052 + j0,038 \\ 0,016 - j0,061 \\ -0,081 + j0,004 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0,064e^{j36,68^\circ} \\ 0,063e^{-j75,44^\circ} \\ 0,081e^{j177,17^\circ} \end{bmatrix} \text{ kA.}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{QF13A} \\ \dot{U}_{QF13B} \\ \dot{U}_{QF13C} \end{bmatrix} = k_A \begin{bmatrix} \dot{U}_{QF13A}^1 \\ \dot{U}_{QF13A}^2 \\ \dot{U}_{QF13A}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 203,97 + j0,12 \\ 0,14 + j0,14 \\ 0,09 - j0,09 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 204,20 + j0,18 \\ -101,98 - j176,75 \\ -101,95 + j176,30 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 204,21e^{j0,05^\circ} \\ 204,06e^{-j119,98^\circ} \\ 203,66e^{j120,04^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

$$\begin{bmatrix} i_{QF13A} \\ i_{QF13B} \\ i_{QF13C} \end{bmatrix} = k_A \begin{bmatrix} i_{QF13A}^1 \\ i_{QF13A}^2 \\ i_{QF13A}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0,047 + j0,020 \\ -0,009 + j0,06 \\ 0,004 + j0,006 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} -0,052 + j0,031 \\ 0,045 + j0,026 \\ 0,020 - j0,039 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0,060e^{j149,06^\circ} \\ 0,052e^{j30,34^\circ} \\ 0,044e^{-j62,49^\circ} \end{bmatrix} \text{ kA.}$$

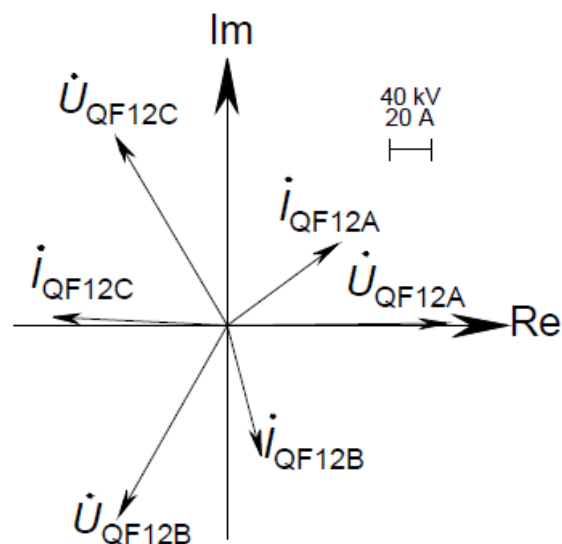
Papildu aprēķina pārbaudei iespējams parādīt garennesimetrijas fāžu spriegumu kritumu noteikšanu:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_{LA}^1 \\ \Delta \dot{U}_{LA}^2 \\ \Delta \dot{U}_{LA}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,88 - j0,12 \\ -0,39 - j0,45 \\ -0,49 + j0,56 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0,89e^{-j7,55^\circ} \\ 0,60e^{-j131,46^\circ} \\ 0,74e^{j130,85^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

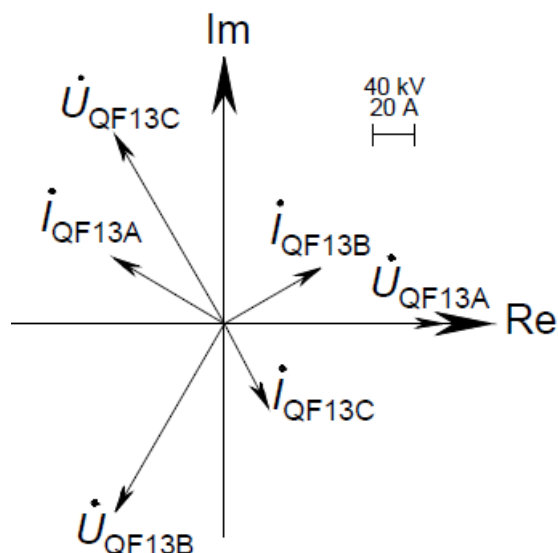
$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_{LA} \\ \Delta \dot{U}_{LB} \\ \Delta \dot{U}_{LC} \end{bmatrix} = k_A \begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_{LA}^1 \\ \Delta \dot{U}_{LA}^2 \\ \Delta \dot{U}_{LA}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,88 - j0,12 \\ -0,39 - j0,45 \\ -0,49 + j0,56 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0,00 - j0,00 \\ -0,45 - j0,26 \\ -1,02 + j1,95 \end{bmatrix} \approx$$

$$\approx \begin{bmatrix} 0 \\ 0,52e^{-j149,68^\circ} \\ 2,20e^{j117,52^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV.}$$

Atbilstoši aprēķinātajiem fāžu spriegumiem un strāvām iespējams uzzīmēt vektoru diagrammas QF12 aizsardzībai (7.30. att.) un QF13 aizsardzībai (7.31. att.).



7.30. att. QF12 piesaistītās aizsardzības fiksēto fāžu spriegumu un strāvu vektoru diagramma, rodoties vispārīgai garennesimetrijai trešā aprēķinu piemēru tīkla jaudas slēdzī QF13.



7.31. att. QF13 piesaistītās aizsardzības fiksēto fāžu spriegumu un strāvu vektoru diagramma, rodoties vispārīgai garenesimetrijai trešā aprēķinu piemēru tīkla jaudas slēdzī QF13.

Šajā piemērā, līdzīgi iepriekšējam piemēram, arī novērojami minimāli fāžu spriegumu sistēmas kropļojumi (7.30. un 7.31. att.), un, ņemot vērā, ka neviena no fāzēm nav pilnībā pārrauta, fāžu strāvu sistēmas abos līnijas galos arī ir salīdzinoši simetriskas. Tomēr QF13 piesaistītās aizsardzības fiksētās fāžu strāvas skaidri parāda, kā, pieaugot fāzē ieslēgtajai pretestībai, samazinājies fāzes strāvas stiprums, sākot no A fāzes bez pārejas pretestības līdz C fāzei ar 50Ω pārejas pretestību. Par aprēķina atbilstību modelētajai situācijai iespējams pārliicināties, atsevišķi aprēķinot sprieguma kritumus fāžu pārejas pretestībās, izmantojot gala rezultātā iegūtās QF13 fāžu strāvas un ņemot vērā, ka QF13 strāvu mērīšanas virziens sanācis pretējs teorijā pieņemtajam garenesimetrijas strāvas virzienam:

$$\Delta \dot{U}_{LA} = -\dot{Z}_{LA} \dot{I}_{QF13A} = 0(0,052 - j0,031) = 0 \text{ kV},$$

$$\Delta \dot{U}_{LB} = -\dot{Z}_{LB} \dot{I}_{QF13B} = 10(0,009 - j0,06) \approx -0,45 - j0,26 \text{ kV},$$

$$\Delta \dot{U}_{LC} = -\dot{Z}_{LC} \dot{I}_{QF13C} = 50(-0,004 - j0,006) \approx -1,02 + j1,95 \text{ kV}.$$

Iespējams pārliicināties, ka tās sakrīt ar augstāk parādīto fāžu sprieguma kritumu vektoru, kurš aprēķināts, izmantojot A fāzes sprieguma krituma simetriskās komponentes, kas iegūtas robežnosacījumu ievērošanai ieviesto EDS avotu vērtību pārrēķināšanas rezultātā. Turklāt, ja QF13 fāžu B un C strāvas vektorus pagrieztu par 180° (atbilstībai ar garenesimetrijas analīzei pieņemamo strāvas virzienu), būtu redzams, ka šie sprieguma kritumi sakrīt fāzē ar garenesimetrijas B un C fāžu strāvām.

Ņemot vērā, ka garenesimetrija radusies salīdzinoši elektriski tuvu dzinēju ekvivalenta AD pieslēgšanas vietai (uzreiz aiz barojošajiem transformatoriem T3 un T4), būtu lietderīgi noteikt tā zarā plūstošās strāvas PS un TS komponentu attiecību un attiecību starp tā kopņu sprieguma PS un TS komponentēm. Šo vērtību amplitūdu attiecību var noteikt, nereducējot uz 20 kV sprieguma pakāpi, jo to amplitūdu transformācija TS un PS komponentēm notiktu identiskā veidā. Interesējošās PS un TS komponentu attiecības:

$$|\dot{U}_{AD}^2|/|\dot{U}_{AD}^1| = |U2(10)|/|U1(10)| \approx 0,0009 \text{ r. v.} = 0,09 \%$$

$$|i_{AD}^2|/|i_{AD}^1| = |i_{19}^2|/|i_{19}^1| \approx 0,0044 \text{ r. v.} = 0,44 \%$$

Redzams, ka šajā situācijā, pateicoties salīdzinoši nenozīmīgajiem fāžu sprieguma sistēmas kropļojumiem, arī AD kopņu fāžu spriegumos būs mazs PS komponentes īpatsvars un sagaidāma viegli pastiprināta dzinēju silšana, bet atbilstoši pirmā garensimetrijas aprēķinu piemēra analizē minētajam AD nozīmīgi bojājumi nav gaidāmi.

Analoģiski iepriekšējam piemēram iespējams novērtēt kapacitatīvās strāvas simetrisko komponentu attiecību ar bojātās līnijas aizsardzības novēroto. Minētās attiecības noteikšanai jāaprēķina 12. un 14. zara strāvu summa:

$$i_{CL3}^1 = i_{12}^1 + i_{14}^1 = 0,0003 - j0,0695 \text{ kA,}$$

$$i_{CL3}^2 = i_{12}^2 + i_{14}^2 = (5,719 - j4,648) \cdot 10^{-5} \text{ kA,}$$

$$i_{CL3}^0 = i_{12}^0 + i_{14}^0 = (6,196 - j5,268) \cdot 10^{-5} \text{ kA.}$$

Šo summāro kapacitatīvo strāvu simetrisko komponentu attiecības pret QF12 fiksētajām komponentēm būs:

$$|i_{CL3}^1|/|i_{QF12A}^1| \approx 1,0169 \text{ r. v.} = 101,69 \%$$

$$|i_{CL3}^2|/|i_{QF12A}^2| \approx 0,0068 \text{ r. v.} = 0,68 \%$$

$$|i_{CL3}^0|/|i_{QF12A}^0| \approx 0,0108 \text{ r. v.} = 1,08 \%$$

Ņemot vērā to, ka TS kapacitatīvā strāva ir lielāka par QF12 strāvas TS komponenti, var secināt, ka konkrētajā piemērā vismaz TS kapacitātes ir jāņem vērā. Salīdzinot ar iepriekšējo piemēru, redzams, ka šajā piemērā līnijas kapacitāšu ievērošanai ir bijusi lielāka ietekme, bet arī šajā piemērā necīgo spriegumu PS un NS komponentu dēļ ne līnijas L3 PS, ne NS kapacitāšu ignorēšana neradītu aizsardzības fiksētajās strāvu simetriskajās komponentēs ievērojamas kļūdas.

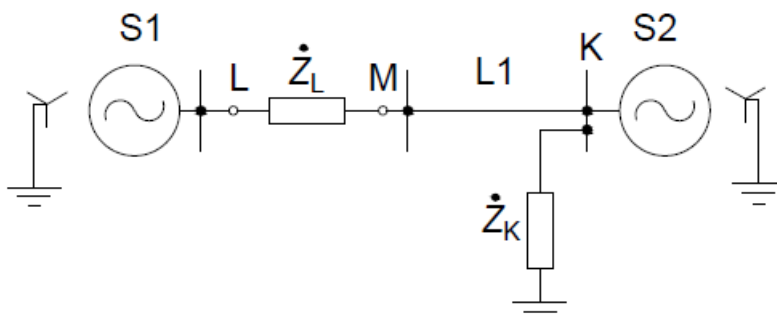
Līdzīgā veidā iespējams pārliecināties, ka vismaz slodzes SL1 un AD TS pretestību ievērošana ir nozīmīga šī režīma parametru aprēķina precizitātei, jo to kopējā TS strāva ir aptuveni 3,5 reizes lielāka par līniju L3 un L4 kopējo TS komponentu vērtību un aptuveni 1,5 reizes lielāka par L5 strāvas TS komponentes vērtību.

Testējot aprēķinu pie dažādām pārejas pretestībām, tika novērots, ka, palielinot pārejas pretestības, joprojām ir iespējama aprēķina diverģence, kā bija minēts teorētiskajā aprakstā. Nonākot šādā situācijā, ieteicams izmēģināt citu LVS risināšanas metodi vai citādi ievērot robežnosacījums, vai aptuveni izmantot kādu no kompleksajām aizvietošanas shēmām, vai arī izmantot kādu specializētu elektrisko sistēmu modelēšanas programmatūru. Spriežot pēc analītiskā aprēķina piemēra rezultātiem, salīdzinoši labāka aprēķina konverģence lielu pārejas pretestību gadījumā iespējama, arī nosakot rezultējošo aizvietošanas shēmu summāros EDS un pretestības un izmantojot universālo matricu pieraksta risinājumu. Tomēr jāatceras, ka tas dos iespēju uzreiz aprēķināt vienīgi strāvas simetriskās komponentes garensimetrijas vietā.

8. ELEKTRISKĀS SISTĒMAS REŽĪMA PARAMETRU APRĒĶINI VAIRĀKU VIENLAICĪGU NESIMETRIJU RAŠANĀS GADĪJUMOS

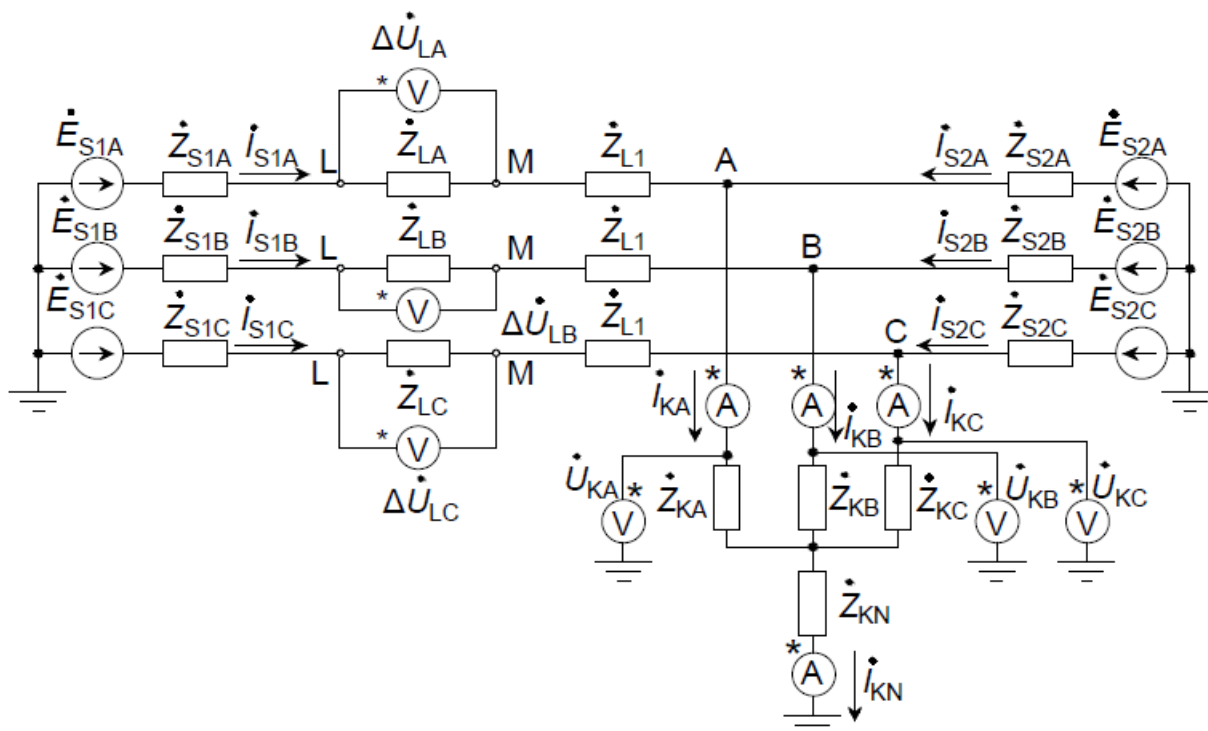
8.1. Elektriskās sistēmas režīmu parametru aprēķinu analītiskā metodika vairāku vienlaicīgu nesimetriju rašanās gadījumos

Iesākumā pievērsīsimies režīma analītiskā aprēķina principu analīzei vienlaicīgu nesimetriju jeb sarežģītu bojājumu rašanās gadījumā. Analīzes piemēram iespējams izmantot 6. un 7. nodaļā parādīto divu sistēmu tīklu, pieņemot, ka sistēmas S1 pusē radusies vispārīga garennesimetrija starp punktiem L un M un vienlaikus uz sistēmas S2 kopnēm radusies vispārīga šķērsnesimetrija punktā K. Vispārīgā gadījumā abas nesimetrijas var rasties dažādos tīkla punktos, tādēļ šai analīzei starp abām nesimetrijas vietām vēlams ieslēgt vismaz vienu papildu pretestību, kas šajā piemērā būs EPL L1 reprezentācija, neņemot vērā tās vadītspējas. Atbilstoša tīkla shēma parādīta 8.1. attēlā.



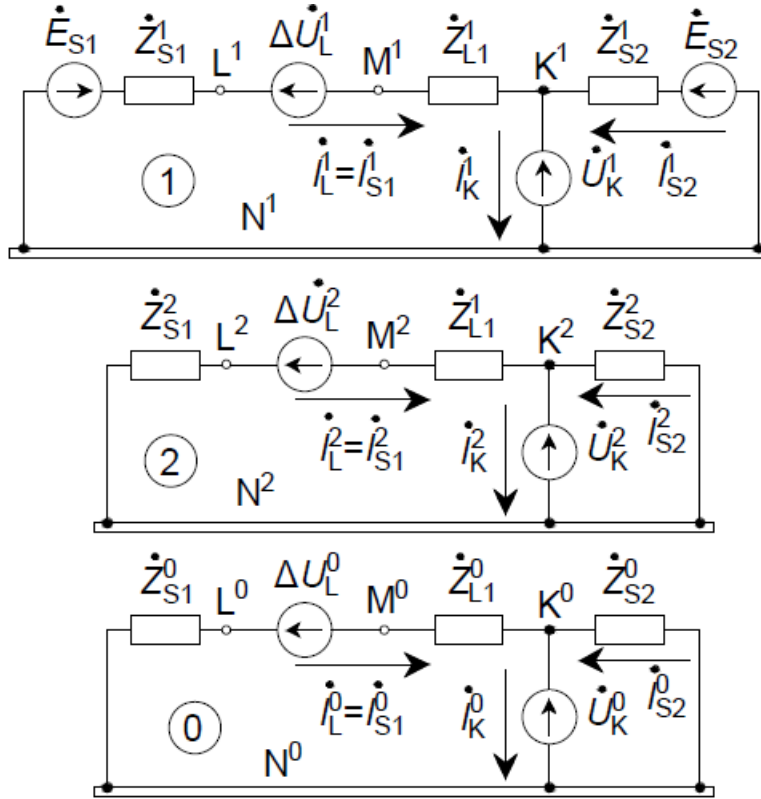
8.1. att. Vienlaicīga vispārīga garennesimetrija starp punktiem L un M un vispārīga šķērsnesimetrija punktā K divpusēji barotā tīklā.

Turklāt pieņemts, ka abas nesimetrijas ir vispārīgas $0 < \dot{Z}_{LA} \neq \dot{Z}_{LB} \neq \dot{Z}_{LC} < \infty \Omega$, $0 < \dot{Z}_{KA} \neq \dot{Z}_{KB} \neq \dot{Z}_{KC} < \infty \Omega$, $0 < \dot{Z}_{KN} < \infty \Omega$. Analīzes shēma fāžu koordinātās vienlaicīgas vispārīgas garennesimetrijas un šķērsnesimetrijas rašanās gadījumā parādīta 8.2. attēlā.



8.2. att. Vienlaicīgas vispārīgas garennesimetrijas starp punktiem L un M un vispārīgas šķērsnesimetrijas punktā K analīzes shēma fāžu koordinātās, nesimetrijām rodas dažādos divpusēji barota tīkla punktos.

Abām nesimetrijas vietām joprojām ir spēkā vienādojumu sistēmas (6.4.) un (7.2.), bet šajā gadījumā tālāka tīkla shēmas ekvivalentēšana jau atšķiras no vienas nesimetrijas rašanās gadījumiem, jo jāievēro ne vien katra nesimetrija, bet arī to savstarpējā mijiedarbība. Konkrētajam piemēram atbilstošas atsevišķās secību aizvietošanas shēmas, ievērojot abas nesimetrijas ar papildu EDS avotiem, parādītas 8.3. attēlā.



8.3. att. Vienlaicīgas vispārīgas garnessimetrijas starp punktiem L un M un vispārīgas šķērsnesimetrijas punktā K secību aizvietošanas shēmas, nesimetrijām rodoties dažādos divpusēji barota tīkla punktos.

Ir iespējams veikt 8.3. attēlā redzamo TS, PS un NS aizvietošanas shēmu topoloģisko režīma parametru skaitlisko aprēķinu, kurā starp tuvinājuma soļiem pārrēķina šo nesimetriju reprezentācijai ieviesto papildu EDS avotu $\Delta\dot{U}_L^1, \Delta\dot{U}_L^2, \Delta\dot{U}_L^0, \dot{U}_K^1, \dot{U}_K^2, \dot{U}_K^0$ vērtības. Balstoties uz 6. un 7. nodaļā ietverto analīzi, var secināt, ka trīs secību aizvietošanas shēmu ekvivalentēšanas vienas nesimetrijas gadījumā dod trīs vienādojumus, kas kopā ar (6.4.) un (7.2.) dod deviņus vienādojumus. Savukārt katra nesimetrija ievieš sešus nezināmos, kas kopā aplūkotajā scenārijā dod divpadsmit nezināmos: $\Delta\dot{U}_L^1, \Delta\dot{U}_L^2, \Delta\dot{U}_L^0, \dot{I}_L^1, \dot{I}_L^2, \dot{I}_L^0, \dot{U}_K^1, \dot{U}_K^2, \dot{U}_K^0, \dot{I}_K^1, \dot{I}_K^2, \dot{I}_K^0$. Šajā situācijā palīdz tas, ka secību aizvietošanas shēmas tagad satur abu bojājumu ieviestos papildu EDS avotus, kuri tādēļ ir funkcionāli saistīti, kas ļauj uzrakstīt nepieciešamos trīs vienādojumus. Saprotams, ka arī šajā gadījumā pie ievērojamām pārejas pretestībām atsevišķu secību aizvietošanas shēmu kopējam skaitliskam risinājumam pastāv konverģences problēmu risks.

Analītiskam risinājumam nepieciešamos sešus vienādojumus no secību aizvietošanas shēmām iespējams iegūt, veicot pa vienai ekvivalentēšanai attiecībā pret katru nesimetrijas vietu, kas vienlaikus radīs saiti starp abām nesimetrijām, nodrošinot to savstarpējās mijiedarbības ievērošanu. Vispirms var parādīt ekvivalentēšanu attiecībā pret šķērsnesimetrijas punktiem $K^1-N^1, K^2-N^2, K^0-N^0$:

$$\dot{E}_{K\Sigma}^1 = [(\dot{E}_{S1} - \Delta\dot{U}_L^1)\dot{Z}_{S2}^1 + \dot{E}_{S2}(\dot{Z}_{S1}^1 + \dot{Z}_{L1}^1)]/(\dot{Z}_{S1}^1 + \dot{Z}_{S2}^1 + \dot{Z}_{L1}^1), \quad (8.1.)$$

$$\dot{Z}_{K\Sigma}^1 = [\dot{Z}_{S2}^1(\dot{Z}_{S1}^1 + \dot{Z}_{L1}^1)]/(\dot{Z}_{S1}^1 + \dot{Z}_{S2}^1 + \dot{Z}_{L1}^1), \quad (8.2.)$$

$$\dot{E}_{K\Sigma}^2 = -\Delta\dot{U}_L^2\dot{Z}_{S2}^2/(\dot{Z}_{S1}^2 + \dot{Z}_{S2}^2 + \dot{Z}_{L1}^1), \quad (8.3.)$$

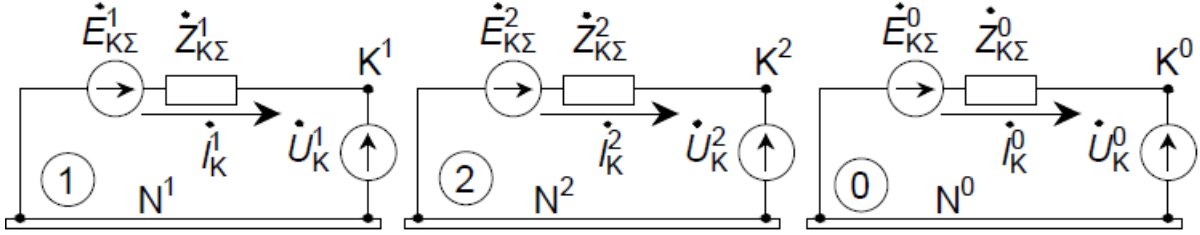
$$\dot{Z}_{K\Sigma}^2 = [\dot{Z}_{S2}^2(\dot{Z}_{S1}^2 + \dot{Z}_{L1}^1)]/(\dot{Z}_{S1}^2 + \dot{Z}_{S2}^2 + \dot{Z}_{L1}^1), \quad (8.4.)$$

$$\dot{E}_{K\Sigma}^0 = -\Delta\dot{U}_L^0\dot{Z}_{S2}^0/(\dot{Z}_{S1}^0 + \dot{Z}_{S2}^0 + \dot{Z}_{L1}^0), \quad (8.5.)$$

$$\dot{Z}_{K\Sigma}^0 = [\dot{Z}_{S2}^0(\dot{Z}_{S1}^0 + \dot{Z}_{L1}^0)]/(\dot{Z}_{S1}^0 + \dot{Z}_{S2}^0 + \dot{Z}_{L1}^0), \quad (8.6.)$$

kur $\dot{Z}_{L1}^1, \dot{Z}_{L1}^0$ – sistēmas S1 un S2 savienojās EPL TS un NS pilnās pretestības, Ω .

Atbilstoši (8.1.)–(8.6.) iegūstamas rezultējošās secību aizvietošanas shēmas attiecībā pret šķērsnesimetrijas punktiem ar EDS avotiem visu secību Tevenena ekvivalentos (8.4. att.).



8.4. att. Vairāku vienlaicīgu nesimetriju rezultējošās secību aizvietošanas shēmas ar tīkla Tevenena ekvivalentiem, ekvivalentējot attiecībā pret šķērsnesimetrijas punktiem.

No 8.4. attēlā redzamajām rezultējošajām secību aizvietošanas shēmām iespējams iegūt nedaudz vispārīgāku vienādojumu sistēmas (6.9.) variantu:

$$\begin{cases} \dot{U}_K^1 = \dot{E}_{K\Sigma}^1 - \dot{Z}_{K\Sigma}^1 \dot{I}_K^1. \\ \dot{U}_K^2 = \dot{E}_{K\Sigma}^2 - \dot{Z}_{K\Sigma}^2 \dot{I}_K^2. \\ \dot{U}_K^0 = \dot{E}_{K\Sigma}^0 - \dot{Z}_{K\Sigma}^0 \dot{I}_K^0. \end{cases} \quad (8.7.)$$

Kā paskaidrots iepriekš, ir jāveic ekvivalentēšana attiecībā pret abu nesimetriju punktiem. Tādēļ turpinājumā tiks parādīta ekvivalentēšana attiecībā pret garennesimetrijas punktiem $L^1-M^1, L^2-M^2, L^0-M^0$, vispirms apvienojot šķērsnesimetrijas EDS un S2 zarus:

$$\dot{E}_{KS2}^1 = (\dot{U}_K^1 \dot{Z}_{S2}^1 + \dot{E}_{S2}^1 \cdot 0)/(\dot{Z}_{S2}^1) = \dot{U}_K^1, \quad (8.8.)$$

$$\dot{E}_{L\Sigma}^1 = \dot{E}_{S1} - \dot{E}_{KS2}^1 = \dot{E}_{S1} - \dot{U}_K^1, \quad (8.9.)$$

$$\dot{Z}_{L\Sigma}^1 = \dot{Z}_{S1} + \dot{Z}_{L1} + \dot{Z}_{KS2}^1 = \dot{Z}_{S1} + \dot{Z}_{L1}, \quad (8.10.)$$

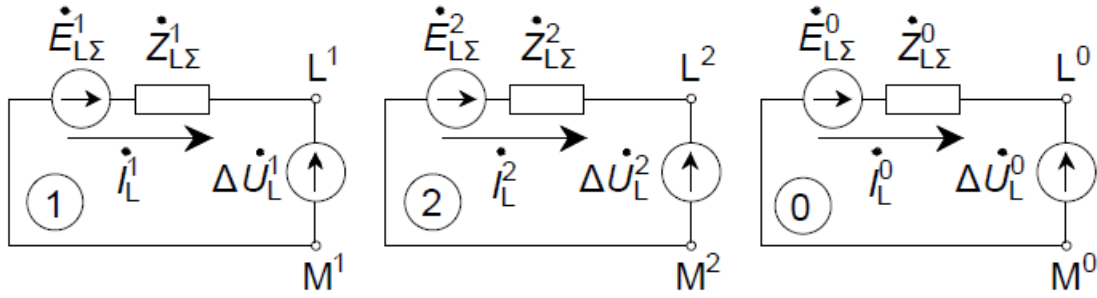
$$\dot{E}_{L\Sigma}^2 = -\dot{E}_{KS2}^2 = -\dot{U}_K^2, \quad (8.11.)$$

$$\dot{Z}_{L\Sigma}^2 = \dot{Z}_{S1} + \dot{Z}_{L1}, \quad (8.12.)$$

$$\dot{E}_{L\Sigma}^0 = -\dot{E}_{KS2}^0 = -\dot{U}_K^0, \quad (8.13.)$$

$$\dot{Z}_{L\Sigma}^0 = \dot{Z}_{S1} + \dot{Z}_{L1}. \quad (8.14.)$$

Augstāk pretestība $\dot{Z}_{KS2}^1 = 0 \Omega$, jo aplūkotajiem šķērsnesimetrijas papildu EDS avotu zariem analītiskā aprēķina gadījumā nav prasības nodrošināt pretestību, kuras vērtība būtu lielāka par 0Ω . Atbilstoši (8.8.)–(8.14.) iegūstamas rezultējošās secību aizvietošanas shēmas attiecībā pret garennesimetrijas punktiem ar EDS avotiem visu secību Tevenena ekvivalentos (8.5. att.).



8.5. att. Vairāku vienlaicīgu nesimetriju rezultējošās secību aizvietošanas shēmas ar tīkla Tevenena ekvivalentiem, ekvivalentējot attiecībā pret garensimetrijas punktiem.

No 8.5. attēlā redzamajām rezultējošajām secību aizvietošanas shēmām iespējams iegūt nedaudz vispārīgāku vienādojumu sistēmas (7.7.) variantu:

$$\begin{cases} \Delta \dot{U}_L^1 = \dot{E}_{L\Sigma}^1 - \dot{Z}_{L\Sigma}^1 i_L^1. \\ \Delta \dot{U}_L^2 = \dot{E}_{L\Sigma}^2 - \dot{Z}_{L\Sigma}^2 i_L^2. \\ \Delta \dot{U}_L^0 = \dot{E}_{L\Sigma}^0 - \dot{Z}_{L\Sigma}^0 i_L^0. \end{cases} \quad (8.15.)$$

Turpinājumā iespējams pielīdzināt (8.7.) un (8.15.) vienādojumiem (6.4.) un (7.2.), kas dod (6.10.) un (7.8.) līdzīgas vienādojumu sistēmas, un tad var summāros nesimetriju EDS aizvietot ar izteiksmēm (8.1.), (8.3.), (8.5.), (8.9.), (8.11.) un (8.13.):

$$\begin{aligned} & \left\{ \begin{aligned} & i_{KA}^1 ([\dot{Z}_{KA} + \dot{Z}_{KB} + \dot{Z}_{KC}]/3 + \dot{Z}_{K\Sigma}^1) + i_{KA}^2 ([\dot{Z}_{KA} + a^2 \dot{Z}_{KB} + a \dot{Z}_{KC}]/3) + \\ & i_{KA}^1 ([\dot{Z}_{KA} + a \dot{Z}_{KB} + a^2 \dot{Z}_{KC}]/3) + i_{KA}^2 ([\dot{Z}_{KA} + \dot{Z}_{KB} + \dot{Z}_{KC}]/3 + \dot{Z}_{K\Sigma}^2) + \\ & i_{KA}^1 ([\dot{Z}_{KA} + a^2 \dot{Z}_{KB} + a \dot{Z}_{KC}]/3) + i_{KA}^2 ([\dot{Z}_{KA} + a \dot{Z}_{KB} + a^2 \dot{Z}_{KC}]/3) + \\ & + i_{KA}^0 ([\dot{Z}_{KA} + a \dot{Z}_{KB} + a^2 \dot{Z}_{KC}]/3) = \dot{E}_{KA\Sigma}^1 = \\ & + i_{KA}^0 ([\dot{Z}_{KA} + a^2 \dot{Z}_{KB} + a \dot{Z}_{KC}]/3) = \dot{E}_{KA\Sigma}^2 = \\ & + i_{KA}^0 ([\dot{Z}_{KA} + \dot{Z}_{KB} + \dot{Z}_{KC} + 9\dot{Z}_{KN}]/3 + \dot{Z}_{K\Sigma}^0) = \dot{E}_{KA\Sigma}^0 = \\ & = \frac{[\dot{E}_{S1A} \dot{Z}_{S2}^1 + \dot{E}_{S2A} (\dot{Z}_{S1}^1 + \dot{Z}_{L1}^1)]}{(\dot{Z}_{S1}^1 + \dot{Z}_{S2}^1 + \dot{Z}_{L1}^1)} - \frac{\Delta \dot{U}_{LA}^1 \dot{Z}_{S2}^1}{(\dot{Z}_{S1}^1 + \dot{Z}_{S2}^1 + \dot{Z}_{L1}^1)}, \\ & = - \frac{\Delta \dot{U}_{LA}^2 \dot{Z}_{S2}^2}{(\dot{Z}_{S1}^2 + \dot{Z}_{S2}^2 + \dot{Z}_{L1}^2)}, \\ & = - \frac{\Delta \dot{U}_{LA}^0 \dot{Z}_{S2}^0}{(\dot{Z}_{S1}^0 + \dot{Z}_{S2}^0 + \dot{Z}_{L1}^0)}, \end{aligned} \right. \quad (8.16.) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left\{ \begin{aligned} & i_{LA}^1 ([\dot{Z}_{LA} + \dot{Z}_{LB} + \dot{Z}_{LC}]/3 + \dot{Z}_{L\Sigma}^1) + i_{LA}^2 ([\dot{Z}_{LA} + a^2 \dot{Z}_{LB} + a \dot{Z}_{LC}]/3) + \\ & i_{LA}^1 ([\dot{Z}_{LA} + a \dot{Z}_{LB} + a^2 \dot{Z}_{LC}]/3) + i_{LA}^2 ([\dot{Z}_{LA} + \dot{Z}_{LB} + \dot{Z}_{LC}]/3 + \dot{Z}_{L\Sigma}^2) + \\ & i_{LA}^1 ([\dot{Z}_{LA} + a^2 \dot{Z}_{LB} + a \dot{Z}_{LC}]/3) + i_{LA}^2 ([\dot{Z}_{LA} + a \dot{Z}_{LB} + a^2 \dot{Z}_{LC}]/3) + \\ & + i_{LA}^0 ([\dot{Z}_{LA} + a \dot{Z}_{LB} + a^2 \dot{Z}_{LC}]/3) = \dot{E}_{LA\Sigma}^1 = \dot{E}_{S1A} - \dot{U}_K^1. \\ & + i_{LA}^0 ([\dot{Z}_{LA} + a^2 \dot{Z}_{LB} + a \dot{Z}_{LC}]/3) = \dot{E}_{LA\Sigma}^2 = -\dot{U}_K^2. \\ & + i_{LA}^0 ([\dot{Z}_{LA} + \dot{Z}_{LB} + \dot{Z}_{LC}]/3 + \dot{Z}_{L\Sigma}^0) = \dot{E}_{LA\Sigma}^0 = -\dot{U}_K^0. \end{aligned} \right. \quad (8.17.) \end{aligned}$$

Pirms izveduma turpinājuma pieraksta vienkāršošanai un uzskatāmībai ieviesīsim jau pazīstamos nesimetriju pārejas pretestību kombināciju apzīmējumus $\dot{Z}_{KABC1} = \dot{Z}_{KA} + \dot{Z}_{KB} + \dot{Z}_{KC}$, $\dot{Z}_{KABC2} = \dot{Z}_{KA} + a \dot{Z}_{KB} + a^2 \dot{Z}_{KC}$, $\dot{Z}_{KABC3} = \dot{Z}_{KA} + a^2 \dot{Z}_{KB} + a \dot{Z}_{KC}$, $\dot{Z}_{LABC1} = \dot{Z}_{LA} +$

$\dot{Z}_{LB} + \dot{Z}_{LC}, \dot{Z}_{LABC2} = \dot{Z}_{LA} + \dot{a}\dot{Z}_{LB} + \dot{a}^2\dot{Z}_{LC}, \dot{Z}_{LABC3} = \dot{Z}_{LA} + \dot{a}^2\dot{Z}_{LB} + \dot{a}\dot{Z}_{LC}$, un apzīmēsim arī brīvo elementu $EZ_{S1S2} = [\dot{E}_{S1A}\dot{Z}_{S2}^1 + \dot{E}_{S2A}(\dot{Z}_{S1}^1 + \dot{Z}_{L1}^1)]/(\dot{Z}_{S1}^1 + \dot{Z}_{S2}^1 + \dot{Z}_{L1}^1)$ un reizinātājus $ZZ_1 = \dot{Z}_{S2}^1/(\dot{Z}_{S1}^1 + \dot{Z}_{S2}^1 + \dot{Z}_{L1}^1), ZZ_2 = \dot{Z}_{S2}^2/(\dot{Z}_{S1}^2 + \dot{Z}_{S2}^2 + \dot{Z}_{L1}^1), ZZ_0 = \dot{Z}_{S2}^0/(\dot{Z}_{S1}^0 + \dot{Z}_{S2}^0 + \dot{Z}_{L1}^0)$. Izmantojot ieviestos apzīmējums, iespējams uzskatāmāk veikt (8.16.)

un (8.17.) labajās pusēs redzamo nesimetrijas papildu EDS avotu $\Delta\dot{U}_{LA}^1, \Delta\dot{U}_{LA}^2, \Delta\dot{U}_{LA}^0, \dot{U}_{KA}^1,$

$\dot{U}_{KA}^2, \dot{U}_{KA}^0$ aizvietošanu ar (6.4.) un (7.2.):

$$\begin{aligned}
& i_{KA}^1([\dot{Z}_{KABC1}/3] + \dot{Z}_{K\Sigma}^1) + (i_{KA}^2\dot{Z}_{KABC3}/3) + (i_{KA}^0\dot{Z}_{KABC2}/3) = \\
& (i_{KA}^1\dot{Z}_{KABC2}/3) + i_{KA}^2([\dot{Z}_{KABC1}/3] + \dot{Z}_{K\Sigma}^2) + (i_{KA}^0\dot{Z}_{KABC3}/3) = \\
& (i_{KA}^1\dot{Z}_{KABC3}/3) + (i_{KA}^2\dot{Z}_{KABC2}/3) + i_{KA}^0([\dot{Z}_{KABC1} + 9\dot{Z}_{KN}]/3) + \dot{Z}_{K\Sigma}^0 = \\
& i_{LA}^1([\dot{Z}_{LABC1}/3] + \dot{Z}_{L\Sigma}^1) + (i_{LA}^2\dot{Z}_{LABC3}/3) + (i_{LA}^0\dot{Z}_{LABC2}/3) = \\
& (i_{LA}^1\dot{Z}_{LABC2}/3) + i_{LA}^2([\dot{Z}_{LABC1}/3] + \dot{Z}_{L\Sigma}^2) + (i_{LA}^0\dot{Z}_{LABC3}/3) = \\
& (i_{LA}^1\dot{Z}_{LABC3}/3) + (i_{LA}^2\dot{Z}_{LABC2}/3) + i_{LA}^0([\dot{Z}_{LABC1}/3] + \dot{Z}_{L\Sigma}^0) = \\
& = EZ_{S1S2} - ZZ_1[(i_{LA}^1\dot{Z}_{LABC1}/3) + (i_{LA}^2\dot{Z}_{LABC3}/3) + (i_{LA}^0\dot{Z}_{LABC2}/3)] \\
& = -ZZ_2[(i_{LA}^1\dot{Z}_{LABC2}/3) + (i_{LA}^2\dot{Z}_{LABC1}/3) + (i_{LA}^0\dot{Z}_{LABC3}/3)] \\
& = -ZZ_0[(i_{LA}^1\dot{Z}_{LABC3}/3) + (i_{LA}^2\dot{Z}_{LABC2}/3) + (i_{LA}^0\dot{Z}_{LABC1}/3)] \\
& = \dot{E}_{S1A} - [(i_{KA}^1\dot{Z}_{KABC1}/3) + (i_{KA}^2\dot{Z}_{KABC3}/3) + (i_{KA}^0\dot{Z}_{KABC2}/3)] \\
& = -[(i_{KA}^1\dot{Z}_{KABC2}/3) + (i_{KA}^2\dot{Z}_{KABC1}/3) + (i_{KA}^0\dot{Z}_{KABC3}/3)] \\
& = -[(i_{KA}^1\dot{Z}_{KABC3}/3) + (i_{KA}^2\dot{Z}_{KABC2}/3) + i_{KA}^0([\dot{Z}_{KABC1} + 9\dot{Z}_{KN}]/3)].
\end{aligned} \tag{8.18.}$$

Turpinājumā var pārnest nesimetrijas aprakstošās A fāzes strāvas simetriskās komponentes (8.18.) kreisajā pusē un ienest iekavās pretestību elementus ZZ_1, ZZ_2, ZZ_0 , un iznest pirms iekavām reizinātāju (1/3), kas kopā ļauj iegūt vienādojumu sistēmu, ko apraksta matricu formas pieraksts:

$$A_{KL}I_{KL}^S = B_{KL}, \tag{8.19.}$$

kur A_{KL} – vienlaicīgas šķērsnesimetrijas un garensimetrijas pretestības koeficientu matrica, Ω ;

I_{KL}^S – vienlaicīgas šķērsnesimetrijas un garensimetrijas rašanās vietās plūstošo aprēķina fāzes strāvu TS, PS un NS komponentu vektors, A;

B_{KL} – vienlaicīgas šķērsnesimetrijas un garensimetrijas brīvo mainīgo vektors, V.

Vienādojumu sistēmā (8.19.) izmantojamās matricas iespējams parādīt, balstoties uz (8.18.) vienādojumu sistēmu un iepriekš minētajiem pārveidojumiem. Iesākumā var parādīt pretestību koeficientu matricu A_{KL} ar izmēriem 6x6, kas apjoma dēļ sadalīta kolonnās:

$$A_{KL} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \dot{Z}_{KABC1} + 3\dot{Z}_{K\Sigma}^1 & \dot{Z}_{KABC3} & \dot{Z}_{KABC2} \\ \dot{Z}_{KABC2} & \dot{Z}_{KABC1} + 3\dot{Z}_{K\Sigma}^2 & \dot{Z}_{KABC3} \\ \dot{Z}_{KABC3} & \dot{Z}_{KABC2} & \dot{Z}_{KABC1} + 9\dot{Z}_{KN} + 3\dot{Z}_{K\Sigma}^0 \\ \dot{Z}_{KABC1} & \dot{Z}_{KABC3} & \dot{Z}_{KABC2} \\ \dot{Z}_{KABC2} & \dot{Z}_{KABC1} & \dot{Z}_{KABC3} \\ \dot{Z}_{KABC3} & \dot{Z}_{KABC2} & \dot{Z}_{KABC1} + 9\dot{Z}_{KN} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}
ZZ_1 \dot{Z}_{LABC1} & ZZ_1 \dot{Z}_{LABC3} & ZZ_1 \dot{Z}_{LABC2} \\
ZZ_2 \dot{Z}_{LABC2} & ZZ_2 \dot{Z}_{LABC1} & ZZ_2 \dot{Z}_{LABC3} \\
ZZ_0 \dot{Z}_{LABC3} & ZZ_0 \dot{Z}_{LABC2} & ZZ_0 \dot{Z}_{LABC1} \\
\dot{Z}_{LABC1} + 3\dot{Z}_{L\Sigma}^1 & \dot{Z}_{LABC3} & \dot{Z}_{LABC2} \\
\dot{Z}_{LABC2} & \dot{Z}_{LABC1} + 3\dot{Z}_{L\Sigma}^2 & \dot{Z}_{LABC3} \\
\dot{Z}_{LABC3} & \dot{Z}_{LABC2} & \dot{Z}_{LABC1} + 3\dot{Z}_{L\Sigma}^0
\end{bmatrix}. \quad (8.20.)$$

Tālāk tiks parādīts šķērsnesimetrijas un garennesimetrijas A fāzes strāvas simetrisko komponentu jeb nezināmo vektors I_{KL}^S :

$$I_{KL}^S = \begin{bmatrix} i_{KA}^1 \\ i_{KA}^2 \\ i_{KA}^0 \\ i_{LA}^1 \\ i_{LA}^2 \\ i_{LA}^0 \end{bmatrix}. \quad (8.21.)$$

Savukārt brīvo mainīgo vektors B_{KL} būs šādā formā:

$$B_{KL} = \begin{bmatrix} EZ_{S1S2} \\ 0 \\ 0 \\ \dot{E}_{S1A} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (8.22.)$$

Atrisinot vienādojumu sistēmu (8.19.), ir iegūstamas A fāzes strāvas simetriskās komponentes abās nesimetrijas vietās: i_{KA}^1 , i_{KA}^2 , i_{KA}^0 , i_{LA}^1 , i_{LA}^2 , i_{LA}^0 . Tālāk jānosaka garennesimetrijas A fāzes sprieguma krituma un šķērsnesimetrijas A fāzes sprieguma simetriskās komponentes. Viens no potenciālajiem risinājumiem ir izmantot 8.3. attēla aizvietošanas shēmas, lai, aprēķinot sprieguma kritumus sistēmu un līnijas pretestībās, aprēķinātu sprieguma simetrisko komponentu vērtības. Otrs variants ir apvienot (8.7.) un (8.15.), ņemot vērā, ka summārie EDS avoti satur otras nesimetrijas ievērošanai ieviestos EDS avotus:

$$\begin{cases}
\Delta \dot{U}_L^1 = \dot{E}_{L\Sigma}^1 - \dot{Z}_{L\Sigma}^1 i_L^1 = \dot{E}_{S1} - \dot{U}_K^1 - \dot{Z}_{L\Sigma}^1 i_L^1 = \dot{E}_{S1} - (\dot{E}_{K\Sigma}^1 - \dot{Z}_{K\Sigma}^1 i_K^1) - \dot{Z}_{L\Sigma}^1 i_L^1 \\
\Delta \dot{U}_L^2 = \dot{E}_{L\Sigma}^2 - \dot{Z}_{L\Sigma}^2 i_L^2 = -\dot{U}_K^2 - \dot{Z}_{L\Sigma}^2 i_L^2 = -(\dot{E}_{K\Sigma}^2 - \dot{Z}_{K\Sigma}^2 i_K^2) - \dot{Z}_{L\Sigma}^2 i_L^2 \\
\Delta \dot{U}_L^0 = \dot{E}_{L\Sigma}^0 - \dot{Z}_{L\Sigma}^0 i_L^0 = -\dot{U}_K^0 - \dot{Z}_{L\Sigma}^0 i_L^0 = -(\dot{E}_{K\Sigma}^0 - \dot{Z}_{K\Sigma}^0 i_K^0) - \dot{Z}_{L\Sigma}^0 i_L^0
\end{cases} \Rightarrow$$

$$\begin{cases}
\Delta \dot{U}_L^1 = \dot{E}_{S1} - (EZ_{S1S2} - \Delta \dot{U}_L^1 ZZ_1) + \dot{Z}_{K\Sigma}^1 i_K^1 - \dot{Z}_{L\Sigma}^1 i_L^1 \\
\Delta \dot{U}_L^2 = -(-\Delta \dot{U}_L^2 ZZ_2) + \dot{Z}_{K\Sigma}^2 i_K^2 - \dot{Z}_{L\Sigma}^2 i_L^2 \\
\Delta \dot{U}_L^0 = -(-\Delta \dot{U}_L^0 ZZ_0) + \dot{Z}_{K\Sigma}^0 i_K^0 - \dot{Z}_{L\Sigma}^0 i_L^0
\end{cases} \Rightarrow$$

$$\begin{cases}
\Delta \dot{U}_L^1 = (\dot{E}_{S1} - EZ_{S1S2} + \dot{Z}_{K\Sigma}^1 i_K^1 - \dot{Z}_{L\Sigma}^1 i_L^1) / (1 - ZZ_1). \\
\Delta \dot{U}_L^2 = (\dot{Z}_{K\Sigma}^2 i_K^2 - \dot{Z}_{L\Sigma}^2 i_L^2) / (1 - ZZ_2). \\
\Delta \dot{U}_L^0 = (\dot{Z}_{K\Sigma}^0 i_K^0 - \dot{Z}_{L\Sigma}^0 i_L^0) / (1 - ZZ_0).
\end{cases} \quad (8.23.)$$

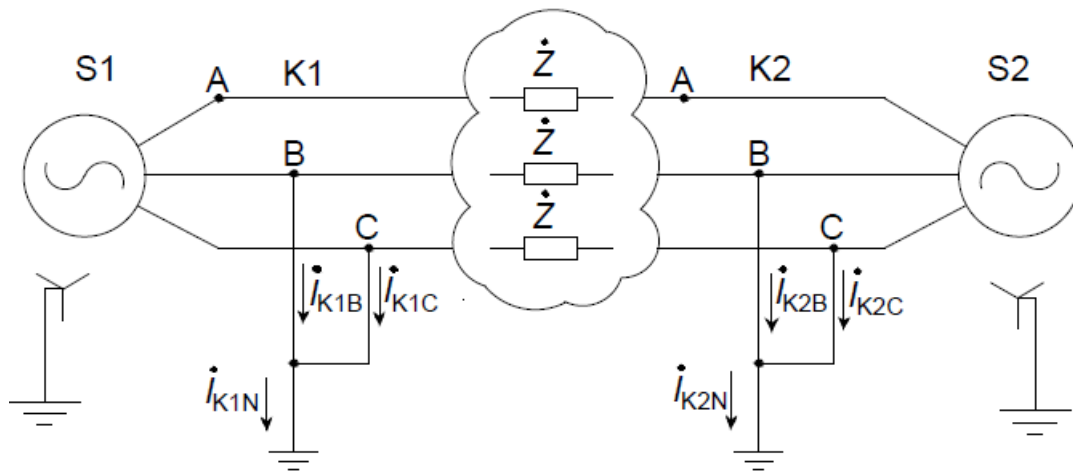
No (8.23.) var noteikt garennesimetrijas A fāzes sprieguma krituma simetriskās komponentes, kuras tālāk ievieto (8.1.), (8.3.) un (8.5.), lai iegūtu šķērsnesimetrijas rezultējošo aizvietošanas shēmu summāros EDS. Šie EDS ļauj viegli noteikt šķērsnesimetrijas A fāzes sprieguma simetriskās komponentes, izmantojot vienādojumu sistēmu (8.7.).

Izmantojot parādīto analīzi kā paraugu, iespējams iegūt analītiskus risinājumus divu vienlaicīgu šķērsnesimetriju vai garennesimetriju, kā arī vēl vairāku vienlaicīgu nesimetriju rašanās gadījumos, ja ievērots nosacījums, ka nebojāto tīkla elementu aizvietošanas shēmu parametri saglabājas lineāri. No parādītā izveduma var secināt arī to, ka šāds risinājums ir viegli īstenojams vienīgi vienkāršu tīklu gadījumos, kas ir raksturīgi mācību uzdevumiem.

Rodoties vienlaicīgiem nesimetriskiem bojājumiem bez pārejas pretestībām, dažos gadījumos (piemēram, divi vienlaicīgi metāliski vienfāzes īsslēgumi, vienlaikus radies metālisks vienfāzes īsslēgums un vienfāzes pārrāvums bez pārejas pretestībām veselajās fāzēs) zinātniekiem ir izdevies iegūt analītiskas formulas nesimetrijas vietas aprēķina fāzes strāvu un spriegumu simetrisko komponentu aprēķinam, izmantojot bojājumu robežnosacījumus, līdzīgi kā tas tika parādīts 6. un 7. nodaļā [14]. Režīma parametru aprēķina gaitā secību aizvietošanas shēmas tiek modificētas zvaigznes slēguma formā, ko sākotnēji ieteica darīt [9], bet arī šis paņēmieni ir praktisks galvenokārt vienkāršām tīkla konfigurācijām. Ievērojamu apjomu ar sarežģīto bojājumu analītiskiem risinājumiem ir ieguvuši arī S. Losevs un A. Čerņins [4], [92], [93] un, balstoties uz šiem darbiem, ir parādīti daudzi analītisku aprēķinu piemēri grāmatā [5]. Vienlaikus jāmin, ka, analizētajam tīklam kļūstot sarežģītākam, ieteicams izmantot topoloģiskas aprēķinu metodes, kuras tiks aprakstītas 8.2. apakšnodaļā.

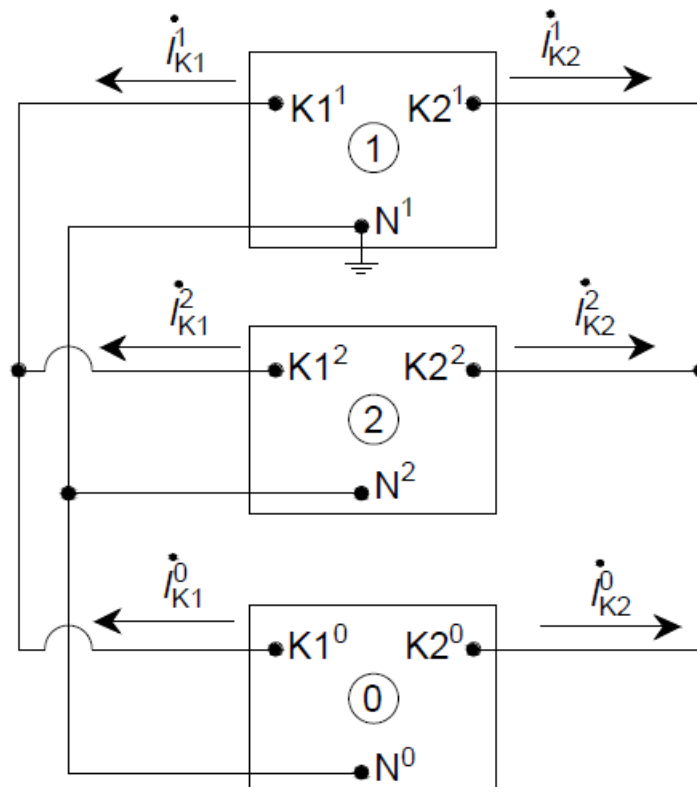
8.2. Elektriskās sistēmas režīmu parametru topoloģiskā aprēķinu metode vairāku vienlaicīgu nesimetriju rašanās gadījumos

Grāmatās [3] un [9] norādīts, ka vispārīgā gadījumā, rodoties vienlaicīgām šķērsnesimetrijām un/vai garennesimetrijām, ir iespējams izmantot kompleksās aizvietošanas shēmas topoloģiskajam režīma parametru aprēķinam, bet, lai nodrošinātu pareizu strāvu sadalījumu tīklā un bojājumu mijiedarbību, jāizmanto ideāli transformatori, savienojot secību aizvietošanas shēmas. Minētajā risinājuma paņēmienā viena no nesimetrijām tiek ievērota ar tiešiem elektriskiem savienojumiem, kā tas parādīts 6. un 7. nodaļā redzamajās kompleksajās aizvietošanas shēmās, bet pārējos bojājumus ievēro, starp secību aizvietošanas shēmām ieslēdzot ideālos transformatorus. Eksistē atsevišķi gadījumi, kuros var īstenot komplekso aizvietošanas shēmu bez ideālajiem transformatoriem, rodoties divām vienlaicīgām nesimetrijām. Minētajos gadījumos spriegumam starp kādu no abu nesimetriju punktiem jābūt 0 V un abām nesimetrijām jābūt vienādei aprēķina fāzei [3], piemēram, diviem īsslēgumiem secību aizvietošanas shēmu neitrāles sakrīt, kas ļauj aplūkot trīs nesimetrijas punktus četrus vietā. Viens no šādiem gadījumiem ir vienlaikus radušies divi metāliski divfāžu īsslēgumi uz zemi (8.6. att.). Starp abiem nesimetrijas punktiem parādītais mākonis apzīmē simetrisku tīkla daļu ar saišu elementiem (katrā fāzē atainoti ar fāzes ekvivalento pretestību Z), **ieskaitot potenciālus apejas ceļus starp abām sistēmām, kas ir iekļauta starp bojājumiem, lai norādītu, ka abi bojājumi var būt dažādos analizējamā tīkla punktos.**



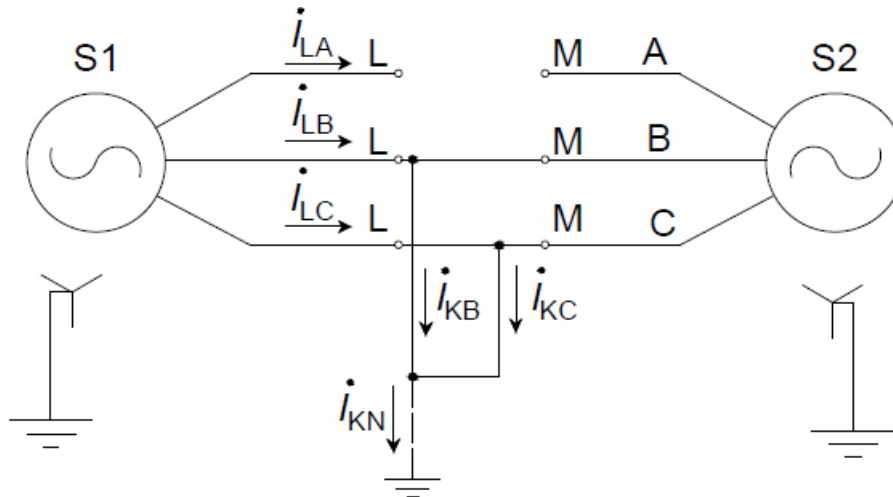
8.6. att. Divi vienlaicīgi divfāžu īsslēgumi uz zemi divpusēji barotā tīklā.

Rodoties 8.6. attēlā redzamajiem īsslēgumiem, iespējams izmantot 8.7. attēlā parādīto komplekso aizvietošanas shēmu. Šajā kompleksajā aizvietošanas shēmā četrstūri vispārīgā veidā apzīmē secību aizvietošanas shēmas (piemēram, 8.3. att.), kuru struktūra var atšķirties, bet secību aizvietošanas shēmu savstarpējie savienojumi starp nesimetrijas punktiem saglabāsies neatkarīgi no paša tīkla konfigurācijas, kamēr tiek analizēts viens un tas pats bojājuma veids.



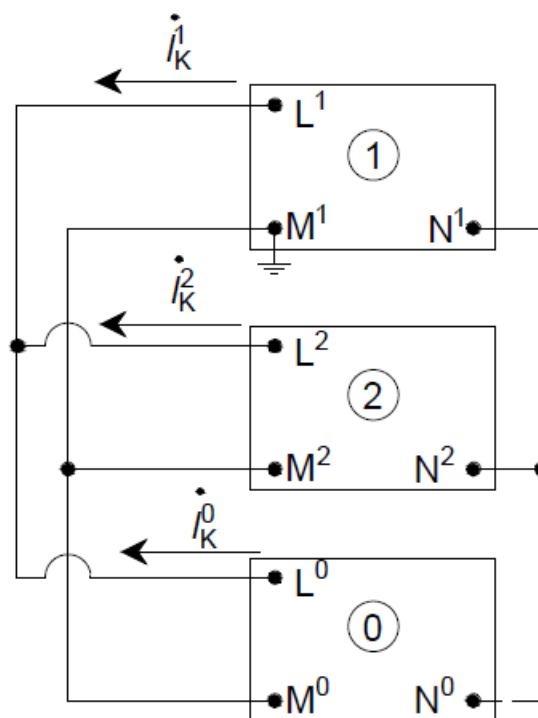
8.7. att. Kompleksā aizvietošanas shēma, rodoties vienlaikus diviem divfāžu īsslēgumiem uz zemi sakrītošās fāzēs abiem īsslēgumiem [3].

Otrs šāds gadījums, kuram [3] parādīta kompleksā aizvietošanas shēma, ir vienlaicīga vienfāzes pārrāvuma un metāliska divfāžu īsslēguma vai metāliska divfāžu īsslēguma uz zemi rašanās vienā un tajā pašā tīkla punktā (8.8. att.). Šajā gadījumā īsslēguma punkts K sakrīt ar pārrāvuma punktu L.



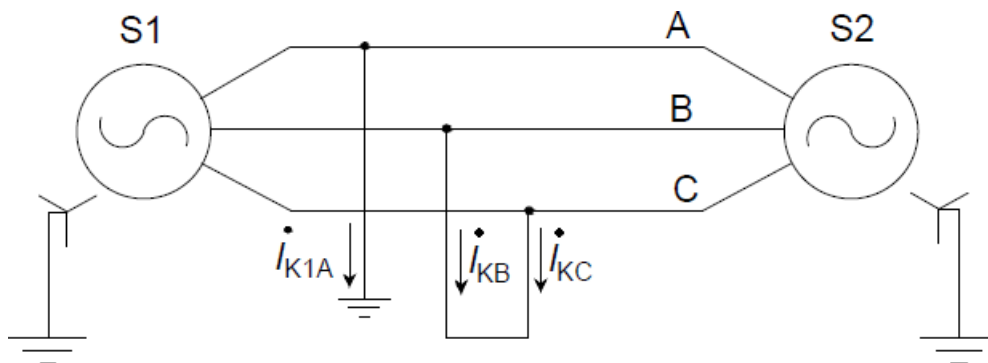
8.8. att. Vienfāzes pārrāvums un divfāžu īsslēgums vai divfāžu īsslēgums uz zemi vienā punktā divpusēji barotā tīklā.

Rodoties šādiem bojājumiem, iespējams lietot 8.9. attēlā redzamo komplekso aizvietošanas shēmu, kur ar raustīto līniju attēlotais savienojums jāizmanto, ja divfāžu īsslēgumam ir kontakts ar zemi.



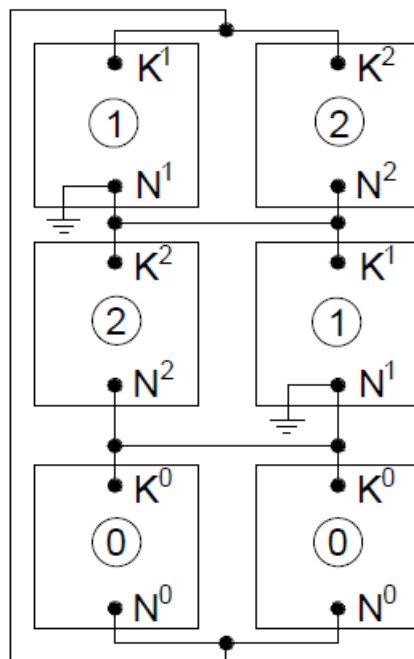
8.9. att. Kompleksā aizvietošanas shēma, rodoties vienfāzes pārrāvumam un metāliskam divfāžu īsslēgumam vai divfāžu īsslēgumam uz zemi vienā un tajā pašā tīkla punktā [3].

Vēl viena no bojājumu kombinācijām, kurai iespējams izmantot komplekso aizvietošanas shēmu bez ideālajiem transformatoriem, ir vienā un tajā pašā tīkla punktā rodoties metāliskam vienfāzes īsslēgumam un metāliskam divfāžu īsslēgumam (8.10. att.).



8.10. att. Vienfāzes īsslēgums un divfāžu īsslēgums vienā divpusēji barota tīkla punktā.

Rodoties 8.10. attēlā redzamajai īsslēgumu kombinācijai, arī iespējams izmantot vienkāršus elektriskos savienojumus starp secību aizvietošanas shēmām, bet ir jāastāda divi secību aizvietošanas shēmu komplekti (8.11. att.).



8.11. att. Kompleksā aizvietošanas shēma, rodoties metāliskam vienfāzes īsslēgumam un divfāžu īsslēgumam vienā un tajā pašā tīkla punktā [3].

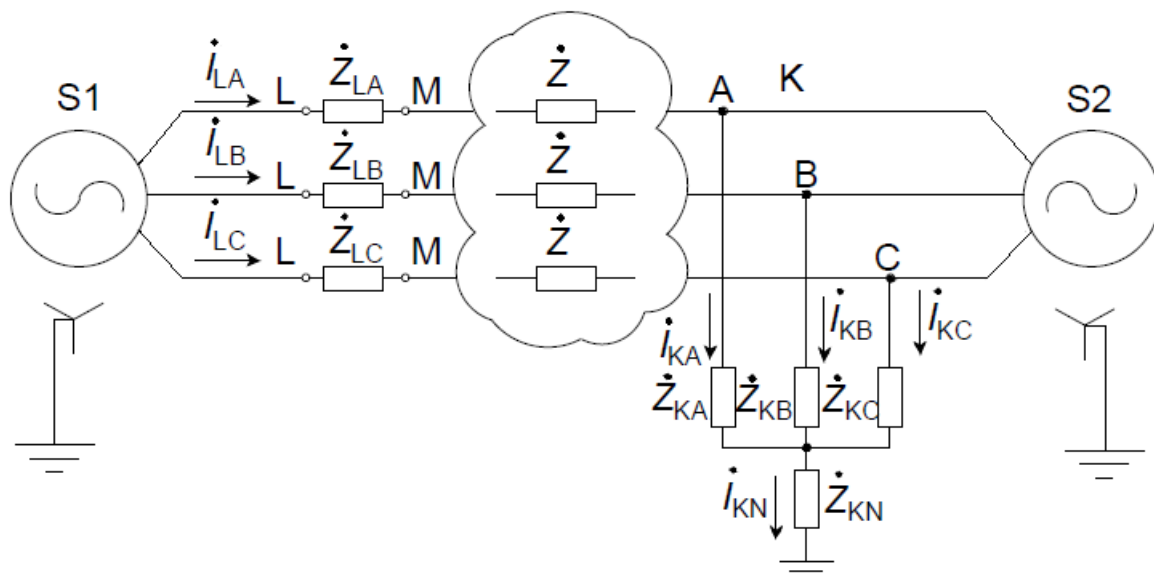
Jāpiemin, ka [4], [92] vēl parādītas arī aizvietošanas shēmas, kuras izveidotas, izmantojot nesimetrisko komponentu metodi, un kuras joprojām var saturēt ideālos transformatorus. Pagaidām nesimetrisko komponentu metode praktiskajos bojājumu režīmu parametru aprēķinos tiek lietota salīdzinoši reti, tādēļ arī šajā darbā tā nav sīkāk izklāstīta.

Turpinājumā aplūkosim [89] piedāvāto režīmu parametru aprēķinu metodiku, rodoties vienlaicīgām nesimetriem jeb sarežģītiem bojājumiem. Tā ir [14] parādītās idejas skaitliskā

aprēķina realizācijas variants. Pamatā piedāvātajai metodei ir ideālo transformatoru aizvietošana ar aprēķina gaitā regulējamiem jeb vadāmiem EDS avotiem. Vienu no nesimetrijām ataino ar atbilstoši kompleksās aizvietošanas shēmas elektriskajiem savienojumiem, kas, saprotams, nevar būt vispārīga garennesimetrija vai šķērsnesimetrija. Vienlaikus katru nākamo nesimetriju kompleksajā aizvietošanas shēmā ievēro ar trim EDS avotiem – pa vienam avotam katrā secības aizvietošanas shēmā. Ar EDS avotiem var ņemt vērā arī vispārīgas garennesimetrijas un šķērsnesimetrijas. Attiecīgi, lai nodrošinātu iespēju regulēt vadāmos nesimetriju EDS avotus starp skaitliskā aprēķina tuvinājumu soļiem, brīvo mainīgo vektoru B , kas, rodies vienai nesimetrijai, pārsvarā ir konstants, būs jāpārreķina, jo tas satur EDS avotu vektoru, kura saturs mainīsies aprēķina gaitā [89]. Šeit iespējami divi veidi, kā noteikt ievesto EDS avotu vērtības nākamajam solim, lai ievērotu tiem atbilstošo bojājumu robežnosacījumus:

- ✓ matemātiski ar vispārīgajiem BV spriegumu vai spriegumu kritumu simetrisko komponentu vienādojumiem;
- ✓ shematiski lietojot divas vai vairāk kompleksās aizvietošanas shēmas vienlaicīgi.

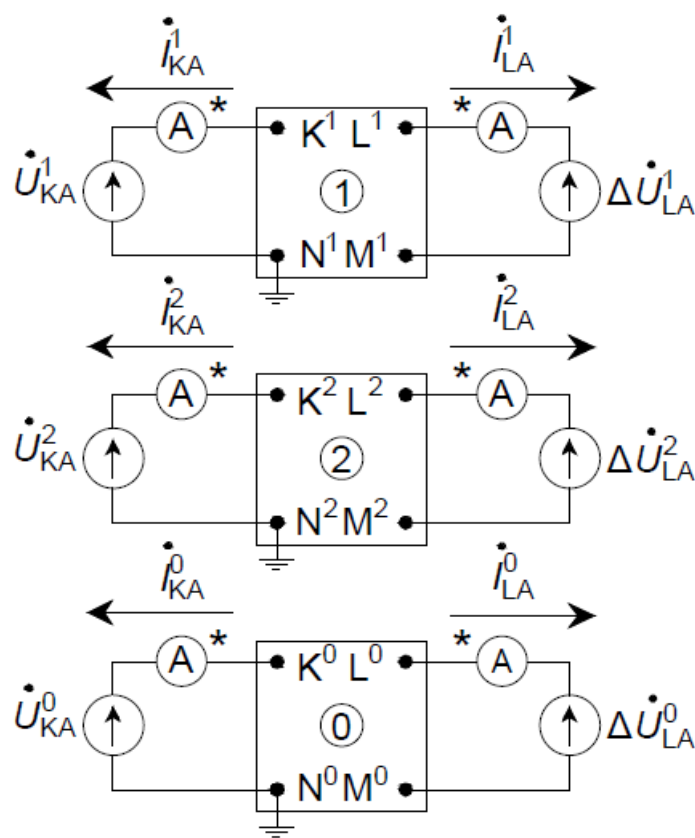
Pirmajā veidā nesimetrijas atainojošo EDS avotu vērtības nosaka, izmantojot vienādojumu sistēmu (6.4.) un/vai (7.2.) vai arī to modifikācijas, kuras pielāgotas konkrētam bojājumam. Pirmais veids ir izdevīgs, jo to var lietot pat, ja daļa no bojājumiem ir vispārīgi, respektīvi, visu fāžu pārejas pretestības ir dažādas. Tomēr svarīgi atzīmēt, ka gadījumā, ja visas nesimetrijas ir vispārīgas, tām nāksies izmantot vienlaicīgā secību aizvietošanas shēmu režīma parametru aprēķina paņēmieni, jo tad nevienai no nesimetrijām nav iespējams elektriski savienot secību aizvietošanas shēmas bez ideālo transformatoru lietošanas. Piemēram var aplūkot analītiskajā daļā parādītajam līdzīgu bojājuma režīmu ar vienlaicīgu vispārīgu garennesimetriju un šķērsnesimetriju (8.12. att.).



8.12. att. Vienlaicīga vispārīga garennesimetrija un šķērsnesimetrija dažādos divpusēji barota tīkla punktos.

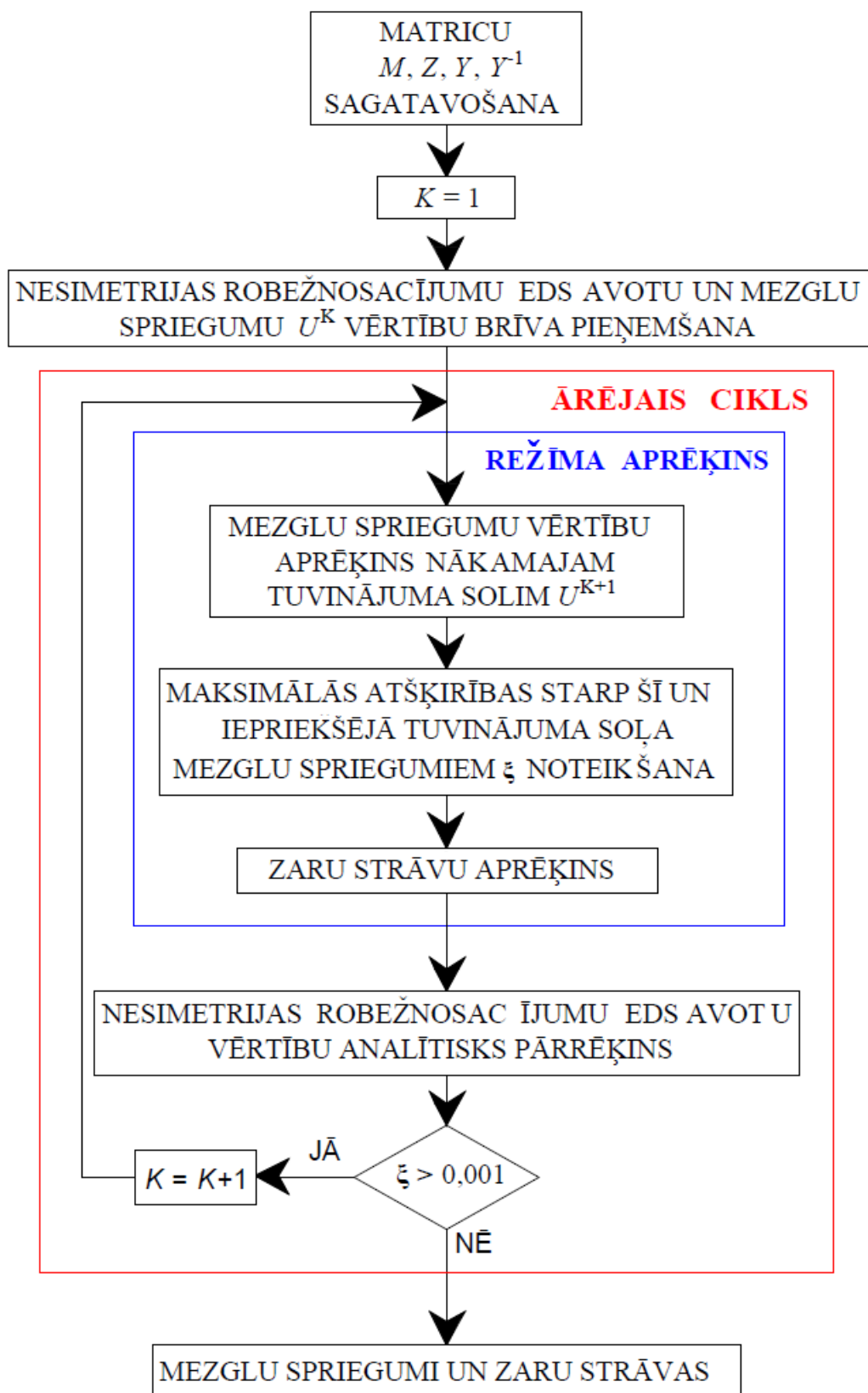
Starp abiem nesimetrijas punktiem parādītais mākonis apzīmē simetrisku tīkla daļu ar saišu elementiem (katrā fāzē atainoti ar fāzes ekvivalento pretestību Z), ieskaitot potenciālus apejas ceļus starp abām sistēmām, kas ir iekļauta starp bojājumiem, lai norādītu, ka abi bojājumi var būt dažādos analizējamā tīkla punktos.

Vienlaicīgu vispārīgu nesimetriju gadījumā starp tuvinājumu soļiem jānosaka secību aizvietošanas shēmu zaru strāvas starp nesimetriju punktiem, kā tas parādīts 8.13. attēlā, un pirms nākamā aprēķina soļa veikšanas ir jāpārreķina nesimetrijas atainojošo EDS avotu vērtības. Ņemot vērā, ka šādiem scenārijiem katrai secību aizvietošanas shēmai veido savu vienādojumu sistēmu un režīma parametru aprēķinus arī veic nosacīti katrai secību aizvietošanas shēmai atsevišķi, katrai no šīm shēmām izvēlas bāzes mezglu (ērtībai ieteicams izvēlēties katras secību aizvietošanas shēmas neitrāli).



8.13. att. Aprēķinu veikšanai izmantojamās secību aizvietošanas shēmas vienlaicīgas vispārīgas garenesimetrijas un šķērsnesimetrijas rašanās gadījumā.

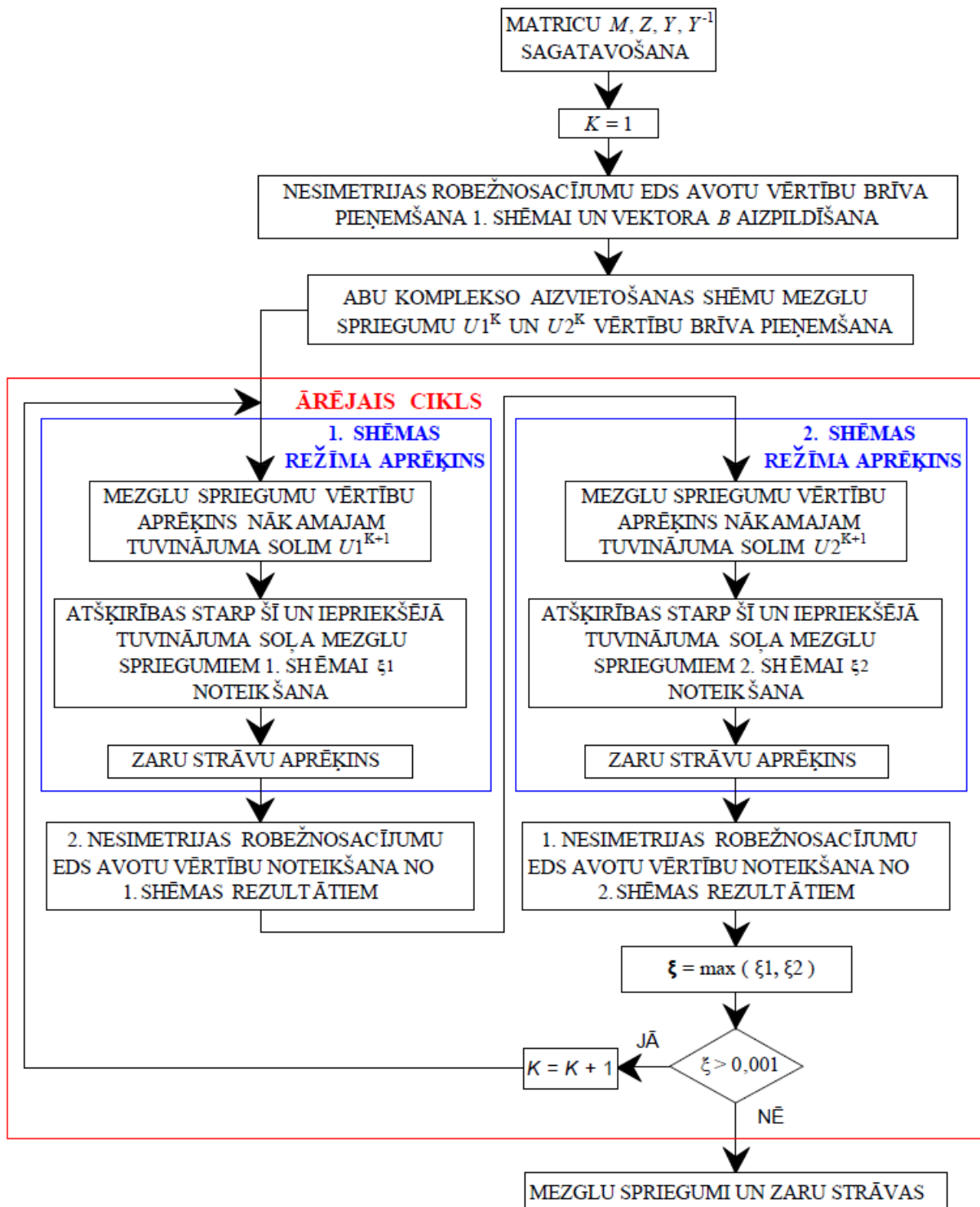
Pirmajam EDS vērtību noteikšanas veidam lietojama 8.14. attēlā parādītā aprēķina algoritma blokshēma.



8.14. att. Skaitliskā aprēķina algoritma blokshēma, nesimetriju EDS avotu vērtības pārrēķinot analītiski.

Jāmin, ka, līdzīgi kā citos gadījumos, kuros tiek veikts skaitliskais aprēķins ar vispārīgo robežnosacījumu ievērošanai ieviesto EDS pārrēķināšanu, arī šajos aprēķinos pie lielām pārejas pretestībām pastāv skaitliskā aprēķina diverģences risks.

Otrais veids ir izmantot vairākas kompleksās aizvietošanas shēmas, kur katrai no nesimetrijām jāizveido viena kompleksā aizvietošanas shēma ar konkrētajai nesimetrijai atbilstošajiem secību aizvietošanas shēmu elektriskiem savienojumiem, kamēr pārējās nesimetrijas tiek ievērotas ar papildu EDS avotiem. Katrai no nesimetrijām atbilstošo EDS avotu vērtības nosaka no kompleksās aizvietošanas shēmas, kurā šī nesimetrija attēlota ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām. Attiecīgi šis risinājuma veids ir izmantojams tikai tad, ja neviena no vienlaikus pastāvošajām nesimetrijām nav vispārīga veida. Otrajam aprēķina paņēmienam vienlaikus tiek veikts skaitlisks režīma parametru aprēķins divām vai vairāk kompleksajām aizvietošanas shēmām. Aprēķina algoritma blokshēma otrajam EDS avotu noteikšanas veidam divu vienlaicīgu nesimetriju rašanās gadījumā dota 8.15. attēlā. Var minēt, ka otrajai metodei nepieciešams lielāks sagatavošanas darbs, bet tās testēšana pagaidām liecinājusi par lielāku skaitliskā aprēķina stabilitāti pie lielām pārejas pretestībām, salīdzinot ar pirmo paņēmieni.



8.15. att. Aprēķina algoritma blokshēma režīma parametru aprēķinam, rodoties divām vienlaicīgām nesimetrijām, nosakot bojājumus atainojošo EDS avotu vērtības no kompleksajām aizvietošanas shēmām [89].

Turpinājumā aplūkotas šīs metodes lietošanai nepieciešamās aizvietošanas shēmas dažādām nesimetriju kombinācijām. 6. un 7. nodaļā jau parādīts, ka gadījumos, kuros vismaz divās fāzēs ir vienādas pārejas pretestības, ir iespējams izveidot komplekso aizvietošanas shēmu ar elektriskiem savienojumiem, rodoties vienai nesimetrijai. Turklāt lielāko daļu no

konkrētu bojājumu vai nesimetrijas veidu aizvietošanas shēmām var iegūt, saslēdzot secību aizvietošanas shēmas paralēli un koriģējot dažādās pārejas pretestībās starp tām. Daudzas no šķērsnesimetriju aizvietošanas shēmām var reducēt no trīsfāžu īsslēguma uz zemi kompleksās aizvietošanas shēmas (6.6. att.), un lielāko daļu no garensimetriju kompleksajām aizvietošanas shēmām iespējams iegūt no garensimetrijas ar pārejas pretestībām visās fāzēs aizvietošanas shēmas (7.6. att.). Ievērojami atšķiras kompleksās aizvietošanas shēmas nesimetrijām, kuru robežnosacījumi paredz, ka īpašās jeb aprēķina fāzes strāvas simetriskajām komponentēm jābūt vienādām, jo tad secību aizvietošanas shēmas slēdzamas virknē, kā tas ir, rodoties vienfāzes īsslēgumam (6.16. att.) vai divfāžu pārrāvumam (7.13. att.). Ņemot vērā tikko minēto, divu vienlaicīgu nesimetriju rašanās gadījumā, lielāko daļu nepieciešamo komplekso aizvietošanas shēmu var iegūt, vienkāršojot aizvietošanas shēmas, kas sastādītas 8.1. tabulā parādītajām nesimetriju kombinācijām.

8.1. tabula

Aplūkojamās nesimetriju veidu kombinācijas divu vienlaicīgu nesimetriju rašanās gadījumā

Vienlaicīgas garensimetrijas un šķērsnesimetrijas kombināciju veidi	Divu vienlaicīgu garensimetriju kombināciju veidi	Divu vienlaicīgu šķērsnesimetriju kombināciju veidi
Vienlaicīgs divfāžu pārrāvums un vienfāzes īsslēgums	Divi vienlaicīgi divfāžu pārrāvumi	Divi vienlaicīgi vienfāzes īsslēgumi
Vienlaicīgs divfāžu pārrāvums un šķērsnesimetrija ar pārejas pretestībām visās fāzēs	Vienlaicīgs divfāžu pārrāvums un garensimetrija ar pārejas pretestībām visās fāzēs	Vienlaicīgs vienfāzes īsslēgums un šķērsnesimetrija ar pārejas pretestībām visās fāzēs
Vienlaicīga garensimetrija ar pārejas pretestībām visās fāzēs un vienfāzes īsslēgums	Divas vienlaicīgas garensimetrijas ar pārejas pretestībām visās fāzēs	Divas vienlaicīgas šķērsnesimetrijas ar pārejas pretestībām visās fāzēs
Vienlaicīga garensimetrija un šķērsnesimetrija ar pārejas pretestībām visās fāzēs		

Pirms uzsākt lietojamo komplekso aizvietošanas shēmu apskatu, ir lietderīgi atcerēties, ka, sastādot kompleksās aizvietošanas shēmas, parasti par īpašo jeb aprēķina fāzi pieņem to fāzi, kuras pārejas pretestība vai stāvoklis atšķiras no pārējo divu fāžu, piemēram, divfāžu īsslēgumam – nebojātā fāze, vienfāzes pārrāvumam – pārrautā fāze, un pilnībā iespējams, ka sarežģītu bojājumu gadījumos abu nesimetriju aprēķina fāzes būs atšķirīgas. Tādēļ turpinājumā dotajās kompleksajās aizvietošanas shēmās pie tīkla elementu ieviestajiem TS un PS (ja tādi pastāv) EDS avotiem tiks parādīti pagriezienu koeficienti C_{E1} , C_{E2} , C_{E3} , C_{E4} , kuri paredzēti gadījumam, ja zināmas vienīgi tīkla elementu EDS avotu (apvienotu energosistēmu, ģeneratoru,

AD u. c.) un strāvas avotu A fāzes vērtības. Ja pastāv tīkla elementu ieviesti NS EDS avoti, tad tiem nav nepieciešami papildu pagriezienu reizinātāji. Turklāt, ja nesimetrijām aprēķina fāzes atšķiras, tad arī nesimetriju atainojošajiem EDS avotiem ir jāizmanto pagriezienu koeficienti C_1 un C_2 , kuru vērtības dažādām divu aprēķina fāžu kombinācijām parādītas 8.2. tabulā. Parādītie koeficienti C_1 un C_2 ir iegūti, balstoties uz principu, kāds pagrieziens jāveic otrajā kompleksajā aizvietošanas shēmā starp nesimetrijas punktiem nomērāmajām spriegumu vai spriegumu kritumu TS un PS komponentēm, lai to aprēķina fāze sakristu ar šajā brīdī aplūkotās kompleksās aizvietošanas shēmas aprēķina fāzi, kurā konkrēto bojājumu ievēro ar papildu EDS avotiem. Triju vai vairāk vienlaicīgu nesimetriju rašanās gadījumā arī var izmantot 8.2. tabulā parādītos koeficientus, bet jāievēro, ka var būt vajadzīgs vairāk pagriezienu koeficientu, jo iespējamas trīs atšķirīgas aprēķina fāzes, bet savstarpējais TS un PS vektoru izvietojums joprojām saglabājas atbilstošs 1.2. attēlam.

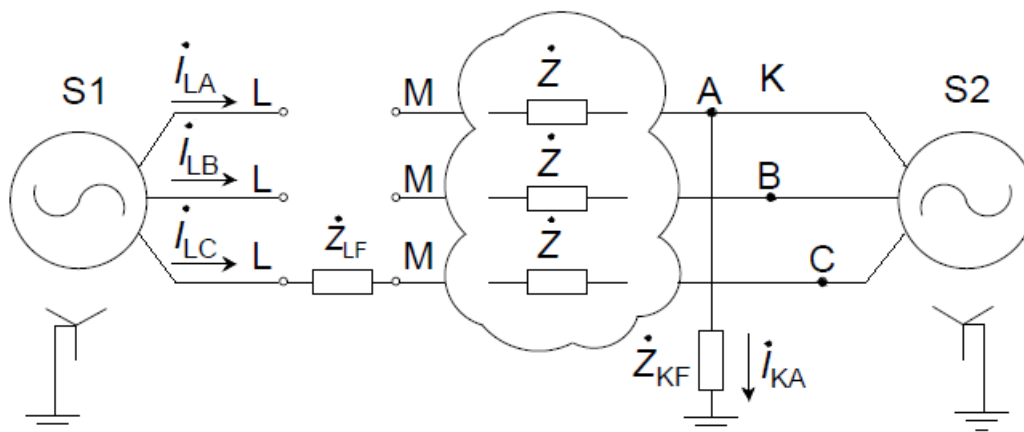
8.2. tabula

Pagriezienu koeficienti divu vienlaicīgu nesimetriju aizvietošanas shēmās

1. aizvietošanas shēmas īpašā fāze	2. aizvietošanas shēmas īpašā fāze	C_1	C_2	C_{E1}	C_{E2}	C_{E3}	C_{E4}
A	A	1	1	1	1	1	1
A	B	\dot{a}	\dot{a}^2	1	1	\dot{a}^2	\dot{a}
A	C	\dot{a}^2	\dot{a}	1	1	\dot{a}	\dot{a}^2
B	A	\dot{a}^2	\dot{a}	\dot{a}^2	\dot{a}	1	1
B	B	1	1	\dot{a}^2	\dot{a}	\dot{a}^2	\dot{a}
B	C	\dot{a}	\dot{a}^2	\dot{a}^2	\dot{a}	\dot{a}	\dot{a}^2
C	A	\dot{a}	\dot{a}^2	\dot{a}	\dot{a}^2	1	1
C	B	\dot{a}^2	\dot{a}	\dot{a}	\dot{a}^2	\dot{a}^2	\dot{a}
C	C	1	1	\dot{a}	\dot{a}^2	\dot{a}	\dot{a}^2

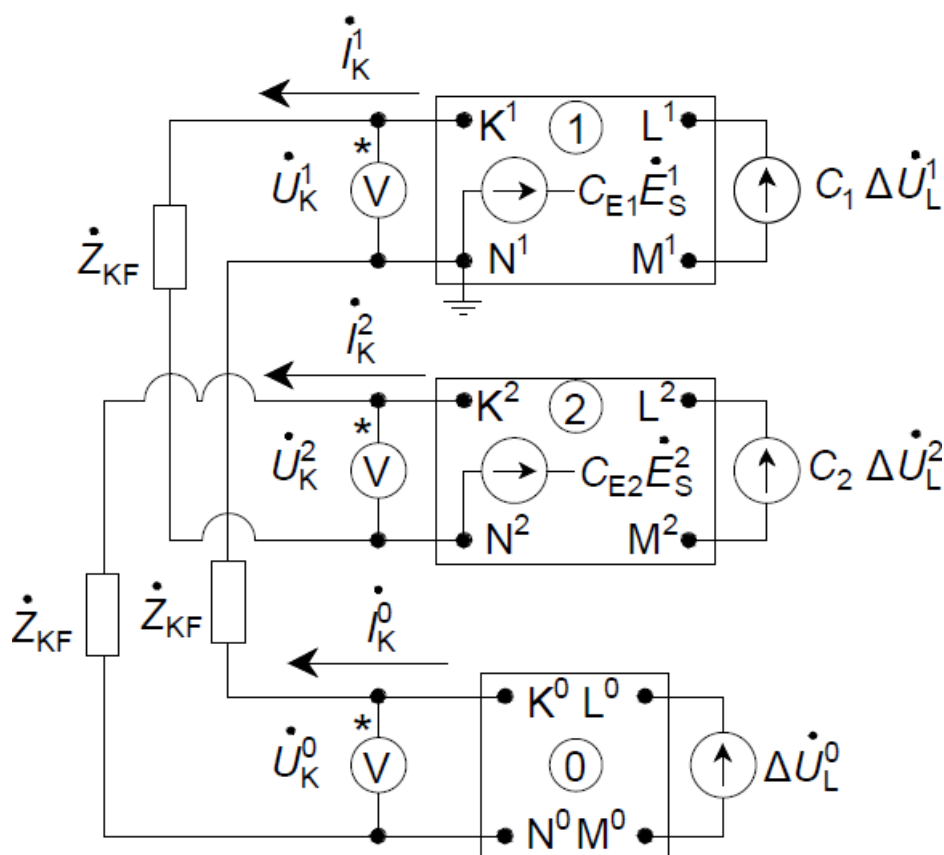
Turpinājumā tiks parādītas abas kompleksās aizvietošanas shēmas risinājumam, kurā bojājumu atainojošos papildu EDS avotus nosaka shematiski. Bojājumu atainojošos papildu EDS avotus nosakot analītiski, var izvēlēties vienu no abām dotajām kompleksajām aizvietošanas shēmām.

Balstoties uz 8.1. tabulu, sāksim ar vienlaicīgu divfāžu pārrāvumu un vienfāzes īsslēgumu (8.16. att.). Šajā piemērā ņemta vērā iespējamā pārrāvuma nebojātās fāzes pārejas pretestība \dot{Z}_{LF} un vienfāzes īsslēguma bojātās fāzes kopējā pārejas pretestība uz zemi \dot{Z}_{KF} . Var atzīmēt arī to, ka, lai abiem bojājumiem varētu sastādīt kompleksās aizvietošanas shēmas, neizmantojot ideālos transformatorus, konkrētajā piemērā īsslēgumam par aprēķina fāzi jāpieņem A fāze, bet pārrāvumam – C fāze. Starp abiem nesimetrijas punktiem parādītais mākonis apzīmē simetrisku tīkla daļu ar saišu elementiem (katrā fāzē atainoti ar fāzes ekvivalento pretestību \dot{Z}), **ieskaitot potenciālus apejas ceļus starp abām sistēmām, kas ir iekļauta starp bojājumiem, lai norādītu, ka abi bojājumi var būt dažādos analizējamā tīkla punktos.**

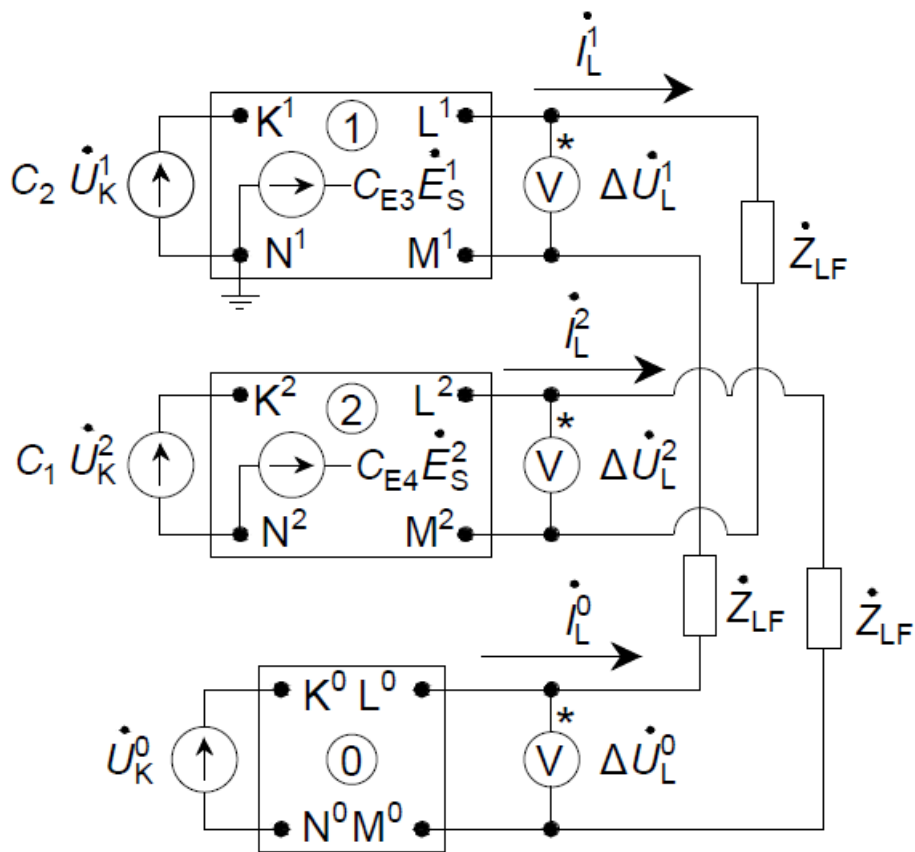


8.16. att. Vienlaicīgs divfāžu pārrāvums un vienfāzes īsslēgums divpusēji barotā tīklā.

Parādītajiem bojājumiem lietojamas 8.17. attēlā un 8.18. attēlā redzamās kompleksās aizvietošanas shēmas, kur 8.17. attēlā vienfāzes īsslēgums atainots ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām, bet 8.18. attēlā pārrāvums atainots ar elektriskiem savienojumiem.

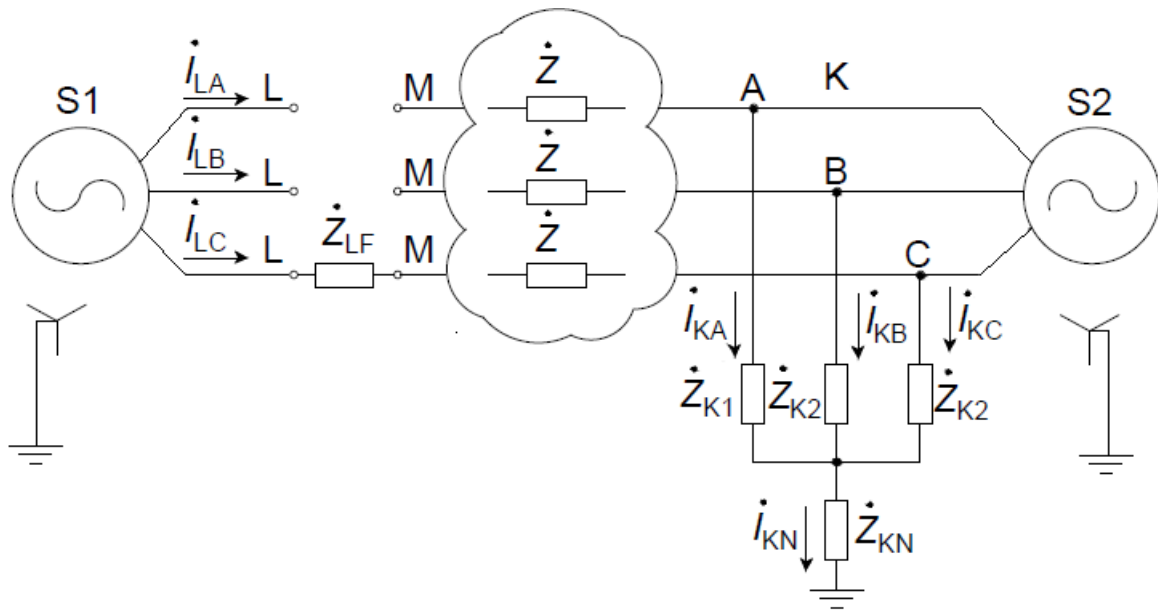


8.17. att. Kompleksā aizvietošanas shēma, rodoties vienlaicīgam divfāžu pārrāvumam un vienfāzes īsslēgumam, kurā īsslēgums atainots ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām.



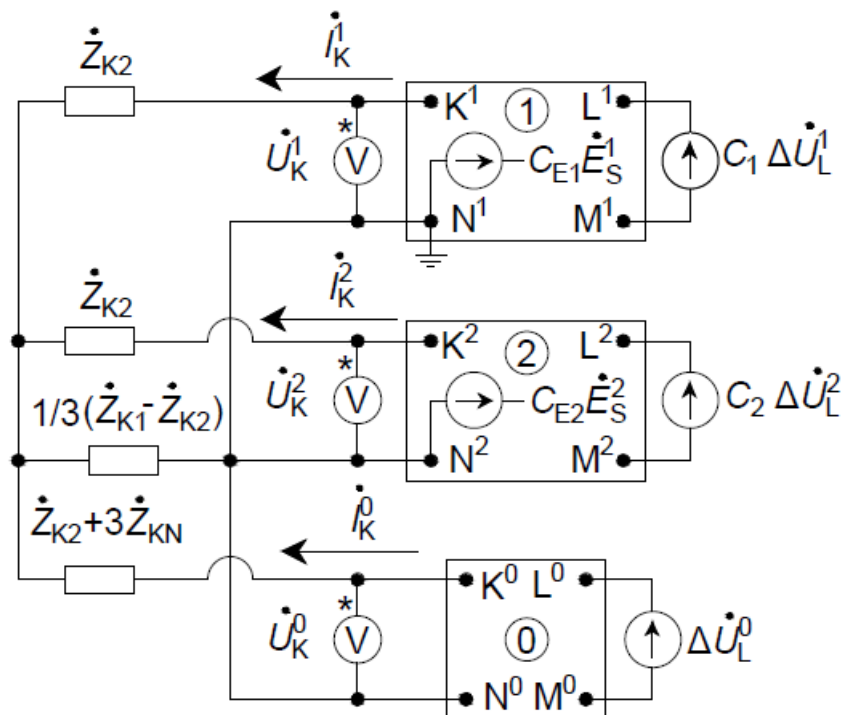
8.18. att. Kompleksā aizvietošanas shēma, rodoties vienlaicīgam divfāžu pārrāvumam un vienfāzes īsslēgumam, kurā pārrāvums atainots ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām.

Nākamā bojājumu kombinācija ir vienlaicīgs divfāžu pārrāvums un šķērsnesimetrija ar pārejas pretestībām visās fāzēs un saiti uz zemi (8.19. att.). Šajā piemērā ņemta vērā iespējamā pārrāvuma nebojātās fāzes pārejas pretestība \dot{Z}_{LF} un šķērsnesimetrijas fāžu pārejas pretestības \dot{Z}_{K1} un \dot{Z}_{K2} , kā arī pārejas pretestība saitē uz zemi \dot{Z}_{KN} . Var atzīmēt arī to, ka, lai abiem bojājumiem varētu sastādīt kompleksās aizvietošanas shēmas, neizmantojot ideālos transformatorus, konkrētajā piemērā šķērsnesimetrijai par aprēķina fāzi būtu jāpieņem A fāze, bet pārrāvumam – C fāze. Starp abiem nesimetrijas punktiem parādītais mākonis apzīmē simetrisku tīkla daļu ar saišu elementiem (katrā fāzē atainoti ar fāzes ekvivalento pretestību \dot{Z}), **ieskaitot potenciālus apejas ceļus starp abām sistēmām, kas ir iekļauta starp bojājumiem, lai norādītu, ka abi bojājumi var būt dažādos analizējamā tīkla punktos.**

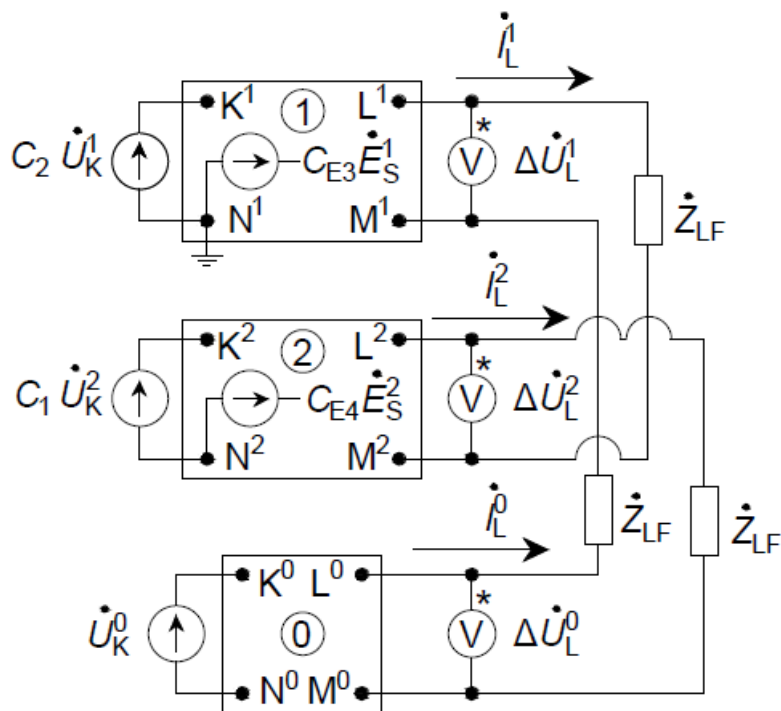


8.19. att. Vienlaicīgs divfāžu pārrāvums un šķērsnesimetrija ar pārejas pretestībām visās fāzēs un saiti uz zemi divpusēji barotā tīklā.

Vienlaikus rodoties divfāžu pārrāvumam un šķērsnesimetrijai ar pārejas pretestībām visās fāzēs un saiti uz zemi, izmantojamās kompleksās aizvietošanas shēmas parādītas 8.20. un 8.21. attēlā, kur 8.20. attēlā šķērsnesimetrija atainota ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām, bet 8.21. attēlā pārrāvums atainots ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām.

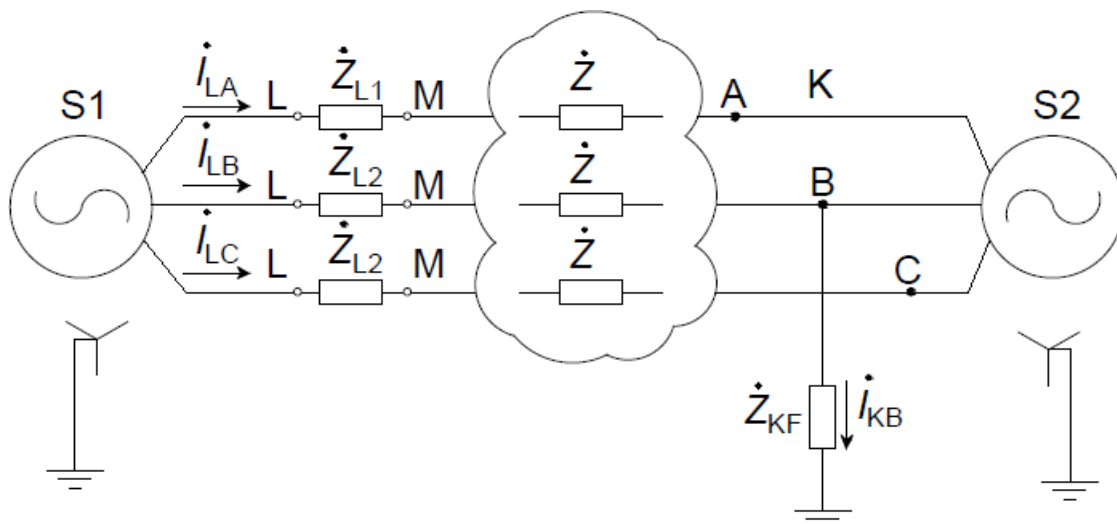


8.20. att. Kompleksā aizvietošanas shēma, vienlaikus rodoties divfāžu pārrāvumam un šķērsnesimetrijai ar pārejas pretestībām visās fāzēs un saitē uz zemi, kurā šķērsnesimetrija atainota ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām.



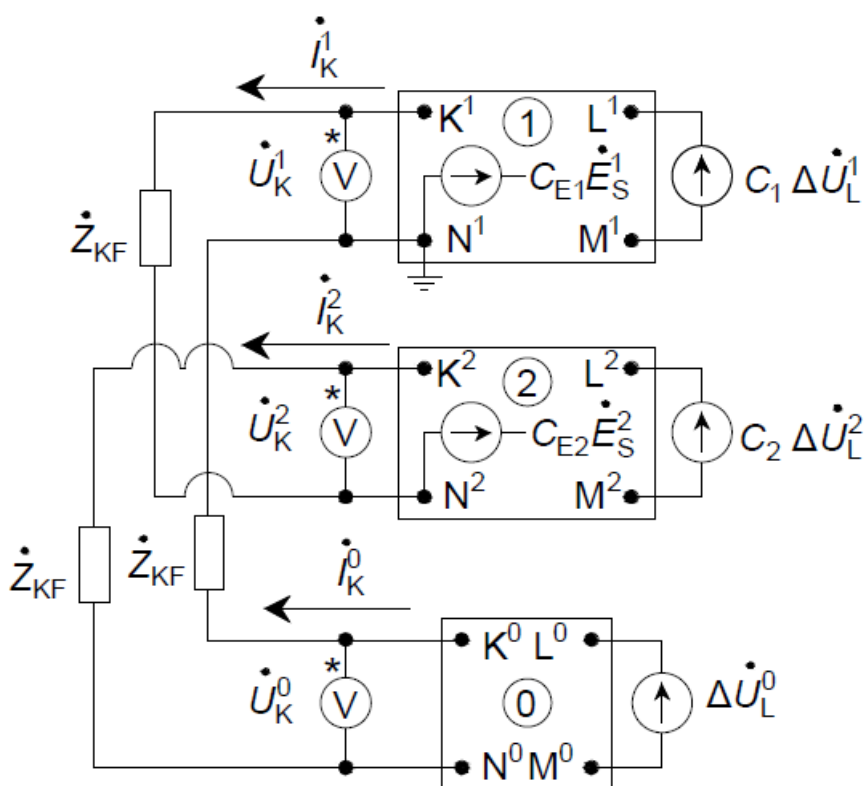
8.21. att. Kompleksā aizvietošanas shēma, rodoties vienlaicīgam divfāžu pārrāvumam un šķērsnesimetrijai ar pārejas pretestībām visās fāzēs un saitē uz zemi, kurā pārrāvums atainots ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām.

Turpinājumā parādīts gadījums ar vienlaicīgi radušos garennesimetriju ar pārejas pretestībām visās fāzēs un vienfāzes īsslēgumu (8.22. att.). Šajā piemērā ņemtas vērā iespējamās garennesimetrijas fāžu pārejas pretestības \dot{Z}_{L1} un \dot{Z}_{L2} un vienfāzes īsslēguma bojātās fāzes kopējā pretestība uz zemi \dot{Z}_{KF} . Var atzīmēt arī to, ka, lai abiem bojājumiem varētu sastādīt kompleksās aizvietošanas shēmas, neizmantojot ideālos transformatorus, konkrētajā piemērā garennesimetrijai par aprēķina fāzi būtu jāpieņem A fāze, bet īsslēgumam – B fāze. Starp abiem nesimetrijas punktiem parādītais mākonis apzīmē simetrisku tīkla daļu ar saišu elementiem (katrā fāzē atainoti ar fāzes ekvivalento pretestību \dot{Z}), **ieskaitot potenciālus apejas ceļus starp abām sistēmām, kas ir iekļauta starp bojājumiem, lai norādītu, ka abi bojājumi var būt dažādos analizējamā tīkla punktos.**

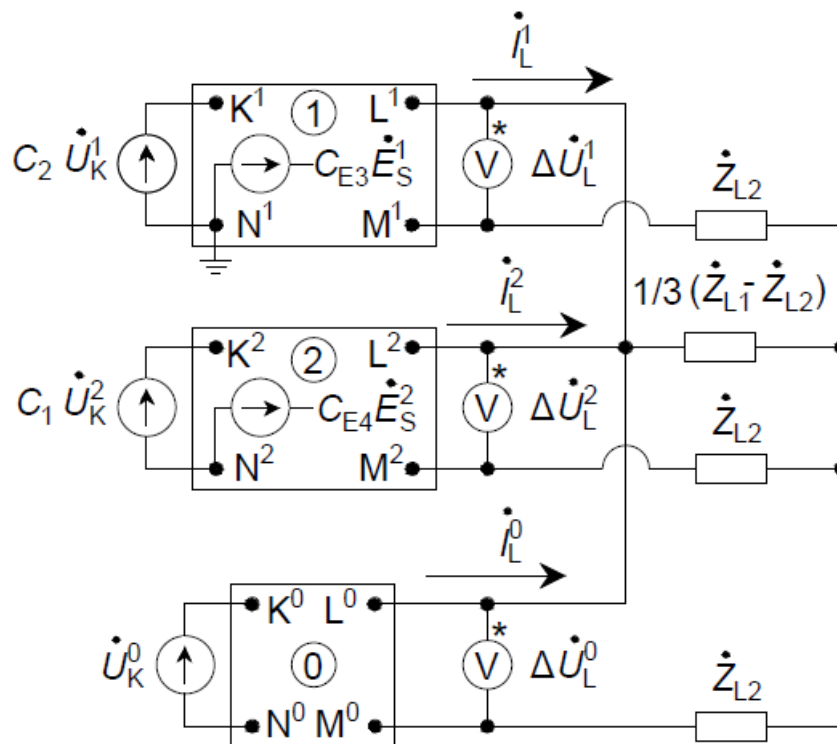


8.22. att. Vienlaicīga garennesimetrija ar pārejas pretestībām visās fāzēs un vienfāzes īsslēgums divpusēji barotā tīklā.

Izmantojamās aizvietošanas shēmas, vienlaikus rodoties garennesimetrijai ar pārejas pretestībām visās fāzēs un vienfāzes īsslēgumam, parādītas 8.23. un 8.24. attēlā, kur 8.23. attēlā īsslēgums atainots ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām, bet 8.24. attēlā garennesimetrija atainota ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām.

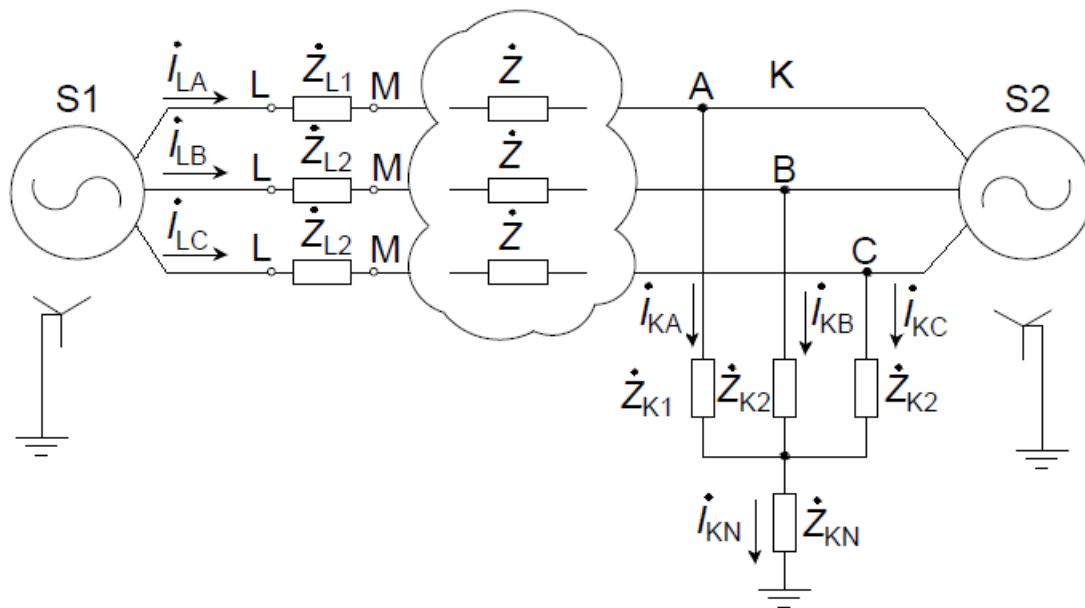


8.23. att. Kompleksā aizvietošanas shēma, rodoties vienlaicīgi garennesimetrijai ar pārejas pretestībām trīs fāzēs un vienfāzes īsslēgumam, kurā īsslēgums atainots ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām.



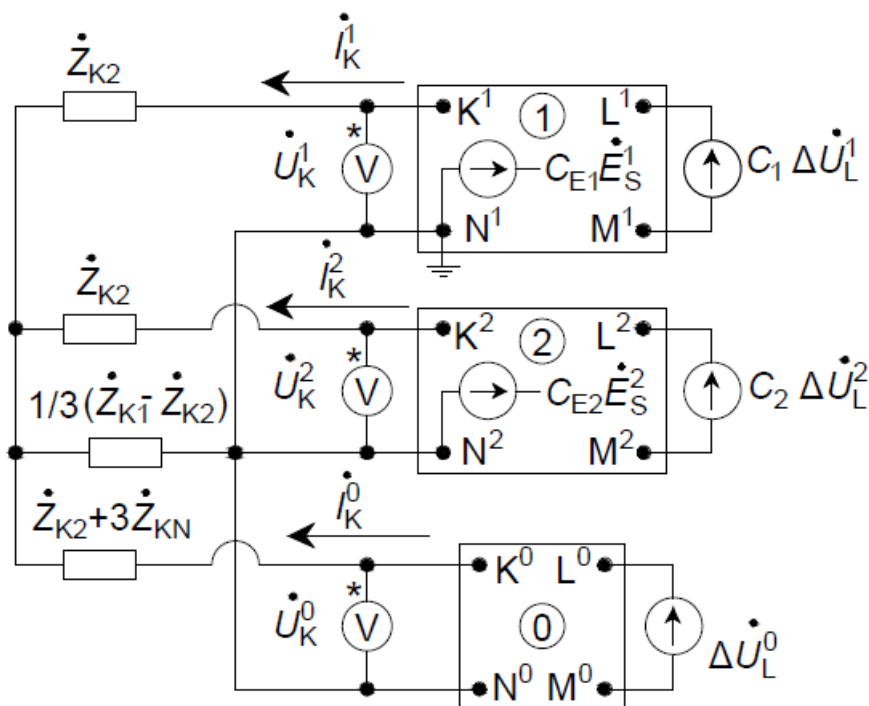
8.24. att. Kompleksā aizvietošanas shēma, vienlaikus rodoties garennesimetrijai ar pārejas pretestībām visās fāzēs un vienfāzes īsslēgumam, kurā garennesimetrija atainota ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām.

Pēdējā no aplūkotajām divu dažādu nesimetriju kombinācijām ietver vienlaicīgu garennesimetrijas ar pretestībām visās fāzēs un šķērsnesimetrijas ar pārejas pretestībām visās fāzēs un saitē uz zemi rašanos (8.25. att.). Šajā piemērā ņemtas vērā potenciālās garennesimetrijas fāžu pārejas pretestības \dot{Z}_{L1} un \dot{Z}_{L2} un šķērsnesimetrijas iespējamās fāžu pārejas pretestības \dot{Z}_{K1} un \dot{Z}_{K2} , kā arī neitrāles jeb saites uz zemi pārejas pretestība. Var atzīmēt arī to, ka, lai abiem bojājumiem varētu sastādīt kompleksās aizvietošanas shēmas, neizmantojot ideālos transformatorus, konkrētajā piemērā gan garennesimetrijai, gan šķērsnesimetrijai par aprēķina fāzi būtu jāpieņem A fāze. Starp abiem nesimetrijas punktiem parādītais mākonis apzīmē simetrisku tīkla daļu ar saišu elementiem (katrā fāzē atainoti ar fāzes ekvivalento pretestību \dot{Z}), ieskaitot potenciālus apejas ceļus starp abām sistēmām, kas ir iekļauta starp bojājumiem, lai norādītu, ka abi bojājumi var būt dažādos analizējamā tīkla punktos.

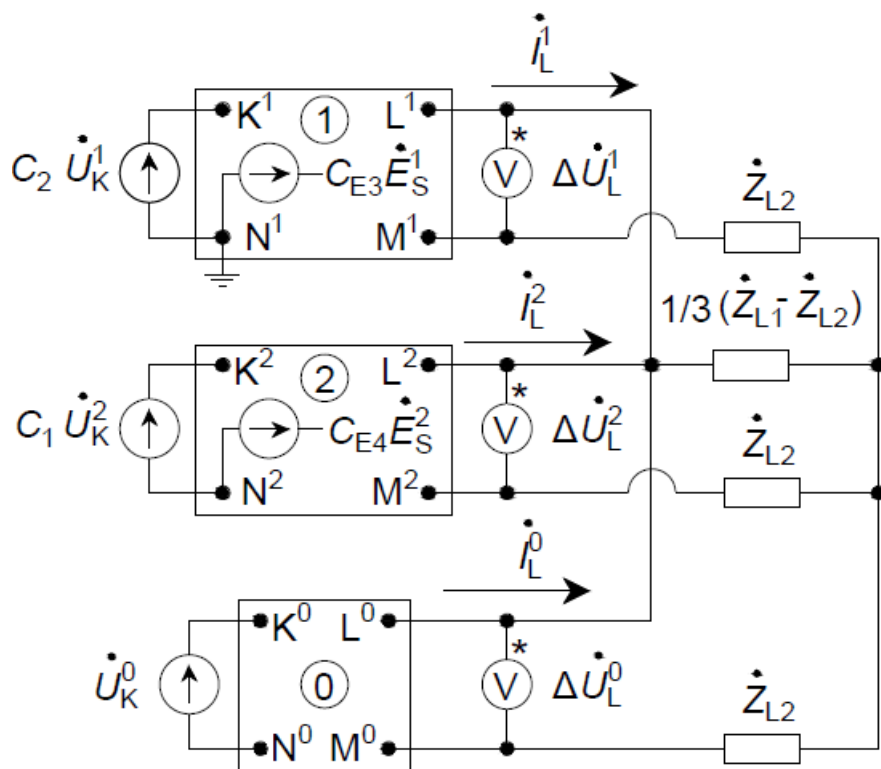


8.25. att. Vienlaicīga garennesimetrija ar pārejas pretestībām visās fāzēs un šķērsnesimetrija ar pārejas pretestībām visās fāzēs un saitē uz zemi divpusēji barotā tīklā.

Vienlaikus rodoties garennesimetrijai ar pārejas pretestībām visās fāzēs un šķērsnesimetrijai ar pārejas pretestībām visās fāzēs un saitē uz zemi, izmantojamās aizvietošanas shēmas parādītas 8.26. un 8.27. attēlā, kur 8.26. attēlā šķērsnesimetrija atainota ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām, bet 8.27. attēlā garennesimetrija atainota ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām.

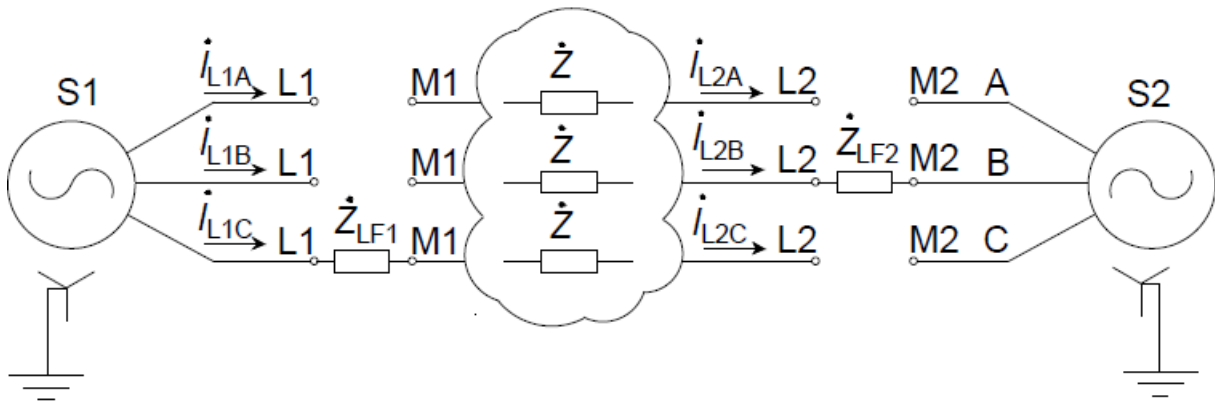


8.26. att. Kompleksā aizvietošanas shēma, vienlaikus rodoties garennesimetrijai ar pārejas pretestībām visās fāzēs un šķērsnesimetrijai ar pārejas pretestībām visās fāzēs un saitē uz zemi, kurā šķērsnesimetrija atainota ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām.



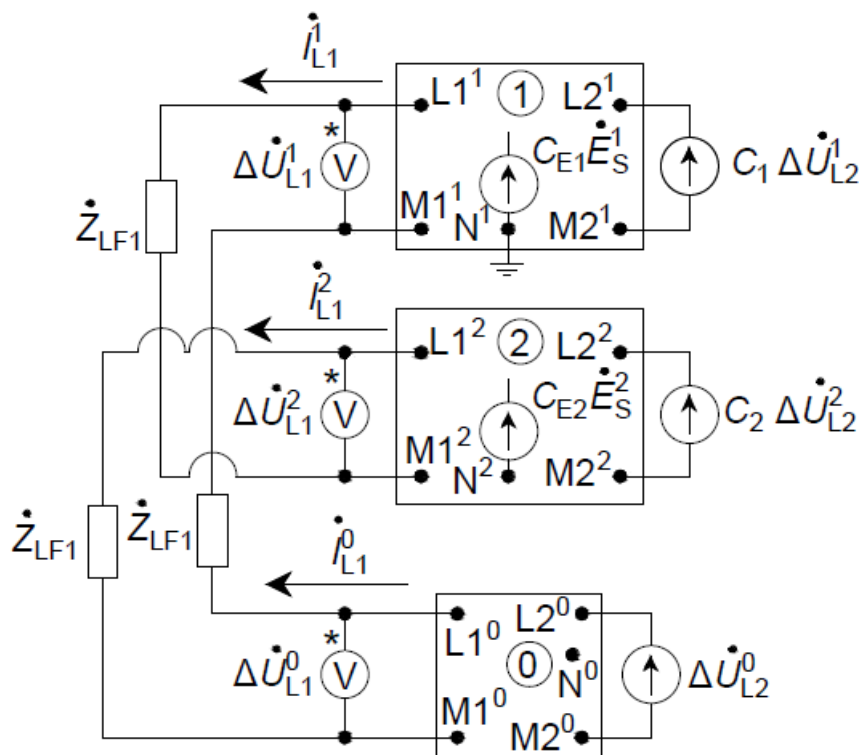
8.27. att. Kompleksā aizvietošanas shēma, vienlaikus rodoties garennesimetrijai ar pārejas pretestībām visās fāzēs un šķērsnesimetrija ar pārejas pretestībām visās fāzēs un saitē uz zemi, kurā garennesimetrija atainota ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām.

Tālāk, balstoties uz 8.1. tabulu, jāizskata kombinācijas ar divām vienlaicīgām garennesimetrijām. Vispirms aplūkosim divu vienlaicīgu divfāžu pārrāvumu rašanos (8.28. att.). Šajā piemērā ņemtas vērā iespējamās pārrāvumu nebojāto fāžu pārejas pretestības \dot{Z}_{LF1} un \dot{Z}_{LF2} . Var atzīmēt arī to, ka, lai abiem bojājumiem varētu sastādīt kompleksās aizvietošanas shēmas, neizmantojot ideālos transformatorus, konkrētajā piemērā pirmajam pārrāvumam par aprēķina fāzi būtu jāpieņem C fāze, bet otrajam – B fāze. Starp abiem nesimetrijas punktiem parādītais mākonis apzīmē simetrisku tīkla daļu ar saišu elementiem (katrā fāzē atainoti ar fāzes ekvivalento pretestību \dot{Z}), **ieskaitot potenciālus apejas ceļus starp abām sistēmām, kas ir iekļauta starp bojājumiem, lai norādītu, ka abi bojājumi var būt dažādos analizējamā tīkla punktos.**

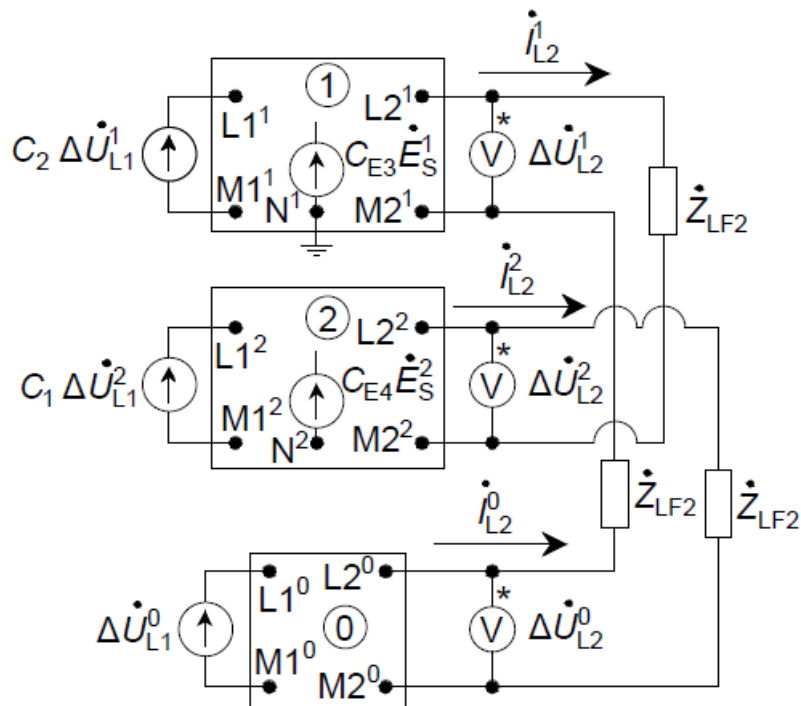


8.28. att. Divi vienlaicīgi divfāžu pārrāvumi divpusēji barotā tīklā.

Rodoties diviem vienlaicīgiem divfāžu pārrāvumiem, izmantojamās kompleksās aizvietošanas shēmas parādītas 8.29. un 8.30. attēlā, kur 8.29. attēlā pirmais pārrāvums atainots ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām, bet 8.30. attēlā otrs pārrāvums atainots ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām.

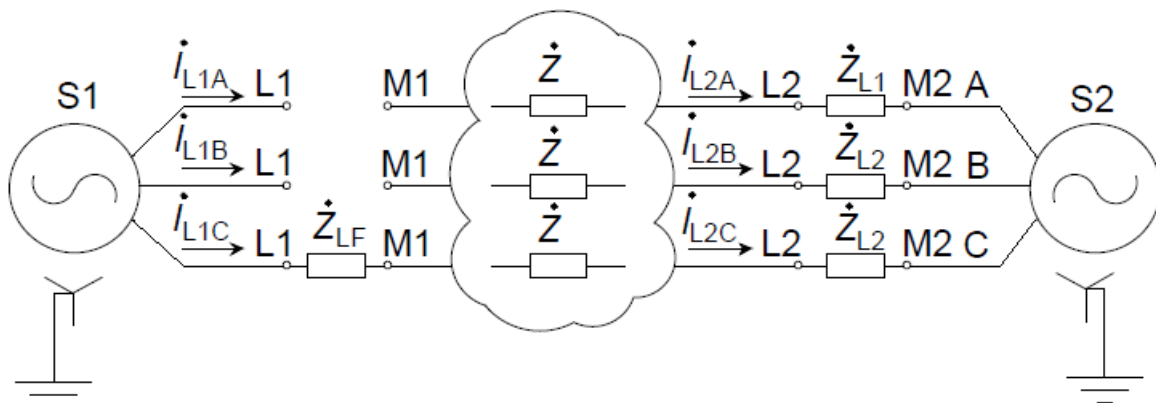


8.29. att. Kompleksā aizvietošanas shēma, vienlaikus rodoties diviem divfāžu pārrāvumiem, kur pirmais pārrāvums atainots ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām.



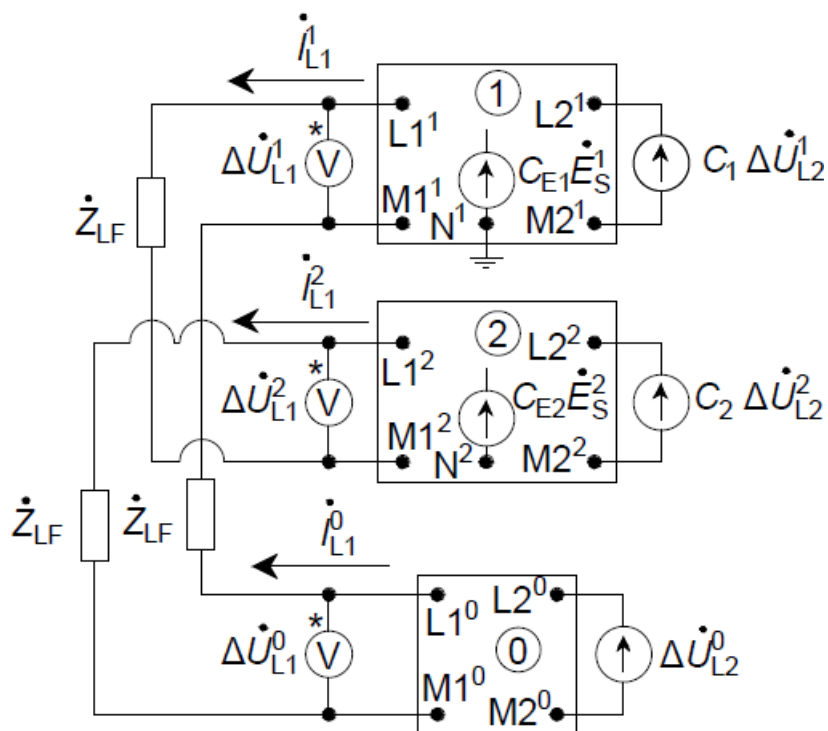
8.30. att. Kompleksā aizvietošanas shēma, vienlaikus rodoties diviem divfāžu pārrāvumiem, kur otrais pārrāvums atainots ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām.

Nākamā garnessimetriju kombinācija ir divfāžu pārrāvums un garnessimetrija ar pārejas pretestībām visās fāzēs (8.31. att.). Šajā piemērā ņemtas vērā potenciālās garnessimetrijas fāžu pārejas pretestības \dot{Z}_{L1} un \dot{Z}_{L2} un divfāžu pārrāvuma iespējamā nebojātās fāzes pārejas pretestība \dot{Z}_{LF} . Var atzīmēt arī to, ka, lai abiem bojājumiem varētu sastādīt kompleksās aizvietošanas shēmas, neizmantojot ideālos transformatorus, konkrētajā piemērā garnessimetrijai par aprēķina fāzi būtu jāpieņem A fāze, bet pārrāvumam – C fāze. Starp abiem nesimetrijas punktiem parādītais mākonis apzīmē simetrisku tīkla daļu ar saišu elementiem (katrā fāzē atainoti ar fāzes ekvivalento pretestību \dot{Z}), ieskaitot **potenciālus apejas ceļus starp abām sistēmām, kas ir iekļauta starp bojājumiem, lai norādītu, ka abi bojājumi var būt dažādos analizējamā tīkla punktos.**

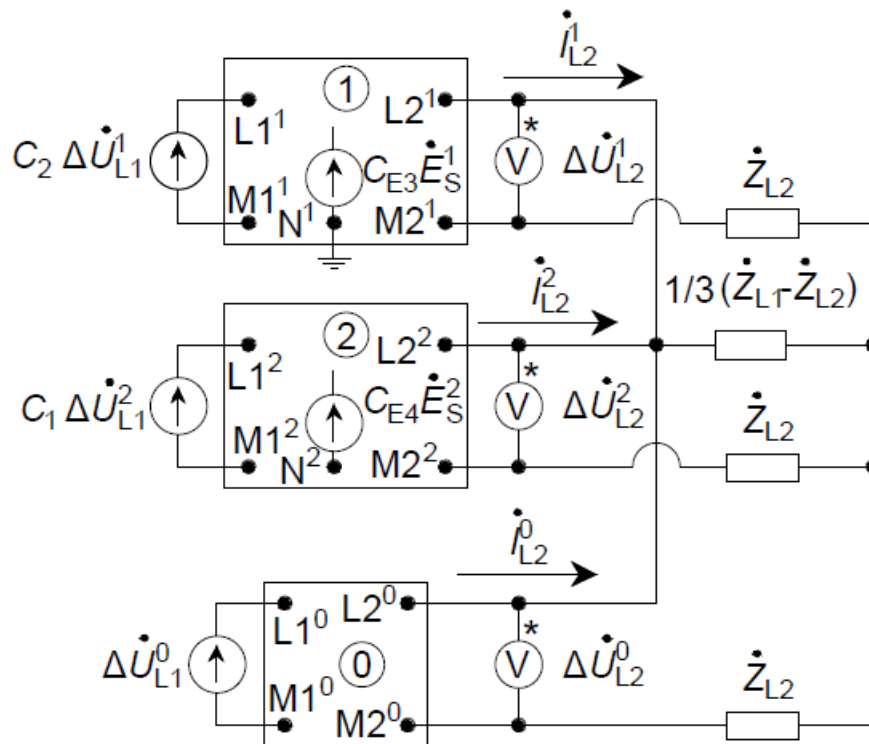


8.31. att. Vienlaicīgs divfāžu pārrāvums un garnessimetrija ar pārejas pretestībām visās fāzēs divpusēji barotā tīklā.

Vienlaikus rodoties divfāžu pārrāvumam un garennesimetrijai ar pārejas pretestībām visās fāzēs, izmantojamās aizvietošanas shēmas parādītas 8.32. un 8.33. attēlā, kur 8.32. attēlā pārrāvums atainots ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām, bet 8.33. attēlā garennesimetrija atainota ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām.

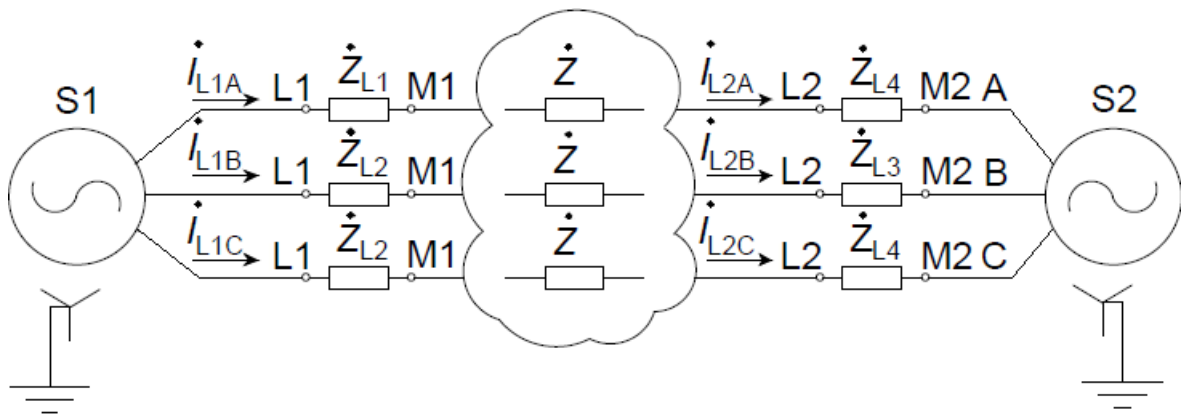


8.32. att. Kompleksā aizvietošanas shēma, rodoties vienlaicīgi divfāžu pārrāvumam un garennesimetrijai ar pārejas pretestībām visās fāzēs, kur pārrāvums atainots ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām.



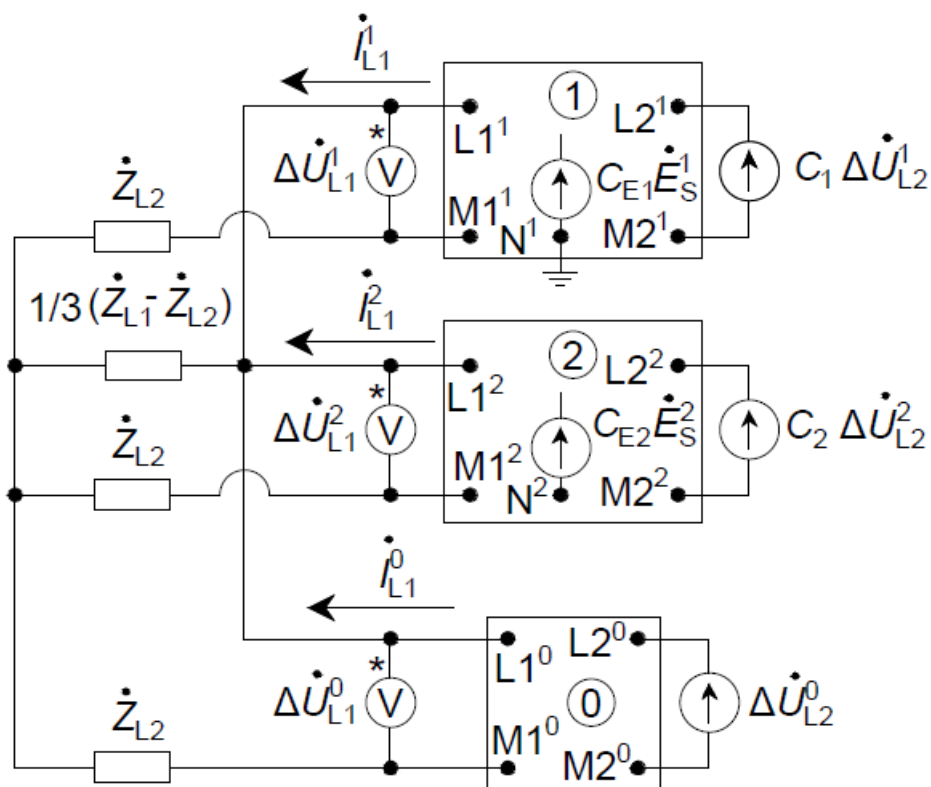
8.33. att. Kompleksā aizvietošanas shēma, vienlaikus rodoties divfāžu pārrāvumam un garensimetrijai ar pārejas pretestībām visās fāzēs, kur garensimetrija atainota ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām.

No divām vienlaicīgu garensimetriju kombinācijām vēl jāaplūko divu garensimetriju ar pārejas pretestībām visās fāzēs rašanās scenārijs (8.34. att.). Šajā piemērā ņemtas vērā iespējamās garensimetriju fāžu pārejas pretestības gan pirmajai nesimetrijas vietai (\dot{Z}_{L1} , \dot{Z}_{L2}), gan otrajai nesimetrijas vietai (\dot{Z}_{L3} , \dot{Z}_{L4}). Var atzīmēt arī to, ka, lai abiem bojājumiem varētu sastādīt kompleksās aizvietošanas shēmas, neizmantojot ideālos transformatorus, konkrētajā piemērā pirmajai garensimetrijai par aprēķina fāzi būtu jāpieņem A fāze, bet otrajai – B fāze. Starp abiem nesimetriju punktiem parādītais mākonis apzīmē simetrisku tīkla daļu ar saišu elementiem (katrā fāzē atainoti ar fāzes ekvivalento pretestību \dot{Z}), **ieskaitot potenciālus apejas ceļus starp abām sistēmām, kas ir iekļauta starp bojājumiem, lai norādītu, ka abi bojājumi var būt dažādos analizējamā tīkla punktos.**

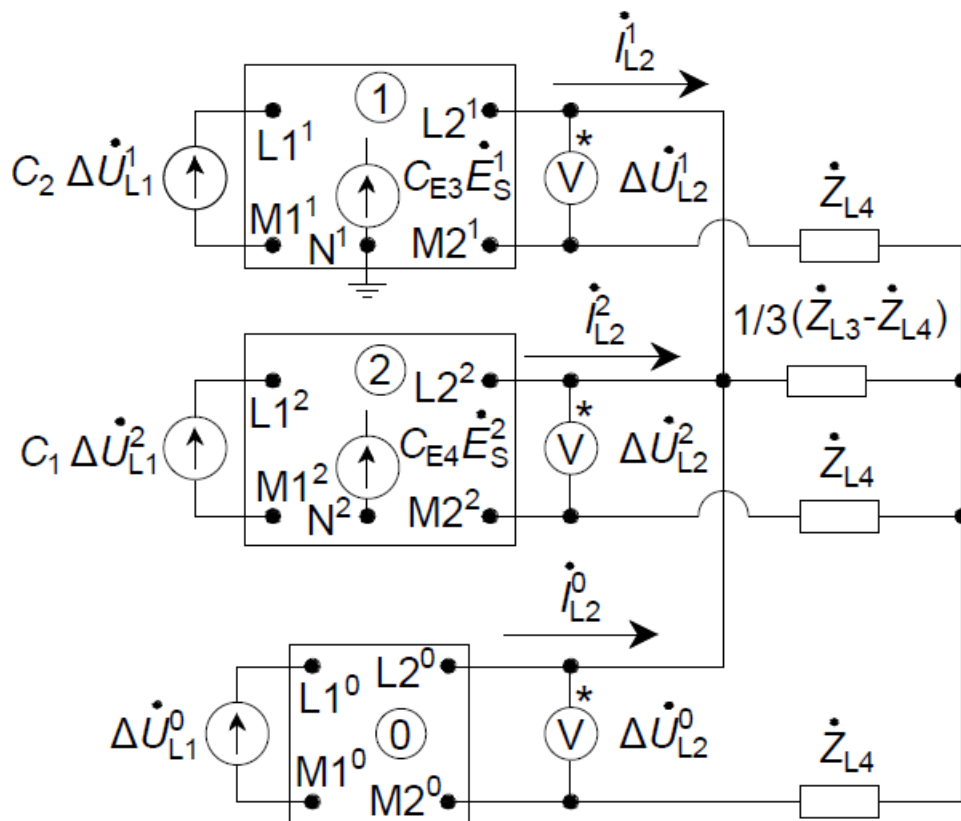


8.34. att. Divas vienlaicīgas garennesimetrijas ar pārejas pretestībām visās fāzēs divpusēji barotā tīklā.

Vienlaikus rodoties divām garennesimetrijām ar pārejas pretestībām visās fāzēs, izmantojamās aizvietošanas shēmas parādītas 8.35. un 8.36. attēlā, kur 8.35. attēlā pirmā garennesimetrija atainota ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām, bet 8.36. attēlā otrā garennesimetrija atainota ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām.

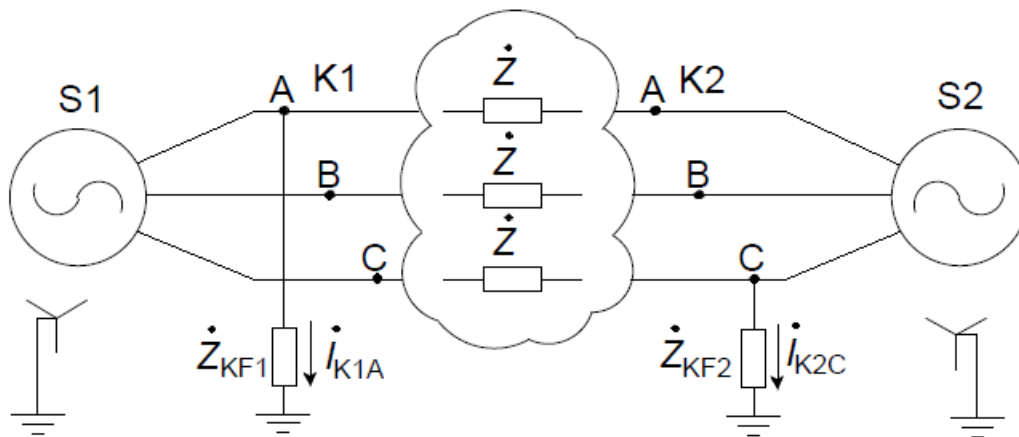


8.35. att. Kompleksā aizvietošanas shēma, rodoties vienlaicīgi divām garennesimetrijām ar pārejas pretestībām visās fāzēs, kur pirmā garennesimetrija atainota ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām.



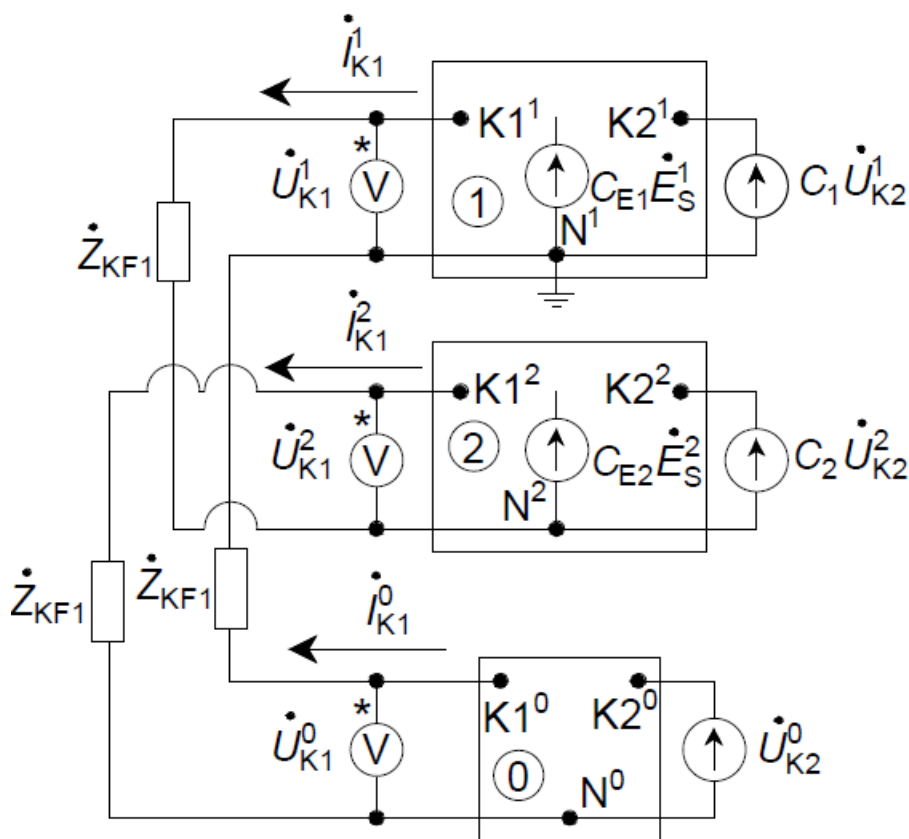
8.36. att. Kompleksā aizvietošanas shēma, vienlaikus rodoties divām garensimetrijām ar pārejas pretestībām visās fāzēs, kur otrā garensimetrija atainota ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām.

Turpinājumā aplūkotas divu vienlaicīgu šķērsnesimetriju kombinācijas, sākot ar diviem vienfāzes īsslēgumiem (8.37. att.). Šajā piemērā ņemtas vērā iespējamās īsslēgumu bojāto fāžu kopējās pārejas pretestības uz zemi \dot{Z}_{KF1} un \dot{Z}_{KF2} . Var atzīmēt arī to, ka, lai abiem bojājumiem varētu sastādīt kompleksās aizvietošanas shēmas, neizmantojot ideālos transformatorus, konkrētajā piemērā pirmajam īsslēgumam par aprēķina fāzi būtu jāpieņem A fāze, bet otrajam – C fāze. Starp abiem nesimetrijas punktiem parādītais mākonis apzīmē simetrisku tīkla daļu ar saišu elementiem (katrā fāzē atainoti ar fāzes ekvivalento pretestību \dot{Z}), **ieskaitot potenciālus apejas ceļus starp abām sistēmām, kas ir iekļauta starp bojājumiem, lai norādītu, ka abi bojājumi var būt dažādos analizējamā tīkla punktos.**

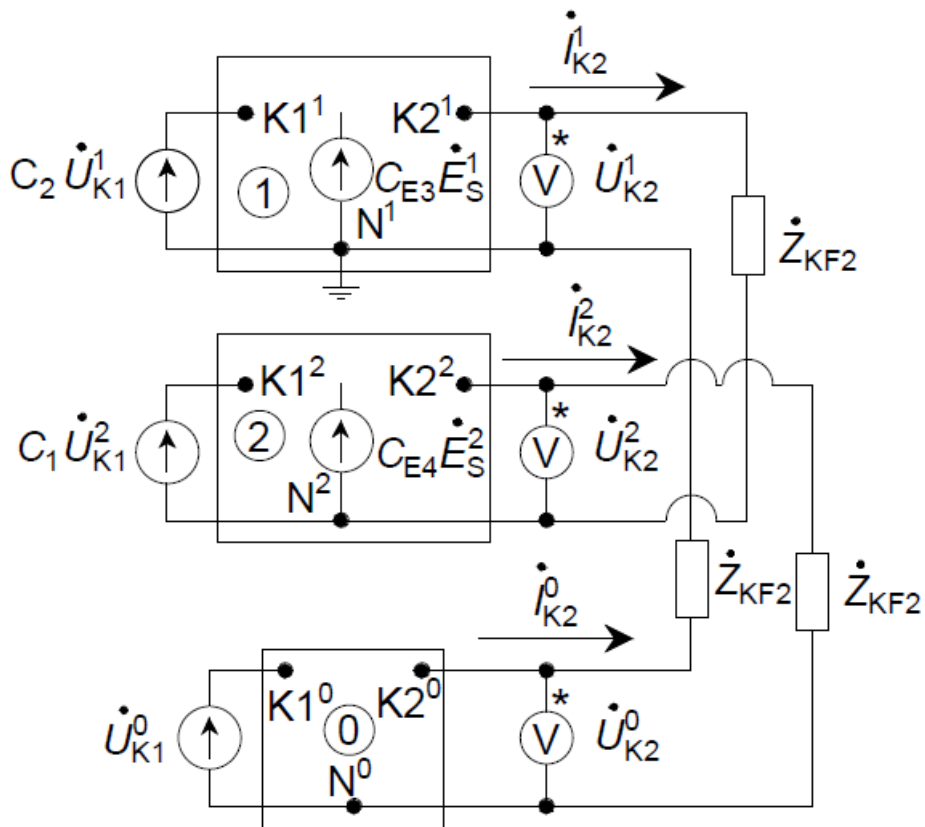


8.37. att. Divi vienlaicīgi vienfāzes īsslēgumi divpusēji barotā tīklā.

Rodoties diviem vienlaicīgiem vienfāzes īsslēgumiem, izmantojamās kompleksās aizvietošanas shēmas parādītas 8.38. un 8.39. attēlā, kur 8.38. attēlā pirmais īsslēgums atainots ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām, bet 8.39. attēlā otrs īsslēgums atainots ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām.

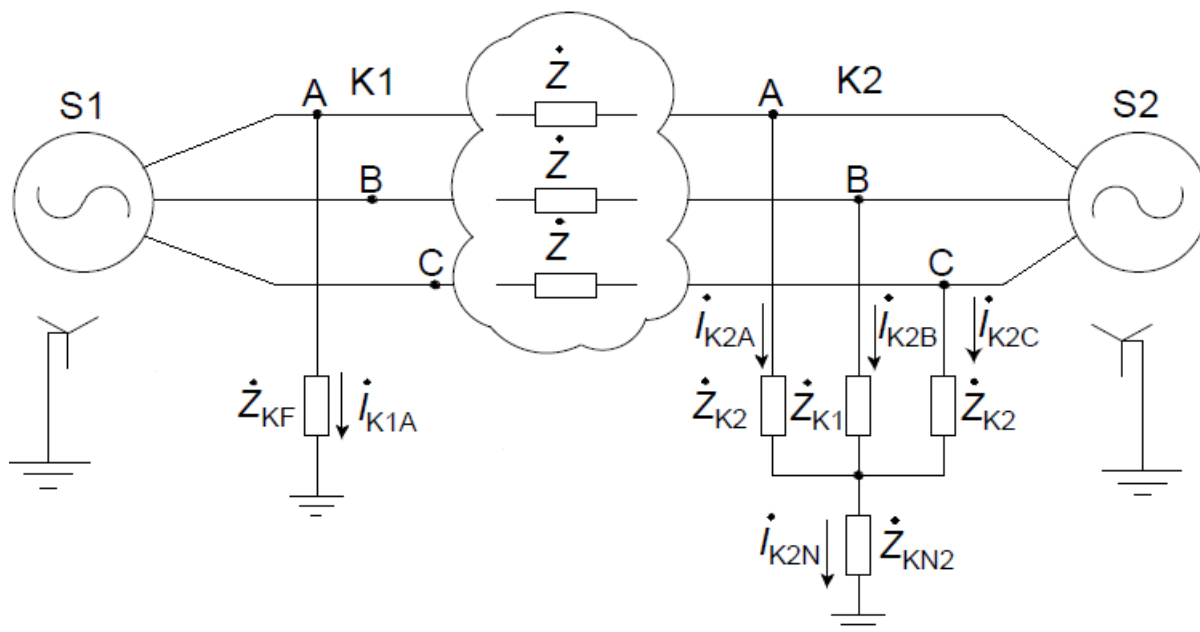


8.38. att. Kompleksā aizvietošanas shēma, vienlaikus rodoties diviem vienfāzes īsslēgumiem, kur pirmais īsslēgums atainots ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām.



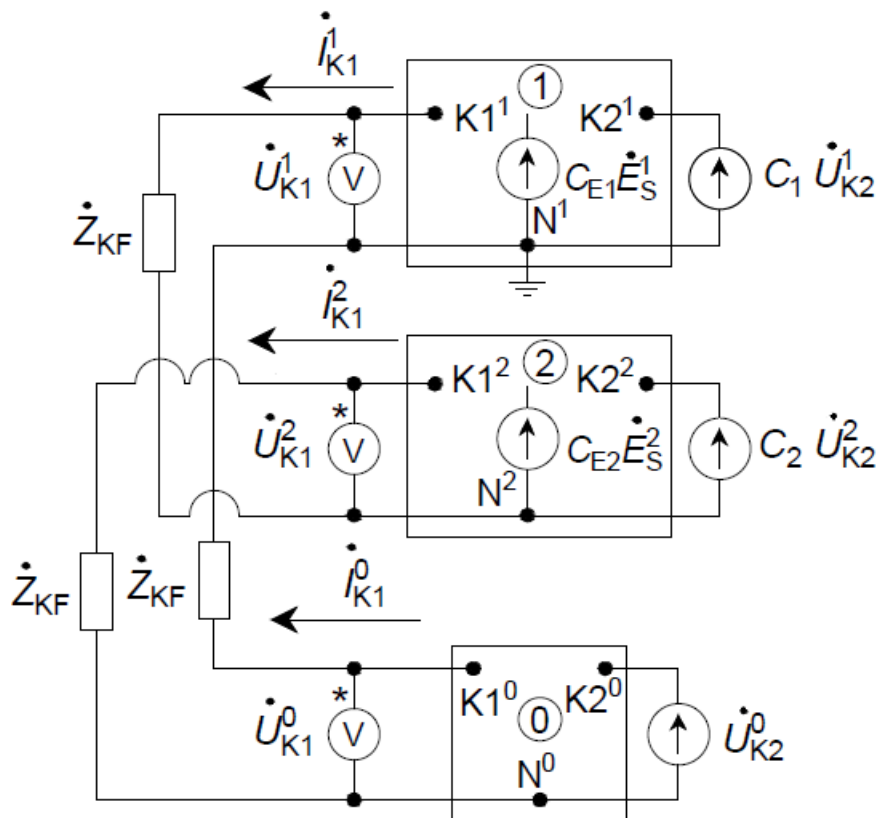
8.39. att. Kompleksā aizvietošanas shēma, rodoties vienlaicīgi diviem vienfāzes īsslēgumiem, kur otrais īsslēgums atainots ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām.

Nākamā divu šķērsnesimetriju kombinācija ir vienlaicīgs vienfāzes īsslēgums un šķērsnesimetrija ar pārejas pretestībām visās fāzēs un saitē uz zemi (8.40. att.). Šajā piemērā ņemta vērā iespējamā vienfāzes īsslēguma bojātās fāzes kopējā pārejas pretestība uz zemi \dot{Z}_{KF} un šķērsnesimetrijas fāžu pārejas pretestības \dot{Z}_{K1} un \dot{Z}_{K2} , kā arī neitrāles jeb saites uz zemi pārejas pretestība \dot{Z}_{KN2} . Var atzīmēt arī to, ka, lai abiem bojājumiem varētu sastādīt kompleksās aizvietošanas shēmas, neizmantojot ideālos transformatorus, konkrētajā piemērā vienfāzes īsslēgumam par aprēķina fāzi būtu jāpieņem A fāze, bet šķērsnesimetrijai – B fāze. Starp abiem nesimetrijas punktiem parādītais mākonis apzīmē simetrisku tīkla daļu ar saišu elementiem (katrā fāzē atainoti ar fāzes ekvivalento pretestību \dot{Z}), **ieskaitot potenciālus apejas ceļus starp abām sistēmām, kas ir iekļauta starp bojājumiem, lai norādītu, ka abi bojājumi var būt dažādos analizējamā tīkla punktos.**

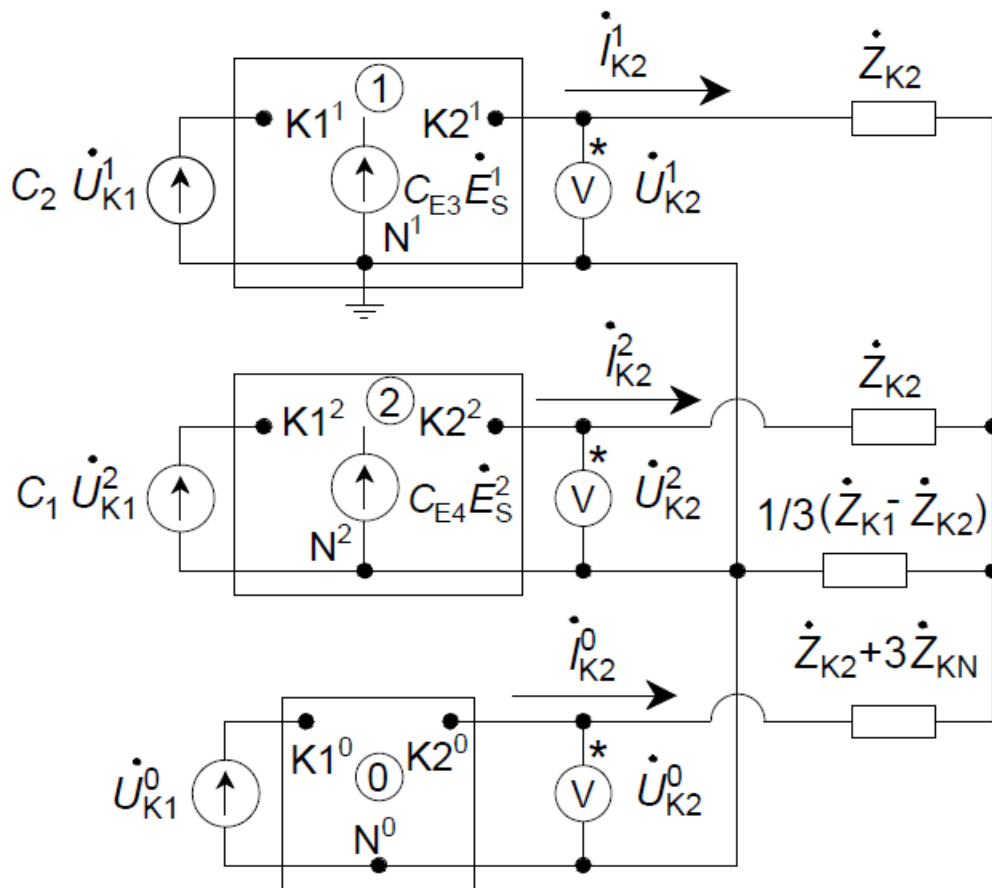


8.40. att. Vienlaicīgs vienfāzes īsslēgums un šķērsnesimetrija ar pārejas pretestībām visās fāzēs un saitē uz zemi divpusēji barotā tīklā.

Vienlaicīga vienfāzes īsslēguma un šķērsnesimetrijas ar pārejas pretestībām visās fāzēs un saitē uz zemi rašanās gadījumā izmantojamās kompleksās aizvietošanas shēmas parādītas 8.41. un 8.42. attēlā, kur 8.41. attēlā vienfāzes īsslēgums atainots ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām, bet 8.42. attēlā šķērsnesimetrija ar pārejas pretestībām visās fāzēs un saitē uz zemi atainota ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām.

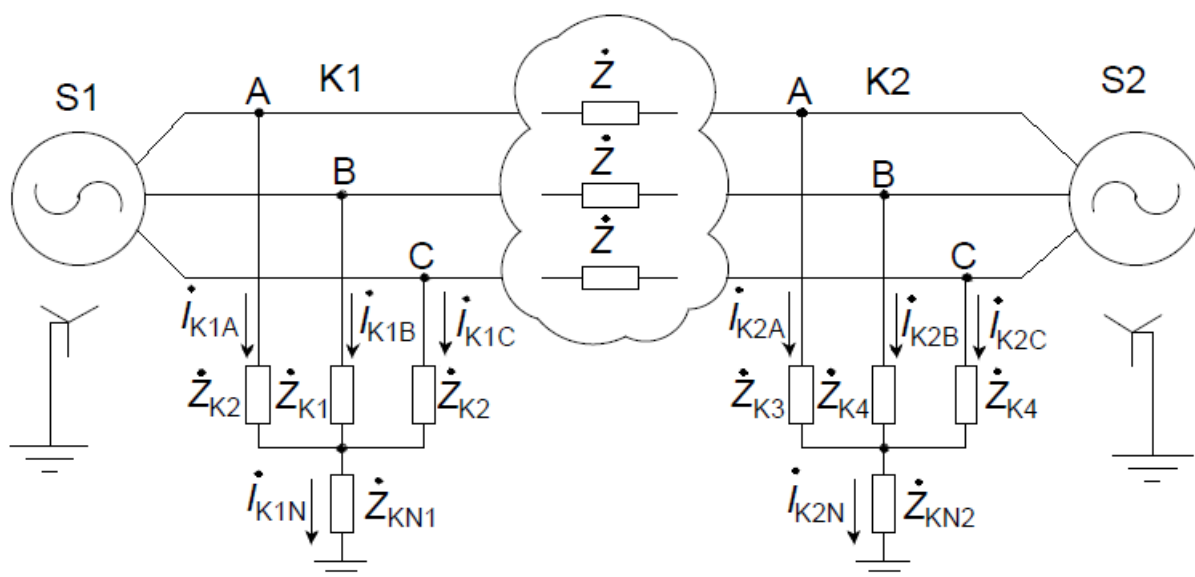


8.41. att. Kompleksā aizvietošanas shēma, vienlaikus rodoties vienfāzes īsslēgumam un šķērsnesimetrijai ar pārejas pretestībām visās fāzēs un saitē uz zemi, kur vienfāzes īsslēgums atainots ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām.



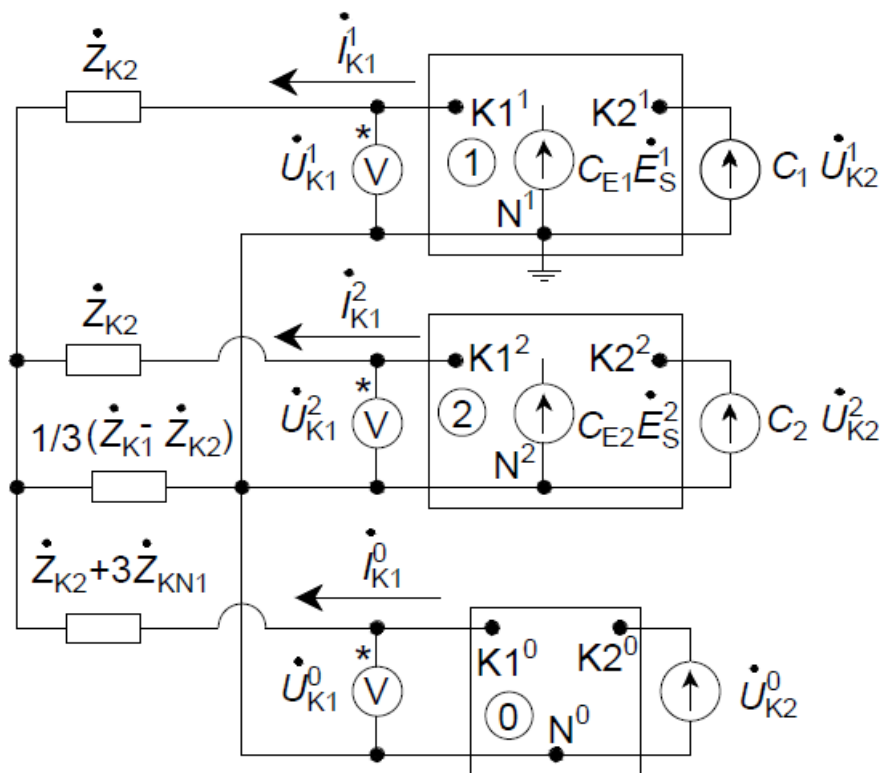
8.42. att. Kompleksā aizvietošanas shēma, rodoties vienfāzes īsslēgumam un šķērsnesimetrijai ar pārejas pretestībām visās fāzēs un saitē uz zemi, kur šķērsnesimetrija atainota ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām.

Pēdējā no aplūkotajām divu šķērsnesimetriju kombinācijām ir divas vienlaicīgas šķērsnesimetrijas ar pārejas pretestībām visās fāzēs un saitēs uz zemi (8.43. att.). Šajā piemērā ņemtas vērā iespējamās šķērsnesimetriju fāžu un neitrāļu pārejas pretestības gan pirmajai nesimetrijas vietai (\dot{Z}_{K1} , \dot{Z}_{K2} , \dot{Z}_{KN1}), gan otrajai nesimetrijas vietai (\dot{Z}_{K3} , \dot{Z}_{K4} , \dot{Z}_{KN2}). Var atzīmēt arī to, ka, lai abiem bojājumiem varētu sastādīt kompleksās aizvietošanas shēmas, neizmantojot ideālos transformatorus, konkrētajā piemērā pirmajai šķērsnesimetrijai par aprēķina fāzi būtu jāpieņem B fāze, bet otrajai – A fāze. Starp abiem nesimetrijas punktiem parādītais mākonis apzīmē simetrisku tīkla daļu ar saišu elementiem (katrā fāzē atainoti ar fāzes ekvivalento pretestību \dot{Z}), ieskaitot potenciālus apejas ceļus starp abām sistēmām, kas ir iekļauta starp bojājumiem, lai norādītu, ka abi bojājumi var būt dažādos analizējamā tīkla punktos.

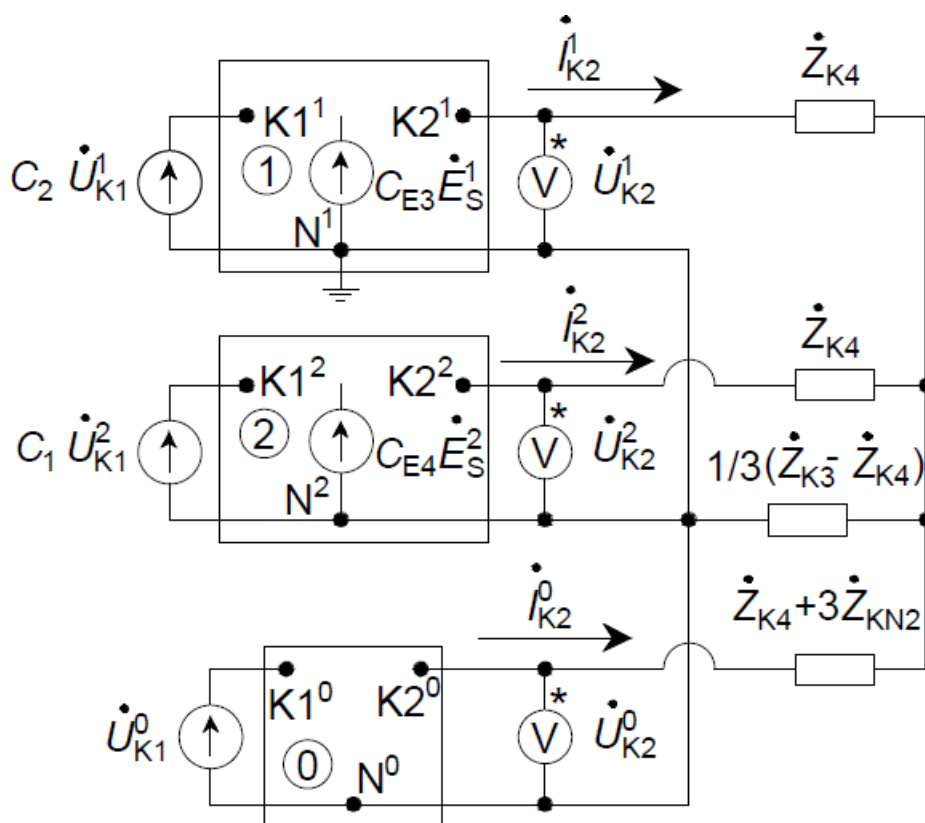


8.43. att. Divas vienlaicīgas šķērsnesimētrijas ar pārejas pretestībām visās fāzēs un saitē uz zemi divpusēji barotā tīklā.

Vienlaikus rodoties divām šķērsnesimētrijām ar pārejas pretestībām visās fāzēs un saitēs uz zemi, izmantojamās aizvietošanas shēmas parādītas 8.44. un 8.45. attēlā, kur 8.44. attēlā pirmā šķērsnesimētrija atainota ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām, bet 8.45. attēlā šķērsnesimētrija atainota ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām.

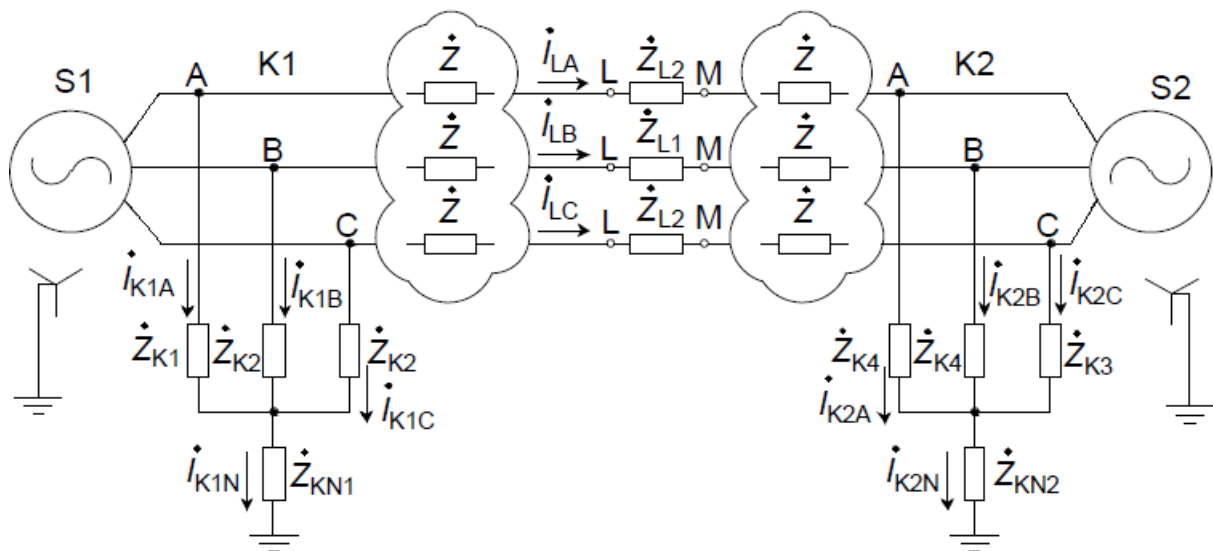


8.44. att. Kompleksā aizvietošanas shēma, rodoties vienlaicīgi divām šķērsnesimētrijām ar pārejas pretestībām visās fāzēs un saitēs uz zemi, kur pirmā šķērsnesimētrija atainota ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām.



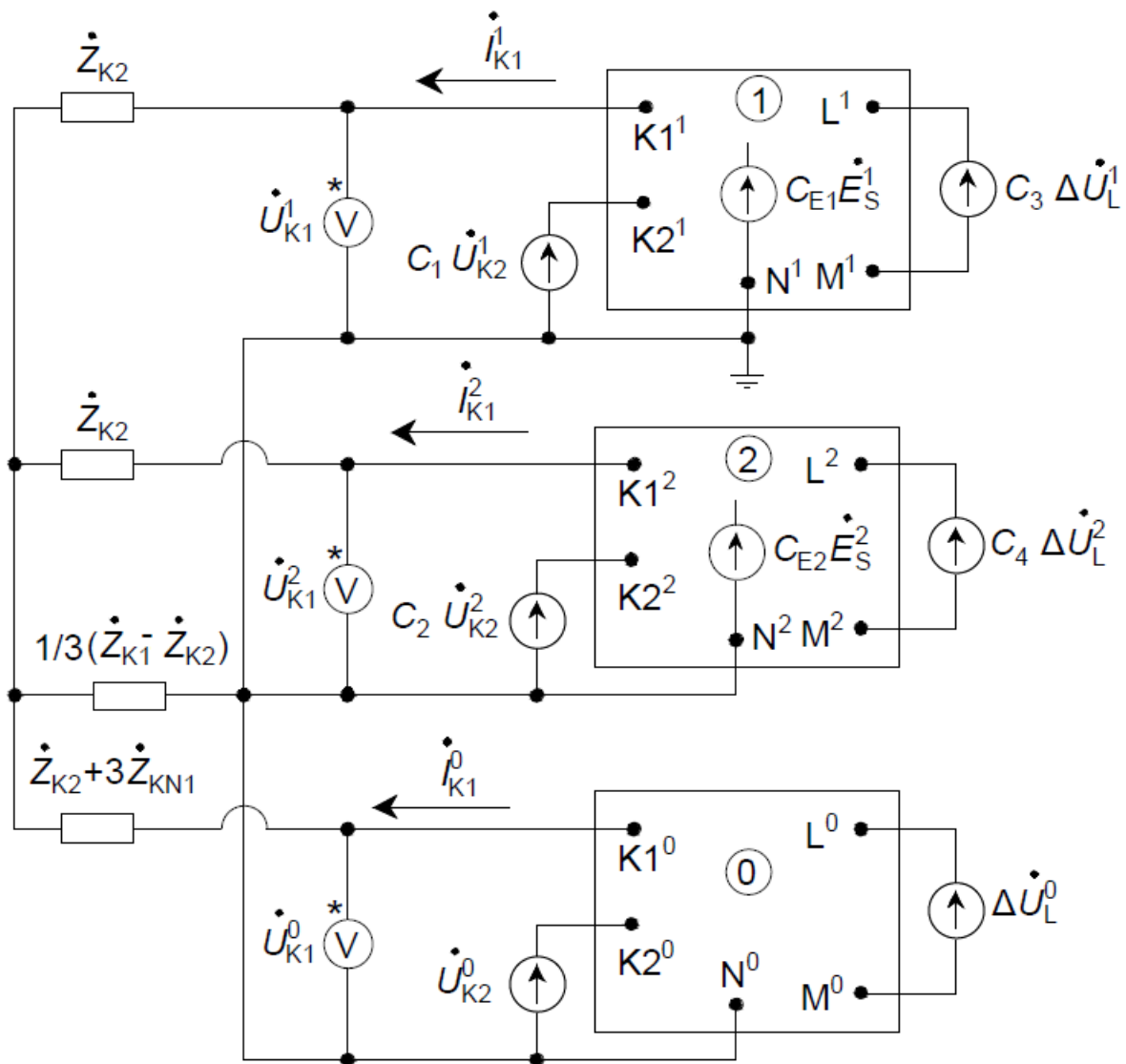
8.45. att. Kompleksā aizvietošanas shēma, vienlaikus rodoties divām šķērsnesimetrijām ar pārejas pretestībām visās fāzēs un saitēs uz zemi, kur otrā šķērsnesimetrija atainota ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām.

Ilustrācijai parādīts piemērs ar trim vienlaicīgām nesimetrijām, ko veido divas šķērsnesimetrijas ar pārejas pretestībām visās fāzēs un saitēs uz zemi un viena garenesimetrija ar pārejas pretestībām visās fāzēs (8.46. att.). Šajā piemērā ņemtas vērā iespējamās šķērsnesimetriju fāžu un neitrāļu pārejas pretestības gan pirmajai šķērsnesimetrijas vietai (\dot{Z}_{K1} , \dot{Z}_{K2} , \dot{Z}_{KN1}), gan otrajai šķērsnesimetrijas vietai (\dot{Z}_{K3} , \dot{Z}_{K4} , \dot{Z}_{KN2}), kā arī garenesimetrijas fāžu pārejas pretestības \dot{Z}_{L1} , \dot{Z}_{L2} . Var atzīmēt arī to, ka, lai šiem bojājumiem varētu sastādīt kompleksās aizvietošanas shēmas, neizmantojot ideālos transformatorus, konkrētajā piemērā pirmajai šķērsnesimetrijai par aprēķina fāzi būtu jāpieņem A fāze, otrajai – C fāze, bet garenesimetrijai – B fāze. Starp nesimetriju punktiem parādītie mākoņi apzīmē simetriskas tīkla daļas ar saišu elementiem (atainotas ar ekvivalentām fāžu pretestībām \dot{Z}), **ieskaitot potenciālus apejas ceļus starp abām sistēmām, kuras ir iekļautas starp bojājumiem, lai norādītu, ka šie bojājumi var būt dažādos analizējamā tīkla punktos.**

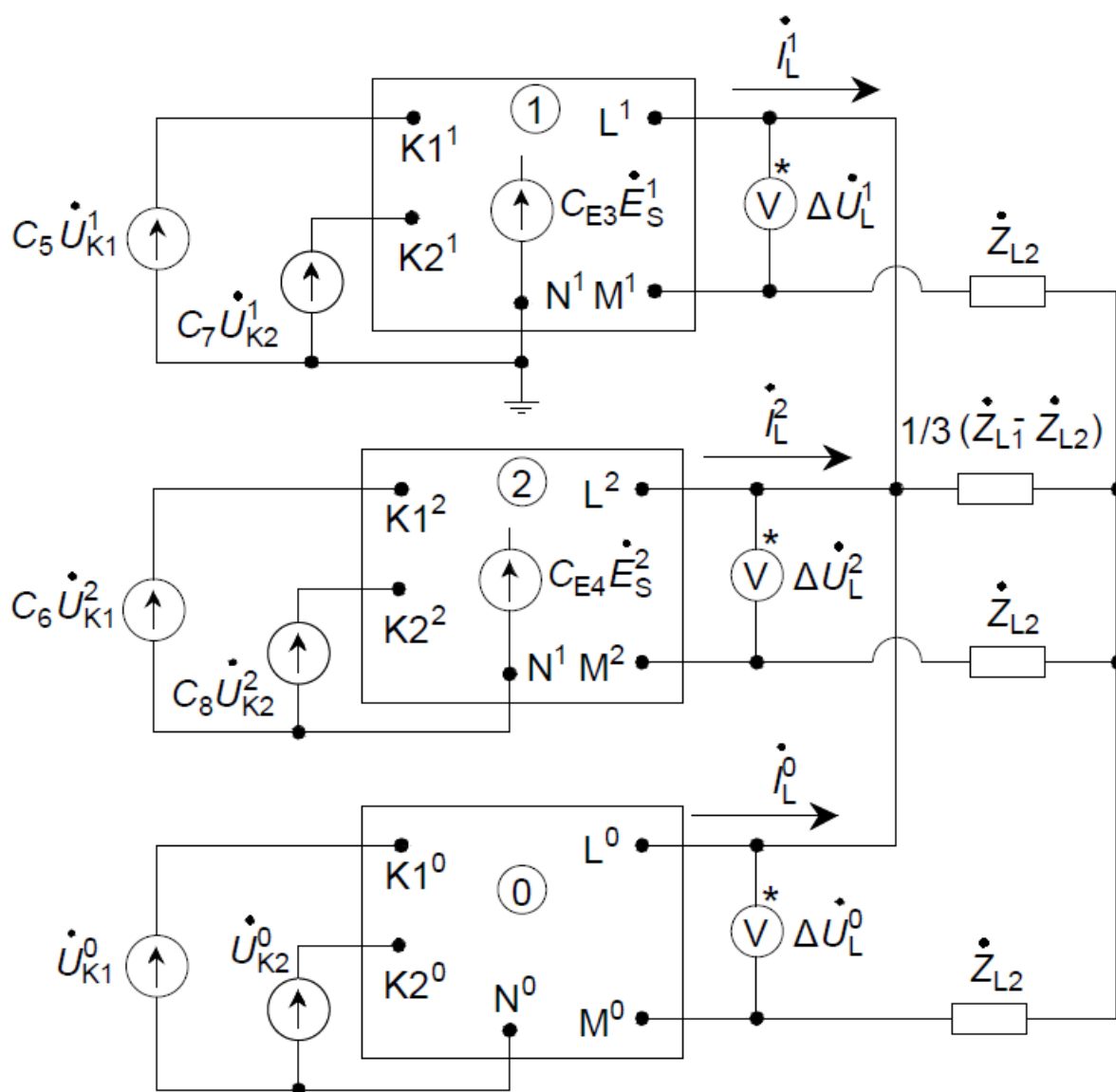


8.46. att. Divas vienlaicīgas šķērsnesimetrijas ar pārejas pretestībām visās fāzēs un saitēs uz zemi un garennesimetrija ar pārejas pretestībām visās fāzēs divpusēji barotā tīklā.

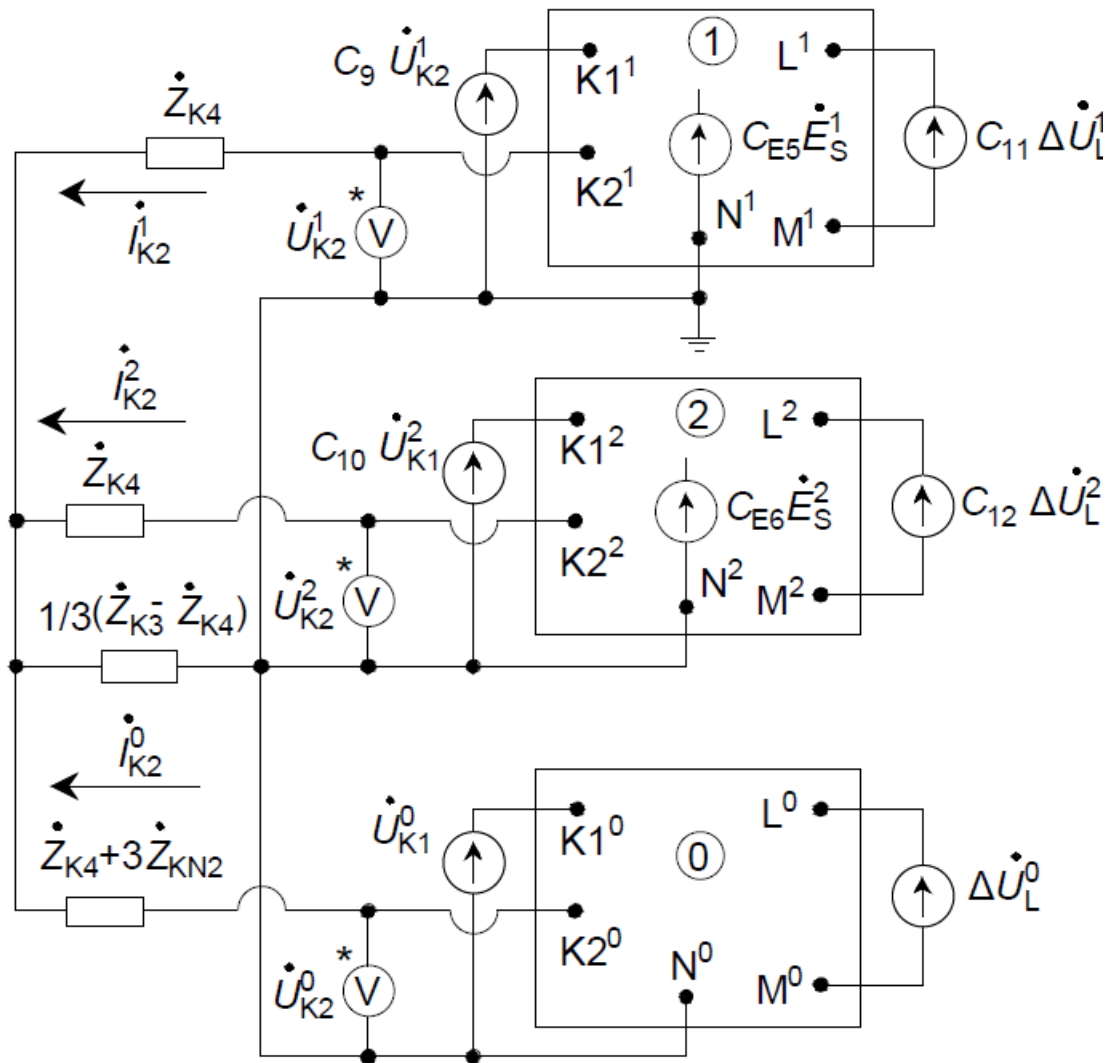
Vienlaikus rodoties divām šķērsnesimetrijām ar pārejas pretestībām visās fāzēs un saitēs uz zemi un garennesimetrijai ar pārejas pretestībām visās fāzēs, izmantojamās aizvietošanas shēmas parādītas 8.47., 8.48. un 8.49. attēlā, kur 8.47. attēlā pirmā šķērsnesimetrija atainota ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām, 8.48. attēlā garennesimetrija atainota ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām un 8.49. attēlā otrā šķērsnesimetrija atainota ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām.



8.47. att. Kompleksā aizvietošanas shēma, vienlaikus rodoties divām šķērsnesimetrijām ar pārejas pretestībām visās fāzēs un saitēs uz zemi un garennesimetrijai ar pārejas pretestībām visās fāzēs, kur pirmā šķērsnesimetrija atainota ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām.



8.48. att. Kompleksā aizvietošanas shēma, vienlaikus rodoties divām šķērsnesimetrijām ar pārejas pretestībām visās fāzēs un saitēs uz zemi un garennesimetrijai ar pārejas pretestībām visās fāzēs, kur garennesimetrija atainota ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām.



8.49. att. Kompleksā aizvietošanas shēma, vienlaikus rodoties divām šķērsnesimetrijām ar pārejas pretestībām visās fāzēs un saitēs uz zemi un garensimetrijai ar pārejas pretestībām visās fāzēs, kur otrā šķērsnesimetrija atainota ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām.

Šajā gadījumā, nosakot nesimetriju ieviesto papildu EDS avotu vērtības, pirmajai kompleksajai aizvietošanas shēmai garensimetriju atainojošie EDS avoti, kuru vērtības noteiktas no otrās kompleksās aizvietošanas shēmas, jātransformē no B fāzes simetriskajām komponentēm uz A fāzes komponentēm. Vienlaicīgi otro šķērsnesimetriju atainojošie EDS avoti, kuru vērtības noteiktas no trešās kompleksās aizvietošanas shēmas, jātransformē no C fāzes simetriskajām komponentēm uz A fāzes komponentēm. Analogiski otrajai kompleksajai aizvietošanas shēmai pirmo šķērsnesimetriju atainojošie EDS avoti, kuru vērtības noteiktas no pirmās kompleksās aizvietošanas shēmas, jātransformē no A fāzes simetriskajām komponentēm uz B fāzes komponentēm. Vienlaicīgi otro šķērsnesimetriju atainojošie EDS avoti, kuru vērtības noteiktas no trešās kompleksās aizvietošanas shēmas, jātransformē no C fāzes simetriskajām komponentēm uz B fāzes komponentēm. Savukārt trešajai kompleksajai aizvietošanas shēmai pirmo šķērsnesimetriju atainojošie EDS avoti, kuru vērtības noteiktas no pirmās kompleksās aizvietošanas shēmas, jātransformē no A fāzes simetriskajām komponentēm uz C fāzes

komponentēm. Vienlaicīgi garenesimetriju atainojošie EDS avoti, kuru vērtības noteiktas no otrās kompleksās aizvietošanas shēmas, jātransformē no B fāzes simetriskajām komponentēm uz C fāzes komponentēm. Attiecīgi 8.47.–8.49. attēlā redzamajām kompleksajām aizvietošanas shēmām lietojamie pagriezienu koeficienti (pie 8.46. attēla bojājumu īpašajām fāzēm) doti 8.3. tabulā.

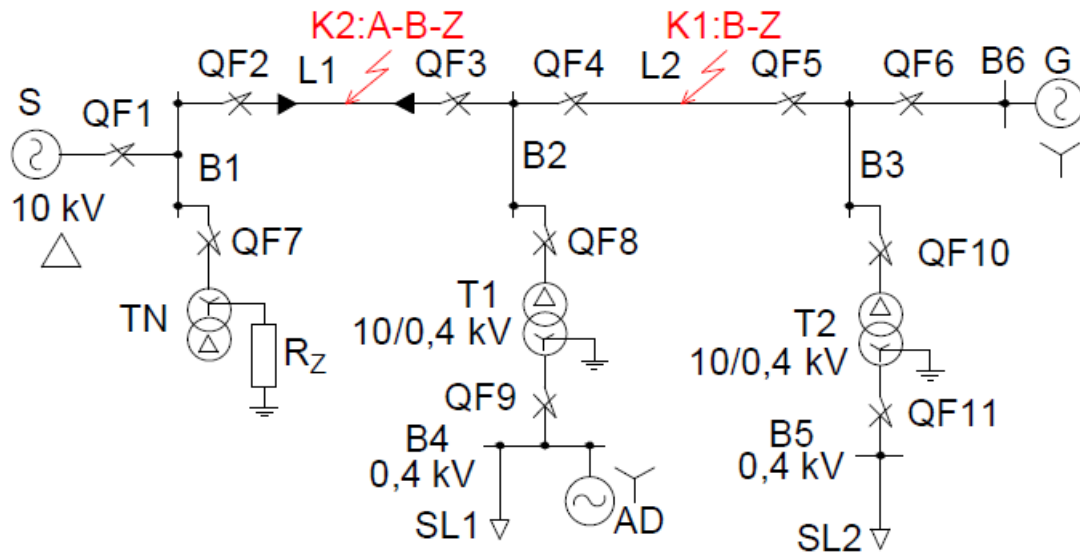
8.3. tabula

Trīs vienlaicīgu nesimetriju piemēra pagriezienu koeficienti

Pirmās šķērsnesimetrijas aizvietošanas shēma, aprēķina fāze A					
C_1	C_2	C_3	C_4	C_{E1}	C_{E2}
\dot{a}^2	\dot{a}	\dot{a}	\dot{a}^2	1	1
Garenesimetrijas aizvietošanas shēma, aprēķina fāze B					
C_5	C_6	C_7	C_8	C_{E3}	C_{E4}
\dot{a}^2	\dot{a}	\dot{a}	\dot{a}^2	\dot{a}^2	\dot{a}
Otrās šķērsnesimetrijas aizvietošanas shēma, aprēķina fāze C					
C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{E5}	C_{E6}
\dot{a}	\dot{a}^2	\dot{a}^2	\dot{a}	\dot{a}	\dot{a}^2

8.3. Pirmais elektriskās sistēmas režīma parametru aprēķina piemērs vairāku vienlaicīgu nesimetriju rašanās gadījumā ar topoloģisku risinājumu

Pirmajā režīma parametru aprēķina piemērā, rodoties vairākām vienlaicīgām nesimetrijām, tiks parādīts topoloģisks risinājums šādam uzdevumam: aprēķināt fāžu spriegumus un strāvas abās BV un jaudas slēdzīem QF2 un QF5 piesaistīto aizsardzību nomērītos fāžu spriegumus un strāvas, izveidojoties B fāzes īsslēgumam uz zemi K1 pirmā aprēķinu piemēru tīkla līnijā L2 attālumā $\alpha_{K1} = 0,1$ r. v. no kopnēm B2 un divfāžu īsslēgumam uz zemi fāzēs A un B K2 līnijā L1 attālumā $\alpha_{K2} = 0,7$ r. v. no kopnēm B1 (8.50. att.). Dati par konkrētā tīkla elementu un slodzes režīma parametriem doti 9. pielikumā. Līnijas L2 īsslēguma K1 kopējā pārejas pretestība uz zemi ir $\dot{Z}_{K1B} + \dot{Z}_{K1N} = 20 \Omega$, bet L1 īsslēgumam K2 pārejas pretestības ir pieņemtas šādas: $\dot{Z}_{K2A} = \dot{Z}_{K2B} = 0,5 \Omega$ un $\dot{Z}_{K1N} = 0 \Omega$. Aprēķins jāveic īsslēgumu sākuma momentam, pieņemot, ka to rašanās brīdī sistēmas A fāzes sprieguma leņķis ir 0° , t. i., atbilstoši slodzes režīma parametru aprēķina momentam. Ievērojot, ka starp ģeneratoru G un īsslēgumiem ir īsi līniju posmi ar mazu pretestību un $t_{APR} < T_d''$, tiek pieņemts, ka ģenerators nonāks virspārejas režīmā. Dzinēju ekvivalents AD konkrētajā scenārijā TS aizvietošanas shēmā tiks ievērots ar tā pret-EDS un statora pretestību, kas dos iespēju noteikt maksimālās abu bojājumu strāvas.



8.50. att. Vienlaicīga B fāzes īsslēguma pirmā aprēķinu piemēru tīkla līnijā L2 un A, B fāžu īsslēguma uz zemi līnijā L1 režīma parametru aprēķina vienlīnijas izejas shēma.

Šajā piemērā tiks parādīts topoloģiskā aprēķina paņēmieni ar divu komplekso aizvietošanas shēmu vienlaicīgo skaitlisko risinājumu (skatīt 8.51. att., kur vienfāzes īsslēguma K1 robežnosacījumi ievēroti ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām, un 8.52. att., kur divfāžu īsslēguma uz zemi K2 robežnosacījumi ievēroti ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām). Var redzēt, ka šo īsslēgumu kompleksajām aizvietošanas shēmām jāizmanto atšķirīgas aprēķina fāzes (B fāze īsslēgumam K1 un C fāze īsslēgumam K2) un ka īsslēgumu, kura robežnosacījumus konkrētajā aizvietošanas shēmā neatbilstoši ar elektriskiem savienojumiem, parāda ar EDS avotiem, kuriem jāveic papildu pagriezieni TS un PS, lai izpildītu pāreju starp dažādajām aprēķina fāzēm. Aprēķins tiks veikts pie aprēķina sprieguma 10,5 kV.

Pirms turpmākajām darbībām, jāņem vērā, ka starp abām BV un AD ir transformators ar kompleksu transformācijas koeficientu, tādēļ ir jāveic tā TS pret-EDS pagriezieni par 30° , lai nodrošinātu, ka BV aprēķinātajām spriegumu un strāvu simetriskajām komponentēm būtu pareizi faktiskie leņķi. Šāda korekcija jāņem vērā, jo pēc slodzes režīma parametru aprēķina, avotiem atbilstošās EDS vērtības noteiktas ar to leņķi, kāds tas būtu šo avotu pieslēgšanas vietās, t. i., ņemot vērā pretēju pārrēķinu zemāk parādītajai. Uz BV attiecinātais AD pret-EDS būs

$$\dot{E}_{ADABV}'' = \dot{E}_{AD}'' e^{j30^\circ} = (4,24 - j2,96)(0,866 + j0,5) \approx 5,152 - j0,443 \text{ kV}.$$

Tagad iespējams noteikt visu avotu B un C fāžu EDS vērtības, kas nepieciešamas abām kompleksajām aizvietošanas shēmām (pēc slodzes režīma parametru aprēķina bija noteiktas tikai A fāzes EDS vērtības):

$$\dot{E}_{SB} = \dot{E}_{SA} \dot{a}^2 = 6,062(-0,5 - j0,866) \approx -3,031 - j5,250 \text{ kV},$$

$$\dot{E}_{GB} = \dot{E}_{GA} \dot{a}^2 = (4,09 + j5,12)(-0,5 - j0,866) \approx -2,389 - j6,102 \text{ kV},$$

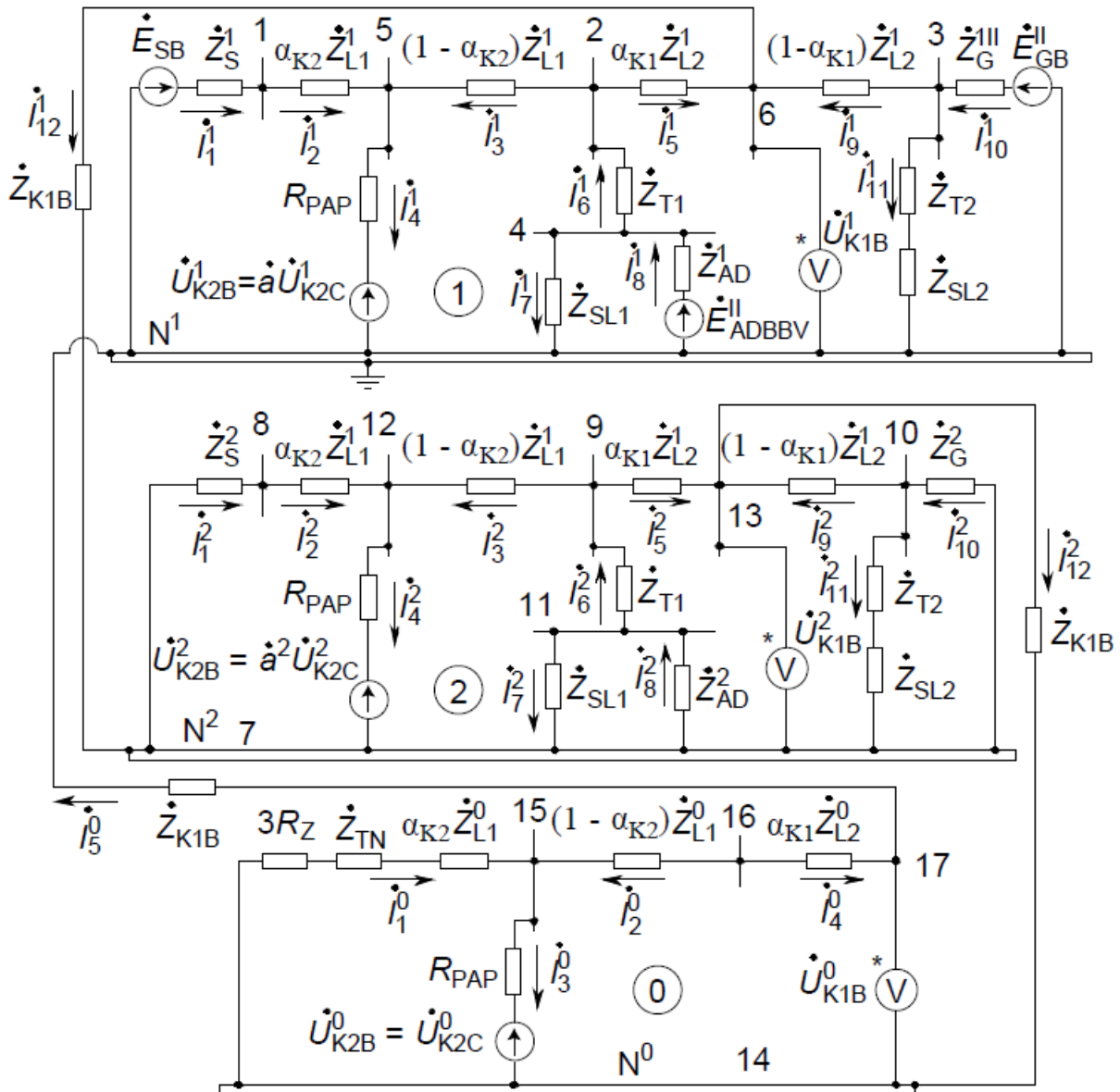
$$\dot{E}_{ADBBV}'' = \dot{E}_{ADABV}'' \dot{a}^2 = (5,152 - j0,443)(-0,5 - j0,866) \approx -2,96 - j4,24 \text{ kV},$$

$$\dot{E}_{SC} = \dot{E}_{SA} \dot{a} = 6,062(-0,5 + j0,866) \approx -3,031 + j5,250 \text{ kV},$$

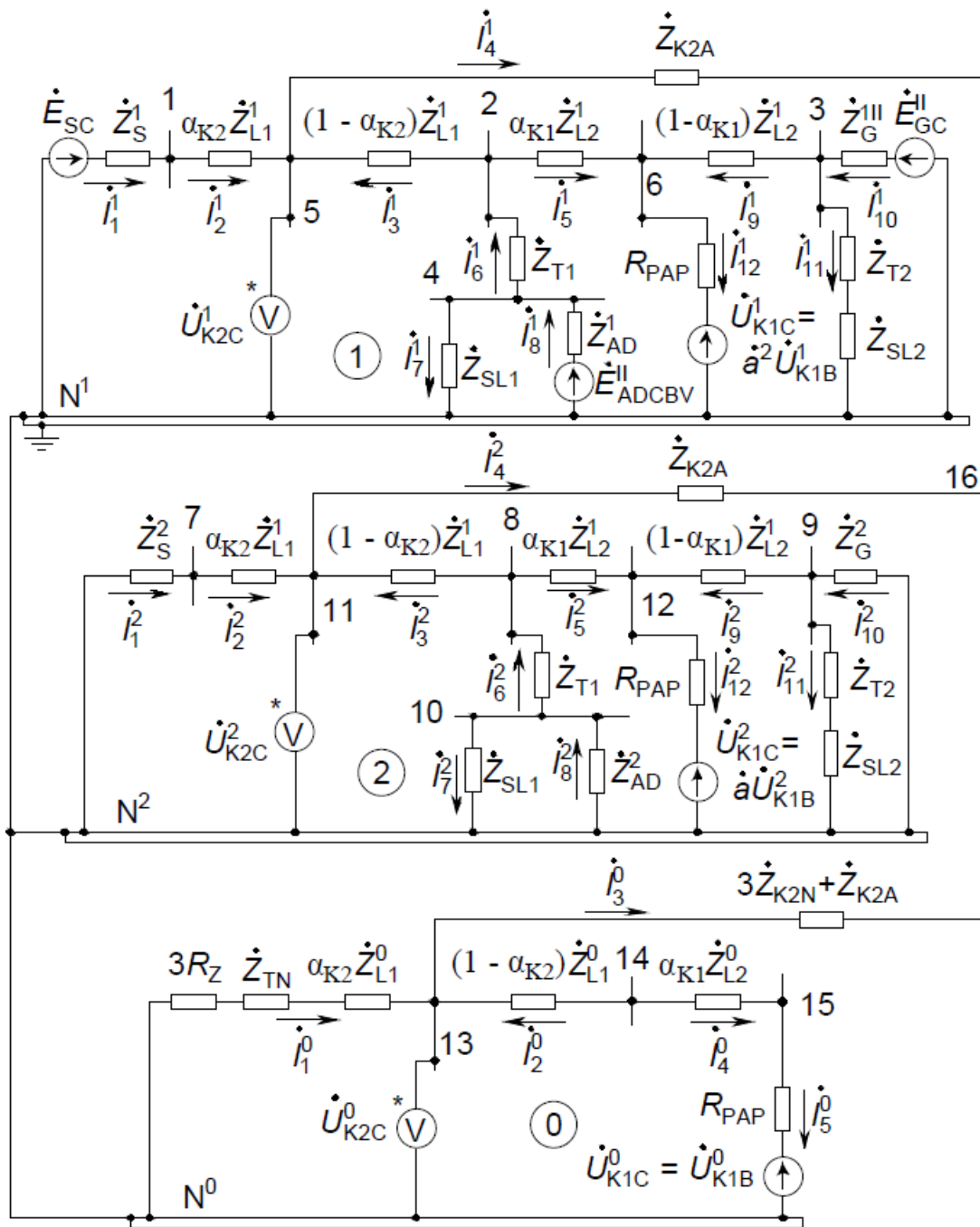
$$\dot{E}_{GC}'' = \dot{E}_{GA}'' \dot{a} = (4,09 + j5,12)(-0,5 + j0,866) \approx -6,479 + j0,982 \text{ kV},$$

$$\dot{E}_{ADCBV}'' = \dot{E}_{ADABV}'' \dot{a} = (5,152 - j0,443)(-0,5 - j0,866) \approx -2,192 + j4,683 \text{ kV}.$$

Aprēķins tiks sākts ar 8.51. attēlā doto komplekso aizvietošanas shēmu, kur pirmajam tuvinājuma solim tiek pieņemtas šādas īsslēgumu K2 atainojošo EDS avotu vērtības: $\dot{U}_{K2C}^1 = \dot{U}_{K2C}^2 = \dot{U}_{K2C}^0 = \dot{E}_{SC}/2 \approx -1,52 + j2,62 \text{ kV}$.



8.51. att. Vienlaicīga B fāzes īsslēguma pirmā aprēķinu piemēru tīkla līnijā L2 un A, B fāžu īsslēguma uz zemi līnijā L1 kompleksā aizvietošanas shēma, kurā ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām ievērots līnijas L2 īsslēgums K1.



8.52. att. Vienlaicīga B fāzes īsslēguma pirmā aprēķinu piemēru tīkla līnijā L2 un A, B fāžu īsslēguma uz zemi līnijā L1 kompleksā aizvietošanas shēma, kurā ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām ievērots līnijas L1 īsslēgums K2.

Abām kompleksajām aizvietošanas shēmām ir jāsastāda ieejas matricas: pirmās incidences matricas $M1$, $M2$, zaru pretestību vektori $ZZ1$, $ZZ2$ un zaru EDS avotu vektori $E1$, $E2$. Pirmā īsslēguma K1 aizvietošanas shēmas ieejas matricas:

$M1$	i_1^1	i_2^1	i_3^1	i_4^1	i_5^1	i_6^1	i_7^1	i_8^1	i_9^1	i_{10}^1	i_{11}^1	i_{12}^1	i_1^2	i_2^2	i_3^2
1	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	1	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0
5	0	-1	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	-1	0	0	0	-1	0	0	1	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$M1$	i_4^2	i_5^2	i_6^2	i_7^2	i_8^2	i_9^2	i_{10}^2	i_{11}^2	i_{12}^2	i_1^0	i_2^0	i_3^0	i_4^0	i_5^0	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7	-1	0	0	-1	1	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
10	0	0	0	0	0	1	-1	1	0	0	0	0	0	0	
11	0	0	1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
12	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
13	0	-1	0	0	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	
14	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	-1	0	0	
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	1	0	0	
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	

ZZ1

i_1^1	\dot{Z}_{S1}^1	0,02 + j0,11	
i_2^1	$\alpha_{K2}\dot{Z}_{L1}^1$	0,22 + j0,22	
i_3^1	$(1 - \alpha_{K2})\dot{Z}_{L1}^1$	0,09 + j0,09	
i_4^1	R_{PAP}	0,001	
i_5^1	$\alpha_{K1}\dot{Z}_{L2}^1$	0,08 + j0,2	
i_6^1	\dot{Z}_{T1}	0,38 + j2,57	
i_7^1	\dot{Z}_{SL1}	155,45 + j66,33	
i_8^1	\dot{Z}_{AD1}	4,88 + j6,30	
i_9^1	$(1 - \alpha_{K1})\dot{Z}_{L2}^1$	0,68 + j1,63	
i_{10}^1	$\dot{Z}_G^{1''}$	0,07 + j1,75	
i_{11}^1	$\dot{Z}_{T2} + \dot{Z}_{SL2}$	44,04 + j24,94	
i_{12}^1	\dot{Z}_{K1B}	10	
i_1^2	\dot{Z}_{S1}^2	0,02 + j0,11	
i_2^2	$\alpha_{K2}\dot{Z}_{L1}^1$	0,22 + j0,22	= Ω ,
i_3^2	$(1 - \alpha_{K2})\dot{Z}_{L1}^1$	0,09 + j0,09	
i_4^2	R_{PAP}	0,001	
i_5^2	$\alpha_{K1}\dot{Z}_{L2}^1$	0,08 + j0,2	
i_6^2	\dot{Z}_{T1}	0,38 + j2,57	
i_7^2	\dot{Z}_{SL1}	155,45 + j66,33	
i_8^2	\dot{Z}_{ADek}^2	6,84 + j15,58	
i_9^2	$(1 - \alpha_{K1})\dot{Z}_{L2}^1$	0,68 + j1,63	
i_{10}^2	\dot{Z}_G^2	0,59 + j2,13	
i_{11}^2	$\dot{Z}_{T2} + \dot{Z}_{SL2}$	44,04 + j24,94	
i_{12}^2	\dot{Z}_{K1B}	10	
i_1^0	$\dot{Z}_{TN} + R_Z + \alpha_{K2}\dot{Z}_{L1}^0$	18,89 + j3,74	
i_2^0	$(1 - \alpha_{K2})\dot{Z}_{L1}^0$	0,40 + j0,15	
i_3^0	R_{PAP}	0,001	
i_4^0	$\alpha_{K1}\dot{Z}_{L2}^0$	0,15 + j0,75	
i_5^0	\dot{Z}_{K1B}	10	

$E1$			
i_1^1	\dot{E}_{SB}	$-3,031 - j5,250$	
i_2^1	0	0	
i_3^1	0	0	
i_4^1	$-\dot{a}\dot{U}_{K2C}^1$	$1,509 + j2,62$	
i_5^1	0	0	
i_6^1	0	0	
i_7^1	0	0	
i_8^1	\dot{E}_{ADBBV}''	$-2,96 - j4,24$	
i_9^1	0	0	
i_{10}^1	\dot{E}_{GB}''	$-2,389 - j6,102$	
i_{11}^1	0	0	
i_{12}^1	0	0	
i_1^2	0	0	
i_2^2	0	0	$=$
i_3^2	0	0	kV.
i_4^2	$-\dot{a}^2\dot{U}_{K2C}^2$	$-3,029$	
i_5^2	0	0	
i_6^2	0	0	
i_7^2	0	0	
i_8^2	0	0	
i_9^2	0	0	
i_{10}^2	0	0	
i_{11}^2	0	0	
i_{12}^2	0	0	
i_1^0	0	0	
i_2^0	0	0	
i_3^0	$-\dot{U}_{K2C}^0$	$1,52 - j2,62$	
i_4^0	0	0	
i_5^0	0	0	

Otrā īsslēguma K2 aizvietošanas shēmas ieejas matricas:

$M2$	i_1^1	i_2^1	i_3^1	i_4^1	i_5^1	i_6^1	i_7^1	i_8^1	i_9^1	i_{10}^1	i_{11}^1	i_{12}^1	i_1^2	i_2^2	i_3^2
1	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	1	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0
5	0	-1	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	-1	0	0	0	-1	0	0	1	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$M2$	i_4^2	i_5^2	i_6^2	i_7^2	i_8^2	i_9^2	i_{10}^2	i_{11}^2	i_{12}^2	i_1^0	i_2^0	i_3^0	i_4^0	i_5^0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	1	-1	1	0	0	0	0	0	0
10	0	0	1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	-1	0	0	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	1	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1
16	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0

ZZ2

i_1^1	\dot{Z}_{S1}^1	0,02 + j0,11	
i_2^1	$\alpha_{K2}\dot{Z}_{L1}^1$	0,22 + j0,22	
i_3^1	$(1 - \alpha_{K2})\dot{Z}_{L1}^1$	0,09 + j0,09	
i_4^1	\dot{Z}_{K2A}	0,5	
i_5^1	$\alpha_{K1}\dot{Z}_{L2}^1$	0,08 + j0,2	
i_6^1	\dot{Z}_{T1}	0,38 + j2,57	
i_7^1	\dot{Z}_{SL1}	155,45 + j66,33	
i_8^1	\dot{Z}_{AD1}	4,88 + j6,30	
i_9^1	$(1 - \alpha_{K1})\dot{Z}_{L2}^1$	0,68 + j1,63	
i_{10}^1	\dot{Z}_G''	0,07 + j1,75	
i_{11}^1	$\dot{Z}_{T2} + \dot{Z}_{SL2}$	44,04 + j24,94	
i_{12}^1	R_{PAP}	0,001	
i_1^2	\dot{Z}_{S1}^2	0,02 + j0,11	
i_2^2	$\alpha_{K2}\dot{Z}_{L1}^1$	0,22 + j0,22	= Ω ,
i_3^2	$(1 - \alpha_{K2})\dot{Z}_{L1}^1$	0,09 + j0,09	
i_4^2	\dot{Z}_{K2A}	0,5	
i_5^2	$\alpha_{K1}\dot{Z}_{L2}^1$	0,08 + j0,2	
i_6^2	\dot{Z}_{T1}	0,38 + j2,57	
i_7^2	\dot{Z}_{SL1}	155,45 + j66,33	
i_8^2	\dot{Z}_{ADek}^2	6,84 + j15,58	
i_9^2	$(1 - \alpha_{K1})\dot{Z}_{L2}^1$	0,68 + j1,63	
i_{10}^2	\dot{Z}_G^2	0,59 + j2,13	
i_{11}^2	$\dot{Z}_{T2} + \dot{Z}_{SL2}$	44,04 + j24,94	
i_{12}^2	R_{PAP}	0,001	
i_1^0	$\dot{Z}_{TN} + R_Z + \alpha_{K2}\dot{Z}_{L1}^0$	18,89 + j3,74	
i_2^0	$(1 - \alpha_{K2})\dot{Z}_{L1}^0$	0,40 + j0,15	
i_3^0	$3\dot{Z}_{K2N} + \dot{Z}_{K2A}$	0,5	
i_4^0	$\alpha_{K1}\dot{Z}_{L2}^0$	0,15 + j0,75	
i_5^0	R_{PAP}	0,001	

$$\begin{array}{r}
E2 \\
i_1^1 \quad \dot{E}_{SC} \quad -3,031 + j5,250 \\
i_2^1 \quad 0 \quad 0 \\
i_3^1 \quad 0 \quad 0 \\
i_4^1 \quad 0 \quad 0 \\
i_5^1 \quad 0 \quad 0 \\
i_6^1 \quad 0 \quad 0 \\
i_7^1 \quad 0 \quad 0 \\
i_8^1 \quad \dot{E}_{ADCBV}'' \quad -2,192 + j4,683 \\
i_9^1 \quad 0 \quad 0 \\
i_{10}^1 \quad \dot{E}_{GC}'' \quad -6,479 + j0,982 \\
i_{11}^1 \quad 0 \quad 0 \\
i_{12}^1 \quad -\dot{a}^2 \dot{U}_{K1B}^1 \quad 1,518 - j2,631 \\
i_1^2 \quad 0 \quad 0 \\
i_2^2 \quad 0 \quad = \quad 0 \quad \text{kV.} \\
i_3^2 \quad 0 \quad 0 \\
i_4^2 \quad 0 \quad 0 \\
i_5^2 \quad 0 \quad 0 \\
i_6^2 \quad 0 \quad 0 \\
i_7^2 \quad 0 \quad 0 \\
i_8^2 \quad 0 \quad 0 \\
i_9^2 \quad 0 \quad 0 \\
i_{10}^2 \quad 0 \quad 0 \\
i_{11}^2 \quad 0 \quad 0 \\
i_{12}^2 \quad -\dot{a} \dot{U}_{K1B}^2 \quad -3,038 \\
i_1^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_2^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_3^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_4^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_5^0 \quad -\dot{U}_{K1B}^0 \quad 1,52 + j2,63
\end{array}$$

Pēc ieejas matricu ievades jāiegūst abu komplekso aizvietošanas shēmu pretestības matricas $Z1$, $Z2$ no zaru pretestību vektoriem $ZZ1$, $ZZ2$, šos vektoru saturus izmantojot kā matricu $Z1$, $Z2$ diagonāles elementus. Turpinājumā tiek noteiktas abu komplekso aizvietošanas shēmu vadītspēju matricas $Y1$, $Y2$ (kas vēlāk tiks invertētas skaitliskā aprēķina konverģences uzlabošanai) un brīvo mainīgo vektori $B1$, $B2$, veicot šādas darbības:

$$\begin{aligned}
Y1 &= M1Z1^{-1}M1^T, \quad Y2 = M2Z2^{-1}M2^T, \\
B1 &= -M1Z1^{-1}E1, \quad B2 = -M2Z2^{-1}E2.
\end{aligned}$$

Veicot vienlaicīgu abu komplekso aizvietošanas shēmu skaitlisko režīma parametru aprēķinu atbilstoši šajā nodaļā dotajai teorijai, tika iegūts risinājums ar precizitāti $1 \cdot 10^{-6}$ kV, izpildot 23 tuvinājuma soļus. Aprēķina programmas realizācijas teksts parādīts 16. pielikumā.

Aprēķinu rezultātā iegūto komplekso aizvietošanas shēmu mezglu spriegumu un zaru strāvu vektori ir šādi:

$U1$		$U2$	
1	$-3,135 - j4,901$	1	$-2,676 + j5,165$
2	$-2,726 - j4,069$	2	$-2,160 + j4,393$
3	$-0,275 - j5,529$	3	$-4,651 + j3,003$
4	$-3,371 - j3,759$	4	$-1,569 + j4,797$
5	$-2,826 - j3,954$	5	$-2,010 + j4,421$
6	$-2,480 - j4,206$	6	$-2,402 + j4,250$
7	$-1,478 - j3,888$	7	$-0,390 - j0,012$
8	$-1,294 - j3,545$	8	$-1,256 + j0,527$ kV.
9	$-0,396 - j3,063$	9	$-0,673 + j0,241$
10	$-0,933 - j3,426$	10	$-1,064 + j0,241$
11	$-0,510 - j3,219$	11	$-1,286 + j0,568$
12	$-0,347 - j3,057$	12	$-1,206 + j0,492$
13	$-0,448 - j3,090$	13	$-1,569 + j2,402$
14	$0,554 - j2,773$	14	$-1,551 + j2,416$
15	$-1,015 - j0,371$	15	$-1,556 + j2,456$
16	$-0,998 - j0,357$	16	$-1,622 + j2,464$
17	$-1,002 - j0,317$		

I_{Z1}		I_{Z2}	
i_1^1	$-2,904 - j1,475$	i_1^1	$0,181 + j3,259$
i_2^1	$-2,904 - j1,475$	i_2^1	$0,181 + j3,259$
i_3^1	$-0,076 - j1,161$	i_3^1	$-0,959 + j0,655$
i_4^1	$-2,980 - j2,636$	i_4^1	$-0,777 + j3,914$
i_5^1	$0,158 + j1,425$	i_5^1	$1,146 - j0,857$
i_6^1	$0,082 + j0,263$	i_6^1	$0,187 - j0,202$
i_7^1	$-0,027 - j0,013$	i_7^1	$0,003 + j0,030$
i_8^1	$0,055 + j0,251$	i_8^1	$0,190 - j0,172$
i_9^1	$-0,208 - j1,441$	i_9^1	$-1,144 + j0,900$
i_{10}^1	$-0,266 - j1,533$	i_{10}^1	$-1,195 + j0,997$
i_{11}^1	$-0,059 - j0,092$	i_{11}^1	$-0,051 + j0,097$
i_{12}^1	$-0,050 - j0,016$	i_{12}^1	$0,002 + j0,043$
i_1^2	$-3,317 + j1,063$	i_1^2	$0,731 - j3,412$
i_2^2	$-3,317 + j1,063$	i_2^2	$0,731 - j3,412$
i_3^2	$-0,297 + j0,230$	i_3^2	$-0,060 - j0,380$
i_4^2	$-3,615 + j1,293$	i_4^2	$0,672 - j3,792$
i_5^2	$0,231 - j0,195$	i_5^2	$0,062 + j0,306$
i_6^2	$-0,066 + j0,035$	i_6^2	$0,003 - j0,074$
i_7^2	$0,007 + j0,001$	i_7^2	$-0,005 + j0,005$
i_8^2	$-0,059 + j0,036$	i_8^2	$-0,002 - j0,069$
i_9^2	$-0,281 + j0,179$	i_9^2	$-0,015 - j0,333$
i_{10}^2	$-0,267 + j0,182$	i_{10}^2	$-0,024 - j0,323$
i_{11}^2	$0,014 + j0,003$	i_{11}^2	$-0,009 + j0,011$
i_{12}^2	$-0,050 - j0,016$	i_{12}^2	$0,048 - j0,027$
i_1^0	$0,056 - j0,138$	i_1^0	$0,056 - j0,138$
i_2^0	$0,050 + j0,016$	i_2^0	$0,050 + j0,016$
i_3^0	$0,106 - j0,123$	i_3^0	$0,106 - j0,123$
i_4^0	$-0,050 - j0,016$	i_4^0	$-0,050 - j0,016$
i_5^0	$-0,050 - j0,016$	i_5^0	$-0,050 - j0,016$

Parādītajās kompleksajās aizvietošanas shēmās QF5 piesaistītajai jeb līnijas aizsardzībai ģeneratora pusē nav parādīts līnijas L2 posms ar pretestību $(1 - \alpha_{K1})\dot{Z}_{L2}^0$. Patiesībā šajā L2 posma zarā arī plūst niecīga kapacitatīva NS strāva, kuru pieļaujams neņemt vērā, bet vienlaikus sprieguma NS komponente būs tuva īsslēguma K1 punktā novērotajai, jo sprieguma kritums līnijas posma NS garenvirziena pretestībā $\dot{I}_{QF5}^0(1 - \alpha_{K1})\dot{Z}_{L2}^0$ arī būs nenozīmīgs. Līdz ar to var pieņemt, ka

$$\dot{U}_{QF5}^0 \approx \dot{U}_{K1}^0 = U1(17) - U1(14) = -1,555 + j2,456 \text{ kV,}$$

$$\dot{I}_{QF5}^0 \approx 0 \text{ kA.}$$

Turklāt ir jāaprēķina arī QF2 piesaistītās aizsardzības novērojamo aprēķina fāzes sprieguma NS komponenti, jo NS aizvietošanas shēmā kopnei B1 nav izdalīts mezgls. Ņemot vērā, ka visām fāzēm NS komponentes sakrīt, iespējams izmantot otrās kompleksās aizvietošanas shēmas NS strāvu, lai noteiktu šo spriegumu kā kopējo sprieguma kritumu neitrāli veidojošā transformatora TN un tā neitrāles rezistora NS pretestībā:

$$\dot{U}_{QF2}^0 = \dot{I}_1^0 (\dot{Z}_{TN} + 3R_Z) = I_{Z2}(25) (\dot{Z}_{TN} + 3R_Z) \approx -1,467 + j2,293 \text{ kV.}$$

Iegūtie komplekso aizvietošanas shēmu režīmu parametru aprēķinu rezultāti un iepriekš parādītie aprēķini kopā satur fāžu spriegumu un strāvu simetrisko komponentu vērtības QF2 piesaistītajai aizsardzībai, abiem īsslēguma punktiem un QF5 piesaistītajai aizsardzībai. Izmantojot pirmās kompleksās aizvietošanas shēmas mezglu spriegumu rezultātus, jāņem vērā, ka tajā PS un NS neitrāļu potenciāls nav 0 V, tādēļ mezglu spriegumu PS un NS komponentes nosakāmas kā starpība starp to mezglu potenciāliem un atbilstošās secību aizvietošanas shēmas neitrāles potenciāliem. Minētā simetrisko komponentu izdalīšana parādīta zemāk:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{QF2B}^1 \\ \dot{U}_{QF2B}^2 \\ \dot{U}_{QF2B}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U1(1) \\ U1(8) - U1(7) \\ \dot{U}_{QF2}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3,135 - j4,901 \\ 0,183 + j0,344 \\ -1,467 + j2,293 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 5,818e^{-j122,61^\circ} \\ 0,390e^{j61,92^\circ} \\ 2,722e^{j122,62^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{QF2B}^1 \\ \dot{I}_{QF2B}^2 \\ \dot{I}_{QF2B}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{Z1}(2) \\ I_{Z1}(14) \\ I_{Z1}(25) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2,904 - j1,475 \\ -3,317 + j1,063 \\ 0,056 - j0,138 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 3,257e^{-j153,08^\circ} \\ 3,484e^{j162,23^\circ} \\ 0,149e^{-j68,04^\circ} \end{bmatrix} \text{ kA,}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{K1B}^1 \\ \dot{U}_{K1B}^2 \\ \dot{U}_{K1B}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U1(6) \\ U1(13) - U1(7) \\ U1(17) - U1(14) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2,480 - j4,206 \\ 1,029 + j0,798 \\ -1,556 + j2,456 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 4,882e^{-j120,52^\circ} \\ 1,302e^{j37,79^\circ} \\ 2,907e^{j122,35^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{K1B}^1 \\ \dot{I}_{K1B}^2 \\ \dot{I}_{K1B}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{Z1}(12) \\ I_{Z2}(24) \\ I_{Z0}(29) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,050 - j0,016 \\ -0,050 - j0,016 \\ -0,050 - j0,016 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0,053e^{-j162,43^\circ} \\ 0,053e^{-j162,43^\circ} \\ 0,053e^{-j162,43^\circ} \end{bmatrix} \text{ kA,}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{K2B}^1 \\ \dot{U}_{K2B}^2 \\ \dot{U}_{K2B}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U1(5) \\ U1(12) - U1(7) \\ U1(15) - U1(14) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2,826 - j3,954 \\ 1,131 + j0,831 \\ -1,569 + j2,402 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 4,860e^{-j125,56^\circ} \\ 1,404e^{j36,31^\circ} \\ 2,869e^{j123,15^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{K2B}^1 \\ \dot{I}_{K2B}^2 \\ \dot{I}_{K2B}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{Z1}(4) \\ I_{Z1}(16) \\ I_{Z1}(27) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2,980 - j2,636 \\ -3,615 + j1,293 \\ 0,106 - j0,123 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 3,978e^{-j138,50^\circ} \\ 3,839e^{j160,32^\circ} \\ 0,162e^{-j49,12^\circ} \end{bmatrix} \text{ kA,}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{QF5B}^1 \\ \dot{U}_{QF5B}^2 \\ \dot{U}_{QF5B}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U1(3) \\ U1(10) - U1(7) \\ \dot{U}_{QF5}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,275 - j5,529 \\ 0,545 + j0,462 \\ -1,555 + j2,456 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 5,536e^{-j92,85^\circ} \\ 0,715e^{j40,31^\circ} \\ 2,907e^{j122,35^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{QF5B}^1 \\ \dot{I}_{QF5B}^2 \\ \dot{I}_{QF5B}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{Z1}(9) \\ I_{Z2}(21) \\ \dot{I}_{QF5}^0 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} -0,208 - j1,441 \\ -0,281 + j0,179 \\ 0 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1,455e^{-j98,20^\circ} \\ 0,334e^{j147,51^\circ} \\ 0 \end{bmatrix} \text{ kA.}$$

Nākamais solis ir pāreja no B fāzes simetriskajām komponentēm uz fāžu lielumiem, izmantojot Forteskju transformāciju:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{QF2A} \\ \dot{U}_{QF2B} \\ \dot{U}_{QF2C} \end{bmatrix} = k_B \begin{bmatrix} \dot{U}_{QF2B}^1 \\ \dot{U}_{QF2B}^2 \\ \dot{U}_{QF2B}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -3,135 - j4,901 \\ 0,183 + j0,344 \\ -1,467 + j2,293 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 4,551 + j1,698 \\ -4,419 - j2,265 \\ -4,534 + j7,445 \end{bmatrix} \approx$$

$$\approx \begin{bmatrix} 4,857e^{j20,46^\circ} \\ 4,966e^{-j152,87^\circ} \\ 8,717e^{j121,34^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{QF2A} \\ \dot{i}_{QF2B} \\ \dot{i}_{QF2C} \end{bmatrix} = k_B \begin{bmatrix} \dot{i}_{QF2B}^1 \\ \dot{i}_{QF2B}^2 \\ \dot{i}_{QF2B}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2,904 - j1,475 \\ -3,317 + j1,063 \\ 0,056 - j0,138 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 5,364 + j0,426 \\ -6,165 - j0,550 \\ 0,968 - j0,291 \end{bmatrix} \approx$$

$$\approx \begin{bmatrix} 5,381e^{j4,54^\circ} \\ 6,190e^{-j174,91^\circ} \\ 1,011e^{j16,72^\circ} \end{bmatrix} \text{ kA,}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{K1A} \\ \dot{U}_{K1B} \\ \dot{U}_{K1C} \end{bmatrix} = k_B \begin{bmatrix} \dot{U}_{K1B}^1 \\ \dot{U}_{K1B}^2 \\ \dot{U}_{K1B}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2,480 - j4,206 \\ 1,029 + j0,798 \\ -1,556 + j2,456 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 3,503 + j1,121 \\ -3,006 - j0,952 \\ -5,163 + j7,199 \end{bmatrix} \approx$$

$$\approx \begin{bmatrix} 3,678e^{j17,75^\circ} \\ 3,153e^{-j162,43^\circ} \\ 8,859e^{j125,65^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{K1A} \\ \dot{i}_{K1B} \\ \dot{i}_{K1C} \end{bmatrix} = k_B \begin{bmatrix} \dot{i}_{K1B}^1 \\ \dot{i}_{K1B}^2 \\ \dot{i}_{K1B}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0,050 - j0,016 \\ -0,050 - j0,016 \\ -0,050 - j0,016 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0 \\ -0,150 - j0,048 \\ 0 \end{bmatrix} \approx$$

$$\approx \begin{bmatrix} 0 \\ 0,158e^{-j162,43^\circ} \\ 0 \end{bmatrix} \text{ kA,}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{K2A} \\ \dot{U}_{K2B} \\ \dot{U}_{K2C} \end{bmatrix} = k_B \begin{bmatrix} \dot{U}_{K2B}^1 \\ \dot{U}_{K2B}^2 \\ \dot{U}_{K2B}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2,826 - j3,954 \\ 1,131 + j0,831 \\ -1,569 + j2,402 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 3,423 + j0,537 \\ -3,264 - j0,721 \\ -4,865 + j7,391 \end{bmatrix} \approx$$

$$\approx \begin{bmatrix} 3,465e^{j8,91^\circ} \\ 3,343e^{-j167,55^\circ} \\ 8,848e^{j123,36^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{K2A} \\ \dot{i}_{K2B} \\ \dot{i}_{K2C} \end{bmatrix} = k_B \begin{bmatrix} \dot{i}_{K2B}^1 \\ \dot{i}_{K2B}^2 \\ \dot{i}_{K2B}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2,980 - j2,636 \\ -3,615 + j1,293 \\ 0,106 - j0,123 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 6,806 + j1,099 \\ -6,488 - j1,465 \\ 0 \end{bmatrix} \approx$$

$$\approx \begin{bmatrix} 6,894e^{j9,17^\circ} \\ 6,651e^{-j167,27^\circ} \\ 0 \end{bmatrix} \text{ kA,}$$

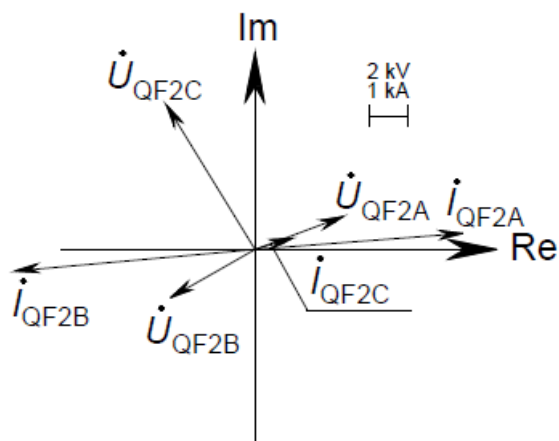
$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{QF5A} \\ \dot{U}_{QF5B} \\ \dot{U}_{QF5C} \end{bmatrix} = k_B \begin{bmatrix} \dot{U}_{QF5B}^1 \\ \dot{U}_{QF5B}^2 \\ \dot{U}_{QF5B}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0,275 - j5,529 \\ 0,545 + j0,462 \\ -1,555 + j2,456 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 3,498 + j4,279 \\ -1,285 - j2,611 \\ -6,879 + j5,699 \end{bmatrix} \approx$$

$$\approx \begin{bmatrix} 5,527e^{j50,73^\circ} \\ 2,910e^{-j116,21^\circ} \\ 8,933e^{j140,36^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

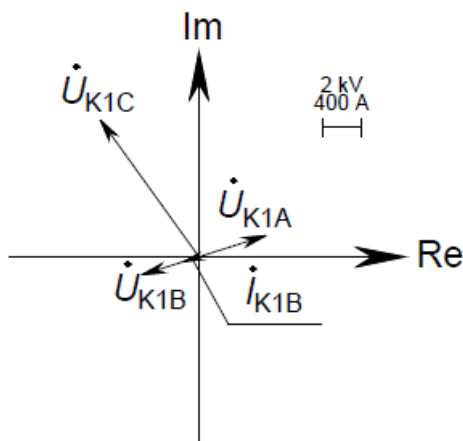
$$\begin{bmatrix} i_{QF5A} \\ i_{QF5B} \\ i_{QF5C} \end{bmatrix} = k_B \begin{bmatrix} i_{QF5B}^1 \\ i_{QF5B}^2 \\ i_{QF5B}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0,208 - j1,441 \\ -0,281 + j0,179 \\ 0 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1,647 + j0,695 \\ -0,489 - j1,261 \\ -1,158 + j0,567 \end{bmatrix} \approx$$

$$\approx \begin{bmatrix} 1,788e^{j22,86^\circ} \\ 1,353e^{-j111,18^\circ} \\ 1,290e^{j153,92^\circ} \end{bmatrix} \text{ kA.}$$

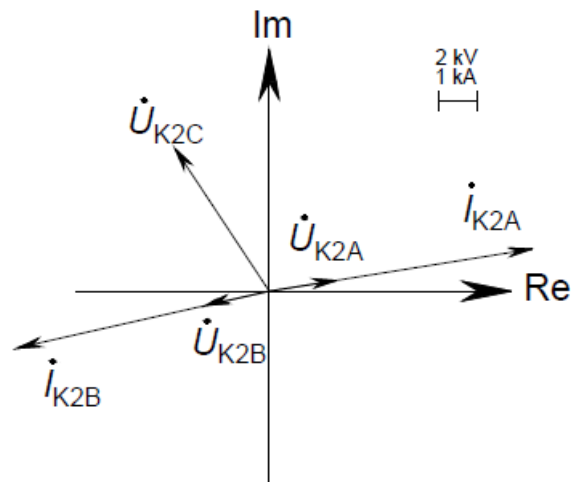
Atbilstoši aprēķinātajiem fāžu spriegumiem un strāvām iespējams uzzīmēt vektoru diagrammas QF2 piesaistītajai aizsardzībai, abiem īsslēguma punktiem un QF5 vadošajai aizsardzībai (8.53.–8.56. att.).



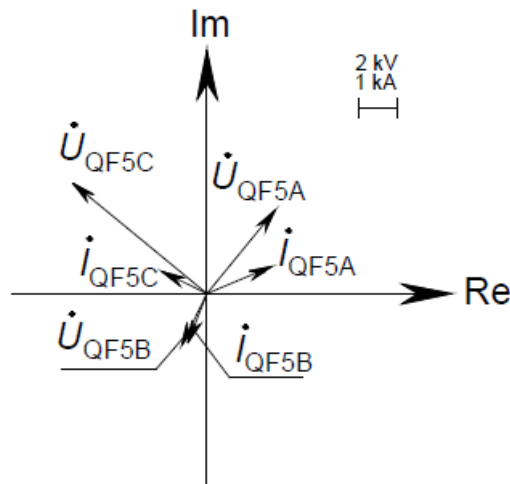
8.53. att. QF2 piesaistītās aizsardzības nomērīto fāžu spriegumu un strāvu vektoru diagramma, vienlaikus rodoties B fāzes īsslēgumam pirmā aprēķinu piemēru tīkla līnijā L2 un A, B fāžu īsslēgumam uz zemi līnijā L1.



8.54. att. Fāžu spriegumu un strāvu vektoru diagramma līnijas L2 īsslēguma vietā, rodoties vienlaicīgi B fāzes īsslēgumam pirmā aprēķinu piemēru tīkla līnijā L2 un A, B fāžu īsslēgumam uz zemi līnijā L1.



8.55. att. Fāžu spriegumu un strāvu vektoru diagramma līnijas L1 īsslēguma vietā, vienlaikus rodoties B fāzes īsslēgumam pirmā aprēķinu piemēru tīkla līnijā L2 un A, B fāžu īsslēgumam uz zemi līnijā L1.



8.56. att. QF5 piesaistītās aizsardzības fiksēto fāžu spriegumu un strāvu vektoru diagramma, rodoties vienlaicīgi B fāzes īsslēgumam pirmā aprēķinu piemēru tīkla līnijā L2 un A, B fāžu īsslēgumam uz zemi līnijā L1.

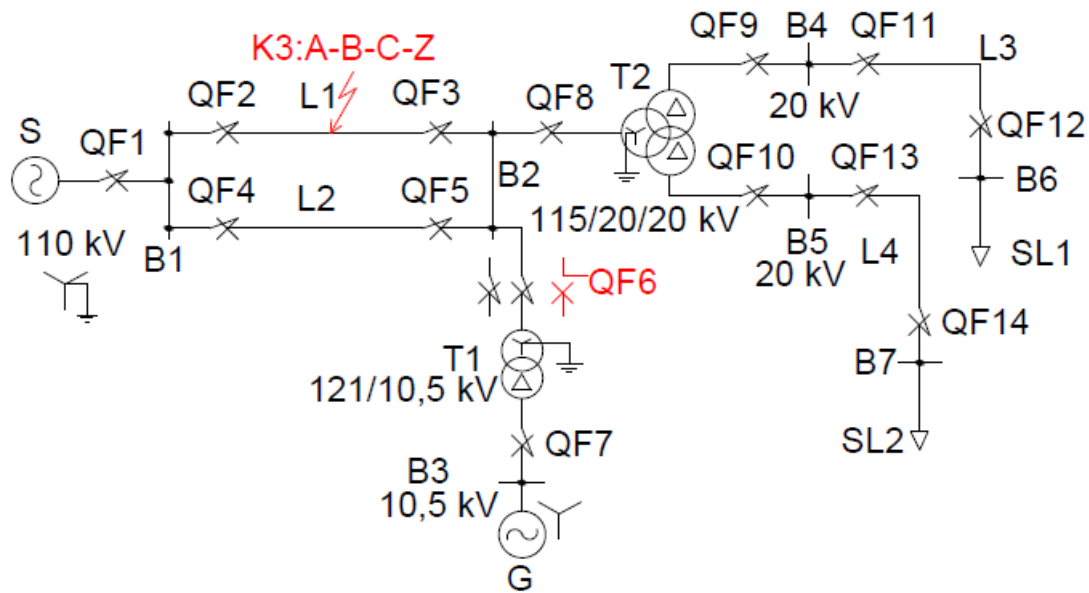
Izvērtējot aprēķinātās fāžu spriegumu un strāvu, kā arī to simetrisko komponentu, vērtības iespējams ievērot, ka abu īsslēgumu rezultātā radusies ievērojama sprieguma NS komponente, kas gandrīz sakrīt fāzē ar C fāzes TS komponenti. Tā rezultātā visās parādītajās vektoru diagrammās nebojātās fāzes C spriegums ievērojami pārsniedz sistēmas fāzes spriegumu. B1 kopņu spriegumu NS komponentes arī saglabājušās lielas L1 mazās NS pretestības un garuma dēļ. Aprēķinātie un vektoru diagrammās parādītie īsslēgumu K1 un K2 fāžu strāvu un spriegumu lielumi parāda, ka abās BV nebojātajās fāzēs īsslēguma strāva neplūst. Turklāt no tiem redzams, ka īsslēgumam K1 B fāzes strāva un spriegums sakrīt fāzē un īsslēgumam K2, A un B fāžu strāvas un spriegumi sakrīt fāzē aktīvo fāžu pārejas pretestību un tiešā kontakta ar zemi ($Z_{K2N} = 0 \Omega$) dēļ. Šie novērojumi liecina par rezultātu atbilstību robežnosacījumiem konkrētajos īsslēgumu punktos. Abu īsslēgumu savstarpējo mijiedarbību parāda tas, ka

īsslēguma K2 punktā, neskatoties uz vienādām pārejas pretestībām A un B fāzēs, fāzē B ir nedaudz zemāks spriegums nekā A fāzē (8.55. att.) un īsslēguma K1 punktā A fāzes spriegums ir pazemināts, neskatoties uz to, ka konkrētajā punktā īsslēgta vienīgi B fāze (8.54. att.). Jāmin arī sagaidāmais rezultāts, ka īsslēguma K2 bojāto fāžu strāvas sanākušas lielākas nekā īsslēgumam K1, pateicoties mazajām pārejas pretestībām un elektrisko tuvumu sistēmai.

Iegūtie rezultāti parāda arī to, ka, pateicoties neitrāli veidojošajam transformatoram TN, caur jaudas slēdzi QF2 uz zemesslēgumiem plūst, ar izolētas neitrāles režīmu salīdzinot, stipra NS strāva ($|I_{QF2}^0| \approx 149 \text{ A}$). Tās vērtība iekļaujas gan standartos paredzētajā zemesslēguma strāvas stipruma ierobežojumā (1 kA) [48] ($|3I_{TN}^0| = |3I_{QF2}^0| = 447 \text{ A}$), gan 7. pielikumā norādītajā un praksē bieži izraudzītajā zemesslēguma strāvu stipruma intervālā (400–600 A). Jāatzīmē, ka šajā situācijā NS strāvas stiprums, iespējams, nav tik nozīmīgs, jo ievērojamo A un B fāžu strāvu stiprumu dēļ, ko lielā mērā noteicis starpfāžu īsslēgums, var sagaidīt QF2 MSA nostrādi ar pirmo vai otro zonu. No ģeneratora puses teorētiski arī jānostrādā QF5 MSA otrajai vai trešajai zonai, ņemot vērā lielo A un B fāžu strāvas stiprumu, kas radies īsslēguma K2 dēļ, un faktu, ka caur QF5 slodzes režīmā plūstošās strāvas stiprums ir tikai 213 A.

8.4. Otrais elektriskās sistēmas režīma parametru aprēķina piemērs vairāku vienlaicīgu nesimetriju rašanās gadījumā ar topoloģisku risinājumu

Otrajā režīma parametru aprēķina piemērā, rodoties vairākām vienlaicīgām nesimetrijām, tiks parādīts topoloģisks risinājums šādam uzdevumam: aprēķināt fāžu spriegumus un strāvas īsslēguma vietā un jaudas slēdžiem QF2 un QF3 piesaistīto aizsardzību nomērītos fāžu spriegumus un strāvas, izveidojoties vispārīgam trīsfāžu īsslēgumam uz zemi otrā aprēķinu piemēru tīkla līnijā L1 attālumā $\alpha = 0,8$ r. v. no kopnēm B1 un vienfāzes pārrāvumam jaudas slēdža QF6 C fāzes kontaktu nesaslēgšanās dēļ (8.57. att.). Dati par konkrētā tīkla elementu un slodzes režīma parametriem doti 10. pielikumā. Vispārīgā trīsfāžu īsslēguma pārejas pretestības ir $\dot{Z}_{KA} = 2 \Omega$, $\dot{Z}_{KB} = 15 \Omega$, $\dot{Z}_{KC} = 0 \Omega$, $\dot{Z}_{KN} = 0 \Omega$, bet pārrāvumam atbilstoši 8.57. attēlam pārejas pretestību veselajās fāzēs nav ($\dot{Z}_{LA} = \dot{Z}_{LB} = 0 \Omega$). Aprēķins jāveic bojājumu sākuma momentam, pieņemot, ka to rašanās brīdī sistēmas A fāzes EDS leņķis ir 0° , t. i., atbilstoši slodzes režīma parametru aprēķina momentam. Elektriskā attāluma līdz īsslēgumam dēļ tiek pieņemts, ka ģenerators nonāks pārejas režīmā.



8.57. att. Vienlaicīga nesimetriska trīsfāžu īsslēguma uz zemi otrā aprēķinu piemēru tīkla līnijā L1 un QF6 jaudas slēdža C fāzes pārrāvuma režīma parametru aprēķina izejas shēma.

Šajā piemērā tiks parādīts topoloģiskā aprēķina paņēmieni ar vienu komplekso aizvietošanas shēmu, kur vienas nesimetrijas robežnosacījumus ievēro ar elektriskajiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām, bet pārējos ņem vērā, ieviešot EDS avotus, kuru vērtības starp tuvinājuma soļiem pārrēķina, izmantojot analītiskas formulas. Īsslēguma atšķirīgo fāžu pārejas pretestību dēļ komplekso aizvietošanas shēmu ar tiešiem elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām iespējams izveidot vienīgi QF6 C fāzes pārrāvumam (aprēķina fāze būs C fāze). Attiecīgi īsslēguma robežnosacījumu ievērošanai tiks ieviesti papildu EDS avoti. Jāņem vērā arī, ka vispārīgā īsslēguma atainošanai izmantoto EDS avotu vērtību aprēķins tiks veikts, izmantojot A fāzes simetriskās komponentes (C fāzes komponentu izmantošanai nāktos no jauna iegūt (6.4.) analogisku vienādojumu sistēmu). Būs jāveic strāvu un spriegumu TS un PS komponentu pagriezieni gan šo papildu EDS vērtību pārrēķinam, gan iegūto vērtību ievērošanai kompleksajā aizvietošanas shēmā. Pirmajam tuvinājuma solim brīvi pieņemtas šādas īsslēguma vietas A fāzes sprieguma simetrisko komponentu jeb ieviesto EDS avotu vērtības: $\dot{U}_{KA}^1 = \dot{U}_{KA}^2 = \dot{U}_{KA}^0 = \dot{E}_{SA}/2 \approx 33,198 \text{ kV}$. Aprēķins tiks veikts pie aprēķina sprieguma 115 kV. Pirms kompleksās aizvietošanas shēmas un ieejas matricu sastādīšanas jāņem vērā, ka starp bojājumiem un ģeneratoru G ir transformators T1 ar slēguma shēmu un grupu $Y_0/\Delta-11$, tādēļ tā pārejas režīma EDS ir jāpagriež par -30° . Šāda korekcija jāņem vērā, jo pēc slodzes režīma parametru aprēķina avotiem atbilstošo EDS avotu vērtības noteiktas ar to leņķi, kāds tas būtu avotu pieslēgšanas vietā, t. i., ņemot vērā turpmāk parādītajai pretēju pāreju. Attiecīgi A fāzei uz BV attiecinātais ģeneratora G EDS būs

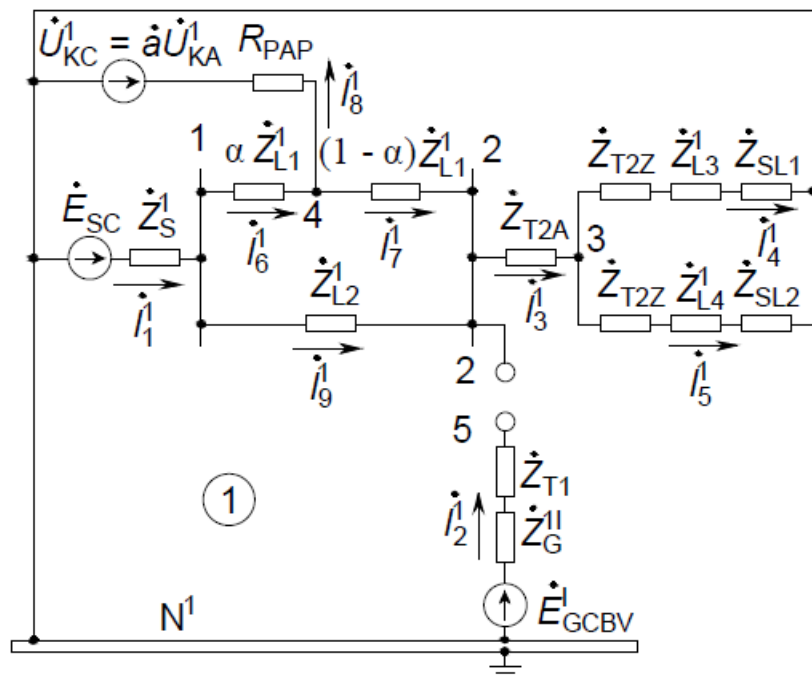
$$\dot{E}'_{GABV} = \dot{E}'_{GA} e^{-j30^\circ} = (28,25 + j68,79)(0,866 - j0,5) \approx 58,86 + j45,45 \text{ kV}.$$

Tā kā īpašā jeb aprēķina fāze kompleksajai aizvietošanas shēmai šajā gadījumā ir C fāze, TS aizvietošanas shēmā sistēmas un ģeneratora pārejas režīma EDS norādīts C fāzei:

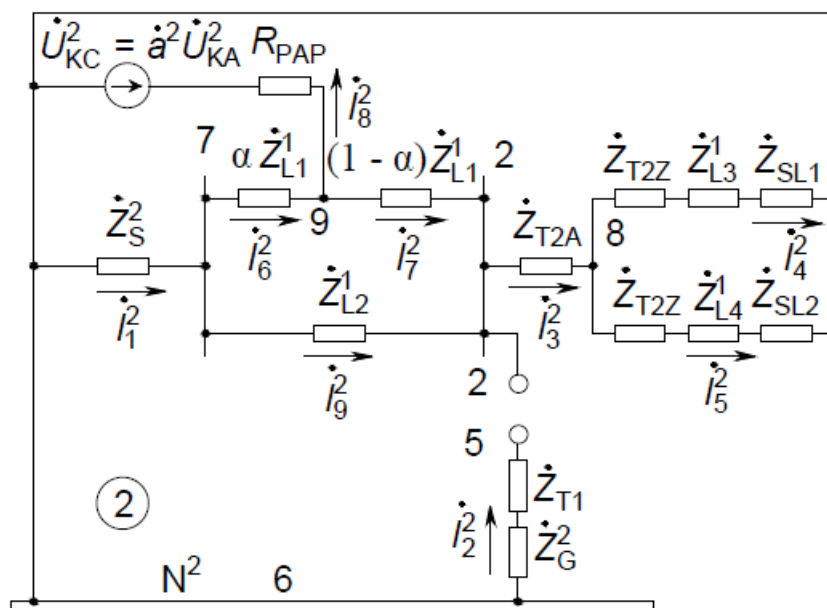
$$\dot{E}_{SC} = \dot{E}_{SA}\dot{a} = 66,40(-0,5 + j0,866) \approx -33,2 + j57,5 \text{ kV},$$

$$\dot{E}'_{GCBV} = \dot{E}'_{GABV}\dot{a} = (58,86 + j45,45)(-0,5 + j0,866) \approx -68,79 + j28,25 \text{ kV}.$$

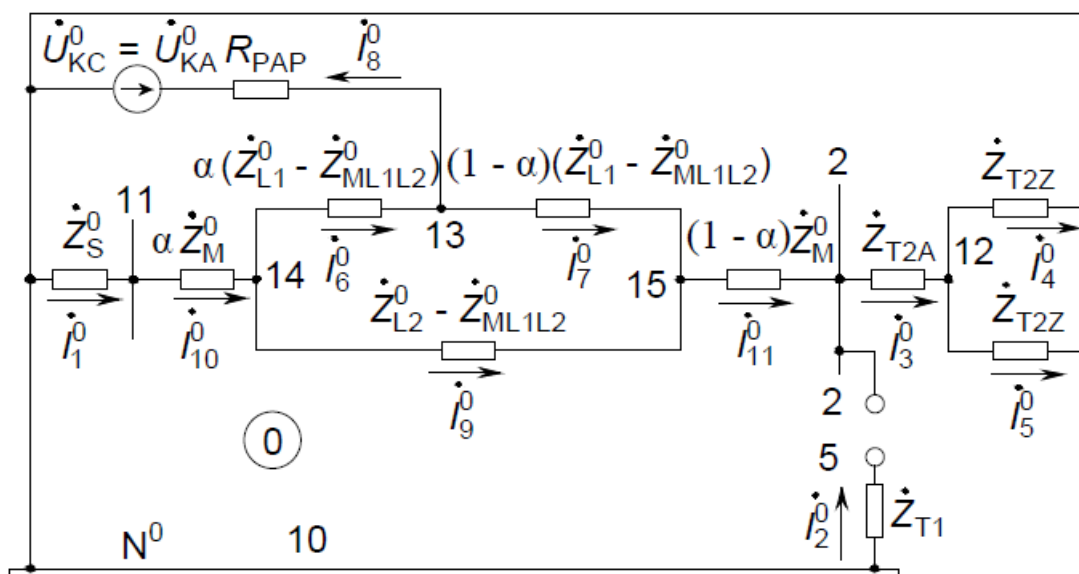
Ņemot vērā kompleksās aizvietošanas shēmas lielos izmērus, tā tiks parādīta, **vizuāli** atdalot TS, PS un NS aizvietošanas shēmas (tās savā starpā joprojām savieno to kopīgie mezgli: 2, 5). Minētās secību aizvietošanas shēmas parādītas 8.58.–8.60. attēlā.



8.58. att. Vienlaicīga nesimetriska trīsfāžu īsslēguma uz zemi otrā aprēķinu piemēru tīkla līnijā L1 un QF6 jaudas slēdža C fāzes pārrāvuma TS aizvietošanas shēma.



8.59. att. Vienlaicīga nesimetriska trīsfāžu īsslēguma otrā aprēķinu piemēru tīkla līnijā L1 un QF6 jaudas slēdža C fāzes pārrāvuma PS aizvietošanas shēma.



8.60. att. Vienlaicīga nesimetriska trīsfāžu īsslēguma otrā aprēķinu piemēru tīkla līnijā L1 un QF6 jaudas slēdža C fāzes pārrāvuma NS aizvietošanas shēma.

Nākamais solis ir sastādīt aprēķina ieejas matricas, balstoties uz šo komplekso aizvietošanas shēmu: pirmās incidences matricu M , zaru pretestību vektoru ZZ un zaru EDS vektoru E :

M	i_1^1	i_2^1	i_3^1	i_4^1	i_5^1	i_6^1	i_7^1	i_8^1	i_9^1	i_1^2	i_2^2	i_3^2	i_4^2	i_5^2	i_6^2
1	-1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	0	0	-1	0	-1	0	0	1	0	0	0
3	0	0	-1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	-1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
5	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	-1	-1	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	1
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	1	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

M	i_7^2	i_8^2	i_9^2	i_1^0	i_2^0	i_3^0	i_4^0	i_5^0	i_6^0	i_7^0	i_8^0	i_9^0	i_{10}^0	i_{11}^0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	-1	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	1	1	0	-1	-1	0	0	-1	0	0	0
11	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
12	0	0	0	0	0	-1	1	1	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	1	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	-1	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0	1

ZZ		
i_1^1	\dot{Z}_S^1	$1,37 + j10,94$
i_2^1	$\dot{Z}_{T1} + \dot{Z}_G^{1'}$	$4,21 + j146,03$
i_3^1	\dot{Z}_{T2A}	$0,45 + j6,27$
i_4^1	$\dot{Z}_{T2Z} + \dot{Z}_{L3}^1 + \dot{Z}_{SL1}$	$1416,4 + j884,15$
i_5^1	$\dot{Z}_{T2Z} + \dot{Z}_{L4}^1 + \dot{Z}_{SL2}$	$1005,3 + j566,51$
i_6^1	$\alpha \dot{Z}_{L1}^1$	$7,52 + j13,74$
i_7^1	$(1 - \alpha) \dot{Z}_{L1}^1$	$1,88 + j3,44$
i_8^1	R_{PAP}	$0,001$
i_9^1	\dot{Z}_{L2}^1	$9,4 + j17,18$
i_1^2	\dot{Z}_S^2	$1,37 + j10,94$
i_2^2	$\dot{Z}_{T1} + \dot{Z}_G^2$	$22,72 + j124,87$
i_3^2	\dot{Z}_{T2A}	$0,45 + j6,27$
i_4^2	$\dot{Z}_{T2Z} + \dot{Z}_{L3}^1 + \dot{Z}_{SL1}$	$1416,4 + j884,15$
i_5^2	$\dot{Z}_{T2Z} + \dot{Z}_{L4}^1 + \dot{Z}_{SL2}$	$1005,3 + j566,51$
i_6^2	$\alpha \dot{Z}_{L1}^1$	$7,52 + j13,74$
i_7^2	$(1 - \alpha) \dot{Z}_{L1}^1$	$1,88 + j3,44$
i_8^2	R_{PAP}	$0,001$
i_9^2	\dot{Z}_{L2}^1	$9,4 + j17,18$
i_1^0	\dot{Z}_S^0	$1,37 + j10,94$
i_2^0	\dot{Z}_{T1}	$1,56 + j40,23$
i_3^0	\dot{Z}_{T2A}	$0,45 + j6,27$
i_4^0	\dot{Z}_{T2Z}	$0,68 + j36,39$
i_5^0	\dot{Z}_{T2Z}	$0,68 + j36,39$
i_6^0	$\alpha(\dot{Z}_{L1}^0 - \dot{Z}_{ML1L2}^0)$	$7,53 + j15,02$
i_7^0	$(1 - \alpha)(\dot{Z}_{L1}^0 - \dot{Z}_{ML1L2}^0)$	$1,88 + j3,75$
i_8^0	R_{PAP}	$0,001$
i_9^0	$\dot{Z}_{L2}^0 - \dot{Z}_{ML1L2}^0$	$9,41 + j18,77$
i_{10}^0	$\alpha \dot{Z}_{ML1L2}^0$	$4,99 + j19,36$
i_{11}^0	$(1 - \alpha) \dot{Z}_{ML1L2}^0$	$1,25 + j4,84$

= $1005,3 + j566,51 \Omega$.

$$\begin{array}{r}
E2 \\
i_1^1 \quad \dot{E}_{SC} \quad -33,20 + j57,50 \\
i_2^1 \quad \dot{E}'_{GCBV} \quad -68,79 + j28,25 \\
i_3^1 \quad 0 \quad 0 \\
i_4^1 \quad 0 \quad 0 \\
i_5^1 \quad 0 \quad 0 \\
i_6^1 \quad 0 \quad 0 \\
i_7^1 \quad 0 \quad 0 \\
i_8^1 \quad -\dot{a}\dot{U}_{K1A}^1 \quad 16,60 - j28,75 \\
i_9^1 \quad 0 \quad 0 \\
i_1^2 \quad 0 \quad 0 \\
i_2^2 \quad 0 \quad 0 \\
i_3^2 \quad 0 \quad 0 \\
i_4^2 \quad 0 \quad 0 \\
i_5^2 \quad 0 \quad 0 \\
i_6^2 \quad 0 \quad 0 \\
i_7^2 \quad 0 \quad 0 \\
i_8^2 \quad -\dot{a}^2\dot{U}_{K1A}^2 \quad 16,60 + j28,75 \\
i_9^2 \quad 0 \quad 0 \\
i_1^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_2^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_3^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_4^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_5^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_6^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_7^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_8^0 \quad -\dot{U}_{K1A}^0 \quad -33,20 \\
i_9^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_{10}^0 \quad 0 \quad 0 \\
i_{11}^0 \quad 0 \quad 0
\end{array}
= \text{kV.}$$

Pēc ieejas matricu ievades var iegūt kompleksās aizvietošanas shēmas pretestību matricu Z , izmantojot vektora ZZ saturu kā šīs matricas diagonāles elementus. Turpinājumā tiek noteikta šīs shēmas vadītspēju matrica Y un brīvo mainīgo vektors B :

$$Y = MZ^{-1}M^T, B = -MZ^{-1}E.$$

Var parādīt arī vienādojumus īsslēguma punkta aprēķina fāzes (šeit – A fāze) sprieguma simetrisko komponentu pārrēķinam, ko iegūst no (6.4.) vienādojumu sistēmas, tajā ievietojot īsslēguma pārejas pretestības:

$$\begin{cases}
\dot{U}_{KA}^1 = (\dot{i}_{KA}^1[17] + \dot{i}_{KA}^2[-5,5 - j12,99] + \dot{i}_{KA}^0[-5,5 + j12,99])/3. \\
\dot{U}_{KA}^2 = (\dot{i}_{KA}^1[-5,5 + j12,99] + \dot{i}_{KA}^2[17] + \dot{i}_{KA}^0[-5,5 - j12,99])/3. \\
\dot{U}_{KA}^0 = (\dot{i}_{KA}^1[-5,5 - j12,99] + \dot{i}_{KA}^2[-5,5 + j12,99] + \dot{i}_{KA}^0[17])/3.
\end{cases}$$

Turklāt jāievēro arī, ka kompleksajai aizvietošanas shēmai aprēķins notiek C fāzes simetriskajām komponentēm, tādēļ īsslēgumu pārstāvošo EDS avotu vērtību pārrēķinam nepieciešamās īsslēguma TS un PS komponentes jāizmanto tad, kad jau veikti atbilstošie pagriezieni:

$$\begin{cases} \dot{I}_{KA}^1 = \dot{a}^2 \dot{I}_{KC}^1 = \dot{a}^2 I_Z(8). \\ \dot{I}_{KA}^2 = \dot{a} \dot{I}_{KC}^2 = \dot{a} I_Z(17). \end{cases}$$

Izpildot kompleksās aizvietošanas shēmas režīma parametru aprēķinu un pārrēķinot īsslēguma punkta sprieguma simetriskās komponentes atbilstoši iepriekš dotajiem paskaidrojumiem, tika iegūts risinājums ar precizitāti 0,001 kV, izpildot 79 tuvinājumu soļus. Aprēķina realizācija programmas tekstā dota 17. pielikumā. Aprēķinu rezultātā iegūtie kompleksās aizvietošanas shēmas mezglu spriegumu un zaru strāvu vektori:

U	
1	$-10,276 + j37,646$
2	$-0,953 + j18,874$
3	$-0,806 + j18,782$
4	$2,199 + j14,461$
5	$-11,378 + j26,165$
6	$-8,355 + j24,928$
7	$-3,456 + j22,070$
8	$-1,037 + j18,851$
9	$-0,474 + j18,292$
10	$3,433 + j25,686$
11	$1,317 + j23,245$
12	$0,242 + j20,578$
13	$-6,646 + j17,861$
14	$-3,054 + j19,344$
15	$-3,915 + j18,160$

kV,

$$\begin{aligned}
I_Z & \\
i_1^1 & 1,529 + j2,287 \\
i_2^1 & 0,003 + j0,393 \\
i_3^1 & 0,013 + j0,024 \\
i_4^1 & 0,006 + j0,010 \\
i_5^1 & 0,007 + j0,015 \\
i_6^1 & 0,916 + j1,409 \\
i_7^1 & -0,602 - j1,247 \\
i_8^1 & 1,519 + j2,656 \\
i_9^1 & 0,612 + j0,878 \\
i_1^2 & 0,202 + j0,473 \\
i_2^2 & -0,005 - j0,025 \\
i_3^2 & 0,005 - j0,013 \\
i_4^2 & 0,002 - j0,005 \\
i_5^2 & 0,003 - j0,008 \\
i_6^2 & 0,120 + j0,283 \\
i_7^2 & -0,072 - j0,178 \\
i_8^2 & 0,192 + j0,461 \\
i_9^2 & 0,082 + j0,191 \\
i_1^0 & 0,244 - j0,163 \\
i_2^0 & 0,002 - j0,368 \\
i_3^0 & -0,284 + j0,170 \\
i_4^0 & -0,142 + j0,085 \\
i_5^0 & -0,142 + j0,085 \\
i_6^0 & 0,175 - j0,152 \\
i_7^0 & -0,355 + j0,550 \\
i_8^0 & 0,530 - j0,701 \\
i_9^0 & 0,069 - j0,011 \\
i_{10}^0 & 0,244 - j0,163 \\
i_{11}^0 & -0,286 + j0,538
\end{aligned} \text{ kA.}$$

Iegūtie rezultāti satur C fāzes spriegumu un strāvu simetrisko komponentu vērtības QF2 piesaistītajai aizsardzībai, īsslēguma punktam un QF3 vadošajai aizsardzībai, ievērojot, ka šīs aizsardzības strāvas mērīšanas virziens ir pretējs shēmā parādītajam. Papildu analīzei tiks izdalītas simetrisko komponentu vērtības jaudas slēdzim QF6, respektīvi, sprieguma kritumi uz jaudas slēdža kontaktiem, lai pārbaudītu, vai pārrāvuma robežnosacījumi ir ievēroti, kā arī QF7 piesaistītajai aizsardzībai, lai novērtētu ģenerators režīma parametrus. Veicot pāreju uz T1 ģenerators pusi, uzreiz tiks ņemti vērā sprieguma kritumi šajā transformatorā un tad veikta gan amplitūdu transformācija, gan TS un PS komponentu pagriezieni, ņemot vērā, ka T1 slēguma shēma un grupa ir $Y_0/\Delta-11$ un pāreja notiek no zvaigznē saslēgtā uz trīsstūrī saslēgtā tinuma pusi:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{\text{QF2C}}^1 \\ \dot{U}_{\text{QF2C}}^2 \\ \dot{U}_{\text{QF2C}}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U(1) \\ U(7) - U(6) \\ U(11) - U(10) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -10,276 + j37,646 \\ 4,900 - j2,858 \\ -2,117 - j2,441 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 39,023e^{j105,27^\circ} \\ 5,672e^{-j30,25^\circ} \\ 3,231e^{-j130,93^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

$$\begin{bmatrix} i_{\text{QF2C}}^1 \\ i_{\text{QF2C}}^2 \\ i_{\text{QF2C}}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_Z(6) \\ I_Z(15) \\ I_Z(24) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,916 + j1,409 \\ 0,120 + j0,283 \\ 0,175 - j0,152 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1,681e^{j56,97^\circ} \\ 0,307e^{j66,97^\circ} \\ 0,231e^{-j40,94^\circ} \end{bmatrix} \text{ kA,}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{\text{KC}}^1 \\ \dot{U}_{\text{KC}}^2 \\ \dot{U}_{\text{KC}}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U(4) \\ U(9) - U(6) \\ U(13) - U(10) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,199 + j14,461 \\ 7,881 - j6,635 \\ -10,079 - j7,825 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 14,629e^{j81,35^\circ} \\ 10,302e^{-j40,10^\circ} \\ 12,760e^{-j142,18^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

$$\begin{bmatrix} i_{\text{KC}}^1 \\ i_{\text{KC}}^2 \\ i_{\text{KC}}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_Z(8) \\ I_Z(17) \\ I_Z(26) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,519 + j2,656 \\ 0,192 + j0,461 \\ 0,530 - j0,701 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 3,059e^{j60,24^\circ} \\ 0,499e^{j67,40^\circ} \\ 0,879e^{-j52,92^\circ} \end{bmatrix} \text{ kA,}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{\text{QF3C}}^1 \\ \dot{U}_{\text{QF3C}}^2 \\ \dot{U}_{\text{QF3C}}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U(2) \\ U(2) - U(6) \\ U(2) - U(10) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,953 + j18,874 \\ 7,403 - j6,053 \\ -4,386 - j6,812 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 18,898e^{j92,89^\circ} \\ 9,563e^{-j39,27^\circ} \\ 8,102e^{-j122,77^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

$$\begin{bmatrix} i_{\text{QF3C}}^1 \\ i_{\text{QF3C}}^2 \\ i_{\text{QF3C}}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_Z(7) \\ -I_Z(16) \\ -I_Z(25) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,602 + j1,247 \\ 0,072 + j0,178 \\ 0,355 - j0,550 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1,385e^{j64,21^\circ} \\ 0,192e^{j68,09^\circ} \\ 0,654e^{-j57,13^\circ} \end{bmatrix} \text{ kA,}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_{\text{QF6C}}^1 \\ \Delta \dot{U}_{\text{QF6C}}^2 \\ \Delta \dot{U}_{\text{QF6C}}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U(2) - U(5) \\ U(2) - U(5) \\ U(2) - U(5) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10,425 - j7,290 \\ 10,425 - j7,290 \\ 10,425 - j7,290 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 12,722e^{-j34,96^\circ} \\ 12,722e^{-j34,96^\circ} \\ 12,722e^{-j34,96^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

$$\begin{bmatrix} i_{\text{QF6C}}^1 \\ i_{\text{QF6C}}^2 \\ i_{\text{QF6C}}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_Z(2) \\ I_Z(11) \\ I_Z(20) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,003 + j0,393 \\ -0,005 - j0,025 \\ 0,002 - j0,368 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0,393e^{j89,57^\circ} \\ 0,026e^{-j101,95^\circ} \\ 0,368e^{-j89,63^\circ} \end{bmatrix} \text{ kA.}$$

Lai izveidotu QF7 C fāzes sprieguma un strāvas simetrisko komponentu vektorus, ir jāievēro sprieguma kritums T1 pretestībā, šo lielumu amplitūdu transformācija uz 10 kV pusi ($k_T = 110/10 = 11$), kā arī TS un PS komponentu pagriezieni:

$$\dot{U}_{\text{QF7C}}^1 = [U(5) + I_Z(2)\dot{Z}_{T1}]e^{j30^\circ}/k_T \approx -3,364 + j0,882 \text{ kV,}$$

$$\dot{U}_{\text{QF7C}}^2 = [U(5) + I_Z(11)\dot{Z}_{T1} - U(6)]e^{-j30^\circ}/k_T \approx -0,114 + j0,169 \text{ kV,}$$

$$i_{\text{QF7C}}^1 = k_T I_Z(2)e^{j30^\circ} \approx -2,135 + j3,762 \text{ kA,}$$

$$i_{\text{QF7C}}^2 = k_T I_Z(11)e^{-j30^\circ} \approx -0,189 - j0,211 \text{ kA,}$$

Ērtībai šos rezultātus var apkopot vektoros, ņemot vērā, ka aiz T1 trīsstūra tinuma fāžu strāvas un spriegumi NS komponentes nesaturēs:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{\text{QF7C}}^1 \\ \dot{U}_{\text{QF7C}}^2 \\ \dot{U}_{\text{QF7C}}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3,364 + j0,882 \\ -0,114 + j0,169 \\ 0 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 3,477e^{j165,31^\circ} \\ 0,204e^{j124,02^\circ} \\ 0 \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

$$\begin{bmatrix} i_{QF7C}^1 \\ i_{QF7C}^2 \\ i_{QF7C}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{Z1}(6) \\ I_{Z1}(15) \\ I_{Z1}(24) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2,135 + j3,762 \\ -0,189 - j0,211 \\ 0 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 4,326e^{j119,57^\circ} \\ 0,283e^{-j131,95^\circ} \\ 0 \end{bmatrix} \text{ kA.}$$

Tagad jāpāriet no C fāzes simetriskajām komponentēm uz fāžu spriegumiem un strāvām, izmantojot Forteskju transformāciju:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{QF2A} \\ \dot{U}_{QF2B} \\ \dot{U}_{QF2C} \end{bmatrix} = k_C \begin{bmatrix} \dot{U}_{QF2C}^1 \\ \dot{U}_{QF2C}^2 \\ \dot{U}_{QF2C}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -10,276 + j37,646 \\ 4,900 - j2,858 \\ -2,117 - j2,441 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 35,649 - j6,693 \\ -34,506 - j32,977 \\ -7,493 + j32,347 \end{bmatrix} \approx$$

$$\approx \begin{bmatrix} 36,272e^{-j10,63^\circ} \\ 47,730e^{-j136,30^\circ} \\ 33,204e^{j103,04^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

$$\begin{bmatrix} i_{QF2A} \\ i_{QF2B} \\ i_{QF2C} \end{bmatrix} = k_C \begin{bmatrix} i_{QF2C}^1 \\ i_{QF2C}^2 \\ i_{QF2C}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,916 + j1,409 \\ 0,120 + j0,283 \\ 0,175 - j0,152 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0,632 - j0,167 \\ -1,319 - j0,308 \\ 1,211 + j1,540 \end{bmatrix} \approx$$

$$\approx \begin{bmatrix} 1,801e^{-j69,46^\circ} \\ 1,354e^{-j166,85^\circ} \\ 1,959e^{j51,82^\circ} \end{bmatrix} \text{ kA,}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{KA} \\ \dot{U}_{KB} \\ \dot{U}_{KC} \end{bmatrix} = k_C \begin{bmatrix} \dot{U}_{KC}^1 \\ \dot{U}_{KC}^2 \\ \dot{U}_{KC}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2,199 + j14,461 \\ 7,881 - j6,635 \\ -10,079 - j7,825 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 3,150 - j6,817 \\ -33,389 - j16,659 \\ 0 \end{bmatrix} \approx$$

$$\approx \begin{bmatrix} 7,510e^{-j65,20^\circ} \\ 37,314e^{-j153,48^\circ} \\ 0 \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

$$\begin{bmatrix} i_{KA} \\ i_{KB} \\ i_{KC} \end{bmatrix} = k_C \begin{bmatrix} i_{KC}^1 \\ i_{KC}^2 \\ i_{KC}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1,519 + j2,656 \\ 0,192 + j0,461 \\ 0,530 - j0,701 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1,575 - j3,408 \\ -2,226 - j1,111 \\ 2,240 + j2,416 \end{bmatrix} \approx$$

$$\approx \begin{bmatrix} 3,755e^{-j65,20^\circ} \\ 2,488e^{-j153,48^\circ} \\ 3,294e^{j47,16^\circ} \end{bmatrix} \text{ kA,}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{QF3A} \\ \dot{U}_{QF3B} \\ \dot{U}_{QF3C} \end{bmatrix} = k_C \begin{bmatrix} \dot{U}_{QF2C}^1 \\ \dot{U}_{QF2C}^2 \\ \dot{U}_{QF2C}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0,953 + j18,874 \\ 7,403 - j6,053 \\ -4,386 - j6,812 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 13,977 - j5,987 \\ -29,199 - j20,459 \\ 2,064 + j6,009 \end{bmatrix} \approx$$

$$\approx \begin{bmatrix} 15,205e^{-j23,19^\circ} \\ 35,653e^{-j144,98^\circ} \\ 6,354e^{j71,04^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

$$\begin{bmatrix} i_{QF3A} \\ i_{QF3B} \\ i_{QF3C} \end{bmatrix} = k_C \begin{bmatrix} i_{QF2C}^1 \\ i_{QF2C}^2 \\ i_{QF2C}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,602 + j1,247 \\ 0,072 + j0,178 \\ 0,355 - j0,550 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0,943 - j1,722 \\ -0,907 - j0,803 \\ 1,029 + j0,876 \end{bmatrix} \approx$$

$$\approx \begin{bmatrix} 1,963e^{-j61,28^\circ} \\ 1,211e^{-j138,50^\circ} \\ 1,351e^{j40,39^\circ} \end{bmatrix} \text{ kA,}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_{\text{QF6A}} \\ \Delta \dot{U}_{\text{QF6B}} \\ \Delta \dot{U}_{\text{QF6C}} \end{bmatrix} = k_C \begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_{\text{QF6C}}^1 \\ \Delta \dot{U}_{\text{QF6C}}^2 \\ \Delta \dot{U}_{\text{QF6C}}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 10,425 - j7,290 \\ 10,425 - j7,290 \\ 10,425 - j7,290 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 31,276 - j21,871 \end{bmatrix} \approx$$

$$\approx \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 38,164e^{-j34,96^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{\text{QF6A}} \\ \dot{I}_{\text{QF6B}} \\ \dot{I}_{\text{QF6C}} \end{bmatrix} = k_C \begin{bmatrix} \dot{I}_{\text{QF6C}}^1 \\ \dot{I}_{\text{QF6C}}^2 \\ \dot{I}_{\text{QF6C}}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,003 + j0,393 \\ -0,005 - j0,025 \\ 0,002 - j0,368 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0,366 - j0,559 \\ -0,359 - j0,545 \\ 0 \end{bmatrix} \approx$$

$$\approx \begin{bmatrix} 0,668e^{-j56,80^\circ} \\ 0,653e^{-j123,36^\circ} \\ 0 \end{bmatrix} \text{ kA,}$$

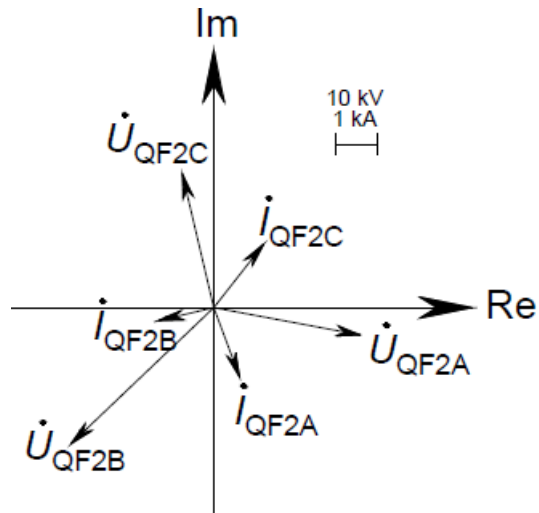
$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{\text{QF7A}} \\ \dot{U}_{\text{QF7B}} \\ \dot{U}_{\text{QF7C}} \end{bmatrix} = k_C \begin{bmatrix} \dot{U}_{\text{QF7C}}^1 \\ \dot{U}_{\text{QF7C}}^2 \\ \dot{U}_{\text{QF7C}}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -3,364 + j0,882 \\ -0,114 + j0,169 \\ 0 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 2,356 + j2,289 \\ 1,122 - j3,339 \\ -3,478 + j1,051 \end{bmatrix} \approx$$

$$\approx \begin{bmatrix} 3,284e^{j44,17^\circ} \\ 3,523e^{-j71,43^\circ} \\ 3,633e^{j163,19^\circ} \end{bmatrix} \text{ kV,}$$

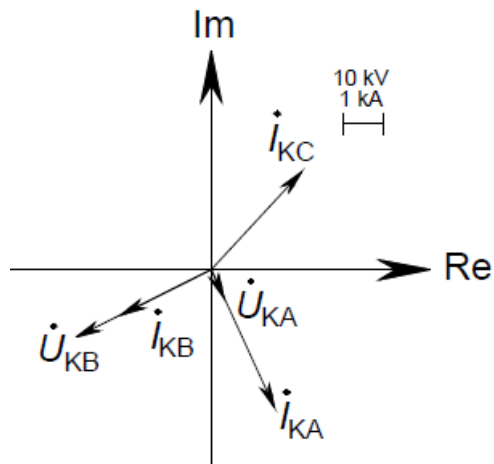
$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{\text{QF7A}} \\ \dot{I}_{\text{QF7B}} \\ \dot{I}_{\text{QF7C}} \end{bmatrix} = k_C \begin{bmatrix} \dot{I}_{\text{QF7C}}^1 \\ \dot{I}_{\text{QF7C}}^2 \\ \dot{I}_{\text{QF7C}}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2,135 + j3,762 \\ -0,189 - j0,211 \\ 0 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 4,603 - j0,091 \\ -2,279 - j3,461 \\ -2,324 + j3,552 \end{bmatrix} \approx$$

$$\approx \begin{bmatrix} 4,604e^{-j1,13^\circ} \\ 4,144e^{-j123,36^\circ} \\ 4,245e^{j123,20^\circ} \end{bmatrix} \text{ kA.}$$

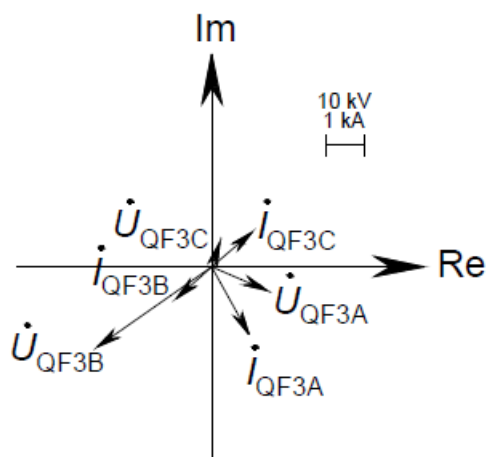
Atbilstoši aprēķinātajiem fāžu spriegumiem un strāvām var uzzīmēt vektoru diagrammas QF2 piesaistītajai aizsardzībai, īsslēguma punktam, QF3 vadošajai aizsardzībai un QF7 atslēdzošajai aizsardzībai T1 10 kV pusē (8.61.–8.64. att.).



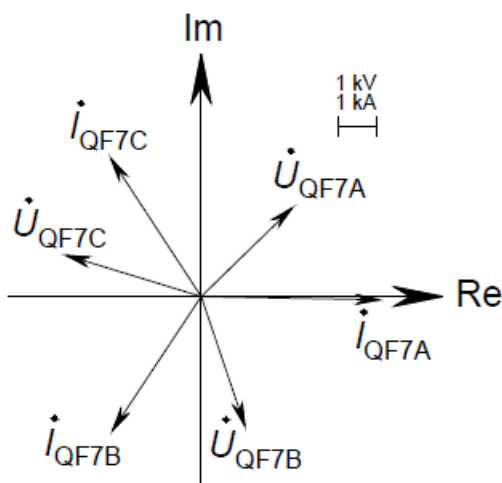
8.61. att. QF2 piesaistītās aizsardzības fiksēto fāžu spriegumu un strāvu vektoru diagramma, vienlaikus rodoties nesimetriskam trīsfāžu īsslēgumam uz zemi otrā aprēķinu piemēru tīkla līnijā L1 un QF6 jaudas slēdža C fāzes pārrāvumam.



8.62. att. Īsslēguma punktā nomērāmo fāžu spriegumu un strāvu vektoru diagramma, rodoties vienlaicīgi nesimetriskam trīsfāžu īsslēgumam uz zemi otrā aprēķinu piemēru tīkla līnijā L1 un QF6 jaudas slēdža C fāzes pārrāvumam.



8.63. att. QF3 vadošās aizsardzības fiksēto fāžu spriegumu un strāvu vektoru diagramma, vienlaikus rodoties nesimetriskam trīsfāžu īsslēgumam uz zemi otrā aprēķinu piemēru tīkla līnijā L1 un QF6 jaudas slēdža C fāzes pārrāvumam.



8.64. att. QF7 piesaistītās aizsardzības fiksēto fāžu spriegumu un strāvu vektoru diagramma 10 kV pusē, rodoties vienlaicīgi nesimetriskam trīsfāžu īsslēgumam uz zemi otrā aprēķinu piemēru tīkla līnijā L1 un QF6 jaudas slēdža C fāzes pārrāvumam.

No iegūtajiem fāžu lielumiem un to vektoru diagrammām (8.61.–8.64. att.) redzams, ka abu bojājumu robežnosacījumi tiek ievēroti, jo īsslēgumam C fāzē un saitē uz zemi pārejas pretestību nav ($\dot{Z}_{KC} = \dot{Z}_{KN} = 0 \Omega$) un atbilstoši C fāzes spriegums ir nulle (8.62. att.). Vienlaikus var atzīmēt, ka B fāzes spriegums ir vairākas reizes lielāks par A fāzes spriegumu un A fāzes strāvas stiprums ir lielāks par B fāzē novērojamo, ko arī var izskaidrot ar šo fāžu pārejas pretestību atšķirīgajām vērtībām ($\dot{Z}_{KA} = 2 \Omega$, $\dot{Z}_{KB} = 15 \Omega$). Aplūkojot jaudas slēdzim QF6 piesaistītajai aizsardzībai aprēķinātos fāžu lielumus, redzams, ka tikai pārrautajā fāzē neplūst strāva un nebojātajām fāzēm sprieguma kritums uz jaudas slēdža kontaktiem ir 0 V (atbilst pārejas pretestībām $\dot{Z}_{LA} = \dot{Z}_{LB} = 0 \Omega$). Abu bojājumu mijiedarbība redzama tajā, ka īsslēguma C fāzes strāva ir mazāka nekā A fāzes strāva, kaut C fāzei pārejas pretestība ir 0 Ω , bet A fāzei – 2 Ω . Tas ir tāpēc, ka jaudas slēdža QF6 bojājuma dēļ īsslēgumam no ģeneratora zara strāvas pieplūst vienīgi pa A un B fāzēm. Vienlaikus caur QF6 no ģeneratora puses plūst

A un B fāzes strāva ar stiprumu, kas vairākas reizes pārsniedz sagaidāmo vērtību, rodoties vienīgi pārrāvumam (strāvu stiprumi būtu tuvāki slodzes režīmā novērotajiem). Aizsardzībām, kuras iedarbojas uz slēdžiem QF2 un QF3, aprēķinātie fāžu un simetrisko komponentu lielumi un uzzīmētās vektoru diagrammas (8.61. un 8.63. att.) vēlreiz parāda, ka līdz ar elektriskā attāluma līdz BV palielinājumu fāžu spriegumi un nereti arī strāvu sistēmas kļūst simetriskākas. Īsslēgums ir tālāk no jaudas slēdža QF2, kas vienlaikus atrodas tuvu lieljaudas sistēmai S, tādēļ QF2 piesaistītās aizsardzības fiksētie fāžu spriegumi un strāvas veido daudz simetriskāku trīsfāžu sistēmu nekā QF3 vadošās aizsardzības noteiktie. QF7 izmantojošās aizsardzības novēroto režīma parametru aprēķins un vektoru diagramma (8.64. att.) parāda transformatoru lielo ietekmi uz spriegumu vektoru sistēmas simetriju, it īpaši, ja jāveic pāreja no zvaigznē saslēgta tinuma uz trīsstūrī savienota tinuma pusi vai otrādi.

Papildu analīzei būtu interesanti aplūkot QF2 piesaistītās DA fiksētās šķietamās pretestības, ievērojot, ka šim scenārijam tās var būt tuvas I zonas robežai. Ņemot vērā īsslēguma atšķirīgās fāžu pārejas pretestības, lietderīgi aprēķināt DA fiksēto šķietamo pretestību visām F–F un F–Z cilpām. F–F cilpām šķietamā pretestība būs [3], [16]:

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{\text{relAB}} &= \frac{\dot{U}_{\text{QF2A}} - \dot{U}_{\text{QF2B}}}{\dot{I}_{\text{QF2A}} - \dot{I}_{\text{QF2B}}} = \frac{(35,649 - j6,693) - (-34,506 - j32,977)}{(0,632 - j0,167) - (-1,319 - j0,308)} \approx 17,63 + j25,94 \, \Omega, \\ \dot{Z}_{\text{relBC}} &= \frac{\dot{U}_{\text{QF2B}} - \dot{U}_{\text{QF2C}}}{\dot{I}_{\text{QF2B}} - \dot{I}_{\text{QF2C}}} = \frac{(-34,506 - j32,977) - (-7,493 + j32,347)}{(-1,319 - j0,308) - (1,211 + j1,540)} \approx 19,26 + j11,75 \, \Omega, \\ \dot{Z}_{\text{relCA}} &= \frac{\dot{U}_{\text{QF2C}} - \dot{U}_{\text{QF2A}}}{\dot{I}_{\text{QF2C}} - \dot{I}_{\text{QF2A}}} = \frac{(-7,493 + j32,347) - (35,649 - j6,693)}{(1,211 + j1,540) - (0,632 - j0,167)} \approx 9,40 + j15,06 \, \Omega.\end{aligned}$$

F–Z cilpām fiksētās pretestībās aprēķina veikšanai vispirms jānosaka līnijas L1 NS kompensācijas koeficients un paralēlās līnijas L2 NS mijinduktivitātes kompensācijas koeficients:

$$\begin{aligned}\dot{k}_0 &= (\dot{Z}_{\text{L1}}^0 - \dot{Z}_{\text{L1}}^1) / \dot{Z}_{\text{L1}}^1 = ((15,65 + j42,97) - (9,4 + j17,18)) / (9,4 + j17,18) \approx \\ &\approx 1,309 + j0,352, \\ \dot{k}_{\text{M0}} &= \dot{Z}_{\text{ML1L2}}^0 / \dot{Z}_{\text{L1}}^1 = (6,24 + j24,20) / (9,40 + j17,18) \approx 1,237 + j0,314.\end{aligned}$$

Attiecīgās DA noteikto pretestību vērtības būs šādas:

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{\text{relAZ}} &= \frac{\dot{U}_{\text{QF2A}}}{\dot{I}_{\text{QF2A}} + \dot{k}_0 \dot{I}_{\text{QF2A}}^0 + \dot{k}_{\text{M0}} \dot{I}_{\text{L2}}^0} = \\ &= \frac{(35,649 - j6,693)}{(0,632 - j0,167) + (1,309 + j0,352)(0,175 - j0,152) + (1,237 + j0,314)(0,069 - j0,011)} \approx \\ &\approx 11,13 + j13,49 \, \Omega, \\ \dot{Z}_{\text{relBZ}} &= \frac{\dot{U}_{\text{QF2B}}}{\dot{I}_{\text{QF2B}} + \dot{k}_0 \dot{I}_{\text{QF2B}}^0 + \dot{k}_{\text{M0}} \dot{I}_{\text{L2}}^0} = \\ &= \frac{(-34,506 - j32,977)}{(-1,319 - j0,308) + (1,309 + j0,352)(0,175 - j0,152) + (1,237 + j0,314)(0,069 - j0,011)} \approx \\ &\approx 43,24 + j14,83 \, \Omega, \\ \dot{Z}_{\text{relCZ}} &= \frac{\dot{U}_{\text{QF2C}}}{\dot{I}_{\text{QF2C}} + \dot{k}_0 \dot{I}_{\text{QF2C}}^0 + \dot{k}_{\text{M0}} \dot{I}_{\text{L2}}^0} =\end{aligned}$$

$$= \frac{(-7,493 + j32,347)}{(1,211 + j1,540) + (1,309 + j0,352)(0,175 - j0,152) + (1,237 + j0,314)(0,069 - j0,011)} \approx$$

$$\approx 7,52 + j13,74 \Omega.$$

Pieņemot drošības koeficientu $k_{dr} = 0,9$, t. i., TA un TV kļūda nepārsniedz 5 %, un rēķinot iestatījumu, pieskaitot papildu iespējamo pārejas pretestību 50 Ω (praksē šī rezerve var atšķirties), var iegūt šādu DA I zonas iestatījumu primārajos omos [90]:

$$\dot{Z}_I = 50 + k_{dr} \dot{Z}_{L1}^1 = 50 + 0,9(9,4 + j17,18) \approx 58,46 + j15,46 \Omega.$$

Salīdzinot DA I zonas iestatījumu \dot{Z}_I ar DA fiksētajām pretestībām, redzams, ka DA iespējams nostrādāt ar I zonu visām cilpām, izņemot F–F cilpu A–B, kuras reaktance pārsniedz iestatījuma robežu. Ņemot vērā, ka L1 TS pretestība līdz īsslēguma vietai ir $\alpha \dot{Z}_{L1}^1 = 7,52 + j13,74 \Omega$, iespējams novērot, kā atšķirīgās īsslēguma fāžu pārejas pretestības A un B fāzēs ietekmējušas DA fiksētās pretestības precizitāti, salīdzinot ar C fāzi, kurā nav pārejas pretestības.

Nobeigumā, ņemot vērā fāžu strāvu PS komponentu negatīvo ietekmi uz elektriskajām mašīnām, iespējams novērtēt tās īpatsvaru ģeneratoram:

$$|i_{QF7C}^2| / |i_{QF7C}^1| = 0,293 / 4,326 \approx 0,0677 \text{ r. v. } \approx 6,77 \%$$

Ievērojot 7.3. apakšnodaļas beigās minēto ģeneratoriem paredzēto izturības robežu (5–10 %) ilgstošai darbībai režīmā, pastāvot fāžu strāvu PS komponentei, var prognozēt, ka visticamāk PS komponente izraisīs pastiprinātu ģeneratora silšanu, bet pati par sevi neradīs neatgriezeniskus bojājumus. Protams, šādos gadījumos precīzai analīzei ir svarīgi uzzināt konkrētā ģeneratora pieļaujamo PS strāvas īpatsvaru. Tomēr konkrētajā scenārijā īsslēguma dēļ statora fāžu strāvas pārsniedz nominālo ($I_{GN} = S_{GN} / (\sqrt{3} U_{GN}) = 25 \cdot 10^6 / (\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 10^3) \approx 1374,6 \text{ A}$) vairāk nekā trīs reizes un sagaidāms, ka vajadzības gadījumā, t. i., nenostādājot aizsardzībām tuvāk īsslēgumam, ģeneratoru atslēgs vismaz tā MSA.

Jāatzīmē, ka, testējot konkrēto aprēķinu ar lielām īsslēguma pārejas pretestību vērtībām, arī varēja novērot skaitliskā aprēķina diverģenci, kas norāda uz turpmākām metodes pilnveidošanas iespējām.

9. LAPLASA TRANSFORMĀCIJAS LIETOŠANA BOJĀJUMU PĀREJAS PROCESU APRĒĶINOS

Energosistēmu bojājumu pārejas procesu aprēķinus visbiežāk lieto sistēmas elementu izvēles procesā un stabilitātes analīzei. Zināšanas par bojājumu pārejas procesa gaitu un režīma parametru signālu amplitūdām var būt noderīgas arī RAA darbības analīzei, piemēram, pārbaudot, vai īsslēguma laikā iespējama RA vajadzībām uzstādīto strāvmaiņu piesātināšanās, it īpaši izteiktā strāvas aperiodiskās komponentes klātbūtnē, vai analizējot relejus, kuru darbība balstīta uz kopējā sprieguma vai strāvas signāla efektīvās vērtības. Literatūrā pieejamā pārejas procesu aprēķinu metodika visbiežāk vispirms piedāvā elektrisko ķēžu pārejas procesu risināšanai lietot diferenciālvienādojumus. Sprotams, ka, augot sistēmas aizvietošanas shēmas izmēriem, strauji palielinās diferenciālvienādojumu vai to sistēmu tieša risinājuma grūtības pakāpe un darbietilpība, tādēļ viens no alternatīvajiem risinājumiem, kuru mēdz piedāvāt, ir uzdevuma risināšana operatoru formā, t. i., lietojot Laplasa transformāciju. Šīs metodes izmantošana ir salīdzinoši izdevīga, ja iespējama iegūtā risinājuma transformācija atpakaļ no operatoru formas uz laika funkciju, izmantojot gatavas apgrieztās Laplasa transformācijas formulas vai skaitlisku apgrieztās Laplasa transformācijas versiju. Viens šāds skaitliskās apgrieztās Laplasa transformācijas paņēmiens tiks sīkāk aprakstīts šajā nodaļā.

9.1. Laplasa transformācija un tās lietojums elektrisko ķēžu pārejas procesu aprēķinos

Laplasa transformācija ir pāreja no oriģinālās laikā mainīgās funkcijas vai signāla pie funkcijas, kura ir atkarīga no kompleksa mainīgā: $p = c + j\omega$ (dažreiz apzīmē arī ar $s = c + j\omega$). Pāreja uz šādu kompleksā mainīgā telpu dod iespēju diferenciālvienādojumus aplūkot kā algebriskus vienādojumus. Atrisinot algebriskos vienādojumus kompleksā mainīgā p telpā, iegūst saknes, kuras atbilst sākotnējo diferenciālvienādojumu risinājumam Laplasa telpā, un, veicot vienādojumu sakņu apgrieztu Laplasa transformāciju, var noteikt risinājumu kā funkciju, kas atkarīga no oriģinālā mainīgā [82], [94], [95].

Analizējot pārejas procesus, tipveidā aplūko laikā mainīgas funkcijas $f(t)$. Pagaidām pieņemsim, ka pirms aprēķina sākuma momenta (piemēram, bojājuma rašanās brīža) $f(t) = 0$, un $f(t) \geq 0$, ja $t \geq 0$ s. Turklāt $f(t)$ pieaugums nepārsniedz eksponenciālu funkciju ($f(t) < Me^{C_0 t}$, ja $t \geq 0$ s, kur M un C_0 ir reālas un pozitīvas konstantes). Konstante C_0 apraksta funkcijas $f(t)$ pieaugumu. Attiecīgi, ja funkcija pieaug vai dilst līdz galīgai vērtībai, tad arī konstantei C_0 ir galīga vērtība un integrālis [82], [94], [95]:

$$F(p) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-pt} dt, \quad (9.1.)$$

kur $f(t)$ – analītiska funkcija no laika;

p – kompleks Laplasa telpas mainīgais;

$F(p)$ – funkcijas $f(t)$ ekvivalents Laplasa telpā;

t – laiks, s,

konverģē, un tas atbilst $f(t)$ ekvivalentam Laplasa kompleksās plaknes daļā, kur $\text{Re}(p) = c > C_0$. Vienādojums (9.1.) atbilst tiešajai Laplasa transformācijai, un literatūrā $f(t)$ parasti sauc par oriģinālu un $F(p)$ sauc par oriģināla attēlu Laplasa telpā jeb vienkārši par attēlu [82]. Laplasa tiešo un apgriezto transformāciju vēl apzīmē $f(t) \doteq F(p)$ un $F(p) \doteq f(t)$ vai $L[f(t)] = F(p)$ un $L^{-1}[F(p)] = f(t)$. Balstoties uz (9.1.), iespējams iegūt dažādām tipveidā lietotām funkcijām Laplasa transformācijas rezultātā iegūstamos attēlus (skatīt 9.1. tabulā ieslēgšanas funkcijas, ieslēgšanas uz laiku funkcijas, delta jeb impulsa funkcijas, lineāras funkcijas, eksponenciālas funkcijas, sinusa, kosinusa, hiperboliskā sinusa, hiperboliskā kosinusa un rimstošu šo funkciju attēlus Laplasa telpā).

9.1. tabula

Tipveidā lietojamo funkciju attēli Laplasa telpā [82], [94], [95]

Oriģinālā funkcija $f(t)$	Attēls Laplasa telpā $F(p)$
$1(t) = \begin{cases} 0, \text{ ja } t < 0 \text{ s} \\ 1, \text{ ja } t \geq 0 \text{ s} \end{cases}$	$1/p, \text{ ja } \text{Re}(p) > 0$
$1(t) - 1(t - \tau) = \begin{cases} 0, \text{ ja } t < 0 \text{ s vai } t \geq \tau \\ 1, \text{ ja } 0 \leq t < \tau \end{cases}$	$(1 - e^{-p\tau})/p$
$\delta(t) = \begin{cases} +\infty, \text{ ja } t = 0 \text{ s} \\ 0, \text{ ja } t \neq 0 \text{ s} \end{cases}$	1
$1(t)kt$	k/p^2
$1(t)e^{\pm at}$	$1/(p \mp a), \text{ ja } \text{Re}(p) > \text{Re}(a)$
$1(t)(1 - e^{-at})$	$a/(p(p + a))$
$1(t) \sin(bt)$	$b/(p^2 + b^2)$
$1(t) \sin(bt + \varphi)$	$(p \sin(\varphi) + b \cos(\varphi))/(p^2 + b^2)$
$1(t) \cos(bt)$	$p/(p^2 + b^2)$
$1(t) \cos(bt + \varphi)$	$(p \cos(\varphi) - b \sin(\varphi))/(p^2 + b^2)$
$1(t) \text{sh}(bt)$	$b/(p^2 - b^2)$
$1(t) \text{ch}(bt)$	$p/(p^2 - b^2)$
$1(t)e^{-at} \sin(bt)$	$b/((p + a)^2 + b^2)$
$1(t)e^{-at} \sin(bt + \varphi)$	$((p + a) \sin(\varphi) + b \cos(\varphi))/((p + a)^2 + b^2)$
$1(t)e^{-at} \cos(bt)$	$(p + a)/((p + a)^2 + b^2)$
$1(t)e^{-at} \cos(bt + \varphi)$	$((p + a) \cos(\varphi) - b \sin(\varphi))/((p + a)^2 + b^2)$
$1(t)e^{-at} \text{sh}(bt)$	$b/((p + a)^2 - b^2)$
$1(t)e^{-at} \text{ch}(bt)$	$(p + a)/((p + a)^2 - b^2)$

Papildus gatavajām tipveida formulām bieži lieto arī Laplasa transformācijas īpašības [82], [95].

✓ Linearitāte:

$$k_1 f_1(t) \pm k_2 f_2(t) \doteq k_1 F_1(p) \pm k_2 F_2(p), \quad (9.2.)$$

$$k_1 F_1(p) \pm k_2 F_2(p) \doteq k_1 f_1(t) \pm k_2 f_2(t). \quad (9.3.)$$

✓ Funkcijas $f(t)$ laika aizture jeb kavējums:

$$f(t - \tau) \doteq F(p)e^{-p\tau}, \quad (9.4.)$$

kur τ – laika aiztures jeb kavējuma ilgums, s.

✓ Funkcijas atvasinājuma transformācija:

$$f'(t) = df(t)/dt \doteq pF(p) - \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} f(0 + \varepsilon) = pF(p) - f(0 +), \quad (9.5.)$$

kur $f(0 +)$ – funkcijas $f(t)$ vērtība momentā $t = 0$ s, tuvojoties no labās puses ($t > 0$ s), kas ir būtiski, ja novērojamas straujas $f(t)$ vērtību izmaiņas aprēķina sākuma momentā.

✓ Funkcijas integrāļa transformācija:

$$\begin{aligned} \int_0^t f(t) dt &\doteq (F(p)/p) + \left(\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_0^\varepsilon f(0 + \varepsilon) dt / p \right) = \\ &= (F(p)/p) + (f^{-1}(0 +)/p), \end{aligned} \quad (9.6.)$$

kur $f^{-1}(0 +)$ – funkcijas $f(t)$ integrāļa vērtība momentā $t = 0$ s, tuvojoties no labās puses ($t > 0$ s).

✓ Oriģināla reizinājums ar eksponenciālu funkciju.

Reizinot oriģinālu $f(t)$ ar eksponenciālu funkciju $e^{\pm at}$ pēc Laplasa transformācijas, iegūst attēlu $F(p)$, kurā p aizstāts ar $p \mp a$:

$$f(t)e^{\pm at} \doteq F(p \mp a). \quad (9.7.)$$

✓ Oriģināla reizinājums ar sinusa vai kosinusa funkcijām.

Reizinot oriģinālu $f(t)$ ar sinusa vai kosinusa funkciju Laplasa transformācijas rezultātā, iegūst attēla kombināciju summas, kurās p aizstāts ar $p - j\omega$ un $p + j\omega$:

$$f(t) \sin(\omega t) \doteq (1/2j)(F(p - j\omega) - F(p + j\omega)), \quad (9.8.)$$

$$f(t) \cos(\omega t) \doteq (1/2)(F(p - j\omega) + F(p + j\omega)). \quad (9.9.)$$

✓ Attēlu reizinājums un Diameļa integrālis.

Veicot divu funkciju attēlu $F_1(p)$, $F_2(p)$ reizinājuma apgriezto Laplasa transformāciju, iegūst to oriģinālu $f_1(t)$, $f_2(t)$ konvolūciju:

$$F_1(p)F_2(p) \doteq \int_0^t f_1(t)f_2(t - \tau)d\tau = f_1(t) * f_2(t). \quad (9.10.)$$

Bieži (9.10.) risināšanai lieto Diameļa integrāli:

$$\begin{aligned} pF_1(p)F_2(p) &\doteq f_1(0)f_2(t) + \int_0^t f_1'(\tau)f_2(t - \tau)d\tau = \\ &= f_1(t)f_2(0) + \int_0^t f_1(\tau)f_2'(t - \tau)d\tau. \end{aligned} \quad (9.11.)$$

Nākamais svarīgais uzdevums ir aplūkot apgrieztās Laplasa transformācijas veikšanu. Ja $F(p)$ ir analītiska funkcija, kura atrodas pusplaknē $\text{Re}(p) = c > C_0$ un kura monotoni tiecas uz nulli $F(p) \rightarrow 0$ attiecībā pret mainīgo p , ja $|p| \rightarrow \infty$ un ja integrālis $\int_{c-j\infty}^{c+j\infty} F(p) dp$ konverģē, jeb tam ir galīga vērtība, no attēla $F(p)$ oriģināla funkcija iegūstama šādi [12], [82], [95]:

$$f(t) = (1/2\pi j) \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} F(p) e^{pt} dp. \quad (9.12.)$$

Atbilstoši (9.12.) integrēšana jāveic pa jebkuru $j\omega$ asij paralēlu līniju, kurai $c > C_0$, no $\omega = -\infty$ rad/s līdz $\omega = +\infty$ rad/s, kas, saprotams, nav praktiski skaitliskam aprēķinam. Tādēļ, balstoties uz Žordāna lemmu, no šāda līnijas integrāļa pāriet uz integrāli pa kontūru, kurš ir pusapļa formā ar bezgalīgu rādiusu un izvietots pa kreisi no c vērtības robežas. Papildus jāņem vērā, ka kompleksajai funkcijai $F(p)$ šajā kontūrā iespējami poli (bezgalīgi lieli ekstrēmumi, kurus fizikāli var saprast, piemēram, kā shēmas kontūru brīvo svārstību frekvences punktu Laplasa kompleksajā plaknē), kuru integrēšana arī ir neiespējama. Šīs problēmas risināšanai lieto minēto pusapļa kontūru ar izgriezumiem ap poliem atbilstoši Koši formulai, kur attālumu līdz poliem bezgalīgi samazina. Tālāk kompleksās funkcijas integrāli pa ekvivalento kontūru CE iespējams parādīt ar vienādojumu [12], [82], [95]:

$$\oint_{CE} F(p) dp = 2\pi j A_{-1}, \quad (9.13.)$$

kur A_{-1} – koeficients pie reizinātāja $1/(p - a)$, izvedot funkciju $F(p)$ Lorāna rindā.

Koeficientu A_{-1} sauc arī par funkcijas $F(p)$ rezīdiju attiecībā pret $F(p)$ īpašo punktu a , t. i., $A_{-1} = \text{Res}(a)$ [12]. Īpašie punkti ir tādi punkti, kuru apkārtnē analītiska funkcija nav izsakāma Teilora rindā, tostarp arī funkcijas $F(p)$ poli. Lietojot rezīdija teorēmu, iespējams pārveidot (9.12.) formā [12], [82], [95]:

$$f(t) = (1/2\pi j) \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} F(p) e^{pt} dp = L^{-1}[F(p)] = \sum_{i=1}^n [\text{Res}_{p_i}(F(p)e^{pt})], \quad (9.14.)$$

kur n – funkcijas $F(p)$ īpašo punktu skaits kontūrā CE ;

p_i – i -tais funkcijas $F(p)$ īpašais punkts.

Rezīdija funkciju no kompleksā mainīgā funkcijas $F(p)$ m -tās kārtas polam p_i iespējams parādīt šādi [12], [82], [95]:

$$\text{Res}_{p_i}(F(p)) = 1/(m-1)! \lim_{p \rightarrow p_i} d^{m-1}(F(p)(p-p_i)^m)/dp^{m-1}, \quad (9.15.)$$

kur m – pola kārtas, kas atbilst iepriekš minētās Lorāna rindas koeficientu skaitam ($A_{-2} \dots A_{-m}$).

Ja $F(p)$ ir meromorfa funkcija, tad attēla funkciju iespējams sadalīt divu funkciju attiecībā [12], [82], [95]:

$$F(p) = F_1(p)/F_2(p), \quad (9.16.)$$

kur abām kompleksā mainīgā p funkcijām nav kopīgu sakņu. Funkcijas $F(p)$ poli ir $F_2(p) = 0$ saknes. Attiecīgi, ja vienādojumam $F_2(p) = 0$ ir vienkāršas saknes, $F(p)$ poli ir 1. kārtas, kas nozīmē, ka $F(p)$ ir virsma un vienai p vērtībai atbilst viena $F(p)$ vērtība. Tad, ievērojot (9.15.) ar $m = 1$, iespējams parādīt $F(p)$ apgriezto Laplasa transformāciju formā [12], [82], [95]:

$$f(t) = L^{-1}[F_1(p)/F_2(p)] = \sum_{i=1}^N [(F_1(p_i)e^{p_i t}/F_2'(p_i))], \quad (9.17.)$$

kur N – funkcijas $F_2(p) = 0$ sakņu skaits.

Sarežģītu sakņu jeb sakņu ar augstākām pakāpēm gadījumā $F(p)$ ir telpisks objekts virs Laplasa kompleksās plaknes un vienai p vērtībai var atbilst vairākas $F(p)$ vērtības. Šādās situācijās (9.15.) nav iespējams vienkāršot un ir $m-1$ reizes jāatvasina funkcija $A(p) = F(p)(p -$

$p_i)^m = (F_1(p)/F_2(p))(p - p_i)^m$. Parādītās funkcijas atvasinājumi palīdz iegūt, ka i -tajai m -tās kārtas saknei [12], [82], [95]:

$$\text{Res}_{p_i}(F_1(p)e^{pt}/F_2(p)) = e^{p_i t} \sum_{k=1}^{m_i} (t^{m_i-k} A^{k-1}(p_i)/[(m_i - k)! (k - 1)!]), \quad (9.18.)$$

un vairāku m -tās kārtas sakņu gadījumā oriģinālā funkcija $f(t)$ nosakāma, saskaitot ar (9.18.) iegūtos rezīdijus atbilstoši (9.14.) [12], [82], [95]:

$$\begin{aligned} f(t) &= L^{-1}[F_1(p)/F_2(p)] = \sum_{i=1}^n [\text{Res}_{p_i}(F_1(p)e^{pt}/F_2(p))] = \\ &= \sum_{i=1}^n [e^{p_i t} \sum_{k=1}^{m_i} (t^{m_i-k} A^{k-1}(p_i)/[(m_i - k)! (k - 1)!]), \end{aligned} \quad (9.19.)$$

kur $A^{k-1}(p_i)$ – funkcijas $A(p)$ $k - 1$ kārtas atvasinājums [82], [95].

Bez vispārīga risinājuma vienkāršām saknēm ar (9.17.) un universāla risinājuma, kas aplūko augstākās kārtas saknes ar (9.19.), ir iespējams izmantot arī 9.1. tabulas formulas un Laplasa transformācijas īpašības, ja izdodas pārveidot funkcijas attēlu $F(p)$ tipveida funkciju formā, jo vienai oriģināla funkcijai atbilst tikai viens attēls un otrādi. Iespējams parādīt arī atsevišķas gatavās analītiskās formulas, kuras paredzētas apgrieztai Laplasa transformācijai un kuras nav dotas 9.1. tabulā (9.2. tabula).

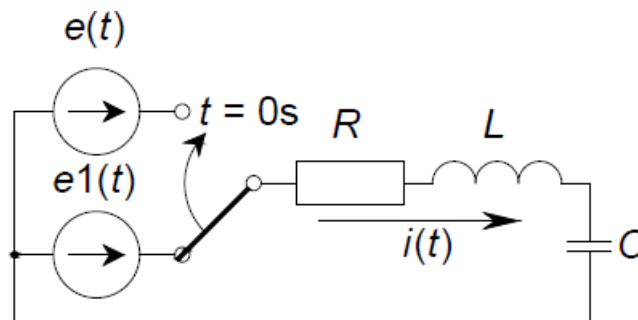
9.2. tabula

Apgrieztai Laplasa transformācijai bieži lietotās formulas [73], [82]

Attēls Laplasa telpā $F(p)$	Oriģinālā funkcija $f(t)$
$n!/p^{n+1}$	t^n
$a^2/(p^2(p + a))$	$at - (1 - e^{-at})$
$1/(p(p + a_1)(p + a_2))$	$(1/a_1 a_2) + (a_1 e^{-a_2 t} - a_2 e^{-a_1 t})/[a_1 a_2 (a_2 - a_1)]$
$1/((p + a_1)(p + a_2))$	$(e^{-a_1 t} - e^{-a_2 t})/(a_2 - a_1)$
$p/((p + a_1)(p + a_2))$	$(a_2 e^{-a_2 t} - a_1 e^{-a_1 t})/(a_2 - a_1)$
$1/(p((p + a)^2 - b^2))$	$[1 - (\text{ch}(bt) + (a/b) \text{sh}(bt) e^{-at})]/(a^2 + b^2)$
$p/(p((p + a)^2 - b^2))$	$(1/b) \text{sh}(bt) e^{-at}$
$p^2/(p((p + a)^2 - b^2))$	$(\text{ch}(bt) - (a/b) \text{sh}(bt))e^{-at}$
$1/(p((p + a)^2 + b^2))$	$[1 - (\cos(bt) + (a/b) \sin(bt) e^{-at})]/(a^2 + b^2)$
$p/(p((p + a)^2 + b^2))$	$(1/b) \sin(bt) e^{-at}$
$p^2/(p((p + a)^2 + b^2))$	$(\cos(bt) - (a/b) \sin(bt))e^{-at}$
$1/(p(p + a)^2)$	$(1 - (1 + at)e^{-at})/a^2$
$p/(p(p + a)^2)$	te^{-at}

Attēls Laplasa telpā $F(p)$	Originālā funkcija $f(t)$
$p^2/(p(p+a)^2)$	$(1-at)e^{-at}$
$p/((p+a)^3)$	$(1-(a/2)t)e^{-at}$
$1/((p+a)^n)$	$e^{-at}t^{n-1}/(n-1)!$
$1/(p(p+a)^n)$	$(1 - e^{-at} \sum_{i=0}^{n-1} [(at)^i/i!])/a^n, n > 0$
$p^n/((p+a)^{n+1})$	$e^{-at} \sum_{i=0}^n [n!(-a)^i t^i / (n-i)! (i!)^2], n > 0$
$1/(p(p^2+a^2))$	$(1 - \cos(at))/a^2$

Turpinājumā aplūkosim, kā augstāk izklāstītā Laplasa transformācijas teorija lietojama elektrisko ķēžu pārejas procesu aprēķiniem. Šim nolūkam izmantosim ķēdi ar aizvietošanas shēmās bieži izmantojamajiem shēmu elementiem – aktīvo pretestību, induktivitāti un kapacitāti – pārejas procesa ar nenulles sākuma nosacījumiem analīzei. Minētais pārejas process būs RLC ķēdes pārslēgšana no viena laikā mainīga EDS avota $e_1(t)$ uz citu laikā mainīgu EDS avotu $e(t)$ (9.1. att.).



9.1. att. RLC ķēdes pārslēgšana no viena laikā mainīga EDS avota uz citu [73], [96].

Atbilstoši otrajam Kirhofa likumam var uzrakstīt diferenciālvienādojumu momentānām vērtībām

$t \geq 0$ s [73], [96]:

$$\begin{aligned} e(t) &= Ri(t) + (Ldi(t)/dt) + (1/C) \int i(t)dt = \\ &= Ri(t) + (Ldi(t)/dt) + (1/C) \int_0^t i(t)dt + u_C(0), \end{aligned} \quad (9.20.)$$

kur $e(t)$ – laikā mainīgs EDS avots, V;

R – RLC ķēdes aktīvā pretestība, Ω ;

L – RLC ķēdes induktivitāte, H;

C – RLC ķēdes kapacitāte, F;

$u_C(0)$ – kondensatora sprieguma momentānā vērtība tieši pirms komutācijas ($t < 0$ s), V.

Balstoties uz Laplasa transformācijas linearitāti, funkcijas atvasinājuma un integrāļa transformāciju, ir iespējams iegūt vienādojuma (9.20.) attēlu Laplasa telpā [73], [96]:

$$E(p) = RI(p) + pLI(p) - Li_L(0) + (I(p)/pC) + u_C(0)/p, \quad (9.21.)$$

kur $E(p)$, $I(p) - e(t)$ un $i(t)$ attēli Laplasa telpā;

$i_L(0)$ – induktivitātē plūstošā strāva tieši pirms komutācijas, A.

No vienādojuma (9.21.) var izteikt strāvas attēlu [73], [82]:

$$I(p) = \frac{E(p) + Li_L(0) - u_C(0)/p}{R + pL + (1/pC)} = \frac{E_\Sigma(p)}{Z_\Sigma(p)}, \quad (9.22.)$$

kur $E_\Sigma(p)$ – aizvietošanas shēmas Laplasa telpā summārais EDS;

$Z_\Sigma(p)$ – aizvietošanas shēmas Laplasa telpā summārā pretestība.

Redzams, ka vienādojumi (9.21.) un (9.22.) ir algebriski un salīdzinoši vienkāršāki nekā diferenciālvienādojums (9.20.). Līdzīgi var pierādīt, ka Laplasa telpā RLC shēmas elementu paralēlslēgumam pieslēdzot spriegumu [73], [82]:

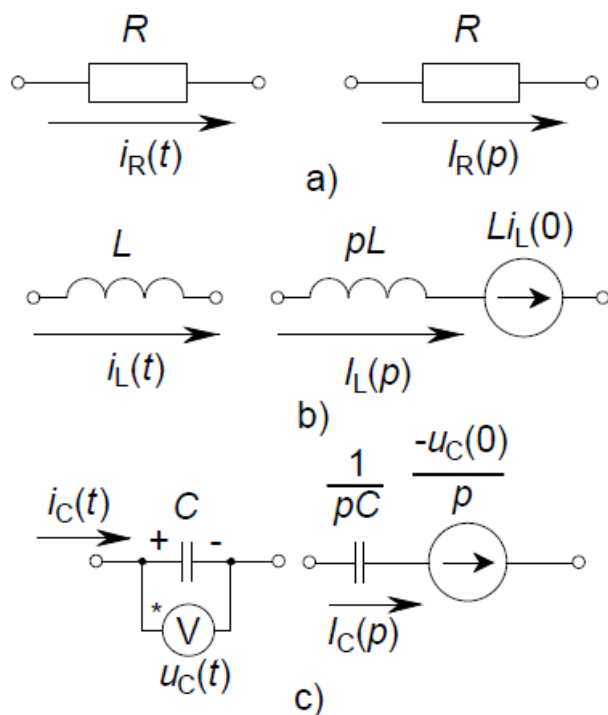
$$I(p) = U(p) \left((1/R) + (1/pL) + pC \right) = U(p) Y_\Sigma(p), \quad (9.23.)$$

kur $U(p)$ – RLC shēmas elementu paralēlslēgumam pieslēgtā sprieguma attēls Laplasa telpā;

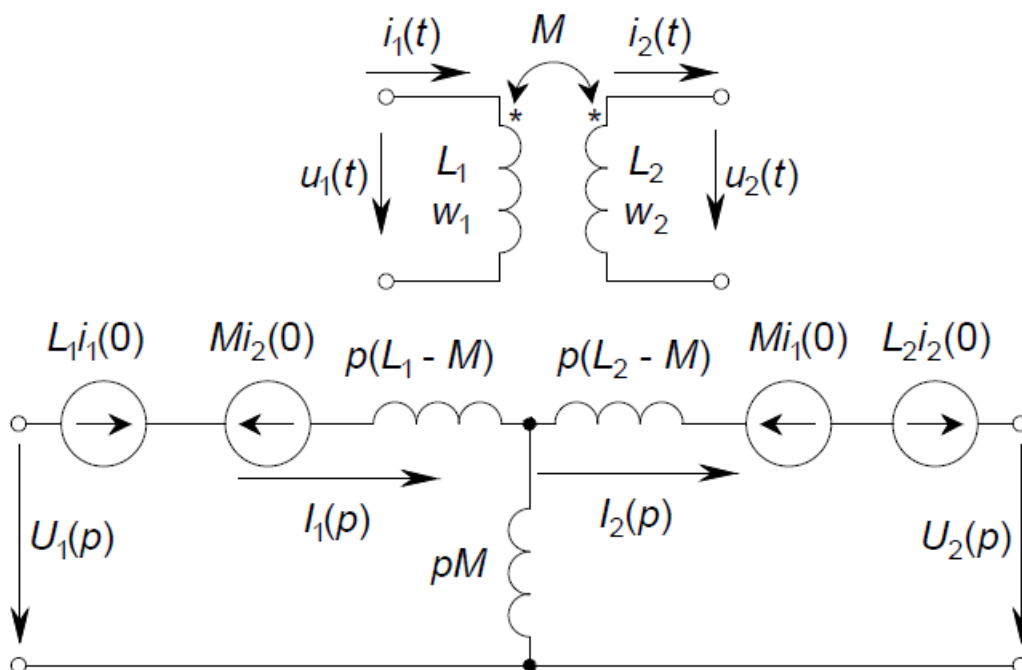
$Y_\Sigma(p)$ – aizvietošanas shēmas Laplasa telpā summārā vadītspēja.

Vienādojumi (9.21.), (9.22.) un (9.23.) parāda, ka Kirhofa un Oma likumi ir spēkā gan oriģināliem, gan attēliem, bet jāņem vērā, ka $E(p)$ un $I(p)$ ir kompleksā mainīgā $p = c + j\omega$ funkcijas, bet pretestības un vadītspējas, kuras veido $Z_\Sigma(p)$ un $Y_\Sigma(p)$, ir noteiktas pie kompleksas leņķiskās frekvences $p = c + j\omega$ [73], [96].

Vienkāršu aizvietošanas shēmu gadījumā parādītā darbību secība, kurā vispirms uzraksta shēmas diferenciālvienādojumus, tad tos transformē uz Laplasa telpu, atrisina iegūtos algebriskos vienādojumus un beigās nepieciešamā parametra attēlu transformē atpakaļ uz oriģinālu ar apgrieztās Laplasa transformācijas palīdzību, aizņem salīdzinoši maz laika. Sarežģītāku aizvietošanas shēmu gadījumā lietderīgāk uzreiz pāriet pie šo shēmu ekvivalentiem Laplasa telpā. Vienādojumi (9.22.) un (9.23.) parāda arī to, kādas pretestības Laplasa telpā atbilst aktīvajai pretestībai, induktivitātei un kapacitātei. Turklāt (9.22.) parāda, ka induktivitātei pirmskomutācijas režīmu ievēro ar papildu EDS avotu $Li_L(0)$, kura vērtību nosaka tajā plūstošā strāva pirms komutācijas un induktivitātes lielums, bet kapacitātei ar papildu EDS avotu $-u_C(0)/p$, ko nosaka spriegums uz kapacitātes pirms komutācijas. Balstoties uz šiem secinājumiem, iespējams parādīt elektriskās ķēdes elementu ekvivalentus Laplasa telpā pie nenulles sākuma nosacījumiem (9.2. att.). Ja pirms komutācijas ķēdē neplūda strāva un nebija sprieguma uz kapacitātēm, to aizvietošana Laplasa telpā nedaudz vienkāršosies, salīdzinot ar 9.2. attēlā parādīto, jo nevajadzēs iekļaut virknē slēgtos EDS avotus $Li_L(0)$ un $-u_C(0)/p$, t. i., paliktu vienīgi pretestību ekvivalenti pL un $1/pC$. Induktīvo elementu, kurus saista mijinduktivitāte, aizvietošanu Laplasa telpā var veikt, mijinduktivitāti ievērojot pretestību matricā Z (nediagonāles elementi) vai ar ekvivalentās ķēdes palīdzību (9.3. att.) [82].

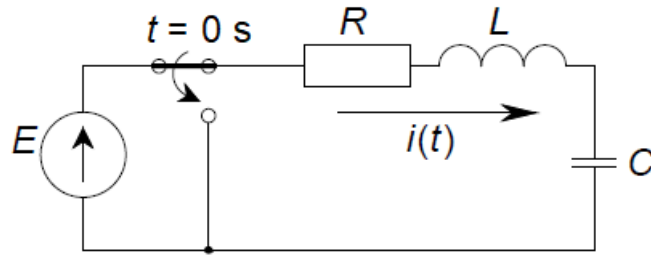


9.2. att. Aktīvās pretestības a), induktivitātes b) un kapacitātes c) ekvivalenti Laplasa telpā pārejas procesu analīzei ar nenulles sākuma nosacījumiem [73], [96].



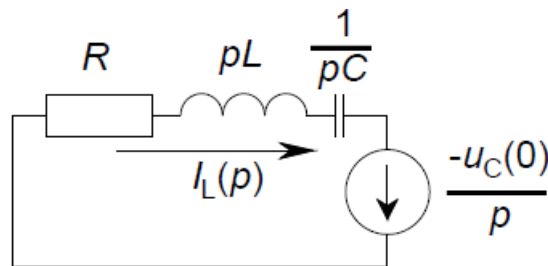
9.3. att. Ar mijinduktivitāti saistītu elementu ekvivalents Laplasa telpā pārejas procesu analīzei ar nenulles sākuma nosacījumiem [73], [96].

Nelielam analītiska risinājuma piemēram aplūkosim kondensatora izlādi RLC kontūrā (9.4. att.), pārslēdzoties no DC EDS avota uz kontūru noslēdzošu savienojumu.



9.4. att. Kondensatora izlādes RLC kontūrā analīzes shēma [73].

Parādītajā ķēdē pirms komutācijas strāva neplūst ($i(t < 0) = 0$ A) uzlādētā kondensatora C dēļ, kā rezultātā kondensatora spriegums atbilst EDS vērtībai $u_C(0) = E$. Balstoties uz 9.2. attēlā parādītajiem aizvietošanas principiem, iespējams izveidot 9.4. attēlā redzamās shēmas ekvivalentu Laplasa telpā (9.5. att.).



9.5. att. Kondensatora izlādes RLC kontūrā aizvietošanas shēma Laplasa telpā [73].

9.5. attēlā parādītajai shēmai iespējams uzrakstīt otro Kirhofa likumu analogiski (9.21.) [73]:
 $0 = RI(p) + pLI(p) + (I(p)/pC) - u_C(0)/p$.

No šī vienādojuma izsakot strāvas attēlu un reizinot šī attēla saucēju un skaitītāju ar komplekso mainīgo p , iegūst izteiksmi:

$$I(p) = u_C(0)/(p^2L + pR + 1/C) = EF_1(p)/F_2(p).$$

Tālāk, lai lietotu (9.17.), jānosaka $F_2(p) = p^2L + pR + 1/C$ atvasinājums un jāatrod saknes vienādojumam $F_2(p) = 0$:

$$F_2'(p) = 2Lp + R,$$

$$p_1 = \frac{-R + \sqrt{R^2 - 4L/C}}{2L},$$

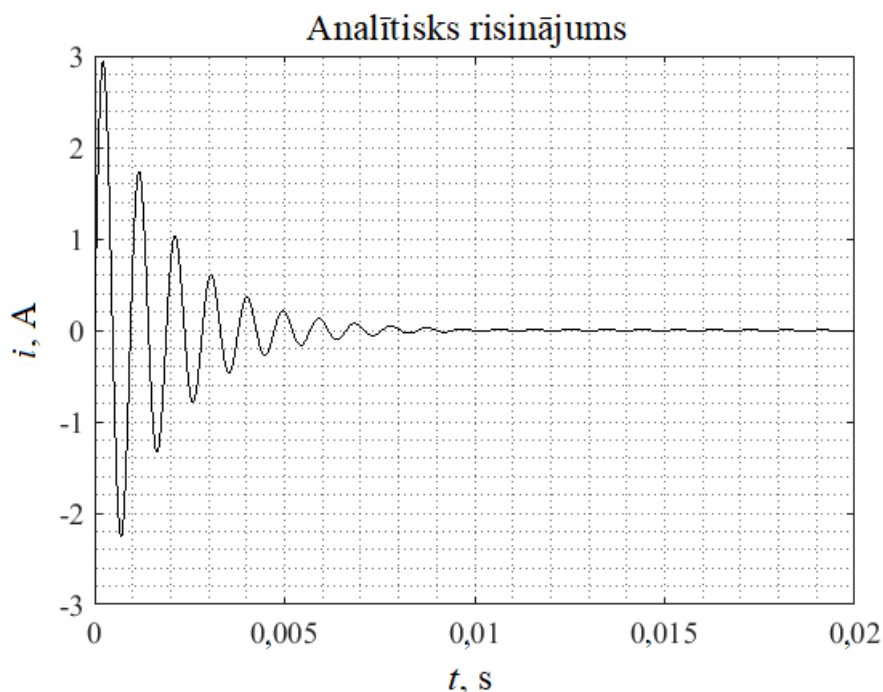
$$p_2 = \frac{-R - \sqrt{R^2 - 4L/C}}{2L}.$$

Lietojot vienādojumu (9.17.), iespējams izteikt strāvas attēla $I(p)$ oriģinālu:

$$\begin{aligned} i(t) &= E \sum_{i=1}^2 [(F_1(p_i)e^{p_i t})/F_2'(p_i)] = E \sum_{i=1}^2 [e^{p_i t}/(2Lp_i + R)] = \\ &= E \left[\frac{e^{p_1 t}}{2L\left(\frac{-R + \sqrt{R^2 - 4L/C}}{2L}\right) + R} + \frac{e^{p_2 t}}{2L\left(\frac{-R - \sqrt{R^2 - 4L/C}}{2L}\right) + R} \right] = E[e^{p_1 t} - e^{p_2 t}]/K, \end{aligned}$$

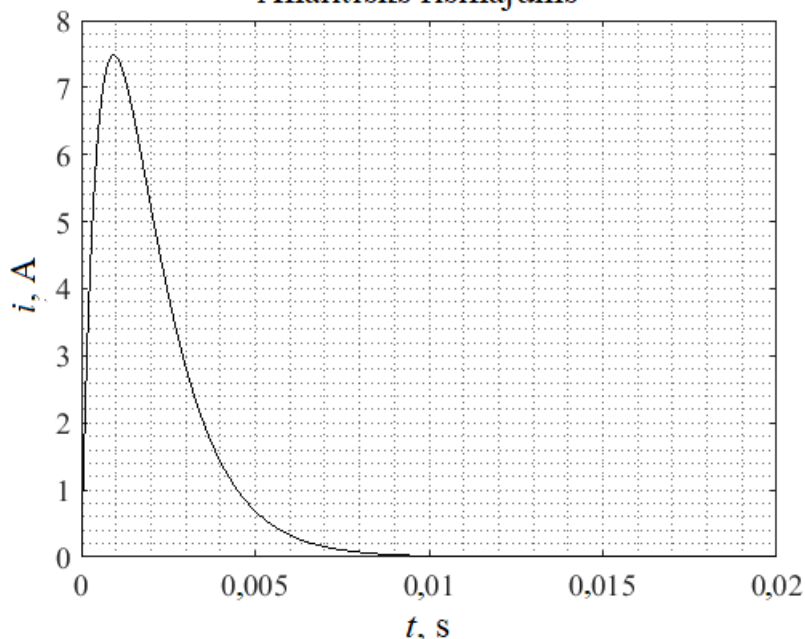
kur K – vienkāršošanas procesā iegūta konstante: $K = \sqrt{R^2 - 4L/C}$.

No [73] veiktās RLC kontūra analīzes zināms, ka parādītajam pārejas procesam iespējams rimstošu sinusoidālu svārstību raksturs, ja $R < 2\sqrt{L/C}$, un aperiodisks raksturs, ja $R > 2\sqrt{L/C}$. Minētajā analīzē arī parādīts, ka svārstību režīmā, strāvas brīvo svārstību leņķiskā frekvence būs $\omega = \sqrt{(1/LC) - (R^2/(4L^2))}$, bet amplitūda būs $i_M = u_C(0)/\omega L$. Savukārt svārstību rimšanas eksponentes laika konstante būs $T = R/(2L)$. Analītiski iegūtās formulas pārbaudei aplūkosim strāvas momentāno vērtību grafiku, ja $E = u_C(0) = 100$ V, $R = 5$ Ω , $L = 4,5 \cdot 10^{-3}$ H, $C = 5 \cdot 10^{-6}$ F. Atbilstoši iepriekš parādītajam kritērijam var noteikt, ka sagaidāms brīvo svārstību režīms. No iepriekš tekstā parādītās formulas iegūstama leņķiskā frekvence $\omega \approx 6643,5$ rad/s, strāvas svārstību frekvence $f = \omega/2\pi \approx 1,057$ kHz, svārstību amplitūda $i_M \approx 3,3$ A un rimšanas laika konstante $T \approx 1,8$ ms, t. i., pārejas procesam jānorimst aptuveni 5,4 ms. Šim scenārijam tika aprēķinātas šādas sakņu un koeficienta K vērtības: $p_1 = -555,56 + j6643,5$, $p_2 = -555,56 - j6643,5$, $K = 0 + j59,791$. Izmantojot strāvas $i(t)$ formulu, iegūtais strāvas momentāno vērtību grafiks parādīts 9.6. attēlā. No šī grafika redzams, ka pirmā strāvas lēciena amplitūda ir tuva teorijā norādītajai, ka svārstību periods ir aptuveni $T_{sv} \approx 0,95$ ms un atbilstošā svārstību frekvence ir $f_{sv} = 1/T_{sv} \approx 1,053$ kHz. Iespējams aplūkot arī kondensatora izlādi aperiodiskas rimšanas gadījumā. Atbilstoši iepriekš dotajam nosacījumam aperiodisks izlādes režīms sagaidāms, ja tiks pieņemtas RLC ķēdes parametru vērtības: $R = 10$ Ω , $L = 4,5 \cdot 10^{-3}$ H, $C = 2 \cdot 10^{-4}$ F. Izmantojot šīs vērtības iegūstamas sakņu un koeficienta K vērtības: $p_1 = -759,75$, $p_2 = -1462,5$, $K = 3,16$. Ar analītisko formulu iegūtais grafiks parādīts 9.7. attēlā. Abi iegūtie grafiki labi parāda, ka induktivitāte novērsusi momentānu strāvas lēcieni pārejas procesa sākumā.



9.6. att. RLC kontūra strāvas stipruma grafiks, kondensatoram izlādējoties svārstību režīmā.

Analītisks risinājums



9.7. att. RLC kontūra strāvas stipruma grafiks, kondensatoram izlādējoties aperiodiskā režīmā.

Aplūkojot pārejas procesu analīzi, vēl jāatgādina par komutācijas likumiem. Pirmais komutācijas likums nosaka, ka **magnētiskās plūsmas saķēdējums Ψ nevar mainīties lēcienveidīgi**, un, tā kā $\Psi = Li_L$, kur induktivitāte visbiežāk ir konstanta, parasti izmanto modificētu nosacījumu, ka **induktīvā elementā plūstošās strāvas stiprums nevar mainīties lēcienveidīgi**. Otrais komutācijas likums nosaka, ka **elektriskais lādiņš q nevar mainīties lēcienveidīgi**, un, tā kā $q = Cu_C$, kur kapacitāte visbiežāk ir konstanta, tad parasti lieto izmainītu nosacījumu, ka **spriegums uz kapacitātes nevar mainīties lēcienveidīgi**. Jāatzīmē, ka ideāliem R, L un C elementiem pieļaujamas lēcienveidīgas strāvas izmaiņas aktīvajās pretestībās un kapacitātēs un lēcienveidīgas sprieguma izmaiņas aktīvajās pretestībās un induktivitātēs [73], [82], [96]. Induktīvos elementos plūstošo strāvu stiprumu un kapacitatīvo elementu spriegumu vērtību atainošanai tieši pirms komutācijas lieto apzīmējumus $i_L(0-)$ un $u_C(0-)$. Principā tās ir vērtības pie $t = 0$ s, kuras nosakāmas, pieņemot, ka komutācija vispār nav notikusi. Pēckomutācijas vērtībām lieto apzīmējumus $i_L(0)$, $u_C(0)$ vai $i_L(+0)$, $u_C(+0)$. Attiecīgi pirmo un otro komutācijas likumu iespējams parādīt formā [73], [82], [96]:

$$\begin{cases} i_L(0-) = i_L(0), \\ u_C(0-) = u_C(0), \end{cases} \quad (9.24.)$$

kur $i_L(0-)$, $i_L(0)$ – induktivitātē plūstošās strāvas stipruma momentānā vērtība tieši pirms komutācijas un uzreiz pēc komutācijas, A;
 $u_C(0-)$, $u_C(0)$ – kapacitatīvā elementa sprieguma momentānā vērtība tieši pirms komutācijas un uzreiz pēc komutācijas, V.

Šajā darbā SKM aprēķini, tāpat kā izklāstītie pārejas procesu aprēķini, aplūko lineāras ķēdes, kuru pārejas procesu aprēķini vispārīgi ved pie lineāru nehomogēnu diferenciālvienādojumu sistēmām. Kā piemēru var minēt vienādojumu (9.20.). Tas pēc

diferencēšanas kļūst par otrās kārtas diferenciālvienādojumu, kura atrisinājums sastāv no divām sastāvdaļām: homogēnā un partikulārā atrisinājuma. Partikulāro atrisinājumu nosaka vienādojuma kreisajā pusē esošais EDS avots, tādēļ elektrotehnikā to mēdz saukt arī par uzspiesto komponenti (vai citur arī par periodisko komponenti AC tīklu aprēķinos) un stacionāro režīmu pēc pārejas procesa – par uzspiesto režīmu. Savukārt homogēno sastāvdaļu iegūst, atrisinot vienādojumu (9.20.) bez reālajiem avotiem. Šādu ķēdes režīmu uztur vienīgi induktīvajos un kapacitatīvajos elementos uzkrātā magnētiskā lauka enerģija ($W_L = Li_L^2/2$) un elektriskā lauka enerģija ($W_C = Cu_C^2/2$), kura pakāpeniski maina savu vērtību, tādēļ elektrotehnikā to mēdz saukt arī par brīvo komponenti. Parādītā analīze ļauj aplūkot pārejas procesu laikam $t \geq 0$ s kā divu sastāvdaļu summu un pārveidot (9.24.) formā [73], [82], [96]:

$$\begin{cases} i_L(0-) = i_L(0) = i_{Lbr}(0) + i_{Luz}(0), \\ u_C(0-) = u_C(0) = u_{Cbr}(0) + u_{Cuz}(0), \end{cases} \quad (9.25.)$$

kur $i_{Lbr}(0)$, $i_{Luz}(0)$ – induktīvā elementā plūstošās strāvas brīvā un uzspiestā komponente $t \geq 0$ s, A;
 $u_{Cbr}(0)$, $u_{Cuz}(0)$ – kapacitatīvā elementa sprieguma brīvā un uzspiestā komponente $t \geq 0$ s, V.

Vienādojumu sistēma (9.25.) dod iespēju izteikt induktīvo elementu strāvu un kapacitatīvo elementu spriegumu brīvo sastāvdaļu momentānās vērtības komutācijas brīdī $t = 0$ s [73], [82], [96]:

$$\begin{cases} i_{Lbr}(0) = i_L(0-) - i_{Luz}(0), \\ u_{Cbr}(0) = u_C(0-) - u_{Cuz}(0). \end{cases} \quad (9.26.)$$

Bojājumu aprēķiniem parasti ar pirmskomutācijas vērtībām var saprast slodzes vai cita pirmsavārijas režīma parametru momentānās vērtības, bet ar uzspiestās komponentes vērtībām saprotamas stacionārā bojājuma režīma parametru vērtības pēc pārejas procesa. Abu stacionāro režīmu parametru aprēķinu metodikas tika izklāstītas iepriekšējās nodaļās. Grāmatā [82] parādīts, ka iespējams veikt atsevišķu shēmas brīvās komponentes parametru aprēķinu Laplasa telpā, izmantojot ar (9.26.) iegūstamās induktīvo elementu strāvu un kapacitatīvo elementu spriegumu brīvo sastāvdaļu vērtības 9.2. un 9.3. attēla ekvivalentos.

9.2. Skaitliska apgrieztā Laplasa transformācija ar izvedumu Furjē rindā

Hevisaida piedāvāto rezīdiju metodi, kas tika parādīta iepriekšējā apakšnodaļā, var lietot oriģināla $f(t)$ noteikšanai no zināma attēla Laplasa telpā $F(p)$, bet vispirms ir jāatrisina iegūtais raksturīgais vienādojums un jāpārveido $F(p)$ par polinomu attiecību. Tādu vienkāršu uzdevumu kā kondensatora izlāde RLC kontūrā risināšanai šāda metode ir salīdzinoši viegla, bet, pieaugot shēmas neatkarīgo kontūru skaitam un atbilstoši arī brīvo sastāvdaļu skaitam, šāds uzdevuma analītiskais risinājums var kļūt ļoti sarežģīts. Viens no iespējamajiem risinājumiem apgrieztās Laplasa transformācijas realizācijai, ir izmantot izvedumu Furjē rindā [97], [98]. Minētā metode ļauj noteikt oriģinālu $f(t)$, izmantojot zināmas attēla $F(p)$ vērtības vienmērīgi sadalītām reālas ass vērtībām. Pieņemsim, ka funkcijas attēlam $F(p)$, kurš eksistē, ja

$\text{Re}(p) = c > 0$, pastāv oriģināls $f(t)$. Papildus tiek pieņemts, ka $f(0) = 0$. Laplasa transformācijas vienādojumā (9.1.) veiksīm aizvietošanu, ieviešot jaunu mainīgo x [97], [98]:

$$e^{-\sigma t} = \cos(x), \quad (9.27.)$$

no kurienes iegūstams, ka laiku kā mainīgo var aizvietot ar šādu naturālo logaritmu [97], [98]:

$$t = -\ln(\cos(x))/\sigma, \quad (9.28.)$$

Turpinājumā iespējams aizstāt meklējamo funkcijas oriģinālu ar funkciju no (9.27.) ievestā mainīgā $\phi(x)$ [97], [98]:

$$f(t) = f(-\ln(\cos(x))/\sigma) = \phi(x), \quad 0 \leq x \leq \pi/2, \quad (9.29.)$$

kur σ – pozitīvs, reāls skaitlis, kura vērtību atbilstoši literatūrā dotajai teorijai [97], [98] var brīvi pieņemt.

Tomēr, veicot praktiskus metodes izmēģinājumus, novērots, ka iegūtā oriģināla funkcijas $f(t)$ grafika forma ir atkarīga no pieņemtās σ vērtības. No veiktajiem algoritma testiem novērots, ka ir izdevīgi izvēlēties σ vērtību šādi:

$$\sigma \approx K_\sigma \pi / (2T_{\max}), \quad (9.30.)$$

kur T_{\max} – simulācijas laiks jeb laiks, kuram tiks aprēķinātas $f(t)$ vērtības, s;

K_σ – proporcionalitātes koeficients, kura vērtības visbiežāk var brīvi pieņemt intervālā 1–10 (svārstību procesiem ieteicama lielāka vērtība).

Nākamais solis ir integrālī (9.1.) aizstāt integrēšanas mainīgo laiku t ar mainīgo x [97], [98]:

$$dt = \sin(x)/\sigma \cos(x) dx. \quad (9.31.)$$

Ievietojot (9.28.) un (9.31.) integrālī (9.1.) un aizstājot robežu $t = 0$ s ar $x = 0$ rad, $t = \infty$ s ar $x = \pi/2$ rad, iespējams iegūt Laplasa transformāciju formā [97], [98]:

$$F(p) = (1/\sigma) \int_0^{\pi/2} (\cos(x))^{(p/\sigma)-1} \sin(x) \phi(x) dx. \quad (9.32.)$$

Funkciju $\phi(x)$ iespējams izvest Furjē rindā [97], [98]:

$$\phi(x) = \sum_{k=0}^{\infty} S_k \sin((2k+1)x), \quad (9.33.)$$

kur S_k – Furjē rindas koeficienti.

Minēto Furjē rindas koeficientu vērtības nosakāmas šādi [99]:

$$S_k = (4/\pi) \int_0^{\pi/2} \phi(x) \sin((2k+1)x) dx. \quad (9.34.)$$

Furjē rindas koeficientus S_k iespējams izteikt arī no attēla $F(p)$ vērtībām vienmērīgi pa reālo asi sadalītiem punktiem [97], [98]:

$$p_m = (2m+1)\sigma, \quad m = 1, \dots, \infty. \quad (9.35.)$$

Ievietojot (9.35.) vienādojumā (9.32.), iegūst [97], [98]:

$$\sigma F((2m+1)\sigma) = \int_0^{\pi/2} (\cos(x))^{2m} \sin(x) \phi(x) dx. \quad (9.36.)$$

Vienādojuma (9.36.) integrāļa kodolu iespējams aizstāt ar funkciju $\sin((2m+1)x)$ lineārām kombinācijām [97], [98]:

$$(\cos(x))^{2m} \sin(x) = 2^{-2m} \sum_{i=0}^m \left(\binom{2m}{i} - \binom{2m}{i-1} \right) \sin((2(m-i)+1)x), \quad (9.37.)$$

kur $\binom{2m}{i} = (2m)!/(i!(2m-i)!)$ – kombinācijas no $2m$ pa i un $\binom{2m}{-1} = 0$.

Izmantojot (9.33.), (9.37.) un ievērojot to, ka

$$\int_0^{\pi/2} \sin((2\alpha+1)x) \sin((2\beta+1)x) dx = \begin{cases} 0, & \text{ja } \alpha \neq \beta \\ \pi/4, & \text{ja } \alpha = \beta \end{cases} \quad (9.38.)$$

un ka konkrētai m vērtībai Furjē rindas locekļi būs atšķirīgi no nulles, ja $\beta = m - i$ ($i = 0, 1, 2, \dots, m$), iespējams pārveidot vienādojumu (9.36.) [97], [98]:

$$F((2m+1)\sigma) = (2^{-2m}\pi/4\sigma) \sum_{i=0}^m \left(\binom{2m}{i} - \binom{2m}{i-1} \right) S_{m-i}. \quad (9.39.)$$

Ērtībai (9.39.) var pārveidot citā formā [97], [98]:

$$\sum_{i=0}^m \left(\binom{2m}{i} - \binom{2m}{i-1} \right) S_{m-i} = 4^{m+1} \sigma F((2m+1)\sigma)/\pi. \quad (9.40.)$$

Izmantojot (9.40.) dažādām m vērtībām, ir iespējams sastādīt vienādojumu sistēmu Furjē rindas koeficientu $S_0 - S_m$ aprēķinam [97], [98]:

- aprēķina mezglam $m = 0$: $S_0 = 4\sigma F(\sigma)/\pi$;
- aprēķina mezglam $m = 1$: $S_0 + S_1 = 4^2\sigma F(3\sigma)/\pi$;
- aprēķina mezglam $m = 2$: $2S_0 + 3S_1 + S_2 = 4^3\sigma F(5\sigma)/\pi$ utt.

Attiecīgi katra nākamā koeficienta S_m atrašanai jāzina visu iepriekšējo koeficientu ($S_0 - S_{m-1}$) vērtības un funkcijas attēla $F(p)$ vērtība punktiem $p = \sigma, 3\sigma, 5\sigma, \dots, (2m-1)\sigma$. Iegūtie koeficienti ļauj noteikt ievesto funkciju $\phi(x)$, izmantojot (9.33.), kas atbilstoši (9.29.) dod funkcijas oriģinālu formā $f(x)$, kurā jāveic (9.28.) parādītajai pretēja aizvietošana. Izpildot minētās darbības un veicot papildu pārveidojumus, iespējams iegūt oriģināla funkciju $f(t)$ ar modificētu Furjē sintēzi [97]–[99]:

$$f(t) = \sum_{i=0}^m [S_i \sin((2i+1)\arccos(e^{-\sigma t}))]. \quad (9.41.)$$

Saprotams, ka bieži nav iespējams garantēt nenulles sākuma nosacījumus ($f(0) = 0$), un tādā gadījumā jāveic aprēķina korekcijas. Vispirms jāiegūst $f(t)$ attēla modificēta versija $f_2(t)$, kurai atbilst $f_2(0) = 0$, no patiesā funkcijas attēla atņemot vērtību $f(0)/p$ jeb $F(p)$ vietā izmantojot $F_2(p) = F(p) - f(0)/p$. Pēc iepriekš aprakstītā aprēķina realizācijas, izmantojot $F_2(p)$, iegūtajam oriģinālam $f_2(t)$ tiek pieskaitīta $f(0)$ vērtība: $f(t) = f_2(t) + f(0)$.

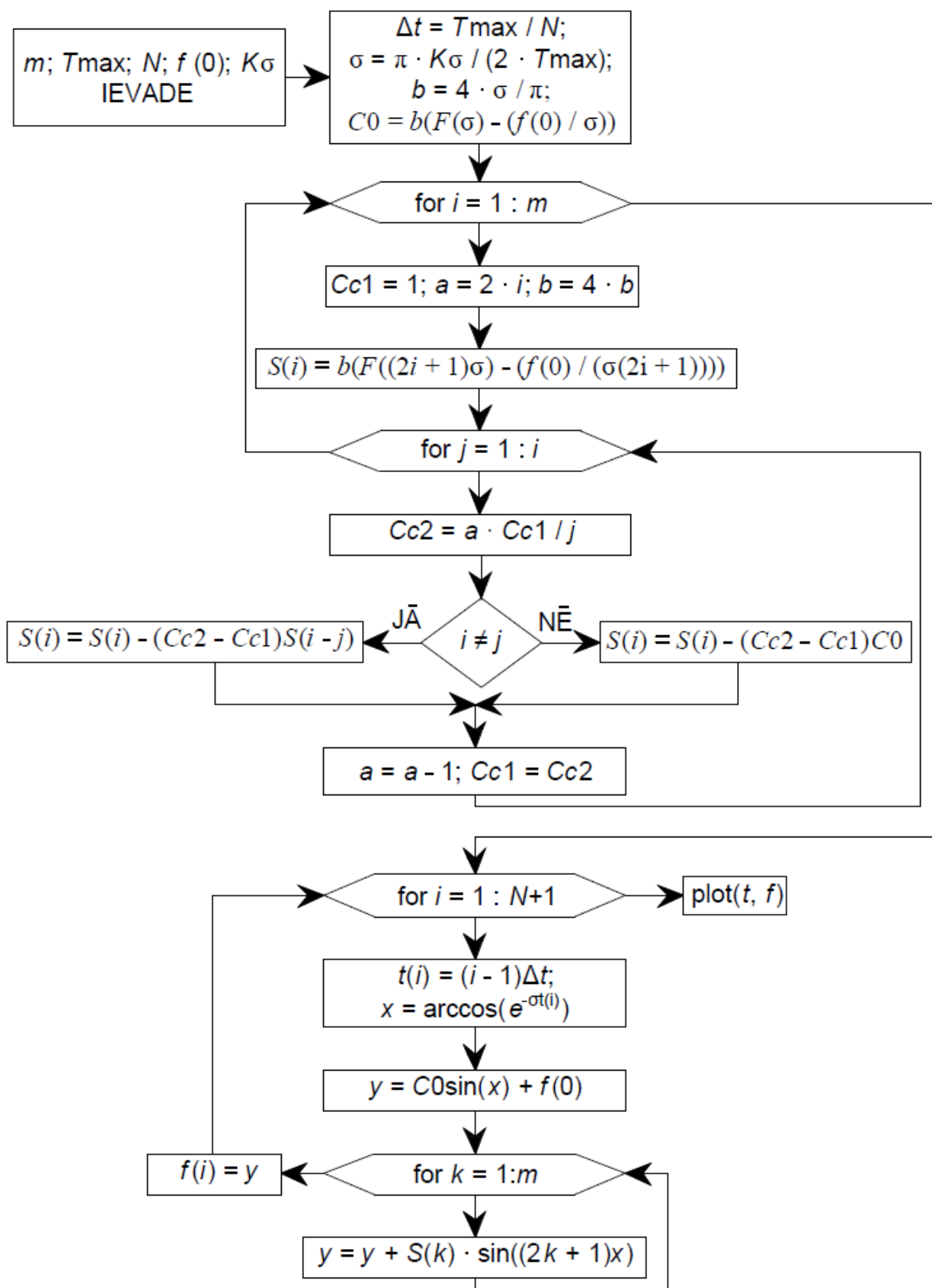
Jāatzīmē arī novērotie aprakstītās metodes ierobežojumi.

1. Aprēķinam izmantoto reālas ass punktu skaits un atbilstošais Furjē rindas koeficientu $\left[\binom{2m}{i} - \binom{2m}{i-1} \right] S_{m-i}$ skaits nosaka oriģināla funkcijas aprēķina precizitāti. Precīzam aprēķinam teorētiski nepieciešams bezgalīgi daudz punktu ($m = 1, \dots, \infty$), bet praktiskos risinājumos m jāpieņem galīgas vērtības. Vēlams izmantot pēc iespējas lielāku aprēķina

punktu skaitu, bet vienlaikus jāievēro, ka elementa $\binom{2m}{i}$ skaitliskā vērtība aug kā faktoriāls no m , un pie ievērojama aprēķina mezglu skaita šī elementa vērtība var pārsniegt datora skaitlisko vērtību robežu ($2^{32} - 1$ vai $2^{64} - 1$), kā rezultātā aprēķina process var kļūt nestabils un iegūtās pārejas procesa līknes kļūda ievērojami pieaug. Šo apsvērumu dēļ ieteicams piesardzīgi izmantot aprēķina punktu skaitu $m > 16$ [98].

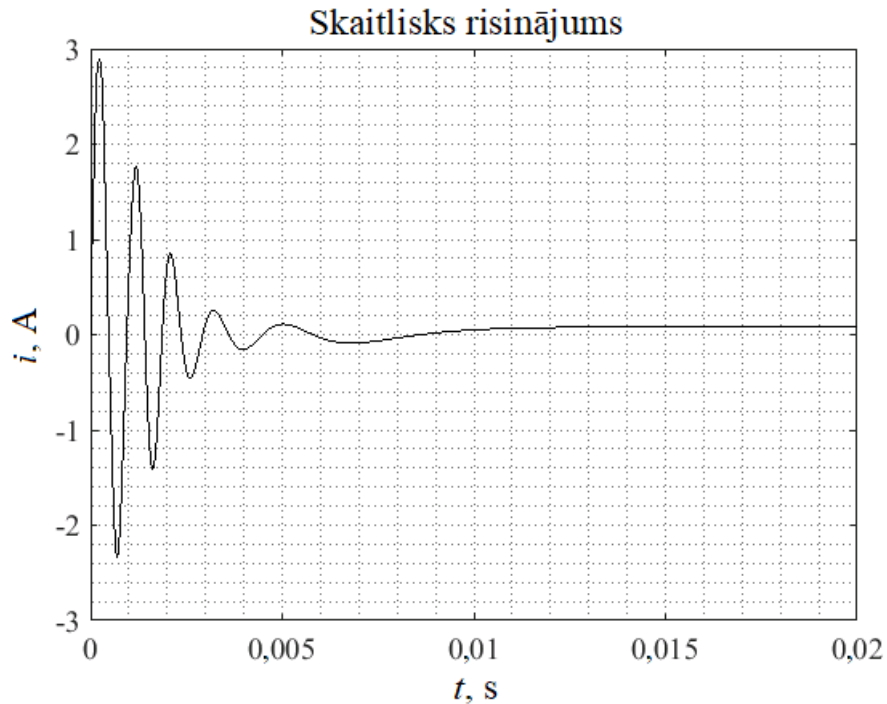
2. Aprakstītajai metodei ir nepieciešams, lai eksistētu attēls $F(p)$ kompleksā mainīgā apgabālā $\text{Re}(p) = c > 0$, ko teorētiski var nodrošināt jebkuram attēlam $F(p)$, ja tā vietā aplūko $F(p + a)$, kur a ir pietiekami liela pozitīva konstante. Šāda pārveidojuma rezultātā faktiski tiks iegūta oriģināla modifikācija $f(t)e^{-at}$, nevis pats funkcijas oriģināls $f(t)$. Noteikums, ka a jābūt pietiekami lielai vērtībai, aprēķinu gaitā noapaļošanas dēļ var novest pie precizitātes zaudēšanas. Precizitātes samazināšanās dēļ rezultātā iegūtais $f(t)$ grafiks var saturēt papildu neparedzētas svārstības. Šādos gadījumos daudz lietderīgāk ir aplūkot sistēmas reakciju uz zināmu tipveida signālu, kas parasti ir ieslēgšanas vai impulsa signāls ($E \cdot 1(t)$ vai $E \cdot \delta(t)$). Tas būtībā ļauj noteikt sistēmas pārvades funkciju ($H(p)$) veidā $H(p)/p$. Patieso pārejas procesu jeb sistēmas reakciju iespējams noteikt, meklējot oriģinālu no pārvades funkcijas un faktiskā ieejas signāla attēla reizinājuma. Kā pārvades funkciju bieži lieto arī sistēmas pretestības attēlu $Z(p)$ vai vadītspējas attēlu $Y(p)$. Šādas metodes aprēķinu procesā parasti lieto Diameļa integrāli [82], [96].
3. Aprēķinu metodes testēšana parādīja, ka tā ir jutīga pret $F((2m + 1)\sigma)$ lieluma dispersiju (skaitliskām kļūdām, veicot $F(p)$ aprēķinu dažādām piešķirtajām $(2m + 1)\sigma$ vērtībām). Novērots, ka dažos gadījumos $F((2m + 1)\sigma)$ aprēķina kļūdas pieaugums pat līdz 10^{-5} – 10^{-6} robežai var radīt aprēķina nestabilitāti un iepriekš minētās svārstības $f(t)$ grafikā.
4. Tā kā metodei ir nosacījums $\text{Re}(p) = c > 0$ jeb attēlam jābūt ar pozitīvo reālo daļu, pastāv gadījumi, piemēram, reakcija uz ideālu sinusoidālu avotu vai nerimstošām svārstībām, kuros risinājuma iegūšana ir apgrūtināta, jo attēls $F(p)$ ir imaginārs. Aprēķinu process zaudē stabilitāti, ko iespējams redzēt kā jau minētās nekontrolējamās papildu svārstības. Tādos gadījumos tiešs risinājums iespējams, lietojot Diameļa integrāli vai citu metodi.

Nākamais solis ir parādīt aprakstītās metodes praktiskajai realizācijai nepieciešamo darbību secību. Principā metodes realizācija sastāv no diviem galvenajiem blokiem: Furjē rindas koeficientu $S_0 - S_m$ aprēķins, atkārtoti veicot attēla funkcijas $F(p)$ vērtību aprēķinu pie vērtībām $p = \sigma, 3\sigma, 5\sigma, \dots, (2m - 1)\sigma$, un oriģināla funkcijas $f(t)$ grafika iegūšana ar Furjē sintēzes palīdzību. Atbilstoša aprēķina algoritma realizācijas blokshēma parādīta 9.8. attēlā.



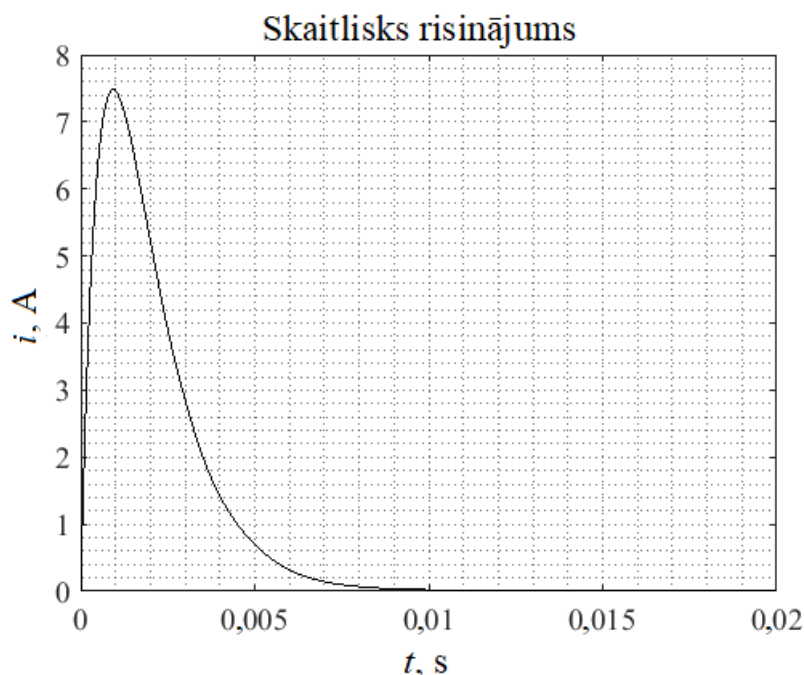
9.8. att. Skaitliskās apgrieztās Laplasa transformācijas ar izvedumu Furjē rindā algoritma blokshēma [97], [98].

9.8. attēlā redzamās blokshēmas realizācijas programmas teksta piemērs parādīts 18. pielikumā. Parādītās skaitliskās apgrieztas Laplasa transformācijas pārbaudei tika izmantots šis algoritms, lai iegūtu 9.6. un 9.7. attēlā aplūkoto piemēru grafikus ar tādiem pašiem shēmas elementu datiem. Svārstību režīmam ($R = 5 \Omega$, $L = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ H}$, $C = 5 \cdot 10^{-6} \text{ F}$) ar aprēķina punktu skaitu $m = 20$ un $K_{\sigma} = 5$ iegūtais svārstību režīma grafiks parādīts 9.9. attēlā.



9.9. att. Skaitliskas apgrieztās Laplasa transformācijas rezultātā iegūtais RLC kontūra strāvas grafiks, kondensatoram izlādējoties svārstību režīmā.

Savukārt aperiodiskas izlādes ($R = 10 \Omega$, $L = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ H}$, $C = 2 \cdot 10^{-4} \text{ F}$) pārejas procesa strāvas grafiks, kas iegūts, izmantojot aprēķina punktu skaitu $m = 16$ un $K_{\sigma} = 5$, parādīts 9.10. attēlā.



9.10. att. Skaitliskas apgrieztās Laplasa transformācijas rezultātā iegūtais RLC kontūra strāvas grafiks, kondensatoram izlādējoties aperiodiskā režīmā.

9.10. attēlā redzams, ka aperiodiskas izlādes grafiks gandrīz ideāli sakrīt ar 9.7. attēlā doto analītiskā risinājuma rezultātā iegūto grafiku. 9.9. attēlā parādītais svārstību grafiks liecina par to, ka attēla imaginārā rakstura dēļ transformācija ir bijusi apgrūtināta, bet ar lielāku aprēķina mezglu skaitu izdevies iegūt strāvas oriģināla grafiku, kas ir līdzīgs 9.6. attēlā redzamajam analītiskā risinājuma rezultātā iegūtajam grafikam. Turklāt pirmajos svārstību periodos $T_{sv} \approx 0,94$ ms un svārstību frekvence ir $f_{sv} = 1/T_{sv} \approx 1,064$ kHz. Kopumā var teikt, ka RLC ķēdes svārstību režīma parametru aprēķini gan ar analītisko paņēmienu, gan ar skaitlisko algoritmu praktiski atbilst teorētisko formulu prognozēm un aperiodisko režīmu grafiku sakrītība rada papildu pārliecību par abu metožu precizitāti.

Neskatoties uz minētajiem trūkumiem, parādīto skaitlisko apgrieztās Laplasa transformācijas metodi iespējams izmantot arī elektrisko sistēmu bojājumu pārejas procesu aprēķinos, ja atdala ar sinusoidāliem avotiem saistītā stacionārā režīma jeb uzspiestās komponentes un brīvās komponentes aprēķinus. Uzspiestās komponentes aprēķins veicams atbilstoši iepriekšējās nodaļās aplūkotajai metodikai, bet brīvās komponentes aprēķinam iespējams lietot iepriekš izklāstīto skaitlisko apgrieztās Laplasa transformācijas metodi, kurai izmantotajā aizvietošanas shēmā ievēro vienīgi induktīvo un kapacitatīvo elementu ievistos EDS avotus (9.2. un 9.3. att.). Minēto EDS avotu vērtību aprēķinam nepieciešamās strāvas stiprumu un spriegumu brīvo komponentu vērtības aprēķināmas ar (9.26.) palīdzību. Sarežģītākām aizvietošanas shēmām $F(p)$ vietā jā sastāda attēlu vienādojumu sistēmas, kuras līdz noteiktai robežai ērti atrisināmas analītiski. Tomēr lielu elektrisko sistēmu un to nesimetrisku bojājumu aizvietošanas shēmām rekomendējams lietot iepriekšējās nodaļās parādītās bojājumu režīmu aizvietošanas shēmas un to režīma parametru topoloģisko risināšanas metodi. Analītisks risinājums, izmantojot komplekso aizvietošanas shēmu, jau ir

demonstrēts [14], bet pilnībā analītisks risinājums sarežģītiem tīkliem ir darbietilpīgs. Nesimetrisku bojājumu gadījumā jāaprēķinās, ka pārejas procesam simetrisko komponentu signālu brīvās komponentes nosakāmas tikai aprēķina fāzei, jo zināmie SKM secību pagriezieni ir spēkā sinusoidāliem signāliem. Attiecīgi no (9.11.) un (9.12.) vienādojumu sistēmas, kurām bojājumu režīmiem bāzes mezgls jeb TS aizvietošanas shēmas neitrāle ir zemēta $U_B = 0$ V un matricas satur skaitliskas vērtības, tiek veikta pāreja uz attēlus saturošām MPM matricām:

$$Y(p) U(p) = I(p) - MZ^{-1}(p)E(p), \quad (9.42.)$$

$$I_Z(p) = Z^{-1}(p)(E(p) + M^T U(p)), \quad (9.43.)$$

kur $U(p)$, $I(p)$ – mezglu spriegumu un strāvas avotu vektoru (U , I) attēli Laplasa telpā;

$Y(p)$ – mezglu vadītspēju matricas (Y) attēls Laplasa telpā;

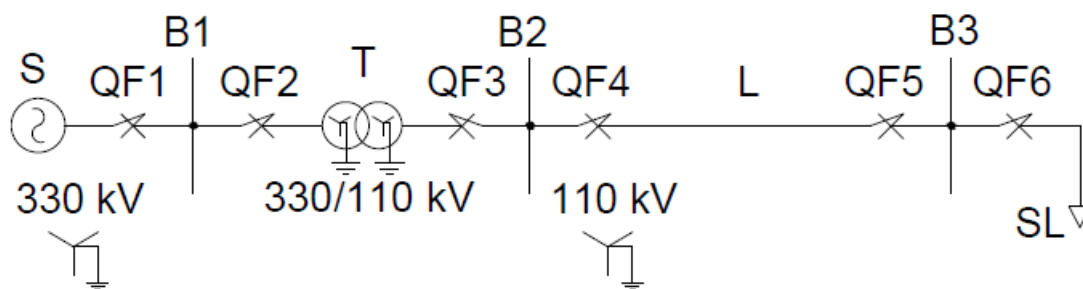
$E(p)$, $Z(p)$ – zaru EDS avotu vektora (E) un tīkla pretestību matricas (Z) attēli Laplasa telpā.

Parādītā pāreja ir vieglāk izpildāma, ja šādu topoloģisko risinājumu matricu formā īsteno kā ārēju funkciju, kurai galvenais apgrieztās Laplasa transformācijas algoritms, nosakot koeficientus $S_0 - S_m$, padod reālas skaitliskās vērtības $p = \sigma, 3\sigma, 5\sigma, \dots, (2m - 1)\sigma$. Šādas ārējās funkcijas realizācija 9.4. apakšnodaļas piemēram parādīta 19. pielikumā. Attiecīgi, vienreiz realizējot skaitliskās apgrieztās Laplasa transformācijas algoritmu atbilstoši parādītajai metodikai un lietojot ārēju attēla $F(p)$ funkciju, var viegli veikt dažādu pārejas procesu aprēķinus, modificējot galvenokārt ārējās funkcijas saturu. Atbilstoši trešajam parādītās metodes trūkumam aprēķinu kļūdas, kuras rodas, realizējot (9.42.) un (9.43.), stipri ietekmēs oriģināla funkcijas noteikšanas precizitāti, tādēļ ieteicams izmantot precīzas iebūvētās vienādojumu sistēmu risināšanas funkcijas vai skaitliskās risināšanas metodes ar paaugstinātu precizitātes robežas iestatījumu. Piedāvātās metodes, kas apvieno skaitlisko apgrieztu Laplasa transformāciju ar topoloģisku brīvās komponentes aprēķinu, piemēri simetriska un nesimetriska bojājuma gadījumā tiks parādīti nākamajās apakšnodaļās.

9.3. Elektriskās sistēmas trīsfāžu īsslēguma pārejas procesa aprēķina realizācijas piemērs ar skaitliskās apgrieztās Laplasa transformācijas lietošanu

Pārejas procesu aprēķini elektriskajās sistēmās bieži nepieciešami, lai novērtētu īsslēgumu trieciensrāvu lielumu un sistēmu stabilitāti. Stabilitātes izvērtēšanai nepieciešams elektromehānisko pārejas procesu aprēķins, kas netiks aplūkots šajā darbā. Trieciensrāvu aprēķins visbiežāk nepieciešams, pārbaudot tīkla elementu dinamisko izturību, un parasti to nosaka, veicot simetriska trīsfāžu īsslēguma režīma parametru aprēķinus, bet vienfāzes īsslēguma strāvas novērtēšana arī var būt nepieciešama, ja īsslēgums rodas aiz transformatora cikcakslēgumā savienotā tinuma.

Pārejas procesu aprēķina piemēram var aplūkot nelielu 110 kV tīklu, kuram iespējams ņemt vērā gan induktīvos, gan kapacitatīvos elementus, lai pārejas procesu aprēķinos varētu aplūkot abu veidu reaktīvos elementus (9.11. att.).



9.11. att. Pārejas procesu aprēķinu piemēra tīkla vienlīnijas shēma.

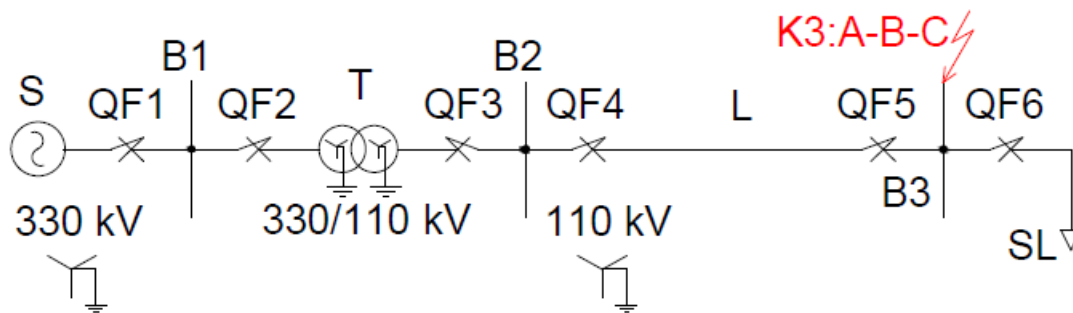
Parādītā tīkla sistēmas S īsslēguma jauda ir pieņemta $S_{KS} = 1200$ MVA, $X/R = 8$, un šajā piemērā sistēmas pretestība pieņemta vienāda visām secībām. Trīs vienfāzes transformatoru grupas T ar slēguma shēmu un grupu Y_0/Y_0-0 nominālā jauda ir pieņemta $S_{NT} = 125$ MVA, īsslēguma spriegums $u_K = 11\%$ un īsslēguma zudumu jauda ir pieņemta $\Delta P_K = 110$ kW. Līnija L pieņemta ar tādiem pašiem parametriem kā L1 10. pielikumā dotajam tīklam, izņemot mijinduktivitāti, jo šeit L ir vienķēdes līnija. Slodžu ekvivalents SL pieņemts kā sastāvošs vienīgi no statistiskām slodzēm ar jaudu $P_{SL} = 40$ MW un $\cos(\varphi_{SL}) = 0,9$. Ņemot vērā, ka šādu tīkla elementu parametru aprēķini pietiekami plaši izskatīti iepriekšējās nodaļās un pielikumos, šim tīklam tiks apkopoti un parādīti jau aprēķinātie aizvietošanas shēmu parametri (9.3. tabula).

9.3. tabula

Pārejas procesu aprēķinu piemēra tīkla elementu aizvietošanas shēmu parametri

Parametrs un mērvienība	Vērtība
$\dot{Z}_S^1 = \dot{Z}_S^2 = \dot{Z}_S^0, \Omega$	$1,37 + j10,94$
\dot{Z}_T, Ω	$0,09 + j10,65$
\dot{Z}_L^1, Ω	$9,4 + j17,18$
\dot{Z}_L^0, Ω	$15,65 + j42,97$
C_L^1, F	$3,25 \cdot 10^{-7}$
C_L^0, F	$1,84 \cdot 10^{-7}$
$\Delta Q_{CL}, Mvar$	1,35
\dot{S}_{SL}, MVA	$40 + j19,37$
\dot{Z}_{SL}, Ω	$267,81 + j129,7$

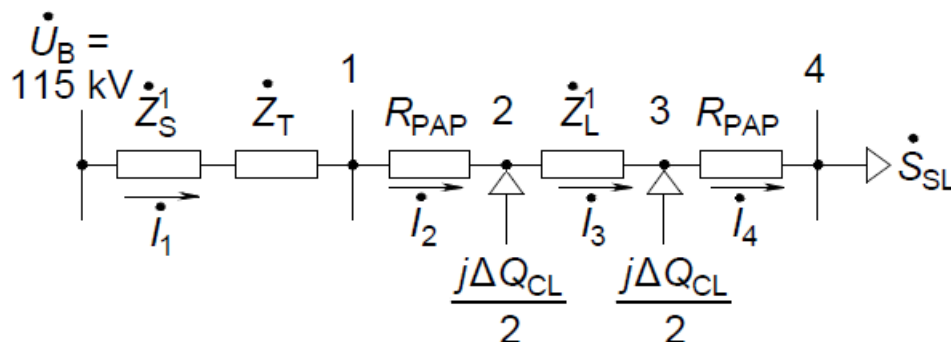
Pirmajā pārejas procesu aprēķinu piemērā izpildāms šāds uzdevums: iegūt QF4 piesaistītās aizsardzības fiksēto fāžu strāvu pārejas procesu grafikus un noteikt to trieciensrāvu vērtības, ja radies simetrisks trīsfāžu īsslēgums uz slodzes kopnēm B3 (9.12. att.) ar pārejas pretestību visās fāzēs $R_K = 1 \Omega$.



9.12. att. Pirmā pārejas procesu aprēķinu piemēra vienlīnijas izejas shēma.

Aprēķins jāveic, pieņemot, ka īsslēguma rašanās brīdī sistēmas A fāzes EDS leņķis ir 0° , t. i., atbilstoši slodzes režīma parametru aprēķina momentam. Līnijas II veida aizvietošanas shēmas realizācijai tiks ieviesta niecīga papildu pretestība $R_{PAP} = 0,001 \Omega$.

Ņemot vērā, ka tīkla aizvietošanas shēma satur induktīvus un kapacitatīvus elementus un ka tīkls pirms bojājuma rašanās darbojies slodzes režīmā, vispirms jāaprēķina šī pirmsavārijas režīma parametri. Tātad ir jānosaka zaru, kas satur induktīvus elementus, strāvu stiprumu momentānās vērtības un mezglu, kuriem aizvietošanas shēmās pieslēgti kapacitatīvi elementi, spriegumu momentānās vērtības. Slodzes režīma aizvietošanas shēma parādīta 9.13. attēlā.



9.13. att. Pārejas procesu aprēķinu piemēra tīkla slodzes režīma aizvietošanas shēma.

Slodzes režīma parametru aprēķinu ceļš šeit netiks sīkāk parādīts, jo tas pietiekami demonstrēts 9.–11. pielikumā. Aprēķinu rezultātā iegūtie mezglu A fāzes spriegumi un A fāzes zaru strāvas parādītas zemāk:

I_z	U
\dot{I}_1 210,79 – j125,90	1 63372 – j4366
\dot{I}_2 210,79 – j125,90 A,	2 63371 – j4365 V.
\dot{I}_3 210,54 – j129,43	3 59166 – j6770
\dot{I}_4 210,11 – j133,18	4 59166 – j6770

Var izdalīt sistēmas un līnijas zaru strāvu stiprumus, kā arī kapacitātēm pieslēgtā 2. un 3. mezgla spriegumu modulūsus un leņķus:

$$\dot{I}_{SA}(-0) = 245,53e^{-j30,85^\circ} \text{ A,}$$

$$\dot{I}_{LA}(-0) = 247,15e^{-j31,58^\circ} \text{ A,}$$

$$\dot{U}_{C1A}(-0) = 63522e^{-j3,94^\circ} \text{ V,}$$

$$\dot{U}_{C2A}(-0) = 59552e^{-j6,53^\circ} \text{ V.}$$

Ņemot vērā, ka īsslēgums rodas $t_{\text{APR}} = 0$ s, kas sakrīt ar slodzes režīma parametru aprēķina brīdi, ir iespējams pāriet uz šo parametru momentānajām vērtībām, gan izmantojot kompleksā skaitļa imagināro daļu, gan izmantojot kompleksā skaitļa moduli un leņķi. Papildus tam jāveic reizinājums ar $\sqrt{2}$, jo iegūtās režīmu parametru kompleksās vērtības atbilst faktisko strāvu un spriegumu sinusoidālo signālu efektīvajām vērtībām [73], [96]. Attiecīgi sistēmas zara A fāzes strāvas stipruma momentānā vērtība pirms komutācijas būs šāda:

$$i_{\text{SA}}(-0) = \sqrt{2}\text{Im}(\dot{I}_1) = \sqrt{2} \cdot (-125,9) \approx -178,05 \text{ A,}$$

līnijā plūstošās strāvas stipruma momentānā vērtība ir

$$i_{\text{LA}}(-0) = \sqrt{2}\text{Im}(\dot{I}_3) = \sqrt{2} \cdot (-129,43) \approx -183,04 \text{ A.}$$

Otrajam mezglam pieslēgtās kapacitātes momentānā A fāzes sprieguma vērtība ir

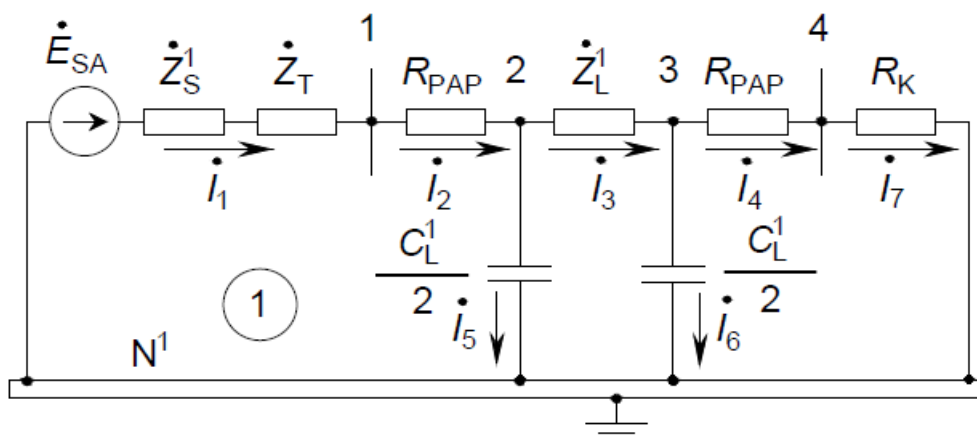
$$u_{\text{C1A}}(-0) = \sqrt{2}\text{Im}(\dot{U}_2) = \sqrt{2} \cdot (-4365,0) \approx -6172,6 \text{ V,}$$

bet trešajam mezglam pieslēgtās kapacitātes momentānā A fāzes sprieguma vērtība ir

$$u_{\text{C2A}}(-0) = \sqrt{2}\text{Im}(\dot{U}_3) = \sqrt{2} \cdot (-6770,0) \approx -9577,7 \text{ V.}$$

B un C fāžu strāvu stiprumu un spriegumu momentānās vērtības ir nosakāmas, izmantojot A fāzes komplekso vērtību modulūsus un leņķus (no tā atņemot 120° un pieskaitot 120°) pirms pārejas uz momentānajām vērtībām.

Jāveic arī stacionārā trīsfāžu īsslēguma režīma jeb uzspiestās pārejas procesa komponentes strāvu stiprumu un spriegumu aprēķins komutācijas brīdī. Īsslēguma aprēķinam netiks ņemta vērā slodze, jo uzdevumā paredzēts noteikt no barojošās puses novērojamo trieciēnstrāvu, un tās kļūda no šāda vienkāršojuma būs minimāla. Aprēķinam nepieciešamā aizvietošanas shēma parādīta 9.14. attēlā.



9.14. att. Pārejas procesu aprēķinu piemēra tīkla simetriska trīsfāžu īsslēguma uz kopnēm B2 aizvietošanas shēma stacionārā īsslēguma režīma parametru aprēķinam.

Arī īsslēgumam netiks sīkāk parādītas ieejas matricas un aprēķinu darbību secība, jo šādu aprēķinu piemēri daudz sarežģītākiem gadījumiem jau tika parādīti 6. nodaļā. No iegūtajiem rezultātiem uzreiz iespējams izdalīt sistēmas un līnijas zaru strāvas stiprumu, kā arī 2. un 3. mezglam pieslēgto kapacitāšu spriegumu modulūsus un leņķus:

$$\dot{I}_{KSA}(0) = 478,8 - j1565,3 \approx 1636,9e^{-j72,99^\circ} \text{ A},$$

$$\dot{I}_{KLA}(0) = 478,9 - j1566,1 \approx 1637,7e^{-j73,00^\circ} \text{ A},$$

$$\dot{U}_{KC1A}(0) = 31918,2 - j8052,5 \approx 32918,3e^{-j14,16^\circ} \text{ V},$$

$$\dot{U}_{KC2A}(0) = 479,3 - j1567,7 \approx 1639,4e^{-j73,00^\circ} \text{ V}.$$

Analoģiski slodzes režīmam, šoreiz var pāriet uz momentānajām vērtībām, izmantojot kompleksā skaitļa imagināro daļu vai kompleksā skaitļa moduli un leņķi. Sistēmas zaram A fāzes strāvas stipruma momentānā vērtība ir

$$i_{KSA}(0) = \sqrt{2}\text{Im}\left(\dot{I}_{KSA}(0)\right) = \sqrt{2} \cdot (-1565,3) \approx -2213,7 \text{ A},$$

bet līnijā plūstošās strāvas stipruma momentānā vērtība ir

$$i_{KLA}(0) = \sqrt{2}\text{Im}\left(\dot{I}_{KLA}(0)\right) = \sqrt{2} \cdot (-1566,1) \approx -2214,8 \text{ A}.$$

Otrajam mezglam pieslēgtās kapacitātes momentānais A fāzes spriegums ir

$$u_{KC1A}(0) = \sqrt{2}\text{Im}\left(\dot{U}_{KC1A}(0)\right) = \sqrt{2} \cdot (-8052,5) \approx -11388,0 \text{ V},$$

bet trešajam mezglam pieslēgtās kapacitātes momentānais A fāzes spriegums ir

$$u_{KC2A}(0) = \sqrt{2}\text{Im}\left(\dot{U}_{KC2A}(0)\right) = \sqrt{2} \cdot (-1567,7) \approx -2217,1 \text{ V}.$$

Zinot induktīvo un kapacitatīvo elementu strāvu stiprumu un spriegumu uzspiesto komponentu vērtības uzreiz pirms un uzreiz pēc komutācijas, ir iespējams noteikt to signālu brīvo komponentu vērtības komutācijas brīdī atbilstoši (9.26.):

$$i_{SAbr}(0) = i_{SA}(-0) - i_{KSA}(0) = -178,05 - (-2213,7) = 2035,7 \text{ A},$$

$$i_{LABr}(0) = i_{LA}(-0) - i_{KLA}(0) = -183,04 - (-2214,8) = 2031,8 \text{ A},$$

$$u_{C1Abr}(0) = u_{C1A}(-0) - u_{KC1A}(0) = -6172,6 - (-11388,0) = 5215,4 \text{ V},$$

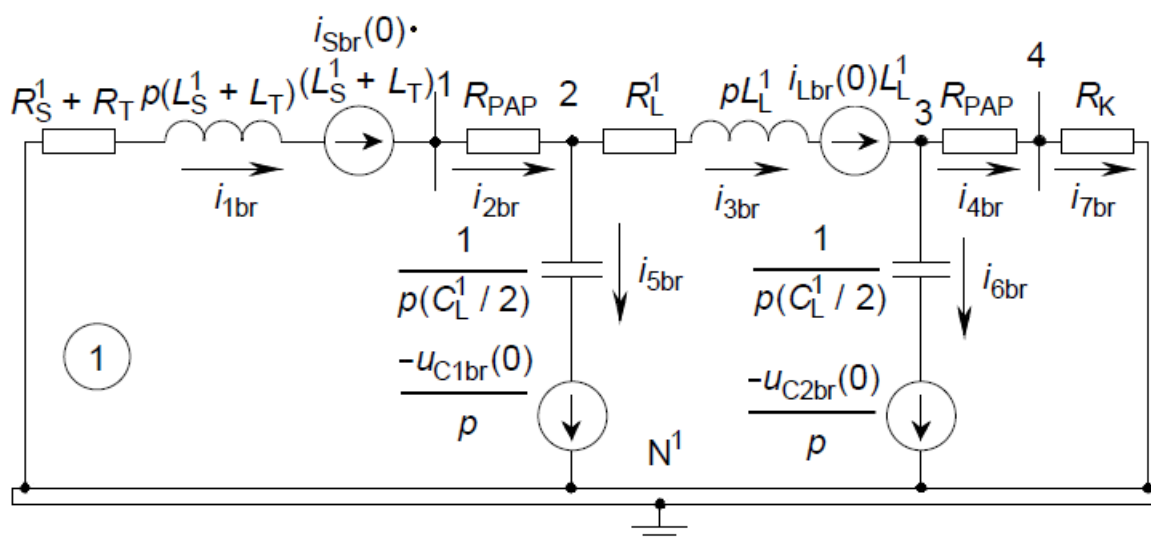
$$u_{C2Abr}(0) = u_{C2A}(-0) - u_{KC2A}(0) = -9577,7 - (-2217,1) = -7360,6 \text{ V}.$$

Pirms īsslēguma radītā pārejas procesa strāvu signālu brīvo sastāvdaļu aprēķinu veikšanas ir jāņem vērā, ka Laplasa telpas aprēķiniem kapacitatīvos un induktīvos elementus ievēro ar kapacitātēm F un induktivitātēm H . Tādēļ 9.3. tabulā dotās induktīvās pretestības jāpārveido uz induktivitātēm, pieņemot nominālu sprieguma frekvenci ($L \approx X_L/\omega_N$). Atbilstošās induktivitātes apkopotas 9.4. tabulā.

Pārejas procesu aprēķinu piemēra tīkla elementu induktivitātēs

Elementa induktivitātes apzīmējums	L , mH
$L_S^1 = L_S^2 = L_S^0$	34,82
L_T	33,87
L_L^1	54,75
L_L^0	136,75
L_{SL}	412,85

Analogiski uzspiesto komponentu arī īsslēguma brīvo komponentu aprēķins tiks veikts ar topoloģisku režīma parametru aprēķina metodi. Atbilstoši teorētiskajā aprakstā minētajam sistēmas EDS avots tiek šuntēts un tiek ieviesti EDS avoti, kuru vērtības nosaka iepriekš aprēķināto induktivitāšu strāvu stiprumu un kapacitāšu spriegumu brīvo komponentu vērtības (9.15. att.).

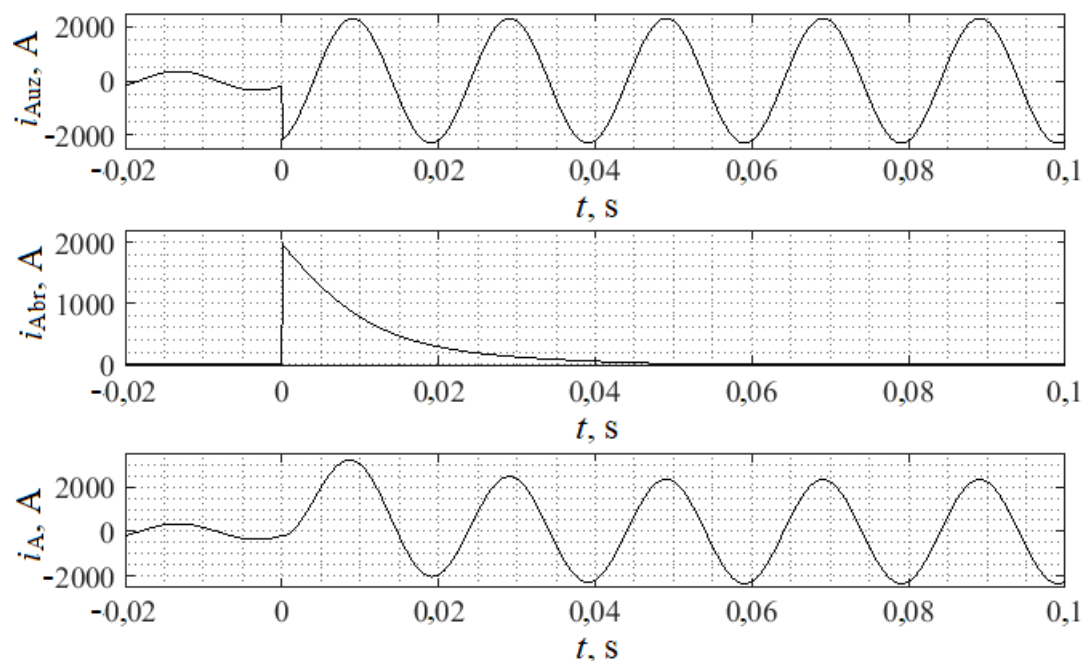


9.15. att. Pārejas procesu aprēķinu piemēra tīkla simetriska trīsfāžu īsslēguma uz kopnēm B2 TS aizvietošanas shēma Laplasa telpā īsslēguma pārejas procesa brīvo komponentu aprēķinam.

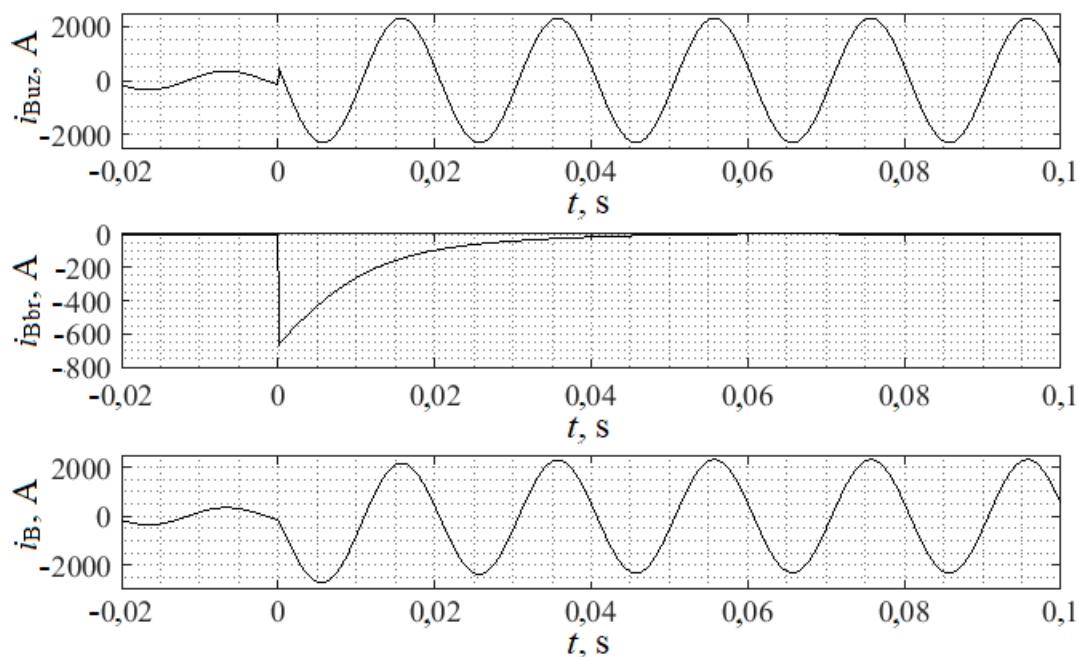
Brīvo komponentu topoloģiskajam aprēķinam Laplasa telpā iespējams parādīt nepieciešamo zaru pretestību vektoru un zaru EDS vektoru:

$ZZ(p)$	$E(p)$
$i_{1br} \quad R_S^1 + R_T + p(L_S^1 + L_T)$	$i_{1br} \quad i_{SAb r}(0)(L_S^1 + L_T)$
$i_{2br} \quad R_{PAP}$	$i_{2br} \quad 0$
$i_{3br} \quad R_L^1 + pL_L^1$	$i_{3br} \quad i_{LAb r}(0)L_L^1$
$i_{4br} \quad R_{PAP}$	$i_{4br} \quad 0$
$i_{5br} \quad 2/(pC_L^1)$	$i_{5br} \quad -u_{C1Ab r}(0)/p$
$i_{6br} \quad 2/(pC_L^1)$	$i_{6br} \quad -u_{C2Ab r}(0)/p$
$i_{7br} \quad R_K$	$i_{7br} \quad 0$

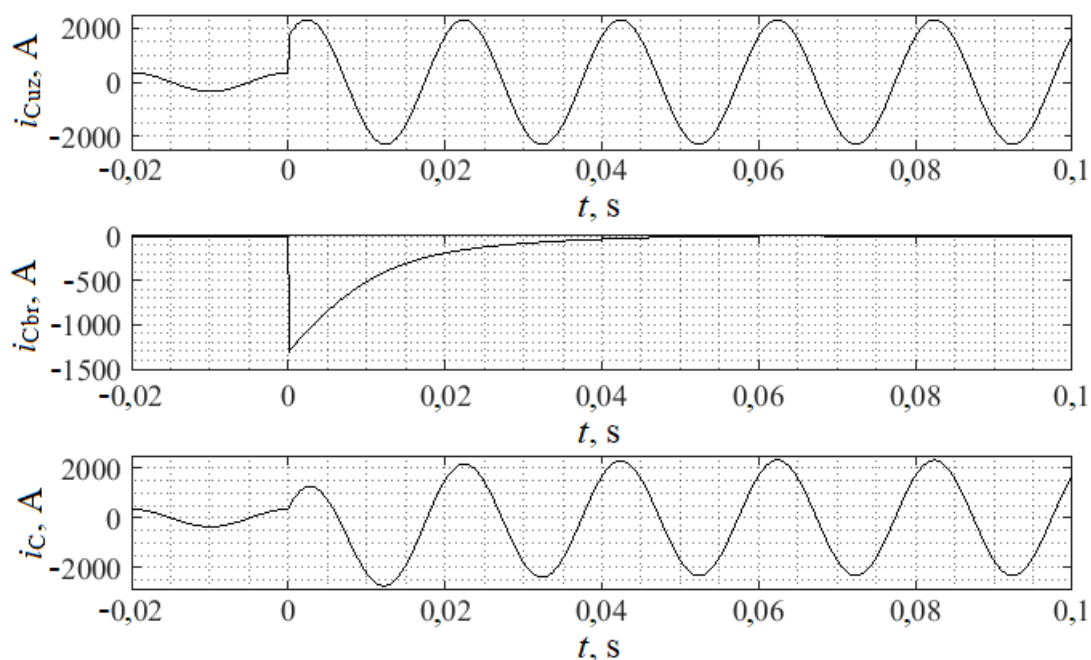
Abu vektoru saturs parādīts analītiskā formā, jo skaitliskā risinājuma gaitā šo vektoru vērtības mainās, mainoties p piešķirtajām vērtībām. Pirmās incidences matricas sastādīšanas princips saglabājas tāds pats kā stacionāro režīmu parametru aprēķinu piemēros, un konkrētajā gadījumā pirmās incidences matrica pat sakristu ar 9.14. attēlā parādītajai shēmai nepieciešamo. Ņemot vērā, ka aprēķins nosaka signālu brīvās komponentes, tad apgrieztās Laplasa transformācijas skaitliskajam aprēķinam par meklējamās funkcijas sākuma vērtību jāpieņem līnijas strāvas signāla brīvās komponentes vērtība $i_{LAbr}(0) = 2031,8$ A, bet B un C fāzēm, veicot vektoriālus pagriezienus A fāzes strāvas kompleksajai vērtībai, var iegūt $i_{LBbr}(0) = -687,3$ A, $i_{LCbr}(0) = -1344,5$ A. Izmantojot aprakstīto apgriezto Laplasa transformāciju A, B, C fāzēm, tika aprēķinātas šo strāvu stiprumu brīvās komponentes momentānās vērtības un konstruēti grafiki ar īsslēguma uzspiesto un brīvo komponenti, kā arī faktisko strāvu stiprumu momentānajām vērtībām 100 ms laika posmam no īsslēguma rašanās brīža. Salīdzinājumam grafikos iekļauts arī viens periods ar pirmsavārijas jeb slodzes režīma strāvu stiprumu vērtībām (9.16.–9.18. att.).



9.16. att. Līnijas A fāzes strāvas stipruma signāla uzspiestās un brīvās komponentes un faktiskā A fāzes strāvas stipruma grafiks, rodoties simetriskam trīsfāžu īsslēgumam uz kopnēm B3, pārejas procesu aprēķinu piemēra tīklā.



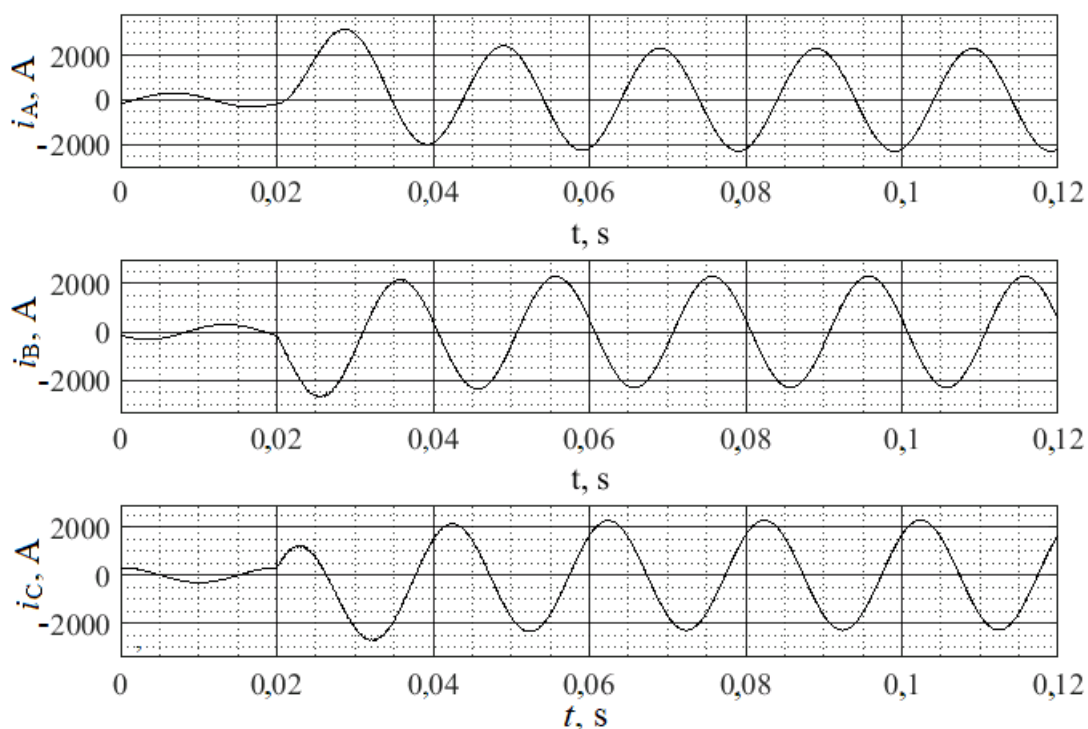
9.17. att. Līnijas B fāzes strāvas stipruma signāla uzspiestās un brīvās komponentes un faktiskā B fāzes strāvas stipruma grafiks, rodoties simetriskam trīsfāžu īsslēgumam uz kopnēm B3, pārejas procesu aprēķinu piemēra tīklā.



9.18. att. Līnijas C fāzes strāvas stipruma signāla uzspiestās un brīvās komponentes un faktiskā C fāzes strāvas stipruma grafiks, rodoties simetriskam trīsfāžu īsslēgumam uz kopnēm B3, pārejas procesu aprēķinu piemēra tīklā.

Rezultātu pārbaudei tika izveidots identisks tīkla modelis *MATLAB Simscape Electrical*TM (agrāk *SimPowerSystems*©) modelēšanas vidē, kura realizē tīkla diferenciālvienādojumu risinājumu. Simulāciju rezultātā iegūto faktisko fāžu strāvu stiprumu grafiki parādīti 9.19. attēlā. Aplūkojot iepriekš parādītos grafikus, kas iegūti, izmantojot šajā darbā aprakstīto

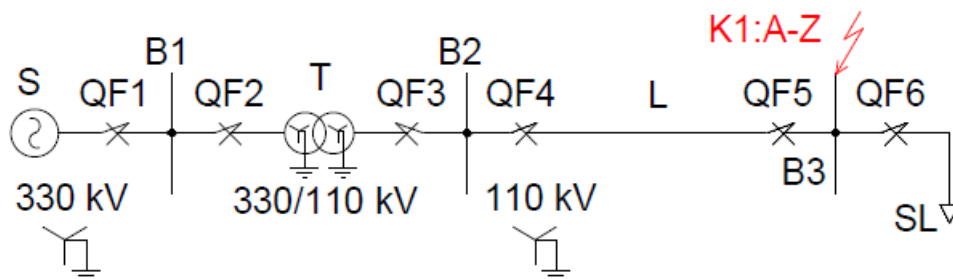
metodi, redzams, ka A fāzē trieciensrāvas vērtība ir aptuveni 3187 A (tā novērojama 0,0088 s pēc īsslēguma rašanās), B fāzē nosacītās trieciensrāvas vērtība ir aptuveni 2724 A (tā novērojama 0,0055 s pēc īsslēguma rašanās) un C fāzē nosacītās trieciensrāvas vērtība ir aptuveni 2723 A (tā novērojama 0,0122 s pēc īsslēguma rašanās). Izskatot ar *MATLAB Simscape Electrical*TM [59] modeli iegūtos fāžu strāvu grafikus 9.19. attēlā, var pārliecināties, ka trieciensrāvu vērtību atšķirības nepārsniedz 1,5 % un to fiksēšanas laiki arī praktiski sakrīt, ja ņem vērā, ka šajos grafikos laika intervālā no 0 s līdz 0,02 s (nevis no -0,02 s līdz 0 s) ir parādīts slodzes režīms.



9.19. att. Līnijas A, B un C fāzes strāvas stipruma grafiks, kas iegūts no *Simscape Electrical*TM izveidotā modeļa, simulējot simetriska trīsfāžu īsslēguma rašanos uz pārejas procesu aprēķinu piemēra tīkla kopnēm B3.

9.4. Elektriskās sistēmas vienfāzes īsslēguma pārejas procesa aprēķina realizācijas piemērs, lietojot skaitlisko apgriezto Laplasa transformāciju

Otrajā pārejas procesu aprēķinu piemērā izpildāms šāds uzdevums: iegūt QF4 piesaistītās aizsardzības fiksēto A fāzes strāvas stipruma pārejas procesa grafiku un noteikt tās trieciensrāvas vērtību, ja radies A fāzes īsslēgums uz slodzes kopnēm B3 (9.20. att.) ar pārejas pretestību $R_K = 10 \Omega$.



9.20. att. Otrā pārejas procesa aprēķinu piemēra vienlīnijas izejas shēma.

Īsslēgums radies 10 ms pēc momenta, kuram aprēķināts slodzes režīms. Līnijas II veida aizvietošanas shēmas realizācijai tiks ieviesta niecīga papildu pretestība $R_{PAP} = 0,001 \Omega$.

Analoģiski iepriekšējam piemēram, jāveic vienfāzes īsslēguma stacionārā režīma jeb pārejas procesa uzspiestās komponentes aprēķins laika momentam $t_{APR} = 0$ s. Laika nobīde tiks ievērota, pārejot uz momentānajām vērtībām, kas ir pieļaujams, jo vienīgais avots konkrētajā tīklā ir sistēma, kuras EDS modulis tiek pieņemts nemainīgs. Atbilstoša stacionārā vienfāzes īsslēguma režīma parametru aprēķina kompleksā aizvietošanas shēma parādīta 9.21. attēlā. Slodze arī šajā īsslēguma režīma parametru aprēķinā netiks ņemta vērā.

Veicot topoloģisku 9.21. attēlā redzamās aizvietošanas shēmas režīma parametru aprēķinu, iegūstamas šādas līnijas un sistēmas A fāzes strāvas stiprumu un abu līnijas II veida aizvietošanas shēmas kapacitāšu A fāzes spriegumu simetrisko komponentu vērtības, ja īsslēgums rastos $t_{APR} = 0$ s:

$$\dot{I}_{KSA}^1(0) = 183,5 - j373,4 \approx 416,1e^{-j63,83^\circ} \text{ A},$$

$$\dot{I}_{KSA}^2(0) = 183,5 - j380,2 \approx 422,2e^{-j64,23^\circ} \text{ A},$$

$$\dot{I}_{KSA}^0(0) = 183,5 - j380 \approx 422,0e^{-j64,23^\circ} \text{ A},$$

$$\dot{I}_{KLA}^1(0) = 183,4 - j376,4 \approx 418,7e^{-j64,03^\circ} \text{ A},$$

$$\dot{I}_{KLA}^2(0) = 183,4 - j379,8 \approx 421,7e^{-j64,23^\circ} \text{ A},$$

$$\dot{I}_{KLA}^0(0) = 183,4 - j379,7 \approx 421,7e^{-j64,23^\circ} \text{ A},$$

$$\dot{U}_{KC1A}^1(0) = 58070 - j3417,3 \approx 58170e^{-j3,37^\circ} \text{ V},$$

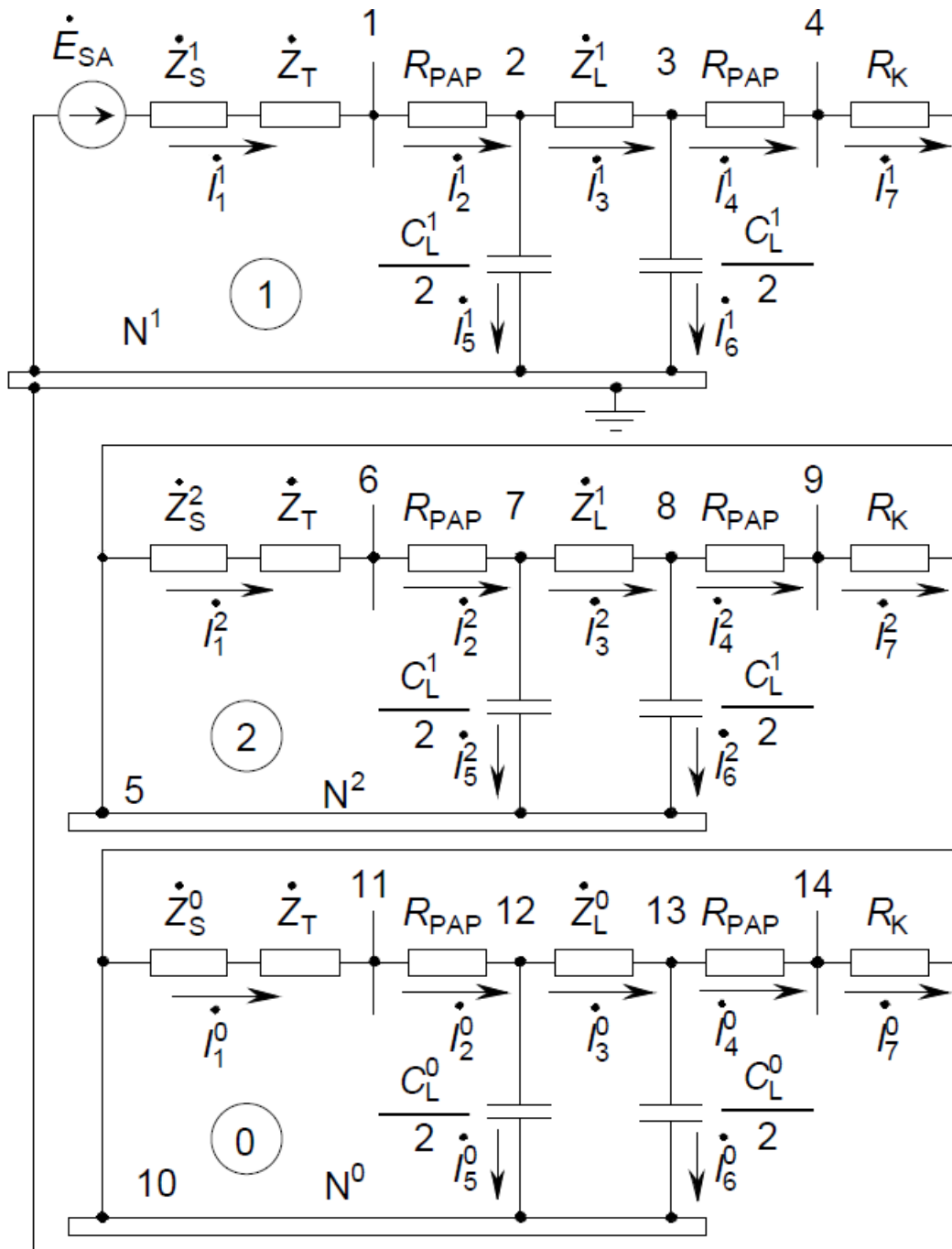
$$\dot{U}_{KC1A}^2(0) = -8472,2 - j3407,3 \approx 9131,7e^{-j158,09^\circ} \text{ V},$$

$$\dot{U}_{KC1A}^0(0) = -8466,9 - j3406,1 \approx 9126,4e^{-j158,09^\circ} \text{ V},$$

$$\dot{U}_{KC2A}^1(0) = 49872 - j3033,0 \approx 49965e^{-j3,48^\circ} \text{ V},$$

$$\dot{U}_{KC2A}^2(0) = -16728 - j2991,0 \approx 16993e^{-j169,86^\circ} \text{ V},$$

$$\dot{U}_{KC2A}^0(0) = -27648 - j5344,1 \approx 28160e^{-j169,06^\circ} \text{ V}.$$



9.21. att. Pārejas procesu aprēķinu piemēra tīkla A fāzes īsslēguma uz kopnēm B3 kompleksā aizvietošanas shēma stacionārā īsslēguma režīma parametru aprēķinam.

Laika nobīdes $t_{APR} = 0,01$ s ievērošanai simetrisko komponentu momentānās vērtības jānosaka, balstoties uz to komplekso vērtību moduļiem un leņķiem, kuriem pieskaitīta t_{APR} ieviestā leņķiskā nobīde, pieņemot nominālu sprieguma frekvenci ($\omega t_{APR} = 180^\circ$). Papildus tam, arī šoreiz pārejot pie momentānajām vērtībām, jāreizina ar $\sqrt{2}$, jo iegūtās kompleksās vērtības atbilst faktisko strāvu un spriegumu simetrisko sastāvdaļu sinusoidālo signālu efektīvajām vērtībām:

$$i_{KSA}^1(0,01) = \sqrt{2} |i_{KSA}^1(0)| \sin(\omega t_{APR} + \varphi_{KSA}^1) = \sqrt{2} \cdot 416,1 \sin(180^\circ - 63,83^\circ) \approx 529,2 \text{ A,}$$

$$\begin{aligned}
i_{KSA}^2(0,01) &= \sqrt{2}|i_{KSA}^2(0)| \sin(\omega t_{APR} + \varphi_{KSA}^2) = \sqrt{2} \cdot 422,2 \sin(180^\circ - 64,23^\circ) \approx 537,7 \text{ A}, \\
i_{KSA}^0(0,01) &= \sqrt{2}|i_{KSA}^0(0)| \sin(\omega t_{APR} + \varphi_{KSA}^0) = \sqrt{2} \cdot 422,2 \sin(180^\circ - 64,23^\circ) \approx 537,7 \text{ A}, \\
i_{KLA}^1(0,01) &= \sqrt{2}|i_{KLA}^1(0)| \sin(\omega t_{APR} + \varphi_{KLA}^1) = \sqrt{2} \cdot 418,7 \sin(180^\circ - 64,03^\circ) \approx \\
&\approx 532,3 \text{ A}, \\
i_{KLA}^2(0,01) &= \sqrt{2}|i_{KLA}^2(0)| \sin(\omega t_{APR} + \varphi_{KLA}^2) = \sqrt{2} \cdot 421,7 \sin(180^\circ - 64,23^\circ) \approx \\
&\approx 537,1 \text{ A}, \\
i_{KLA}^0(0,01) &= \sqrt{2}|i_{KLA}^0(0)| \sin(\omega t_{APR} + \varphi_{KLA}^0) = \sqrt{2} \cdot 421,7 \sin(180^\circ - 64,23^\circ) \approx \\
&\approx 537,1 \text{ A}, \\
u_{C1A}^1(0,01) &= \sqrt{2}|\dot{U}_{KC1A}^1(0)| \sin(\omega t_{APR} + \varphi_{KC1A}^1) = \sqrt{2} \cdot 58170 \sin(180^\circ - 3,37^\circ) \approx \\
&\approx 4835,8 \text{ V}, \\
u_{C1A}^2(0,01) &= \sqrt{2}|\dot{U}_{KC1A}^2(0)| \sin(\omega t_{APR} + \varphi_{KC1A}^2) = \sqrt{2} \cdot 9131,7 \sin(180^\circ - 158,09^\circ) \approx \\
&\approx 4818,9 \text{ V}, \\
u_{C1A}^0(0,01) &= \sqrt{2}|\dot{U}_{KC1A}^0(0)| \sin(\omega t_{APR} + \varphi_{KC1A}^0) = \sqrt{2} \cdot 9126,4 \sin(180^\circ - 158,09^\circ) \approx \\
&\approx 4816,1 \text{ V}, \\
u_{C2A}^1(0,01) &= \sqrt{2}|\dot{U}_{KC2A}^1(0)| \sin(\omega t_{APR} + \varphi_{KC2A}^1) = \sqrt{2} \cdot 49965 \sin(180^\circ - 3,48^\circ) \approx \\
&\approx 4289,1 \text{ V}, \\
u_{C2A}^2(0,01) &= \sqrt{2}|\dot{U}_{KC2A}^2(0)| \sin(\omega t_{APR} + \varphi_{KC2A}^2) = \sqrt{2} \cdot 16993 \sin(180^\circ - 169,86^\circ) \approx \\
&\approx 4230,9 \text{ V}, \\
u_{C2A}^0(0,01) &= \sqrt{2}|\dot{U}_{KC2A}^0(0)| \sin(\omega t_{APR} + \varphi_{KC1A}^0) = \sqrt{2} \cdot 28160 \sin(180^\circ - 169,06^\circ) \approx \\
&\approx 7557,9 \text{ V}.
\end{aligned}$$

Analoģiski jāievēro laika nobīde arī slodzes režīma parametriem, pieņemot, ka pirms īsslēguma sistēmas režīms ir bijis simetrisks. Tātad nulles pirmskomutācijas vērtības ir tikai strāvu un spriegumu TS komponentēm:

$$\begin{aligned}
i_{SA}^1(0,01) &= \sqrt{2}|i_{SA}^1(-0)| \sin(\omega t_{APR} + \varphi_{SA}^1) = \sqrt{2} \cdot 245,5 \sin(180^\circ - 30,85^\circ) \approx 178,1 \text{ A}, \\
i_{LA}^1(0,01) &= \sqrt{2}|i_{LA}^1(-0)| \sin(\omega t_{APR} + \varphi_{LA}^1) = \sqrt{2} \cdot 247,15 \sin(180^\circ - 31,58^\circ) \approx 183 \text{ A} \\
u_{C1A}^1(0,01) &= \sqrt{2}|\dot{U}_{C1A}^1(-0)| \sin(\omega t_{APR} + \varphi_{C1A}^1) = \sqrt{2} \cdot 63522 \sin(180^\circ - 3,94^\circ) \approx \\
&\approx 6172,6 \text{ V}, \\
u_{C2A}^1(0,01) &= \sqrt{2}|\dot{U}_{C2A}^1(-0)| \sin(\omega t_{APR} + \varphi_{C2A}^1) = \sqrt{2} \cdot 59552 \sin(180^\circ - 36,53^\circ) \approx \\
&\approx 9577,7 \text{ V}.
\end{aligned}$$

Ievērojot iepriekš minēto par pirmskomutācijas vērtībām un balstoties uz (9.26.), var viegli secināt, ka šajā piemērā spriegumu un strāvu PS un NS komponentu pārejas procesa brīvo komponentu vērtības tieši pēc komutācijas būs vienādas ar īsslēguma uzspiesto komponentu vērtībām īsslēguma rašanās brīdī, bet ņemtas ar pretēju zīmi (piemēram, $i_{SAbr}^2(0,01) = 0 - i_{KSA}^2(0,01) = -537,7 \text{ A}$). Tādēļ atsevišķi tiks parādīts vienīgi strāvu un spriegumu TS komponentu pārejas procesa brīvo komponentu vērtību aprēķins:

$$\begin{aligned}
i_{SAbr}^1(0,01) &= i_{SA}^1(0,01) - i_{KSA}^1(0,01) = 178,1 - 529,2 = -351,1 \text{ A}, \\
i_{LAbr}^1(0,01) &= i_{LA}^1(0,01) - i_{KLA}^1(0,01) = 183 - 532,3 = -349,3 \text{ A},
\end{aligned}$$

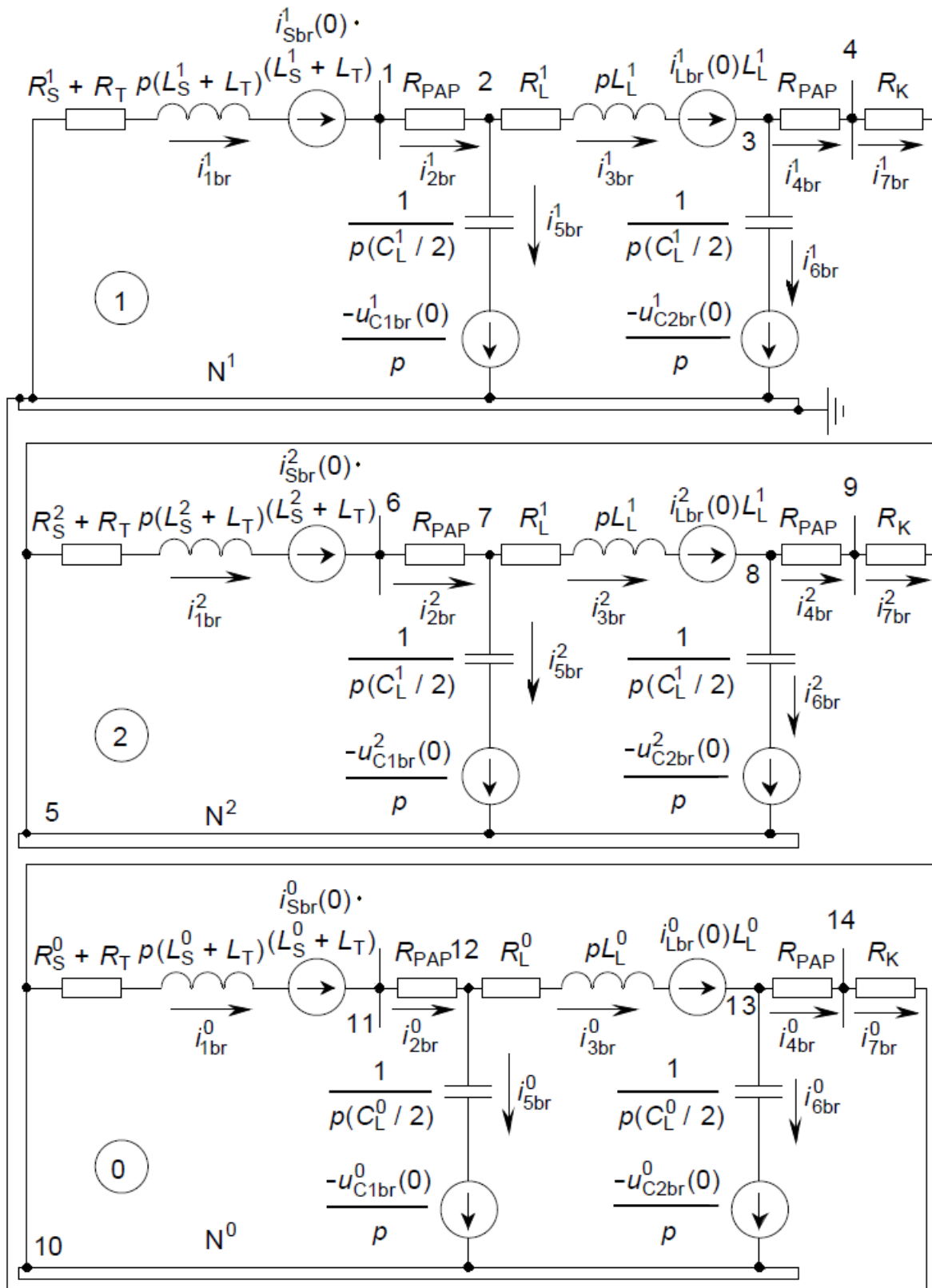
$$u_{C1Abr}^1(0,01) = u_{C1A}^1(0,01) - u_{KC1A}^1(0,01) = 6172,6 - 4835,8 = -1336,8 \text{ V,}$$

$$u_{C2Abr}^1(0,01) = u_{C2A}^1(0,01) - u_{KC2A}^1(0,01) = 9577,7 - 4289,1 = -5288,6 \text{ V.}$$

Līdzīgi trīsfāžu īsslēgumam, arī vienfāzes īsslēgumam nosakāmo signālu brīvās komponentes tiks aprēķināts ar topoloģisko režīma parametru aprēķina metodi. Brīvo komponentu aprēķinam izmantojamā kompleksā aizvietošanas shēma Laplasa telpā parādīta 9.22. attēlā. Šajā attēlā redzamās kompleksās aizvietošanas shēmas režīma topoloģiskajam aprēķinam Laplasa telpā iespējams parādīt nepieciešamo zaru pretestību vektoru un zaru EDS vektoru:

$ZZ(p)$		$E(p)$	
i_{1br}^1	$R_S^1 + R_T + p(L_S^1 + L_T)$	i_{1br}^1	$i_{SAbr}^1(0,01)(L_S^1 + L_T)$
i_{2br}^1	R_{PAP}	i_{2br}^1	0
i_{3br}^1	$R_L^1 + pL_L^1$	i_{3br}^1	$i_{LAbr}^1(0,01)L_L^1$
i_{4br}^1	R_{PAP}	i_{4br}^1	0
i_{5br}^1	$2/[pC_L^1]$	i_{5br}^1	$-u_{C1Abr}^1(0,01)/p$
i_{6br}^1	$2/[pC_L^1]$	i_{6br}^1	$-u_{C2Abr}^1(0,01)/p$
i_{7br}^1	R_K	i_{7br}^1	0
i_{1br}^2	$R_S^2 + R_T + p(L_S^2 + L_T)$	i_{1br}^2	$i_{SAbr}^2(0,01)(L_S^2 + L_T)$
i_{2br}^2	R_{PAP}	i_{2br}^2	0
i_{3br}^2	$R_L^2 + pL_L^2$	i_{3br}^2	$i_{LAbr}^2(0,01)L_L^2$
i_{4br}^2	R_{PAP}	i_{4br}^2	0
i_{5br}^2	$2/[pC_L^2]$	i_{5br}^2	$-u_{C1Abr}^2(0,01)/p$
i_{6br}^2	$2/[pC_L^2]$	i_{6br}^2	$-u_{C2Abr}^2(0,01)/p$
i_{7br}^2	R_K	i_{7br}^2	0
i_{1br}^0	$R_S^0 + R_T + p(L_S^0 + L_T)$	i_{1br}^0	$i_{SAbr}^0(0,01)(L_S^0 + L_T)$
i_{2br}^0	R_{PAP}	i_{2br}^0	0
i_{3br}^0	$R_L^0 + pL_L^0$	i_{3br}^0	$i_{LAbr}^0(0,01)L_L^0$
i_{4br}^0	R_{PAP}	i_{4br}^0	0
i_{5br}^0	$2/[pC_L^0]$	i_{5br}^0	$-u_{C1Abr}^0(0,01)/p$
i_{6br}^0	$2/[pC_L^0]$	i_{6br}^0	$-u_{C2Abr}^0(0,01)/p$
i_{7br}^0	R_K	i_{7br}^0	0

Abu vektoru saturs parādīts analītiskā formā, jo skaitliskā risinājuma gaitā šo vektoru saturs mainās, mainoties p piešķirtajām vērtībām. Pirmās incidences matricas sastādīšanas princips saglabājas tāds pats kā stacionāro režīmu parametru aprēķinu piemēros, un konkrētajā gadījumā pirmās incidences matrica sakrīt ar 9.21. attēlā redzamajai shēmai nepieciešamo. Lai samazinātu skaitliskā aprēķina gaitā uzkrāto kļūdu, iegūtās vienādojumu sistēmas risināšanas procesā tiks izmantota *MATLAB*© iebūvēta LVS sistēmu risināšanas funkcija. Šim piemēram meklēto strāvas simetrisko komponentu signālu brīvo komponentu topoloģiskajam aprēķinam izmantojamās ārējās funkcijas realizācija programmas tekstā parādīta 19. pielikumā.

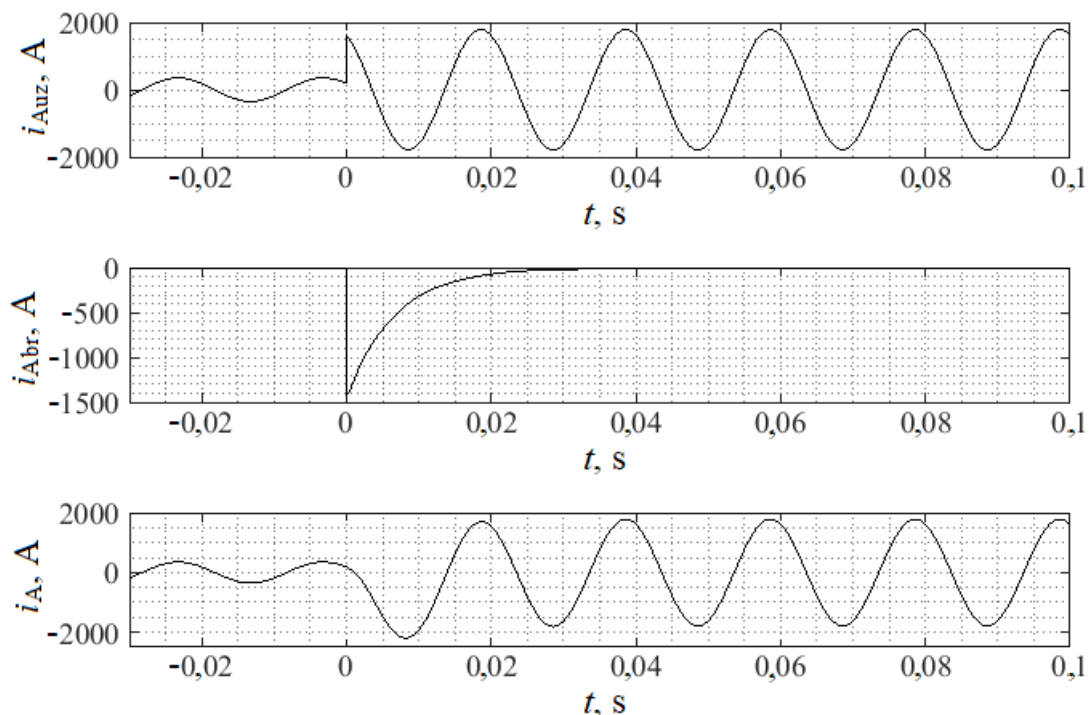


9.22. att. Pārejas procesu aprēķinu piemēra tīkla A fāzes īsslēguma uz kopnēm B3 kompleksā aizvietošanas shēma nosakāmās strāvas simetrisko komponentu signālu brīvo komponentu aprēķinam.

Ņemot vērā, ka aprēķins paredzēts brīvo komponentu noteikšanai, apgrieztās Laplasa transformācijas skaitliskajam aprēķinam par meklējamās funkcijas sākuma vērtību jāpieņem līnijas A fāzes strāvas stipruma signāla brīvās komponentes vērtība:

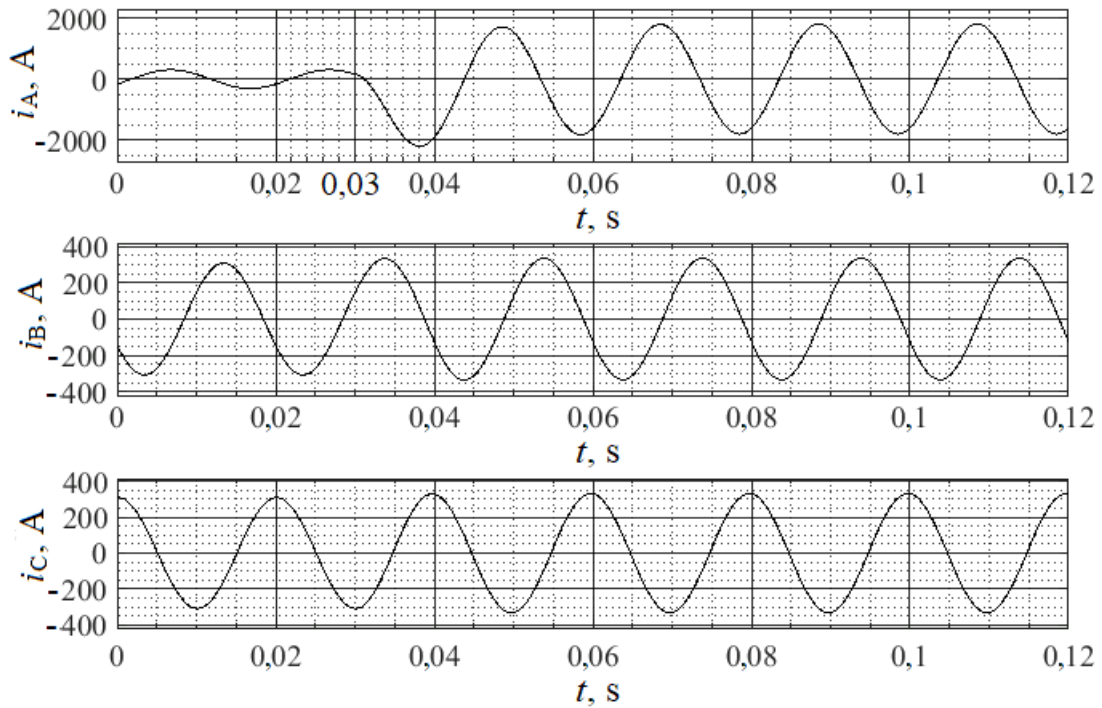
$$i_{LABr}(0,01) = i_{LABr}^1(0,01) + i_{LABr}^2(0,01) + i_{LABr}^0(0,01) = -1423,4 \text{ A.}$$

Izmantojot iepriekšējo aprēķinu rezultātus un skaitliskā brīvās komponentes aprēķina rezultātus, konstruēts A fāzes strāvas stipruma signāla uzspiestās un brīvās komponentes, kā arī faktiskās A fāzes strāvas stipruma momentāno vērtību grafiks 100 ms ilgam laika posmam no īsslēguma rašanās brīža. Papildus parādīts arī viens periods un 10 ms ar pirmsavārijas režīma A fāzes strāvas stipruma momentānajām vērtībām (9.23. att.).



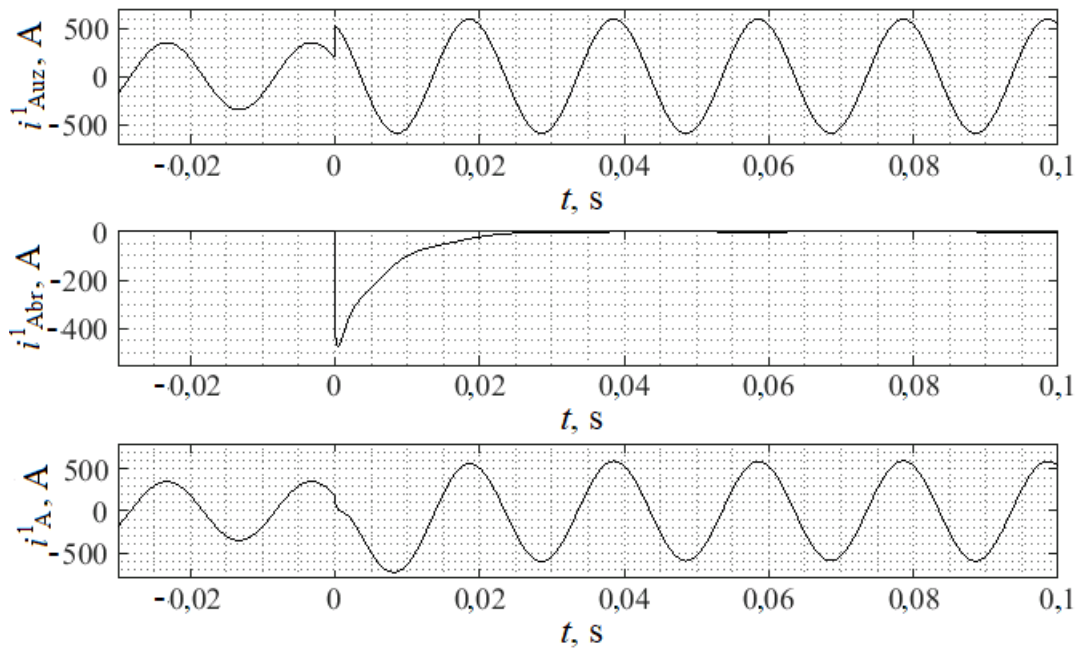
9.23. att. Līnijas A fāzes strāvas stipruma uzspiestās un brīvās komponentes un faktisko A fāzes strāvas stipruma vērtību grafiks, rodoties A fāzes īsslēgumam uz pārejas procesu aprēķinu piemēra tīkla kopnēm B3.

Rezultātu pārbaudei *MATLAB Simscape Electrical*TM modelēšanas vidē izveidotajam tīkla modelim tika simulēts identisks vienfāzes īsslēgums, un šādi iegūto faktisko fāžu strāvu stiprumu grafiki parādīti 9.24. attēlā. Aplūkojot šos grafikus redzams, ka A fāzei nosakāmā triecienskāves vērtība ir aptuveni 2194 A (tā novērojama 0,0082 s pēc īsslēguma rašanās). Savukārt, aplūkojot *MATLAB Simscape Electrical*TM simulācijas rezultātā iegūto fāžu strāvu grafikus (9.24. att.), var pārliecināties, ka A fāzes triecienskāves vērtības atšķirība nepārsniedz 0,5 % un ka triecienskāves fiksēšanas laika momenti arī gandrīz sakrīt, ņemot vērā, ka laika intervālā no 0 s līdz 0,03 s parādīts slodzes režīms. Neskatoties uz to, ka B un C fāzes strāvas simetriskajām komponentēm signāla brīvās komponentes tiešā veidā iegūt ar parādīto komplekso aizvietošanas shēmu nav iespējams, 9.24. attēlā var redzēt, ka B un C fāzēs praktiski nav novērojamas strāvas stipruma izmaiņas, jo BV šajās fāzēs strāva neplūst.

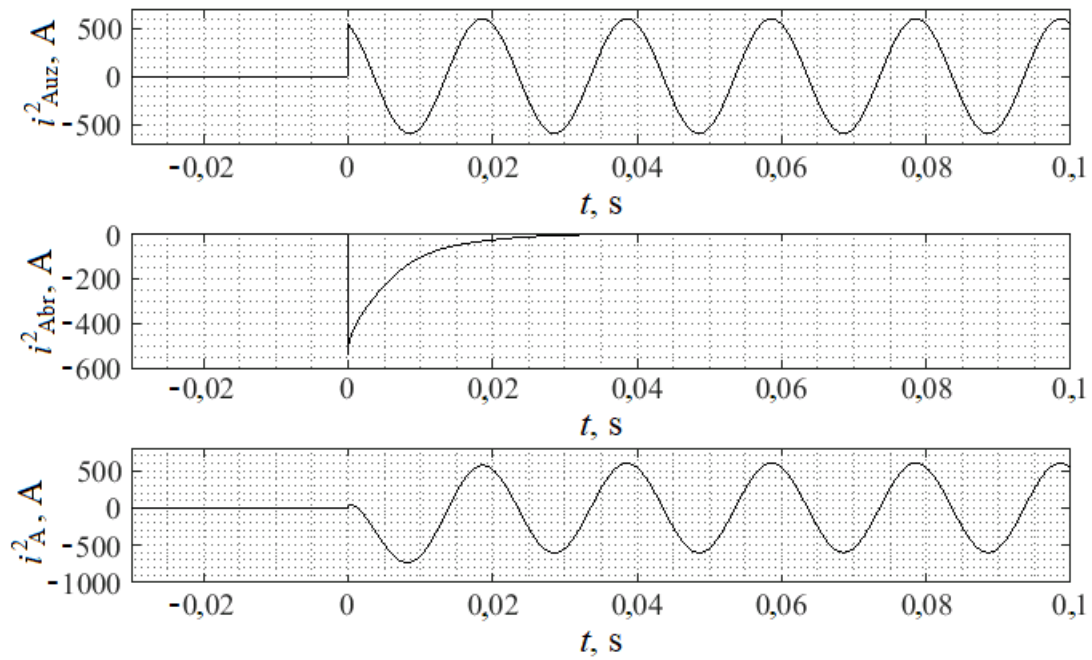


9.24. att. Līnijas A, B un C fāzes strāvas stipruma grafiks, kas iegūts no *Simscape Electrical*TM izveidotā modeļa, simulējot A fāzes īsslēguma rašanos uz pārejas procesu aprēķinu piemēra tīkla kopnēm B3.

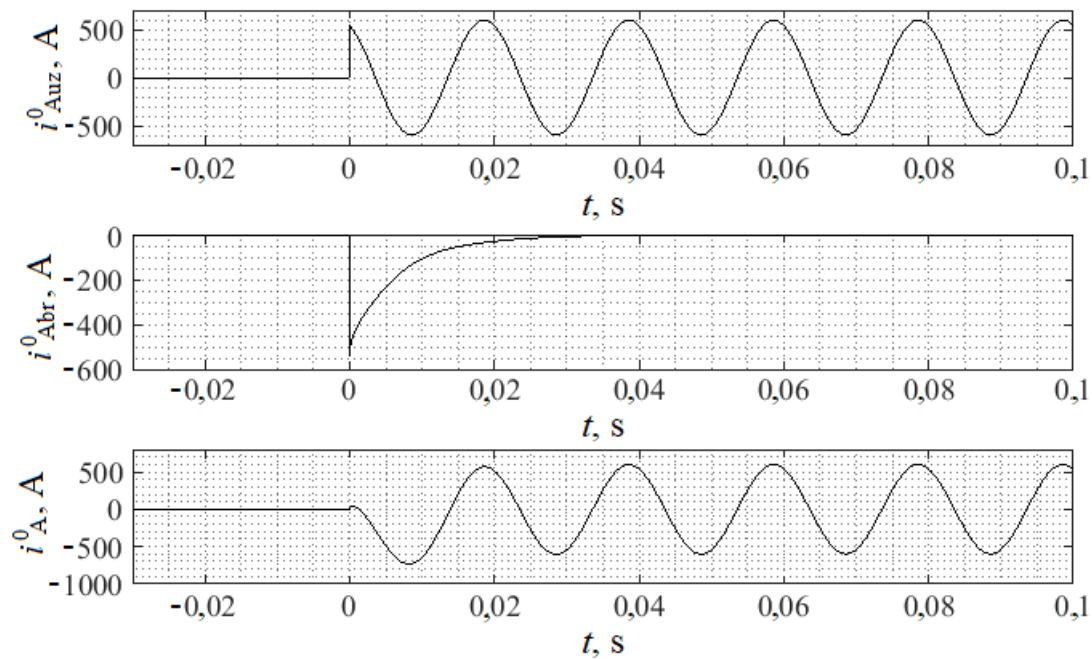
Savukārt šāds signālu brīvo komponentu aprēķins ar komplekso aizvietošanas shēmu dod iespēju atsevišķi aplūkot pārejas procesu aprēķina fāzes simetriskajām komponentēm. Līnijas A fāzes strāvas simetrisko komponentu signālu grafiki parādīti 9.25.–9.27. attēlā.



9.25. att. Līnijas A fāzes strāvas TS komponentes signāla uzspiestās, brīvās komponentes un faktiskās A fāzes strāvas TS komponentes momentāno vērtību grafiks, rodoties A fāzes īsslēgumam uz pārejas procesu aprēķinu piemēra tīkla kopnēm B3.



9.26. att. Līnijas A fāzes strāvas PS komponentes signāla uzspiestās, brīvās komponentes un faktiskās A fāzes strāvas PS komponentes momentāno vērtību grafiks, rodoties A fāzes īsslēgumam uz pārejas procesu aprēķinu piemēra tīkla kopnēm B3.



9.27. att. Līnijas A fāzes strāvas NS komponentes signāla uzspiestās un brīvās komponentes un faktiskās A fāzes strāvas NS komponentes momentāno vērtību grafiks, rodoties A fāzes īsslēgumam uz pārejas procesu aprēķinu piemēra tīkla kopnēm B3.

Aplūkojot 9.25.–9.27. attēlu, iespējams pārliecināties, ka simetrisko komponentu momentāno vērtību grafiku summa atbilst faktiskajam fāzes strāvas stipruma grafikam, un var redzēt bojātās fāzes strāvas komponentu grafiku atšķirības, ko rada to dažādās pirmskomutācijas vērtības.

SECINĀJUMI

1. SKM dod iespēju nesimetrisku elektriskās sistēmas režīmu aplūkot kā simetrisku apakšsistēmu jeb secību režīmu summu, kas ļauj katrai no apakšsistēmām režīma parametrus noteikt vienai no fāzēm un izvairīties no nepieciešamības ievērot pilnīgi visas mijinduktivitātes starp fāzēm un citiem vadītājiem, kā tas jādara, veicot aprēķinus fāžu koordinātās.
2. MPM ar tīkla aprakstu matricu formā, izmantojot topoloģisko modelēšanu (grafu analīzi), ļauj veikt režīma parametru aprēķinus dažādu sarežģītības pakāpju un izmēru aizvietošanas shēmām, ja to elementi ir lineāri, aprēķina ieejas matricu sastādīšanai izmantojot viegli saprotamus un sistemātiski realizējamus principus.
3. Īpaša uzmanība jāpievērš gadījumos, kad starp analizējamo tīkla punktu un nesimetrijas vietu vai BV ieslēgti transformatori ar kompleksu transformācijas koeficientu, jo bez šādu transformatoru ieviesto simetrisko komponentu pagriezienu ievērošanas noteiktie fāžu lielumi būs kļūdaini un bez rūpīgas analīzes iespējams pat nepareizi noteikt bojājuma veidu.
4. Transformatoru ar kompleksu transformācijas koeficientu ieviestie pagriezieni jāņem vērā, ne tikai nosakot bojājuma parametrus, kādi tie zināmi aiz šādiem transformatoriem, bet arī avotiem, lai pareizi noteiktu spriegumu un strāvu simetrisko komponentu vērtības BV.
5. Rodoties vienai šķērsnesimetrijai vai garennesimetrijai, kurai divām fāzēm pārejas pretestības praktiski sakrīt, rekomendējams lietot kompleksās aizvietošanas shēmas, jo tās ļauj uzreiz noteikt simetriskās komponentes vairākiem elektriskās sistēmas punktiem, neveicot manuālu secību aizvietošanas shēmu ekvivalentēšanu jeb vienkāršošanu.
6. Rodoties vienai vispārīgai šķērsnesimetrijai vai garennesimetrijai, kurai visās fāzēs ir atšķirīgas pārejas pretestības, iespējams izmantot darbā parādītos vispārīgās vienādojumu sistēmas matricu pierakstus, veicot secību aizvietošanas shēmu ekvivalentēšanu vai vienlaicīgu šo aizvietošanas shēmu režīma parametru aprēķinu, pārrēķinot nesimetriju atainojošo EDS avotu vērtības starp tuvinājumu soļiem.
7. Nosacīti atdalītā secību aizvietošanas shēmu režīmu parametru aprēķina lietošana ļauj efektīvāk izmantot skaitļojamās iekārtas resursus, jo operācijas tiek veiktas ar mazākām matricām un vieglāk var izmantot daudzprocesoru skaitļošanas sistēmas. Tomēr minētajam risinājumam svarīgi ņemt vērā iespējamās konverģences ierobežojumus pie lielām pārejas pretestību vērtībām, kas ir galvenais šāda paņēmiena trūkums.
8. Papildu uzmanība jāpievērš, analizējot režīmus, kuros šķērsnesimetrija vai garennesimetrija radusies tīklos ar izolētu neitrāli, jo necīgās aprēķina fāzes strāvas NS komponentes lielums nenozīmē, ka sprieguma NS komponente arī būs nenozīmīga.
9. Elektrisko sistēmu punktos, kas ir elektriski attālināti no nesimetrijas rašanās vietas, sagaidāms, ka fāžu spriegumu PS un NS komponentes, salīdzinot ar BV, būs mazākas, it īpaši, ja starp šiem punktiem un BV atrodas transformatori ar trīsstūrī saslēgtu tīnumu.
10. Darbā ietvertie aprēķinu piemēri demonstrē, ka piedāvātie stacionāro nesimetrisko režīmu parametru aprēķinu paņēmieni lietojami, ne tikai analizējot situāciju BV vai RUV, bet arī citu tīkla elementu darbību, piemēram, izvērtējot AD vai SG spriegumu un strāvu PS komponentu īpatsvaru un ietekmi.

11. Īsslēgumu aprēķinos parasti tīkla slodzes un tā elementu aizvietošanas shēmu vadītspējas pieļaujams ignorēt, ja paredzams, ka to strāvu stiprumi būs daudzkārt mazāki par īsslēguma strāvām, bet garennesimetriju rašanās gadījumos jāņem vērā praktiski visi tīkla elementi un to aizvietošanas shēmu sastāvdaļas, kuras būtu nozīmīgas tīkla pirmsavārijas režīma parametru aprēķinos.
12. Atsevišķos vairāku vienlaicīgu nesimetriju rašanās gadījumos iespējams lietot jau gatavas kompleksās aizvietošanas shēmas, kurās izmantoti vienīgi tieši elektriski savienojumi starp secību aizvietošanas shēmām, bet tās parasti ir lietojamas nesimetrijām bez pārejas pretestībām un nereti vienīgi gadījumos, ja šīs nesimetrijas radušās vienā tīkla punktā.
13. Alternatīvi var lietot kompleksās aizvietošanas shēmas, kurās viena no nesimetrijām ievērota ar elektriskiem savienojumiem starp secību aizvietošanas shēmām, bet pārējās nesimetrijas ievērotas, realizējot savienojumus ar ideālo transformatoru palīdzību vai ieviešot papildu EDS avotus, kuru vērtības iespējams noteikt, tās pārrēķinot ar vispārīgo robežnosacījumu vienādojumu sistēmu palīdzību starp tuvinājumu soļiem vai tās nosacīti nomērot no vēl vienas vai vairākām kompleksajām aizvietošanas shēmām, kurās citas nesimetrijas atainotas ar tiešiem elektriskajiem savienojumiem.
14. Izvērtējot aprēķināto režīma parametru atbilstību simulētajam scenārijam, rodoties vairākām vienlaicīgām nesimetrijām jeb sarežģītājiem bojājumiem, jāaplūko ne tikai katras konkrētās nesimetrijas robežnosacījumu izpilde, bet arī šo nesimetriju mijiedarbība.
15. Laplasa transformācijas lietošana ļauj pārejas procesu aprēķiniem diferenciālvienādojumu vietā izmantot to attēlu algebriskus vienādojumus Laplasa telpā, kas atvieglo aprēķinu, ja iegūtajam risinājumam var lietot tipveida apgrieztās Laplasa transformācijas formulas vai iespējams izmantot kādu skaitlisku apgriezto Laplasa transformācijas metodi.
16. Darbā parādītā skaitliskā apgrieztās Laplasa transformācijas metode aizvieto laiku t ar mainīgā x kosinusu, kas ļauj ar oriģinālo laika funkciju $f(t)$ saistītu funkciju $\phi(x)$ izvest Furjē rindā, kuras koeficientu aprēķins, lietojot $f(t)$ attēlu $F(p)$, dod iespēju iegūt arī oriģinālās funkcijas momentānās vērtības.
17. Aprakstītās skaitliskās apgrieztās Laplasa transformācijas metodes testēšana parādīja, ka tās precizitāte ir ļoti atkarīga no funkcijas $f(t)$ attēla $F(p)$ vērtību aprēķina kļūdām un ka tā ir pamatā lietojama pārejas procesu strāvu un spriegumu signālu brīvo komponentu aprēķiniem, bet to iespējams izmantot kopā ar topoloģisko MPM metodi un aizvietošanas shēmu ekvivalentiem Laplasa telpā. Tas ļauj noteikt signālu brīvās komponentes vairāku tīkla elementu režīma parametru signāliem vienlaikus.
18. Jāatzīmē, ka parādītās elektrisko sistēmu nesimetrisko režīmu parametru aprēķinu metodes ar to datorrealizāciju ir viegli integrēt plašākām analīzēm, piemēram, izveidojot ārējus ciklus, kas maina bojājumu attālumu un pārejas pretestību vērtības, lai konstruētu grafikus strāvām, spriegumiem un/vai to simetriskajām komponentēm vai identificētu reālos elementu aizvietošanas shēmu parametrus u. tml., kas darbā demonstrēts, sniedzot atsauces uz publikācijām ar konkrētiem lietojumiem. Attiecīgi darbā parādītās modelēšanas metodes var kalpot par pamatu dažādu adaptīvu un viedu RAA funkciju izstrādei.

NOSLĒGUMA VĀRDI

SKM dažus gadus atpakaļ apritēja 100 gadu jubileja. Jāatzīmē, ka 1918. gadā Forteskju publicētais darbs deva neaizstājamu ieguldījumu elektrisko sistēmu nesimetrisko režīmu modelēšanas un analīzes attīstībā. RA projektēšana un darbības analīze ir bijusi cieši saistīta ar SKM kopš šīs metodes rašanās, un mūsdienu skaitļošanas tehnikas un metožu lietošana dod iespējas atklāt SKM potenciālu jaunā līmenī. Šajā darbā parādītās elektrisko sistēmu nesimetrisko režīmu parametru aprēķinu metodes, kas apvieno skaitliskās un topoloģiskās analīzes metodes ar SKM, dodot iespēju modelēt dažādas sarežģītības pakāpes bojājumus jebkāda izmēra tīklos, kur teorētiski vienīgais ierobežojums ir skaitļojamās iekārtas vai datora atmiņas apjoms.

Projektējot AR, vienmēr jānodrošina aizsardzības selektivitāte un jutīgums, tādēļ gan RA projektēšanai, gan darbības analīzei ir jānosaka elektroenerģētiskās sistēmas parametri dažādos režīmos, it īpaši minimāla iekšējā bojājuma un maksimāla ārējā bojājuma gadījumos. Atkarībā no RA darbības principiem un konstrukcijas var būt jānosaka bojāto fāžu strāvu un spriegumu moduļi, to simetriskās komponentes vai atvasinātie lielumi (jauda, šķietamā pretestība u. c.) vai citi sistēmas vai tās režīma parametri. Minētajiem aprēķiniem iespējams izmantot arī šajā darbā detalizēti izklāstītās analītiskās un skaitliskās režīma parametru noteikšanas metodes un to nianšes. Papildus jāatzīmē, ka, neskatoties uz to, ka daļa no aplūkotajiem nesimetriju veidiem visticamāk rastos ZS tīklos, to aplūkošana arī AS tīklu piemēros ir lietderīga, jo šo tīklu elementu aizvietošanā bieži jāievēro vairāk aspektu, piemēram, līniju kapacitatīvās vadītspējas. Attiecīgi, veicot režīma parametru aprēķinus šādiem bojājumiem VS vai ZS tīklos, modelēšanas principi saglabāsies nemainīgi un galvenās izmaiņas parasti būs saistītas ar elementu aizvietošanas shēmu vienkāršojumiem. Aprēķinu piemēri parāda ne tikai šīs elementu aizvietošanas atšķirības dažādu sprieguma līmeņu tīkliem, bet arī to, cik nozīmīgu lomu kopumā spēlē sagatavojošie aprēķini pirms bojājumu režīmu parametru noteikšanas.

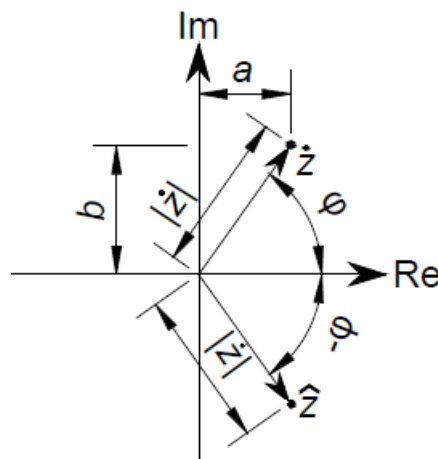
Nobeigumā autori vēlas izteikt cerību, ka šajā grāmatā izklāstītās metodes, parādītie aprēķinu piemēri un to rezultātu analīzes iespējas palīdzēs topošajiem RA speciālistiem iegūt jaunas zināšanas un esošajiem speciālistiem papildināt savas zināšanas tādos studijās retāk aplūkotajos tematos kā sarežģītie bojājumi.

PIELIKUMI

1. pielikums. Atkārtojums par kompleksajiem skaitļiem.
2. pielikums. Ievads Furjē rindās un Furjē transformācijā.
3. pielikums. Kabeļu fāzes vadu īpatnējās aktīvās līdzstrāvas pretestības dažādu materiālu vadiem un dažādiem *IEC 60228* norādītajiem nominālajiem vadītāju šķērsriezuma laukumiem pie 20 °C.
4. pielikums. Zemsprieguma kabeļu dati.
5. pielikums. Vidsprieguma kabeļu dati.
6. pielikums. Augstsprieguma kabeļu dati.
7. pielikums. Neitrāļu režīmi, to īpašības un realizācija.
8. pielikums. 4A sērijas AD aizvietošanas shēmu pretestību vērtības atkarībā no to nominālās aktīvās jaudas un sinhronās rotācijas frekvences.
9. pielikums. Pirmā aprēķinu piemēru tīkla elementu izejas dati un sagatavojošie aprēķini.
10. pielikums. Otrā aprēķinu piemēru tīkla elementu izejas dati un sagatavojošie aprēķini.
11. pielikums. Trešā aprēķinu piemēru tīkla elementu izejas dati un sagatavojošie aprēķini.
12. pielikums. Otrā šķērsnesimetrijas aprēķinu piemēra topoloģiskā režīma parametru aprēķina datorrealizācija *MATLAB*© programmas tekstā.
13. pielikums. Trešā šķērsnesimetrijas aprēķinu piemēra topoloģiskā režīma parametru aprēķina datorrealizācija *MATLAB*© programmas tekstā.
14. pielikums. Otrā garennesimetrijas aprēķinu piemēra topoloģiskā režīma parametru aprēķina datorrealizācija *MATLAB*© programmas tekstā.
15. pielikums. Trešā garennesimetrijas aprēķinu piemēra topoloģiskā režīma parametru aprēķina datorrealizācija *MATLAB*© programmas tekstā.
16. pielikums. Pirmā vairāku vienlaicīgu nesimetriju aprēķinu piemēra topoloģiskā režīma parametru aprēķina datorrealizācija *MATLAB*© programmas tekstā.
17. pielikums. Otrā vairāku vienlaicīgu nesimetriju aprēķinu piemēra topoloģiskā režīma parametru aprēķina datorrealizācija *MATLAB*© programmas tekstā.
18. pielikums. Skaitliskās apgrieztās Laplasa transformācijas datorrealizācijas piemērs *MATLAB*© programmas tekstā.
19. pielikums. Skaitliskās apgrieztās Laplasa transformācijas realizācijai izmantotās ārējās attēla funkcijas ar topoloģisko tīkla režīma parametru risinājumu vienfāzes īsslēgumam datorrealizācijas piemērs *MATLAB*© programmas tekstā.

Atkārtojums par kompleksajiem skaitļiem

Komplekss skaitlis ir skaitlis, ko iespējams izteikt formā $\dot{z} = a + jb$, kur a un b ir reāli skaitļi un j ir imagināra vienība [100]. Saskaitāmo a sauc par kompleksā skaitļa reālo daļu ($\text{Re}(\dot{z}) = a$), un b – par imagināro daļu ($\text{Im}(\dot{z}) = b$). Var secināt, ka komplekss skaitlis ir divu sastāvdaļu kombinācija. Tas nozīmē, ka komplekss skaitlis ir divdimensionāls lielums, kas attēlojams divdimensiju (kompleksajā) plaknē, atšķirībā no reāla skaitļa, kas attēlojams kā punkts uz reālās ass Re (P.1.1. att.).



P.1.1. att. Komplekss skaitlis kompleksajā plaknē [16].

Šis attēls parāda arī pārējos kompleksā skaitļa raksturlielumus: moduli $|\dot{z}|$ un fāzes nobīdes leņķi attiecībā pret reālo asi φ . Balstoties uz parādītajiem kompleksā skaitļa raksturlielumiem, iespējams uzrakstīt matemātiskos pierakstus jeb formas, kādās tiek izmantoti kompleksie skaitļi (algebriskā, trigonometriskā un eksponenciālā forma) [16], [100]:

$$\dot{z} = a + jb = |\dot{z}|(\cos(\varphi) + j \sin(\varphi)) = |\dot{z}|e^{j\varphi}, \quad (\text{P.1.1.})$$

kur \dot{z} – komplekss skaitlis;

a, b – kompleksā skaitļa reālā un imaginārā daļa;

j – imagināra vienība ($j^2 = -1$ jeb $j = \sqrt{-1}$);

$|\dot{z}|$ – kompleksā skaitļa modulis;

φ – kompleksā skaitļa arguments jeb fāzes nobīdes leņķis attiecībā pret reālo asi.

Kompleksie skaitļi, kaut arī izdomāti lielumi, ir noderīgi praktisku uzdevumu risināšanai dažādās sfērās, tostarp arī elektroenerģētikā. Elektroenerģētikas uzdevumu risinājumos nereti rezultātu vienkāršākai atainošanai kompleksus skaitļus parāda ar vektora garumu (vienādu ar kompleksā skaitļa moduli) un leņķi formā: $\dot{z} = |\dot{z}| \angle \varphi$.

Turpinājumā aplūkosim pamatdarbības ar kompleksajiem skaitļiem. Veicot elektrisko sistēmu bojājumu stacionāro režīmu parametru aprēķinus un analīzi, liela daļa no aplūkojamajiem lielumiem ir attēlojami kā kompleksie skaitļi, kas apraksta strāvu un spriegumu vidējās kvadrātiskās vai amplitūdu vērtības, kā arī šo lielumu savstarpējos fāžu nobīdes leņķus.

Atbilstoši ar kompleksajiem skaitļiem ir jāveic daudz matemātisko darbību, kuras īsumā tiks izklāstītas šī pielikuma turpinājumā.

Kompleksa skaitļa moduli iespējams aprēķināt, balstoties uz Pitagora teorēmu (atbilstoši P.1.1. att.) [16], [100]:

$$|\dot{z}| = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad (\text{P.1.2.})$$

bet fāzes nobīdes leņķi jeb kompleksā skaitļa argumentu ($\text{Arg}(\dot{z}) = \varphi$) var aprēķināt, izmantojot arktangensa funkciju [100]:

$$\varphi = \begin{cases} \arctg(b/a), \text{ ja } a > 0 \\ \arctg(b/a) + 180^\circ, \text{ ja } a < 0 \text{ un } b \geq 0 \\ \arctg(b/a) - 180^\circ, \text{ ja } a < 0 \text{ un } b < 0. \\ 90^\circ, \text{ ja } a = 0 \text{ un } b > 0 \\ -90^\circ, \text{ ja } a = 0 \text{ un } b < 0 \end{cases} \quad (\text{P.1.3.})$$

Atsevišķos gadījumos ir jāveic darbības ar kompleksi saistītiem skaitļiem \hat{z} , kas būtībā ir kompleksā skaitļa spoguļattēls kompleksajā plaknē attiecībā pret reālo asi [16], [100]:

$$\hat{z} = a - jb = |\dot{z}|(\cos(\varphi) - j \sin(\varphi)) = |\dot{z}|e^{-j\varphi} = |\dot{z}|\angle -\varphi, \quad (\text{P.1.4.})$$

kur \hat{z} – kompleksā skaitļa \dot{z} kompleksi saistītais skaitlis.

Tālāk aplūkosim divu kompleksu skaitļu $\dot{z} = a + jb$ un $\dot{y} = c + jd$ saskaitīšanu un atņemšanu [100]:

$$\dot{x} = \dot{z} \pm \dot{y} = (a + jb) \pm (c + jd) = a \pm c + j(b \pm d), \quad (\text{P.1.5.})$$

reizināšanu (ņemot vērā, ka $j^2 = -1$) [100]:

$$\begin{aligned} \dot{x} = \dot{z}\dot{y} &= (a + jb)(c + jd) = ac + jad + jcb - bd = \\ &= ac - bd + j(ad + cb), \end{aligned} \quad (\text{P.1.6.})$$

un dalīšanu [100]:

$$\begin{aligned} \dot{x} = \frac{\dot{z}}{\dot{y}} &= \frac{(a+jb)}{(c+jd)} = \frac{(a+jb)(c-jd)}{(c+jd)(c-jd)} = \frac{(ac+bd)+j(cb-ad)}{c^2+d^2} = \\ &= \frac{ac+bd}{c^2+d^2} + j \frac{cb-ad}{c^2+d^2}. \end{aligned} \quad (\text{P.1.7.})$$

Pēdējās divas darbības ir ērtāk veikt ar kompleksajiem skaitļiem eksponenciālā formā [100]:

$$\dot{x} = \dot{z}\dot{y} = |\dot{z}|e^{j\varphi_1}|\dot{y}|e^{j\varphi_2} = |\dot{z}||\dot{y}|e^{j(\varphi_1+\varphi_2)} = |\dot{z}||\dot{y}|\angle(\varphi_1 + \varphi_2), \quad (\text{P.1.8.})$$

$$\dot{x} = \dot{z}/\dot{y} = |\dot{z}|e^{j\varphi_1}/(|\dot{y}|e^{j\varphi_2}) = (|\dot{z}|/|\dot{y}|)e^{j(\varphi_1-\varphi_2)} = |\dot{z}|/|\dot{y}|\angle(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (\text{P.1.9.})$$

Balstoties uz (P.1.4.) un (P.1.6.), iespējams parādīt, ka [100]:

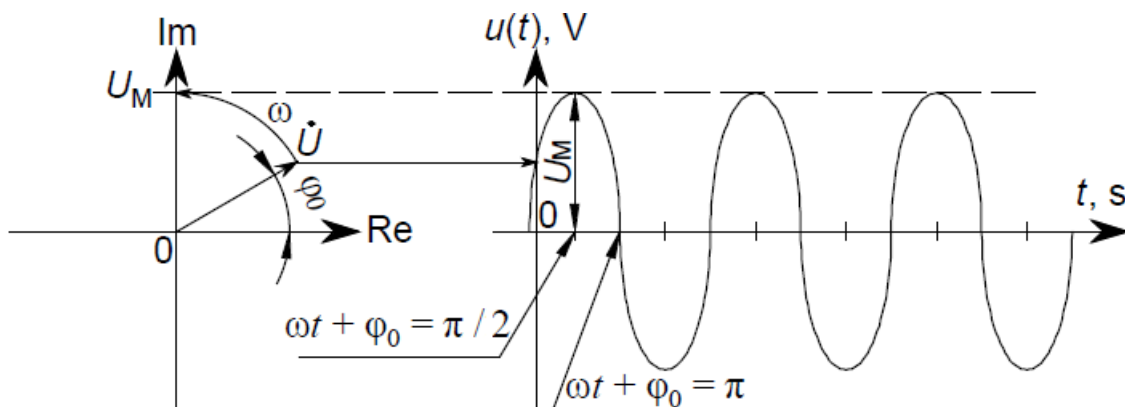
$$\dot{z}\hat{z} = (a + jb)(a - jb) = a^2 + b^2 = |\dot{z}|^2. \quad (\text{P.1.10.})$$

Praktiskam piemēram aplūkosim pamatdarbības ar kompleksajiem skaitļiem $\dot{z} = 10 + j10$ un $\dot{y} = -4 - j8$. Vispirms noteiksim šo kompleksu skaitļu modulūsus un leņķus:

$$|\dot{z}| = \sqrt{10^2 + 10^2} = 10\sqrt{2} \approx 14,14, \quad |\dot{y}| = \sqrt{(-4)^2 + (-8)^2} = 4\sqrt{5} \approx 8,94,$$

$$\varphi_1 = \arctg(10/10) = 45^\circ, \quad \varphi_2 = \arctg(-4/-8) - 180^\circ = -153,43^\circ.$$

Šāda momentāna sprieguma signāla attēlošanai kompleksajā plaknē tiek zīmēts vektors, kura garums atbilst momentānā signāla amplitūdas vērtībai U_M un ar sākotnējo fāzes leņķi φ_0 attiecībā pret reālo asi Re, iegūstot kompleksu vērtību $\dot{U} = U_M e^{j\varphi_0}$ (vizuāla šādas pārejas interpretācija parādīta P.1.3. att.). Iespējams atzīmēt, ka laika momentā $t = 0$ s, $u(t)$ sakrīt ar šo sprieguma signālu atainojošā kompleksā skaitļa \dot{U} imagināro daļu jeb tā projekciju uz imaginārās ass.



P.1.3. att. Pāreja no momentāna sprieguma signāla uz tā reprezentāciju kompleksajā plaknē [73].

Praksē bieži amplitūdas vietā lieto vidējo kvadrātisko jeb efektīvo vērtību (U_{eff}) vektora garumam, kas sinusoidāla signāla gadījumā izsakāms šādi [73]:

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{(1/T) \int_0^T u(t)^2 dt} = \sqrt{(1/T) \int_0^T U_M^2 \sin^2(\omega t) dt} = U_M / \sqrt{2}, \quad (\text{P.1.13.})$$

kur U_{eff} – sprieguma efektīvā jeb vidējā kvadrātiskā vērtība, V;

T – sprieguma momentānā signāla periods, s.

Izmantojot parādītos kompleksās algebras pamatus un sinusoidālo elektrisko lielumu atainošanu kompleksajā plaknē, iespējams īsumā atkārtot arī galvenās sakarības starp elektriskajiem lielumiem to kompleksajās formās jeb lietojot simbolisko metodi. Oma likums kompleksajā formā pierakstāms šādi [82], [96]:

$$\dot{U} = i\dot{Z}, \quad (\text{P.1.14.})$$

kur \dot{U} – uz pretestības \dot{Z} nomērāmā sprieguma efektīvā kompleksā vērtība, V;

\dot{I} – pretestībā \dot{Z} plūstošās strāvas stipruma efektīvā kompleksā vērtība, A;

\dot{Z} – pilnā pretestība (sastāv no aktīvās un reaktīvās komponentes: $\dot{Z} = R + jX$), Ω .

To iespējams parādīt arī ar pretestībai apgriezto lielumu jeb vadītspēju [82], [96]:

$$\dot{I} = \dot{Y}\dot{U}, \quad (\text{P.1.15.})$$

kur \dot{Y} – pilnā vadītspēja (sastāv no aktīvās un reaktīvās komponentes: $\dot{Y} = G - jB$), S.

Kompleksā formā var lietot arī pretestību summu virknes slēgumam [17], [82], [96]:

$$\dot{Z}_V = \sum_{j=1}^{N_V} \dot{Z}_j, \quad (\text{P.1.16.})$$

kur N_V – virknē saslēgto pretestību skaits;

\dot{Z}_V – virknes slēguma kopējā pilnā pretestība, Ω ;

\dot{Z}_j – j -tā virknes slēguma pilnā pretestība, Ω ,

un vadītspēju summu paralēlslēgumam [17], [82], [96]:

$$\dot{Y}_P = \sum_{j=1}^{N_P} \dot{Y}_j, \quad (\text{P.1.17.})$$

kur N_P – paralēli saslēgto pretestību skaits;

\dot{Y}_P – paralēlslēguma kopējā pilnā vadītspēja, S;

\dot{Y}_j – j -tās paralēlslēgumā esošās pretestības pilnā vadītspēja, S.

Dažos gadījumos ir jānosaka arī paralēlslēguma ekvivalentā EDS avota vērtība, ja vismaz kāds no šiem zariem satur EDS avotu [2], [17]:

$$\dot{E}_P = (1/\dot{Y}_P) \sum_{j=1}^{N_P} \dot{E}_j \dot{Y}_j, \quad (\text{P.1.18.})$$

kur \dot{E}_P – paralēlslēguma ekvivalentā EDS avota efektīvā kompleksā vērtība, V;

\dot{E}_j – j -tā paralēlslēgumā esošā zara EDS avota efektīvā kompleksā vērtība, V.

Tāpat aizvietošanas shēmas mezgliem un kontūriem drīkst izmantot Kirhofa likumus kompleksajā formā, sākot ar pirmo Kirhofa likumu, kas lietots kādam konkrētam mezglam [96]:

$$\sum_{j=1}^{N_Z} \dot{I}_j = \sum_{k=1}^{N_J} \dot{J}_k, \quad (\text{P.1.19.})$$

kur N_Z – konkrētajam mezglam pieslēgto zaru skaits;

\dot{I}_j – j -tajā konkrētajam mezglam pieslēgtajā zarā plūstošās strāvas stipruma efektīvā kompleksā vērtība, kas noteikta, ņemot vērā uzdoto zara virzienu, A;

N_J – konkrētajam mezglam pieslēgto strāvas avotu skaits;

\dot{J}_k – k -tā konkrētajam mezglam pieslēgtā strāvas avota vērtība, kurai ņemts vērā strāvas avota virziens, A.

Otrais Kirhofa likums, kas lietots kādam konkrētam aizvietošanas shēmas kontūram [96]:

$$\sum_{j=1}^{N_Z} \dot{U}_j = \sum_{j=1}^{N_Z} \dot{I}_j \dot{Z}_j = \sum_{j=1}^{N_Z} \dot{E}_j, \quad (\text{P.1.20.})$$

kur N_Z – konkrētajā kontūrā ietilpstošo zaru skaits;

\dot{U}_j – konkrētajā kontūrā ietilpstošā j -tā zara pretestībā novērojamā sprieguma krituma efektīvā kompleksā vērtība, V;

\dot{I}_j – konkrētajā kontūrā ietilpstošā j -tā zara pretestībā plūstošās strāvas stipruma efektīvā kompleksā vērtība, ievērojot uzdotā zara virziena sakrītību ar kontūra virzienu, A;

\dot{Z}_j – konkrētajā kontūrā ietilpstošā j -tā zara pilnā pretestība, Ω ;

\dot{E}_j – konkrētajā kontūrā ietilpstošajā j -tajā zarā ieslēgtā EDS avota efektīvā kompleksā vērtība, ievērojot šī avota virziena sakrītību ar kontūra virzienu, V.

Turpinājumā iespējams parādīt vienfāzes AC ķēdes jaudas aprēķina formulas [18], [82]:

$$\dot{S}_F = \dot{U}_F \hat{I}_F = \dot{Z}_F \dot{I}_F \hat{I}_F = \dot{Z}_F |\dot{I}_F|^2 = \dot{U}_F \hat{U}_F \hat{Y}_F = |\dot{U}_F|^2 \hat{Y}_F, \quad (\text{P.1.21.})$$

kur \dot{S}_F – fāzes pilnā jauda (sastāv no aktīvās un reaktīvās komponentes: $\dot{S}_F = P + jQ$), VA;

\dot{U}_F, \hat{U}_F – fāzes sprieguma efektīvā kompleksā un kompleksi saistītā vērtība, V;
 \dot{I}_F, \hat{I}_F – fāzes strāvas stipruma efektīvā kompleksā un kompleksi saistītā vērtība, V;
 \dot{Z}_F – fāzes pilnā pretestība, Ω ;
 \hat{Y}_F – fāzes pilnās vadītspējas kompleksi saistītā vērtība, S.

Savukārt simetriskai trīsfāžu ķēdei jaudas aprēķinam izmantojamas šādas formulas [18], [82]:

$$\dot{S}_{3F} = 3\dot{U}_F\hat{I}_F = 3\dot{Z}_F\dot{I}_F\hat{I}_F = 3\dot{Z}_F|\dot{I}_F|^2 = 3\dot{U}_F\hat{U}_F\hat{Y}_F = 3|\dot{U}_F|^2\hat{Y}_F, \quad (\text{P.1.22.})$$

kur \dot{S}_{3F} – trīsfāžu pilnā jauda, VA.

Izmantojot (P.1.22.) un ņemot vērā, ka atbilstoši (P.1.4.) un (P.1.9.) ir spēkā vienādība $\widehat{(\dot{x}/\dot{y})} = \hat{x}/\hat{y}$, iespējams iegūt formulu fāzes strāvas aprēķinam:

$$\dot{I}_F = \hat{S}_{3F}/(3\hat{U}_F). \quad (\text{P.1.23.})$$

Analoģiski iespējams izteikt formulas arī fāzes pretestības un vadītspējas aprēķinam gadījumā, ja zināma tīkla elementa trīsfāžu jauda un spriegums:

$$\dot{Z}_F = 3\hat{U}_F\dot{U}_F/\hat{S}_{3F} = 3|\dot{U}_F|^2/\hat{S}_{3F}, \quad (\text{P.1.24.})$$

$$\dot{Y}_F = \hat{S}_{3F}/(3\hat{U}_F\dot{U}_F) = \hat{S}_{3F}/3|\dot{U}_F|^2. \quad (\text{P.1.25.})$$

Tad nepieciešamības gadījumā iespējams iegūt formulas, kurās izmantots līnijas jeb F–F spriegums, aplūkojot zvaigznes slēgumu, vai līnijas strāva, analizējot trīsstūra slēgumu, bet svarīgi ņemt vērā, ka pierakstā ar kompleksajām vērtībām jāņem vērā ne tikai fāžu amplitūdu atšķirības, bet arī leņķiskā nobīde starp fāzes un līnijas lielumiem.

Būtu lietderīgi parādīt arī pretestību trīsstūra slēguma pārveidošanu ekvivalentā zvaigznes slēgumā un otrādi. Vispirms pārveidojot no trīsstūra slēguma uz zvaigznes slēgumu [2], [14]:

$$\dot{Z}_A = \dot{Z}_{AB}\dot{Z}_{CA}/(\dot{Z}_{AB} + \dot{Z}_{BC} + \dot{Z}_{CA}), \quad (\text{P.1.26.})$$

$$\dot{Z}_B = \dot{Z}_{AB}\dot{Z}_{BC}/(\dot{Z}_{AB} + \dot{Z}_{BC} + \dot{Z}_{CA}), \quad (\text{P.1.27.})$$

$$\dot{Z}_C = \dot{Z}_{BC}\dot{Z}_{CA}/(\dot{Z}_{AB} + \dot{Z}_{BC} + \dot{Z}_{CA}), \quad (\text{P.1.28.})$$

kur $\dot{Z}_A, \dot{Z}_B, \dot{Z}_C$ – ekvivalentā zvaigznes slēguma A, B un C fāžu vai zaru pilnās pretestības, Ω ;
 $\dot{Z}_{AB}, \dot{Z}_{BC}, \dot{Z}_{CA}$ – pilnās pretestības starp trīsstūra slēguma virsotnēm vai trīsstūra slēguma starpfāžu pilnās pretestības, Ω .

Savukārt, pārveidojot zvaigznes slēgumu uz ekvivalentu trīsstūra slēgumā [2], [14]:

$$\dot{Z}_{AB} = \dot{Z}_A + \dot{Z}_B + \dot{Z}_A\dot{Z}_B/\dot{Z}_C, \quad (\text{P.1.29.})$$

$$\dot{Z}_{BC} = \dot{Z}_B + \dot{Z}_C + \dot{Z}_B\dot{Z}_C/\dot{Z}_A, \quad (\text{P.1.30.})$$

$$\dot{Z}_{CA} = \dot{Z}_C + \dot{Z}_A + \dot{Z}_C\dot{Z}_A/\dot{Z}_B. \quad (\text{P.1.31.})$$

Ievads Furjē rindās un Furjē transformācijā

Veicot elektrotehniskos aprēķinus, nereti ir lietderīgi aizvietot kādu signālu $s(t)$ (piemēram, strāvu $i(t)$, spriegumu $u(t)$ vai citu laikā novērojamu fizikālu lielumu) ar tā aproksimāciju, kas iegūta, sadalot šo signālu sakārtotu laika funkciju sistēmā [95], [101]:

$$s(t) \approx \sum_{i=1}^N a_i f_i(t), \quad (\text{P.2.1.})$$

kur $s(t)$ – laikā mainīgs signāls;

N – signāla $s(t)$ aproksimācijai nepieciešamo funkciju skaits;

a_i – i -tās signāla $s(t)$ aproksimācijai izmantotās funkcijas amplitūda vai mēroga koeficients;

$f_i(t)$ – i -tā signāla $s(t)$ aproksimācijai izmantotā laika funkcija.

Šāda aplūkojamā signāla $s(t)$ sadalīšana jeb dekompozīcija ir lietderīga, ja tādas matemātiskās darbības kā atvasināšana, integrēšana vai pat funkcijas vērtību aprēķināšana, ar dekompozīcijas realizācijai izmantotajām laikā mainīgajām funkcijām $f_1(t), \dots, f_N(t)$ prasa mazāk skaitlisko operāciju vai ir vieglāk izpildāmas, risinot uzdevumus analītiskā ceļā, nekā oriģinālajam signālam $s(t)$. Šāda dekompozīcija ir izdevīga arī, ja nepārtrauktajam signālam $s(t)$ ir zināma vienīgi vērtību tabula jeb diskrētas mērījumu punktu vērtības, lai iegūtu reālā signāla aproksimāciju ar nepārtrauktām funkcijām. Redzams, ka (P.2.1.) parādītās dekompozīcijas realizācijai jāizvēlas laikā mainīgās funkcijas $f_1(t), \dots, f_N(t)$ un tad jānosaka atbilstošie koeficienti a_1, \dots, a_N . Šī dekompozīcija faktiski atbilst signāla $s(t)$ attēlam noteiktā funkcionālā telpā, kurā funkcijas $f_1(t), \dots, f_N(t)$ veido koordinātu sistēmu. Svarīgi nodrošināt, ka dekompozīcijai izmantotās funkcijas ir savstarpēji neatkarīgas jeb ortogonālas [12], [95]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f_i(t) f_j(t) dt = 0, \quad i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, N; i \neq j. \quad (\text{P.2.2.})$$

Ortogonalu funkciju sistēmas sastādīšana bezgalīgam laika intervālam ir iespējama, bet reti ir izdevīga (piemēram, aplūkojot nejaušu skaitļu secības) [95], [102].

Ņemot vērā, ka elektrotehniskos uzdevumos bieži ir jānosaka stacionāru režīmu parametri, kuriem AC ķēdēs atbilst periodiski signāli [99], [103]–[106]:

$$s(t) = s(t + mT), \quad m = -\infty, \dots, 1, 0, 1, \dots, \infty; \quad 0 < T < \infty, \quad (\text{P.2.3.})$$

kur $s(t)$ – laikā mainīgs periodisks signāls;

m – vesels skaitlis;

T – signāla $s(t)$ periods ($T = 1/f$), s.

Šādā gadījumā ir pietiekami režīma parametru vērtības noteikt vienam periodam un attiecīgi ortogonalitātes nosacījumu arī var piemērot vienam periodam, t. i., iespējams aizstāt (P.2.2.) integrāļa robežas ar laika intervālu t_1 – t_2 , kuram atbilst viens signāla periods T . Ortogonalu funkciju sistēma ir lietojama kā bāze funkcionālajai telpai, kurā iespējams attēlot periodisku signālu $s(t)$, ja laika intervāls t_1 – t_2 ietver oriģinālā signāla periodu. Savukārt apgrieztā transformācija, kas atbilst pārejai no attēla funkcionālajā telpā uz laika signālu vai funkciju, neradīs papildu kropļojumus laika signālā, ja par bāzi izmantotā funkciju sistēma $f_1(t), \dots, f_N(t)$

saturēs funkcijas, kuras veido savstarpējo bāzi. Šādas funkcijas raksturo ne tikai to ortogonalitāte, bet arī ortonormalitāte [12], [95], [99]:

$$\int_{t_1}^{t_2} f_i^2(t) dt = 1, i = 1, \dots, N. \quad (\text{P.2.4.})$$

Jāatzīmē, ka funkciju sistēmas, kuras ir ortogonālas, var viegli normēt, izmantojot normēšanas koeficientus jeb papildu reizinātājus [12], [103]:

$$k_{ni} = 1 / \sqrt{\int_{t_1}^{t_2} f_i^2(t) dt}, i = 1, \dots, N. \quad (\text{P.2.5.})$$

kur k_{ni} – i -tās signāla $s(t)$ aproksimācijai izmantotās funkcijas $f_i(t)$ normēšanas koeficients.

Vienkāršākā ortogonālu funkciju sistēma, ko iespējams izmantot periodisku signālu ar periodu $T > 0$ s dekompozīcijai, sastāv no trigonometriskajām funkcijām [95], [99]:

$$\begin{cases} f_{2i-1} = \cos(2\pi(2i-1)t/T) \\ f_{2i} = \sin(4\pi it/T) \end{cases}, i = 1, \dots, \infty. \quad (\text{P.2.6.})$$

Neatkarīgi no izvēlētās bāzes vienādojumu sistēmas saglabājās uzdevums noteikt koeficientu a_1, \dots, a_N vērtības, kas ir saistīts arī ar dekompozīcijas precizitātes kritērija izvirzīšanas uzdevumu. Sprotams, ka tāda koeficientu kopa, kura minimizēs dekompozīcijas ieviestās kļūdas, nodrošinās arī visprecīzāko oriģinālā signāla aproksimāciju, tādēļ par dekompozīcijas precizitātes kritēriju var pieņemt tās rezultātā iegūtās signāla aproksimācijas un oriģinālā signāla atšķirību lielumu. Ja par precizitātes kritēriju izraugās signāla un tā aproksimācijas attālumu jeb Eiklīda normu Hilberta telpā [12], [101]:

$$\Delta = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} [s(t) - \sum_{i=1}^N a_i f_i(t)]^2 dt}, \quad (\text{P.2.7.})$$

Furjē dekompozīcijas koeficientus, kuri nodrošina vidēji tuvāko signāla aproksimāciju, iespējams aprēķināt, atrisinot vienādojumu sistēmu, ko veido iepriekš dotā kritērija parciālie atvasinājumi [101]:

$$\begin{cases} d\Delta/da_1 = 0, \\ \dots \\ d\Delta/da_N = 0, \end{cases} \quad (\text{P.2.8.})$$

kur Δ – signāla $s(t)$ un tā aproksimācijas attālumus.

Aprobežojoties ar reālajiem koeficientiem, vienādojumu sistēmu (P.2.8.) iespējams aizvietot ar [101]:

$$\begin{cases} d\Delta^2/da_1 = 0, \\ \dots \\ d\Delta^2/da_N = 0, \end{cases} \quad (\text{P.2.9.})$$

kas dod iespēju aprēķināt dekompozīcijas koeficientus šādā veidā [103]:

$$a_i = \int s(t) f_i(t) dt. \quad (\text{P.2.10.})$$

Integrēšanas robežām (P.2.10.) jāiekļaujas intervālā, kurā funkciju sistēmai $f_1(t), \dots, f_N(t)$ piemīt ortogonalitāte, piemēram, periodisku signālu dekompozīcijai var izmantot integrēšanas robežas no 0 s līdz T , ja $T < t_2$.

Ja signālu $s(t)$ iespējams aizvietot ar secīgu ortogonālu un ortonormālu funkciju grupu ar kādu iepriekš uzdotu precizitāti, šādu secīgu funkciju grupu sauc par pilno grupu. Rindu, kas veidota no pilnas funkciju grupas ar Furjē dekompozīcijas koeficientiem, sauc par Furjē rindu. Signāla izvešanu Furjē rindā iespējams īstenot, par bāzi izmantojot trigonometriskās funkcijas, Ležandra, Čebiševa un Hermīta polinomus, Hāra, Beseļa un citas funkcijas, kamēr tiek ievēroti Dirihlē teorēmas nosacījumi [12], [99], [105]:

$$0 < \left| \int_{t_1}^{t_2} |s(t)| dt \right| < \infty, \quad (\text{P.2.11.})$$

$$\left| \int_{t_1}^{t_2} |ds(t)/dt| dt \right| < \infty. \quad (\text{P.2.12.})$$

Uzreiz var atzīmēt, ka šie nosacījumi vienmēr ir spēkā signāliem, kuriem piemīt galīga enerģija.

Turpinājumā iespējams pievērsties periodisku signālu dekompozīcijai, kurā izmantotas trigonometriskās funkcijas, kas ir viens no izplatītākajiem Furjē dekompozīcijas veidiem. Ieviešot (P.2.6.) normējošu koeficientu $\sqrt{2/T}$, iespējams sastādīt šādu ortogonālu vienādojumu sistēmu [95], [99], [103]:

$$\begin{cases} f_0 = 1/\sqrt{T}, \\ f_{2i-1} = \sqrt{2/T} \cos(2\pi(2i-1)t/T), i = 1, \dots, \infty. \\ f_{2i} = \sqrt{2/T} \sin(4\pi it/T) \end{cases} \quad (\text{P.2.13.})$$

Apvienojot normējošo koeficientu ar dekompozīcijas koeficientiem a_1, \dots, a_N , iespējams iegūt periodiska signāla $s(t) = s(t + mT)$ izvedumu Furjē rindā formā [104], [105]:

$$s(t) = (C_0/2) + \sum_{k=1}^{\infty} [C_k \cos(2\pi kt/T) + S_k \sin(2\pi kt/T)], \quad (\text{P.2.14.})$$

kur $C_0/2$ – signāla $s(t)$ vidējā vērtība (elektrotehnikā saukta arī par DC komponenti);

k – harmonikas kārtas skaitlis;

C_k – k -tās harmonikas kosinusa koeficients jeb kosinusoīdas amplitūda;

S_k – k -tās harmonikas sinusa koeficients jeb sinusoīdas amplitūda.

Ievērojot (P.2.10.) un normēšanas koeficientu, k -tās harmonikas kosinusa un sinusa koeficienti ir izsakāmi šādā formā [99], [103], [104]:

$$C_k = (2/T) \int_{-T/2}^{T/2} s(t) \cos(2\pi kt/T) dt, \quad (\text{P.2.15.})$$

$$S_k = (2/T) \int_{-T/2}^{T/2} s(t) \sin(2\pi kt/T) dt. \quad (\text{P.2.16.})$$

Augstāk parādīto pierakstu sauc par Furjē rindas trigonometrisko formu. Pastāv vairākas Furjē dekompozīcijas pieraksta formas. Viena no tām iegūstama līdzīgi, kā veicot pāreju no kompleksa skaitļa algebriskās uz trigonometrisko formu, – tiek izmantotas vienīgi kosinusa vai sinusa funkcijas ar atšķirīgām amplitūdām un fāzes jeb sākuma leņķi [95], [99], [103]:

$$s(t) = (C_0/2) + \sum_{k=1}^{\infty} [A_k \cos(k\omega t + \varphi_k)] = (C_0/2) + \sum_{k=1}^{\infty} [A_k \sin(k\omega t + \theta_k)], \quad (\text{P.2.17.})$$

kur A_k – k -tās harmonikas koeficients jeb amplitūda;

ω – pamatharmonikas (elektrotehnikā parasti 50 Hz vai 60 Hz) leņķiskā frekvence, rad/s;
 φ_k – k -tās harmonikas fāzes jeb sākuma leņķis, ja dekompozīcijai izmanto kosinusoīdas, rad;
 θ_k – k -tās harmonikas fāzes jeb sākuma leņķis, ja dekompozīcijai izmanto sinusoīdas, rad.

Šim pierakstam koeficientu un sākuma leņķu aprēķinam var izmantot trigonometriskās formas koeficientus, balstoties uz Pitagora teorēmu un trigonometriju [75], [95], [99], [103]:

$$A_k = \sqrt{C_k^2 + S_k^2}, \quad (\text{P.2.18.})$$

$$\varphi_k = -\text{arctg}(S_k/C_k), \quad (\text{P.2.19.})$$

$$\theta_k = \text{arctg}(C_k/S_k), \quad (\text{P.2.20.})$$

$$\omega = 2\pi/T. \quad (\text{P.2.21.})$$

Furjē rindas (P.2.14.) un (P.2.17.) atbilst periodiskā signāla $s(t)$ aproksimācijai, kuru veido harmonisku signālu (harmoniku) summa, kas sastāv no veselām harmonikām ar frekvencēm, kuras dalās ar pamatharmonikas frekvenci bez atlikuma ($k\omega$), un konstanta jeb DC sastāvdaļa $C_0/2$. Minētā harmoniku izmantošana dekompozīcijai padara šīs metodes lietošanu ērtāku kopā ar elektrotehnikā plaši lietoto simbolisko jeb Hevisaida–Šteinmece metodi. Furjē koeficientu kopa ieguvusi apzīmējumu spektrs, un šo koeficientu noteikšanu sauc par signāla spektrālo analīzi. Periodiska signāla spektrs pēc būtības atspoguļo šo signālu ar funkciju diskrētas frekvences telpā ($k\omega = 2\pi k/T$, kur k ir vesels skaitlis) [95], [103].

Furjē rindu (P.2.17.) iespējams pārrakstīt kompleksā formā, lietojot Eilera formulu [12]:

$$\cos(x) = (e^{jx} - e^{-jx})/2 \quad (\text{P.2.22.})$$

un ieviešot kompleksu harmonikas amplitūdu [99], [103]–[105]:

$$s(t) = (1/2) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \hat{A}_k e^{jk\omega t}, \quad (\text{P.2.23.})$$

kur \hat{A}_k – k -tās harmonikas kompleksā amplitūda ($\hat{A}_k = C_k + jS_k = \sqrt{C_k^2 + S_k^2} e^{j\varphi_k}$).

Šeit lietderīgi atzīmēt, ka negatīvās harmonikas ($k < 0$) ir līdzīgas pozitīvajām harmonikām, bet tās rotē kompleksajā plaknē pretējā, t. i., pulksteņa rādītāja virzienā, un tās iespējams uztvert arī kā pozitīvo harmoniku kompleksi saistītos lielumus ($\hat{A}_{-k} = \hat{A}_k = C_k - jS_k = \sqrt{C_k^2 + S_k^2} e^{-j\varphi_k}$). Balstoties uz (P.2.15.) un (P.2.16.), izsakāmas kompleksās harmoniku amplitūdas (P.2.23.) konkrētajai Furjē rindai [99], [103]:

$$\hat{A}_k = (2/T) \int_{-T/2}^{T/2} s(t) e^{-jk\omega t} dt, \quad k = -\infty, \dots, \infty. \quad (\text{P.2.24.})$$

Ņemot vērā, ka negatīvās harmonikas atbilst pozitīvo harmoniku kompleksi saistītiem lielumiem un ka $\dot{z} + \hat{z} = 2\text{Re}(\dot{z})$, iespējams (P.2.23.) pārrakstīt formā [99]:

$$s(t) = (C_0/2) + \sum_{k=1}^{\infty} \text{Re}(\hat{A}_k e^{jk\omega t}). \quad (\text{P.2.25.})$$

Veicot Furjē dekompozīciju, ir vērts ņemt vērā arī signāla jeb laikā mainīgās funkcijas veidu, ja tam piemīt simetrija, jo tas var izslēgt nepieciešamību noteikt gan sinusa, gan kosinusa koeficientus daļai no harmonikām vai nepieciešamību noteikt sinusa vai kosinusa koeficientus visām harmonikām, kas, protams, ļauj samazināt aprēķinu laiku [12], [99], [104]:

- ja konkrētais signāls atbilst pāra funkcijai, kurai, aizvietojot laiku t ar negatīvu vērtību $-t$, iegūst to pašu vērtību $s(t) = s(-t)$ (piemēram, $\cos(t)$), veicot Furjē dekompozīciju vai transformāciju, nav jāievēro sinusa koeficienti, jo $\text{Im}(\hat{A}_k) = S_k = 0$;
- ja konkrētais signāls atbilst nepāra funkcijai, kurai, aizvietojot laiku t ar negatīvu vērtību $-t$, iegūst to pašu vērtību, kas ņemta ar pretēju zīmi $s(t) = -s(-t)$ (piemēram, $\sin(t)$), veicot Furjē dekompozīciju vai transformāciju, nav jāievēro kosinusa koeficienti, jo $\text{Re}(\hat{A}_k) = C_k = 0$;
- ja konkrētais signāls atbilst funkcijai, kurai piemīt pusperioda simetrija (angļu val. *half-wave symmetry*), t. i., funkcijas vērtība pēc pusperioda sakrīt ar konkrētā brīža vērtību, kas ņemta ar pretēju zīmi $s(t) = -s(t + T/2)$, jeb pozitīvo un negatīvo vērtību pusperiodi ir secīgi un simetriski attiecībā pret laika asi (piemēram, taisnstūra formas viļņa signāls, angļu val. *square waveform* [104], [105]), veicot Furjē dekompozīciju vai transformāciju, nav jāņem vērā pāra harmonikas, jo $S_k = C_k = 0$ visām $k = 2, 4, 6, \dots$ harmonikām.

Daudzas digitālas RAA ierīces izmanto elektrisko signālu (spriegumu un strāvu) diskrētus mērījumus, fiksējot mērījumu rezultātus nevis nepārtraukti, bet ik pēc noteikta laika intervāla. Attiecīgi šādu mērījumu rezultātā nepārtrauktās laika funkcijas, jeb signāla vietā iegūst diskrētu signāla reprezentāciju $s(t) \rightarrow s(i\tau) \rightarrow s(i)$ (i – mērījuma punkta kārtas skaitlis), kas principā ir tabula ar mērījuma kārtas skaitli un tā vērtību. Šāda pāreja vizuāli atspoguļota P.2.1. attēlā. Gadījumos, kad signāls $s(t)$ uzdots ar diskrētiem tā mērījuma punktiem, t. i., kā diskrēta, nevis nepārtraukta laika funkcija, iespējams lietot diskrēto Furjē transformāciju (turpmāk tekstā – DFT). Pieņemsim, ka interesējošais signāls uzdots ar N_T laikā vienmērīgi sadalītiem signāla mērījumiem $s(i\tau)$, $i = 1, \dots, N_T$, kas uzņemti viena perioda T laikā ar mērījumu laika soli $\tau = T/N_T$. Tādā gadījumā, izmantojot (P.2.15.) un (P.2.16.) un pārejot pie skaitliskas integrēšanas ar taisnstūru summēšanu, iegūstamas šādas Furjē rindas koeficientu aprēķinu formulas [104], [106]:

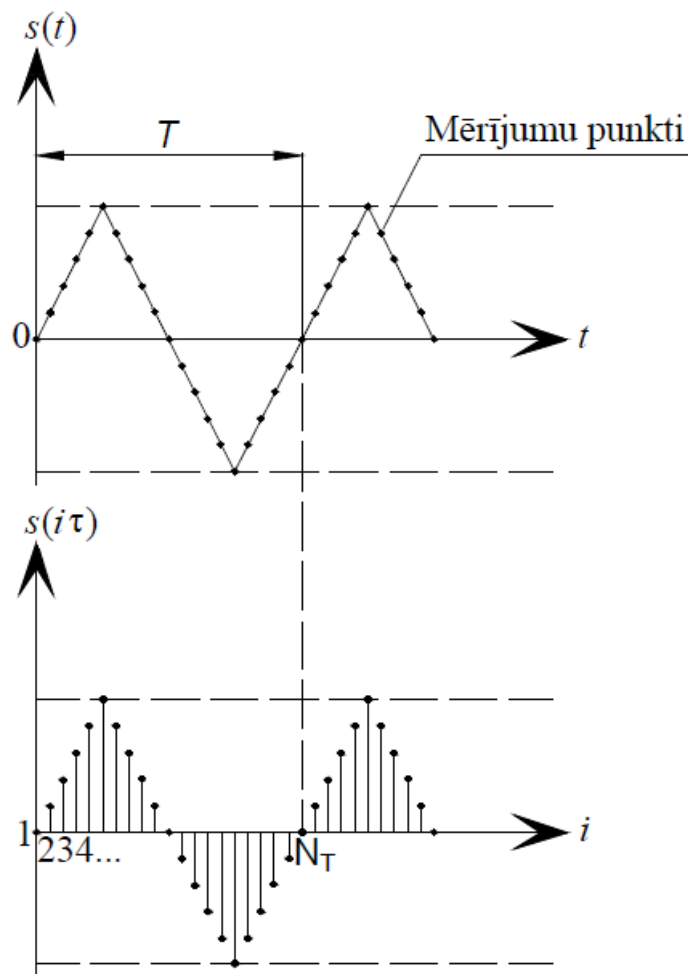
$$C_k = (2/N_T) + \sum_{i=1}^{N_T} [s(i\tau) \cos(2\pi k(i-1)/N_T)], \quad (\text{P.2.26.})$$

$$S_k = (2/N_T) + \sum_{i=1}^{N_T} [s(i\tau) \sin(2\pi k(i-1)/N_T)]. \quad (\text{P.2.27.})$$

Vienlaikus Furjē rindas kompleksās amplitūdas arī iespējams izteikt tiešā veidā, pārejot pie skaitliskās integrēšanas vienādojumā (P.2.24.) [99], [103], [106]:

$$\hat{A}_k = (2/N_T) + \sum_{i=1}^{N_T} [s(i\tau) e^{-j2\pi k(i-1)/N_T}]. \quad (\text{P.2.28.})$$

Izmantojot augstāk parādīto koeficientu aprēķinu formulas DFT realizācijai, svarīgi atcerēties, ka laikam τN_T precīzi jāsakrīt ar oriģinālā signāla $s(t)$ faktisko periodu T , lai izvairītos no nepieļaujamu kļūdu rašanās.



P.2.1. att. Diskrēta signāla $s(i\tau)$ iegūšana no nepārtraukta signāla jeb laikā mainīgas funkcijas $s(t)$, veicot diskrētus mērījumus.

Elektrotehnikā (P.2.26.), (P.2.27.) un citās analogiskās DFT formās bieži lieto, lai noteiktu pamatharmonikas (visbiežāk 50 Hz vai 60 Hz) ortogonālās komponentes C_1 un S_1 strāvas vai sprieguma signāliem, ja pieejami šo signālu diskrēti mērījumi, kas iegūti no analogdigitālajiem pārveidotājiem. Tad elektrisko lielumu efektīvās kompleksās vērtības var izteikt formā [95], [103]:

$$\dot{U}_1 = (C_1 + jS_1)/\sqrt{2} \quad (\text{P.2.29.})$$

vai

$$\dot{I}_1 = (C_1 + jS_1)/\sqrt{2} \quad (\text{P.2.30.})$$

un nepieciešamības gadījumā izmantot citām elektrotehnikas pamatos aprakstītām metodēm.

Jāatzīmē, ka praksē Furjē transformācijai vai izvedumam Furjē rindā izmanto galēju harmoniku skaitu, pēc kura augstāku harmoniku amplitūdas ir tik mazas, ka to ignorēšana nerada nozīmīgu kļūdu [104], [105].

Koeficientu \dot{A}_k noteikšana principā atbilst tiešajai Furjē transformācijai, kas laikā mainīgu signālu $s(t)$ pārveido uz tā attēlu frekvences telpā $S(\omega)$, ko vispārīgā veidā parāda šādi [12], [75], [99], [103]:

$$S(\omega) = F[s(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (\text{P.2.31.})$$

Tomēr visbiežāk periodiskiem laikā mainīgiem signāliem attēls frekvences telpā būs diskrēta funkcija, kā tas minēts iepriekš. Attiecīgi šādām funkcijām visu koeficientu kopa atbilst to attēlam frekvences telpā $S(k\omega) = \{A_k\}$ [99].

Līdz šim brīdim aprakstīti vienīgi periodisku signālu $s(t) = s(t + mT)$ izvedumi Furjē rindā, bet īsumā jāaplūko arī aperiodiska signāla izvešana Furjē rindā. Pieņemsim, ka sprieguma impulss $u(t)$ atbilst aperiodiskam signālam. Tādā gadījumā iespējams atkārtot impulsu $u(t)$, lai iegūtu periodisku signālu, kura periods atbilst šī impulsa ilgumam [12], [103]:

$$s(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} u(t + mT), \quad (\text{P.2.32.})$$

kur m – vesels skaitlis.

Iegūtais periodiskais signāls sakrītīs ar aperiodisko impulsu, ja šī signāla periodu palielina līdz bezgalībai [101], [103]:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} s(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} u(t + mT) = u(t). \quad (\text{P.2.33.})$$

Izvedot iegūto signālu $s(t)$ Furjē rindā un ar robežas palīdzību to pārveidojot par impulsu $u(t)$, iegūstams, ka Furjē rindas koeficienti būs:

$$\begin{aligned} A_k &= (2/T) \int_{-T/2}^{T/2} s(t) e^{-j2\pi kt/T} dt = \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} (2/T) \int_{-T/2}^{T/2} s(t) e^{-j2\pi kt/T} dt = (2/\infty) \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j2\pi kt/\infty} dt = 0. \end{aligned} \quad (\text{P.2.34.})$$

Neskatoties uz šo rezultātu, joprojām iespējams analizēt lielumu [12], [99], [103], [104], [106]:

$$\dot{G}_u(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) e^{-j\omega t} dt, \quad (\text{P.2.35.})$$

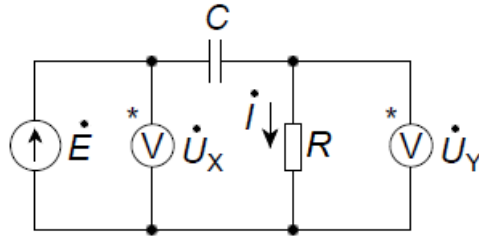
kur $\dot{G}_u(\omega)$ – impulsa $u(t)$ spektrālā funkcija.

Spektrālā funkcija $\dot{G}(\omega)$ ir nepārtraukta funkcija frekvences telpā. Vienlaikus spektrālā funkcija ir lietojama, lai noteiktu arī periodisku signālu harmoniku amplitūdas diskrētām frekvenču vērtībām ($\omega_k = 2\pi k/T$) [12], [99], [103]:

$$\dot{A}_k = (2/T) \dot{G}_s(2\pi k/T), \quad (\text{P.2.36.})$$

kur $\dot{G}_s(\omega)$ – periodiska signāla $s(t)$ spektrālā funkcija.

Visizplatītākais spektrālās funkcijas lietojums elektrotehnikā ir elektriskās ķēdes reakcijas noteikšana, ja tā pakļauta periodiskām vai impulsa veida iedarbēm. Piemēram, varam aplūkot vienkāršu RC virkni, kas pieslēgta EDS avotam (P.2.2. att.).



P.2.2. att. Piemēra elektriskā ķēde, ko veido rezistora, kondensatora un EDS avota virknes slēgums.

Augstāk parādītās shēmas spriegumus pirms RC slēguma un aiz tā iespējams izteikt šādā formā:

$$\dot{U}_y = \dot{I}R = \dot{U}_x R / (R + 1/j\omega C) = \dot{U}_x \dot{H}(j\omega), \quad (\text{P.2.37.})$$

kur \dot{U}_y – RC ķēdes izejas spriegums, V;

\dot{U}_x – RC ķēdes ieejas spriegums ($\dot{U}_x = \dot{E}$), V;

\dot{I} – RC ķēdē plūstošā strāva, A;

R – RC ķēdes rezistora pretestība, Ω ;

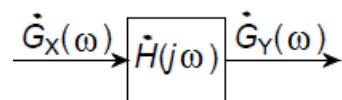
C – RC ķēdes kondensatora kapacitāte, F;

$\dot{H}(j\omega)$ – ķēdes pārvades funkcija.

Jāatzīmē, ka pārvades funkcija $\dot{H}(j\omega)$ nav atkarīga no ieejas signāla, un, pat ja ieejas signāls būs atainots nevis kā kompleksais skaitlis \dot{U}_x , bet kā spektrālā funkcija $\dot{G}_x(\omega)$, izejas signāla veids joprojām sakrītīs ar ieejā padotā signāla veidu un arī būs spektrālā funkcija [95], [103], [104], [106]:

$$\dot{G}_y(\omega) = \dot{G}_x(\omega) \dot{H}(j\omega). \quad (\text{P.2.38.})$$

Attiecīgi vispārīgā veidā pārvades funkcija nosaka ieejas signāla spektrālās funkcijas izmaiņas, kuras būs novērojamas ķēdes ietekmes dēļ, kā tas parādīts P.2.3. attēlā.



P.2.3. att. Pārvades funkcijas ietekme uz ieejas signāla spektrālo funkciju [95], [106].

Izejas sprieguma signāla vērtības $u_y(t)$ šādā gadījumā iespējams iegūt no spektrālās funkcijas $\dot{G}_y(\omega)$, lietojot apgriezto Furjē transformāciju:

$$u_y(t) = (1/2\pi) \int_{-\infty}^{\infty} \dot{G}_y(\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (\text{P.2.39.})$$

Daži signāli (parasti tādi, kuri satur momentānas jeb lēcienveidīgas vērtību izmaiņas), piemēram, taisnstūra formas viļņa signāls un ieslēgšanas funkcija [12], [103]:

$$1(t) = \begin{cases} 0, & \text{ja } t < 0 \text{ s,} \\ 1, & \text{ja } t \geq 0 \text{ s,} \end{cases} \quad (\text{P.2.40.})$$

neatbilst Dirihlē teorēmas nosacījumiem ((P.2.11.) un/vai (P.2.12.)). Tādēļ šādiem signāliem nav iespējams precīzi veikt Furjē transformāciju vai izvedumu Furjē rindā. Minētajiem

signāliem iespējams lietot vispārinātu Furjē transformācijas veidu – Laplasa transformāciju [12], [103]. Iepriekš minētajiem signāliem spektrālā funkcija (P.2.35.) nesatur labo robežu, bet to iespējams mākslīgi radīt, oriģinālo signālu reizinot ar eksponenti e^{-ct} [12], [95], [103]:

$$\dot{G}_u(\omega, c) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) e^{-ct} e^{-j\omega t} dt, \quad (\text{P.2.41.})$$

kur c – papildu konstante.

Tādā veidā iespējams iegūt šī signāla attēlu kompleksās frekvences $p = c + j\omega$ telpā [12], [95], [103]:

$$\dot{G}_u(\omega, c) = \int_0^{\infty} u(t) e^{-(c+j\omega)t} dt, \quad (\text{P.2.42.})$$

jeb

$$U(p) = \dot{G}_u(p) = \int_0^{\infty} u(t) e^{-pt} dt. \quad (\text{P.2.43.})$$

Spektrālo funkciju kompleksās frekvences telpā $U(p)$ sauc par oriģinālās funkcijas vai signāla $u(t)$ attēlu Laplasa telpā vai vienkārši par attēlu. Apgrieztā transformācija, kas ļauj iegūt laika signālu no tā attēla, ir šāda [12], [95], [103]:

$$\begin{aligned} u(t) &= (1/2\pi j) \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} \dot{G}_u(c+j\omega) e^{(c+j\omega)t} d(c+j\omega) = \\ &= (1/2\pi j) \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} U(p) e^{pt} dp. \end{aligned} \quad (\text{P.2.44.})$$

Literatūrā (P.2.44.) tiek saukts par Mellina integrāli, un tā noteikšanai lieto dažādas skaitliskās integrēšanas metodes.

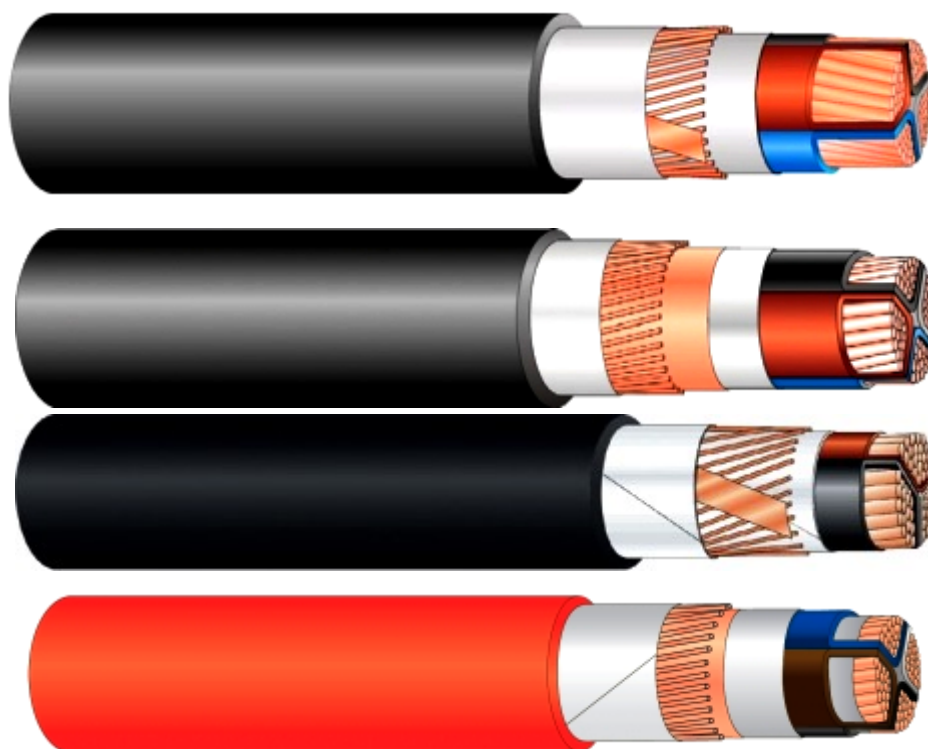
Ņemot vērā, ka Laplasa transformācija ir vispārināta Furjē transformācijas forma, Furjē transformācijai iespējams izmantot arī Laplasa transformācijas īpašības (linearitāte, reizinājums ar konstanti u. c.), kas kopā ar Laplasa transformāciju detalizētāk aprakstītas 9. nodaļā. Minētās īpašības lietojamas, aizstājot mainīgo p ar frekvenci ω , Laplasa transformācijas apzīmējumu $L[f(t)]$ ar Furjē transformācijas apzīmējumu $F[f(t)]$ un attēlu Laplasa telpā $U(p)$ ar spektrālo funkciju $\dot{G}(\omega)$ [95], [103].

3. pielikums

Kabeļu fāzes vadu īpatnējās aktīvās līdzstrāvas pretestības dažādu materiālu vadiem un dažādiem IEC 60228 norādītajiem nominālajiem vadītāju šķērsriezuma laukumiem pie 20 °C [42], [107]

SŠK, mm ²	R _{DC} , Ω/km		
	Cu	Cu ar metāla pārklājumu	Al ar metālisku pārklājumu vai bez tā
0,5	36,0000	36,7000	–
0,75	24,5000	24,8000	–
1	18,1000	18,2000	–
1,5	12,1000	12,2000	–
2,5	7,4000	7,5600	–
4	4,6100	4,7000	7,4100
6	3,0800	3,1100	4,6100
10	1,8300	1,8400	3,0800
16	1,1500	1,1600	1,9100
25	0,7270	0,7340	1,2000
35	0,5240	0,5290	0,8680
50	0,3870	0,3910	0,6410
70	0,2680	0,2700	0,4430
95	0,1930	0,1950	0,3200
120	0,1530	0,1540	0,2530
150	0,1240	0,1260	0,2060
185	0,0991	0,1000	0,1640
240	0,0754	0,0762	0,1250
300	0,0601	0,0607	0,1000
400	0,0470	0,0475	0,0778
500	0,0366	0,0369	0,0605
630	0,0283	0,0286	0,0469
800	0,0221	0,0224	0,0367
1000	0,0176	0,0177	0,0291

Zemsprieguma kabeļu dati



P.4.1. att. MCMK, EMCMK, XCMK–HF un FRHF–EMC tipa trīsfāžu kabeļi ar Cu fāžu vadiem [108].

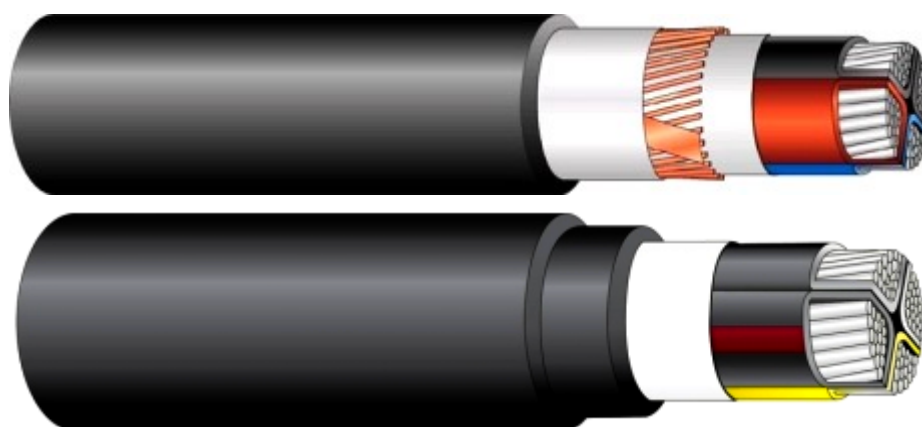
P.4.1. tabula

MCMK un EMCMK tipa 0,6/1 kV trīsfāžu kabeļu ar trīs vadiem darba (TS un PS) induktivitātes un kapacitātes vērtības [108]

Kabeļa vadu un ekrāna $S_{\text{ŠK}}$, mm ²	MCMK tipa kabeļi		EMCMK tipa kabeļi	
	C , μF/km	L , mH/km	C , μF/km	L , mH/km
3x16/16	0,350	0,300	–	–
3x25/16	0,450	0,260	0,400	0,190
3x35/16	0,500	0,240	0,400	0,190
3x50/25	0,600	0,220	0,450	0,180
3x70/35	0,650	0,200	0,500	0,170
3x95/50	0,700	0,180	0,550	0,160
3x120/70	0,750	0,170	0,600	0,150
3x150/70	0,750	0,160	0,700	0,140
3x185/95	0,750	0,150	0,800	0,120
3x240/120	0,750	0,150	0,850	0,120

MCMK, EMCMK, XCMK–HF un FRHF–EMC tipa 0,6/1 kV trīsfažu kabeļu ar četriem vadiem darba (TS un PS) induktivitātes un kapacitātes vērtības [108]

Kabeļa vadu un ekrāna Sšķ, mm ²	MCMK tipa kabeļi		EMCMK tipa kabeļi		XCMK–HF tipa kabeļi		FRHF–EMC tipa kabeļi	
	C, μF/km	L, mH/km	C, μF/km	L, mH/km	C, μF/km	L, mH/km	C, μF/km	L, mH/km
4x16/16	0,300	0,300	–	–	0,250	0,270	0,200	0,310
4x25/16	0,350	0,270	0,450	0,230	–	–	0,200	0,280
4x35/16	0,450	0,260	0,500	0,220	0,300	0,250	0,200	0,260
4x50/25	0,500	0,240	0,550	0,200	0,350	0,230	0,250	0,240
4x70/35	0,550	0,240	0,600	0,190	0,400	0,190	0,300	0,220
4x95/50	0,650	0,230	0,650	0,170	–	–	0,300	0,190
4x120/70	0,700	0,230	0,700	0,160	0,450	0,160	0,350	0,180
4x150/70	0,750	0,230	0,750	0,160	–	–	0,350	0,180
4x185/95	0,800	0,220	0,800	0,150	0,500	0,140	0,400	0,170
4x240/120	0,850	0,220	0,850	0,150	0,550	0,120	0,500	0,170



P.4.2. att. AMCMK, AXMK un AMCMK–HF tipa trīsfažu kabeļi ar Al vadiem [108].

P.4.3. tabula

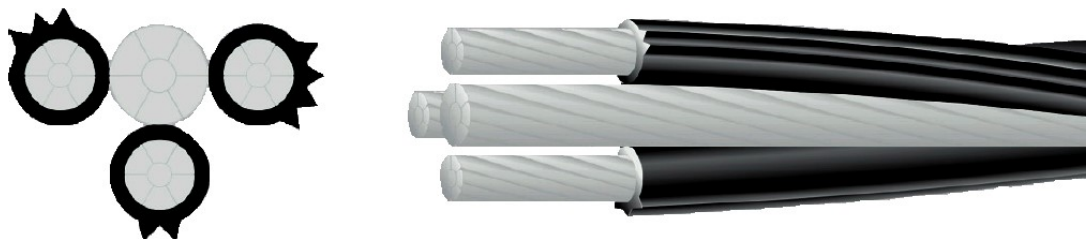
AMCMK tipa 0,6/1 kV trīsfažu kabeļu ar trīs vadiem darba (TS un PS) induktivitātes un kapacitātes vērtības [108]

Kabeļa vadu un ekrāna $S_{šķ}$, mm ²	AMCMK tipa kabeļi	
	C , μF/km	L , mH/km
3x16/10	0,300	0,300
3x25/16	0,350	0,270
3x35/16	0,450	0,250
3x50/16	0,500	0,240
3x70/21	0,550	0,230
3x95/29	0,600	0,210
3x120/40	0,650	0,190
3x150/41	0,700	0,180
3x185/57	0,750	0,170
3x240/72	0,750	0,160
3x300/88	0,800	0,150

P.4.4. tabula

AMCMK, AXMK un AMCMK–HF tipa 0,6/1 kV trīsfažu kabeļu ar četriem vadiem darba (TS un PS) induktivitātes un kapacitātes vērtības [108]

Kabeļa vadu un ekrāna $S_{šķ}$, mm ²	AMCMK tipa kabeļi		AXMK tipa kabeļi (bez ekrāna)		AMCMK–HF tipa kabeļi	
	C , μF/km	L , mH/km	C , μF/km	L , mH/km	C , μF/km	L , mH/km
4x16/10	–	–	0,200	0,290	–	–
4x25/16	0,400	0,280	0,200	0,290	–	–
4x35/16	0,400	0,270	0,200	0,290	0,350	0,250
4x50/16	0,450	0,270	0,250	0,290	–	–
4x70/21	0,550	0,240	0,250	0,250	0,40	0,220
4x95/29	0,550	0,240	0,250	0,300	–	–
4x120/41	0,650	0,220	0,300	0,300	0,450	0,190
4x150/41	0,650	0,210	0,300	0,300	–	–
4x185/57	0,700	0,190	0,300	0,300	0,500	0,170
4x240/72	0,700	0,180	0,300	0,300	0,550	0,150
4x300/88	0,700	0,170	0,350	0,350	–	–



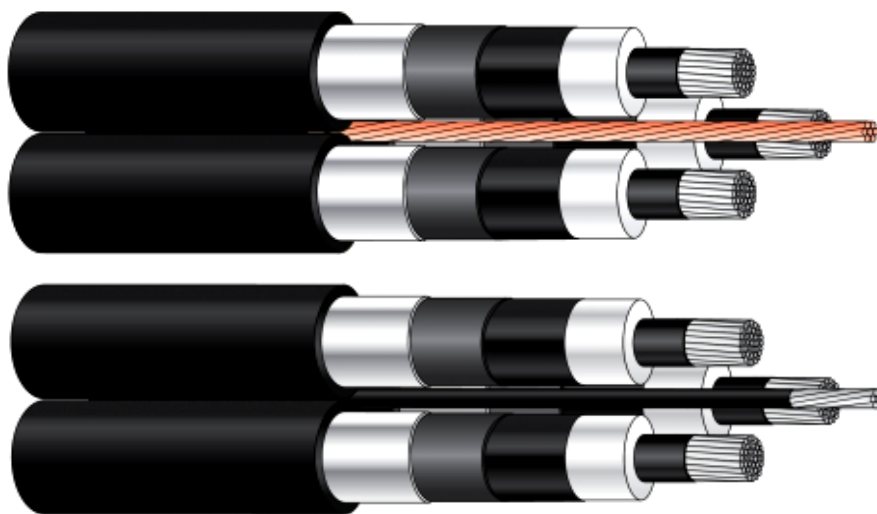
P.4.3. att. AMKA tipa trīs fāžu piekarkabelis ar Al vadiem un tā šķērsriezums [109].

P.4.5. tabula

AMKA tipa 0,6/1 kV trīs fāžu piekarkabeļu fāžu un PEN vada aktīvas pretestības pie 20°C un darba (TS un PS) induktivitātes vērtības [109]

Kabeļa fāzes un PEN vada $S_{\text{ŠK}}$, mm^2	R_F , Ω/km	R_{PEN} , Ω/km	L , mH/km
1x16+25	1,910	1,380	0,290
3x16+25	1,910	1,380	0,350
3x25+35	1,200	0,986	0,340
3x35+50	0,868	0,720	0,340
3x50+70	0,641	0,493	0,330
3x70+95	0,443	0,363	0,310
3x120+95	0,253	0,363	0,300

Vidsprieguma kabeļu dati



P.5.1. att. AHXAMK–W un AHXAMK–WM tipa 10 kV un 20 kV trīsfāžu piekarkabeļi ar Al vadiem un Cu (35 mm²) vai Al (62 mm²) centrālo vadu [108].

P.5.1. tabula

AHXAMK–W un AHXAMK–WM tipa 10 kV trīsfāžu piekarkabeļu fāžu vadu aktīvas pretestības pie 20°C un darba (TS un PS) induktivitātes un kapacitātes vērtības [108]

Kabeļa fāzes vadu un centrālā vada $S_{\text{šķ}}$, mm ²	AHXAMK–W tipa 10 kV kabeļi			AHXAMK–WM tipa 10 kV kabeļi		
	R , Ω/km	L , mH/km	C , μF/km	R , Ω/km	L , mH/km	C , μF/km
3x50+(35/62)	–	–	–	0,641	0,390	0,260
3x70+(35/62)	0,443	0,390	0,260	0,443	0,370	0,260
3x95+(35/62)	0,320	0,370	0,290	0,320	0,350	0,290
3x120+(35/62)	0,253	0,350	0,320	0,253	0,340	0,320
3x150+(35/62)	0,206	0,340	0,350	0,206	0,330	0,350
3x185+(35/62)	0,164	0,340	0,380	0,164	0,320	0,380
3x240+(35/62)	0,125	0,320	0,430	0,125	0,300	0,430
3x300+(35/62)	0,100	0,310	0,470	–	–	–

AHXAMK–W un AHXAMK–WM tipa 20 kV trīsfāžu piekarkabeļu fāžu vadu aktīvas pretestības pie 20°C un darba (TS un PS) induktivitātes un kapacitātes vērtības [108]

Kabeļa fāzes vadu un centrālā vada $S_{\text{šķ}}$, mm ²	AHXAMK–W tipa 20 kV kabeļi			AHXAMK–WM tipa 20 kV kabeļi		
	R , Ω/km	L , mH/km	C , μF/km	R , Ω/km	L , mH/km	C , μF/km
3x50+(35/62)	–	–	–	0,641	0,430	0,260
3x70+(35/62)	0,443	0,420	0,180	0,443	0,400	0,260
3x95+(35/62)	0,320	0,400	0,200	0,320	0,390	0,290
3x120+(35/62)	0,253	0,380	0,220	0,253	0,370	0,320
3x150+(35/62)	0,206	0,370	0,230	0,206	0,300	0,350
3x185+(35/62)	0,164	0,350	0,260	0,164	0,300	–
3x240+(35/62)	0,125	0,340	0,290	0,125	–	–



P.5.2. att. 10/12 kV un 18/30 kV trīsfāžu kabeļi ar Cu fāzes vadiem un XPLE izolāciju [107].

P.5.3. tabula

10/12 kV trīs vienfāzes un trīsfāžu kabeļu ar *XPLE* izolāciju darba (TS un PS) induktivitātes un kapacitātes vērtības [107]

Kabeļa fāžu vadu $S_{\text{šk}}$, mm^2	10/12 kV vienfāzes kabeļi ar Cu ekrāniem			10/12 kV trīsfāžu ekranēti kabeļi bruņu apvalkā	
	Trīsstūra konfigurācija L , mH/km	Horizontāla konfigurācija L , mH/km	C , $\mu\text{F}/\text{km}$	L , mH/km	C , $\mu\text{F}/\text{km}$
25	–	–	–	0,442	0,170
35	–	–	–	0,414	0,180
50	0,439	0,611	0,190	0,395	0,200
70	0,417	0,589	0,220	0,376	0,220
95	0,395	0,567	0,240	0,353	0,240
120	0,379	0,551	0,260	0,341	0,260
150	0,369	0,541	0,280	0,331	0,280
185	0,360	0,525	0,300	0,321	0,310
240	0,344	0,512	0,340	0,309	0,340
300	0,331	0,503	0,370	0,299	0,370
400	0,321	0,493	0,400	0,286	0,410
500	0,309	0,484	0,440	–	–
630	0,299	0,474	0,490	–	–

P.5.4. tabula

18/30 kV trīs vienfāzes un trīsfāžu kabeļu ar *XPLE* izolāciju darba (TS un PS) induktivitātes un kapacitātes vērtības [107]

Kabeļa fāžu vadu $S_{\text{šk}}$, mm^2	18/30 kV vienfāzes kabeļi ar Cu ekrāniem			18/30 kV trīsfāžu ekranēti kabeļi bruņu apvalkā	
	Trīsstūra konfigurācija L , mH/km	Vienas plaknes konfigurācija L , mH/km	C , $\mu\text{F}/\text{km}$	L , mH/km	C , $\mu\text{F}/\text{km}$
70	0,455	0,618	0,160	0,430	0,160
95	0,427	0,602	0,180	0,404	0,180
120	0,411	0,586	0,190	0,388	0,190
150	0,398	0,567	0,210	0,376	0,210
185	0,385	0,554	0,220	0,363	0,220
240	0,369	0,538	0,250	0,347	0,240
300	0,357	0,528	0,270	0,334	0,260
400	0,341	0,516	0,290	–	–
500	0,331	0,503	0,320	–	–
630	0,315	0,493	0,350	–	–
800	0,302	0,481	0,400	–	–



P.5.3. att. АСБЛ un ААБ2Л типа 10 kV trīsfāžu kabeļi ar Al vadiem un papīra izolāciju [110], [111].

P.5.5. tabula

ААБ–10, АСБ–10, ААБ2Л–10 типа 10 kV trīsfāžu kabeļu ar papīra vai papīra–eļļas izolāciju un Al vadiem TS fāžu aktīvās pretestības pie 20°C, induktivitātes un kapacitātes un NS kapacitātes vērtības no prakses datiem

ААБ–10, АСБ–10, ААБ2Л–10				
Kabeļa fāžu vadu $S_{\text{шк}}$, mm ²	R^1 , Ω/km	L^1 , mH/km	C^1 , μF/km	C^0 , μF/km
35	0,890	0,302	0,270	0,124
50	0,620	0,286	0,290	0,142
70	0,443	0,274	0,310	0,165
95	0,326	0,264	0,350	0,192
120	0,258	0,258	0,370	0,215
150	0,206	0,251	0,440	0,238
185	0,167	0,245	0,450	0,262
240	0,129	0,239	0,460	0,292



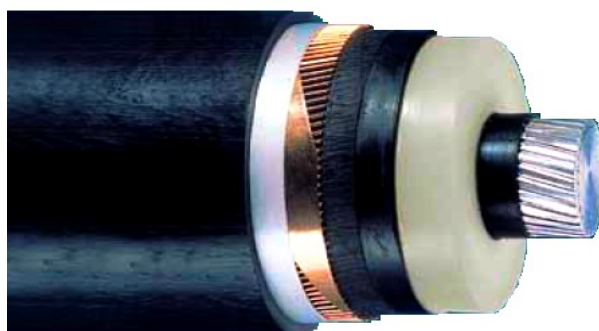
P.5.4. att. OCB–20 tipa 20 kV trīsfažu kabeļi ar Cu vadiem un papīra izolāciju [112].

P.5.6. tabula

OCB–20, CB–10 un CKJI–10 tipa 20 kV un 10 kV trīsfažu kabeļu ar papīra vai papīra–eļļas izolāciju un Cu vadiem TS fāžu aktīvās pretestības pie 20°C, induktivitātes un kapacitātes un NS kapacitātes vērtības no prakses datiem

Kabeļa tips	Kabeļa fāžu vadu $S_{\text{šk}}$, mm^2	R^1 , Ω/km	L^1 , mH/km	C^1 , $\mu\text{F}/\text{km}$	C^0 , $\mu\text{F}/\text{km}$
OCB–20	25	0,740	0,430	0,170	0,170
	35	0,520	0,411	0,190	0,190
	50	0,370	0,379	0,210	0,210
	70	0,256	0,369	0,240	0,240
	95	0,194	0,350	0,270	0,270
	120	0,153	0,341	0,320	0,320
	150	0,122	0,331	0,350	0,350
CB–10	185	0,099	0,321	0,380	0,380
	25	0,740	0,290	0,280	0,137
	35	0,520	0,277	0,310	0,158
	50	0,370	0,264	0,360	0,183
	70	0,256	0,255	0,400	0,214
	95	0,194	0,248	0,420	0,247
	120	0,153	0,242	0,460	0,278
	150	0,122	0,236	0,510	0,311
	185	0,099	0,232	0,530	0,343
CKJI–10	240	0,077	0,226	0,580	0,383
	50	0,370	0,286	0,290	0,142
	70	0,260	0,274	0,310	0,165
	120	0,153	0,242	0,460	0,278
	150	0,122	0,236	0,510	0,311
	185	0,099	0,229	0,530	0,343

Augstsprieguma kabeļu dati



P.6. att. 110 kV, 220 kV un 330 kV vienfāzes kabelis ar Al fāzes vadu un *XLPE* izolāciju [42].

P.6.1. tabula

110 kV trīs vienfāzes kabeļu ar *XLPE* izolāciju darba (TS un PS) induktivitātes un kapacitātes vērtības [42]

Kabeļa fāzes vadu $S_{\text{šk}}$, mm^2	Trīsstūra konfigurācija L^1 , mH/km	Horizontāla konfigurācija L^1 , mH/km	C^1 , $\mu\text{F}/\text{km}$
185	0,470	0,660	0,140
240	0,440	0,630	0,150
300	0,420	0,610	0,170
400	0,390	0,590	0,200
500	0,380	0,570	0,220
630	0,370	0,550	0,240
800	0,350	0,530	0,260
1000	0,340	0,510	0,280
1200	0,340	0,500	0,320
1400	0,330	0,490	0,340
1600	0,320	0,480	0,360
2000	0,310	0,460	0,380
2500	0,300	0,450	0,420

P.6.2. tabula

220 kV trīs vienfāzes kabeļu ar *XPLE* izolāciju darba (TS un PS) induktivitātes un kapacitātes vērtības [42]

Kabeļa fāzes vadu $S_{\text{šk}}$, mm^2	Trīsstūra konfigurācija L^1 , mH/km	Horizontāla konfigurācija L^1 , mH/km	C^1 , $\mu\text{F}/\text{km}$
500	0,440	0,600	0,140
630	0,420	0,580	0,160
800	0,410	0,560	0,170
1000	0,390	0,540	0,190
1200	0,380	0,520	0,210
1400	0,370	0,510	0,220
1600	0,360	0,500	0,230
2000	0,350	0,490	0,240
2500	0,340	0,470	0,270

P.6.3. tabula

330 kV trīs vienfāzes kabeļu ar *XPLE* izolāciju darba (TS un PS) induktivitātes un kapacitātes vērtības [42]

Kabeļa fāzes vadu $S_{\text{šk}}$, mm^2	Trīsstūra konfigurācija L^1 , mH/km	Horizontāla konfigurācija L^1 , mH/km	C^1 , $\mu\text{F}/\text{km}$
630	0,440	0,590	0,140
800	0,420	0,570	0,150
1000	0,400	0,550	0,170
1200	0,390	0,530	0,190
1400	0,380	0,520	0,200
1600	0,370	0,510	0,210
2000	0,360	0,490	0,230
2500	0,350	0,480	0,250

Neitrāļu režīmi, to īpašības un realizācija

Neitrāļu režīmi un to īpašības [18], [49], [113]–[123]

Neitrāles režīms	U_N , kV	Priekšrocības	Trūkumi	Citi komentāri
Cieši zemēta neitrāle (angļu val. <i>solidly earthed neutral</i>)	0,23; 0,4; 0,69; 110; 330	<ul style="list-style-type: none"> • Elektriskais nullpunkts ir fiksēts, un nesimetriskas slodzes gadījumā fāžu spriegumu nobīdes ir minimālas; • zemesslēgumi neizsauc nozīmīgus pārspriegumus, izņemot vienfāzes automātiskās atkalieslēgšanas iekārtu darbības laikā, kad iespējami pārspriegumi līdz $2,5 U_{fmax}$; • bojājuma gadījumā barošana atslēdzas gandrīz momentāni; • lielo zemesslēguma strāvu stipruma dēļ ($I_Z = 3I^0 > 500 \text{ A}$) vieglāk nodrošināt zemesslēguma aizsardzību jutību; • zemas prasības elektrisko mašīnu (transformatori, ģeneratoru u. c.) izolācijai neitrālēs tuvumā (var izmantot pakāpenisku jeb gradientu izolācijas struktūru). 	<ul style="list-style-type: none"> • Zemesslēgumi ir jāatslēdz maksimāli ātri, lielo bojājuma strāvu stiprumu termiskās un dinamiskās iedarbības, lielā pieskarsprieguma uz transformatora zemējuma kontūra un soļa sprieguma BV dēļ, kas neļauj uzturēt līnijas darbību līdz tās remontam; • lielākas izbūves izmaksas nekā izolētas neitrāles tīklam (piemēram, 0,4 kV tīklā līnijām vajag vismaz vienu <i>PEN</i> vadu). 	<ul style="list-style-type: none"> • Izveido, bez papildu pretestības savienojot visu transformatoru un/vai ģeneratoru neitrāles ar zemi; • 0,4 kV tīklos izmanto vairākus cieši zemētas neitrāles paveidus jeb sistēmas atkarībā no neitrālvada un aizsargvada realizācijas atbilstoši drošības prasībām (piemēram, TN–S jeb piecvadu sistēma ar atdalīto zemēšanas vadu; TN–C jeb četrvadu sistēma, kur aizsargvadu apvieno ar neitrāles vadu kopīgā <i>PEN</i> vadā u. c.); • 110 kV tīklos mēdz izmantot arī efektīvi zemētu neitrāli.

Neitrāles režīms	U_N , kV	Priekšrocības	Trūkumi	Citi komentāri
Efektīvi zemēta neitrāle (angļu val. <i>effectively earthed neutral</i>)	110	<ul style="list-style-type: none"> • Elektriskais nullpunkts ir praktiski fiksēts, un nesimetriskas slodzes gadījumā fāžu spriegumu nobīdes ir nelielas; • zemesslēgumi izsauc ierobežota lieluma pārspriegumus, izņemot vienfāzes automātiskās atkalieslēgšanas iekārtu darbības laikā, kur iespējami pārspriegumi līdz $2,5 U_{fmax}$; • lielo zemesslēguma strāvu stipruma dēļ ($I_Z = 3I^0 > 500 \text{ A}$) vieglāk nodrošināt zemesslēguma aizsardzību jutību; • zemesslēguma strāvas stiprums ir mazāks nekā tīklā ar cieši zemētu neitrāli, kas samazina prasības komutācijas aparātiem. 	<ul style="list-style-type: none"> • Zemesslēgumi ir jāatslēdz maksimāli ātri, lielo bojājuma strāvu stiprumu termiskās un dinamiskās iedarbības, lielā pieskarsprieguma uz transformatora zemējuma kontūra un soļa sprieguma BV dēļ, kas neļauj uzturēt līnijas darbību līdz tās remontam; • lielākas izbūves izmaksas nekā tīklā ar izolētu neitrāli (vismaz daļai transformatoru jāizveido zemējums un zemesslēguma strāvu stipruma dēļ zemēšanas iekārtas ir salīdzinoši dārgākas), bet vienlaikus zemēšanas iekārtu skaits būs mazāks un zemesslēguma strāvas būs zemākas nekā cieši zemētai neitrālei, kas daļēji samazina kopējās zemēšanas sistēmas izmaksas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Izveido, ar papildu pretestību vai bez tās, savienojot daļu no transformatoru vai ģeneratoru neitrālēm ar zemi; • tīklu uzskata par efektīvi zemētu, ja zemēta daļa no transformatoru neitrālēm un zemesslēguma koeficients (attiecība starp lielāko no veselo fāžu spriegumiem BV vienfāzes īsslēgumu laikā un šīs fāzes spriegumu pirms bojājuma) nepārsniedz 1,4; • nereti efektīvi zemētas neitrāles režīmu izmanto, lai garantētu barošanas centru apakšstacijās, kur ir sazemētas 330/100 kV autotransformatoru neitrāles, uzstādītās zemesslēgumu aizsardzības jutīgumu tīklos ar vienkāršotas uzbūves apakšstacijām (bez jaudas slēdžiem), jo, izolējot neitrāles slodžu atzarojumu transformatoriem (110/20 (10) kV), tiek garantēts NS aizvietošanas shēmas nemainīgums zemesslēguma laikā.

Neitrāles režīms	U _N , kV	Priekšrocības	Trūkumi	Citi komentāri
Izolēta neitrāle (angļu val. <i>isolated neutral</i>)	0,23 1; 6; 10; 20; (35)	<ul style="list-style-type: none"> • Mazo kapacitatīvo zemesslēguma strāvu stipruma dēļ ir mazs risks radīt īsslēgtās fāzes vada nopietnus termiskus bojājumus, un BV veidojas salīdzinoši neliels soļa spriegums, kā rezultātā pieļaujams ilglaicīgi turpināt elektroapgādi pa bojāto līniju; • mazais zemesslēgumu strāvu stiprums ļauj vienkāršot zemējuma iekārtu izbūvi; • pie ļoti maza zemesslēgumu strāvas stipruma tā elektriskais loks var pārtrūkt, momentānajai strāvas stipruma vērtībai pārejot nulles punktu, kas var novest pie zemesslēguma pašlikvidācijas (praksē novērota arī izolācijas pašatjaunošanās eļļas–papīra kabeļiem). 	<ul style="list-style-type: none"> • Tīkla elektriskais nullpunkts nav fiksēts, un stabila zemesslēguma laikā nebojāto fāžu spriegums sasniedz līnijas jeb starpfāžu spriegumu un arī slodzes režīmam jāierobežo potenciālās nullpunkta nobīdes; • BV izveidojoties intermitējošam lokam, līnijas induktivitātēs un kapacitatīvajās vadītspējās radušās augstfrekvences svārstības var izsaukt pārspriegumus līdz pat 380 % no fāzes maksimālā sprieguma normālos apstākļos; • potenciālo pārspriegumu dēļ ir jāizmanto izolācija ar paaugstinātu izturību, lai novērstu jaunu bojājumu rašanos; • nepieciešama zemesslēgumu aizsardzība ar paaugstinātu jutību un nereti specializētas BVN ierīces; • darbā paliekošās līnijas bojājums joprojām var būt bīstams cilvēkiem, tādēļ izolētas neitrāles režīms nav rekomendējams apdzīvotās vietās izbūvētiem GL tīkliem. 	<ul style="list-style-type: none"> • Izolētas neitrāles režīms veidojas, ja šī tīkla pusē transformatoru tinumi saslēgti trīsstūra, vai zvaigznes slēgumā, neveicot zvaigznes slēguma nullpunkta zemēšanu; • izolētas neitrāles režīmu pieļaujams realizēt, ja kapacitatīvās zemesslēguma strāvas stiprums nepārsniedz 10–30 A (atkarībā no līniju balstu materiāla un nominālā sprieguma); • lieto galvenokārt VS tīklos, kurus veido GL, jo to īpatnējā kapacitāte ir 30–60 reizes mazāka nekā KL.

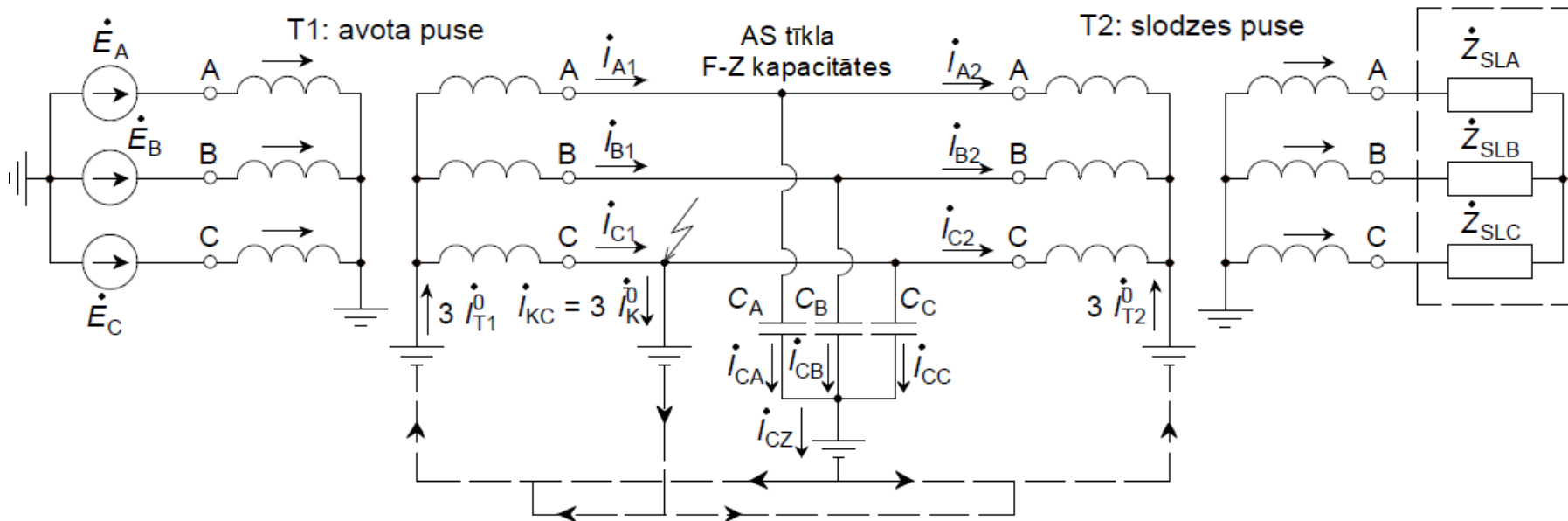
<p>Kompensēta (liel-induktīva) neitrāle (angļu val. <i>compensated neutral</i>)</p>	<p>6; 10; 20; (35)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mazo, kompensēto zemesslēguma strāvu stipruma dēļ ir mazs risks radīt īsslēgtās fāzes vada nopietnus termiskus bojājumus, un BV veidojas salīdzinoši neliels soļa spriegums, kā rezultātā pieļaujams turpināt elektroapgādi pa bojāto līniju līdz pat 8 h; • pie ļoti maza zemesslēgumu strāvas stipruma tā elektriskais loks var pārtrūkt, kas var novest pie zemesslēguma pašlikvidācijas; • mazais zemesslēgumu strāvu stiprums ļauj ietaupīt investīcijas zemējuma iekārtu izbūvē; • dod iespēju izvairīties no cieši vai efektīvi zemētas neitrāles lietošanas tīklos ar citādi lieliem kapacitatīvo zemesslēguma strāvu stipriem. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tīkla elektriskais nullpunkts nav fiksēts, un stabila zemesslēguma laikā nebojāto fāžu spriegums sasniedz līnijas jeb starpfāžu spriegumu un arī slodzes režīmam jāierobežo potenciālās nullpunkta nobīdes; • BV izveidojoties intermitējošam lokam, līnijas induktivitātēs un kapacitatīvajās vadītspējās radušās augstfrekvences svārstības var izsaukt pārspriegumus līdz pat 280 % no fāzes maksimālā sprieguma normālos apstākļos; • bīstami pārspriegumi (līdz 310 % un dažreiz pat 500 % no fāzes sprieguma normālos apstākļos) var veidoties arī kompensācijas izraisītas rezonanses dēļ; • potenciālo pārspriegumu dēļ ir jāizmanto izolācija ar paaugstinātu izturību, lai novērstu jaunu bojājumu rašanos; • nepieciešama speciāla (piemēram, trešās harmonikas) zemesslēgumu aizsardzība ar paaugstinātu jutību un nereti specializētas BVN ierīces. 	<ul style="list-style-type: none"> • Kompensētas neitrāles režīmu realizē, izolētas neitrāles tīkla barošanas centros pieslēdzot NT (slēgumu shēma Y_0/Δ vai Z_0 bez sekundārā tinuma), kura neitrālē ieslēdz zemētājreaktoru (Petersena spoli) ar lielu, vēlams, automātiski regulējamu induktivitāti; • zemētājreaktora spoli rekomendē noskaņot rezonanses režīmā, bet praksē, lai izvairītos no minētajiem pārspriegumiem, bieži to ieregulē režīmā ar pārkompensāciju līdz 5 % vai nepilnīgu kompensāciju, ja vienfāzes pārrāvuma gadījumā kapacitatīvās vadītspējas neizsauc elektriskā nullpunkta nobīdi par vairāk nekā 70 %; • zemētājreaktoram mēdz paredzēt pieslēdzamu šuntējošu zemējumu vai paralēlu rezistoru, vai arī ieslēgt šādu rezistoru reaktoram speciāli izveidotā sekundārā tinumā, kuru pieslēdz īslaicīgi pastāvīga zemesslēguma gadījumos, lai uzlabotu RA jutību un BVN indikatoru darbību, un dažreiz arī normālos darba režīmos, lai samazinātu iespējamās elektriskā nullpunkta nobīdes un rezonanses pārspriegumus; • lieto galvenokārt GL vai jauktos GL un KL tīklos, jo reaktors nespēj pilnībā novērst intermitējošo loku rašanos KL tīklos.
---	------------------------------------	--	--	---

Neitrāles režīms	U_N , kV	Priekšrocības	Trūkumi	Citi komentāri
Mazrezistīva jeb zemomīga neitrāle (angļu val. <i>low resistance neutral earthing</i>)	6; 10; 20	<ul style="list-style-type: none"> • Ievērojami samazina pārspriegumus, kas rodas zemesslēgumu dēļ, jo nullpunkta nobīdes ir nelielas, salīdzinot ar izolētu vai kompensētu neitrāli; • salīdzinoši lielo zemesslēguma strāvu stipruma dēļ vieglāk nodrošināt zemesslēguma aizsardzību jutību, un zemesslēgumu strāvas aktīvais raksturs atvieglo virzītas zemesslēguma aizsardzības darbību; • zemesslēguma aizsardzības ātrā nostrāde ievērojami samazina jaunu izolācijas caursišanu risku KL tīklos; • samazina ilgstoša zemesslēguma radīto risku cilvēku un citu iekārtu drošībai; • bieži iespējams izmantot esošos NT, kas izbūvēti kompensētas neitrāles realizācijai. 	<ul style="list-style-type: none"> • Zemesslēgumi ir jāatslēdz maksimāli ātri lielo bojājuma strāvu stiprumu termiskās un dinamiskās iedarbības dēļ, kas neļauj uzturēt līnijas darbību līdz tās remontam; • lielākas izbūves izmaksas nekā izolētas neitrāles režīmam (jānodrošina maza zemesslēguma strāvas atgriešanās ceļu pretestība). 	<ul style="list-style-type: none"> • Mazrezistīvas neitrāles režīmu izveido, izolētas neitrāles tīkla barošanas centros pieslēdzot NT (slēgumu shēma Y_0/Δ vai Z_0 bez sekundārā tinuma), kura neitrālē ieslēdz zemēšanas rezistoru vai zemētājreaktoru, kura sekundārajā tinumā ieslēdz rezistoru; • svarīgi, lai zemei paralēlie zemesslēguma strāvas noslēgšanās ceļi (bieži zemēti KL ekrāni, bruņu apvalki un paralēlo 0,4 kV līniju PEN vadi un ekrāni) būtu ar mazu pretestību, jo mazrezistīvu neitrāli pieļaujams lietot, ja caur transformatora neitrāles zemēšanas kontūru plūstošā strāva nerada pieskarspriegumu, kas pārsniedz 80 V; • rezistora pretestību izraugās tādā veidā, lai tā strāvas stiprums nepārsniedz 1 kA, bet praksē to mēdz iestatīt, lai zemesslēguma strāvas stiprums būtu 400–600 A, lai mazinātu kabeļa smagas izdegšanas risku un samazinātu pieskarspriegumu uz NT zemēšanas kontūra.

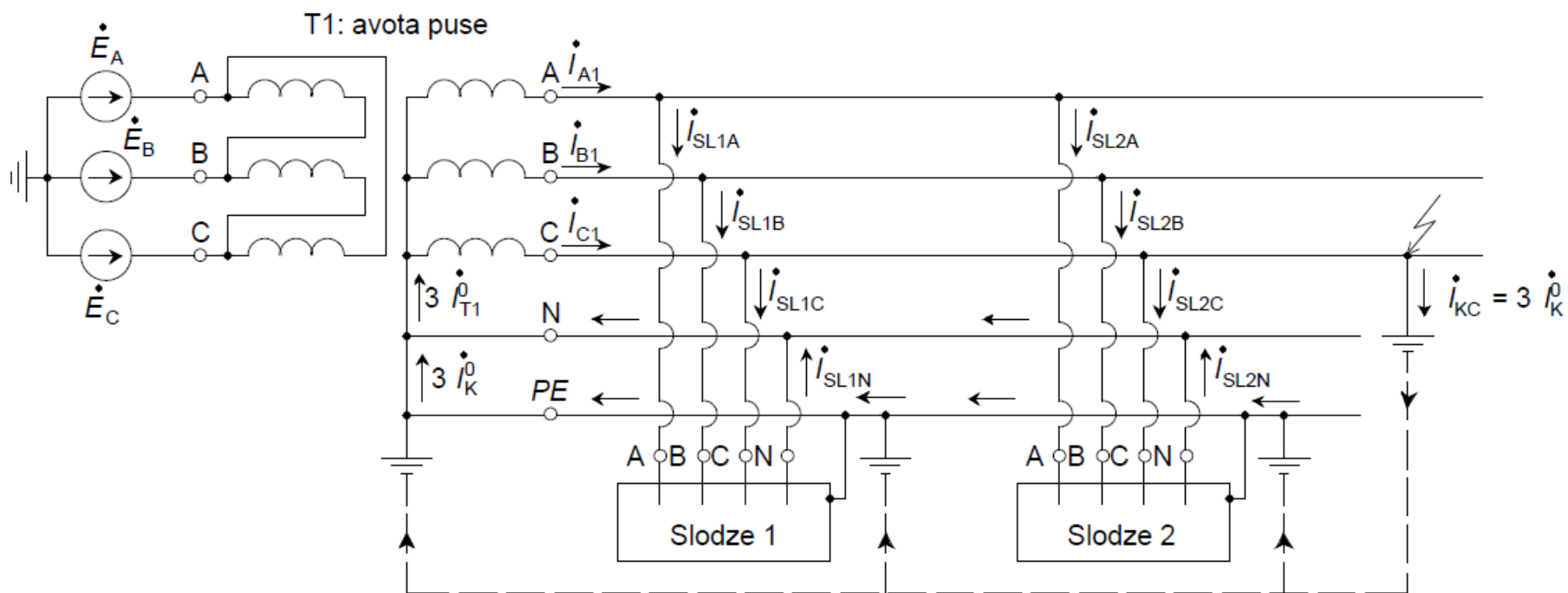
Neitrāles režīms	U _N , kV	Priekšrocības	Trūkumi	Citi komentāri
Lielrezistīva (lielomīga) neitrāle (angļu val. <i>high resistance neutral earthing</i>)	0,48–35	<ul style="list-style-type: none"> • Samazinātā zemesslēguma strāvas stipruma dēļ bojājuma vietā veidojas mazs pieskarspriegums, kas dod iespēju noteiktu laiku turpināt iekārtu darbību, pirms bojājums jāatslēdz; • slāpē zemesslēgumu radītās augstfrekvences svārstības un ierobežo pārspriegumus līdz 250 % no nominālā F–Z sprieguma; • mazais zemesslēgumu strāvu stiprums ļauj ietaupīt investīcijas zemējuma iekārtu izbūvē; • zemesslēguma strāvas aktīvais raksturs atvieglo virzītas zemesslēgumu aizsardzības darbību. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tīkla elektriskais nullpunkts nav fiksēts, un stabila zemesslēguma laikā nebojāto fāžu spriegums sasniedz līnijas jeb starpfāžu spriegumu un arī slodzes režīmam jāierobežo iespējamās nullpunkta nobīdes; • potenciālo pārspriegumu dēļ ir jāizmanto izolācija ar paaugstinātu izturību, lai novērstu jaunu bojājumu rašanos; • lietojams galvenokārt nelieliem tīkliem, kuru kapacitāto zemesslēgumu strāvu stiprumi parasti nepārsniedz 10 A, un nav lietderīgi izmantot Petersena spoli. 	<ul style="list-style-type: none"> • Lielrezistīvas neitrāles režīmu izveido, ieslēdzot rezistoru starp transformatora un/vai ģenerators zvaigznes tinuma nullpunktu un zemi vai NT neitrālē ieslēgta zemētājreaktora sekundārajā tinumā, vai NT sekundārajā tinumā, kas izveidots atvērtā trīsstūra slēgumā; • rezistora pretestību izvēlas tā, lai neitrālē ieslēgtā aktīvā ekvivalentā pretestība būtu aptuveni vienāda ar tīkla kopējo kapacitāto vadītspēju ekvivalento pretestību; • visbiežāk lieto ražotnēm, kuru darbības tūlītēja pārtraukšana var būt bīstama, vai ģenerators–transformators blokiem, vai modernizējot tīklus ar izolētu neitrāli; • Latvijā šāds neitrāles režīms pagaidām nav izplatīts.

Neitrāles režīms	U_N , kV	Priekšrocības	Trūkumi	Citi komentāri
Mazinduktīva neitrāle (angļu val. <i>low inductance neutral earthing; low reactance neutral earthing</i>)	0,4; 0,66; 10,5; 13,8; (citi SG U_N); 110–330	<ul style="list-style-type: none"> •Ievērojami samazina ilgstošus pārspriegumus, kas rodas zemesslēgumu dēļ, jo nullpunkta nobīdes ir nelielas, salīdzinot ar izolētu vai kompensētu neitrāli; •ļauj ierobežot zemesslēgumu strāvas, lai neradītu pārmērīgus iekārtu bojājumus un ietaupītu komutācijas aparātu resursu; •salīdzinoši lielo zemesslēguma strāvu stipruma dēļ vieglāk nodrošināt zemesslēguma aizsardzību jutību. 	<ul style="list-style-type: none"> •Zemēšanas reaktors nespēj ierobežot zemesslēguma strāvu tik ļoti, kā mazrezistīva neitrāle vai neitrāles, kuras sazemētas ar lielu pretestību; •salīdzinoši lielo zemesslēgumu strāvas stiprumu dēļ zemēšanas ierīču izbūve ir dārgāka; •iespējami rezonanses pārspriegumi. 	<ul style="list-style-type: none"> •Mazinduktīvas neitrāles režīmu izveido, tīklam, kas citādi darbojas izolētas neitrāles režīmā, pieslēdzot NT, kas izveidots ar Z0 slēgumu bez papildu zemētājreaktora vai pretestībām NT neitrālē, vai arī ieslēdzot papildu reaktoru starp ģeneratora vai transformatora zvaigznes tinuma nullpunktu un zemi; •visbiežāk izmanto tieši ģeneratoru zemēšanai, vai transformatoru/autotransformatoru zemēšanai, ja to NS pretestība ir maza un jāierobežo zemesslēguma strāvas.

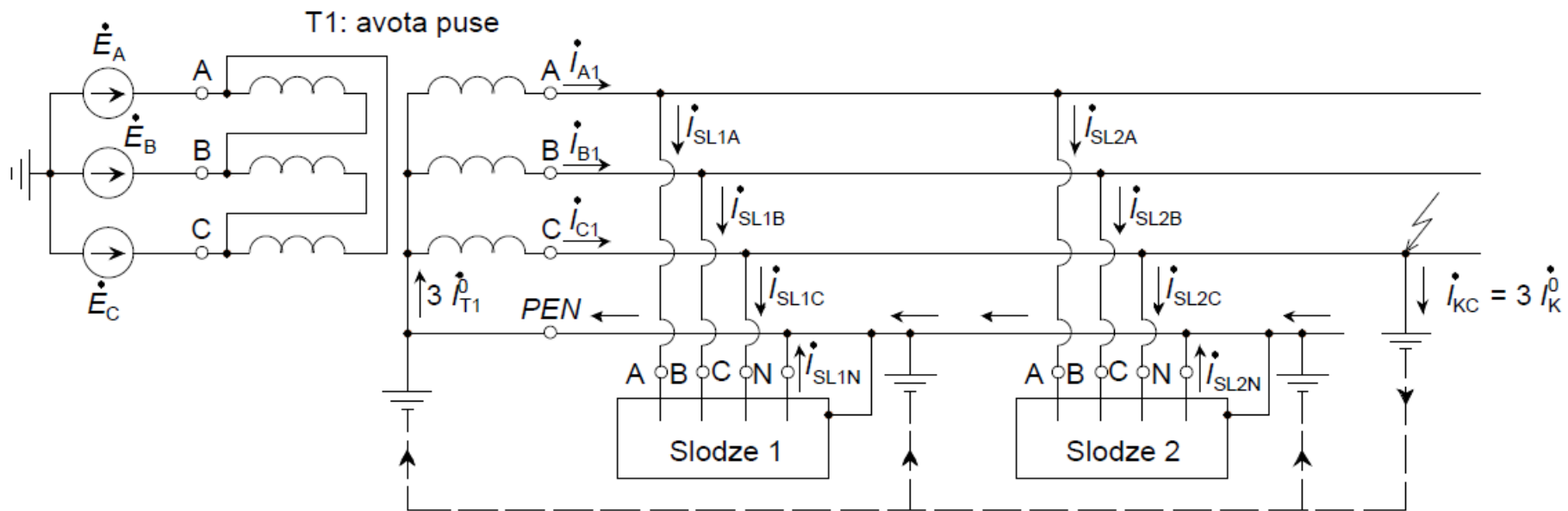
Turpinājumā tiks parādītas dažādu neitrāļu režīmu realizācijas shēmas fāžu koordinātās ar aptuveniem strāvu sadalījumiem zemesslēgumu laikā (P.7.1–P.7.13. att.).



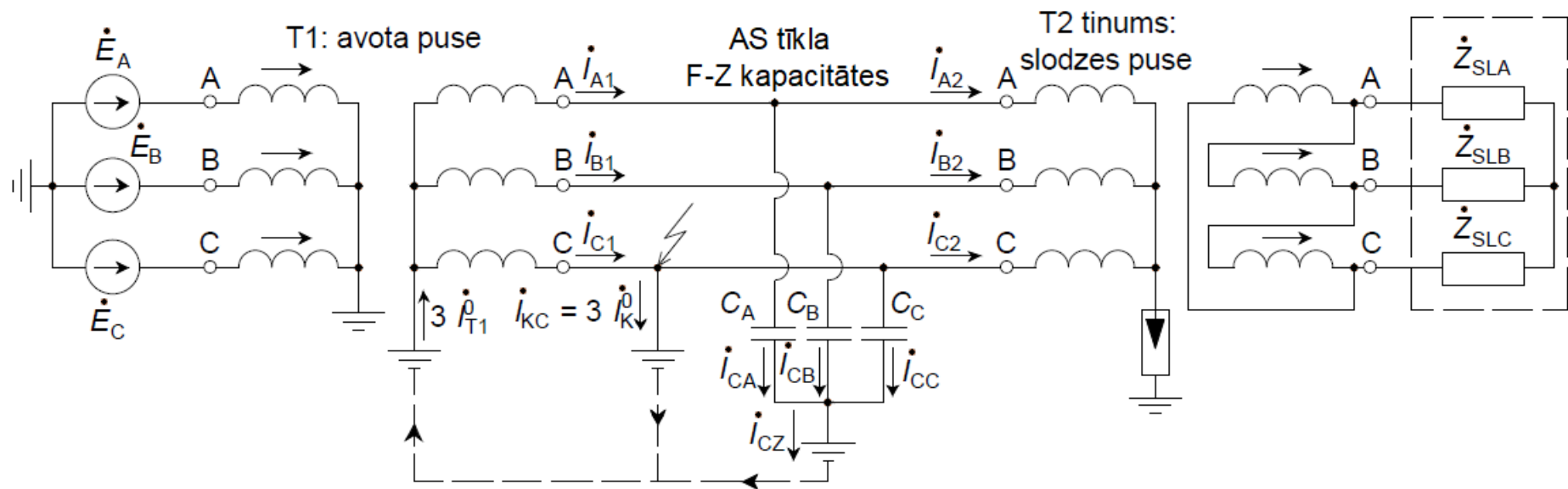
P.7.1. att. AS tīkls cieši zemētas neitrāles režīmā, notiekot zemesslēgumam.



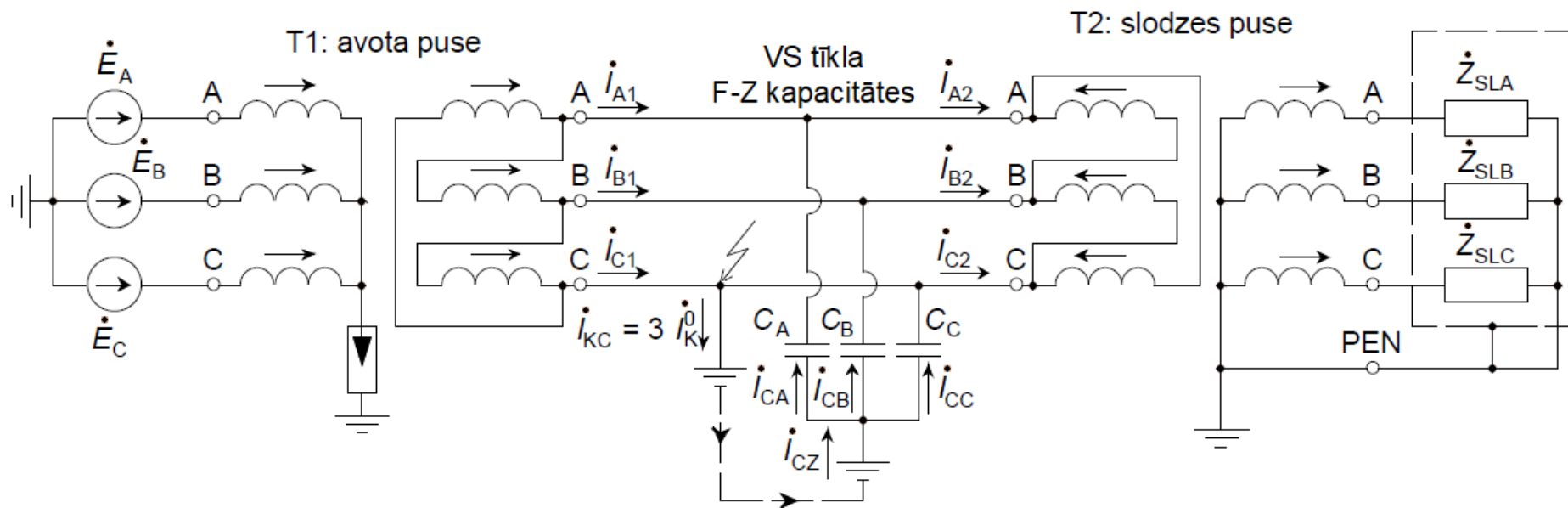
P.7.2. att. ZS tīkls cieši zemētas neitrāles režīmā (TN-S sistēma), notiekot zemesslēgumam [114], [117], [122], [123].



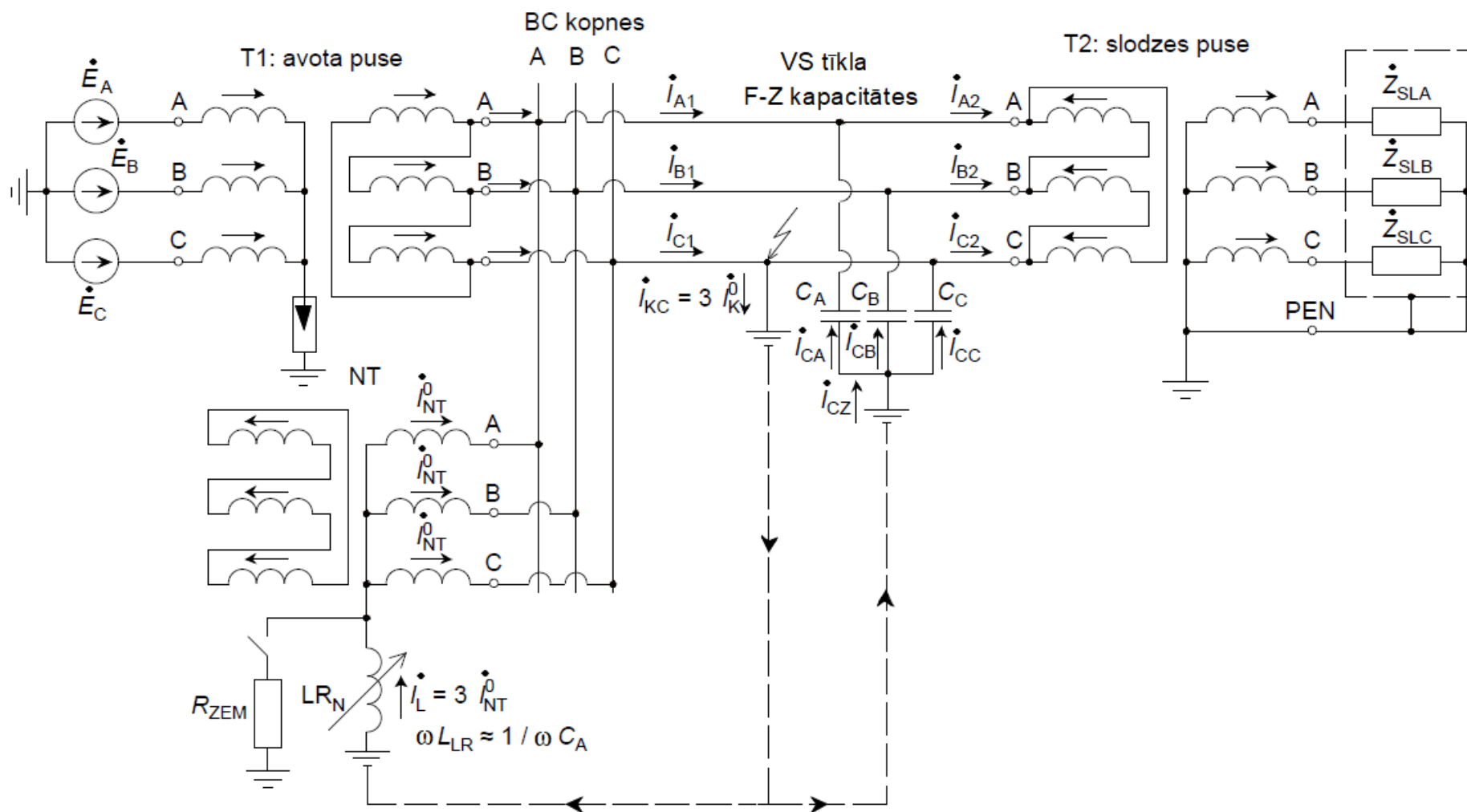
P.7.3. att. ZS tīkls cieši zemētas neitrāles režīmā (TN–C sistēma), notiekot zemesslēgumam [114], [117], [122], [123].



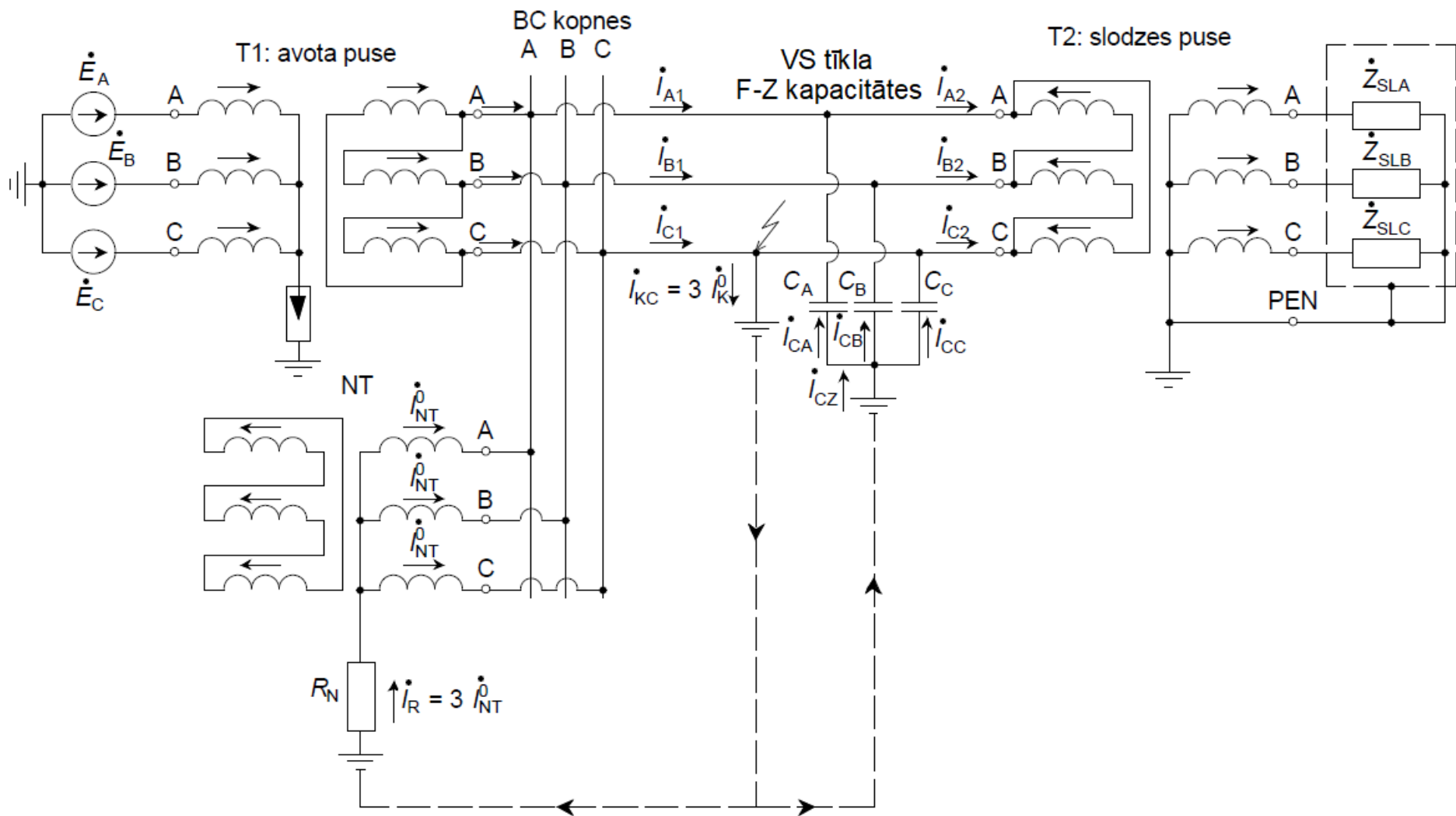
P.7.4. att. AS tīkls efektīvi zemētas neitrāles režīmā, notiekot zemesslēgumam [121].



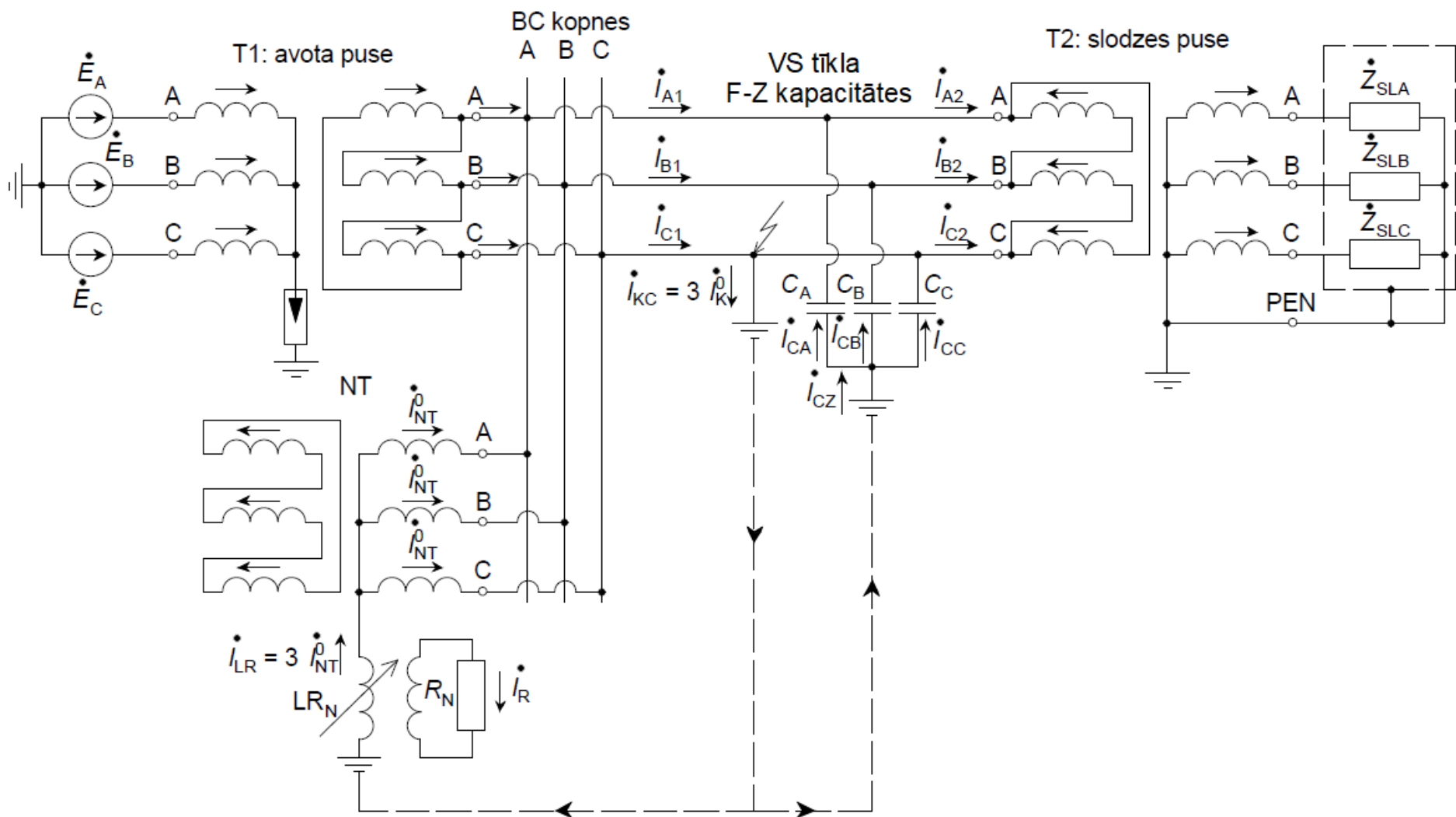
P.7.5. att. VS tīkls izolētas neitrāles režīmā, notiekot zemesslēgumam [18], [116], [117], [123].



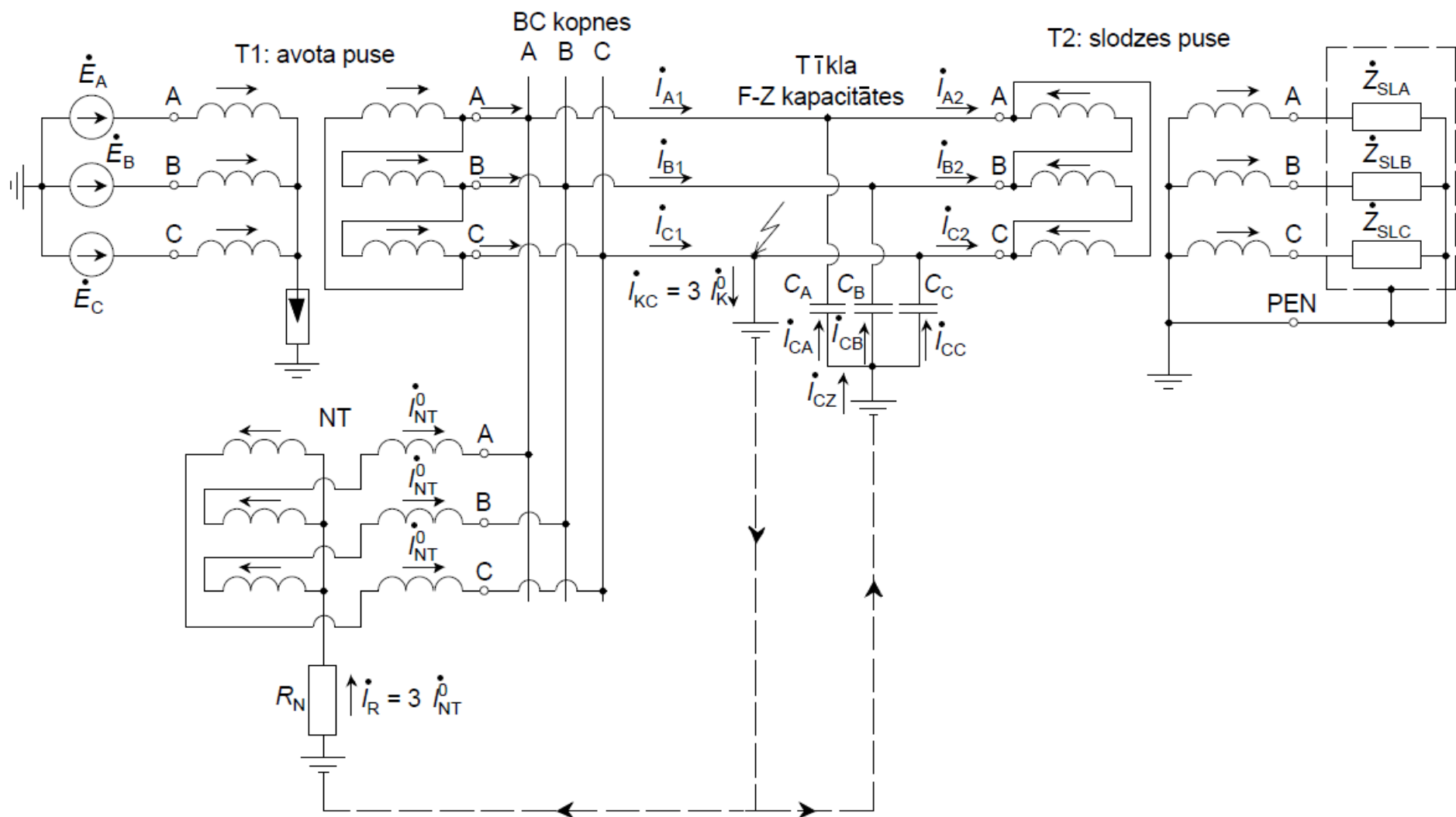
P.7.6. att. VS tīkls kompensētas neitrāles režīmā, notiekot zemesslēgumam [18], [116], [117], [123].



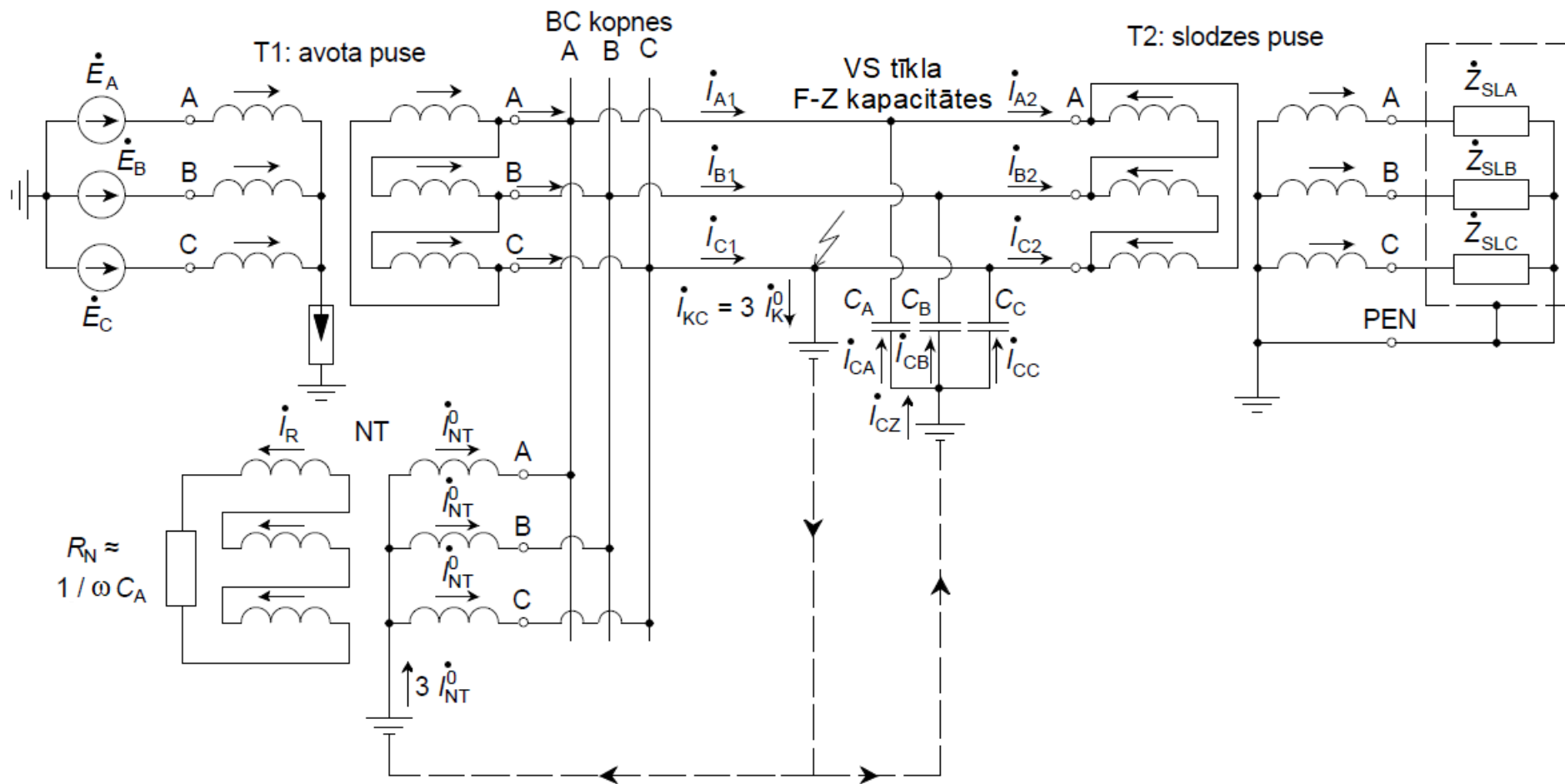
P.7.7. att. VS tīkls mazresistīvas neitrāles režīmā (rezistoru tiešā veidā ieslēdzot NT neitrālē), notiekot zemesslēgumam [116], [117], [123].



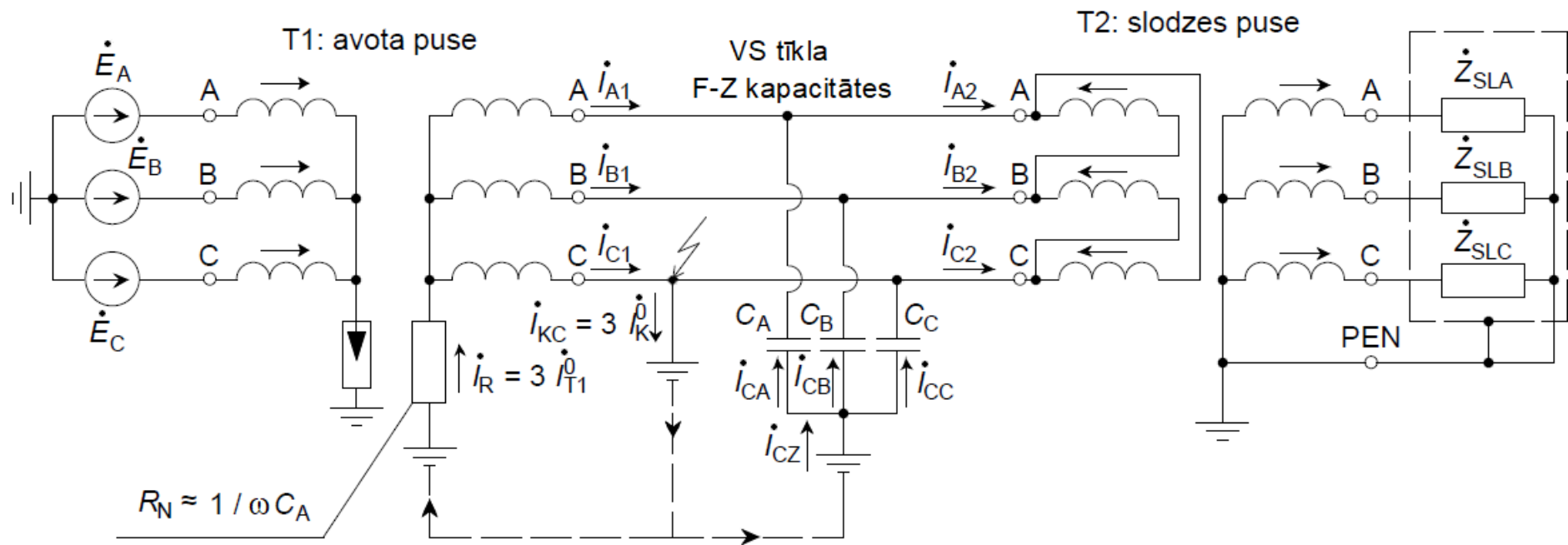
P.7.8. att. VS tīkls mazrezistīvas neitrāles režīmā (rezistoru ieslēdzot NT neitrālē ar zemētājreaktora palīdzību), notiekot zemesslēgumam [116], [117], [123].



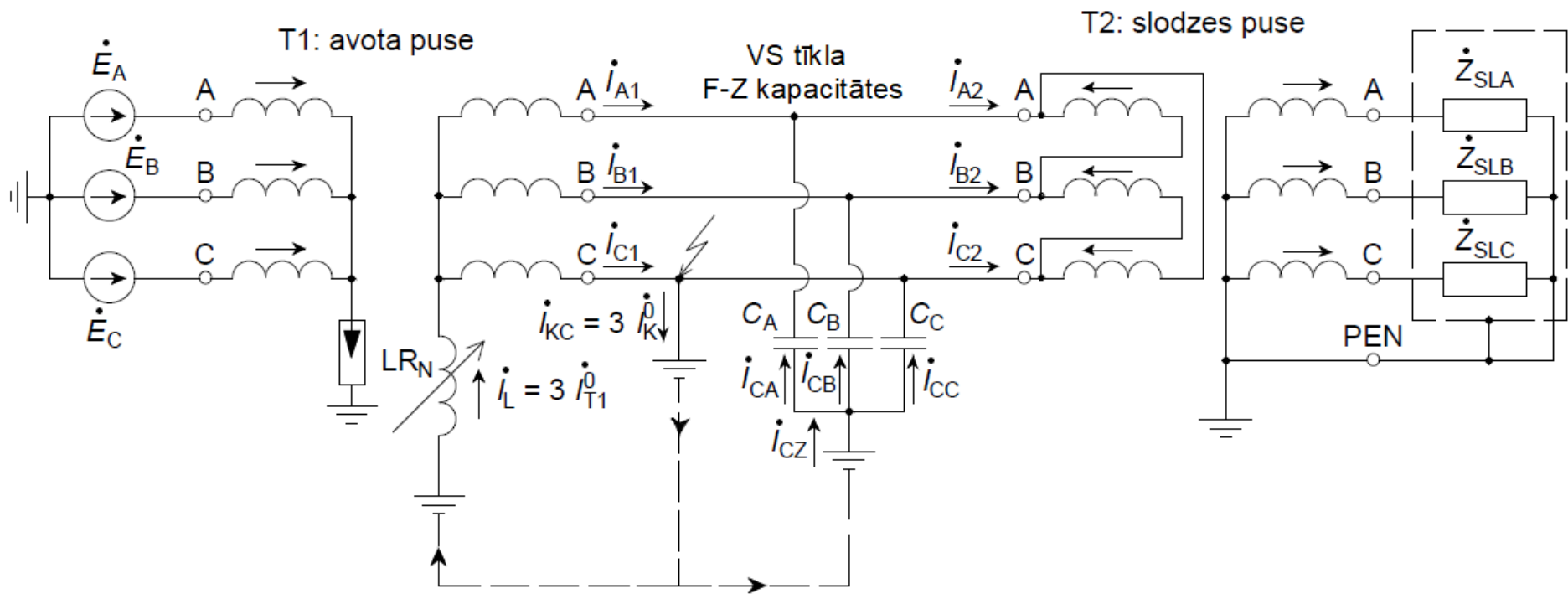
P.7.9. att. VS tīkls mazresistīvas neitrāles režīmā (rezistoru tiešā veidā ieslēdzot cikcakslēgumā savienota NT neitrālē), notiekot zemesslēgumam [123].



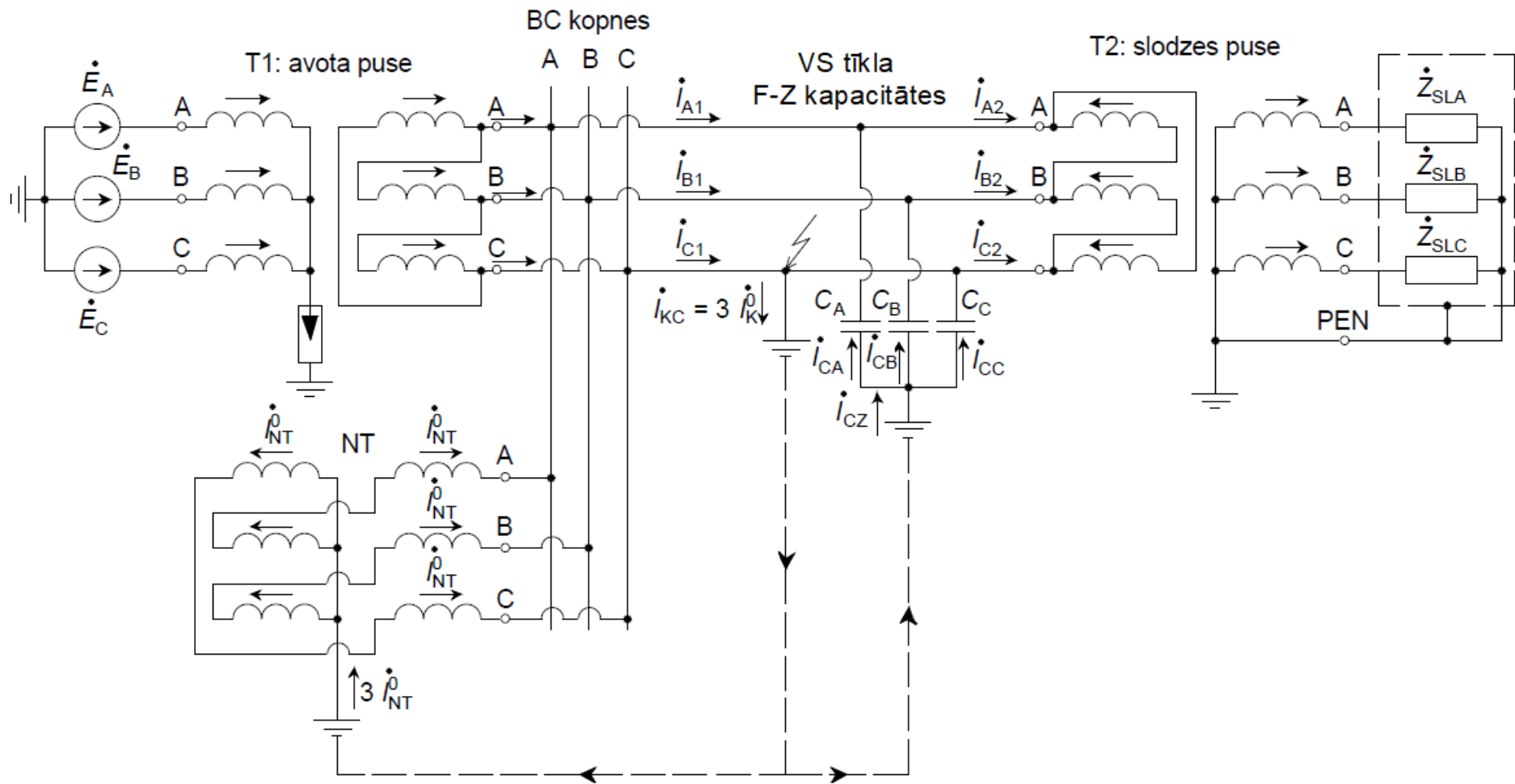
P.7.10. att. VS tīkls lielrezistīvas neitrāles režīmā (rezistoru ieslēdzot NT sekundārajā tinumā), notiekot zemesslēgumam [121], [123].



P.7.11.att. VS tīkls lielrezistīvas neutrāles režīmā (rezistoru tiešā veidā ieslēdzot spēka transformatora neutrālē), notiekot zemesslēgumam [121], [123].

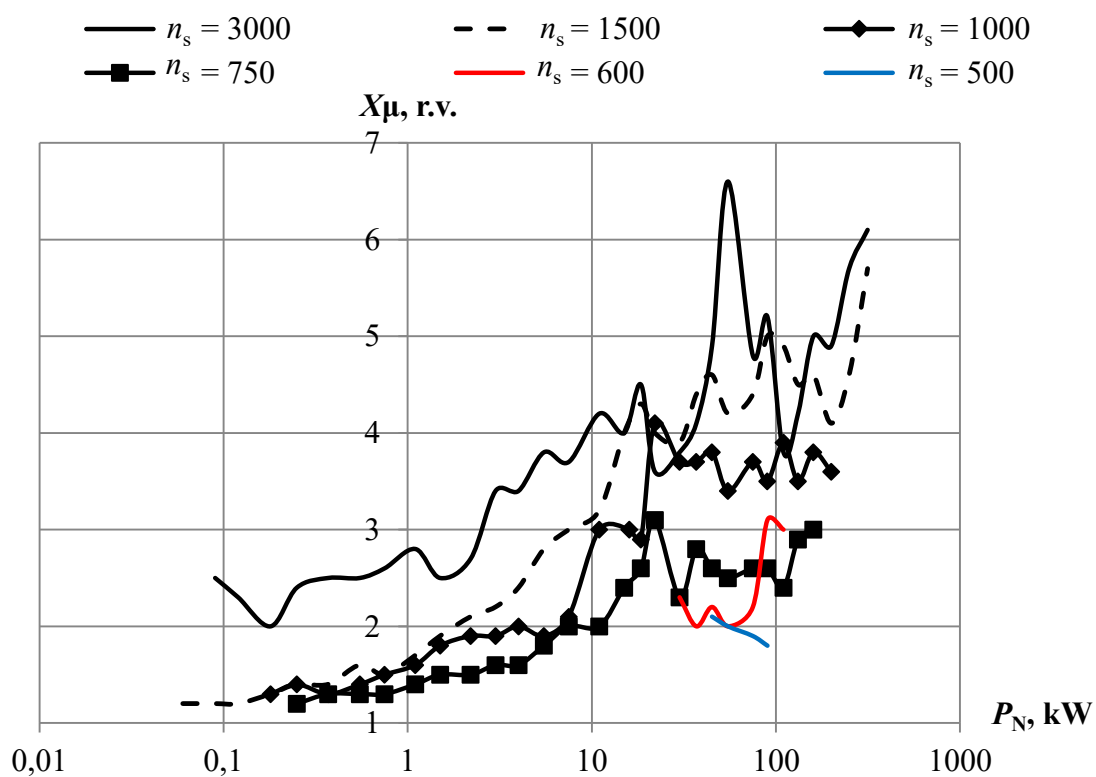


P.7.12. att. VS tīkls mazinduktīvas neitrāles režīmā (zemēšanas reaktoru ieslēdzot spēka transformatora neitrālē), notiekot zemesslēgumam [121], [123].

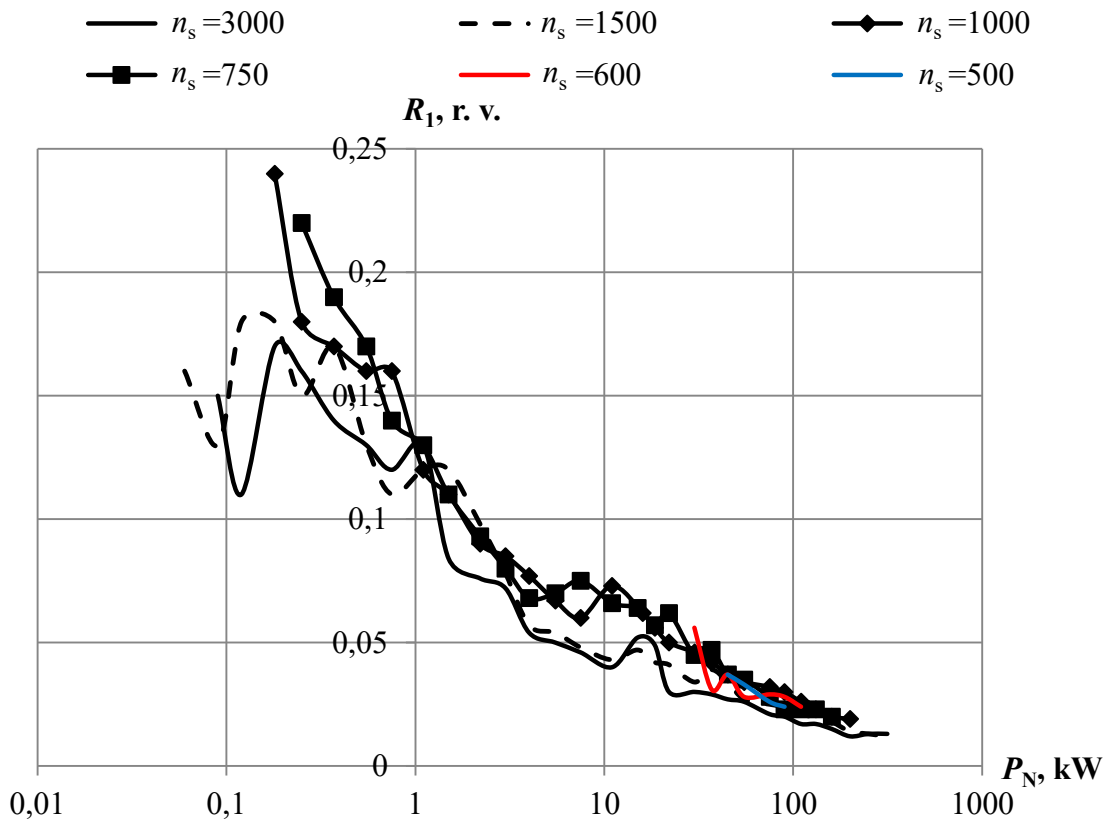


P.7.13. att. VS tīkls mazinduktīvas neutrāles režīmā (izveidots ar cikcakslēgumā savienotu NT), notiekot zemesslēgumam [49], [123].

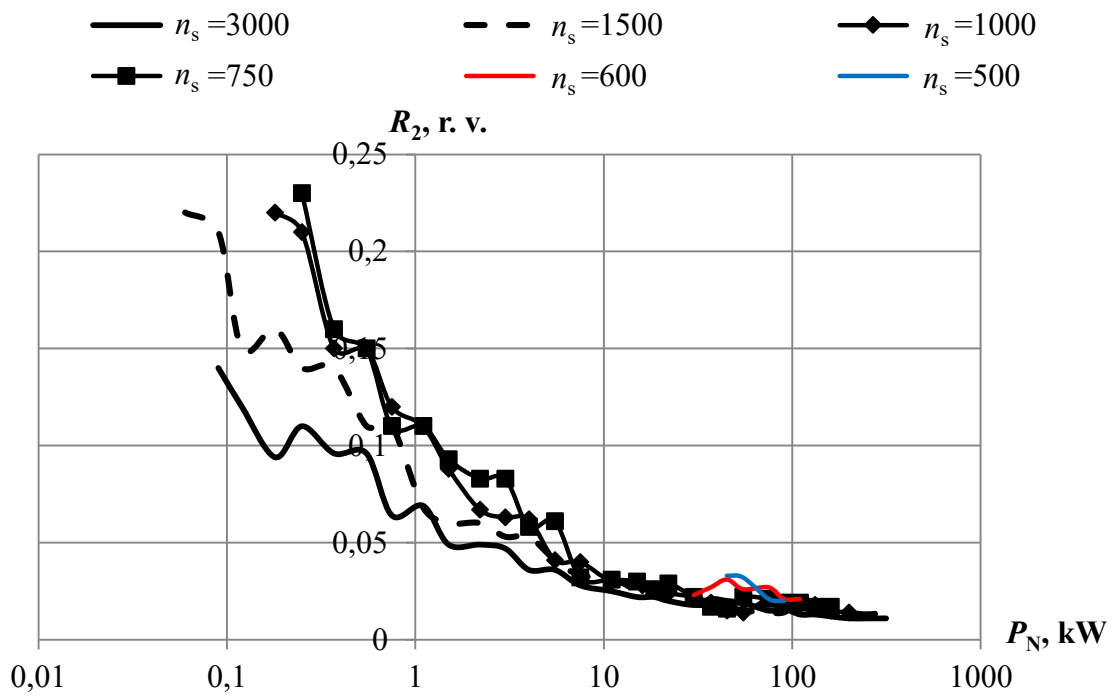
4A sērijas AD aizvietošanas shēmu pretestību vērtības atkarībā no to nominālās aktīvās jaudas un sinhronās rotācijas frekvences



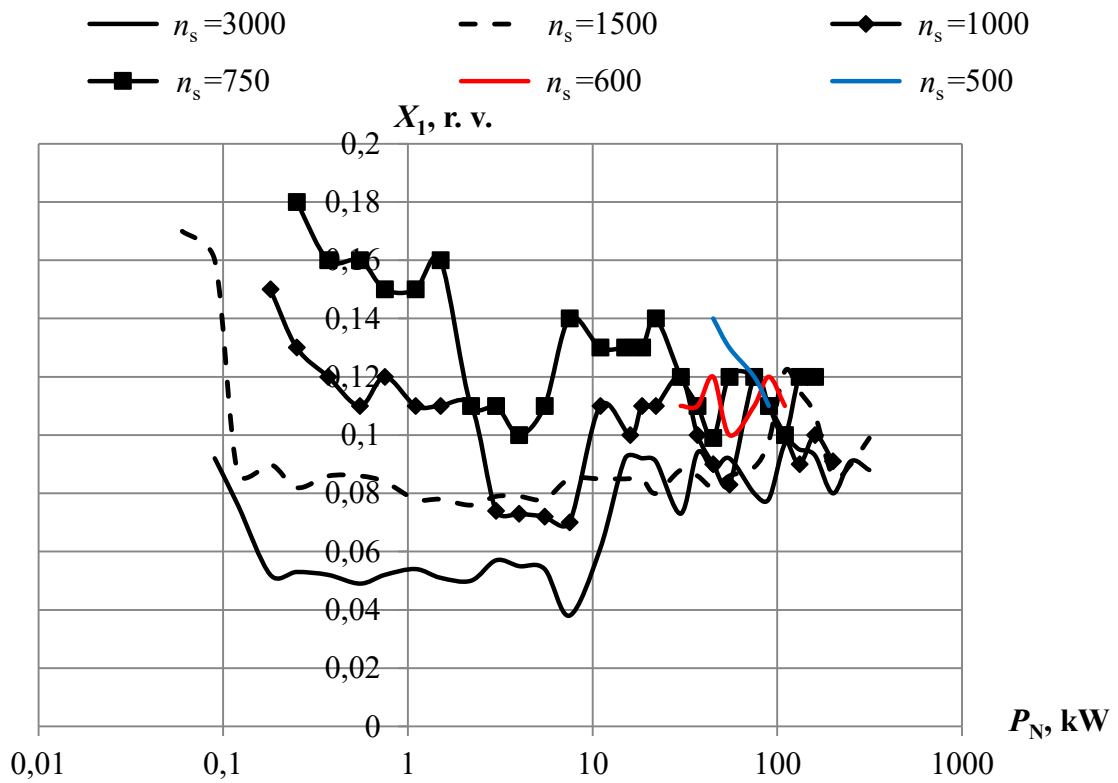
P.8.1. att. 4A sērijas AD magnetizācijas zara reaktances vērtību grafiks dažādām nominālajām jaudām un sinhronajām rotācijas frekvencēm [68].



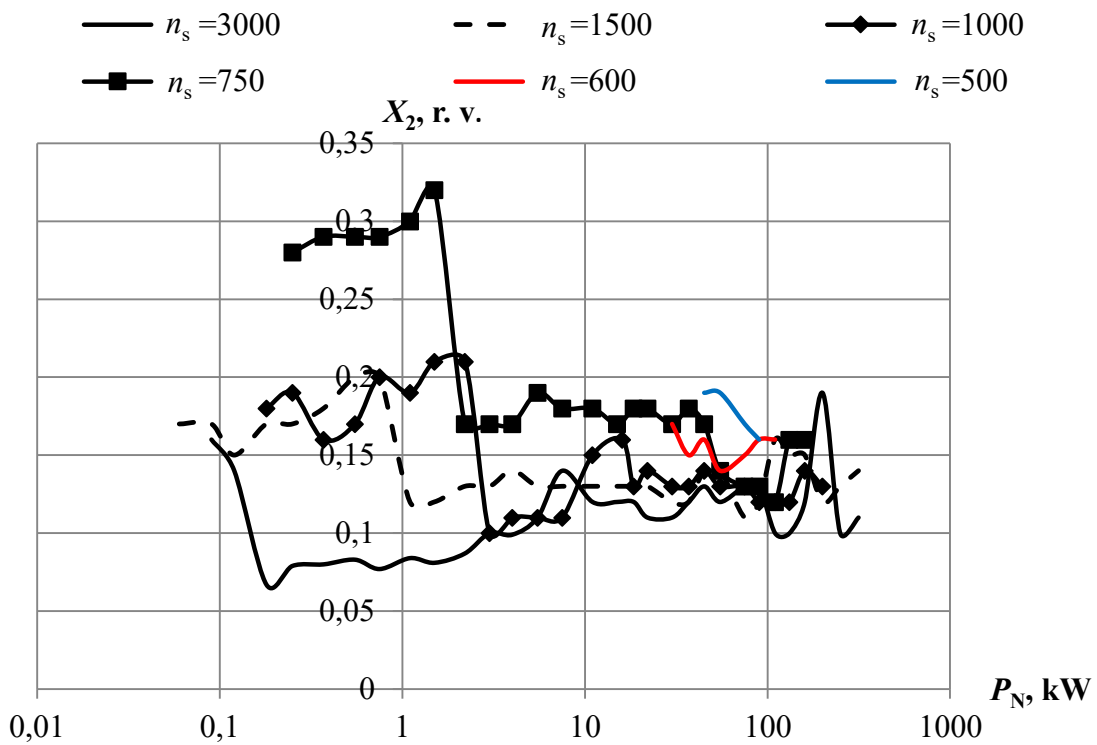
P.8.2. att. 4A sērijas AD statora aktīvās pretestības vērtību grafiks dažādām nominālajām jaudām un sinhronajām rotācijas frekvencēm [68].



P.8.3. att. 4A sērijas AD rotora aktīvās pretestības vērtību grafiks dažādām nominālajām jaudām un sinhronajām rotācijas frekvencēm [68].



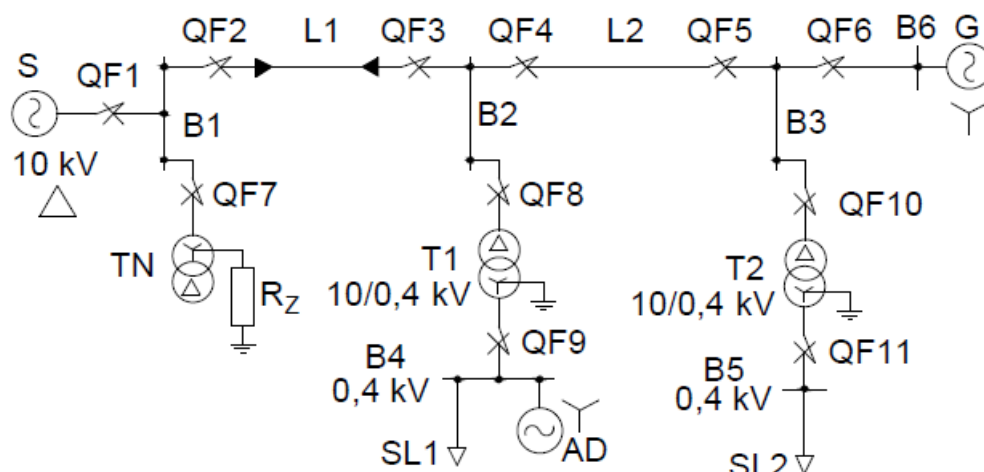
P.8.4. att. 4A sērijas AD statora reaktances vērtību grafiks dažādām nominālajām jaudām un sinhronajām rotācijas frekvencēm [68].



P.8.5. att. 4A sērijas AD rotora reaktances vērtību grafiks dažādām nominālajām jaudām un sinhronajām rotācijas frekvencēm [68].

Pirmā aprēķinu piemēru tīkla elementu izejas dati un sagatavojošie aprēķini

Pirmā stacionāro režīmu parametru aprēķinu piemēros analizētā tīkla shēma parādīta P.9.1. attēlā.



P.9.1. att. Pirmā aprēķinu piemēru tīkla vienlīnijas shēma.

Parādītais tīkls nodrošina divu slodžu SL1 un SL2, un dzinēju ekvivalenta AD barošanu no 10 kV VS tīklam pieslēgtas sistēmas S un izkliedētas ģenerācijas stacijas TG G pa KL L1 un GL L2. Šis tīkls ir mazresistīvas neitrāles režīmā, jo citādi tīklā ar izolētu neitrāli ieslēgts neitrāli veidojošais transformators TN, kura neitrālē ieslēgts rezistors ar pretestību $R_Z = 5,77 \Omega$. Tīkla elementus raksturojošie dati apkopoti P.9.1.–P.9.6. tabulā. Transformatoru T1 un T2 slēgumu shēma un grupa pieņemta $Y_0/\Delta-11$.

P.9.1. tabula

Pirmā aprēķinu piemēru tīkla sistēmas dati

Parametri un mērvienības	U_N , kV	S_{KS} , MVA	X/R
Vērtības	10	1000	5

P.9.2. tabula

Pirmā aprēķinu piemēru tīkla transformatoru dati [124]

Transformators	Tips	S_N , MVA	U_{AS} , kV	U_{ZS} , kV	U_{KASZS} , %	ΔP_k , kW	ΔP_0 , kW
T1	TM-2500/10	2,5	10	0,4	6,5	23,5	3,85
T2	TM-2500/10	2,5	10	0,4	6,5	23,5	3,85
TN	TM-1600/10	1,6	10	0,4	5,5	16,5	3,30

P.9.3. tabula

Pirmā aprēķinu piemēru tīkla ģenerators dati [124]

Parametrs un mērvienība	Vērtība
Tips	T-6-2Y3
S_N , MVA	7,5
$\cos\varphi_N$	0,8
n_N , min^{-1}	3000
X''_d , r. v.	0,119
X'_d , r. v.	0,172
X_d , r. v.	1,71
X^2 , r. v.	0,145
X^0 , r. v.	0,058
R^1 , r. v.	0,005
R^2 , r. v.	0,04
R^0 , r. v.	0,005
T''_d , s	0,091
T'_d , s	1,24
T_J , s	7

P.9.4. tabula

Pirmā aprēķinu piemēru tīkla GL L2 dati

Parametrs un mērvienība	Vērtība
Līnijas garums l_L , km	5
Starpbalsta tips	III10-6
Vadu skaits fāzē	1
Fāzes vada marka	AC185/43
Zibensaizsardzības trošu skaits	0

Pirmā aprēķinu piemēru tīkla KL L1 dati [107]

Parametrs un mērvienība	Vērtība
Fāzes vada šķērsriezuma laukums $S_{\text{ŠK}}$, mm ²	240
Fāzes vada materiāls	Al
Līnijas garums, km	3
Fāzes vada diametrs d_V , mm	18,8
Fāzes vada izolācijas biezums S_{IZ} , mm	8
Fāzes ekrāna pusvadītāja slāņa biezums S_{PUS} , mm	0,6
Fāzes ekrāna Cu folijas biezums S_{Cu} , mm	0,1
Bruņu apvalka tērauda dzīslu diametrs $d_{BR} \approx S_{BR}$, mm	3,15
Ārējās izolācijas biezums $S_{\text{ĀR}}$, mm	4,2
Kabeļa ārējais diametrs d_{KAB} , mm	104
Līdzstrāvas aktīvā īpatnējā pretestība pie 90°C R_{DC} , Ω/km	0,161
Darba jeb TS īpatnējā kapacitāte C^1 , μF/km	0,24
Darba jeb TS īpatnējā induktivitāte $L1$ un induktīvā pretestība X^1 , H/km un Ω/km	$0,109 \text{ } \Omega/\text{km} \approx 0,109 \cdot 1000 / 100 \cdot \pi \approx$ $\approx 0,347 \text{ mH}/\text{km}$

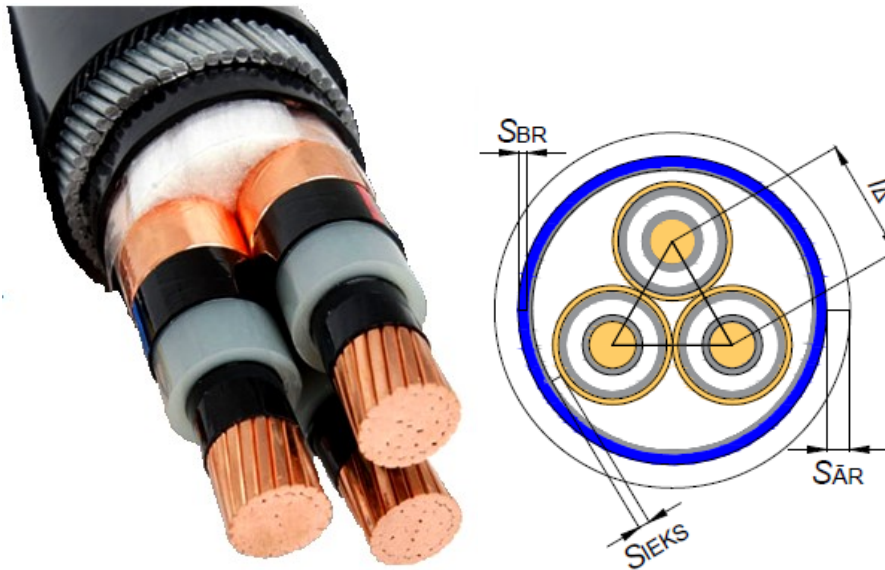
Pirmā aprēķinu piemēru tīkla slodžu dati

Parametrs un mērvienība	SL1, AD	SL2
P_N , MW	2	2
$\cos\varphi_N$	–	0,89
$\cos\varphi_{SL}$	0,92	–
$\cos\varphi_{AD}$	0,86	–
Dzinēju un statiskās slodzes nominālo jaudu attiecība AD:SL	70:30	–

Papildus tiek pieņemts, ka kabeļa bruņu apvalks un fāžu ekrāni ir zemēti abos L1 galos, fāzes vadu ekrāni saskaras un līdz ar to fāžu vadu ģeometriskie centri ir simetriski izvietoti, veidojot vienādmalu trīsstūri, un, ka ģenerators attīsta jaudu $\hat{S}_G = 6 + j1$ MVA. Par aprēķina spriegumu tiek pieņemts sistēmas pakāpei atbilstošais spriegums $U_{APR} = 10,5$ kV.

Šim piemēram atsevišķi aplūkots KL L1 parametru un kopnēm B4 pieslēgtās jauktās slodzes aizvietošanas shēmu parametru aprēķins, bet pārējo elementu aizvietošanas shēmu parametru vērtības tiks dotas gatavas, jo to noteikšanas process tiks parādīts nākamajos

pielikumos. KL L1 aizvietošanas shēmu parametru aprēķinam izmantoti P.9.5. tabulas dati kopā ar P.9.2. attēlu.



P.9.2. att. Pirmā aprēķinu piemēru tīkla 10 kV kabelis (parādīts ar Cu fāzes vadiem) ar *XPLE* izolāciju [107] un tā šķērsriezums ar nepieciešamajiem izmēriem.

Vispirms noteiksim nepieciešamos kabeļa ģeometriskos parametrus:

- fāzes vada rādiuss:

$$r_v = d_v/2 = 0,0188/2 = 0,0094 \text{ m};$$

- kabeļa ārējais rādiuss:

$$r_{KAB} = d_{KAB}/2 = 0,104/2 = 0,052 \text{ m};$$

- fāzes vada ģeometriskais rādiuss:

$$r_{Gv} = 0,779r_v = 0,779 \cdot 0,0094 = 0,0073 \text{ m};$$

- fāzes vada rādiuss, ierēķinot pusvadītāja materiāla pārklājumu:

$$r_0 = r_v + S_{PUS} = 0,0094 + 0,0006 = 0,01 \text{ m};$$

- fāzes vada izolācijas rādiuss:

$$r_{IZ} = r_0 + S_{IZ} = 0,010 + 0,008 = 0,018 \text{ m};$$

- fāzes ekrāna Cu folijas iekšējais un ārējais rādiuss, ievērojot pusvadītāja slāņa esamību gan ap vāzes vadu, gan tā izolāciju, un fāzes ekrāna ģeometriskais rādiuss:

$$r_{EKR1} = r_v + 2S_{PUS} + S_{IZ} = 0,0094 + 2 \cdot 0,0006 + 0,0080 = 0,0186 \text{ m},$$

$$r_{EKR2} = r_{EKR1} + S_{Cu} = 0,0186 + 0,0001 = 0,0187 \text{ m},$$

$$r_{GEKR} = (r_{EKR1} + r_{EKR2})/2 = (0,0186 + 0,0187)/2 \approx 0,0187 \text{ m};$$

- fāžu vadu centru izveidotā vienādmalu trīsstūra malas garums:

$$l_{\Delta} = 2r_v + 2S_{IZ} + 4S_{PUS} + 2S_{Cu} = 0,0188 + 0,0160 + 0,0024 + 0,0002 = 0,0374 \text{ m};$$

- attālums no kabeļa ģeometriskā centra līdz fāžu centriem, ko aprēķina kā šim vienādmalu trīsstūrim apvilktas riņķa līnijas rādiusu:

$$r_{\Delta} = l_{\Delta} \sqrt{3}/3 = 0,0374 \cdot \sqrt{3}/3 \approx 0,0216 \text{ m};$$

- attālums no kabeļa centra līdz jebkuras fāzes ekrāna ārējam slānim (fāžu ekrāniem apvilktas riņķa līnijas rādiuss):

$$r_{3f} = r_{\Delta} + r_v + 2S_{PUS} + S_{IZ} + S_{Cu} = 0,0216 + 0,0094 + 0,0012 + 0,008 + 0,0001 = 0,0403 \text{ m};$$

- iekšējās izolācijas biezums starp fāžu ekrāniem un pirms bruņu apvalka esošā pusvadītāja slāņa:

$$S_{IEKS} = r_{KAB} - S_{\bar{A}R} - S_{BR} - S_{PUS} - r_{3f} = 0,052 - 0,0042 - 0,00315 - 0,0006 - 0,0403 = 0,00375 \text{ m};$$

- bruņu apvalka iekšējais, ārējais un ģeometriskais rādiuss:

$$r_{BR1} = r_{3f} + S_{IEKS} + S_{PUS} = 0,0403 + 0,00375 + 0,0006 = 0,04465 \text{ m},$$

$$r_{BR2} = r_{BR1} + S_{BR} = 0,04465 + 0,00315 = 0,0478 \text{ m},$$

$$r_{GBR} = (r_{BR1} + r_{BR2})/2 = (0,04465 + 0,0478)/2 \approx 0,0462 \text{ m};$$

- vidējais attālums starp fāžu ģeometriskajiem centriem:

$$D_{vid} = \sqrt[3]{D_{AB}D_{BC}D_{CA}} = \sqrt[3]{l_{\Delta}^3} = 0,0374 \text{ m};$$

- trīs fāžu vidējais vada un ekrāna ģeometriskais rādiuss:

$$r_{G3v} = \sqrt[3]{r_{Gv}D_{vid}^2} = \sqrt[3]{0,0073 \cdot 0,0374^2} \approx 0,0217 \text{ m},$$

$$r_{G3EKR} = \sqrt[3]{r_{GEKR}D_{vid}^2} = \sqrt[3]{0,0187 \cdot 0,0374^2} \approx 0,0297 \text{ m}.$$

Tagad jāveic KL L1 TS un PS elektrisko parametru aprēķins.

Īpatnējās DC aktīvās fāzes pretestības aprēķins atbilstoši formulai (2.32.) un tās aprēķins AC (pie 20 °C), ievērojot skinefektu:

$$R_{DC} = 318,31 \rho_{Al}/r_v^2 = 318,31 \cdot 2,82 \cdot 10^{-8}/0,0094^2 \approx 0,102 \Omega/\text{km},$$

$$R_{L0} = R_{AC} = R_{DC} k_{sk} = 0,102 \cdot 1,0125 \approx 0,103 \Omega/\text{km}.$$

Lai arī zināmi ražotāja dati TS induktivitātei un kapacitātei, aprēķināsim tās arī analītiski. Īpatnējās fāzes induktivitātes un induktīvās pretestības aprēķins, lietojot gan [8], gan [42] dotās metodes un neievērojot iespējamo fāžu ekrānu strāvas ietekmi:

$$L_{L0}^1 = 0,05 + 0,2 \ln(D_{vid}/r_v) = 0,05 + 0,2 \ln(0,0374/0,0094) \approx 0,3262 \text{ mH}/\text{km},$$

$$X_{L0}^1 = 2\pi f L_{L0}^1 = 100\pi \cdot 0,3262/1000 \approx 0,103 \Omega/\text{km},$$

$$X_{L0}^1 = 0,1447 \lg(D_{vid}/r_{Gv}) = 0,1447 \lg(0,0374/0,0073) \approx 0,103 \Omega/\text{km}.$$

Abas metodes devušas īpatnējo TS induktīvo pretestību, kas ir aptuveni par 6 % mazāka nekā ražotāja noteiktā. Papildus var izmēģināt metodiku, kas aprakstīta [8], ievērojot fāžu ekrānu

ietekmi uz TS īpatnējo pretestību. Šim nolūkam vēl jāaprēķina fāžu ekrānu īpatnējā aktīvā pretestība un TS īpatnējā pretestība mijinduktivitātēm starp fāžu vadiem un to ekrāniem:

$$R_{\text{EKR0}} = 318,31\rho_{\text{Cu}}/(r_{\text{EKR2}}^2 - r_{\text{EKR1}}^2) = 318,31 \cdot 1,68 \cdot 10^{-8}/(0,0187^2 - 0,0186^2) \approx 5,348 \cdot 10^{-6}/3,73 \cdot 10^{-6} \approx 1,434 \Omega/\text{km},$$

$$X_{\text{EKR0}}^1 \approx X_{\text{MLEKR0}}^1 = 0,1447\lg(D_{\text{vid}}/r_{\text{GEKR}}) = 0,1447\lg(0,0374/0,0187) \approx 0,044 \Omega/\text{km}.$$

Aktīvās īpatnējās TS pretestības vērtība, ievērojot ekrānu ietekmi:

$$R_{\text{L0}}^1 = R_{\text{L0}}^1 = R_{\text{L0}} + X_{\text{MEKR0}}^2 R_{\text{EKR0}}/(R_{\text{EKR0}}^2 + X_{\text{EKR0}}^2) = 0,103 + (1,434 \cdot 0,044^2)/(1,434^2 + 0,044^2) \approx 0,104 \Omega/\text{km}.$$

Redzams, ka mazās fāžu ekrānu un līnijas mijinduktivitātes TS pretestības dēļ fāžu ekrānu ietekme uz aktīvo TS pretestību šim kabelim nesasniedz 1 %, un, saprotams, induktīvās pretestības gadījumā tā būtu ievērojami mazāka, tādēļ turpmākajos aprēķinos TS ignorēsim šo ietekmi abām pretestības sastāvdaļām, t. i., izmantosim $R_{\text{L0}}^1 \approx R_{\text{AC}} = 0,103 \Omega/\text{km}$ un iepriekš noteikto $X_{\text{L0}}^1 \approx 0,103 \Omega/\text{km}$.

Īpatnējā fāzes kapacitāte atbilstoši [37], [42] lietotajai koaksiāla kabeļa kapacitātes noteikšanas metodikai, ņemot vērā, ka elektrisko lauku ierobežo fāžu ekrāni:

$$C_{\text{L0}}^1 = \varepsilon_r/18\ln(r_{\text{IZ}}/r_0) = 2,5/18\ln(0,018/0,01) \approx 2,5/10,58 \approx 0,236 \mu\text{F}/\text{km}.$$

Salīdzināšanai iespējams šo kapacitāti noteikt arī atbilstoši [8] parādītajam paņēmienam, izmantojot īpatnējās kapacitatīvās pretestības līknes. Trīsfāžu kabeļiem [8] doto līkņu izmantošanai ir jānosaka attiecības α un β :

$$\alpha = S_{\text{IEKS}}/S_{\text{IZ}} = 0,00375/0,008 \approx 0,47,$$

$$\beta = (S_{\text{IEKS}} + S_{\text{IZ}})/d_v = (0,00375 + 0,008)/0,0188 = 0,625.$$

No līknēm iegūstams, ka kapacitatīvo vadītspēju ekvivalentās TS pretestība pie $\varepsilon_r = 3,5$ r. v. ir $X_{\text{C3,5}}^1 \approx 5625 \Omega/\text{km}$. Šī vērtība jākorrigē, lai iegūtu ekvivalento pretestību, kas atbilst faktiskajai izolācijas materiāla relatīvajai dielektriskajai caurlaidībai:

$$X_{\text{C0}}^1 = X_{\text{C3,5}}^1 \cdot 3,5/\varepsilon_r = 5625 \cdot 3,5/2,5 \approx 7875 \Omega/\text{km},$$

$$C_{\text{L0}}^1 = 1/(2\pi f X_{\text{C0}}^1) = 1/(100\pi \cdot 7875) \approx 0,404 \cdot 10^{-6} \text{ F}/\text{km} = 0,404 \mu\text{F}/\text{km}.$$

Var redzēt, ka konkrētajam kabelim, koaksiāla kabeļa kapacitātes aprēķina formula dod īpatnējās kapacitātes vērtību, kas ir praktiski identiska ražotāja datiem, bet grāmatā [8] dotās līknes, kuras visticamāk atbilst trīsfāžu kabeļiem bez fāžu ekrāniem, uzrādīja gandrīz divreiz lielāku īpatnējo kapacitāti.

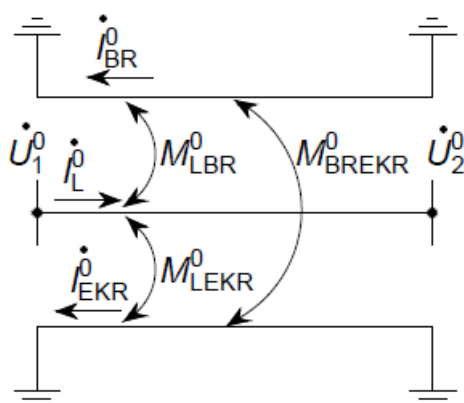
Jāveic arī NS elektrisko parametru aprēķins.

NS īpatnējā kapacitāte zemēto fāžu ekrānu dēļ šim kabelim sakrīt ar TS kapacitāti:

$$C_{\text{L0}}^1 = C_{\text{L0}}^2 = C_{\text{L0}}^0 = 0,236 \mu\text{F}/\text{km}.$$

Pieņemot, ka gan fāžu ekrāni, gan bruņu apvalks abos KL galos ir zemēti, jāņem vērā, ka teorētiski katrā no līnijas fāzes vadiem var plūst NS strāva I_{L}^0 , kas tādā gadījumā sadalās pa trīs zemētajiem fāžu ekrāniem, kur katrā plūst I_{EKR}^0 , kopīgo bruņu apvalku, kurā plūst visu trīs fāžu bruņu apvalka NS strāvas $3I_{\text{BR}}^0$, un pa zemi, kurā noslēdzas visu trīs fāžu zemes NS strāva $3I_{\text{Z}}^0$.

Attiecīgi nevar tiešā veidā izmantot 2.18. attēla aizvietošanas shēmu KL un fāžu ekrāniem vai bruņu apvalkam. Tādēļ tiks izmantota vizuāli vienkāršota vienlīnijas analīzes shēma, kurā parādītas visu trīs vadītāju sistēmu (fāžu vadi, fāžu ekrāni un bruņu apvalks) savstarpējās NS mijinduktivitātes (P.9.3. att.). Šajā shēmā arī bruņu apvalkam parādīta vienīgi vienas fāzes strāvas bruņu apvalka komponente \dot{I}_{BR}^0 , jo NS pretestība jānosaka vienas fāzes strāvai, tādēļ reizinājums ar 3 tiks ņemts vērā apvalka NS pretestībā, lai saglabātu pareizu NS sprieguma kritumu tajā.



P.9.3. att. KL ar zemētiem fāžu ekrāniem un bruņu apvalku NS vienlīnijas analīzes shēma.

Balstoties uz parādīto analīzes shēmu, iespējams uzrakstīt otrā Kirhofa likuma vienādojumus katrai no vadu sistēmām, ņemot vērā, ka zemētajiem fāžu ekrāniem un bruņu apvalkam abos līnijas galos potenciāls ir 0 V:

$$\begin{cases} \dot{U}_1^0 - \dot{U}_2^0 = \dot{I}_L^0 \dot{Z}_L^0 - \dot{I}_{BR}^0 \dot{Z}_{MLBR}^0 - \dot{I}_{EKR}^0 \dot{Z}_{MLEKR}^0, \\ 0 = \dot{I}_{BR}^0 \dot{Z}_{BR}^0 - \dot{I}_L^0 \dot{Z}_{MLBR}^0 + \dot{I}_{EKR}^0 \dot{Z}_{MBREKR}^0, \\ 0 = \dot{I}_{EKR}^0 \dot{Z}_{EKR}^0 - \dot{I}_L^0 \dot{Z}_{MLEKR}^0 + \dot{I}_{BR}^0 \dot{Z}_{MBREKR}^0, \end{cases} \quad (\text{P.9.1.})$$

kur \dot{U}_1^0, \dot{U}_2^0 – sprieguma līnijas sākumā un beigās NS komponentes, V;

$\dot{I}_L^0, \dot{I}_{EKR}^0, \dot{I}_{BR}^0$ – strāvas KL fāzēs, to ekrānos un kopējā bruņu apvalkā NS komponentes, A;

$\dot{Z}_L^0, \dot{Z}_{EKR}^0, \dot{Z}_{BR}^0$ – KL fāžu, to ekrānu un kopējā bruņu apvalka NS pretestības,

neņemot vērā to savstarpējās mijinduktivitātes, Ω ;

$\dot{Z}_{MLBR}^0, \dot{Z}_{MLEKR}^0, \dot{Z}_{MBREKR}^0$ – NS pretestības mijinduktivitātēm starp līnijas fāzēm un bruņu apvalku, starp līnijas fāzēm un to ekrāniem un starp bruņu apvalku un fāžu ekrāniem, Ω .

No (P.9.1.) vienādojumu sistēmas 3. vienādojuma, izsakot fāžu ekrānu NS strāvu un ievietojot iegūto vienādojumu 1. un 2. vienādojumā, iespējams iegūt vienādojumu sistēmu:

$$\begin{cases} \dot{U}_1^0 - \dot{U}_2^0 = \dot{I}_L^0 \dot{Z}_{L2}^0 - \dot{I}_{BR}^0 \dot{Z}_{MLBR2}^0, \\ 0 = \dot{I}_{BR}^0 \dot{Z}_{BR2}^0 - \dot{I}_L^0 \dot{Z}_{MLBR2}^0, \end{cases} \quad (\text{P.9.2.})$$

kur $\dot{Z}_{L2}^0, \dot{Z}_{BR2}^0$ – KL fāžu un kopējā bruņu apvalka NS pretestības, ievērojot fāžu ekrānu ietekmi, Ω ;

\dot{Z}_{MLBR2}^0 – NS pretestība mijinduktivitātei starp līnijas fāzēm un bruņu apvalku, ievērojot fāžu ekrānu ietekmi, Ω .

Modificētās līnijas, bruņu apvalka un to mijinduktivitātes NS pretestības var izteikt šādi:

$$\dot{Z}_{L2}^0 = \dot{Z}_L^0 - (\dot{Z}_{MLEKR}^0)^2 / \dot{Z}_{EKR}^0, \quad (\text{P.9.3.})$$

$$\dot{Z}_{BR2}^0 = \dot{Z}_{BR}^0 - (\dot{Z}_{MBREKR}^0)^2 / \dot{Z}_{EKR}^0, \quad (\text{P.9.4.})$$

$$\dot{Z}_{MLBR2}^0 = \dot{Z}_{MLBR}^0 - \dot{Z}_{MLEKR}^0 \dot{Z}_{MBREKR}^0 / \dot{Z}_{EKR}^0. \quad (\text{P.9.5.})$$

No vienādojumu sistēmas (P.9.2.) 2. vienādojuma izsakot bruņu apvalka strāvu un ievietojot to 1. vienādojumā, iespējams iegūt faktisko NS sprieguma krituma vienādojumu formā $\Delta \dot{U}_{ekv}^0 = \dot{U}_1^0 - \dot{U}_2^0 = \dot{I}_L^0 \dot{Z}_{Lekv}^0$, kur konkrētajā gadījumā ekvivalento KL NS pretestību iespējams noteikt ar vienādojumu, kas ir līdzīgs GL zibensaizsardzības troses ietekmes ievērošanai iegūstamajam:

$$\dot{Z}_{Lekv}^0 = \dot{Z}_{L2}^0 - (\dot{Z}_{MLBR2}^0)^2 / \dot{Z}_{BR2}^0, \quad (\text{P.9.6.})$$

kur \dot{Z}_{Lekv}^0 – KL fāžu ekvivalentā NS pretestības, ievērojot gan fāžu ekrānu, gan bruņu apvalka ietekmi, Ω .

Tā kā visas līnijas kopējā pretestība ir tieši proporcionāla tās īpatnējai pretestībai, var augstāk redzamajās formulās pretestības aizvietot ar to īpatnējām vērtībām.

Sākumā iespējams noteikt kabeļa bruņu apvalka (tērauda marka šeit pieņemta AISI 1010) īpatnējo aktīvo NS pretestību:

$$R_{BR0} = 318,31 \rho_{1010} / (r_{BR2}^2 - r_{BR1}^2) = 318,31 \cdot 1,43 \cdot 10^{-7} / (0,0478^2 - 0,04465^2) \approx \approx 0,156 \Omega/\text{km}.$$

Turpinājumā noteiksim fāžu vadu, to ekrānu un kopējā bruņu apvalka NS īpatnējās pretestības. Aprēķiniem tiks izmantots kabeļiem modificētais zemē plūstošās strāvas dziļums $D_{Zkab} \approx 796,2$ m, kas noteikts pie grunts īpatnējās pretestības $100 \Omega/\text{m}^3$. Minētās pretestības nosakāmas šādi:

$$\dot{Z}_{L0}^0 = R_0 + 0,148 + j0,434 \lg(D_{Zkab}/r_{G3v}) = 0,103 + 0,148 + j0,434 \lg(796,2/0,0217) \approx \approx 0,251 + j1,981 \Omega/\text{km},$$

$$\dot{Z}_{EKR0}^0 = R_{EKR0} + 0,148 + j0,434 \lg(D_{Zkab}/r_{G3EKR}) = 1,434 + 0,148 + j0,434 \lg(796,2/0,0297) \approx 1,582 + j1,922 \Omega/\text{km},$$

$$\dot{Z}_{BR0}^0 = 3R_{BR0} + 0,148 + j0,434 \lg(D_{Zkab}/r_{GBR}) = 3 \cdot 0,156 + 0,148 + j0,434 \lg(796,2/0,0462) \approx 0,616 + j1,839 \Omega/\text{km}.$$

Šo vadītāju sistēmu mijinduktivitāšu NS īpatnējo pretestību aprēķinam pieņemts, ka tuvināti mijinduktivitāšu vērtības saitēm starp fāžu vadiem un bruņu apvalku un starp fāžu ekrāniem un bruņu apvalku sakrīt, jo fāžu vadu un to ekrānu ģeometriskie centri sakrīt, un bruņu apvalks aptver arī ekrānus:

$$\dot{Z}_{MLEKR0}^0 = \dot{Z}_{EKR0}^0 - R_{EKR0} = 0,148 + j0,434 \lg(D_{Zkab}/r_{G3EKR}) \approx 0,148 + j1,922 \Omega/\text{km},$$

$$\dot{Z}_{MLBR0}^0 = \dot{Z}_{BR0}^0 - 3R_{BR0} = 0,148 + j0,434 \lg(D_{Zkab}/r_{GBR}) \approx 0,148 + j1,839 \Omega/\text{km},$$

$$\dot{Z}_{MBREKR0}^0 \approx \dot{Z}_{MLBR0}^0 \approx 0,148 + j1,839 \Omega/\text{km}.$$

Turpinājumā iespējams noteikt modificētās fāžu vadu un bruņu apvalka NS īpatnējās pretestības, skaitliski ierēķinot fāžu ekrānu ietekmi:

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{L20}^0 &= \dot{Z}_{L0}^0 - (\dot{Z}_{MLEKR0}^0)^2 / \dot{Z}_{EKRO}^0 = (0,251 + j1,981) - \\ &- (0,148 + j1,922)^2 / (1,582 + j1,922) \approx 1,012 + j0,697 \text{ } \Omega/\text{km}, \\ \dot{Z}_{BR20}^0 &= \dot{Z}_{BR0}^0 - (\dot{Z}_{MBREKR0}^0)^2 / \dot{Z}_{EKRO}^0 = (0,616 + j1,839) - \\ &- (0,148 + j1,839)^2 / (1,582 + j1,922) \approx 1,305 + j0,658 \text{ } \Omega/\text{km}, \\ \dot{Z}_{MLBR20}^0 &= \dot{Z}_{MLBR0}^0 - \dot{Z}_{MLEKR0}^0 \dot{Z}_{MBREKR0}^0 / \dot{Z}_{EKRO}^0 = (0,148 + j1,839) - \\ &- (0,148 + j1,922)(0,148 + j1,839) / (1,582 + j1,922) \approx 0,872 + j0,607 \text{ } \Omega/\text{km}.\end{aligned}$$

Tagad iespējams ierēķināt arī bruņu apvalka ietekmi un iegūt ekvivalento līnijas īpatnējo NS pretestību atbilstoši (P.9.5.):

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{Lekv0}^0 &= \dot{Z}_{L20}^0 - (\dot{Z}_{MLBR20}^0)^2 / \dot{Z}_{BR20}^0 = (1,012 + j0,697) - \\ &- (0,872 + j0,607)^2 / (1,305 + j0,658) \approx 0,446 + j0,170 \text{ } \Omega/\text{km}.\end{aligned}$$

Vienkāršības pēc turpmākajiem aprēķiniem uzreiz apzīmēsim ekvivalento NS pretestību vienkārši kā L1 NS pretestību $\dot{Z}_{L10}^0 = \dot{Z}_{Lekv0}^0$. Abas līnijas atrodas tīkla daļā, kuras sprieguma pakāpe sakrīt ar aprēķina spriegumu, un tālāka parametru redukcija uz citu sprieguma pakāpi nav nepieciešama. Salīdzinot aprēķinātās KL TS un NS īpatnējās pretestības, iespējams secināt, ka šādam kabelim, saņemējot fāžu ekrānus un bruņu apvalku abos galos, tie, līdzīgi kā zibensaizsardzības troses GL, samazina NS pretestības induktīvo komponenti gan skaitliski, gan tās attiecību pret aktīvo komponenti X^0/R^0 (šajā piemērā no 7,89 līdz 0,69, saņemējot fāžu ekrānus, un tālāk līdz 0,38, saņemējot arī bruņu apvalku). Attiecīgi samazinājās arī tās attiecība pret TS induktīvo komponenti X^0/X^1 (šajā piemērā no 19,23 līdz 6,77, saņemējot fāžu ekrānus, un tālāk līdz 1,65, saņemējot arī bruņu apvalku). NS pretestības aktīvā komponente kopumā ir pieaugusi, saņemētajos fāžu ekrānos un bruņu apvalkā radušos aktīvās jaudas zudumu dēļ, bet, ja saņemtu vienīgi fāžu ekrānus, tā būtu daudz augstāka, jo, salīdzinot ar bruņu apvalku, fāžu ekrāniem ir ievērojami mazāki šķērsriezuma laukumi. Šī iemesla dēļ, saņemējot vienīgi fāžu ekrānus, attiecība R^0/R^1 strauji pieauga no 2,44 līdz 9,83, bet, saņemējot arī bruņu apvalku, tā ievērojami samazinājās līdz 4,33, kas, protams, joprojām ir augstāka nekā KL bez zemētiem ekrāniem un bruņu apvalka.

Ievērojot šīs KL garumu ir iespējams no īpatnējām pretestībām un kapacitātēm pāriet uz visas līnijas pretestībām un kapacitātēm:

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{L1}^1 &= l_{L1} \dot{Z}_{L10}^1 = 3(0,103 + j0,103) = 0,309 + j0,309 \text{ } \Omega, \\ \dot{Z}_{L1}^0 &= l_{L1} \dot{Z}_{L10}^0 = 3(0,446 + j0,17) = 1,338 + j0,510 \text{ } \Omega, \\ C_{L1}^1 &= C_{L1}^2 = C_{L1}^0 = l_{L1} C_{L10}^1 = 3 \cdot 0,236 = 0,709 \text{ } \mu\text{F} = 0,709 \cdot 10^{-6} \text{ F}.\end{aligned}$$

Tālāk aplūkosim jauktās slodzes parametru aprēķinu, vispirms noskaidrojot AD un statisko slodžu aktīvās jaudas:

$$\begin{aligned}P_{AD} &= 0,7P_{\Sigma SL} = 0,7 \cdot 2,0 = 1,4 \text{ MW}, \\ P_{SL1} &= 0,3P_{\Sigma SL} = 0,3 \cdot 2,0 = 0,6 \text{ MW}.\end{aligned}$$

Tagad iespējams noteikt slodzes SL1 pilno jaudu un ekvivalento pretestību:

$$\dot{S}_{SL1} \approx 0,600 + j0,256 \text{ MVA},$$

$$\dot{Z}_{SL1} \approx U_{APR}^2 / \hat{S}_{SL1} = (10,5 \cdot 10^3)^2 / ((0,600 - j0,256) \cdot 10^6) \approx 155,45 + j66,33 \Omega.$$

Par AD ekvivalentu veidojošajiem dzinējiem nav sīkāku datu, izņemot to $\cos\varphi$. Tādēļ tiks pieņemts, ka to nominālā rotācijas frekvence ir 1500 min^{-1} jeb tie ir dzinēji ar diviem polu pāriem, kas ir samērā izplatīta konstrukcija. Tā kā nav zināms atsevišķo dzinēju nominālo jaudu sadalījums, tiks izmantotas vidējās vērtībās no 2.17. tabulas un teorētiskajā aprakstā norādītā magnetizācijas zara aktīvās pretestības diapazona vidējā vērtība. Pieņemto AD ekvivalenta aizvietošanas shēmas pretestību vērtību apkopojums dots P.9.7. tabulā.

P.9.7. tabula

Pirmā aprēķinu piemēru tīkla AD ekvivalenta aizvietošanas shēmas pretestības

R_μ , r. v.	X_μ , r. v.	R_1 , r. v.	X_1 , r. v.	R_2 , r. v.	X_2 , r. v.
0,220	3,139	0,072	0,093	0,061	0,143

Turpinājumā iespējams noteikt AD ekvivalenta TS un PS pretestības, balstoties uz 2. nodaļā dotajām aizvietošanas shēmām diviem raksturīgiem gadījumiem: nekustīgam rotoram ($s = 1$ r. v.) un slodzes režīmam (pieņemot $s = 0,05$ r. v.). Pirms tam vēl ir jānosaka AD pilnās jaudas modulis:

$$S_{NAD} = P_{AD} / \cos\varphi_{AD} = 1,4 / 0,86 \approx 1,628 \text{ MVA}.$$

TS un PS AD ekvivalentās pretestības sakrīt, ja slīde ir $s = 1$ r. v.:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{ADrv}^1 = \dot{Z}_{ADrv}^2 &= (R_1 + jX_1) + \frac{(R_\mu + jX_\mu)(R_2 + jX_2)}{(R_\mu + jX_\mu) + (R_2 + jX_1)} = (0,072 + j0,093) + \\ &+ \frac{(0,220 + j3,139)(0,061 + j0,143)}{(0,220 + j3,139) + (0,061 + j0,143)} \approx 0,128 + j0,231 \text{ r. v.} \end{aligned}$$

Tās iespējams pārveidot nosauktajās vienībās pie aprēķina sprieguma:

$$\dot{Z}_{ADs=1}^1 = \dot{Z}_{ADs=1}^2 = \dot{Z}_{ADrv}^1 U_{APR}^2 / S_{NAD} = (0,128 + j0,231)(10,5 \cdot 10^3)^2 / (1,628 \cdot 10^6) \approx 8,67 + j15,64 \Omega.$$

Pie slīdes $s = 0,05$ r. v. TS un PS pretestības nosakāmas šādi:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{ADrv}^1 &= (R_1 + jX_1) + \frac{(R_\mu + jX_\mu)\left(\left(\frac{R_2}{0,05}\right) + jX_2\right)}{(R_\mu + jX_\mu) + \left(\left(\frac{R_2}{0,05}\right) + jX_1\right)} = (0,072 + j0,093) + \\ &+ \frac{(0,220 + j3,139)(1,220 + j0,143)}{(0,220 + j3,139) + (1,220 + j0,143)} \approx 1,038 + j0,572 \text{ r. v.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{ADrv}^2 &= (R_1 + jX_1) + \frac{(R_\mu + jX_\mu)\left(\left(\frac{R_2}{1,95}\right) + jX_2\right)}{(R_\mu + jX_\mu) + \left(\left(\frac{R_2}{1,95}\right) + jX_1\right)} = (0,072 + j0,093) + \\ &+ \frac{(0,220 + j3,139)(0,031 + j0,143)}{(0,220 + j3,139) + (0,031 + j0,143)} \approx 0,101 + j0,230 \text{ r. v.} \end{aligned}$$

Šīs pretestības arī iespējams pārveidot nosauktajās vienībās pie aprēķina sprieguma:

$$\dot{Z}_{ADs=0,05}^1 = \dot{Z}_{ADrv}^1 U_{APR}^2 / S_{NAD} = (1,038 + j0,572)(10,5 \cdot 10^3)^2 / (1,628 \cdot 10^6) \approx 70,29 + j38,74 \Omega,$$

$$\dot{Z}_{ADs=0,05}^2 = \dot{Z}_{ADrv}^2 U_{APR}^2 / S_{NAD} = (0,101 + j0,230)(10,5 \cdot 10^3)^2 / (1,628 \cdot 10^6) \approx 6,84 + j15,58 \Omega.$$

NS pretestības netiks ņemtas vērā, jo atbilstoši 2. nodaļā dotajam aprakstam var pieņemt, ka AD neitrāles ir izolētas, kā tas visbiežāk praksē arī novērojams, lai izvairītos no strāvas augstāko harmoniku radītas AD rotora pārkaršanas. Iespējamais AD pret-EDS bojājumu sākuma momentam tiks noteikts no slodzes režīma parametru aprēķina rezultātiem, kuros AD tiks ņemts vērā tā ar nominālo patērēto jaudu $\dot{S}_{NAD} \approx 1,400 + j0,831$ MVA.

Tagad iespējams parādīt atsevišķi aprēķinātās pretestības divtinumu transformatoriem, kuriem nav veiktas sprieguma regulatora pozīciju izmaiņas (P.9.8. tabula).

P.9.8. tabula

Pirmā aprēķinu piemēru tīkla transformatoru aizvietošanas shēmas pretestības

Transformators	T1	T2	TN
\dot{Z}_T, Ω	$0,38 + j2,57$	$0,38 + j2,57$	$0,64 + j3,38$

Slodzes SL2 pilnā jauda un ekvivalentā pretestība ir

$$\dot{S}_{SL2} \approx 2,000 + j1,025 \text{ MVA},$$

$$\dot{Z}_{SL2} \approx U_{APR}^2 / \dot{S}_{SL2} = (10,5 \cdot 10^3)^2 / ((2,000 - j1,025) \cdot 10^6) \approx 43,66 + j22,37 \Omega.$$

Apvienotās energosistēmas S aprēķinātā pretestība, kas konkrētajā piemērā pieņemta vienāda visām secībām, kopā ar A fāzes EDS dota P.9.9. tabulā.

P.9.9. tabula

Pirmā aprēķinu piemēru tīkla sistēmas aizvietošanas shēmu pretestība un A fāzes EDS

\dot{Z}_S, Ω	\dot{E}_{SA}, kV
$0,02 + j0,11$	$6,062 + j0$

Ģenerators G pretestības, kuras aprēķinātas atsevišķi, apkopotas P.9.10. tabulā.

P.9.10. tabula

Pirmā aprēķinu piemēru tīkla ģenerators aizvietošanas shēmu pretestības

Parametrs	Vērtība
\dot{Z}_{GSL}^1, Ω	$0,07 + j25,14$
$\dot{Z}_G^{1''}, \Omega$	$0,07 + j1,75$
$\dot{Z}_G^{1'}, \Omega$	$0,07 + j2,53$
\dot{Z}_G^2, Ω	$0,59 + j2,13$
\dot{Z}_G^0, Ω	$0,07 + j0,85$

Ģenerators EDS tiks noteikts no slodzes režīma parametru aprēķina rezultātiem. Virspārejas un pārejas režīma EDS moduļi pieņemti atbilstoši 2.15. tabulas datiem $\dot{E}_{Grv}'' = 1,08$ r. v. un $\dot{E}_{Grv}' = 1,12$ r. v.

Turpinājumā tiks parādītas GL L2 II veida aizvietošanas shēmas parametru vērtības (P.9.11. tabula).

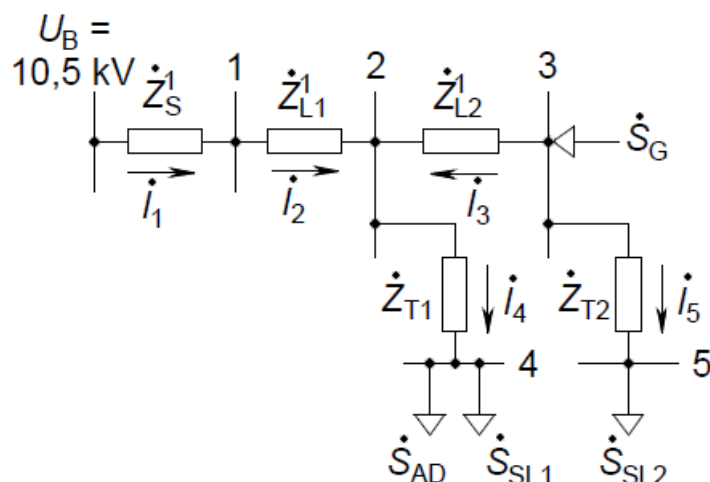
P.9.11. tabula

Pirmā aprēķinu piemēru tīkla GL L2 aizvietošanas shēmas parametri

Parametrs	Vērtība
$\dot{Z}_{L0}^1, \Omega/\text{km}$	$0,152 + j0,361$
$\dot{Z}_{L0}^0, \Omega/\text{km}$	$0,301 + j1,494$
$C_{L0}^1, \text{F}/\text{km}$	$9,66 \cdot 10^{-9}$
$C_{L0}^0, \text{F}/\text{km}$	$4,28 \cdot 10^{-9}$
\dot{Z}_L^1, Ω	$0,76 + j1,81$
\dot{Z}_L^0, Ω	$1,50 + j7,47$
C_L^1, F	$0,48 \cdot 10^{-7}$
C_L^0, F	$0,21 \cdot 10^{-7}$

L2 kapacitātes ir ļoti nelielas un slodzes režīmā pie 10,5 kV sprieguma sagaidāmā līnijas ģenerētā kapacitatīvā jauda ir apmēram 1,7 kvar, kas ir aptuveni 0,04 % no ģenerators nominālās reaktīvās jaudas, tādēļ šajā piemērā ne līnijas L1, ne L2 kapacitatīvās vadītspējas netiks ņemtas vērā.

Nākamais solis ir veikt slodzes režīma parametru aprēķinu, kas tiks izpildīts ar topoloģisko MPM metodi, izmantojot (4.23.) un (4.24.) vienādojumā parādīto metodiku. Slodzes režīma parametru aprēķina mērķis šim piemēram ir noskaidrot ģenerators G slodzes leņķi un AD pret-EDS vērtību. Iesākumā nepieciešama slodzes režīmam atbilstoša aizvietošanas shēma (P.9.4. att.).



P.9.4. att. Pirmā aprēķinu piemēru tīkla slodzes režīma parametru aprēķina aizvietošanas shēma.

Balstoties uz parādīto shēmu, jāsastāda pirmās incidences matrica M , pretestību matrica Z no zaru pretestību vektora ZZ un mezglu jaudu vektors S (skatīt to sastādīšanas principus 4. nodaļā). Atbilstoši P.9.4. attēlā parādītajiem strāvu virzieniem pirmās incidences matrica būs

M	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5
1	-1	1	0	0	0
2	0	-1	-1	1	0
3	0	0	1	0	1
4	0	0	0	-1	0
5	0	0	0	0	-1

Zaru pretestību vektors būs

ZZ	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5
	Z_S^1	Z_{L1}^1	Z_{L2}^1	Z_{T1}	Z_{T2}
	0,02 + j0,11	0,309 + j0,309	0,76 + j1,81	0,38 + j2,57	0,38 + j2,57

Ω ,

no kura pretestību matricu iegūst, tā vērtības izmantojot kā diagonāles elementus pretestību matricā, t. i., $Z = \text{diag}(ZZ)$. Savukārt mezglu jaudu vektors pieņem formu:

S	1	2	3	4	5
	0	0	\dot{S}_G	$-1(\dot{S}_{SL1} + \dot{S}_{AD})$	$-\dot{S}_{SL2}$

MVA.

Slodzes režīma parametru aprēķina, kas realizēts ar 4. nodaļā parādīto slodzes režīma parametru aprēķina funkciju, programmas teksts:

```
tic %Sakam uzņemt apreķina laiku
clc; clear;
Ub=10.5; %Apreķina spriegums, kV
k3=sqrt(3);
%Divtinumu transformatoru pretestības, omi
Zt=[0.38+2.57i %T2
    0.38+2.57i]; %T1
%Sistemas pretestība, omi
Zs=(0.02+0.11i);
%Liniju tiessecības pretestības, omi
Zl1=[0.309+0.309i %L1
     0.76+1.81i]; %L2
%Generatora G jauda un slodzes rezīma pretestība, MVA un omi
Sg=6+1i;
Zgn=0.07+25.14i;
%Virsparejas un parejas rezīma EDS vērtības turbogeneratoriem, r.v.
EvpRV=1.08;
EpRV=1.12;
%AD statora slodzes rezīma pretestība, omi
Zad1=4.876+6.298i;
Sad=1.4+0.831i;
```

```

%Slodzu jaudas, MVA
Ssl=[2+1.087i
      2+1.025i];
%Pirmas incidences matrica
% 1 2 3 4 5
M=[-1 1 0 0 0 %1
    0 -1 -1 1 0 %2
    0 0 1 0 1 %3
    0 0 0 -1 0 %4
    0 0 0 0 -1];%5
MS=size(M,1); %Mezglu skaits
ZS=size(M,2); %Zaru skaits
Mt=M';
%Zaru pretestibu vektors, omi
ZZ=[Zs %I1
     Zl1(1) %I2
     Zl1(2) %I3
     Zt(1) %I4
     Zt(2)]; %I5
%Pretestibu matricas sastadisana
Z=diag(ZZ);
%Pretestibu matricas vienkarsota inversija
Z1=Z;
for i=1:ZS
    Z1(i,i)=1/Z(i,i);
end
%Mezglu jaudu vektors: Generacijas, liniju kapacitativas un slodzes jaudas,
MVA
S=[0 %B1
   0 %B2
   Sg %B3
   -Ssl(1) %B4
   -Ssl(2)];%B5
EPS=1e-6;%Precizitates kriterija robeza Zeidela metodei, kV
%Mezglu spriegumu aprekins, kV
U=ZeidelSL(M,ZZ,S,Ub,EPS);
%Zaru stravu vektora satura aprekins, kA
Iz=Z1*Mt*(U-Ub)/k3;
%Zaru jaudu plusmu vektora satura aprekins, MVA
Sz=zeros(ZS,1);
for i=1:MS
    for j=1:ZS
        if M(i,j)~=0
            T=U(i)*conj(Iz(j))*k3;
            if abs(T)>abs(Sz(j))
                Sz(j)=T;
            end
        end
    end
end
end
%Jaudas zudumu zaru pretestibas aprekins, MVA
Szud=zeros(ZS,1);
for i=1:ZS
    Szud(i)=3*Iz(i)*conj(Iz(i))*Z(i,i);
end
disp 'Mezglu spriegumi, kV'
U
disp 'Spriegumu moduli, % un lenki gradus'
abs(U)*100/Ub
angle(U)*180/pi
disp 'Zaru stravas, kA un lenki gradus'

```

```

Iz
abs(Iz)
angle(Iz)*180/pi
disp 'Zaru jaudas plusmas, MVA'
Sz
disp 'Jaudas zudumi zaros, MVA'
Szud
%Generatora pirmasavarijas A fazes EDSi
disp 'EqG slodzes rezima kV; lenkis grados un modulis kV'
EqG=(U(3)/k3)+(Iz(3)+Iz(5))*Zgn
dEqG=angle(EqG)*180/pi
MEqG=abs(EqG)
disp 'EqG modulis visparejas un parejas rezima, kV un to kompleksas
vertibas kV'
MEqGvp=Evprv*Ub/k3
EqGvp=MEqGvp*(cos(angle(EqG))+sin(angle(EqG))*1i)
MEqGp=EpRV*Ub/k3
EqGp=MEqGp*(cos(angle(EqG))+sin(angle(EqG))*1i)
%AD stravas noteiksana
disp 'AD kopnu spriegums kV, ieverojot tiessecibas pagriezenu T1 par -30
gradiem'
UB4=U(4)*(0.866-0.5i)
disp 'AD strava kA, ieverojot ieguto kopnu spriegumu'
Iad=conj(Sad)/(k3*conj(UB4))
%AD pret-EDS noteiksana
disp 'AD pret-EDS, kV; ta lenkis grados un modulis, kV'
EadSL=(UB4/k3)-Iad*Zad1
dEad=angle(EadSL)*180/pi
MEad=abs(EadSL)
toc %beidzam uznemt aprekinu izpildes laiku

```

Aprēķinu rezultātā iegūtais mezglu spriegumu vektors:

$$\begin{array}{l}
 U \\
 1 \quad 10,49 + j0,02 \\
 2 \quad 10,49 + j0,12 \\
 3 \quad 10,70 + j0,82 \\
 4 \quad 10,13 - j0,33 \\
 5 \quad 10,39 + j0,36
 \end{array} \text{ kV,}$$

kuru, izmantojot ar vienādojumu sistēmu $I_Z = Z^{-1}(E + M^T(U - U_B))$, ņemot vērā, ka E aizpildīts ar 0 V un dalot bāzes un mezglu spriegumus ar $\sqrt{3}$, lai pārietu uz fāzes spriegumu vērtībām, tika iegūts zaru strāvu vektors:

$$\begin{array}{l}
 I_Z \\
 \dot{I}_1 \quad -0,101 - j0,090 \\
 \dot{I}_2 \quad -0,101 - j0,090 \\
 \dot{I}_3 \quad 0,213 + j0,024 \\
 \dot{I}_4 \quad 0,112 - j0,066 \\
 \dot{I}_5 \quad 0,113 - j0,053
 \end{array} \text{ kA.}$$

Ņemot vērā, ka starp sistēmu S un ģeneratoru G nav transformatora ar kompleksu transformācijas koeficientu, uzreiz iespējams lietot aprēķināto ģeneratoru kopņu spriegumu un

tā A fāzes strāvu, kuru šeit veido 3. un 5. zara strāvas, lai noteiktu ģenerators A fāzes EDS slodzes režīmā:

$$\begin{aligned}\dot{E}_{qG} &= (U(3)/\sqrt{3}) + (i_3 + i_5)\dot{Z}_{GSL}^1 = ((10,70 + j0,82)/\sqrt{3}) + \\ &+ ((0,213 + j0,024) + (0,113 - j0,053))(0,07 + j25,14) \approx 6,92 + j8,67 \approx \\ &\approx 11,10e^{j51,39^\circ} \text{ kV.}\end{aligned}$$

Pieņemot, ka ģenerators rotora stāvoklis un tam atbilstošais EDS leņķis nemainīsies bojājumu sākuma momentā, ir iespējams noteikt aptuvenas virspārejas un pārejas režīmu EDS vērtības:

$$\begin{aligned}\dot{E}_{qG}'' &= (E_{Grv}'' U_{APR}/\sqrt{3})(\cos(\delta) + j \sin(\delta)) = (1,08 \cdot 10,5/\sqrt{3}) \cdot \\ &\cdot (\cos(51,39^\circ) + j \sin(51,39^\circ)) \approx 4,09 + j5,12 \text{ kV,} \\ \dot{E}_{qG}' &= (E_{Grv}' U_{APR}/\sqrt{3})(\cos(\delta) + j \sin(\delta)) = (1,12 \cdot 10,5/\sqrt{3}) \cdot \\ &\cdot (\cos(51,39^\circ) + j \sin(51,39^\circ)) \approx 4,24 + j5,31 \text{ kV.}\end{aligned}$$

AD pret-EDS noteikšanai vispirms jāzina statora pretestība, kas reducēta pie aprēķina sprieguma:

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{AD1}^1 &= \dot{Z}_{AD1rv}^1 U_{APR}^2 / S_{NAD} = (0,072 + j0,093)(10,500 \cdot 10^3)^2 / (1,628 \cdot 10^6) \approx \\ &\approx 4,88 + j6,30 \Omega.\end{aligned}$$

Turklāt, nosakot AD pret-EDS, šajā tīklā jāņem vērā, ka transformatora T1 slēguma shēmas un grupas (Y₀/Δ-11) dēļ AD kopņu spriegums U(4) kā TS komponente vēl jāpagriež par -30°, pārejot uz sekundārā tinuma pusi, lai iegūtu faktisko AD kopņu sprieguma leņķi (tā moduli vienkāršībai atstāsim reducētu pie kopējā aprēķina sprieguma 10,5 kV):

$$\dot{U}_{B4} = U(4)e^{-j30^\circ} = (10,13 - j0,33)(0,866 - j0,5) \approx 8,61 - j5,35 \text{ kV.}$$

AD statora A fāzes strāva, balstoties uz iegūto kopņu B4 līnijas spriegumu:

$$\dot{I}_{AD} = \hat{S}_{AD}/\sqrt{3}\hat{U}_{B4} = (1,4 - j0,831)/\sqrt{3}(8,61 + j5,35) \approx 0,043 - j0,082 \text{ kA.}$$

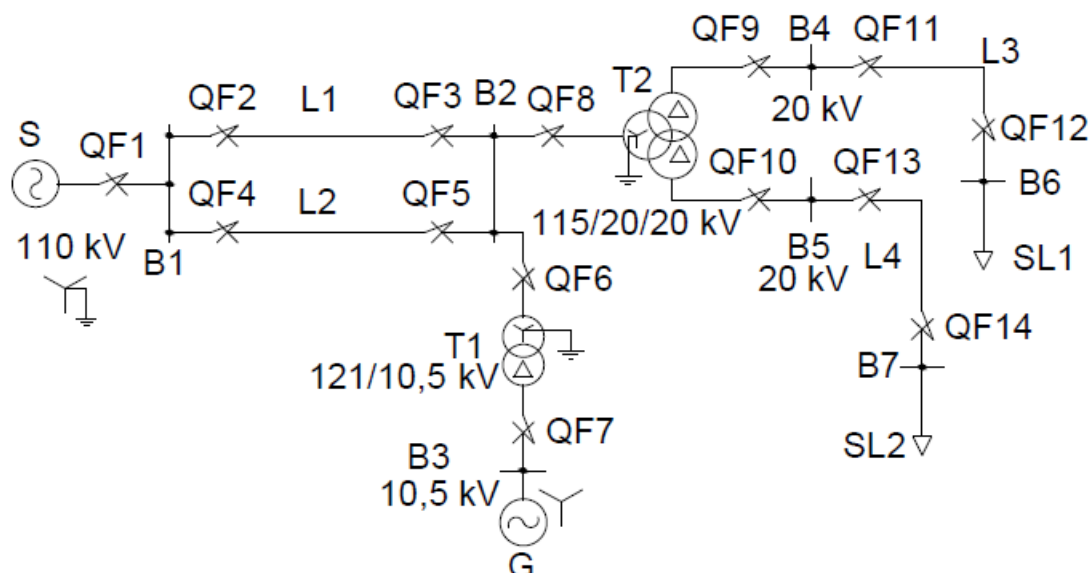
AD A fāzes pret-EDS nosaka no kopņu A fāzes sprieguma atņemot sprieguma kritumu AD statora pretestībā:

$$\begin{aligned}\dot{E}_{AD} &= (\dot{U}_{B4}/\sqrt{3}) - \dot{I}_{AD}\dot{Z}_{AD1}^1 = ((8,61 - j5,35)/\sqrt{3}) - (0,043 - j0,082) \cdot \\ &\cdot (4,88 + j6,30) \approx 4,24 - j2,96 \approx 5,17e^{-j34,88^\circ} \text{ kV.}\end{aligned}$$

Salīdzinājumam ar 2.6. apakšnodaļā minēto tuvināto pret-EDS vērtību (0,9 r. v.) var parādīt AD aprēķina fāzes pret-EDS vērtību: $E_{ADrv} = 5,17/(10,5/\sqrt{3}) \approx 0,853 \text{ r. v.}$

Otrā aprēķinu piemēru tīkla elementu izejas dati un sagatavojošie aprēķini

Otrā stacionāro režīmu parametru aprēķinu piemēros izmantotā tīkla shēma parādīta P.10.1. attēlā.



P.10.1. att. Otrā aprēķinu piemēru tīkla vienlīnijas shēma.

Parādītais tīkls nodrošina divu slodžu SL1 un SL2 barošanu no 110 kV sistēmas pa divķēžu GL (L1, L2) un no TG G ar transformatora T1 palīdzību. Abi barošanas avoti pieslēgti transformatoram ar šķeltu ZS tinumu. Tīkla elementus raksturojošie dati apkopoti turpinājumā dotajās tabulās (P.10.1.–P.10.5. tab.). T1 slēguma shēma un grupa pieņemta $Y_0/\Delta-11$, bet T2 tā pieņemta $Y_0/\Delta/\Delta-11-11$.

P.10.1. tabula

Otrā aprēķinu piemēru tīkla sistēmas dati

Parametri un mērvienības	U_N , kV	S_{KS} , MVA	X/R
Vērtības	110	1200	8

P.10.2. tabula

Otrā aprēķinu piemēru tīkla transformatoru dati [124]

Transformators	Tips	S_N , MVA	U_{AS} , kV	U_{ZS} , kV	U_K AS-ZS, %	U_K ZS-ZS, %	ΔP_K , kW	ΔP_0 , kW
T1	ТД-40000/110	40	121	10,5	11,0	–	170	34
T2	ТРДН-630000/110	63	115	20,0	10,5	30	245	50

P.10.3. tabula

Otrā aprēķinu piemēru tīkla ģenerators dati [124]

Parametrs	Vērtība
Tips	T-20-2Y3
S_N , MVA	25
$\cos\varphi_N$	0,8
n_N , min^{-1}	3000
X'_d , r. v.	0,131
X'_d , r. v.	0,2
X_d , r. v.	2,07
X^2 , r. v.	0,16
X^0 , r. v.	0,072
R^1 , r. v.	0,005
R^2 , r. v.	0,04
R^0 , r. v.	0,005
T'_d , s	0,095
T_d , s	1,47
T_J , s	9

P.10.4. tabula

Otrā aprēķinu piemēru tīkla GL dati

Parametrs un mērvienība	L1, L2	L3	L4
Līnijas garums l_L , km	40	10	8
Starpbalstu tips	Π110-2	ΠKO20-1	ΠKO20-1
Vadu skaits fāzē	1	1	1
Fāzes vada marka	AC120/19	AC185/24	AC240/32
Zibensaizsardzības trošu skaits	1	0	0
Zibensaizsardzības trošu marka	AC120/19	–	–

P.10.5. tabula

Otrā aprēķinu piemēru tīkla statisko slodžu dati

Slodzes nosaukums	SL1	SL2
P_N , MW	7,50	11,25
$\cos\varphi_N$	0,88	0,91

Tiek pieņemts, ka ģenerators nominālas slodzes režīmā attīsta jaudu $\dot{S}_G = 20 + j15$ MVA. Papildus jāatzīmē, ka transformatora T2 AS tinumam iestatīta sprieguma regulēšanas pakāpe: -5% , bet ZS tinumiem $+7,5\%$. Turklāt, ņemot vērā, ka starpbalsta Π110-2 rasējumos nav norādīts fāžu vadu augstums no zemes vai izolatoru garums, tad šajā piemērā fāzes izolatora

garums tiek pieņemts 1,27 m atbilstoši ražotāja *SIEMENS* 123 kV silikona izolatoram 3FL3–066–3YA10–2XX1 [125]. Praktiski gan biežāk lieto keramiskos izolatorus, bet aprēķina gaita tādēļ nemainās. Pieņemts arī, ka zibensaizsardzības troses stiprinātas tieši pie balstiem un ka aprēķina spriegums ir $U_{APR} = 115$ kV.

Šim piemēram detalizētāk aplūkosim sistēmas, transformatoru, TG un statiskās slodzes aizvietošanas shēmu parametru aprēķinus. Vispirms aprēķināma sistēmas pretestība, kuru šajā piemērā pieņemsim vienādu visām secību aizvietošanas shēmām, un vismaz tās A fāzes EDS. Zinot sistēmas īsslēguma jaudu, iespējams noteikt tās pretestības moduli:

$$Z_S = U_{APR}^2 / S_{KS} = (115 \cdot 10^3)^2 / (1200 \cdot 10^6) \approx 11,02 \Omega.$$

Savukārt, zinot pretestības komponentu attiecību X/R , var noteikt sistēmas pretestības leņķi un sistēmas pilnās pretestības vērtību:

$$\varphi_S = \arctg(X/R) = \arctg(8) \approx 82,87^\circ,$$

$$\dot{Z}_S = Z_S(\cos(\varphi_S) + j \sin(\varphi_S)) = 11,02(\cos(82,87^\circ) + j \sin(82,87^\circ)) \approx 1,37 + j10,94 \Omega.$$

Tālāk iespējams noteikt sistēmas A fāzes EDS vērtību, pieņemot, ka sistēmas EDS modulis ir 1 r. v. un leņķis ir 0° :

$$\dot{E}_{SA} = E_{TV} U_{APR}(\cos(\delta_S) + j \sin(\delta_S)) / \sqrt{3} = 1 \cdot 115 / \sqrt{3} \approx 66,4 \text{ kV}.$$

Turpinājumā aplūkots divtinumu transformatora T1 un transformatora ar šķeltu ZS tinumu T2 aizvietošanas shēmu parametru aprēķins. Ņemot vērā, ka T1 nav veikta papildu sprieguma regulēšana, uzreiz var veikt pretestību aprēķinus, izmantojot aprēķina spriegumam tuvāko AS tinuma nominālo spriegumu:

$$Z_{T1} = U_{K\%AS} U_{AS}^2 / 100 S_{NT} = 11 \cdot (121 \cdot 10^3)^2 / (100 \cdot 40 \cdot 10^6) \approx 40,26 \Omega,$$

$$R_{T1} = \Delta P_K U_{AS}^2 / S_{NT}^2 = 170 \cdot 10^3 \cdot (121 \cdot 10^3)^2 / (40 \cdot 10^6)^2 \approx 1,56 \Omega,$$

$$X_{T1} = \sqrt{Z_{T1}^2 - R_{T1}^2} = \sqrt{40,26^2 - 1,56^2} \approx 40,23 \Omega,$$

$$\dot{Z}_{T1} = R_{T1} + jX_{T1} = 1,56 + j40,23 \Omega.$$

Transformatoram T2 AS tinumam ieregulēta sprieguma pakāpe: -5% , kura šim tinumam atbilst $0,95 \cdot 121 \approx 114,95$ kV, bet ZS tinumiem ieregulēta sprieguma pakāpe $+7,5\%$, kura, reducējot uz aprēķina spriegumu, atbilst $115 \cdot 1,075 \approx 123,63$ kV. Šajā piemērā netiks ņemtas vērā īsslēguma sprieguma un aktīvās jaudas zudumu izmaiņas sprieguma regulēšanas dēļ, bet tuvināti tiks izmantoti faktiskie tinumu spriegumi, lai ievērotu sprieguma regulēšanas ietekmi uz tinumu ekvivalentajām pretestībām. Pirms pašu pretestību aprēķina jānosaka arī šķelšanas koeficients un atsevišķo tinumu īsslēgumu spriegumi:

$$K_\xi = U_{K\%ZS1-ZS2} / U_{K\%AS-ZS} = 30 / 10,5 \approx 2,86,$$

$$U_{K\%AS} = U_{K\%AS-ZS}(1 - K_\xi / 2n_\xi) = 10,5(1 - 2,86 / 2 \cdot 2) \approx 3 \%,$$

$$U_{K\%ZS1} = U_{K\%ZS2} = U_{K\%ZS1-ZS2} / 2 = 30 / 2 \approx 15 \%.$$

Tagad iespējams noteikt tinumu pretestības, ņemot vērā to ieregulētos spriegumus (ZS tinumiem reducēts uz 115 kV):

$$Z_{T2AS} = U_{K\%AS} U_{AS}^2 / 100 S_{NT} = 3 \cdot (114,95 \cdot 10^3)^2 / (100 \cdot 63 \cdot 10^6) \approx 6,29 \Omega,$$

$$Z_{T2ZS1} = Z_{T2ZS2} = U_{K\%ZS1} U_N^2 / 100 S_{NT} = 15 \cdot (123,63 \cdot 10^3)^2 / (100 \cdot 63 \cdot 10^6) \approx 36,39 \Omega.$$

Šajā piemērā vēl pieņemsim, ka T2 ZS tinumu jauda ir 66,667 % S_{NT} , tādēļ iesākumā tiks noteikta AS tinuma aktīvā pretestība, bet uz AS pusi reducēto ZS tinumu pretestību iespējams noteikt no tinumu jaudu attiecības:

$$R_{T2AS} = \Delta P_{Kmax} U_{AS}^2 / 1,83 S_{NT}^2 = 245 \cdot 10^3 \cdot (114,95 \cdot 10^3)^2 / [1,83 \cdot (63,00 \cdot 10^6)^2] \approx 0,45 \Omega,$$

$$R'_{T2ZS1} = R'_{T2ZS2} = R_{AS} S_{AS} / S_{ZS} = 1,5 R_{AS} = 1,5 \cdot 0,45 \approx 0,68 \Omega.$$

Atliek noteikt AS un ZS tinumu induktīvās un pilnās pretestības:

$$X_{T2AS} = \sqrt{Z_{T2AS}^2 - R_{T2AS}^2} = \sqrt{6,29^2 - 0,45^2} \approx 6,27 \Omega,$$

$$X_{T2ZS1} = X_{T2ZS2} = \sqrt{Z_{T2ZS1}^2 - R_{T2ZS1}^2} = \sqrt{36,39^2 - 0,68^2} \approx 36,39 \Omega,$$

$$\dot{Z}_{T2A} = R_{T2AS} + jX_{T2AS} = 0,45 + j6,27 \Omega,$$

$$\dot{Z}_{T2Z} = R_{T2ZS1} + jX_{T2ZS1} = 0,68 + j36,39 \Omega.$$

Turpinājumā aplūkoti TG aizvietošanas shēmu pretestību aprēķini. Iesākumā tiks parādīti TS pretestību aprēķini slodzes, virspārejas un pārejas režīmiem, balstoties uz to zināmajām vērtībām r. v. sistēmā:

$$R_G^1 = R_{Grv}^1 U_{APR}^2 / S_{GN} = 0,005 (115 \cdot 10^3)^2 / (25 \cdot 10^6) \approx 2,65 \Omega,$$

$$X_{GSL}^1 = X_d U_{APR}^2 / S_{GN} = 2,07 (115 \cdot 10^3)^2 / (25 \cdot 10^6) \approx 1095,03 \Omega,$$

$$X_G'' = X_d'' U_{APR}^2 / S_{GN} = 0,131 (115 \cdot 10^3)^2 / (25 \cdot 10^6) \approx 69,30 \Omega,$$

$$X_G' = X_d' U_{APR}^2 / S_{GN} = 0,2 (115 \cdot 10^3)^2 / (25 \cdot 10^6) \approx 105,80 \Omega.$$

Atkarībā no aplūkojamā TG režīma tā aizvietošanas shēmās lietojamas šādas pilnās pretestības:

$$\dot{Z}_{GSL}^1 = R_G^1 + jX_{GSL}^1 = 2,65 + j109,03 \Omega,$$

$$\dot{Z}_G^{1''} = R_G^1 + jX_G'' = 2,65 + j69,3 \Omega,$$

$$\dot{Z}_G^{1'} = R_G^1 + jX_G' = 2,65 + j105,8 \Omega.$$

Analoģiski iespējams noteikt PS un NS pretestības, uz kurām neattiecas ģenerators iekšējo pārejas procesu radītās pretestību izmaiņas:

$$R_G^2 = R_{Grv}^2 U_{APR}^2 / S_{GN} = 0,04 (115 \cdot 10^3)^2 / (25 \cdot 10^6) \approx 21,16 \Omega,$$

$$X_G^2 = X_{Grv}^2 U_{APR}^2 / S_{GN} = 0,16 (115 \cdot 10^3)^2 / (25 \cdot 10^6) \approx 84,64 \Omega,$$

$$R_G^0 = R_{Grv}^0 U_{APR}^2 / S_{GN} = 0,005 (115 \cdot 10^3)^2 / (25 \cdot 10^6) \approx 2,65 \Omega,$$

$$X_G^0 = X_{Grv}^0 U_{APR}^2 / S_{GN} = 0,072 (115 \cdot 10^3)^2 / (25 \cdot 10^6) \approx 38,09 \Omega.$$

Attiecīgi PS un NS, ja šī TG neutrāli sazēmētu, aizvietošanas shēmās izmantojamas šādas pilnās pretestības:

$$\dot{Z}_G^2 = R_G^2 + jX_G^2 = 21,16 + j84,64 \Omega,$$

$$\dot{Z}_G^0 = R_G^0 + jX_G^0 = 2,65 + j38,09 \Omega.$$

Ģenerators EDS būs iespējams aprēķināt pēc slodzes režīma parametru aprēķina, kurā ģenerators tiks ņemts vērā ar tā attīstīto jaudu $\dot{S}_G = 20 + j15$ MVA. Papildus tam virspārejas

un pārejas režīma EDS moduļi pieņemti atbilstoši 2.15. tabulas datiem: $\dot{E}_{Grv}'' = 1,08$ r. v. un $\dot{E}_{Grv}' = 1,12$ r. v.

Nākamās tiks noteiktas statisko slodžu pretestības, balstoties uz to pilno jaudu:

$$\dot{S}_{SL1} \approx 7,50 + j4,05 \text{ MVA}, \dot{S}_{SL2} \approx 11,25 + j5,13 \text{ MVA},$$

$$\dot{Z}_{SL1} \approx U_{APR}^2 / \hat{S}_{SL1} = (115 \cdot 10^3)^2 / ((7,50 - j4,05) \cdot 10^6) \approx 1365,5 + j737 \Omega,$$

$$\dot{Z}_{SL2} \approx U_{APR}^2 / \hat{S}_{SL2} = (115 \cdot 10^3)^2 / ((11,25 - j5,13) \cdot 10^6) \approx 973,5 + j443,5 \Omega.$$

NS aizvietošanas shēmās abas slodzes netiks ņemtas vērā, jo tās pieslēgtas tīklam ar izolētu neitrāli. Turpinājumā apkopotas atsevišķi noteiktās līniju II veida aizvietošanas shēmas parametru vērtības (NS jau ir ierēķināta trošu ietekme).

P.10.6. tabula

Otrā aprēķinu piemēru tīkla GL aizvietošanas shēmu parametri

Līnijas nosaukums	L1, L2	L3	L4
$\dot{Z}_{L0}^1, \Omega/\text{km}$	0,235 + j0,43	0,152 + j0,335	0,118 + j0,327
$\dot{Z}_{L0}^0, \Omega/\text{km}$	0,391 + j1,074	0,301 + j1,546	0,266 + j1,538
$C_{L0}^1, \text{F}/\text{km}$	$8,13 \cdot 10^{-9}$	$10,41 \cdot 10^{-9}$	$10,68 \cdot 10^{-9}$
$C_{L0}^0, \text{F}/\text{km}$	$4,61 \cdot 10^{-9}$	$4,23 \cdot 10^{-9}$	$4,28 \cdot 10^{-9}$
\dot{Z}_L^1, Ω	9,4 + j17,18	1,52 + j3,35	0,94 + j2,62
\dot{Z}_L^0, Ω	15,65 + j42,97	3,01 + j15,46	2,13 + j12,31
C_L^1, F	$3,25 \cdot 10^{-7}$	$1,04 \cdot 10^{-7}$	$0,85 \cdot 10^{-7}$
C_L^0, F	$1,84 \cdot 10^{-7}$	$0,42 \cdot 10^{-7}$	$0,34 \cdot 10^{-7}$
$\dot{Z}_{Mp}^0, \Omega/\text{km}$	0,156 + j0,605	–	–
$\dot{Z}_{L0+Mp}^0, \Omega/\text{km}$	0,547 + j1,679	–	–

Ņemot vērā, ka līniju parametri principā tiek aprēķināti pie to nominālajiem spriegumiem, ir jāreducē L3 un L4 parametri no 20 kV uz aprēķina spriegumu U_{APR} , izmantojot transformācijas koeficientu $k_{TR} = 115 / 20 = 5,75$:

$$\dot{Z}_{L3}^1 = \dot{Z}_{L3,20kV}^1 (k_{TR})^2 = 5,75^2 (1,52 + j3,35) \approx 50,26 + j110,76 \Omega,$$

$$\dot{Z}_{L3}^0 = \dot{Z}_{L3,20kV}^0 (k_{TR})^2 = 5,75^2 (3,01 + j15,46) \approx 99,52 + j511,15 \Omega,$$

$$\dot{Z}_{L4}^1 = \dot{Z}_{L4,20kV}^1 (k_{TR})^2 = 5,75^2 (0,94 + j2,65) \approx 31,08 + j86,62 \Omega,$$

$$\dot{Z}_{L4}^0 = \dot{Z}_{L4,20kV}^0 (k_{TR})^2 = 5,75^2 (2,13 + j12,31) \approx 70,42 + j407,00 \Omega.$$

Līdzīgi, lai nodrošinātu, ka šo līniju ģenerētās kapacitatīvās jaudas paliek nemainīgas, veicot aprēķinus ar spriegumu U_{APR} , kapacitātes ir jādala ar transformācijas koeficienta kvadrātu:

$$C_{L3}^1 = C_{L3,20kV}^1 / (k_{TR})^2 = 1,04 \cdot 10^{-7} / 5,75^2 \approx 3,24 \cdot 10^{-9} \text{ F},$$

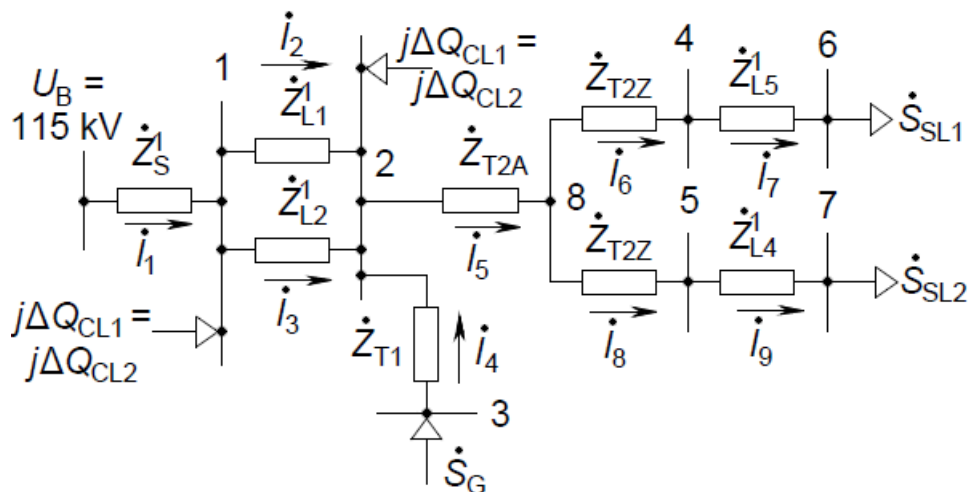
$$C_{L3}^0 = C_{L3,20kV}^0 / (k_{TR})^2 = 0,42 \cdot 10^{-7} / 5,75^2 \approx 1,27 \cdot 10^{-9} \text{ F},$$

$$C_{L4}^1 = C_{L4,20kV}^1 / (k_{TR})^2 = 0,85 \cdot 10^{-7} / 5,75^2 \approx 2,57 \cdot 10^{-9} \text{ F},$$

$$C_{L4}^0 = C_{L4,20kV}^0 / (k_{TR})^2 = 0,34 \cdot 10^{-7} / 5,75^2 \approx 1,03 \cdot 10^{-9} \text{ F}.$$

Iepriekšējiem elementiem šāda redukcija nebija nepieciešama, jo to pretestību aprēķinos parādījās spriegums kvadrātā, kas ļauj automātiski veikt redukciju, reālā sprieguma vietā lietojot aprēķina spriegumu. Slodzes režīma parametru aprēķinam abu 110 kV līniju kapacitātes aizvietošim ar to ģenerēto reaktīvo jaudu, kura katra no līnijām pie 115 kV sprieguma ir $\Delta Q_{CL1} = \omega C_{L1}^1 U_{APR}^2 = 100\pi \cdot 3,25 \cdot 10^{-7} (115 \cdot 10^3)^2 \approx 1,35 \cdot 10^6 \text{ VA} = 1,35 \text{ Mvar}$.

Nākamais solis ir veikt slodzes režīma parametru aprēķinu, kas tiks izpildīts ar topoloģisko MPM metodi, izmantojot (4.23.) un (4.24.) vienādojumā parādīto metodiku. Slodzes režīma parametru aprēķina mērķis šajā piemērā ir noskaidrot ģeneratora G slodzes leņķi. Iesākumā ir jāastāda slodzes režīma parametru aprēķina aizvietošanas shēma (P.10.2. att.). Šajā shēmā vienādās un uz pusi dalāmās L1 un L2 kapacitatīvās jaudas jau ir summētas un pieslēgtas kopnēm 1 un 2, jo precīzāka L1, L2 aizvietošanas shēmas realizācija neradīs ievērojamas izmaiņas ģeneratora EDS vērtībā.



P.10.2. att. Otrā aprēķinu piemēru tīkla slodzes režīma parametru aprēķina aizvietošanas shēma.

Balstoties uz parādīto aizvietošanas shēmu, jāastāda pirmās incidences matrica M , pretestību matrica Z , ko iegūst no zaru pretestību vektora ZZ , un mezglu jaudu vektors S atbilstoši 4. nodaļā dotajiem paskaidrojumiem. P.10.2. attēlā parādītajiem strāvu virzieniem pirmās incidences matrica būs

M	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8	I_9
1	-1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	0	-1	-1	-1	1	0	0	0	0
3	0	0	0	1	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	-1	1	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	-1	1
6	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
8	0	0	0	0	-1	1	0	1	0

Zaru pretestību vektors ZZ būs

$$\begin{array}{l}
 I_Z \\
 \begin{array}{l}
 \dot{I}_1 \quad \dot{Z}_S^1 \quad 1,37 + j10,94 \\
 \dot{I}_2 \quad \dot{Z}_{L1}^1 \quad 9,4 + j17,18 \\
 \dot{I}_3 \quad \dot{Z}_{L2}^1 \quad 9,4 + j17,18 \\
 \dot{I}_4 \quad \dot{Z}_{T1} = 1,56 + j40,23 \\
 \dot{I}_5 \quad \dot{Z}_{T2A} = 0,45 + j6,27 \\
 \dot{I}_6 \quad \dot{Z}_{T2Z} = 0,68 + j36,39 \\
 \dot{I}_7 \quad \dot{Z}_{L3}^1 \quad 50,26 + j110,76 \\
 \dot{I}_8 \quad \dot{Z}_{T2Z} = 0,68 + j36,39 \\
 \dot{I}_9 \quad \dot{Z}_{L4}^1 \quad 31,08 + j86,62
 \end{array}
 \end{array} \quad \Omega,$$

no kura pretestību matricu iegūst, tā vērtības izmantojot kā diagonāles elementus pretestību matricā, t. i., $Z = \text{diag}(ZZ)$. Savukārt mezglu jaudu vektors S pieņem formu:

$$\begin{array}{l}
 S \\
 \begin{array}{l}
 1 \quad j\Delta Q_{CL1} \quad 0,00 + j1,35 \\
 2 \quad j\Delta Q_{CL1} \quad 0,00 + j1,35 \\
 3 \quad \dot{S}_G \quad 20,00 + j15,00 \\
 4 \quad 0 = 0,00 \quad \text{MVA.} \\
 5 \quad 0 \quad 0,00 \\
 6 \quad -\dot{S}_{SL1} \quad -7,50 - j4,05 \\
 7 \quad -\dot{S}_{SL2} \quad -11,25 - j5,13 \\
 8 \quad 0 \quad 0,00
 \end{array}
 \end{array}$$

Slodzes režīma parametru aprēķina, kas īstenots ar 4. nodaļā parādīto slodzes režīma parametru aprēķina funkciju, programmas teksts:

```

tic %Sakam uzņemt apreķina laiku
clc; clear;
Ub=115; %Apreķina spriegums, kV
k3=sqrt(3);
%Divtinumu transformatoru pretestības, omi
Zt=1.56+40.23i; %T1
%Skelta ZS tinuma transformatoru pretestības, omi
%   AS           ZS
Ztsk=[(0.45+6.27i) (0.68+36.39i)]; %T2
%Sistemas pretestība, omi
Zs=(1.37+10.94i);
%Liniju tiessecības pretestības, omi
Zl1=[9.4+17.18i      %L1
     9.4+17.18i      %L2
     50.26+110.76i   %L3
     31.08+86.62i]; %L4
%L1, L2 kapacitatīvas generetas jaudas, Mvar
dQc=1.35;
%Generatora G jauda un slodzes režīma pretestība, MVA un omi
Sg=20+15i;
Zgn=2.65+1095.03i;
%Virsparejas un parejas režīma EDS vērtības turbogeneratoriem, r.v.
EvpRV=1.08;
EpRV=1.12;

```

```

%Slodzu jaudas, MVA
Ssl=[7.5+4.05i
      11.25+5.13i];
%Pirmas incidences matrica
% 1 2 3 4 5 6 7 8 9
M=[-1 1 1 0 0 0 0 0 0 %1
    0 -1 -1 -1 1 0 0 0 0 %2
    0 0 0 1 0 0 0 0 0 %3
    0 0 0 0 0 -1 1 0 0 %4
    0 0 0 0 0 0 -1 1 0 %5
    0 0 0 0 0 0 -1 0 0 %6
    0 0 0 0 0 0 0 0 -1 %7
    0 0 0 0 -1 1 0 1 0];%8
MS=size(M,1); %Mezglu skaits
ZS=size(M,2); %Zaru skaits
Mt=M';
%Zaru pretestibu vektors, omi
ZZ=[Zs %I1
     Zl1(1) %I2
     Zl1(2) %I3
     Zt %I4
     Ztsk(1,1) %I5
     Ztsk(1,2) %I6
     Zl1(3) %I7
     Ztsk(1,2) %I8
     Zl1(4)]; %I9
%Pretestibu matricas sastadisana
Z=diag(ZZ);
%Pretestibu matricas vienkarsota inversija
Z1=Z;
for i=1:ZS
    Z1(i,i)=1/Z(i,i);
end
%Mezglu jaudu vektors: Generacijas, liniju kapacitativas un slodzes jaudas,
MVA
S=[1i*dQc %1
   1i*dQc %2
   Sg %3
   0 %4
   0 %5
   -Ssl(1) %6
   -Ssl(2) %7
   0]; %8

EPS=1e-6;%Precizitates kriterija robeza Zeidela metodei, kV
U=ZeidelSL(M,ZZ,S,Ub,EPS);
%Zaru stravu vektora satura aprekins, kA
Iz=Z1*Mt*(U-Ub)/k3;
%Zaru jaudu plusmu vektora satura aprekins, MVA
Sz=zeros(ZS,1);
for i=1:MS
    for j=1:ZS
        if M(i,j)~=0
            T=U(i)*conj(Iz(j))*k3;
            if abs(T)>abs(Sz(j))
                Sz(j)=T;
            end
        end
    end
end
end
%Jaudas zudumi zaru pretestibas, MVA

```

```

Szud=zeros(ZS,1);
for i=1:ZS
    Szud(i)=3*Iz(i)*conj(Iz(i))*Z(i,i);
end
disp 'Mezglu spriegumi, kV'
U
disp 'Spriegumu moduli, % un lenki grados'
abs(U)*100/Ub
angle(U)*180/pi
disp 'Zaru stravas, kA un lenki grados'
Iz
abs(Iz)
angle(Iz)*180/pi
disp 'Zaru jaudu plusmas, MVA'
Sz
disp 'Jaudas zudumi zaru pretestibas, MVA'
Szud
disp 'B3 kopnu spriegums, kV, ieverojot tiessecibas komponentes pagriezienu
T1 par +30 gradiem'
UB3=U(4)*(0.866+0.5i)
disp 'G strava, kA, ieverojot tiessecibas komponentes pagriezienu T1 par
+30 gradiem'
IG=Iz(4)*(0.866+0.5i)
%Generatora pirmasavarijas A fazes EDSi
disp 'EqG slodzes rezima, kV; ta lenkis grados un modulis, kV'
EqG=(UB3/k3)+(IG*Zgn)
dEqG=angle(EqG)*180/pi
MEqG=abs(EqG)
disp 'EqG modulis visparejas un parejas rezima, kV; so EDS kompleksas
vertibas kV'
MEqGvp=Evprv*Ub/k3
EqGvp=MEqGvp*(cos(angle(EqG))+sin(angle(EqG))*1i)
MEqGp=EpRV*Ub/k3
EqGp=MEqGp*(cos(angle(EqG))+sin(angle(EqG))*1i)
toc %beidzam uzneimt aprekinu izpildes laiku

```

Aprēķinu rezultātā iegūtais mezglu spriegumu vektors:

U

1	$115,37 - j0,01$
2	$115,57 - j0,08$
3	$120,47 + j6,67$
4	$113,18 - j3,53$ kV,
5	$112,57 - j4,74$
6	$104,87 - j8,81$
7	$104,18 - j11,63$
8	$114,84 - j1,10$

no kuriem ar (4.12.) vienādojumu, ievērojot, ka E aizpildīts ar nullēm un papildus dalot bāzes un mezglu spriegumus ar $\sqrt{3}$, lai pārietu uz fāzes spriegumu vērtībām, tika iegūts zaru strāvu vektors:

$$\begin{aligned}
I_Z & \\
\dot{I}_1 & -0,002 + j0,019 \\
\dot{I}_2 & -0,001 + j0,006 \\
\dot{I}_3 & -0,001 + j0,006 \\
\dot{I}_4 & 0,100 - j0,066 \\
\dot{I}_5 & 0,098 - j0,061 \quad \text{kA.} \\
\dot{I}_6 & 0,039 - j0,026 \\
\dot{I}_7 & 0,039 - j0,026 \\
\dot{I}_8 & 0,058 - j0,035 \\
\dot{I}_9 & 0,058 - j0,035
\end{aligned}$$

Pirms ģenerators G EDS noteikšanas ir jāpagriež ģenerators kopņu sprieguma un zara strāvas vektori kā TS komponentes par 30° , jo starp sistēmu S un ģeneratoru G ir transformators T1 ar slēguma shēmu un grupu $Y_0/\Delta-11$ (pāreja no zvaigznes uz trīsstūra slēgumā esošā tinuma pusi), lai noteiktu faktisko EDS leņķi:

$$\dot{U}_{B3} = U(3)e^{j30^\circ} = (120,47 + j6,67)(0,866 + j0,5) \approx 99,7814 + j53,53 \text{ kV.}$$

$$\dot{I}_G = I_Z(4)e^{j30^\circ} = (0,100 - j0,066)(0,866 + j0,5) \approx 0,119 - j0,008 \text{ kA.}$$

Tagad iespējams aprēķināt G slodzes režīma EDS:

$$\begin{aligned}
\dot{E}_{qG} &= (\dot{U}_{B3}/\sqrt{3}) + \dot{I}_G \dot{Z}_{GSL}^1 = ((99,78 + j53,53)/\sqrt{3}) + (0,119 - j0,008) \cdot \\
&\cdot (2,65 + j1095,03) \approx 66,38 + j161,61 \approx 174,71e^{j67,67^\circ} \text{ kV.}
\end{aligned}$$

Pieņemot, ka ģenerators rotora stāvoklis un tam atbilstošais EDS leņķis nemainīsies bojājumu sākuma momentā, ir iespējams aptuveni noteikt virspārejas un pārejas režīma EDS:

$$\begin{aligned}
\dot{E}_{qG}'' &= (E_{Grv}'' U_{APR}/\sqrt{3})(\cos(\delta) + j \sin(\delta)) = (1,08 \cdot 115/\sqrt{3}) \cdot \\
&\cdot (\cos(67,67^\circ) + j \sin(67,67^\circ)) \approx 27,24 + j66,33 \text{ kV,}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{E}_{qG}' &= (E_{Grv}' U_{APR}/\sqrt{3})(\cos(\delta) + j \sin(\delta)) = \\
&= (1,12 \cdot 115/\sqrt{3})(\cos(67,67^\circ) + j \sin(67,67^\circ)) \approx 28,25 + j68,79 \text{ kV.}
\end{aligned}$$

AD un statiskā slodze, bet kopnei B7 ar invertoriem P1 un P2 un transformatoru T5 pieslēgtas divas saules paneļu grupas PV1 un PV2, kas ataino izkliedētu ģenerāciju atjaunojamo enerģijas avotu formā. Tīkla elementus raksturojošie dati apkopoti turpinājumā dotajās tabulās (P.11.1.–P.11.6. tab.). Transformatoru T1–T4 slēguma shēma un grupa pieņemta $Y_0/\Delta-11$ un transformatoram T5 tā pieņemta $Y_0/\Delta/\Delta-11-11$. Savukārt autotransformatoriem AT1 un AT2 slēgumu shēma un grupa pieņemta $Y_{0\text{ auto}}/\Delta-0-11$.

P.11.1. tabula

Trešā aprēķinu piemēru tīkla sistēmas dati

Parametri un mērvienības	U_N , kV	S_{KS} , MVA	X/R
Vērtības	750	5000	10

P.11.2. tabula

Trešā aprēķinu piemēru tīkla transformatoru dati [124]

Transformators	Tips	S_N , MVA	U_{AS} , kV	U_{ZS} , kV	U_K AS-ZS, %	U_K ZS-ZS, %	ΔP_K , kW	ΔP_0 , kW
T1	ТДЦ– 200000/330	200	347	13,8	11	-	520	180
T2	ТДЦ– 200000/330	200	347	13,8	11	-	520	180
T3	ТДЦ– 200000/330*	200	347	20,0	11	-	520	180
T4	ТДЦ– 200000/330*	200	347	20,0	11	-	520	180
T5	ТРДНС– 40000/330	40	330	6,3	11	28	180	80

*Pieņemts, ka iespējams pasūtīt ТДЦ–200000/330 modifikāciju, kuras sekundārais spriegums ir 20 kV.

P.11.3. tabula

Trešā aprēķinu piemēru tīkla autotransformatoru dati [124]

Parametrs un mērvienība	AT1	AT2
Tips	АОДЦ–417000/750/330	АОДЦ–417000/750/330
S_N , MVA	417	417
U_{AS} , kV	750	750
U_{VS} , kV	330	330
U_{ZS} , kV	10,5	10,5
U_K AS-VS, %	10	10
U_K AS-ZS, %	28	28
U_K VS-ZS, %	17	17
ΔP_K , kW	580	580
ΔP_0 , kW	217	217

Trešā aprēķinu piemēru tīkla ģeneratoru dati [124]

Parametrs un mērvienība	G1	G2
Tips	CB-855/235-32	CB-855/235-32
S_N , MVA	176,5	176,5
$\cos\varphi_N$	0,85	0,85
n_N , min ⁻¹	187,5	187,5
X''_d , r. v.	0,17	0,17
X'_d , r. v.	0,28	0,28
X_d , r. v.	1	1
X''_q , r. v.	0,23	0,23
X_q , r. v.	0,8	0,8
X^2 , r. v.	0,147	0,147
X^0 , r. v.	0,054	0,054
R^1 , r. v.	0,011	0,011
R^2 , r. v.	0,02	0,02
R^0 , r. v.	0,011	0,011
T''_d , s	0,05	0,05
T_d , s	1,8	1,8
T_J , s	8	8

Trešā aprēķinu piemēru tīkla GL dati

Parametrs un mērvienība	L1, L2	L3, L4	L5	L6
Līnijas garums l_L , km	175	100	70	80
Starpbalstu tips	П330-2Т	ПБ330-7	ПБ330-7	ПБ330-7
Vadu skaits fāzē	2	2	2	2
Vidējais attālums starp šķeltiem fāzes vadiem a_{vid} , m	0,4	0,4	0,4	0,4
Fāzes vada marka	2xAC240/39	2xAC240/39	2xAC240/39	2xAC240/39
Zibensaizsardzības trošu skaits	2	2	2	2
Zibensaizsardzības trošu marka	AC120/19	AC120/19	AC120/19	AC120/19

Trešā aprēķinu piemēru tīkla slodžu dati

Parametrs un mērvienība	SL1, AD	SL2	SL3
P_N, MW	200	40	40
$\cos\varphi_N$	–	0,90	0,90
$\cos\varphi_{SL}$	0,88	–	–
$\cos\varphi_{AD}$	0,85	–	–
Dzinēju un statiskās slodzes jaudas attiecība AD:SL	30:70	–	–

Saules paneļu grupai PV1 un PV2 pieņemta jauda 5 MW un $\cos\varphi = 0,9$. Turklāt pieņemts, ka ģeneratori nominālas slodzes režīmā attīsta jaudu $\dot{S}_{G1} = \dot{S}_{G2} = 150 + j15$ MVA. Ņemot vērā, ka starpbalstu П330–2Т un ПБ330–7 rasējumos nav norādīts fāžu vadu augstums no zemes, tad konkrētajā piemērā tiek pieņemts izolatora garums 3,19 m, kas atbilst ražotāja SIEMENS 362 kV silikona izolatoram 3FL3–177–3YA10–2XR1 [125]. Praksē, protams, biežāk lieto keramiskus izolatorus, bet aprēķina gaitu tas nemaina. Konkrētajā piemērā arī pieņemts, ka zibensaizsardzības troses stiprinātas tieši pie līnijas torņiem bez izolatoriem, jo izolētu vai vienā punktā zemētu trošu gadījumā trošu ietekmi varētu ignorēt arī NS parametru aprēķinā un nebūtu iespējams parādīt to ievērošanu GL NS parametru aprēķinā.

Konkrētajā piemērā sīkāk tiks demonstrēts autotransformatora aizvietošanas shēmas pretestību aprēķins, kā arī divķēžu GL ar šķeltiem vadiem un divām zibensaizsardzības trosēm aizvietošanas shēmu parametru aprēķins, jo tas ir salīdzinoši sarežģīts gadījums un ietver soļus, kas jāveic arī vienkāršāku līniju konfigurāciju gadījumā. Par aprēķina spriegumu pieņemts $U_{APR} = 340$ kV.

Sākot autotransformatora pretestību aprēķinu, līdzīgi kā transformatoriem ar šķeltiem tinumiem, jānosaka atsevišķo tinumu īsslēgumu spriegumi:

$$\begin{cases} U_{KAS} = 0,5(U_{KAS-VS} + U_{KAS-ZS} - U_{KVS-ZS}) = 0,5(10 + 28 - 17) = 10,5 \% \\ U_{KVS} = 0,5(U_{KAS-VS} + U_{KVS-ZS} - U_{KAS-ZS}) = 0,5(10 + 17 - 28) = -0,5 \approx 0 \% \\ U_{KZS} = 0,5(U_{KAS-ZS} + U_{KVS-ZS} - U_{KAS-VS}) = 0,5(28 + 17 - 10) = 17,5 \% \end{cases}$$

Šajā gadījumā VS tinuma pilnā pretestība šķietami ir jāpieņem par 0Ω , bet, pat ja izdalītā ekvivalentā VS tinuma reaktance sanāk 0Ω , šī tinuma aktīvā pretestība noteikti joprojām ir lielāka par 0Ω . Tālāk nosakāma tinumu aktīvā pretestība, kuru, pieņemot vienādas tinumu nominālās jaudas un uzreiz izmantojot U_{APR} tuvāko sprieguma pakāpi jeb VS tinuma nominālo spriegumu, aprēķina šādi:

$$R_{AS} = R'_{VS} = R'_{ZS} = \Delta P_{Kmax} U_{VS}^2 / (2S_{NT}^2) = 0,58 \cdot 10^6 \cdot (330 \cdot 10^3)^2 / 2(417 \cdot 10^6)^2 \approx 0,18 \Omega.$$

AS tinumam un ZS tinumam vēl jānosaka pilnās pretestības modulis un reaktance:

$$Z_{AS} = U_{K\%AS} U_{VS}^2 / (100S_{NT}) = 10,5(330 \cdot 10^3)^2 / (100 \cdot 417 \cdot 10^6) \approx 27,42 \Omega,$$

$$Z_{ZS} = U_{K\%ZS} U_{VS}^2 / (100S_{NT}) = 17,5(330 \cdot 10^3)^2 / (100 \cdot 417 \cdot 10^6) \approx 45,70 \Omega,$$

$$X_{AS} = \sqrt{Z_{AS}^2 - R_{AS}^2} = \sqrt{27,42^2 - 0,18^2} \approx 27,42 \, \Omega,$$

$$X_{ZS} = \sqrt{Z_{ZS}^2 - (R'_{ZS})^2} = \sqrt{45,70^2 - 0,18^2} \approx 45,70 \, \Omega.$$

Tagad iespējams parādīt aizvietošanas shēmās izmantojamās tinumu pilnās pretestības:

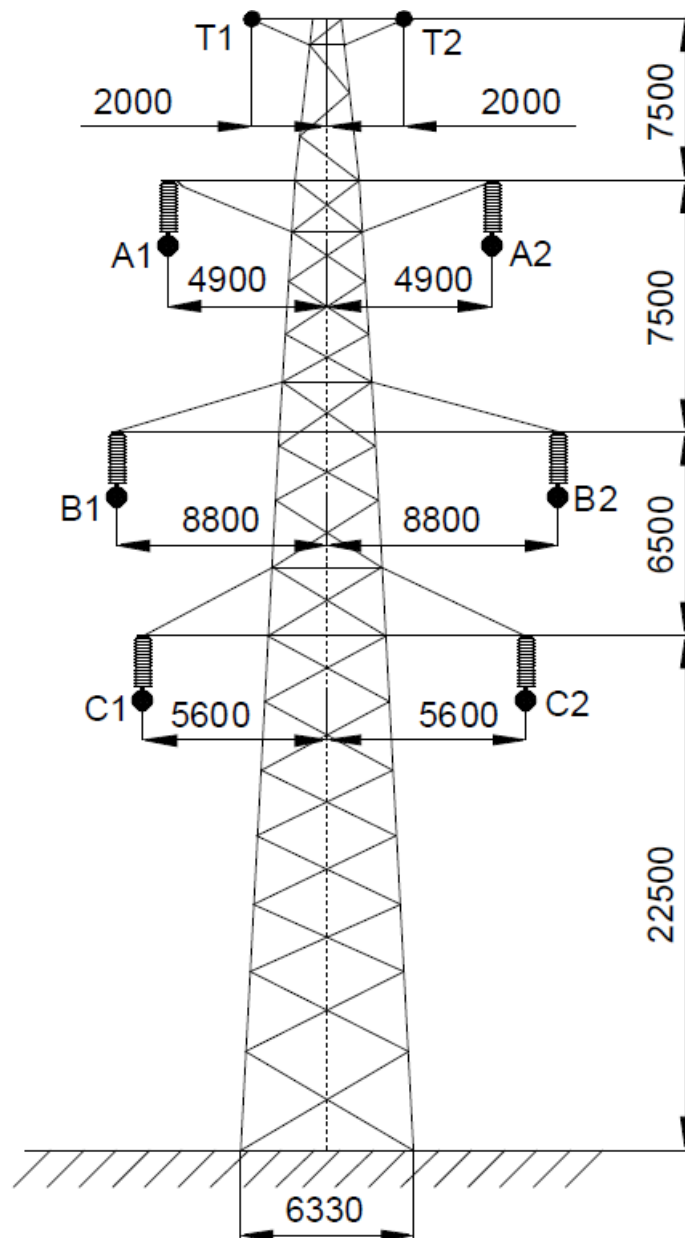
$$\dot{Z}_{AS} = R_{AS} + jX_{AS} = 0,18 + j27,42 \, \Omega,$$

$$\dot{Z}_{VS} = R_{VS} + jX_{VS} = 0,18 \, \Omega,$$

$$\dot{Z}_{ZS} = R_{ZS} + jX_{ZS} = 0,18 + j45,70 \, \Omega,$$

Turpinājumā tiks parādīts divķēžu līnijas L1, L2 parametru aprēķins, kura, kā norādīts P.11.5. tabulā, izbūvēta izmantojot starpbalstus П330–2Т ar diviem vadiem fāzē 2xAC240/39, kuru attālums ir 0,4 m, un divām zibensaizsardzības trosēm, kuru marka pieņemta AC120/19. Papildus pieņemts, ka fāzes vads ir izveidots 2 slāņos pa 30 dzīslām, kas atbilstoši 2.2. tabulai dod fāzes vada ekvivalentēšanas koeficientu $K_{EL1} = K_{EL2} = 0,826$ (trosei tiks pieņemts aptuvenais ekvivalentēšanas koeficients no 2. nodaļas apraksta: $K_{ET} = 0,95$). Starpbalsta konstrukcijas skice parādīta P.11.2. attēlā. Jau iepriekš jābrīdina, ka jau tā lielā aprēķina izmēru samazināšanai kapacitāšu aprēķinā netiks ņemtas vērā vadu nokares, bet to ievērošana mainītu vienīgi metodi, ar kādu sākumā tiktu noteikti attālumi starp vadiem un to spoguļattēliem zemē un to iegūtās vērtības.

Līnijas ģeometrijas ērtākam aprakstam lietderīgi apkopot fāžu un zibensaizsardzības trošu vadu augstumus no zemes h un to horizontālos attālumus no balsta centrālās ass vai divu līniju vidus ass X , kas P.11.2. attēlā parādīta kā balsta simetrijas ass, par pozitīvo virzienu pieņemot virzienu pa labi no centrālās ass. Ievērojot parādītos fāžu izolatoru un trošu stiprinājuma vietu augstumus un horizontālos attālumus, kā arī minēto fāžu izolatoru garumu (3,19 m), var parādīt fāžu un trošu koordinātas (P.11.7. tabula).



P.11.2. att. Tērauda starpbalsta П330–2Т konstrukcijas skice (izmēri ņemti no [126]).

P.11.7. tabula

Fāžu vadu un zibensaizsardzības trošu koordinātas divķēžu līnijai L1, L2

Fāzes vai zibensaizsardzības troses vada apzīmējums	h, m	X, m
A1	33,31	-4,90
B1	25,81	-8,80
C1	19,31	-5,60
A2	33,31	4,90
B2	25,81	8,80
C2	19,31	5,60
T1	44,00	-2,00
T2	44,00	2,00

Tālāk jānosaka attālumi F–F, fāze–trose un trose–trose, kā arī attālumi no fāzēm un trosēm līdz fāžu un trošu spoguļattēliem zemē, kurus izmanto vidējo ģeometrisko attālumu noteikšanai. Lielā apjoma dēļ tiks parādīti piemēri attāluma starp fāzi B1 un trosi T2, kā arī B1 attāluma līdz T2 spoguļattēlam zemē noteikšanai, bet pārējie atsevišķo attālumu rezultāti apkopoti tabulās (P.11.8. un P.11.9. tab.), jo to aprēķinu princips ir identisks piemēros parādītajam:

$$D_{B_1T_2} = \sqrt{|h_{B_1} - h_{T_2}|^2 + |X_{B_1} - X_{T_2}|^2} = \sqrt{|25,81 - 44,00|^2 + |-8,80 - 2,00|^2} \approx 21,15 \text{ m,}$$

$$S_{B_1T_2} = \sqrt{|h_{B_1} + h_{T_2}|^2 + |X_{B_1} - X_{T_2}|^2} = \sqrt{|25,81 + 44,00|^2 + |-8,80 - 2,00|^2} \approx 70,64 \text{ m.}$$

P.11.8. tabula

Fāžu vadu un zibensaizsardzības trošu savstarpējie attālumi D_{ij} divķēžu līnijai L1, L2

D_{ij}	A1	B1	C1	A2	B2	C2	T1	T2
A1	0,00	8,45	14,02	9,80	15,62	17,50	11,08	12,72
B1	8,45	0,00	7,25	15,62	17,60	15,80	19,42	21,15
C1	14,02	7,25	0,00	17,50	15,80	11,20	24,95	25,83
A2	9,80	15,62	17,50	0,00	8,45	14,02	12,72	11,08
B2	15,62	17,60	15,80	8,45	0,00	7,25	21,15	19,42
C2	17,50	15,80	11,20	14,02	7,25	0,00	25,83	24,95
T1	11,08	19,42	24,95	12,72	21,15	25,83	0,00	4,00
T2	12,72	21,15	25,83	11,08	19,42	24,95	4,00	0,00

P.11.9. tabula

Fāžu vadu un zibensaizsardzības trošu attālumi līdz spoguļattēliem zemē S_{ij} divķēžu līnijai L1, L2

S_{ij}	A1	B1	C1	A2	B2	C2	T1	T2
A1	66,62	59,25	52,62	67,34	60,69	53,66	77,36	77,62
B1	59,25	51,62	45,23	60,69	54,54	47,36	70,14	70,64
C1	52,63	45,23	38,62	53,66	47,36	40,21	63,41	63,76
A2	67,34	60,69	53,66	66,62	59,25	52,62	77,62	77,36
B2	60,69	54,54	47,36	59,25	51,62	45,23	70,64	70,14
C2	53,66	47,36	40,21	52,62	45,23	38,62	63,76	63,41
T1	77,36	70,14	63,41	77,62	70,64	63,76	88,00	88,09
T2	77,62	70,64	63,76	77,36	70,14	63,41	88,09	88,00

Turpinājumā iespējams noteikt vidējos ģeometriskos attālumus starp katras līnijas fāzēm un vidējos attālumus starp katras līnijas fāzēm un šo fāžu spoguļattēliem zemē, kā arī attālumus no fāzēm līdz citu fāžu spoguļattēliem zemē:

$$D_{\text{vidL1}} = \sqrt[3]{D_{A_1B_1} D_{B_1C_1} D_{C_1A_1}} = \sqrt[3]{8,45 \cdot 7,25 \cdot 14,02} \approx 9,51 \text{ m,}$$

$$D_{\text{vidL2}} = \sqrt[3]{D_{A_2B_2} D_{B_2C_2} D_{C_2A_2}} = \sqrt[3]{8,45 \cdot 7,25 \cdot 14,02} \approx 9,51 \text{ m,}$$

$$S_{\text{fvidL1}} = \sqrt[3]{S_{A_1A_1} S_{B_1B_1} S_{C_1C_1}} = \sqrt[3]{66,62 \cdot 51,62 \cdot 38,62} \approx 51,02 \text{ m,}$$

$$S_{\text{fvidL2}} = \sqrt[3]{S_{A_2A_2} S_{B_2B_2} S_{C_2C_2}} = \sqrt[3]{66,62 \cdot 51,62 \cdot 38,62} \approx 51,02 \text{ m,}$$

$$S_{MvidL1} = \sqrt[3]{S_{A1B1}S_{B1C1}S_{C1A1}} = \sqrt[3]{59,25 \cdot 45,23 \cdot 52,62} \approx 52,05 \text{ m,}$$

$$S_{MvidL2} = \sqrt[3]{S_{A2B2}S_{B2C2}S_{C2A2}} = \sqrt[3]{59,25 \cdot 45,23 \cdot 52,62} \approx 52,05 \text{ m.}$$

Vēl jānosaka vidējais attālums starp visām paralēlo līniju fāzēm un vidējais attālums starp abu līniju fāžu vadiem un to spoguļattēliem zemē:

$$D_{L1L2} = \sqrt[9]{D_{A1A2}D_{A1B2}D_{A1C2}D_{B1A2}D_{B1B2}D_{B1C2}D_{C1A2}D_{C1B2}D_{C1C2}} = \\ = \sqrt[9]{9,80 \cdot 15,62 \cdot 17,50 \cdot 15,62 \cdot 17,60 \cdot 15,80 \cdot 17,50 \cdot 15,80 \cdot 11,20} \approx 14,89 \text{ m,}$$

$$S_{L1L2} = \sqrt[9]{S_{A1A2}S_{A1B2}S_{A1C2}S_{B1A2}S_{B1B2}S_{B1C2}S_{C1A2}S_{C1B2}S_{C1C2}} = \\ = \sqrt[9]{67,34 \cdot 60,69 \cdot 53,66 \cdot 60,69 \cdot 54,54 \cdot 47,36 \cdot 53,66 \cdot 47,36 \cdot 40,21} \approx 53,37 \text{ m.}$$

Tālāk jānosaka vidējie attālumi no fāzēm līdz abām trosēm un abu trošu spoguļattēliem zemē, kas vēlāk dos iespēju noteikt ekvivalentās jeb apvienotās troses ietekmi:

$$D_{2TL1} = \sqrt[6]{D_{A1T1}D_{B1T1}D_{C1T1}D_{A1T2}D_{B1T2}D_{C1T2}} = \\ = \sqrt[6]{11,08 \cdot 19,42 \cdot 24,95 \cdot 12,72 \cdot 21,15 \cdot 25,83} \approx 18,28 \text{ m,}$$

$$D_{2TL2} = \sqrt[6]{D_{A2T1}D_{B2T1}D_{C2T1}D_{A2T2}D_{B2T2}D_{C2T2}} = \\ = \sqrt[6]{12,72 \cdot 21,15 \cdot 25,83 \cdot 11,08 \cdot 19,42 \cdot 24,95} \approx 18,28 \text{ m,}$$

$$S_{2TL1} = \sqrt[6]{S_{A1T1}S_{B1T1}S_{C1T1}S_{A1T2}S_{B1T2}S_{C1T2}} = \\ = \sqrt[6]{77,36 \cdot 70,14 \cdot 63,41 \cdot 77,62 \cdot 70,64 \cdot 63,76} \approx 70,26 \text{ m,}$$

$$S_{2TL2} = \sqrt[6]{S_{A2T1}S_{B2T1}S_{C2T1}S_{A2T2}S_{B2T2}S_{C2T2}} = \\ = \sqrt[6]{77,62 \cdot 70,64 \cdot 63,76 \cdot 77,36 \cdot 70,14 \cdot 63,41} \approx 70,26 \text{ m.}$$

Zinot līnijas vidējos ģeometriskos attālumus, iespējams pievērsties līniju TS un NS pretestību aprēķiniem, ievērojot zemētās zibensaizsardzības troses. Iesākumā iespējams aprēķināt šķeltā fāzes vada un vienas troses īpatnējās aktīvās pretestības:

$$R_{L10} = 1000\rho / (S_{\text{šķL1}}n_{v1}) = (1000 \cdot 2,82 \cdot 10^{-8}) / (240 \cdot 10^{-6} \cdot 2) \approx 0,059 \text{ } \Omega/\text{km,}$$

$$R_{L20} = 1000\rho / (S_{\text{šķL2}}n_{v2}) = (1000 \cdot 2,82 \cdot 10^{-8}) / (240 \cdot 10^{-6} \cdot 2) \approx 0,059 \text{ } \Omega/\text{km,}$$

$$R_{T0} = 1000\rho / S_{\text{šķT}} = (1000 \cdot 2,82 \cdot 10^{-8}) / (120 \cdot 10^{-6}) \approx 0,235 \text{ } \Omega/\text{km.}$$

TS un NS pilnās pretestības aprēķiniem vēl jānosaka fāzes vada un troses faktiskais rādiuss, ģeometriskais vai vidējais ģeometriskais rādiuss šķeltu vadu gadījumā un visu trīs fāžu un abu trošu ekvivalentos ģeometriskos rādiius:

$$r_{L1} = \sqrt{S_{\text{šķL1}}/\pi} = \sqrt{240 \cdot 10^{-6}/\pi} \approx 8,74 \cdot 10^{-3} \text{ m,}$$

$$r_{GL1} = \sqrt[n_{v1}]{r_{L1}K_{EL1}a_{vidL1}^{n_{v1}-1}} = \sqrt{r_{L1}K_{EL1}a_{vidL1}} = \sqrt{8,74 \cdot 10^{-3} \cdot 0,826 \cdot 0,4} \approx 0,054 \text{ m,}$$

$$r_{\delta L1} = \sqrt[3]{r_{GL1}D_{vidL1}^2} = \sqrt[3]{0,054 \cdot 9,51^2} \approx 1,70 \text{ m,}$$

$$r_{L2} = \sqrt{S_{\text{šķL2}}/\pi} = \sqrt{240 \cdot 10^{-6}/\pi} \approx 8,74 \cdot 10^{-3} \text{ m,}$$

$$r_{GL2} = \sqrt[n_{v2}]{r_{L2}K_{EL2}a_{vidL2}^{n_{v2}-1}} = \sqrt{r_{L2}K_{EL2}a_{vidL2}} = \sqrt{8,74 \cdot 10^{-3} \cdot 0,826 \cdot 0,4} \approx 0,054 \text{ m,}$$

$$r_{\delta L2} = \sqrt[3]{r_{GL2} D_{vidL2}^2} = \sqrt[3]{0,054 \cdot 9,51^2} \approx 1,70 \text{ m},$$

$$r_T = \sqrt{S_{\text{skT}}/\pi} = \sqrt{120 \cdot 10^{-6}/\pi} \approx 6,18 \cdot 10^{-3} \text{ m},$$

$$r_{GT} = r_T K_{ET} = 6,18 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95 \approx 5,87 \cdot 10^{-3} \text{ m},$$

$$r_{G2T} = \sqrt{D_{T1T2} r_{GT}} = \sqrt{4 \cdot 5,87 \cdot 10^{-3}} \approx 0,153 \text{ m}.$$

Tagad iespējams aprēķināt abu līniju īpatnējās TS pilnās pretestības, kuras sakrīt ar to PS pretestībām:

$$\dot{Z}_{L10}^1 = \dot{Z}_{L10}^2 = R_{L10} + j0,1447 \lg(D_{vidL1}/r_{GL1}) = 0,059 + j0,1447 \lg(9,51/0,054) \approx \\ \approx 0,059 + j0,325 \text{ } \Omega/\text{km},$$

$$\dot{Z}_{L20}^1 = \dot{Z}_{L20}^2 = R_{L20} + j0,1447 \lg(D_{vidL2}/r_{GL2}) = 0,059 + j0,1447 \lg(9,51/0,054) \approx \\ \approx 0,059 + j0,325 \text{ } \Omega/\text{km}.$$

Nākamais solis ir noteikt līniju īpatnējās NS pretestības un NS mijinduktivitātes pretestības, neņemot vērā trošu ietekmi. Pirms NS pretestību aprēķiniem svarīgi atbilstoši Karsona modelim noteikt zemē atspoguļotā vada dziļumu, ko nosaka grunts īpatnējā pretestība. Ņemot vērā, ka uzdevumā nav dota informācija par grunts pretestības sadalījumu vai grunts pretestības vidējā vērtība, tad no teorētiskā apraksta tiks pieņemta tās vērtība $\rho_G = 100 \text{ } \Omega/\text{m}^3$. Atspoguļotā vada dziļums GL un minētās NS pretestības nosakāmas šādi:

$$D_Z = 658,368 \sqrt{\rho_G/f} = 658,368 \sqrt{100/50} \approx 931,07 \text{ m},$$

$$\dot{Z}_{L10}^0 = R_{L10} + 0,148 + j0,434 \lg(D_Z/r_{\delta L1}) = 0,059 + 0,148 + j0,434 \lg(931,07/1,70) \approx \\ \approx 0,207 + j1,189 \text{ } \Omega/\text{km},$$

$$\dot{Z}_{L20}^0 = R_{L20} + 0,148 + j0,434 \lg(D_Z/r_{\delta L2}) = 0,059 + 0,148 + j0,434 \lg(931,07/1,70) \approx \\ \approx 0,207 + j1,189 \text{ } \Omega/\text{km},$$

$$\dot{Z}_{ML1L20}^0 = 0,148 + j0,434 \lg(D_Z/D_{L1L2}) = 0,148 + j0,434 \lg(931,07/14,89) \approx \\ \approx 0,148 + j0,780 \text{ } \Omega/\text{km}.$$

Ja L1, L2 nebūtu zemētas zibensaizsardzības troses, tad pietiktu līniju NS pretestībās ņemt vērā to savstarpējo mijinduktivitāti, bet konkrētajai līnijai ir zemētas troses, tādēļ jānosaka ekvivalentas troses NS pretestība un tās NS mijinduktivitātes pretestība ar abām līnijām:

$$\dot{Z}_{2T0}^0 = (3R_{T0}/n_T) + 0,148 + j0,434 \lg(D_Z/r_{G2T}) = (3 \cdot 0,235/2) + 0,148 + \\ + j0,434 \lg(931,07/0,153) \approx 0,501 + j1,642 \text{ } \Omega/\text{km},$$

$$\dot{Z}_{M2TL10}^0 = 0,148 + j0,434 \lg(D_Z/D_{2TL1}) = 0,148 + j0,434 \lg(931,07/18,28) \approx \\ \approx 0,148 + j0,741 \text{ } \Omega/\text{km},$$

$$\dot{Z}_{M2TL20}^0 = 0,148 + j0,434 \lg(D_Z/D_{2TL2}) = 0,148 + j0,434 \lg(931,07/18,28) \approx \\ \approx 0,148 + j0,741 \text{ } \Omega/\text{km}.$$

Tālāk jāņem vērā ekvivalentās troses ietekme uz līniju NS pretestībām un abu līniju mijinduktivitātes pretestību:

$$\dot{Z}_{L1+2T0}^0 = \dot{Z}_{L10}^0 - (\dot{Z}_{M2TL10}^0)^2 / \dot{Z}_{2T0}^0 = (0,207 + j1,189) - \\ - (0,148 + j0,741)^2 / (0,501 + j1,642) \approx 0,174 + j0,858 \text{ } \Omega/\text{km},$$

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{L2+2T0}^0 &= \dot{Z}_{L20}^0 - (\dot{Z}_{M2TL20}^0)^2 / \dot{Z}_{2T0}^0 = (0,207 + j1,189) - \\ &- (0,148 + j0,741)^2 / (0,501 + j1,642) \approx 0,174 + j0,858 \text{ } \Omega/\text{km}, \\ \dot{Z}_{ML1L2+2T0}^0 &= \dot{Z}_{ML1L20}^0 - \dot{Z}_{M2TL10}^0 \dot{Z}_{M2TL20}^0 / \dot{Z}_{2T0}^0 = (0,148 + j0,780) - \\ &- (0,148 + j0,741)(0,148 + j0,741) / (0,501 + j1,642) \approx 0,115 + j0,449 \text{ } \Omega/\text{km}.\end{aligned}$$

Tagad pēc trošu ietekmes skaitliskas ievērošanas var izmantot augstāk redzamās īpatnējās pretestības, ja mijinduktivitāti starp abām līnijām ņem vērā kā pretestību aizvietošanas shēmā (vai iekļauj pretestību matricā Z kā nediagonāles elementus), vai arī skaitliski ierēķināt tās ietekmi:

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{L1+2T+ML1L20}^0 &= \dot{Z}_{L1+2T0}^0 + \dot{Z}_{ML1L2+2T0}^0 = (0,174 + j0,858) + (0,115 + j0,449) = \\ &= 0,289 + j1,307 \text{ } \Omega/\text{km}, \\ \dot{Z}_{L2+2T+ML1L20}^0 &= \dot{Z}_{L2+2T0}^0 + \dot{Z}_{ML1L2+2T0}^0 = (0,174 + j0,858) + (0,115 + j0,449) = \\ &= 0,289 + j1,307 \text{ } \Omega/\text{km}.\end{aligned}$$

Vadītspēju aprēķinu sāksim ar divķēžu līnijas L1, L2 īpatnējo kapacitāšu aprēķinu. Katrai no līnijām jānosaka vidējais fāzes potenciāla koeficients un vidējais starpfāžu potenciāla koeficients:

$$\begin{aligned}\alpha_{fvidL1} &= 41,494 \cdot 10^6 \lg(S_{fvidL1}/r_{GL1}) = 41,494 \cdot 10^6 \lg(51,02/0,054) \approx \\ &\approx 1,236 \cdot 10^8 \text{ km/F}, \\ \alpha_{fvidL2} &= 41,494 \cdot 10^6 \lg(S_{fvidL2}/r_{GL2}) = 41,494 \cdot 10^6 \lg(51,02/0,054) \approx \\ &\approx 1,236 \cdot 10^8 \text{ km/F}, \\ \alpha_{MvidL1} &= 41,494 \cdot 10^6 \lg(S_{MvidL1}/D_{vidL1}) = 41,494 \cdot 10^6 \lg(52,05/9,51) \approx \\ &\approx 0,306 \cdot 10^8 \text{ km/F}, \\ \alpha_{MvidL2} &= 41,494 \cdot 10^6 \lg(S_{MvidL2}/D_{vidL2}) = 41,494 \cdot 10^6 \lg(52,05/9,51) \approx \\ &\approx 0,306 \cdot 10^8 \text{ km/F}.\end{aligned}$$

Iegūtie potenciāla koeficienti ļauj aprēķināt abu līniju TS un PS īpatnējās kapacitātes:

$$\begin{aligned}C_{L10}^1 &= C_{L10}^2 = 1/(\alpha_{fvidL1} - \alpha_{MvidL1}) = 1/((1,236 - 0,306) \cdot 10^8) \approx 10,753 \cdot 10^{-9} \text{ F/km}, \\ C_{L20}^1 &= C_{L20}^2 = 1/(\alpha_{fvidL2} - \alpha_{MvidL2}) = 1/((1,236 - 0,306) \cdot 10^8) \approx 10,753 \cdot 10^{-9} \text{ F/km}.\end{aligned}$$

Slodzes režīmā katrai no līnijām TS kapacitātes vietā iespējams tuvināti ievest līnijas kopējo ģenerēto jaudu, ko aizvietošanas shēmā, līdzīgi kā kapacitāti, daļa uz pusēm. Kapacitātes papildu reducēšana nav nepieciešama, jo līnijas nominālais spriegums atbilst aprēķina sprieguma pakāpei:

$$\begin{aligned}\Delta Q_{CL1} &= \Delta Q_{CL2} = l_{L1} C_{L10}^1 \omega_N U_{APR}^2 = 175 \cdot 10,753 \cdot 10^{-9} \cdot 100\pi \cdot (340 \cdot 10^3)^2 \approx \\ &\approx 6,834 \cdot 10^7 \text{ var} = 68,34 \text{ Mvar}.\end{aligned}$$

Tālāk iespējams noteikt NS mijkapacitātes potenciāla koeficientu starp abām līnijām:

$$\alpha_{L1L2}^0 = 3 \cdot 41,494 \cdot 10^6 \lg(S_{L1L2}/D_{L1L2}) = 1,245 \cdot 10^8 \lg(53,37/14,89) \approx 0,69 \cdot 10^8 \text{ km/F}.$$

NS kapacitāšu aprēķiniem jānosaka arī atsevišķo līniju NS potenciāla koeficienti, kuros ierēķināta ekvivalentās zibensaizsardzības troses ietekme. Šim nolūkam jānosaka ekvivalentās

troses ietekmes koeficients $\Delta\alpha_{2T}^0$, kura aprēķinam izmanto trošu ietekmes uz līnijām un trošu savstarpējās ietekmes potenciāla koeficientus:

$$\alpha_{2TL1}^0 = 41,494 \cdot 10^6 \lg(S_{2TL1}/D_{2TL1}) = 41,494 \cdot 10^6 \lg(70,26/18,28) \approx 0,243 \cdot 10^8 \text{ km/F},$$

$$\alpha_{2TL2}^0 = 41,494 \cdot 10^6 \lg(S_{2TL2}/D_{2TL2}) = 41,494 \cdot 10^6 \lg(70,26/18,28) \approx 0,243 \cdot 10^8 \text{ km/F},$$

$$\alpha_{T1T1}^0 = 41,494 \cdot 10^6 \lg(S_{T1T1}/r_{G2T}) = 41,494 \cdot 10^6 \lg(88/0,153) \approx 1,145 \cdot 10^8 \text{ km/F},$$

$$\alpha_{T1T2}^0 = 41,494 \cdot 10^6 \lg(S_{T1T2}/D_{T1T2}) = 41,494 \cdot 10^6 \lg(88,09/4,00) \approx 0,557 \cdot 10^8 \text{ km/F},$$

$$\alpha_{TTekv}^0 = (\alpha_{T1T1}^0 + \alpha_{T1T2}^0)/2 = ((1,145 + 0,557) \cdot 10^8)/2 \approx 0,851 \cdot 10^8 \text{ km/F},$$

$$\Delta\alpha_{2TL1}^0 = 3(\alpha_{2TL1}^0)^2/\alpha_{TTekv}^0 = 3(0,243 \cdot 10^8)^2/(0,851 \cdot 10^8) \approx 0,208 \cdot 10^8 \text{ km/F},$$

$$\Delta\alpha_{2TL2}^0 = 3(\alpha_{2TL2}^0)^2/\alpha_{TTekv}^0 = 3(0,243 \cdot 10^8)^2/(0,851 \cdot 10^8) \approx 0,208 \cdot 10^8 \text{ km/F}.$$

Zinot šos potenciāla koeficientus, iespējams noteikt līniju NS potenciāla koeficientus ar ierēķinātu ekvivalentās troses ietekmi:

$$\alpha_{L2+2T}^0 = \alpha_{fvidL2} + 2\alpha_{MvidL2} - \Delta\alpha_{2TL2}^0 = (1,236 + 2 \cdot 0,306 - 0,208) \cdot 10^8 = 1,640 \cdot 10^8 \text{ km/F}.$$

Ja neievēro līniju mijkapacitāti, līniju NS kapacitātes iegūstamas no augstāk redzamajiem potenciāla koeficientiem:

$$C_{L1+2T}^0 = C_{L2+2T}^0 = 1/\alpha_{L1+2T}^0 = 1/(1,64 \cdot 10^8) \approx 6,098 \cdot 10^{-9} \text{ F/km}.$$

Savukārt, ja tiek ņemta vērā līniju NS mijkapacitāte, tad jānosaka aizvietošanas shēmās lietojamās līniju L1, L2 kapacitātes, kā arī starp līnijām ieslēdzamā kapacitāte:

$$C_{L2sh}^0 = \frac{\alpha_{L2+2T}^0 - \alpha_{L1L2}^0}{\alpha_{L1+2T}^0 \alpha_{L2+2T}^0 - (\alpha_{L1L2}^0)^2} = \frac{(1,64 - 0,69) \cdot 10^8}{1,64 \cdot 10^8 \cdot 1,64 \cdot 10^8 - (0,69 \cdot 10^8)^2} \approx 4,292 \cdot 10^{-9} \text{ F/km},$$

$$C_{L1sh}^0 = \frac{\alpha_{L1+2T}^0 - \alpha_{L1L2}^0}{\alpha_{L1+2T}^0 \alpha_{L2+2T}^0 - (\alpha_{L1L2}^0)^2} = \frac{(1,64 - 0,69) \cdot 10^8}{1,64 \cdot 10^8 \cdot 1,64 \cdot 10^8 - (0,69 \cdot 10^8)^2} \approx 4,292 \cdot 10^{-9} \text{ F/km},$$

$$C_{L1L2}^0 = \frac{\alpha_{L1L2}^0}{\alpha_{L1+2T}^0 \alpha_{L2+2T}^0 - (\alpha_{L1L2}^0)^2} = \frac{0,69 \cdot 10^8}{1,64 \cdot 10^8 \cdot 1,64 \cdot 10^8 - (0,69 \cdot 10^8)^2} \approx 3,117 \cdot 10^{-9} \text{ F/km}.$$

Salīdzinot ar [4] doto intervālu 330 kV līnijām $C_{L0}^1 \approx 8,8 - 12 \text{ nF/km}$ un $C_{L0}^0 \approx (0,55 - 0,60)C_{L0}^1 \approx 4,84 - 7,20 \text{ nF/km}$, var secināt, ka TS īpatnējā kapacitāte ietilps aptuvenajā diapazonā, bet katras līnijas NS īpatnējā kapacitāte ir nedaudz mazāka, ko var izskaidrot ar paralēlo līniju iedarbes ievērošanu. Ja netiktu ievērota paralēlo līniju mijkapacitāte, tad acīmredzami NS kapacitāte atrastos norādītajā intervālā. Kad tiek ņemta vērā vadu nokare, tad parādīto aprēķinu secība un formulas nemainās, bet tiek izmantoti ekvivalentie fāžu augstumi no zemes, kas ir mazāki, un samazinās arī to attālumi līdz vadu spoguļattēliem zemē.

Lai pabeigtu līniju parametru aprēķina piemēru, jāaprēķina vēl koronas zudumus atainojošā vadītspēja. Iesākumā, izmantojot 2.8. tabulu, var noteikt, ka konkrētajam vadu šķērsgrizumam pie 330 kV: $\Delta P_{koMAX} = 6300 \text{ W/km}$, $\Delta P_{koMIN} = 2700 \text{ W/km}$, kas dod iespēju aprēķināt koronas īpatnējo zudumu jaudas vidējo vērtību

$$\Delta P_{ko0} = (\Delta P_{koMAX} + \Delta P_{koMIN})/2 = (6300 + 2700)/2 = 4500 \text{ W/km},$$

un no vidējās zudumu jaudas vērtības aprēķināt to ekvivalento īpatnējo vadītspēju:

$$G_{L0} = \Delta P_{ko0} / U_{APR}^2 = 4500 / (340 \cdot 10^3)^2 \approx 38,93 \cdot 10^{-9} \text{ S/km.}$$

Koronas zudumi turpmākajos aprēķinos tiks ievēroti vienīgi slodzes režīma parametru noteikšanai (kaut arī garensimetriju gadījumos reālos aprēķinos šos zudumus var nākties ievērot) kā līnijai pieslēgta zudumu (patērētā) aktīvā jauda:

$$\Delta P_{ko} = \Delta P_{ko0} l_{L1} = 4500 \cdot 175 \approx 0,788 \cdot 10^6 \text{ W} = 0,788 \text{ MW.}$$

Augstāk parādītajos aprēķinos redzams, ka līniju simetrijas dēļ lielākā daļa no izmēru un pretestību vērtībām abām līnijām sanāca vienādas, bet to aprēķini tika parādīti katrai no līnijām, lai atgādinātu, ka iespējami gadījumi ar dažāda šķērsriezuma līnijām uz viena balsta vai paralēlām, tuvu novietotām, atšķirīgām līnijām u. tml., kuros šīs vērtības var atšķirties. Vēl atliek pāriet no īpatnējām pretestībām un kapacitātēm uz visam līnijas garumam atbilstošajām pretestībām un kapacitātēm:

$$\dot{Z}_{L1}^1 = \dot{Z}_{L2}^1 = l_{L1} \dot{Z}_{L10}^1 = 175(0,059 + j0,325) \approx 10,33 + j56,88 \Omega,$$

$$\dot{Z}_{L1}^0 = \dot{Z}_{L2}^0 = l_{L1} \dot{Z}_{L1+2T+ML1L20}^0 = 175(0,289 + j1,307) \approx 50,58 + j228,73 \Omega,$$

$$C_{L1}^1 = C_{L2}^1 = l_{L1} C_{L10}^1 = 175 \cdot 10,753 \cdot 10^{-9} \approx 1,882 \cdot 10^{-6} \text{ F,}$$

$$C_{L1}^0 = C_{L2}^0 = l_{L1} C_{L1+2T}^0 = 175 \cdot 6,098 \cdot 10^{-9} \approx 1,067 \cdot 10^{-6} \text{ F.}$$

Saules paneļu grupu PV un pārveidotāju P kopīgai ievērošanai ir jānosaka tā pilnā jauda slodzes režīmam un strāvas stiprums, kāds sagaidāms īsslēguma režīmā. Pilno jaudu viegli noteikt, zinot aktīvo jaudu un $\cos\varphi$, izmantojot jaudu trijstūri, kas ļauj iegūt $\dot{S}_{PV} = 5,00 + j2,42 \text{ MVA}$. Ņemot vērā, ka nav dota sīkāka informācija par pārveidotājiem P, pieņemsim, ka to nominālā jauda sakrīt ar saules paneļu grupu PV nominālo jaudu. Tādā gadījumā iespējams noteikt pārveidotāju nominālo strāvas stiprumu pie to nominālā sprieguma 6,3 kV:

$$I_{PN6,3} \approx I_{PVN6,3} = P_{PVN} / (\sqrt{3} U_{PVN} \cos(\varphi_{PV})) =$$

$$= 5,00 \cdot 10^6 / (\sqrt{3} \cdot 6300,00 \cdot 0,90) \approx 509,13 \text{ A.}$$

un reducēt šo strāvu uz aprēķina spriegumu:

$$I_{PN340} = I_{PN6,3} / k_T = (509,13 \cdot 6,30) / 340,00 \approx 9,43 \text{ A.}$$

Īsslēguma laikā var sagaidīt, ka pārveidotāju strāvas stiprums arī pieaugs un tie pāries strāvas ierobežošanas režīmā, kurā strāvas stiprums parasti nepārsniedz 150 % no nominālās slodzes strāvas stipruma [60]. Attiecīgi īsslēgumiem AS tīklā var pieņemt, ka no pārveidotājiem plūstošās reducētās strāvas stiprums nepārsniegs:

$$I_{KP340} = 1,5 I_{PN340} = 1,5 \cdot 9,43 \approx 14,15 \text{ A.}$$

Atsevišķi aprēķinātās divtinumu transformatoru pretestības parādītas P.11.10. tabulā.

P.11.10. tabula

Trešā aprēķinu piemēru tīkla divtinumu transformatoru aizvietošanas shēmas pretestības

Transformators	T1, T2	T3, T4
\dot{Z}_T, Ω	$1,57 + j66,20$	$1,57 + j66,20$

Transformatora ar šķeltu ZS tinumu (visu tinumu jaudas šeit pieņemtas vienādas), pretestības arī tika aprēķinātas atsevišķi un dotas P.11.11. tabulā.

P.11.11. tabula

Trešā aprēķinu piemēru tīkla transformatora ar šķeltu ZS tinumu aizvietošanas shēmas pretestības

Parametrs un mērvienība	\dot{Z}_{AS}, Ω	$\dot{Z}_{ZS1} = \dot{Z}_{ZS2}, \Omega$
Vērtība	$6,13 + j108,73$	$6,13 + j381,1$

Apvienotās energosistēmas S aprēķinātā pretestība, kas šajā piemērā pieņemta vienāda visām secībām, un A fāzes EDS dots P.11.12. tabulā.

P.11.12. tabula

Trešā aprēķinu piemēru tīkla sistēmas aizvietošanas shēmu pretestība un A fāzes EDS

Parametrs un mērvienība	\dot{Z}_S, Ω	\dot{E}_{SA}, kV
Vērtība	$2,30 + j23,01$	196,30

Ģeneratoru G1 un G2 pretestības, kuras arī aprēķinātas atsevišķi, apkopotas P.11.13. tabulā.

P.11.13. tabula

Trešā aprēķinu piemēru tīkla ģeneratoru aizvietošanas shēmu pretestības

Parametrs un mērvienība	Vērtība
\dot{Z}_{GSL}^1, Ω	$7,20 + j523,97$
$\dot{Z}_G^{1''}, \Omega$	$7,20 + j150,64$
$\dot{Z}_G^{1'}, \Omega$	$7,20 + j183,39$
\dot{Z}_G^2, Ω	$13,10 + j96,28$
\dot{Z}_G^0, Ω	$7,20 + j35,37$

Ģeneratora EDS tiks noteikts, izmantojot slodzes režīma parametru aprēķina rezultātus (slodzes režīmam atbilstoši teorijai reaktance noteikta, izmantojot X_q un virspārejas režīmam X_q''). Abu HG virspārejas režīma EDS moduļi pieņemti vienādi ar $\dot{E}_{GTV}'' = 1,13$ r. v. atbilstoši

2.16. tabulai, pieņemot, ka abi HG ir ar slāpētājtinumiem. Savukārt pārejas režīma EDS moduļi pieņemt vienādi ar $\dot{E}'_{Grv} = 1,15$ r. v. atbilstoši 2.15. tabulas datiem.

GL L3, L4, L5 un L6 II veida aizvietošanas shēmas parametru vērtības ir apkopotas P.11.14. tabulā.

P.11.14. tabula

Trešā aprēķinu piemēru tīkla GL L3, L4, L5 un L6 aizvietošanas shēmu parametri

Parametrus un mērvienība	L3, L4	L5	L6
$\dot{Z}_{L0}^1, \Omega/\text{km}$	$0,059 + j0,326$	$0,059 + j0,326$	$0,059 + j0,326$
$\dot{Z}_{L0}^0, \Omega/\text{km}$	$0,192 + j0,717$	$0,192 + j0,717$	$0,192 + j0,717$
$C_{L0}^1, \text{F}/\text{km}$	$10,780 \cdot 10^{-9}$	$10,780 \cdot 10^{-9}$	$10,780 \cdot 10^{-9}$
$C_{L0}^0, \text{F}/\text{km}$	$7,610 \cdot 10^{-9}$	$7,610 \cdot 10^{-9}$	$7,610 \cdot 10^{-9}$
\dot{Z}_L^1, Ω	$5,88 + j32,608$	$4,11 + j22,83$	$4,7 + j26,09$
\dot{Z}_L^0, Ω	$19,15 + j71,70$	$13,41 + j50,19$	$15,32 + j57,36$
C_L^1, F	$1,080 \cdot 10^{-6}$	$0,750 \cdot 10^{-6}$	$0,860 \cdot 10^{-6}$
C_L^0, F	$0,760 \cdot 10^{-6}$	$0,530 \cdot 10^{-6}$	$0,610 \cdot 10^{-6}$
$\Delta Q_C, \text{Mvar}$	39,140	27,400	31,310
$\Delta P_{ko}, \text{MW}$	0,450	0,320	0,360

Slodzēm SL2 un SL3 jāzina to pilnā jauda un ekvivalentā pretestība:

$$\dot{S}_{SL2} = \dot{S}_{SL3} \approx 40,00 + j19,37 \text{ MVA},$$

$$\dot{Z}_{SL2} = \dot{Z}_{SL3} \approx U_{APR}^2 / \dot{S}_{SL2} = (340,00 \cdot 10^3)^2 / [(40,00 - j19,37) \cdot 10^6] \approx 2340,90 + j1133,70 \Omega.$$

No kopnēm B6 pieslēgtās apvienotās slodzes statistiskās slodzes SL1 aktīvā jauda ir

$$P_{SL1} = 0,7 P_{SL,AD} = 0,7 \cdot 200,0 = 140,0 \text{ MW},$$

un pilnā jauda, kas noteikta, izmantojot SL1 $\cos\varphi$, ir $\dot{S}_{SL1} \approx 140,00 + j75,56 \text{ MVA}$. SL1 atbilstošā ekvivalentā pretestība ir

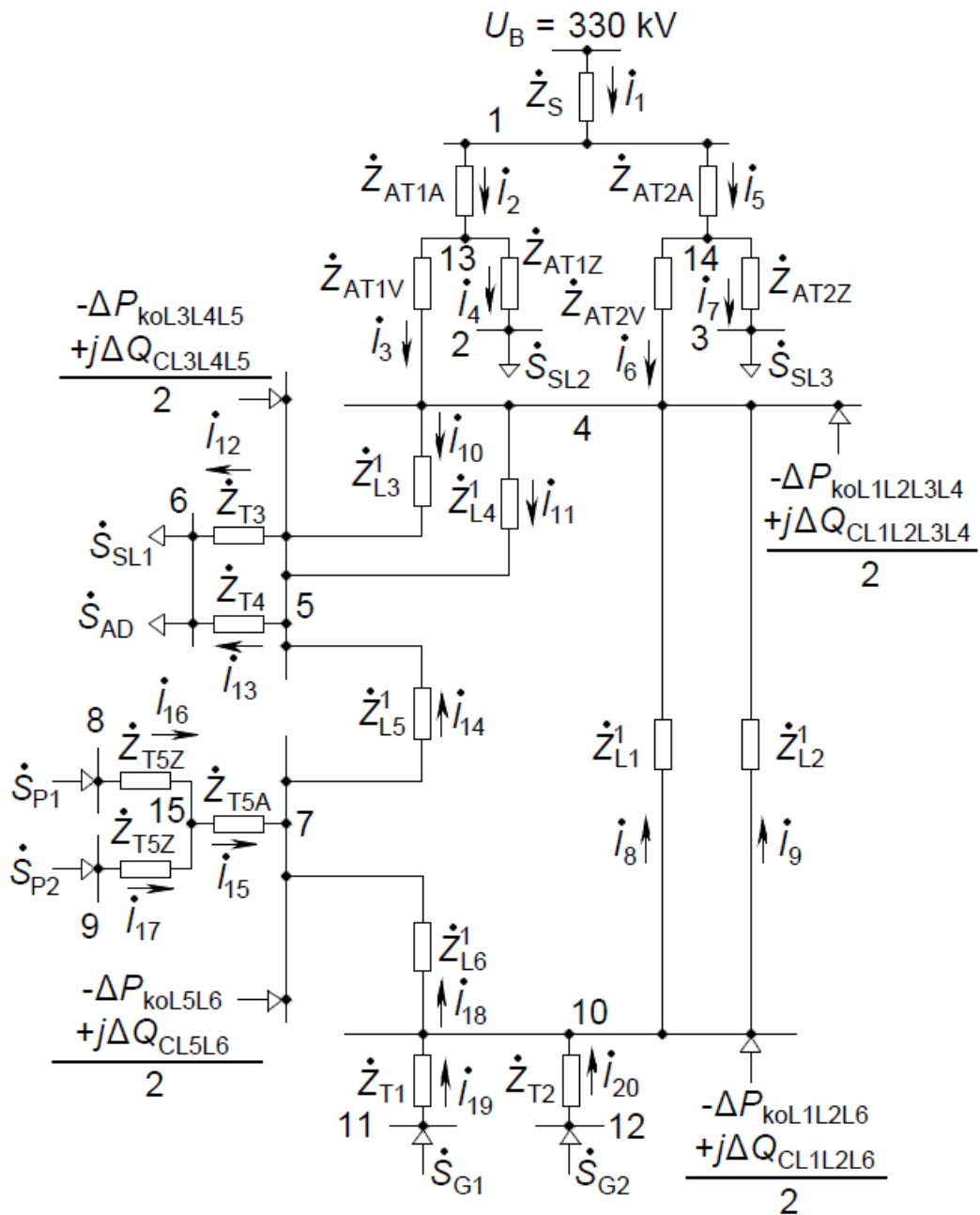
$$\dot{Z}_{SL1} \approx U_{APR}^2 / \dot{S}_{SL1} = (340,00 \cdot 10^3)^2 / [(140,00 - j75,56) \cdot 10^6] \approx 639,40 + j345,10 \Omega.$$

AD grupas ekvivalentu AD veidojošie dzinēji sīkāk nav aprakstīti, tādēļ atkal tiks izmantotas vidējās aizvietošanas pretestību vērtības no P.9.7. tabulas. Vienīgi tagad AD kopējā jauda ir $\dot{S}_{NAD} \approx 60,00 + j37,19 \text{ MVA}$. AD TS un PS pretestības nekustīgam rotoram ($s = 1$ r. v.) un slodzes režīmam ($s = 0,05$ r. v.) aprēķinātas atsevišķi un apkopotas P.11.15. tabulā.

Trešā aprēķinu piemēru tīkla AD aizvietošanas shēmu pretestības

s, r. v.	Parametrs	Vērtība, r. v.	Vērtība, Ω
1	\dot{Z}_{ADek}^1	$0,128 + j0,231$	$246,910 + j444,070$
	\dot{Z}_{ADek}^2	$0,128 + j0,231$	$246,910 + j444,070$
0,05	\dot{Z}_{ADek}^1	$1,038 + j0,572$	$2000,400 + j1102,000$
	\dot{Z}_{ADek}^2	$0,101 + j0,230$	$194,640 + j442,930$

Nākamais solis ir veikt slodzes režīma parametru aprēķinu, kas tiks izpildīts ar topoloģisko MPM metodi, izmantojot (4.23.) un (4.24.) vienādojumā parādīto metodiku. Slodzes režīma parametru aprēķina mērķis ir noskaidrot ģeneratoru G1 un G2 slodzes leņķus, pārveidotāju strāvas avotu leņķus un AD potenciālo pret-EDS. Iesākumā ir jāastāda slodzes režīma parametru aprēķina aizvietošanas shēma (P.11.3. att.). Šajā shēmā 330 kV līniju kapacitatīvās ģenerētās jaudas un koronas zudumu jaudas jau ir summētas un pieslēgtas kopnēm, kuras savieno šīs līnijas, jo precīzāka līniju aizvietošanas shēmu realizācija neradīs ievērojamas izmaiņas ģeneratoru EDS vērtībās, P1, P2 strāvu leņķiem vai AD pret-EDS vērtībai.



P.11.3. att. Trešā aprēķinu piemēru tīkla slodzes režīma parametru aprēķina aizvietošanas shēma.

Atbilstoši P.11.3. attēlā parādītajiem strāvu virzieniem pirmās incidences matrica (izmēra dēļ vizuāli sadalīta uz pusēm) būs

M	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6	i_7	i_8	i_9	i_{10}
1	-1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
4	0	0	-1	0	0	-1	0	-1	-1	1
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	-1	1	1	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	-1	1	1	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M	i_{11}	i_{12}	i_{13}	i_{14}	i_{15}	i_{16}	i_{17}	i_{18}	i_{19}	i_{20}
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	-1	1	1	-1	0	0	0	0	0	0
6	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	1	-1	0	0	-1	0	0
8	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1
11	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	1	-1	-1	0	0	0

Zaru pretestību vektors šim piemēram būs

$$\begin{array}{l}
 ZZ \\
 \dot{I}_1 \quad \dot{Z}_S \quad 2,30 + j23,01 \\
 \dot{I}_2 \quad \dot{Z}_{AT1A} \quad 0,18 + j27,42 \\
 \dot{I}_3 \quad \dot{Z}_{AT1Z} \quad 0,18 \\
 \dot{I}_4 \quad \dot{Z}_{AT1V} \quad 0,18 + j45,7, \\
 \dot{I}_5 \quad \dot{Z}_{AT2A} \quad 0,18 + j27,42 \\
 \dot{I}_6 \quad \dot{Z}_{AT2V} \quad 0,18 \\
 \dot{I}_7 \quad \dot{Z}_{AT2Z} \quad 0,18 + j45,70 \\
 \dot{I}_8 \quad \dot{Z}_{L1}^1 \quad 10,33 + j56,88 \\
 \dot{I}_9 \quad \dot{Z}_{L2}^1 \quad 10,33 + j56,88 \\
 \dot{I}_{10} \quad \dot{Z}_{L3}^1 = 5,88 + j32,61 \quad \Omega, \\
 \dot{I}_{11} \quad \dot{Z}_{L4}^1 \quad 5,88 + j32,61 \\
 \dot{I}_{12} \quad \dot{Z}_{T3} \quad 1,57 + j66,20 \\
 \dot{I}_{13} \quad \dot{Z}_{T4} \quad 1,57 + j66,20 \\
 \dot{I}_{14} \quad \dot{Z}_{L5}^1 \quad 4,11 + j22,83 \\
 \dot{I}_{15} \quad \dot{Z}_{T5A} \quad 6,13 + j108,73 \\
 \dot{I}_{16} \quad \dot{Z}_{T5Z} \quad 6,13 + j381,10 \\
 \dot{I}_{17} \quad \dot{Z}_{T5Z} \quad 6,13 + j381,10 \\
 \dot{I}_{18} \quad \dot{Z}_{L6}^1 \quad 4,70 + j26,09 \\
 \dot{I}_{19} \quad \dot{Z}_{T1} \quad 1,57 + j66,20 \\
 \dot{I}_{20} \quad \dot{Z}_{T2} \quad 1,57 + j66,20
 \end{array}$$

no kura pretestību matricu iegūst, tā vērtības izmantojot kā diagonāles elementus pretestību matricā, t. i., $Z = \text{diag}(ZZ)$. Savukārt mezglu jaudu vektors S šim piemēram ir formā:

$$\begin{array}{l}
 S \\
 1 \quad 0 \\
 2 \quad -\dot{S}_{SL2} \quad 0 \\
 3 \quad -\dot{S}_{SL3} \quad -40 - j19,37 \\
 4 \quad (-\Delta P_{koL1L2L3L4} + j\Delta Q_{CL1L2L3L4})/2 \quad -40 - j19,37 \\
 5 \quad (-\Delta P_{koL3L4L5} + j\Delta Q_{CL3L4L5})/2 \quad -1,24 + j107,48 \\
 6 \quad -\dot{S}_{SL1} - \dot{S}_{SAD} \quad -0,61 + j52,84 \\
 7 \quad (-\Delta P_{koL5L6} + j\Delta Q_{CL5L6})/2 \quad -200 + j112,75 \\
 8 \quad \dot{S}_{P1} \quad = -0,34 + j29,35 \quad \text{MVA.} \\
 9 \quad \dot{S}_{P2} \quad 5 + j2,42 \\
 10 \quad (-\Delta P_{koL1L2L6} + j\Delta Q_{CL1L2L6})/2 \quad 5 + j2,42 \\
 11 \quad \dot{S}_{G1} \quad -0,97 + j84 \\
 12 \quad \dot{S}_{G2} \quad 150 + j15 \\
 13 \quad 0 \quad 150 + j15 \\
 14 \quad 0 \quad 0 \\
 15 \quad 0 \quad 0
 \end{array}$$

Slodzes režīma parametru aprēķina, kas realizēts ar 4. nodaļā parādīto slodzes režīma parametru aprēķina funkciju, programmas teksts:

```

tic %Sakam uzņemt apreķina laiku
clc;clear;
Ub=340; %Apreķina spriegums, kV
k3=sqrt(3);
%Divtinumu transformatoru pretestības, omi
Zt=1.57+66.2i; %T1,T2,T3,T4
%Skelta ZS tinuma transformatoru pretestības, omi
%      AS              ZS
Ztsk=[(6.13+108.73i)  (6.13+381.1i)]; %T5
%Auto transformatoru pretestības, omi
%      AS              VS              ZS
Zat=[(0.18+27.42i)    (0.18)    (0.18+45.7i)    %AT1
      (0.18+27.42i)    (0.18)    (0.18+45.7i)]; %AT2
%Sistēmas pretestība, omi
Zs=2.3+23.01i;
%Liniju tiessecības pretestības, omi
Zl1=[10.33+56.88i %L1
      10.33+56.88i %L2
      5.88+32.61i %L3
      5.88+32.61i %L4
      4.11+22.83i %L5
      4.7+26.09i]; %L6
%Liniju koronas zudumi un kapacitatīvas enerģijas jaudas, MVA
dS1=[(-0.788+68.34i) %L1
      (-0.788+68.34i) %L2
      (-0.45+39.14i) %L3
      (-0.45+39.14i) %L4
      (-0.32+27.4i) %L5
      (-0.36+31.31i)]; %L6
%Generatoru G1 un G2 jauda un slodzes režīma pretestība, MVA un omi
Sg=150+15i;
Zgn=7.2+523.97i;
%Virsparejas un parejas režīma EDS vērtības turbogeneratoriem, r.v.
EvpRV=1.13;
EpRV=1.15;
%Slodžu jaudas, MVA
Ssl=[200+112.75i
      40+19.37i
      40+19.37i];
% Saules panelu PV1,PV2 un parveidoju P1,P2 tīkla nodota jauda, MVA
Sp=5+2.42i;
%Saules panelu PV1,PV2 un parveidoju P1,P2 izzēģuma režīma reducēto strāvu
stiprumu moduli, kA
MIpk=0.01415;
%AD statora pretestība un slodzes režīma jauda, omi un MVA
Zlad=117.91+152.3i;
Sad=60+37.19i;
%Pirmās incidences matrica
%  1  2  3  4  5  6  7  8  9  10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
M=[-1  1  0  0  1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0 %1
    0  0  0 -1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0 %2
    0  0  0  0  0  0 -1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0 %3
    0  0 -1  0  0 -1  0 -1 -1  1  1  0  0  0  0  0  0  0  0  0 %4
    0  0  0  0  0  0  0  0  0 -1 -1  1  1 -1  0  0  0  0  0  0 %5
    0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0 -1 -1  0  0  0  0  0  0  0 %6
    0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  1 -1  0  0 -1  0  0 %7
    0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  1  0  0  0  0 %8

```

```

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 %9
0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 -1 -1 %10
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 %11
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 %12
0 -1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %13
0 0 0 0 -1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %14
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 -1 -1 0 0 0 %15
% 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
MS=size(M,1);%Mezglu skaits
ZS=size(M,2);%Zaru skaits
Mt=M';
%Zaru pretestibu vektors, omi
ZZ=[Zs %I1
Zat(1,1) %I2
Zat(1,2) %I3
Zat(1,3) %I4
Zat(2,1) %I5
Zat(2,2) %I6
Zat(2,3) %I7
Zl1(1) %I8
Zl1(2) %I9
Zl1(3) %I10
Zl1(4) %I11
Zt %I12
Zt %I13
Zl1(5) %I14
Ztsk(1,1) %I15
Ztsk(1,2) %I16
Ztsk(1,2) %I17
Zl1(6) %I18
Zt %I19
Zt ]; %I20
%Pretestibu matricas sastadisana
Z=diag(ZZ);
%Pretestibu matricas vienkarsota inversija
Z1=Z;
for i=1:ZS
Z1(i,i)=1/Z(i,i);
end
%Mezglu jaudu vektors: Generacijas, liniju kapacitativas un slodzes jaudas,
MVA
S=[0 %1
-Ss1(2) %2
-Ss1(3) %3
((dS1(1)+dS1(2)+dS1(3)+dS1(4))/2) %4
((dS1(3)+dS1(4)+dS1(5))/2) %5
-Ss1(1) %6
((dS1(5)+dS1(6))/2) %7
Sp %8
Sp %9
((dS1(1)+dS1(2)+dS1(6))/2) %10
Sg %11
Sg %12
0 %13
0 %14
0]; %15
EPS=1e-6;%Precizitates kriterija robeza Zeidela metodei, kV
U=ZeidelSL(M,ZZ,S,Ub,EPS);%Mezglu spriegumu aprekins
%Zaru stravu vektora satura aprekins, kA
Iz=Z1*Mt*(U-Ub)/k3;
%Zaros plustoso jaudu vektora satura aprekins, MVA

```

```

Sz=zeros(ZS,1);
for i=1:MS
    for j=1:ZS
        if M(i,j)~=0
            T=U(i)*conj(Iz(j))*k3;
            if abs(T)>abs(Sz(j))
                Sz(j)=T;
            end
        end
    end
end
end
%Jaudas zudumi zaru pretestibas, MVA
Szud=zeros(ZS,1);
for i=1:ZS
    Szud(i)=3*Iz(i)*conj(Iz(i))*Z(i,i);
end
disp 'Mezglu spriegumi, kV'
U
disp 'Spriegumu moduli, % un lenki gradus'
abs(U)*100/Ub
angle(U)*180/pi
disp 'Zaru stravas, kA un lenki gradus'
Iz
abs(Iz)
angle(Iz)*180/pi
disp 'Zaru jaudas plusmas, MVA'
Sz
disp 'Jaudas zudumi zaru pretestibas, MVA'
Szud
%Avotu aprekinu
disp 'B11 kopnu spriegums, kV, ieverojot tiessecibas komponentes
pagriezienu T1 par +30 gradiem'
UB11=U(11)*(0.866+0.5i)
disp 'G1 strava kA, ieverojot tiessecibas komponentes pagriezienu T1 par
+30 gradiem'
IG1=Iz(19)*(0.866+0.5i)
%Generatora G1 A fazes EDSi
disp 'EqG1 slodzes rezima, kV; ta lenkis gradus un modulis, kV'
EqG1=(UB11/k3)+(IG1*Zgn)
dEqG1=angle(EqG1)*180/pi
MEqG1=abs(EqG1)
disp 'EqG1 modulis visparejas un parejas rezima, kV; un so EDS kompleksas
vertibas, kV'
MEqG1vp=Evprv*Ub/k3
EqG1vp=MEqG1vp*(cos(angle(EqG1))+sin(angle(EqG1))*1i)
MEqG1p=EpRV*Ub/k3
EqG1p=MEqG1p*(cos(angle(EqG1))+sin(angle(EqG1))*1i)
disp 'B12 kopnu spriegums, kV, ieverojot tiessecibas komponentes
pagriezienu T2 par +30 gradiem'
UB12=U(12)*(0.866+0.5i)
disp 'G2 strava, kA, ieverojot tiessecibas komponentes pagriezienu T2 par
+30 gradiem'
IG2=Iz(20)*(0.866+0.5i)
%Generatora G2 A fazes EDSi
disp 'EqG2 slodzes rezima, kV; ta lenkis gradus un modulis, kV'
EqG2=(UB12/k3)+(IG2*Zgn)
dEqG2=angle(EqG2)*180/pi
MEqG2=abs(EqG2)
disp 'EqG2 modulis visparejas un parejas rezima, kV un to kompleksas
vertibas, kV'
MEqG2vp=Evprv*Ub/k3

```

```

EqG2vp=MEqG2vp*(cos(angle(EqG2))+sin(angle(EqG2))*1i)
MEqG2p=EpRV*Ub/k3
EqG2p=MEqG2p*(cos(angle(EqG2))+sin(angle(EqG2))*1i)
%AD stravas noteiksana
disp 'AD kopnu B6 spriegums, kV, ieverojot tiessecibas pagriezienu T3 un T4
par +30 gradiem'
UB6=U(6)*(0.866-0.5i)
disp 'AD strava, kA, ieverojot ieguto kopnu spriegumu'
Iad=conj(Sad)/(k3*conj(UB6))
%AD pret-EDS noteiksana
disp 'AD pret-EDS, kV; ta lenkis grados un modulis, kV'
EadSL=(UB6/k3)-Iad*Zlad
dEad=angle(EadSL)*180/pi
MEad=abs(EadSL)
%PV1 un PV2 ar P1 un P2 tikla injekceto stravu aprekins
disp 'P1 un P2 stravas stiprumi slodzes rezima, kA un to lenki grados,
ieverojot tiessecibas pagriezienu par +30 gradiem'
Ip1=Iz(16)*(0.866+0.5i)
Ip2=Iz(17)*(0.866+0.5i)
dIp1=angle(Ip1)*180/pi
dIp2=angle(Ip2)*180/pi
disp 'P1 un P2 stravas stiprumi issleguma rezima, kA, saglabajot slodzes
rezima lenki'
Ip1k=MIpk*(cos(angle(Ip1))+sin(angle(Ip1))*1i)
Ip2k=MIpk*(cos(angle(Ip2))+sin(angle(Ip2))*1i)
toc %beidzam uznemt aprekina izpildes laiku

```

Aprēķinu rezultātā iegūtais mezglu spriegumu vektors:

U	
1	$346,79 + j0,89$
2	$348,14 - j3,43$
3	$348,14 - j3,43$
4	$350,78 + j1,75$
5	$349,24 - j1,37$
6	$336,58 - j20,02$
7	$354,42 + j6,49$
8	$358,37 + j14,88$
9	$358,37 + j14,88$
10	$357,73 + j15,16$
11	$357,84 + j42,86$
12	$357,84 + j42,86$
13	$350,75 + j1,78$
14	$350,75 + j1,78$
15	$355,94 + j9,5$

no kurienes ar (4.12.) vienādojumu, ņemot vērā, ka E aizpildīts ar 0 V un papildus dalot bāzes un mezglu spriegumus ar $\sqrt{3}$, lai pārietu uz fāzes spriegumu vērtībām, tika iegūts zaru strāvu vektors:

$$\begin{aligned}
I_Z & \\
\dot{I}_1 & -0,039 + j0,167 \\
\dot{I}_2 & -0,019 + j0,083 \\
\dot{I}_3 & -0,085 + j0,116 \\
\dot{I}_4 & 0,066 - j0,033 \\
\dot{I}_5 & -0,019 + j0,083 \\
\dot{I}_6 & -0,085 + j0,116 \\
\dot{I}_7 & 0,066 - j0,033 \\
\dot{I}_8 & 0,144 - j0,044 \\
\dot{I}_9 & 0,144 - j0,044 \\
\dot{I}_{10} & 0,058 - j0,017 \text{ kA.} \\
\dot{I}_{11} & 0,058 - j0,017 \\
\dot{I}_{12} & 0,165 - j0,107 \\
\dot{I}_{13} & 0,165 - j0,107 \\
\dot{I}_{14} & 0,215 - j0,092 \\
\dot{I}_{15} & 0,016 - j0,007 \\
\dot{I}_{16} & 0,008 - j0,004 \\
\dot{I}_{17} & 0,008 - j0,004 \\
\dot{I}_{18} & 0,199 - j0,037 \\
\dot{I}_{19} & 0,241 + j0,005 \\
\dot{I}_{20} & 0,241 + j0,005
\end{aligned}$$

Garenesimetrijas un pārrāvumu gadījuma aptuveni var lietot no slodzes režīma iegūtos pārveidotāju P1, P2 strāvu stiprumus un leņķus. Īsslēgumu aprēķiniem šoreiz tiks pieņemts, ka strāvas avota leņķis arī saglabājas aptuveni tāds pats kā slodzes režīmā, kaut precīzam aprēķinam būtu nepieciešami vismaz divi režīma parametru aprēķini. Pirmais aprēķins ļautu noteikt aptuveno pārveidotāju kopņu spriegumu, rodoties īsslēgumam. Tad ar pārveidotāju strāvas moduli un kopņu sprieguma moduli iespējams noteikt pilnās jaudas moduli, kas kopā ar fiksētu $\cos\phi$ dod iespēju noteikt pilno jaudu. Precizētās P1, P2 ekvivalento strāvas avotu vērtības iegūst, izmantojot pilnās jaudas un kopņu spriegumu kompleksās vērtības. Beigās veic režīma pārrēķinu ar koriģētajiem strāvas avotiem. Šādu procesu idejiski var atkārtot, kamēr izmaiņas visu kopņu spriegumu vai strāvas avotu vērtībās ir mazākas par lietotāja izvēlētu robežvērtību. Tomēr daudzu aplūkotā tīkla īsslēgumu gadījumos aplūkoto pārveidotāju strāvas stiprumi būs mazi, salīdzinot ar S, G1 un G2 strāvu stiprumiem, tādēļ sagaidāms, ka tuvinātais P1 un P2 strāvas avotu leņķa pieņēmums neradīs vērā ņemamas aprēķinu kļūdas. Pirms strāvas avotu leņķa noteikšanas jāievēro to strāvu pagrieziens par 30° , jo starp sistēmu S un pārveidotājiem ir transformators T5 ar slēguma shēmu un grupu $Y_0/\Delta/\Delta-11-11$ un ir jāveic pārrēķins no zvaigznē saslēgta tinuma puses uz trīsstūrī savienoto tinumu pusēm:

$$\begin{aligned}
\dot{I}_{P1SL} = \dot{I}_{P2SL} = \dot{I}_{P1} &= I_Z(16)e^{j30^\circ} = (0,0082 - j0,0036)(0,866 + j0,5) \approx \\
&\approx 0,0089 + j0,001 \approx 0,0089e^{j6,55^\circ} \text{ kA.}
\end{aligned}$$

Attiecīgi, balstoties uz pieņēmumu par nemainīgo P1, P2 strāvas avotu lenķi, iespējams noteikt īsslēguma režīma strāvas avotu vērtības:

$$\dot{I}_{P1K} = \dot{I}_{P2K} \approx I_{KPN340}(\cos(6,55^\circ) + j \sin(6,55^\circ)) \approx 0,0141 + j0,0016 \text{ kA.}$$

Pirms ģeneratoru G1 EDS noteikšanas ir jāpagriež ģeneratoru kopņu spriegumu un zaru strāvu vektori kā TS komponentes par 30° , jo starp sistēmu S un G1, G2 ir transformatori T1 un T2 ar slēguma shēmām un grupām $Y_0/\Delta-11$ (pāreja no zvaigznē uz trīsstūrī savienotā tinuma pusi), lai noteiktu faktiskos EDS lenķus:

$$\dot{U}_{B11} = U(11)e^{j30^\circ} = (357,84 + j4,29)(0,866 + j0,5) \approx 288,46 + j216,04 \text{ kV.}$$

$$\dot{I}_{G1} = I_Z(4)e^{j30^\circ} = (0,241 + j0,005)(0,866 + j0,5) \approx 0,207 - j0,125 \text{ kA.}$$

Kopņu B12 un B11 spriegums sanāk identisks ($\dot{U}_{B12} = \dot{U}_{B11}$), un iegūtā ģeneratora G2 strāva sakrīt ar G1 strāvu ($\dot{I}_{G2} = \dot{I}_{G1}$), tādēļ, ņemot vērā, ka abi ģeneratori ir identiski, EDS aprēķins tiks parādīts vienīgi G1. Ģeneratora G1 slodzes režīma fāzes EDS būs šāds:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{qG1} &= (\dot{U}_{B11}/\sqrt{3}) + \dot{I}_{G1}\dot{Z}_{GSL}^1 = (288,46 + j216,04/\sqrt{3}) + \\ &+ (0,207 - j0,125)(7,2 + j523,97) \approx 102,63 + j233,95 \approx 255,47e^{j66,31^\circ} \text{ kV.} \end{aligned}$$

Pieņemot, ka ģeneratora rotora stāvoklis un tam atbilstošais EDS lenķis nemainīsies arī bojājumu sākuma momentā, ir iespējams aptuveni noteikt tā virspārejas un pārejas režīma EDS:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{qG}'' &= (E_{Grv}''U_{APR}/\sqrt{3})(\cos(\delta) + j \sin(\delta)) = (1,13 \cdot 340/\sqrt{3})(\cos(66,31^\circ) + \\ &+ j \sin(66,31^\circ)) \approx 89,11 + j203,13 \text{ kV,} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{qG}' &= (E_{Grv}'U_{APR}/\sqrt{3})(\cos(\delta) + j \sin(\delta)) = (1,15 \cdot 340/\sqrt{3})(\cos(66,31^\circ) + \\ &+ j \sin(66,31^\circ)) \approx 90,69 + j206,73 \text{ kV.} \end{aligned}$$

AD pret-EDS noteikšanai vēl jāzina (uz U_{APR} reducētā) statora pretestība:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{AD1}^1 &= \dot{Z}_{AD1rv}^1 U_{APR}^2 / S_{NAD} = (0,072 + j0,093)(340 \cdot 10^3)^2 / 70,591 \cdot 10^6 \approx \\ &\approx 117,91 + j152,3 \Omega. \end{aligned}$$

Turklāt, nosakot AD pret-EDS, šajā tīklā jāņem vērā, ka transformatoru T3 un T4 slēguma shēmu un grupu $Y_0/\Delta-11$ dēļ, AD kopņu spriegums $U(6)$ kā TS komponente vēl jāpagriež par 30° , pārejot uz trīsstūrī savienotā tinuma pusi, lai iegūtu faktisko AD kopņu sprieguma lenķi:

$$\dot{U}_{B6} = U(6)e^{j30^\circ} = (336,58 - j20,02)(0,866 + j0,5) \approx 281,46 - j185,63 \text{ kV.}$$

AD statora A fāzes strāva, balstoties uz iegūto kopņu B6 līnijas spriegumu:

$$\dot{I}_{AD} = \hat{S}_{AD}/\sqrt{3}\dot{U}_{B6} = (60 - j37,19)/\sqrt{3}(281,46 + j185,63) \approx 0,051 - j0,110 \text{ kA.}$$

AD pret-EDS nosaka no kopņu fāzes sprieguma, atņemot sprieguma kritumu AD statora pretestībā:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{AD} &= (\dot{U}_{B6}/\sqrt{3}) - \dot{I}_{AD}\dot{Z}_{AD1}^1 = ((281,46 - j185,63)/\sqrt{3}) - \\ &- (0,051 - j0,110)(117,91 + j152,3) \approx 139,81 - j101,96 \approx 173,04e^{-j36,10^\circ} \text{ kV.} \end{aligned}$$

Salīdzinājumam ar 2.6. apakšnodaļā minēto tuvināto pret-EDS vērtību (0,9 r. v.) var parādīt AD aprēķina fāzes pret-EDS vērtību: $E_{ADrv} = 173,04/(340/\sqrt{3}) \approx 0,882 \text{ r. v.}$

Otrā šķērsnesimetrijas aprēķinu piemēra topoloģiskā režīma parametru aprēķina
datorrealizācija *MATLAB*© programmas tekstā

```

tic %Sakam uzņemt apreķina laiku
clear; clc;
Ub=115; %Apreķina spriegums, kV
k3=sqrt(3);
%SKM Pagriezienu operatoru definesana
a=((-0.5)+(1i*k3/2));
a2=((-0.5)-(1i*k3/2));
%Divtinumu transformatoru pretestības, omi
Zt=1.56+40.23i; %T1
%Skelta ZS tinuma transformatoru pretestības, omi
%   AS           ZS
Ztsk=[(0.45+6.27i) (0.68+36.39i)]; %T2
%Sistēmas pretestība, omi
Zs=1.37+10.94i;
%Sistēmas fazu EDS, kV
EsA=Ub/k3;
EsB=EsA*a2;
EsC=EsA*a;
%Liniju tiessecības pretestības (L3, L4 reducetas uz 115kV), omi
Zl1=[9.4+17.18i   %L1
     9.4+17.18i   %L2
     50.26+110.76i %L3
     31.08+86.62i]; %L4
%Liniju nullsecības pretestības (L3, L4 reducetas uz 115kV), omi
Zl0=[15.65+42.97i %L1
     15.65+42.97i %L2
     99.52+511.15i %L3
     70.42+407i]; %L4
%Liniju L1 un L2 nullsecības mijindukcijas pretestība, omi
Zm0=6.24+24.2i;
%Slodzu ekvivalentas pretestības, omi
Zsl=[1365.5+737i
     973.5+443.5i];
%Generatora tiessecības pretestības, omi
Zgn=2.65+1095.03i;
Zgvp=2.65+69.3i;
Zgp=2.65+105.8i;
%Generatora pretsecības pretestība, omi
Zg2=21.16+84.64i;
%Generatora nullsecības pretestība, omi
Zg0=2.65+38.09i;
%Generatora fazu parejas režīma EDS atbilstosi BV, kV
EgpAbv=58.86+45.45i;
EgpCbv=EgpAbv*a;
%Issleguma parejas pretestības
disp 'Issleguma parejas pretestības, Omi'
Zka=6
Zkb=6
Zkc=1*10^6
Zkn=1
Zkf=12

```

```

%PIRMAS INCIDENCES MATRICA
% 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25
M=[-1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %1
0 -1 -1 -1 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %2
0 0 0 0 -1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %3
0 0 0 0 0 0 0 0 -1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %4
0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 -1 -1 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %5
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %6
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 0 0 0 0 0 0 0 1 0 %7
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 -1 -1 1 0 0 0 1 0 %8
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 1 1 0 0 %9
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 -1 0 %10
0 0 0 0 0 0 0 0 -1 0 0 0 0 0 0 -1 0 0 0 0 0 0 0 0 -1]; %11

%ZARU PRETESTIBU VEKTORS, Omi
ZZ=[Zs %I11
Zl1(1) %I21
Zl1(2) %I31
Zt+Zgp %I41
Ztsk(1,1) %I51
Ztsk(1,2)+Zl1(3)+Zs1(1) %I61
Ztsk(1,2)+Zl1(4)+Zs1(2) %I71
Zkf/2 %IK1
Zs %I12
Zl1(1) %I22
Zl1(2) %I32
Zt+Zg2 %I42
Ztsk(1,1) %I52
Ztsk(1,2)+Zl1(3)+Zs1(1) %I62
Ztsk(1,2)+Zl1(4)+Zs1(2) %I72
Zkf/2 %IK2
Zs %I10
Zl0(1)-Zm0 %I20
Zl0(2)-Zm0 %I30
Zt %I40
Ztsk(1,1) %I50
Ztsk(1,2) %I60
Ztsk(1,2) %I70
Zm0 %I80
3*Zkn+(Zkf/2)]; %IK0

%ZARU EDS VEKTORS, kV
E= [EsC %I11
0 %I21
0 %I31
EgpCbv %I41
0 %I51
0 %I61
0 %I71
0 %IK1
0 %I12
0 %I22
0 %I32
0 %I42
0 %I52
0 %I62
0 %I72
0 %IK2
0 %I10
0 %I20
0 %I30
0 %I40
0 %I50

```

```

0      %I60
0      %I70
0      %I80
0];    %IK0
MS=size(M,1); %Mezglu skaits
ZS=size(M,2); %Zaru skaits
Z=diag(ZZ); %Pretestibu matricas sastadisana
Mt=M';
%Pretestibu matricas vienkarsota inversija
for i=1:ZS
    Z1(i,i)=1/Z(i,i);
end
Y=M*Z1*Mt; %Vaditspeju matricas iegusana
B=-M*Z1*E; %Brivo mainigo vektora iegusana
%Aprekinam spriegumus kompleksas aizvietosanas shemas mezglos ar Zeidela
metodi (funkcija dota gramatas 4.nodala)
disp 'C fazes spriegumu simetriskas komponentes kompleksas aizvietosanas
shemas mezglos, kV; to moduli, kV un lenki grados'
U=zeidel(Y,B,1e-6)
MU=abs(U)
dU=angle(U)*180/pi
disp 'C fazes stravas simetriskas komponentes kompleksas shemas zaros, kA;
to moduli, kA un lenki grados'
Iz=(Z1*(E+Mt*U))
MIz=abs(Iz)
dIz=angle(Iz)*180/pi
%DARBIBAS AR SIMETRISKAJAM KOMPONENTEM
disp 'C fazes spriegumu simetriskas komponentes BV, kV; to moduli, kV un
lenki grados'
Uks=[U(2)
      U(5)
      U(8)]
MUks=abs(Uks)
dUks=angle(Uks)*180/pi
disp 'C fazes stravas simetriskas komponentes BV, kA; to moduli, kA un
lenki grados'
Iks=[Iz(8)
      Iz(16)
      Iz(25)]
MIks=abs(Iks)
dIks=angle(Iks)*180/pi
disp 'C fazes spriegumu simetriskas komponentes QF2 RUV, kV; to moduli, kV
un lenki grados'
UQF2s=[U(1)
        U(4)
        U(7)]
MUQF2s=abs(UQF2s)
dUQF2s=angle(UQF2s)*180/pi
disp 'C fazes stravas simetriskas komponentes QF2 RUV, kA; to moduli, kA un
lenki grados'
IQF2s=[Iz(2)
        Iz(10)
        Iz(18)]
MIQF2s=abs(IQF2s)
dIQF2s=angle(IQF2s)*180/pi
%PAREJA NO SIMETRISKAJAM KOMPONENTEM UZ FAZU LIELUMIEM
%Funkcija SimComp2Ph dota gramatas 1. nodala
disp 'Fazu spriegumi BV, kV; to moduli, kV un lenki grados'
Uk=SimComp2Ph(Uks, 'C')
MUK=abs(Uk)
dUk=angle(Uk)*180/pi

```

```

disp 'Fazu stravas BV, kA; to moduli, kA; un lenki gradus'
Ik=SimComp2Ph(Iks, 'C')
MIk=abs(Ik)
dIk=angle(Ik)*180/pi
disp 'Fazu spriegumi QF2 RUV, kV; to moduli, kV un lenki gradus'
UQF2=SimComp2Ph(UQF2s, 'C')
MUQF2=abs(UQF2)
dUQF2=angle(UQF2)*180/pi
disp 'Fazu stravas QF2 RUV, kA; to moduli, kA un lenki gradus'
IQF2=SimComp2Ph(IQF2s, 'C')
MIQF2=abs(IQF2)
dIQF2=angle(IQF2)*180/pi
%Robeznosacijumu parbaudem BV
disp 'Neitrales jeb saites ar zemi stravas stiprumi BV, kA; to moduli, kA
un lenki gradus'
Ikn=Ik(1)+Ik(2)
MIkn=abs(Ikn)
dIkn=angle(Ikn)*180/pi
disp 'Neitrales spriegums BV, kV; ta modulis kV un lenkis gradus'
Ukn=Uk(1)-Ik(1)*Zka
MUkn=abs(Ukn)
dUkn=angle(Ukn)*180/pi
disp 'Spriegumu starpiba starp A fazi un neitrales punktu BV, kV; tas
modulis, kV un lenkis gradus'
DUkA=Uk(1)-Ukn
MDUkA=abs(DUkA)
dDUkA=angle(DUkA)*180/pi
disp 'Spriegumu starpiba starp B fazi un neitrales punktu BV, kV; tas
modulis, kV un lenkis gradus'
DUkB=Uk(2)-Ukn
MDUkb=abs(DUkB)
dDUkB=angle(DUkB)*180/pi
%DA noveroja pretestiba un II zonas iestatijums
disp 'Distantaizsardzibas noverota issleguma pretestiba A-B cilpai, Omi'
Zrel=(UQF2(1)-UQF2(2))/((IQF2(1)-IQF2(2)))
disp 'Distantaizsardzibas vienkarsoti noteiktais II zonas iestatijums, Omi'
kdr=0.9;
ZDAII=kdr*(Zl1(1)+kdr*Zl1(2))
toc%Beidzam uznemt aprekinu laiku

```

Trešā šķērsnesimetrijas aprēķinu piemēra topoloģiskā režīma parametru aprēķina
datorrealizācija *MATLAB*© programmas tekstā

```

tic %Sakam uzņemt apreķina laiku
clc; clear;
Ub=340; %Apreķina spriegums, kV
k3=sqrt(3);
%SKM Pagriezienu operatoru definesana
a=(-0.5)+(1i*k3/2);
a2=conj(a);
%Nominala sprieguma frekvence, Hz
fn=50;
%Nominala lenkiska frekvence, rad/s
Wn=2*pi*fn;
%Apreķina laika moments, s
tapr=0.03;
%Divtinumu transformatoru pretestības, omi
Zt=1.57+66.2i; %T1,T2,T3,T4
%Skelta ZS tinuma transformatoru pretestības, omi
%      AS      ZS
Ztsk=[(6.13+108.73i) (6.13+381.1i)]; %T5
%Autotransformatoru pretestības, omi
%      AS      VS      ZS
Zat=[(0.18+27.42i) (0.18) (0.18+45.7i) %AT1
      (0.18+27.42i) (0.18) (0.18+45.7i)]; %AT2
%Sistēmas pretestība, omi
Zs=2.3+23.01i;
%Sistēmas fazu EDS momenta tapr, kV
EsA=(Ub/k3)*(cos(Wn*tapr)+sin(Wn*tapr)*1i);
%Liniju tiessecības pretestības, omi
Zl1=[10.33+56.88i %L1
      10.33+56.88i %L2
      5.88+32.61i %L3
      5.88+32.61i %L4
      4.11+22.83i %L5
      4.7+26.09i]; %L6
%Liniju nullsecības pretestības, omi
Zl0=[50.58+228.73i %L1, iereķinot ML1L2
      50.58+228.73i %L2, iereķinot ML1L2
      19.15+71.70i %L3
      19.15+71.70i %L4
      13.41+50.19i %L5
      15.32+57.36i]; %L6
%Generatoru tiessecības pretestība, omi
Zgp=7.2+183.39i;
%Generatoru pretsecības pretestība, omi
Zg2=13.1+96.28i;
%Generatoru A fazes parejas EDS, ieverojot pareju T1 un T2 uz Y0 pusi, kV
EgpAbv=(90.69+206.73i)*exp(1i*(-30*pi/180));
%Generatoru A fazes parejas EDS momenta tapr, ieverojot pareju uz Y0 pusi
T1 un T2, kV
EgpA=EgpAbv*(cos(Wn*tapr)+sin(Wn*tapr)*1i);
%PV+P stravas avotu vertības issleguma rezīma, ieverojot pareju T5 uz Y0
pusi, kA
JpkAbv=(0.0141+0.0016i)*exp(1i*(-30*pi/180));
%PV+P stravas avotu vertības slodzes rezīma un issleguma momenta tapr, kA
JpkA=JpkAbv*(cos(Wn*tapr)+sin(Wn*tapr)*1i);
disp 'Issleguma parejas pretestības, Omi'

```

```

Zka=20
Zkb=10
Zkc=0
Zkn=0
disp 'Papildu maksliga pretestiba aizvietosanas shemu realizacijai, omi'
Rpap=0.0001
disp 'Issleguma parejas pretestibu kombinacijas aprekinu vienkarsojumiem,
Omi'
Zkabc1=Zka+Zkb+Zkc
Zkabc2=Zka+a*Zkb+a2*Zkc
Zkabc3=Zka+a2*Zkb+a*Zkc
disp 'Issleguma attalums, r.v.'
alfa=0.6
disp 'Pirmajam solim pienemtie issleguma punktu spriegumi jeb papildu EDS
secibu aizvietosanas shemas, kV'
UkA1=EsA/2
UkA2=EsA/2
UkA0=EsA/2
%TIESSECIBAS AIZVIETOSANAS SHEMAS REZIMA PARAMETRU APREKINA IEEJAS MATRICAS
%PIRMAS INCIDENCES MATRICA
%      1  2  3  4  5  6  7  8  9  10 11 12 13 14 15 16
M1=[-1  1  1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  %1
     0 -1 -1 -1 -1  1  1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  %2
     0  0  0  0  0  -1 -1  1  0  0  0  0  0  0  0  0  %3
     0  0  0  0  0  0  0  -1 -1  0  0  0  0  0  0  1  %4
     0  0  0  0  0  0  0  0  1 -1  0  0 -1  0  0  0  %5
     0  0  0  1  1  0  0  0  0  0  0  0  1 -1 -1  0  %6
     0  0  0  0  0  0  0  0  0  1 -1 -1  0  0  0  0  %7
     0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  1  0  0  0  0  0  %8
     0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  1  0  0  0  0 ];%9
%ZARU PRETESTIBU VEKTORS, Omi
ZZ1=[Zs          %I11
     Zat(1,1)+Zat(1,2) %I21
     Zat(2,1)+Zat(2,2) %I31
     Zl1(1)          %I41
     Zl1(2)          %I51
     Zl1(3)          %I61
     Zl1(4)          %I71
     Zl1(5)*alfa     %I81
     Zl1(5)*(1-alfa) %I91
     Ztsk(1,1)       %I101
     Ztsk(1,2)       %I111
     Ztsk(1,2)       %I121
     Zl1(6)          %I131
     Zt+Zgp          %I141
     Zt+Zgp          %I151
     Rpap];          %IK1
%ZARU EDS VEKTORS 1 SOLIM, kV
E1=[EsA          %I11
     0            %I21
     0            %I31
     0            %I41
     0            %I51
     0            %I61
     0            %I71
     0            %I81
     0            %I91
     0            %I101
     0            %I111
     0            %I121
     0            %I131

```

```

EgpA %I141
EgpA %I151
-UkA1];%IK1
%STRAVAS AVOTU VEKTORS, kA
I1=[0 %1
0 %2
0 %3
0 %4
0 %5
0 %6
0 %7
JpkA %8
JpkA]; %9
MS1=size(M1,1);%Tiessecibas aizvietosanas shemas mezglu skaits
ZS1=size(M1,2);%Tiessecibas aizvietosanas shemas zaru skaits
%Tiessecibas aizvietosanas shemas pretestibu matricas sastadisana un
vienkarsota inversija
Z1=diag(ZZ1);
M1t=M1';
Z11=zeros(ZS1,ZS1);
for i=1:ZS1
    Z11(i,i)=1/Z1(i,i);
end
Y1=M1*Z11*M1t;
%Y1 inversija
Y11=inv(Y1);
B1=I1-M1*Z11*E1;
%PRETSECIBAS AIZVIETOSANAS SHEMAS REZIMA PARAMETRU APREKINA IEEJAS MATRICAS
%PIRMAS INCIDENCES MATRICA
% 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13
M2=[-1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %1
0 -1 -1 -1 -1 1 1 0 0 0 0 0 0 %2
0 0 0 0 0 -1 -1 1 0 0 0 0 0 %3
0 0 0 0 0 0 0 -1 -1 0 0 0 1 %4
0 0 0 0 0 0 0 0 1 -1 0 0 0 %5
0 0 0 1 1 0 0 0 0 1 -1 -1 0 ];%6
%ZARU PRETESTIBU VEKTORS, Omi
ZZ2=[Zs %I21
Zat(1,1)+Zat(1,2) %I22
Zat(2,1)+Zat(2,2) %I32
Z11(1) %I42
Z11(2) %I52
Z11(3) %I62
Z11(4) %I72
Z11(5)*alfa %I82
Z11(5)*(1-alfa) %I92
Z11(6) %I132
Zt+Zg2 %I142
Zt+Zg2 %I152
Rpap]; %IK2
%ZARU EDS VEKTORS 1 SOLIM, kV
E2=[0 %I12
0 %I22
0 %I32
0 %I42
0 %I52
0 %I62
0 %I72
0 %I82
0 %I92
0 %I132

```

```

0      %I142
0      %I152
-UkA2];%IK2
MS2=size(M2,1);%Pretsecibas aizvietosanas shemas mezglu skaits
ZS2=size(M2,2);%Pretsecibas aizvietosanas shemas zaru skaits
Z2=diag(ZZ2);
M2t=M2';
%Pretsecibas aizvietosanas shemas pretestibu matricas sastadisana un
vienkarsota inversija
Z21=zeros(ZS2,ZS2);
for i=1:ZS2
    Z21(i,i)=1/Z2(i,i);
end
Y2=M2*Z21*M2t;
%Y2 inversija
Y21=inv(Y2);
B2=-M2*Z21*E2; %I2=0
%NULLSECIBAS AIZVIETOSANAS SHEMAS REZIMA PARAMETRU APREKINA IEEJAS MATRICAS
%PIRMAS INCIDENCES MATRICA
%
1  2  3  4  5  6  7  8  9  10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22
M0=[-1  1  1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0 %1
0  0  0 -1 -1  1  1  0  0  0  0  0  0  0  0 -1  0 -1  0  0  0  0 %2
0  0  0  0  0 -1 -1  1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  1  1  0 %3
0  0  0  0  0  0  0 -1 -1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  1 %4
0  0  0  0  0  0  0  0  1 -1  0  0 -1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0 %5
0  0  0  1  1  0  0  0  0  0  0  0  1 -1 -1  0  0  0  0  0  0  0  0 %6
0  0  0  0  0  0  0  0  0  1 -1 -1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0 %7
0 -1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  1  1  0  0  0  0  0  0 %8
0  0 -1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  1  1  0  0  0  0];%9
%ZARU PRETESTIBU VEKTORS, Omi
ZZ0=[Zs      %I10
Zat(1,1)    %I20
Zat(2,1)    %I30
Zl0(1)      %I40
Zl0(2)      %I50
Zl0(3)      %I60
Zl0(4)      %I70
Zl0(5)*alfa %I80
Zl0(5)*(1-alfa) %I90
Ztsk(1,1)   %I100
Ztsk(1,2)   %I110
Ztsk(1,2)   %I120
Zl0(6)      %I130
Zt          %I140
Zt          %I150
Zat(1,2)    %I160
Zat(1,3)    %I170
Zat(2,2)    %I180
Zat(2,3)    %I190
Zt          %I200
Zt          %I210
Rpap];      %IK0
%ZARU EDS VEKTORS 1 SOLIM, kV
E0=[0      %I10
0      %I20
0      %I30
0      %I40
0      %I50
0      %I60
0      %I70
0      %I80

```



```

0      %I90
0      %I100
0      %I110
0      %I120
0      %I130
0      %I140
0      %I150
0      %I160
0      %I170
0      %I180
0      %I190
0      %I200
0      %I210
-UkA0];%IK0
MS0=size(M0,1);%Nullsecibas aizvietosanas shemas mezglu skaits
ZS0=size(M0,2);%Nullsecibas aizvietosanas shemas zaru skaits
%Nullsecibas aizvietosanas shemas pretestibu matricas sastadisana un
vienkarsota inversija
Z0=diag(ZZ0);
M0t=M0';
Z01=zeros(ZS0,ZS0);
for i=1:ZS0
    Z01(i,i)=1/Z0(i,i);
end
Y0=M0*Z01*M0t;
%Y0 inversija
Y01=inv(Y0);
B0=-M0*Z01*E0; %I0=0
%Visa aprekena kopeja precizitates robeza, kV
EPSkrit=0.001;
%Brivi pienemta pasreizeja precizitates (spriegumu atskiribas starp soliem)
vertiba, kas lielaka par EPSkrit ieejai cikla, kV
EPS=inf;
%Tuvinajuma solu skaits
N=1;
%Aizpildam secibu shemu mezglu spriegumu vektorus ar brivi pienemtam
vertibam, kV
U1=ones(MS1,1)*(Ub/k3);
U2=ones(MS2,1)*(Ub/k3);
U0=ones(MS0,1)*(Ub/k3);
%KOPIGAIS SECIBU AIZVIETOSANAS SHEMU REZIMA PARAMETRU APREKINA CIKLS
while EPS>EPSkrit
    %Secibu aizvietosanas shemu pasreizejas precizitates vertibas
    atiestatisana
    EPS1=0;
    EPS2=0;
    EPS0=0;
    %TIESSECIBAS AIZVIETOSANAS SHEMAS REZIMA PARAMETRU APREKINA 1 TUVINAJUMA
    SOLIS
    for i=1:MS1
        Un=0;
        for j=1:MS1
            Un=Un+Y11(i,j)*B1(j);
        end
        T=abs(U1(i)-Un);
        if T>EPS1
            EPS1=T;
        end
        U1(i)=Un;
    end
end

```

```

%PRETSECIBAS AIZVIETOSANAS SHEMAS REZIMA PARAMETRU APREKINA 1 TUVINAJUMA
SOLIS
for i=1:MS2
    Un=0;
    for j=1:MS2
        Un=Un+Y21(i,j)*B2(j);
    end
    T=abs(U2(i)-Un);
    if T>EPS2
        EPS2=T;
    end
    U2(i)=Un;
end
%NULLSECIBAS SHEMAS REZIMA PARAMETRU APREKINA 1 TUVINAJUMA SOLIS
for i=1:MS0
    Un=0;
    for j=1:MS0
        Un=Un+Y01(i,j)*B0(j);
    end
    T=abs(U0(i)-Un);
    if T>EPS0
        EPS0=T;
    end
    U0(i)=Un;
end
%SECIBU AIZVIETOSANAS SHEMU ZARU STRAVU APREKINI, kA
Iz1=Z11*(E1+M1t*U1);
Iz2=Z21*(E2+M2t*U2);
Iz0=Z01*(E0+M0t*U0);
%PARREKINAM ISSLEGUMA PUNKTA SPRIEGUMA SIMETRISKAS KOMPONENTES, kV
UkA1=(Iz1(16)*Zkabc1+Iz2(13)*Zkabc3+Iz0(22)*Zkabc2)/3;
UkA2=(Iz1(16)*Zkabc2+Iz2(13)*Zkabc1+Iz0(22)*Zkabc3)/3;
UkA0=(Iz1(16)*Zkabc3+Iz2(13)*Zkabc2+Iz0(22)*(Zkabc1+9*Zkn))/3;
%ATJAUNINAM ZARU EDS VEKTORUS (UkA1,2,0 VERTIBAS TAJOS), kV
E1(16)=-UkA1;
E2(13)=-UkA2;
E0(22)=-UkA0;
%ATJAUNINAM BRIVO MAINIGO VEKTORUS
B1=I1-M1*Z11*E1;
B2=-M2*Z21*E2; %I2=0
B0=-M0*Z01*E0; %I0=0
%Nosakam maksimalo mezglu spriegumu starpibu starp tuvinajuma soliem
%visam secibu aizvietosanas shemam, kV
EPS=max([EPS1 EPS2 EPS0]);
N=N+1;
end
disp 'Risinajuma iegusanai nepieciesamo solu skaits'
N
disp 'A fazes tiessecibas aizvietosanas shemas mezglu spriegumi, kV'
U1
disp 'A fazes tiessecibas aizvietosanas shemas zaru stravas stiprumi, kA'
Iz1
disp 'A fazes pretsecibas aizvietosanas shemas mezglu spriegumi, kV'
U2
disp 'A fazes pretsecibas aizvietosanas shemas zaru stravas stiprumi, kA'
Iz2
disp 'A fazes nullsecibas aizvietosanas shemas mezglu spriegumi, kV'
U0
disp 'A fazes nullsecibas aizvietosanas shemas zaru stravas stiprumi, kA'
Iz0
%DARBIBAS AR SIMETRISKAJAM KOMPONENTEM

```

```

disp 'A fazes spriegumu simetriskas komponentes BV, kV; to moduli, kV un
lenki grados'
Uks=[U1(4)
      U2(4)
      U0(4)]
MUks=abs(Uks)
dUks=angle(Uks)*180/pi
disp 'A fazes stravas simetriskas komponentes BV, kA; to moduli, kA un
lenki grados'
Iks=[Iz1(16)
      Iz2(13)
      Iz0(22)]
MIks=abs(Iks)
dIks=angle(Iks)*180/pi
disp 'A fazes spriegumu simetriskas komponentes QF12 RUV, kV; to moduli, kV
un lenki grados'
UQF12s=[U1(2)
         U2(2)
         U0(2)]
MUQF12s=abs(UQF12s)
dUQF12s=angle(UQF12s)*180/pi
disp 'A fazes stravas simetriskas komponentes QF12 RUV, kA; to moduli, kA
un lenki grados'
IQF12s=[Iz1(6)
         Iz2(6)
         Iz0(6)]
MIQF12s=abs(IQF12s)
dIQF12s=angle(IQF12s)*180/pi
%PAREJA NO SIMETRISKAJAM KOMPONENTEM UZ FAZU LIELUMIEM
%Funkcija SimComp2Ph dota gramatas 1. nodala
disp 'Fazu spriegumi BV, kV; to moduli, kV un lenki grados'
Uk=SimComp2Ph(Uks, 'A')
MUk=abs(Uk)
dUk=angle(Uk)*180/pi
disp 'Fazu stravu stiprumi BV, kA; to moduli, kA un lenki grados'
Ik=SimComp2Ph(Iks, 'A')
MIk=abs(Ik)
dIk=angle(Ik)*180/pi
disp 'Fazu spriegumi QF12 RUV, kV; to moduli, kV un lenki grados'
UQF12=SimComp2Ph(UQF12s, 'A')
MUQF12=abs(UQF12)
dUQF12=angle(UQF12)*180/pi
disp 'Fazu stravu stiprumi QF12 RUV, kA; to moduli, kA un lenki grados'
IQF12=SimComp2Ph(IQF12s, 'A')
MIQF12=abs(IQF12)
dIQF12=angle(IQF12)*180/pi
%DISTANTAIZSARDZIBAS FIKSETAS PRETESTIBAS STARPFAZU CILPAM
disp 'Distantaizsardzibas fikseta pretestiba A-B cilpai, Omi'
ZrelAB=(UQF12(1)-UQF12(2))/((IQF12(1)-IQF12(2)))
disp 'Distantaizsardzibas fikseta pretestiba B-C cilpai, Omi'
ZrelBC=(UQF12(2)-UQF12(3))/((IQF12(2)-IQF12(3)))
disp 'Distantaizsardzibas fikseta pretestiba C-A cilpai, Omi'
ZrelCA=(UQF12(3)-UQF12(1))/((IQF12(3)-IQF12(1)))
%DISTANTAIZSARDZIBAS FIKSETAS PRETESTIBAS CILPAM FAZE-ZEME
disp 'Nullsecibas kompensacijas koeficients linijai L3'
k0=(Zl0(3)-Zl1(3))/Zl1(3)
disp 'Distantaizsardzibas fikseta pretestiba A-Z cilpai, Omi'
ZrelAZ=UQF12(1)/(IQF12(1)+k0*Iz0(6))
disp 'Distantaizsardzibas fikseta pretestiba B-Z cilpai, Omi'
ZrelBZ=UQF12(2)/(IQF12(2)+k0*Iz0(6))
disp ' Distantaizsardzibas fikseta pretestiba C-Z cilpai, Omi'

```

```
ZrelCZ=UQF12(3)/(IQF12(3)+k0*Iz0(6))
%DISTANTAIZSARDZIBAS ZONU IESTATIJUMU VERTIBAS
kdr=0.9;
disp 'DA II zona uz prieksu, primaros omos, nemot vera ZL5<ZL4 un paredzot
Rez = 50omi'
ZdaII=kdr*(Zl1(3)+kdr*Zl1(5))+50
disp 'DA III zona uz prieksu, primaros omos, rezervejot L5, L6 linijas un
paredzot Rez = 50omi'
ZdaIII=kdr*(Zl1(3)+Zl1(5)+kdr*Zl1(6))+50
toc%Beidzam uznemt aprekina laiku
```

Otrā garennesimetrijas aprēķinu piemēra topoloģiskā režīma parametru aprēķina
datorrealizācija *MATLAB*© programmas tekstā

```

tic %Sakam uzņemt apreķina laiku
clc; clear;
Ub=115; %Apreķina spriegums, kV
k3=sqrt(3);
k2=sqrt(2);
%SKM Pagriezienu operatoru definesana
a=(-0.5)+(1i*k3/2);
a2=conj(a);
%Nominala sprieguma frekvence, Hz
fn=50;
%Nominala rotācijas frekvence, rad/s
Wn=2*pi*fn;
tapr=0; %Apreķina laika moments, s
%Divtinumu transformatoru pretestības, omi
Zt=1.56+40.23i; %T1
%Skelta ZS tinuma transformatoru pretestības, omi
%   AS           ZS
Ztsk=[(0.45+6.27i) (0.68+36.39i)]; %T2
%Sistēmas pretestība, omi
Zs=1.37+10.94i;
%Sistēmas fazu EDS momenta tapr, kV
EsA=(Ub/k3)*(cos(Wn*tapr)+sin(Wn*tapr)*1i);
%Liniju tiessecības pretestības (L3, L4 reducejot uz 115 kV), omi
Zl1=[9.4+17.18i    %L1
     9.4+17.18i    %L2
     50.26+110.76i %L3
     31.08+86.62i]; %L4
%Liniju nullsecības pretestības (L3, L4 reducejot uz 115 kV), omi
Zl0=[15.65+42.97i %L1
     15.65+42.97i %L2
     99.52+511.15i %L3
     70.42+407i]; %L4
%Liniju tiessecības kapacitātes (L3, L4 reducejot uz 115 kV), F
Cl1=[3.25*10^-7 %L1
     3.25*10^-7 %L2
     3.24*10^-9 %L3
     2.57*10^-9]; %L4
%Liniju nullsecības kapacitātes (L3, L4 reducejot uz 115 kV), F
Cl0=[1.84*10^-7 %L1
     1.84*10^-7 %L2
     1.27*10^-9 %L3
     1.03*10^-9]; %L4
%Liniju L1 un L2 nullsecības mijindukcijas pretestības, omi
Zm0=6.24+24.2i;
%Slodzu pretestības, omi
Zs1=[1365.5+737i
     973.5+443.5i];
%Generatora tiessecības pretestības, omi
Zgn=2.65+1095.03i;
%Generatora pretsecības pretestība, omi
Zg2=21.16+84.64i;
%Generatora nullsecības pretestība, omi
Zg0=2.65+38.09i;
%Generatora fazu slodzes režīma EDS momenta tapr, ievērojot pagriezienu T1,
kV

```



```

(2/(Wn*((1-alfa)*Cl1(1))*1i)) %I162
(2/(Wn*(Cl1(2))*1i)) %I172
(2/(Wn*(Cl1(2))*1i)) %I182
ZLa %ILA2
%Nullseciba
Zs %I10
Zt %I20
Ztsk(1,1) %I30
Ztsk(1,2) %I40
Ztsk(1,2) %I50
Rpap %I60
alfa*(Zl0(1)-Zm0) %I70
(1-alfa)*(Zl0(1)-Zm0) %I80
Rpap %I90
Rpap %I100
(Zl0(2)-Zm0) %I110
Rpap %I120
(2/(Wn*(alfa*Cl0(1))*1i)) %I130
(2/(Wn*(alfa*Cl0(1))*1i)) %I140
(2/(Wn*((1-alfa)*Cl0(1))*1i)) %I150
(2/(Wn*((1-alfa)*Cl0(1))*1i)) %I160
(2/(Wn*(Cl0(2))*1i)) %I170
(2/(Wn*(Cl0(2))*1i)) %I180
alfa*Zm0 %I190
(1-alfa)*Zm0 %I200
ZLa]; %ILA0
%Zaru EDS vektora sastadisana, kV
E=zeros(ZS,1);
E(1)=EsA; %I11
E(2)=EgslABV; %I12
%Pretestibu matricas sastadisanas un vienkarsota inversija
Z=diag(ZZ);
Mt=M';
Zl=zeros(ZS,ZS);
for i=1:ZS
    Zl(i,i)=1/Z(i,i);
end
Y=M*Zl*Mt; %Vaditspeju matricas iegusana
B=-M*Zl*E; %Brivo mainigo vektora iegusana
%Aprekinam spriegumus mezglos ar iebuvetu LVS risinasanas funkciju
disp 'A fazes spriegumu simetriskas komponentes kompleksas aizvietosanas
shemas mezglos, kV; to moduli, kV un lenki gradus'
U=Y\B
MU=abs(U)
dU=angle(U)*180/pi
disp 'A fazes stravas simetriskas komponentes kompleksas aizvietosanas
shemas zaros, kA; to moduli, kA un lenki gradus'
Iz=(Zl*(E+Mt*U))
MIz=abs(Iz)
dIz=angle(Iz)*180/pi
%DARBIBAS AR SIMETRISKAJAM KOMPONENTEM
disp 'A fazes spriegumu simetriskas komponentes QF2 aizsardzibai, kV; to
moduli, kV un lenki gradus'
UQF2s=[U(1)
        (U(11)-U(10))
        (U(21)-U(20))]
MQF2s=abs(UQF2s)
dQF2s=angle(UQF2s)*180/pi
disp 'A fazes stravas simetriskas komponentes QF2 aizsardzibai, kA; to
moduli, kA un lenki gradus'
IQF2s=[Iz(6)

```

```

Iz(25)
Iz(44)]
MQF2s=abs(IQF2s)
dQF2s=angle(IQF2s)*180/pi
disp 'A fazes spriegumu simetriskas komponentes QF3 aizsardzibai, kV; to
moduli, kV un lenki gradus'
UQF3s=[U(2)
        (U(12)-U(10))
        (U(22)-U(20))]
MUQF3s=abs(UQF3s)
dUQF3s=angle(UQF3s)*180/pi
disp 'A fazes stravas simetriskas komponentes QF3 aizsardzibai, kA; to
moduli, kA un lenki gradus'
%QF3 stravas merijums notiek virziena uz L1, bet uzdotais stravas virziens
ir uz kopnem, t.i., pretejs merijumam
IQF3s=[-Iz(9)
        -Iz(28)
        -Iz(47)]
MIQF3s=abs(IQF3s)
dIQF3s=angle(IQF3s)*180/pi
%PAREJA NO SIMETRISKAJAM KOMPONENTEM UZ FAZU LIELUMIEM
%Funkcija SimComp2Ph dota gramatas 1.nodala
disp 'Fazu spriegumi QF2 aizsardzibai, kV; to moduli, kV un lenki gradus'
UQF2=SimComp2Ph(UQF2s, 'A')
MUQF2=abs(UQF2)
dUQF2=angle(UQF2)*180/pi
disp 'Fazu stravu stiprumi QF2 aizsardzibai, kA; to moduli, kA un lenki
gradus'
IQF2=SimComp2Ph(IQF2s, 'A')
MIQF2=abs(IQF2)
dIQF2=angle(IQF2)*180/pi
disp 'Fazu spriegumi QF3 aizsardzibai, kV; to moduli, kV un lenki gradus'
UQF3=SimComp2Ph(UQF3s, 'A')
MUQF3=abs(UQF3)
dUQF3=angle(UQF3)*180/pi
disp 'Fazu stravu stiprumi QF3 aizsardzibai, kA; to moduli, kA un lenki
gradus'
IQF3=SimComp2Ph(IQF3s, 'A')
MIQF3=abs(IQF3)
dIQF3=angle(IQF3)*180/pi
disp 'Generators pretsecibas un tiessecibas stravu stiprumu modulu
attieciba r.v.'
I2I1Grv=abs(Iz(21))/abs(Iz(2))
%KAPACITATES IETEKMES UZ SUMMARAM PARRAVUMA STRAVAM APREKINS, APSKATOT QF2
PUSES KAPACITATES LIDZ PARRAVUMAM
disp 'Tiessecibas kapacitativo stravu stiprumu I13 un I14 summa, kA'
I1kap=Iz(13)+Iz(14)
disp 'Pretsecibas kapacitativo stravu stiprumu I13 un I14 summa, kA'
I2kap=Iz(32)+Iz(33)
disp 'Nullsecibas kapacitativo stravu stiprumu I13 un I14 summa, kA'
I0kap=Iz(51)+Iz(52)
%Kapacitativo stravu simetrisko komponensu attieciba pret QF2 noverotajam
komponentem
disp 'Tiessecibas kapacitativo stravu stiprumu I13+I14 attieciba pret QF2
noveroto, r.v.'
I1QF2Crv=abs(I1kap)/abs(IQF2s(1))
disp 'Pretsecibas kapacitativo stravu stiprumu I13+I14 attieciba pret QF2
noveroto, r.v.'
I2QF2Crv=abs(I2kap)/abs(IQF2s(2))
disp 'Nullsecibas kapacitativo stravu stiprumu I13+I14 attieciba pret QF2
noveroto, r.v.'

```



```
I0QF2Crv=abs(I0kap)/abs(IQF2s(3))
%Slodzes stravas tiessecibas komponentes attieciba pret G noveroto
disp 'Tiessecibas kopejas slodzes stravas stipruma I3 attieciba pret G
plustosas stravas stiprumu, r.v.'
I1GSLrv=abs(Iz(3))/abs(Iz(2))
disp 'Tiessecibas kopejas slodzes stravas stipruma I3 attieciba pret L2
plustosas stravas stiprumu, r.v.'
I1L2SLrv=abs(Iz(3))/abs(Iz(12))
toc %Beidzam uznemt aprekinu laiku
```

Trešā garennesimetrijas aprēķinu piemēra topoloģiskā režīma parametru aprēķina
datorrealizācija *MATLAB*© programmas tekstā

```

tic%Sakam uzņemt apreķina laiku
clc; clear;
Ub=340; %Apreķina spriegums, kV
k3=sqrt(3);
%SKM Pagriezienu operatoru definesana
a=(-0.5)+(1i*k3/2);
a2=conj(a);
%Nominala sprieguma frekvence, Hz
fn=50;
%Nominala rotācijas frekvence, rad/s
Wn=2*pi*fn;
%Apreķina laika moments, s
tapr=0;
%Divtinumu transformatoru pretestības, omi
Zt=1.57+66.2i; %T1,2,3,4
%Skelta ZS tinuma transformatoru pretestības, omi
%      AS          ZS
Ztsk=[(6.13+108.73i) (6.13+381.1i)]; %T5
%Auto transformatoru pretestības, omi
%      AS          VS          ZS
Zat=[(0.18+27.42i) (0.18) (0.18+45.7i) %AT1
      (0.18+27.42i) (0.18) (0.18+45.7i)]; %AT2
%Sistēmas pretestība, omi
Zs=2.3+23.01i;
%Sistēmas fazu EDS momenta tapr, kV
EsA=(Ub/k3)*(cos(Wn*tapr)+sin(Wn*tapr)*1i);
%Liniju tiessecības pretestības, omi
Zl1=[10.33+56.88i %L1
      10.33+56.88i %L2
      5.88+32.61i %L3
      5.88+32.61i %L4
      4.11+22.83i %L5
      4.7+26.09i]; %L6
%Liniju nullsecības pretestības, omi
Zl0=[50.58+228.73i %L1, iereķinot ML1L2
      50.58+228.73i %L2, iereķinot ML1L2
      19.15+71.70i %L3
      19.15+71.70i %L4
      13.41+50.19i %L5
      15.32+57.36i]; %L6
%Liniju tiessecības kapacitātes, F
Cl1=[1.882*10^-6 %L1
      1.882*10^-6 %L2
      1.080*10^-6 %L3
      1.080*10^-6 %L4
      0.750*10^-6 %L5
      0.860*10^-6]; %L6
%Liniju nullsecības kapacitātes, F
Cl0=[1.067*10^-6 %L1
      1.067*10^-6 %L2
      0.760*10^-6 %L3
      0.760*10^-6 %L4
      0.530*10^-6 %L5
      0.610*10^-6]; %L6
%Generatora tiessecības pretestības, omi

```

```

Zgn=7.2+523.97i;
%Generatora pretsecibas pretestiba, omi
Zg2=13.1+96.28i;
%Generatora nullsecibas pretestiba, omi
Zg0=7.2+35.37i;
%Generatora A fazes slodzes rezima EDS momenta tapr, kV
EgslA=(205.85+151.29i)*(cos(Wn*tapr)+sin(Wn*tapr)*1i);
%Slodzu pretestibas, omi
Zsl=[639.4+345.1i %SL1
      2340.9+1133.7i %SL2
      2340.9+1133.7i];%SL3
%AD ekvivalentas pretestibas pie slides 0.05r.v. (slodzes rezims), omi
Zladsl=2000.4+1102i;
Z2adsl=194.64+442.93i;
%PV+P stravas avotu vertibas slodzes rezima momenta tapr, kA
JpslA=(0.008-0.004i)*(cos(Wn*tapr)+sin(Wn*tapr)*1i);
%Garenesimetrijas vieta esosas parejas pretestibas
disp 'Fazu parejas pretestibas garenesimetrijas vieta, omi'
Zla=0
Zlb=10
Zlc=50
disp 'Papildus maza pretestiba aizvietosanas shemu realizacijai, omi'
Rpap=0.001
%Parejas pretestibu kombinaciju vertibas
disp 'Garenesimetrijas parejas pretestibu kombinacijas aprekinu
vienkarsojumiem, omi'
Zlabcl=Zla+Zlb+Zlc
Zlabcl2=Zla+a*Zlb+a2*Zlc
Zlabcl3=Zla+a2*Zlb+a*Zlc
disp 'Pirmajam solim pienemtas garenesimetrijas spriegumu krituma
simetriskas komponentes, kV'
Ula1=EsA/2
Ula2=EsA/2
Ula0=EsA/2
%TIESSECIBAS AIZVIETOSANAS SCHEMAS REZIMA PARAMETRU APREKINA IEEJAS MATRICAS
%PIRMAS INCIDENCES MATRICA
%
% 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
M1=[-1 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %1
     0 0 0 -1 0 0 -1 -1 -1 1 1 0 0 0 0 -1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %2
     0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 0 0 0 0 -1 0 1 1 0 0 -1 -1 0 0 0 0 0 0 0 0 %3
     0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 -1 0 0 -1 -1 0 0 0 %4
     0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 -1 -1 -1 %5
     0 -1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %6
     0 0 0 0 -1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %7
     0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 -1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %8
     0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 -1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %9
     0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 -1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %10
     0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 -1 -1 0 0 0 0 0 %11
     0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 %12
     0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 %13];%13
%ZARU PRETESTIBU VEKTORS, Omi
ZZ1=[Zs %I11
      Zat(1,1) %I21
      Zat(1,3)+Zsl(2) %I31
      Zat(1,2) %I41
      Zat(2,1) %I51
      Zat(2,3)+Zsl(3) %I61
      Zat(2,2) %I71
      Zl1(1) %I81
      Zl1(2) %I91
      Zl1(4) %I101
      Rpap %I111
      (2/(Wn*(C11(3))*1i)) %I121
      Zl1(3) %I131
      (2/(Wn*(C11(3))*1i)) %I141
      Rpap %I151=ILA1

```

```

(2/(Wn*(C11(1)+C11(2)+C11(4))*1i)) %I161
Zt %I171
Zt %I181
Zlads1 %I191
Zs1(1) %I201
(2/(Wn*(C11(4)+C11(5))*1i)) %I211
Zl1(5) %I221
Ztsk(1,1) %I231
Ztsk(1,2) %I241
Ztsk(1,2) %I251
(2/(Wn*(C11(5)+C11(6))*1i)) %I261
Zl1(6) %I271
Zt+Zgn %I281
Zt+Zgn %I291
(2/(Wn*(C11(1)+C11(2)+C11(6))*1i))] %I301
%ZARU FAZU EDS VEKTORS 1 SOLIM, kV
E1=[EsA %I11
0 %I21
0 %I31
0 %I41
0 %I51
0 %I61
0 %I71
0 %I81
0 %I91
0 %I101
0 %I111
0 %I121
0 %I131
0 %I141
-U1A1 %I151=ILA1
0 %I161
0 %I171
0 %I181
0 %I191
0 %I201
0 %I211
0 %I221
0 %I231
0 %I241
0 %I251
0 %I261
0 %I271
EgslA %I281
EgslA %I291
0]; %I301
%MEZGLU STRAVAS AVOTU VEKTORS, kA
I1=[0 %1
0 %2
0 %3
0 %4
0 %5
0 %6
0 %7
0 %8
0 %9
0 %10
0 %11
JpslA %12
JpslA];%13
MS1=size(M1,1); %Tiessecibas aizvietosanas shemas mezglu skaits

```



```

0      %I102
0      %I112
0      %I122
0      %I132
0      %I142
-U1A2 %I152=ILA2
0      %I162
0      %I172
0      %I182
0      %I192
0      %I202
0      %I212
0      %I222
0      %I262
0      %I272
0      %I282
0      %I292
0];   %I302
MS2=size(M2,1); %Pretsecibas aizvietosanas shemas mezglu skaits
ZS2=size(M2,2); %Pretsecibas aizvietosanas shemas zaru skaits
%Pretsecibas aizvietosanas shemas pretestibu matricas sastadisana un
vienkarsota inversija
Z2=diag(ZZ2);
M2t=M2';
Z21=zeros(ZS2,ZS2);
for i=1:ZS2
    Z21(i,i)=1/Z2(i,i);
end
Y2=M2*Z21*M2t;
%Y2 inversija
Y21=inv(Y2);
B2=-M2*Z21*E2; %I2=0
%NULLSECIBAS AIZVIETOSANAS SHEMAS REZIMA PARAMETRU APREKINA IEEJAS MATRICAS
%PIRMAS INCIDENCES MATRICA
%
% 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
M0=[-1 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %1
0 0 0 -1 0 0 -1 -1 -1 1 1 0 0 0 0 0 -1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %2
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 0 0 0 0 -1 0 1 1 -1 -1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %3
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 -1 0 0 -1 -1 0 0 0 %4
0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 -1 -1 -1 %5
0 -1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %6
0 0 0 0 -1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %7
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 -1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %8
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 -1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %9
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 -1 1 0 0 0 0 0 %10];
%ZARU PRETESTIBU VEKTORS, Omi
ZZ0=[Zs %I11
Zat(1,1) %I20
Zat(1,3) %I30
Zat(1,2) %I40
Zat(2,1) %I50
Zat(2,3) %I60
Zat(2,2) %I70
Zl0(1) %I80
Zl0(2) %I90
Zl0(4) %I100
Rpap %I110
(2/(Wn*(C10(3))*1i)) %I120
Zl0(3) %I130
(2/(Wn*(C10(3))*1i)) %I140
Rpap %I150=ILA0
(2/(Wn*(C10(1)+C10(2)+C10(4))*1i)) %I160
Zt %I170
Zt %I180

```

```

(2/(Wn*(C10(4)+C10(5))*1i))           %I210
Z10(5)                                 %I220
Ztsk(1,1)                              %I230
Ztsk(1,2)                              %I240
Ztsk(1,2)                              %I250
(2/(Wn*(C10(5)+C10(6))*1i))           %I260
Z10(6)                                 %I270
Zt                                      %I280
Zt                                      %I290
(2/(Wn*(C10(1)+C10(2)+C10(6))*1i))] %I300
%ZARU FAZU EDS VEKTORS 1 SOLIM, kV
E0=[0      %I10
0      %I20
0      %I30
0      %I40
0      %I50
0      %I60
0      %I70
0      %I80
0      %I90
0      %I100
0      %I110
0      %I120
0      %I130
0      %I140
-U1A0 %I150=ILA0
0      %I160
0      %I170
0      %I180
0      %I210
0      %I220
0      %I230
0      %I240
0      %I250
0      %I260
0      %I270
0      %I260
0      %I270
0]; %I300
MS0=size(M0,1); %Nullsecibas aizvietosanas shemas mezglu skaits
ZS0=size(M0,2); %Nullsecibas aizvietosanas shemas zaru skaits
%Nullsecibas aizvietosanas shemas pretestibu matricas sastadisana un
vienkarsota inversija
Z0=diag(ZZ0);
M0t=M0';
Z01=zeros(ZS0,ZS0);
for i=1:ZS0
    Z01(i,i)=1/Z0(i,i);
end
Y0=M0*Z01*M0t;
%Y0 inversija
Y01=inv(Y0);
B0=-M0*Z01*E0; %I0=0
%Visa aprekena kopejais precizitates kriterijs, kV
EPSkrit=0.001;
%Brivi pienemta tekosa precitates vertiba, kas lielaka par EPSkrit ieejai
%cikla, kV
EPS=10;
%Tuvinajuma solu skaits
N=1;

```

```

%Aizpildam secibu shemu mezglu spriegumu matricas ar brivi pienemtam
vertibam, kV
U1=ones (MS1,1) * (Ub/k3);
U2=ones (MS2,1) * (Ub/k3);
U0=ones (MS0,1) * (Ub/k3);
%KOPIGAIS SECIBU AIZVIETOSANAS SHEMU REZIMU PARAMETRU APREKINA CIKLS
while EPS>EPSkrit
    %Secibu aizvietosanas shemu tekosas precizitates vertibas
    EPS1=0;
    EPS2=0;
    EPS0=0;
    if N==1
        %TIESSECIBAS AIZVIETOSANAS SHEMAS REZIMA PARAMETRU APREKINA 1
        TUVINAJUMA SOLIS
        for i=1:MS1
            Un=0;
            for j=1:MS1
                Un=Un+Y11 (i,j) *B1 (j);
            end
            T=abs (U1 (i) -Un);
            if T>EPS1
                EPS1=T;
            end
            U1 (i)=Un;
        end
        %PRETSECIBAS AIZVIETOSANAS SHEMAS REZIMA PARAMETRU APREKINA 1
        TUVINAJUMA SOLIS
        for i=1:MS2
            Un=0;
            for j=1:MS2
                Un=Un+Y21 (i,j) *B2 (j);
            end
            T=abs (U2 (i) -Un);
            if T>EPS2
                EPS2=T;
            end
            U2 (i)=Un;
        end
        %NULLSECIBAS AIZVIETOSANAS SHEMAS REZIMA PARAMETRU APREKINA 1
        TUVINAJUMA SOLIS
        for i=1:MS0
            Un=0;
            for j=1:MS0
                Un=Un+Y01 (i,j) *B0 (j);
            end
            T=abs (U0 (i) -Un);
            if T>EPS0
                EPS0=T;
            end
            U0 (i)=Un;
        end
        end
        %SECIBU AIZVIETOSANAS SHEMU ZARU STRAVU APREKINI, kA
        Iz1=Z11*(E1+M1t*U1);
        Iz2=Z21*(E2+M2t*U2);
        Iz0=Z01*(E0+M0t*U0);
        %PARREKINAM GARENNESIMETRIJAS VIETAS A FAZES SPRIEGUMA KRITUMA
        SIMETRISKAS KOMPONENTES, kV
        U1A1=(Iz1 (15) *Z1abc1+Iz2 (15) *Z1abc3+Iz0 (15) *Z1abc2) /3;
        U1A2=(Iz1 (15) *Z1abc2+Iz2 (15) *Z1abc1+Iz0 (15) *Z1abc3) /3;
        U1A0=(Iz1 (15) *Z1abc3+Iz2 (15) *Z1abc2+Iz0 (15) *Z1abc1) /3;
        %ATJAUNINAM ZARU EDS VEKTORUS (U1A1,2,0 VERTIBAS TAJOS), kV
    end
end

```



```

E1(15)=-U1A1;
E2(15)=-U1A2;
E0(15)=-U1A0;
%ATJAUNINAM BRIVO MAINIGO VEKTRUS
B1=I1-M1*Z11*E1;
B2=-M2*Z21*E2; %I2=0
B0=-M0*Z01*E0; %I0=0
else %SAKOT AR 2. TUVINAJUMA SOLI PARREKINAM GARENNESIMETRIJAS
ROBEZNOSACIJUMU IENESTO EDS VERTIBAS ARI STARP ATSEVISKU SECIBU
AIZVIETOSANAS SHEMU REZIMA APREKINU TUVINAJUMU SOLIEM
%TIESSECIBAS AIZVIETOSANAS SHEMAS REZIMA PARAMETRU APREKINA 1
TUVINAJUMA SOLIS
for i=1:MS1
    Un=0;
    for j=1:MS1
        Un=Un+Y11(i,j)*B1(j);
    end
    T=abs(U1(i)-Un);
    if T>EPS1
        EPS1=T;
    end
    U1(i)=Un;
end
%TIESSECIBAS AIZVIETOSANAS SHEMAS ZARU STRAVU APREKINS, kA
Iz1=Z11*(E1+M1t*U1);
%PARREKINAM GARENNESIMETRIJAS SPRIEGUMA KRITUMU PRETSECIBAS
AIZVIETOSANAS SHEMAI (Izmatojas si sola IL1 un ieprieksejo solu IL2, IL0
vertibas), kV
U1A2=(Iz1(15)*Z1abc2+Iz2(15)*Z1abc1+Iz0(15)*Z1abc3)/3;
%ATJAUNINAM ZARU EDS VEKTORU E2 (U1A2 VERTIBU), kV
E2(15)=-U1A2;
%ATJAUNINAM BRIVO MAINIGO VEKTRU B2
B2=-M2*Z21*E2; %I2=0
%PRETSECIBAS AIZVIETOSANAS SHEMAS REZIMA PARAMETRU APREKINA 1
TUVINAJUMA SOLIS
for i=1:MS2
    Un=0;
    for j=1:MS2
        Un=Un+Y21(i,j)*B2(j);
    end
    T=abs(U2(i)-Un);
    if T>EPS2
        EPS2=T;
    end
    U2(i)=Un;
end
%PRETSECIBAS AIZVIETOSANAS SHEMAS ZARU STRAVU APREKINS, kA
Iz2=Z21*(E2+M2t*U2);
%PARREKINAM GARENNESIMETRIJAS SPRIEGUMA KRITUMU NULLSECIBAI (Izmatojas
si sola IL1,IL2 un ieprieksejo sola IL0 vertibas), kV
U1A0=(Iz1(15)*Z1abc3+Iz2(15)*Z1abc2+Iz0(15)*Z1abc1)/3;
%ATJAUNINAM ZARU EDS VEKTORU E0 (U1A0 VERTIBU), kV
E0(15)=-U1A0;
%ATJAUNINAM BRIVO MAINIGO VEKTRU B0
B0=-M0*Z01*E0; %I0=0
%NULLSECIBAS AIZVIETOSANAS SHEMAS REZIMA PARAMETRU APREKINA 1
TUVINAJUMA SOLIS
for i=1:MS0
    Un=0;
    for j=1:MS0
        Un=Un+Y01(i,j)*B0(j);

```

```

end
T=abs(U0(i)-Un);
if T>EPS0
    EPS0=T;
end
U0(i)=Un;
end
%NULLSECEBAS SHEMAS ZARU STRAVU APREKINS, kA
Iz0=Z01*(E0+M0t*U0);
%PARREKINAM GARENNESIMETRIJAS PAREJAS SPRIEGUMU KRITUMU TIESSECEBAI
(Izmatojas si sola IL1,IL2,IL0 vertibas), kV
U1A1=(Iz1(15)*Z1abc1+Iz2(15)*Z1abc3+Iz0(15)*Z1abc2)/3;
%ATJAUNINAM ZARU EDS VEKTORU E1 (U1A1 VERTIBU), kV
E1(15)=-U1A1;
%ATJAUNINAM BRIVO MAINIGO VEKTRU B1
B1=I1-M1*Z11*E1;
end
%Nosakam maksimalo starpibu mezglu spriegumiem starp tuvinajumu soliem
visam secibu aizvietosanas shemam
EPS=max([EPS1 EPS2 EPS0]);
N=N+1;
end
disp 'risinajuma iegusanai nepieciešamo tuvinajumu solu skaits'
N
disp 'A fazes tiessecibas aizvietosanas shemas mezglu spriegumi, kV'
U1
disp 'A fazes tiessecibas aizvietosanas shemas zaru stravas, kA'
Iz1
disp 'A fazes pretsecibas aizvietosanas shemas mezglu spriegumi, kV'
U2
disp 'A fazes pretsecibas aizvietosanas shemas zaru stravas, kA'
Iz2
disp 'A fazes nullsecibas shemas mezglu spriegumi, kV'
U0
disp 'A fazes nullsecibas aizvietosanas shemas zaru stravas, kA'
Iz0
disp 'A fazes nullsecibas aizvietosanas shemas zaru stravas, kA'
%DARBIBAS AR SIMETRISKAJAM KOMPONENTEM
disp 'Garnnesimetrijas A fazes sprieguma krituma simetriskas komponentes,
kV; to moduli, kV un lenki gradus'
ULs=[U1A1
      U1A2
      U1A0]
MULs=abs(ULs)
dULs=angle(ULs)*180/pi
disp 'A fazes spriegumu simetriskas komponentes QF12 RUV, kV; to moduli, kV
un lenki gradus'
UQF12s=[U1(2)
         U2(2)
         U0(2)]
MUQF12s=abs(UQF12s)
dUQF12s=angle(UQF12s)*180/pi
disp 'A fazes stravas simetriskas komponentes QF12 RUV, kA; to moduli, kA
un lenki gradus'
IQF12s=[Iz1(11)
         Iz2(11)
         Iz0(11)]
MIQF12s=abs(IQF12s)
dIQF12s=angle(IQF12s)*180/pi
disp 'A fazes spriegumu simetriskas komponentes QF13 RUV, kV; to moduli, kV
un lenki gradus'

```

```

UQF13s=[U1 (3)
        U2 (3)
        U0 (3)]
MUQF13s=abs (UQF13s)
dUQF13s=angle (UQF13s)*180/pi
disp 'A fazes stravas simetriskas komponentes QF13 RUV, kA; to moduli, kA
un lenki grados'
IQF13s=[-Iz1 (15)
        -Iz2 (15)
        -Iz0 (15)]
MIQF13s=abs (IQF13s)
dIQF13s=angle (IQF13s)*180/pi
%PAREJA NO SIMETRISKAJAM KOMPONENTEM UZ FAZU LIELUMIEM
%Funkcija SimComp2Ph dota gramatas 1.nodala
disp 'Fazu spriegumu kritumi garennesimetrijas vieta, kV; to moduli, kV un
lenki grados'
UL=SimComp2Ph (ULs, 'A')
MUL=abs (UL)
dUL=angle (UL)*180/pi
disp 'Fazu spriegumi QF12 RUV, kV; to moduli, kV un lenki grados'
UQF12=SimComp2Ph (UQF12s, 'A')
MUQF12=abs (UQF12)
dUQF12=angle (UQF12)*180/pi
disp 'Fazu stravu stiprumi QF12 RUV, kA; to moduli, kA un lenki grados'
IQF12=SimComp2Ph (IQF12s, 'A')
MIQF12=abs (IQF12)
dIQF12=angle (IQF12)*180/pi
disp 'Fazu spriegumi QF13 RUV, kV; to moduli, kV un lenki grados'
UQF13=SimComp2Ph (UQF13s, 'A')
MUQF13=abs (UQF13)
dUQF13=angle (UQF13)*180/pi
disp 'Fazu stravu stiprumi QF13 RUV, kA; to moduli, kA un lenki grados'
IQF13=SimComp2Ph (IQF13s, 'A')
MIQF13=abs (IQF13)
dIQF13=angle (IQF13)*180/pi
disp 'Fazu spriegumu kritumu vertibas noteiktas ar QF13 stravam un parejas
pretestibam parbaudei, kV'
dULA=Z1a*(-1*IQF13 (1))
dULB=Z1b*(-1*IQF13 (2))
dULC=Z1c*(-1*IQF13 (3))
disp 'AD pretsecibas un tiessecibas stravu stiprumu un spriegumu attieciba'
I21ADrv=abs (Iz2 (19))/abs (Iz1 (19))
U21ADrv=abs (U2 (10))/abs (U1 (10))
%L3 Kapacitativo stravu attiecibas ar to garenvirziena stravam
disp 'L3 tiessecibas, pretsecibas un nullsecibas kapacitativas stravas
stiprumi, kA'
Ic1=Iz1 (12)+Iz1 (14)
Ic2=Iz2 (12)+Iz2 (14)
Ic0=Iz0 (12)+Iz0 (14)
disp 'L3 tiessecibas, pretsecibas un nullsecibas kapacitativas stravas
stiprumu attieciba pret L3 garenvirziena stravas simetriskajam komponentem'
Ic1rv=abs (Ic1)/abs (IQF12s (1))
Ic2rv=abs (Ic2)/abs (IQF12s (2))
Ic0rv=abs (Ic0)/abs (IQF12s (3))
%Slodzu kopejas stravas stiprums un L3 un L4 kopejais stravas stiprums
disp 'SL1 un AD kopejas stravas tiessecibas komponentes attieciba pret L3
un L4 kopejo stravu un L5 tiessecibas komponenti'
Isl3L41rv=abs (Iz1 (19)+Iz1 (20))/abs (Iz1 (10)+Iz1 (15))
Isl1L5rv=abs (Iz1 (19)+Iz1 (20))/abs (Iz1 (22))
Toc%Beidzam uznemt aprekinu laiku

```

Pirmā vairāku vienlaicīgu nesimetriju aprēķinu piemēra topoloģiskā režīma parametru
aprēķina datorrealizācija *MATLAB*© programmas tekstā

```

tic %Sakam uzņemt apreķina laiku
clc; clear;
Ub=10.5; %Apreķina spriegums, kV
k3=sqrt(3);
%SKM Pagriezienu operatoru definesana
a=(-0.5)+(1i*k3/2);
a2=conj(a);
%Nominala sprieguma frekvence, Hz
fn=50;
%Nominala lenkiska frekvence, rad/s
Wn=2*pi*fn;
%Apreķina laika moments, s
tapr=0;
%Divtinumu transformatoru pretestības, omi
Zt=[0.38+2.57i %T1
    0.38+2.57i]; %T2
%Neitrali veidojosa transformatora pretestība, omi
Ztn=0.64+3.38i;
%Neitrala veidojosa transformatora rezistora pretestība, omi
Rz=5.77;
%Sistemas pretestība, omi
Zs=0.02+0.11i;
%Sistemas fazu EDS momenta tapr, kV
EsA=(Ub/k3)*(cos(Wn*tapr)+sin(Wn*tapr)*1i);
EsB=(EsA*a2);
EsC=(EsA*a);
%Liniju tiessecības pretestības, omi
Zl1=[0.309+0.309i %L1
    0.76+1.81i];%L2
%Liniju nullsecības pretestības, omi
Zl0=[1.338+0.51i %L1
    1.5+7.47i];%L2
%Liniju nullsecības kapacitativo vadītspeju pretestības uz visu linijas
garumu, omi
Zc11=(1/(Wn*(0.709*10^-6)*1i));
Zc12=(1/(Wn*(0.21*10^-7)*1i));
%Generatora tiessecības virsparejas pretestība, omi
Zgvp=0.07+1.75i;
%Generatora pretsecības pretestība, omi
Zg2=0.59+2.13i;
%Generatora nullsecības pretestība, omi
Zg0=0.07+0.85i;
%Generatora fazu virsparejas EDS momenta tapr, kV
EgvpA=(4.09+5.12i)*(cos(Wn*tapr)+sin(Wn*tapr)*1i);
EgvpB=(EgvpA*a2);
EgvpC=(EgvpA*a);
%AD ekvivalenta pretsecības pretestības pie slides 0.05 r.v. (slodzes
režims), omi
Z2adsl=6.84+15.58i;
%AD statora pretestība, omi
Zlad1=4.88+6.30i;
%AD fazu virsparejas EDS momenta tapr, kV
EadA=(4.24-2.96i)*(cos(Wn*tapr)+sin(Wn*tapr)*1i);
EadB=(EadA*a2);
EadC=(EadA*a);

```

```

%Slodzu pretestibas, Omi
Zs1=[155.45+66.33i
      43.66+22.37i];
disp '1. issleguma L2 parejas pretestibas, omi'
Zk1b=20
disp '1. issleguma attalums linija L2 no kopnem B2, r.v.'
alfa1=0.1
disp 'Pirmajam solim pienemtas 1. issleguma B fazes sprieguma simetriskas
komponentes, kV'
Uk1B1=EsB/2
Uk1B2=EsB/2
Uk1B0=EsB/2
disp '2. issleguma parejas pretestibas, omi'
Zk2a=0.5
Zk2b=0.5
Zk2n=0
disp '2. issleguma attalums linija L1 no kopnem B1, r.v.'
alfa2=0.7
disp 'Pirmajam solim pienemtas 2. issleguma C fazes sprieguma simetriskas
komponentes, kV'
Uk2C1=EsC/2
Uk2C2=EsC/2
Uk2C0=EsC/2
disp 'Papildu maksliga pretestiba aizvietosanas shemu realizacijai, omi'
Rpap=0.001
%PIRMAS KOMPLEKSAS AIZVIETOSANAS SHEMAS REZIMA PARAMETRU APREKINA IEEJAS
MATICAS
%PIRMAS INCIDENCES MATRICA
%
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
M1=[-1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %1
0 0 1 0 1 -1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %2
0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 -1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %3
0 0 0 0 0 0 1 1 -1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %4
0 -1 -1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %5
0 0 0 0 -1 0 0 0 -1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %6
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 1 0 0 -1 0 0 -1 1 0 1 -1 0 0 0 0 %7
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %8
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 -1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %9
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 -1 1 0 0 0 0 0 %10
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 -1 0 0 0 0 0 0 %11
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 -1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %12
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 0 0 0 -1 0 0 1 0 0 0 %13
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 1 0 -1 0 0 %14
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 -1 1 0 0 %15
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 %16
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 1 %17];
%ZARU PRETESTIBU VEKTORS, Omi
ZZ1=[Zs %I11
      alfa2*Zl1(1) %I21
      (1-alfa2)*Zl1(1) %I31
      Rpap %I41
      alfa1*Zl1(2) %I51
      Zt(1) %I61
      Zs1(1) %I71
      Zlad1 %I81
      (1-alfa1)*Zl1(2) %I91
      Zgvp %I101
      Zt(2)+Zs1(2) %I111
      Zk1b %I121
      Zs %I12
      alfa2*Zl1(1) %I22
      (1-alfa2)*Zl1(1) %I32
      Rpap %I42
      alfa1*Zl1(2) %I52
      Zt(1) %I62
      Zs1(1) %I72

```

```

Z2ads1 %I82
(1-alfa1)*Z11(2) %I92
Zg2 %I102
Zt(2)+Zs1(2) %I112
Zk1b %I122
Ztn+(3*Rz)+(alfa2*Z10(1)) %I10
((1-alfa2)*Z10(1)) %I20
Rpap %I30
alfa1*Z10(2) %I40
Zk1b]; %I50
%ZARU EDS VEKTORS 1 SOLIM, kV
E1 =[EsB %I11
0 %I21
0 %I31
-1*(a*Uk2C1) %I41
0 %I51
0 %I61
0 %I71
EadB %I81
0 %I91
EgvpB %I101
0 %I111
0 %I121
0 %I12
0 %I22
0 %I32
-1*(a2*Uk2C2) %I42
0 %I52
0 %I62
0 %I72
0 %I82
0 %I92
0 %I102
0 %I112
0 %I122
0 %I10
0 %I20
-Uk2C0 %I30
0 %I40
0]; %I50
MS1=size(M1,1);%Pirmas kompleksas aizvietosanas shemas mezglu skaits
ZS1=size(M1,2);%Pirmas kompleksas aizvietosanas shemas zaru skaits
%Pirmas kompleksas aizvietosanas shemas pretestibu matricas sastadisanu un
vienkarsota inversija
Z1=diag(ZZ1);
M1t=M1';
Z11=zeros(ZS1,ZS1);
for i=1:ZS1
    Z11(i,i)=1/Z1(i,i);
end
Y1=M1*Z11*M1t;
%Y1 inversija
Y11=inv(Y1);
B1=-M1*Z11*E1;
%OTRAS KOMPLEKSAS AIZVIETOSANAS SHEMAS REZIMA PARAMETRU APREKINA IEEJAS
MATRICAS
%PIRMAS INCIDENCES MATRICA
% 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
M2=[-1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %1
0 0 1 0 1 -1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %2
0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 -1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %3
0 0 0 0 0 1 1 -1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %4
0 -1 -1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %5

```



```

0 %I112
-1*(a*Uk1B2) %I122
0 %I10
0 %I20
0 %I30
0 %I40
-Uk1B0]; %I50
MS2=size(M2,1); %Otras kompleksas aizvietosanas shemas mezglu skaits
ZS2=size(M2,2); %Otras kompleksas aizvietosanas shemas zaru skaits
%Otras kompleksas aizvietosanas shemas pretestibu matricas sastadisana un
vienkarsota inversija
Z2=diag(ZZ2);
M2t=M2';
Z21=zeros(ZS2,ZS2);
for i=1:ZS2
    Z21(i,i)=1/Z2(i,i);
end
Y2=M2*Z21*M2t;
%Y2 inversija
Y21=inv(Y2);
B2=-M2*Z21*E2;
%Visa aprekena kopejais precizitates kriterijs, kV
EPSkrit=1e-6;
%Brivi pienemta pasreizeja precizitates vertiba, kas lielaka par EPSkrit
ieejai cikla, kV
EPS=inf;
%Tuvinajuma solu skaits
N=1;
%Aizpildam komplekso aizvietosanas shemu mezglu spriegumu vektorus ar brivi
pienemtam vertibam, kV
U1=ones(MS1,1)*(Ub/k3);
U2=ones(MS2,1)*(Ub/k3);
%KOPIGAIS KOMPLEKSO AIZVIETOSANAS SHEMU REZIMU PARAMETRU APREKINA CIKLS
while EPS>EPSkrit
    %Pasreizejas precizitates kriteriju vertibas abam kompleksajam
aizvietosanas shemam
    EPS1=0;
    EPS2=0;
    %PIRMA ISSLEGUMA KOMPLEKSAS AIZVIETOSANAS SHEMAS REZIMA PARAMETRU APREKINA
1 TUVINAJUMA SOLIS
    for i=1:MS1
        Un=0;
        for j=1:MS1
            Un=Un+Y11(i,j)*B1(j);
        end
        T=abs(U1(i)-Un);
        if T>EPS1
            EPS1=T;
        end
        U1(i)=Un;
    end
    %K1 ISSLEGUMA PUNKTA APREKINA FAZES B ISSLEGUMA SPRIEGUMA SIMETRISKO
KOMPONENSU VERTIBAS, kV
    Uk1B1=U1(6);
    Uk1B2=U1(13)-U1(7);
    Uk1B0=U1(17)-U1(14);
    %BALSTOTIES UZ JAUNAJAM K1 SPRIEGUMA SIMETRISKAJAM KOMPONENTEM, ATJAUNINAM
OTRAS AIZVIETOSANAS SHEMAS EDS VEKTORU, kV
    E2(12)=-1*(a2*Uk1B1);
    E2(24)=-1*(a*Uk1B2);
    E2(29)=-Uk1B0;

```



```

%ATJAUNINAM OTRA ISSLEGUMA AIZVIETOSANAS SHEMAI IZMANTOJAMO BRIVO MAINIGO
VEKTORU
B2=-M2*Z21*E2;
%OTRA ISSLEGUMA KOMPLEKSAS AIZVIETOSANAS SHEMAS REZIMA PARAMETRU APREKINA
1 TUVINAJUMA SOLIS
for i=1:MS2
    Un=0;
    for j=1:MS2
        Un=Un+Y21(i,j)*B2(j);
    end
    T=abs(U2(i)-Un);
    if T>EPS2
        EPS2=T;
    end
    U2(i)=Un;
end
%K2 ISSLEGUMA PUNKTA APREKINA FAZES ISSLEGUMA SPRIEGUMA SIMETRISKO
KOMPONENTSU VERTIBAS, kV
Uk2C1=U2(5);
Uk2C2=U2(11);
Uk2C0=U2(13);
%BALSTOTIES UZ JAUNAJAM K2 SPRIEGUMA SIMETRISKAJAM KOMPONENTEM,
ATJAUNINAM PIRMAS KOMPLEKSAS AIZVIETOSANAS SHEMAS EDS VEKTORU, kV
E1(4)=-1*(a*Uk2C1);
E1(16)=-1*(a2*Uk2C2);
E1(27)=-Uk2C0;
%ATJAUNINAM PIRMA ISSLEGUMA AIZVIETOSANAS SHEMAI IZMANTOJAMO BRIVO
MAINIGO VEKTORU
B1=-M1*Z11*E1;
%Nosakam maksimālo starpību starp mezglu spriegumu vertikāli saja un
iepriekšēja tuvinajuma soli abām aizvietosanas shēmām
EPS=max([EPS1 EPS2]);
N=N+1;
end
%ABU KOMPLEKSO AIZVIETOSANAS SHEMU ZARU STRAVU APREKINI, kA
Iz1=Z11*(E1+M1t*U1);
Iz2=Z21*(E2+M2t*U2);
disp 'Risinajuma iegūšanai nepieciešamo tuvinajuma soli skaits'
N
disp 'Pirmas kompleksas aizvietosanas shēmas mezglu B fāzes spriegumu
simetriskas komponentes, kV'
U1
disp 'Pirmas kompleksas aizvietosanas shēmas zaru B fāzes strāvu
simetriskas komponentes, kA'
Iz1
disp 'Otras kompleksas aizvietosanas shēmas mezglu C fāzes spriegumu
simetriskas komponentes, kV'
U2
disp 'Otras kompleksas aizvietosanas shēmas zaru C fāzes strāvu simetriskas
komponentes, kA'
Iz2
disp 'Parveidota vektora U1 versija atbilstosi otrajai aizvietosanas shēmai
salīdzinājumam, t.i., ievērojot N2 un N0 potenciālus un pārējot uz C fāzes
simetriskajam komponentem, kV'
[U1(1:6)*a2
(U1(8:13)-U1(7))*a
U1(15:17)-U1(14)]
disp 'Aptuveni QF5 aizsardzības I0 aprēķins ar ZL2 nullsecības pretestības
un kapacitatīvas vadītspējas pretestības otrajā K1 pusē noteikšanu'
disp 'Linijas L2 posma līdz QF5 nullsecības pretestība, omi'
ZL20=(1-alfa1)*Z10(2)

```

```

disp 'Linijas L2 posma lidz QF5 nullsecibas kapacitativas vaditspejas
pretestiba, omi'
ZCL20=Zcl2/(1-alfa1)
disp 'QF5 B fazes stravas nullsecibas komponentes aprekins, balstoties uz
K1 punkta nullsecibas spriegumu, kA'
IQF50=(U1(17)-U1(14))/(ZL20+ZCL20)
disp 'QF5 B fazes sprieguma nullsecibas komponente, ja pieskaita sprieguma
kritumu L2 posma nullsecibas pretestiba, kV'
UQF50=(U1(17)+IQF50*ZL20)-U1(14)
disp 'QF2 B fazes sprieguma nullsecibas komponente, noteikta ka sprieguma
kritums TN un ta rezistora, kV'
UQF20=(3*Rz+Ztn)*-Iz2(25)
%DARBIBAS AR SIMETRISKAJAM KOMONENTEM
disp 'B fazes spriegumu simetriskas komponentes QF2 aizsardzibai, kV; to
moduli, kV un lenki gradus'
UQF2s=[U1(1)
        U1(8)-U1(7)
        UQF20]
MUQF2s=abs(UQF2s)
dUQF2s=angle(UQF2s)*180/pi
disp 'B fazes stravas simetriskas komponentes QF2 aizsardzibai, kA; to
moduli, kA un lenki gradus'
IQF2s=[Iz1(2)
        Iz1(14)
        Iz1(25)]
MIQF2s=abs(IQF2s)
dIQF2s=angle(IQF2s)*180/pi
disp 'B fazes spriegumu simetriskas komponentes 1. issleguma vieta, kV; to
moduli, kV un lenki gradus'
Uk1s=[U1(6)
        U1(13)-U1(7)
        U1(17)-U1(14)]
MUk1s=abs(Uk1s)
dUk1s=angle(Uk1s)*180/pi
disp 'B fazes stravas simetriskas komponentes 1. issleguma vieta, kA; to
moduli, kA un lenki gradus'
Ik1s=[Iz1(12)
        Iz1(24)
        Iz1(29)]
MIk1s=abs(Ik1s)
dIk1s=angle(Ik1s)*180/pi
disp 'B fazes spriegumu simetriskas komponentes 2. issleguma vieta, kV; to
moduli, kV un lenki gradus'
Uk2s=[U1(5)
        U1(12)-U1(7)
        U1(15)-U1(14)]
MUk2s=abs(Uk2s)
dUk2s=angle(Uk2s)*180/pi
disp 'B fazes stravas simetriskas komponentes 2. issleguma vieta, kA; to
moduli, kA un lenki gradus'
Ik2s=[Iz1(4)
        Iz1(16)
        Iz1(27)]
MIk2s=abs(Ik2s)
dIk2s=angle(Ik2s)*180/pi
disp 'B fazes spriegumu simetriskas komponentes QF5 aizsardzibai, kV; to
moduli, kV un lenki gradus'
UQF5s=[U1(3)
        U1(10)-U1(7)
        UQF50]
MUQF5s=abs(UQF5s)

```

```

dUQF5s=angle(UQF5s)*180/pi
disp 'B fazes stravas simetriskas komponentes QF5 aizsardzibai, kA; to
moduli, kA un lenki gradus'
IQF5s=[Iz1(9)
       Iz1(21)
       0]
MIQF5s=abs(IQF5s)
dIQF5s=angle(IQF5s)*180/pi
%PAREJA NO SIMETRISKAJAM KOMPONENTEM UZ FAZU LIELUMIEM
%Funkcija SimComp2Ph dota gramatas 1.nodala
disp 'Fazu spriegumi QF2 aizsardzibai, kV; to moduli, kV un lenki gradus'
UQF2=SimComp2Ph(UQF2s, 'B')
MUQF2=abs(UQF2)
dUQF2=angle(UQF2)*180/pi
disp 'Fazu stravu stiprumi QF2 aizsardzibai, kA; to moduli, kA un lenki
gradus'
IQF2=SimComp2Ph(IQF2s, 'B')
MIQF2=abs(IQF2)
dIQF2=angle(IQF2)*180/pi
disp 'Fazu spriegumi 1. issleguma vieta, kV; to moduli, kV un lenki gradus'
Uk1=SimComp2Ph(Uk1s, 'B')
MUk1=abs(Uk1)
dUk1=angle(Uk1)*180/pi
disp 'Fazu stravu stiprumi 1. issleguma vieta, kA; to moduli, kA un lenki
gradus'
Ik1=SimComp2Ph(Ik1s, 'B')
MIk1=abs(Ik1)
dIk1=angle(Ik1)*180/pi
disp 'Fazu spriegumi 2. issleguma vieta, kV; to moduli, kV un lenki gradus'
Uk2=SimComp2Ph(Uk2s, 'B')
MUk2=abs(Uk2)
dUk2=angle(Uk2)*180/pi
disp 'Fazu stravu stiprumi 2. issleguma vieta, kA; to moduli, kA un lenki
gradus'
Ik2=SimComp2Ph(Ik2s, 'B')
MIk2=abs(Ik2)
dIk2=angle(Ik2)*180/pi
disp 'Fazu spriegumi QF5 aizsardzibai, kV; to moduli, kV un lenki gradus'
UQF5=SimComp2Ph(UQF5s, 'B')
MUQF5=abs(UQF5)
dUQF5=angle(UQF5)*180/pi
disp 'Fazu stravu stiprumi QF5 aizsardzibai, kA; to moduli, kA un lenki
gradus'
IQF5=SimComp2Ph(IQF5s, 'B')
MIQF5=abs(IQF5)
dIQF5=angle(IQF5)*180/pi
disp 'TN nullsecibas stravas stipruma modulis, kA'
MI0TN=abs(Iz1(25))
toc %Beidzam uznemt aprekinu laiku

```

Otrā vairāku vienlaicīgu nesimetriju aprēķinu piemēra topoloģiskā režīma parametru aprēķina datorrealizācija *MATLAB*© programmas tekstā

```

tic %Sakam uzņemt apreķina laiku
clc; clear;
Ub=115; %Apreķina spriegums, kV
k3=sqrt(3);
%SKM Pagriezienu operatoru definesana
a=(-0.5)+(1i*k3/2);
a2=conj(a);
%Nominala sprieguma frekvence, Hz
fn=50;
%Nominala rotācijas frekvence, rad/s
Wn=2*pi*fn;
tapr=0;
%Divtinumu transformatoru pretestības, omi
Zt=1.56+40.23i;
%Skelta ZS tinuma transformatoru pretestības, omi
%      AS          ZS
Ztsk=[(0.45+6.27i) (0.68+36.39i)]; %T2
%Sistemas pretestība, omi
Zs=1.37+10.94i;
%Sistemas A un C fazu EDS momenta tapr, kV
EsA=(Ub/k3)*(cos(Wn*tapr)+sin(Wn*tapr)*1i);
EsC=(EsA*a)*(cos(Wn*tapr)+sin(Wn*tapr)*1i);
%Liniju tiessecības pretestības (L3, L4 reducejot uz 115kV), omi
Zl1=[9.4+17.18i      %L1
     9.4+17.18i      %L2
     50.26+110.76i   %L3
     31.08+86.62i]; %L4
%Liniju nullsecības pretestības (L3, L4 reducejot uz 115kV), omi
Zl0=[15.65+42.97i   %L1
     15.65+42.97i   %L2
     99.52+511.15i  %L3
     70.42+407i];   %L4
%Liniju tiessecības kapacitātes (L3, L4 reducejot uz 115kV), F
Cl1=[3.25*10^-7     %L1
     3.25*10^-7     %L2
     3.24*10^-9     %L3
     2.57*10^-9];   %L4
%Liniju nullsecības kapacitātes (L3, L4 reducejot uz 115kV), F
Cl0=[1.84*10^-7     %L1
     1.84*10^-7     %L2
     1.27*10^-9     %L3
     1.03*10^-9];   %L4
%Liniju L1 un L2 nullsecības mijindukcijas pretestība, omi
Zm0=6.24+24.2i;
%Slodzu pretestības, omi
Zs1=[1365.5+737i
     973.5+443.5i];
%Generatora tiessecības parejas režīma pretestība, omi
Zgp=2.65+105.8i;
%Generatora pretsecības pretestība, omi
Zg2=21.16+84.64i;
%Generatora A un C fazu parejas EDS momenta tapr, kV
EgpA=(58.86+45.45i)*(cos(Wn*tapr)+sin(Wn*tapr)*1i);
EgpC=(EgpA*a)*(cos(Wn*tapr)+sin(Wn*tapr)*1i);
%Parravuma parejas pretestības

```

```

disp 'Parravuma vieta nebojato fazu parejas pretestibas, Omi'
Zla=0
Zlb=0
disp 'Papildusnieciga pretestiba aizvietosanas shemu realizacijai, omi'
Rpap=0.0001
%Issleguma parejas pretestibas
disp 'Issleguma vietas parejas pretestibas, omi'
Zka=2
Zkb=15
Zkc=0
Zkn=0
disp 'Issleguma pretestibu kombinacijas robeznosaciju ienesto EDS avotu
vertibu parrekinam, omi'
Zkabc1=Zka+Zkb+Zkc
Zkabc2=Zka+a*Zkb+a2*Zkc
Zkabc3=Zka+a2*Zkb+a*Zkc
disp 'Issleguma attalums alfa, r.v.'
alfa=0.8
disp 'Pirmajam solim brivi pienemtas issleguma papildu EDS jeb issleguma
vietas aprekinata fazes sprieguma simetrisko komponensu vertibas, kV'
UkA1=EsA/2
UkA2=EsA/2
UkA0=EsA/2
%PIRMAS INCIDENCES MATRICA
% 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
M=[-1 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %1
0 0 1 0 0 0 -1 0 -1 0 0 1 0 0 0 -1 0 -1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 -1 %2
0 0 -1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %3
0 0 0 0 0 -1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %4
0 -1 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 0 0 0 0 0 0 0 0 %5
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 -1 -1 0 0 -1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %6
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %7
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %8
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %9
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 -1 -1 0 0 -1 0 0 0 %10
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 %11
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 1 1 0 0 0 0 0 0 %12
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 1 1 0 0 0 %13
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 1 -1 0 %14
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 0 -1 0 1];%15
%ZARU PRETESTIBU VEKTORS, Omi
ZZ=[Zs %I11
Zgp+Zt %I21
Ztsk(1,1) %I31
Ztsk(1,2)+Zl1(3)+Zs1(1) %I41
Ztsk(1,2)+Zl1(4)+Zs1(2) %I51
alfa*Zl1(1) %I61
(1-alfa)*Zl1(1) %I71
Rpap %I81
Zl1(2) %I91
Zs %I12
Zg2+Zt %I22
Ztsk(1,1) %I32
Ztsk(1,2)+Zl1(3)+Zs1(1) %I42
Ztsk(1,2)+Zl1(4)+Zs1(2) %I52
alfa*Zl1(1) %I62
(1-alfa)*Zl1(1) %I72
Rpap %I82
Zl1(2) %I92
Zs %I10
Zt %I20
Ztsk(1,1) %I30
Ztsk(1,2) %I40
Ztsk(1,2) %I50
alfa*(Zl0(1)-Zm0) %I60

```

```

(1-alfa)*(Zl0(1)-Zm0)    %I70
Rpap                    %I80
(Zl0(2)-Zm0)           %I90
alfa*Zm0                %I100
(1-alfa)*Zm0];        %I110
%ZARU FAZU EDS VEKTORS 1 SOLIM, kV
E=[EsC                 %I11
  EgpC                 %I21
  0                    %I31
  0                    %I41
  0                    %I51
  0                    %I61
  0                    %I71
  -1*(a*UkA1)         %I81
  0                    %I91
  0                    %I12
  0                    %I22
  0                    %I32
  0                    %I42
  0                    %I52
  0                    %I62
  0                    %I72
  -1*(a2*UkA2)       %I82
  0                    %I92
  0                    %I10
  0                    %I20
  0                    %I30
  0                    %I40
  0                    %I50
  0                    %I60
  0                    %I70
  -UkA0               %I80
  0                    %I90
  0                    %I100
  0];                 %I110
MS=size(M,1); %Kompleksas aizvietosanas shemas mezglu skaits
ZS=size(M,2); %Kompleksas aizvietosanas shemas zaru skaits
%Kompleksas aizvietosanas shemas pretestibu matricas sastadisana un
vienkarsota inversija
Z=diag(ZZ);
Mt=M';
Z1=zeros(ZS,ZS);
for i=1:ZS
    Z1(i,i)=1/Z(i,i);
end
Y=M*Z1*Mt;
%Y inversija
Y1=inv(Y);
B=-M*Z1*E;%Brivo mainigo vektors
%Precizitates kriterijs, kV
EPSkrit=0.001;
%Brivi pienemta tekosa precitates vertiba, kas lielaka par EPSkrit ieejai
cikla, kV
EPS=10;
%Tuvinajuma sola skaits
N=1;
%Aizpildam mezglu spriegumu vektoru ar brivi pienemtam vertibam, kV
U=ones(MS,1)*(Ub/k3);
%KOMPLEKSAS AIZVIETOSANAS SHEMAS REZIMA PARAMETRU APREKINA CIKLS
while EPS>EPSkrit
    %Tekosa precizitates vertibas

```

```

EPS1=0;
%KOMPLEKSAS AIZVIETOSANAS SHEMAS REZIMA PARAMETRU APREKINA 1 TUVINAJUMA
SOLIS
for i=1:MS
    Un=0;
    for j=1:MS
        Un=Un+Y1(i,j)*B(j);
    end
    T=abs(U(i)-Un);
    if T>EPS1
        EPS1=T;
    end
    U(i)=Un;
end
%SHEMAS ZARU STRAVU APREKINS STARP TUVINAJUMU SOLIEM, kA
Iz=Z1*(E+Mt*U);
%A fazes stravas simetriskas komponentes issleguma vieta, nemot vera, ka
Iz satur C fazes stravu simetriskas komponentes, kA
IkA1=a2*Iz(8);
IkA2=a*Iz(17);
IkA0=Iz(26);
%ANALITISKI PAREKINAM ISSLEGUMA A FAZES SPRIEGUMA SIMETRISKAS
KOMPONENTES, kV
UkA1=(IkA1*Zkabc1+IkA2*Zkabc3+IkA0*Zkabc2)/3;
UkA2=(IkA1*Zkabc2+IkA2*Zkabc1+IkA0*Zkabc3)/3;
UkA0=(IkA1*Zkabc3+IkA2*Zkabc2+IkA0*(Zkabc1+9*Zkn))/3;
%ATJAUNINAM ZARU EDS VEKTORU (UkC1,2,0 VERTIBAS TAJOS), kV
E(8)=-1*(a*UkA1);
E(17)=-1*(a2*UkA2);
E(26)=-UkA0;
%ATJAUNINAM BRIVO MAINIGO VEKTRA SATURU
B=-M*Z1*E;
EPS=EPS1;
N=N+1;
end
disp 'Risinajuma iegusanai nepieciesamo tuvinajuma solu'
N
disp 'Kompleksas aizvietosanas shemas mezglu spriegumi, kV'
U
disp 'Kompleksas aizvietosanas shemas zaru stravas, kA'
Iz
%DARBIBAS AR SIMETRISKAJAM KOMPONENTEM
disp 'C fazes sprieguma simetriskas komponentes QF2 aizsardzibai, kV; to
moduli, kV un lenki gradus'
UQF2s=[U(1)
        U(7)-U(6)
        U(11)-U(10)]
MUQF2s=abs(UQF2s)
dUQF2s=angle(UQF2s)*180/pi
disp 'C fazes stravas simetriskas komponentes QF2 aizsardzibai, kA; to
moduli, kA un lenki gradus'
IQF2s=[Iz(6)
        Iz(15)
        Iz(24)]
MIQF2s=abs(IQF2s)
dIQF2s=angle(IQF2s)*180/pi
disp 'C fazes spriegumu simetriskas komponentes issleguma vieta, kV; to
moduli, kV un lenki gradus'
Uks=[U(4)
        U(9)-U(6)
        U(13)-U(10)]

```

```

MUks=abs(Uks)
dUks=angle(Uks)*180/pi
disp 'C fazes stravas simetriskas komponentes isleguma vieta, kA; to
moduli, kA un lenki grados'
Iks=[Iz(8)
      Iz(17)
      Iz(26)]
MIks=abs(Iks)
dIks=angle(Iks)*180/pi
disp 'C fazes spriegumu simetriskas komponentes QF3 aizsardzibai, kV; to
moduli, kV un lenki grados'
UQF3s=[U(2)
        U(2)-U(6)
        U(2)-U(10)]
MUQF3s=abs(UQF3s)
dUQF3s=angle(UQF3s)*180/pi
disp 'C fazes stravas simetriskas komponentes QF3 aizsardzibai, kA; to
moduli, kA un lenki grados'
%QF3 aizsardzibas merisanas virziens ir pretejs aizvietosanas shema
pienemtajiem
IQF3s=[-Iz(7)
        -Iz(16)
        -Iz(25)]
MIQF3s=abs(IQF3s)
dIQF3s=angle(IQF3s)*180/pi
disp 'C fazes sprieguma krituma simetriskas komponentes QF6 jaudas sledzi,
kV; to moduli, kV un lenki grados'
UQF6s=[U(2)-U(5)
        U(2)-U(5)
        U(2)-U(5)]
MUQF6s=abs(UQF6s)
dUQF6s=angle(UQF6s)*180/pi
disp 'QF6 jaudas sledza C fazes stravas simetriskas komponentes, kA; to
moduli, kA un lenki grados'
IQF6s=[Iz(2)
        Iz(11)
        Iz(20)]
MIQF6s=abs(IQF6s)
dIQF6s=angle(IQF6s)*180/pi
%GENERATORA SIMETRISKO KOMPONENSU NOTEIKSANAI VEL JAIEVERO T1
TRANSFORMACIJAS KOEFICIENTS UN PAGRIEZIENI
disp 'Transformacijas koeficients parejot no 110kV uz 10kV pusi'
kT=110/10
disp 'Pagriezienu koeficienti parejai no primara uz sekundaro tinumu
transformatoram ar sleguma shemu un grupu Y/D-11'
ke1=exp(1i*(30*pi/180))
ke2=exp(1i*(-30*pi/180))
disp 'C fazes spriegumu simetriskas komponentes QF7 aizsardzibai,
ieverojot kT un pagriezienus, kV; to moduli, kV un lenki grados'
UQF7s=[((U(5)+Iz(2)*Zt)*ke1)/kT
        ((U(5)+Iz(11)*Zt)-U(6))*ke2)/kT
        0]
MUQF7s=abs(UQF7s)
dUQF7s=angle(UQF7s)*180/pi
disp 'C fazes stravas simetriskas komponentes QF7 aizsardzibai, ieverojot
kT un pagriezienus, kA; to moduli, kA un lenki grados'
IQF7s=[Iz(2)*kT*ke1
        Iz(11)*kT*ke2
        0]
MIQF7s=abs(IQF7s)
dIQF7s=angle(IQF7s)*180/pi

```



```

%PAREJA NO SIMETRISKAJAM KOMPONENTEM UZ FAZU LIELUMIEM
%Funkcija SimComp2Ph dota gramatas 1.nodala
disp 'Fazu spriegumi QF2 aizsardzibai, kV; to moduli, kV un lenki gradus'
UQF2=SimComp2Ph(UQF2s, 'C')
MUQF2=abs(UQF2)
dUQF2=angle(UQF2)*180/pi
disp 'Fazu stravu stiprumi QF2 aizsardzibai, kA; to moduli, kA un lenki
gradus'
IQF2=SimComp2Ph(IQF2s, 'C')
MIQF2=abs(IQF2)
dIQF2=angle(IQF2)*180/pi
disp 'Fazu spriegumi issleguma vieta, kV; to moduli, kV un lenki gradus'
Uk=SimComp2Ph(Uks, 'C')
MUk=abs(Uk)
dUk=angle(Uk)*180/pi
disp 'Fazu stravu stiprumi issleguma vieta, kA; to moduli, kA un lenki
gradus'
Ik=SimComp2Ph(Iks, 'C')
MIk=abs(Ik)
dIk=angle(Ik)*180/pi
disp 'Fazu spriegumi QF3 aizsardzibai, kV; to moduli, kV un lenki gradus'
UQF3=SimComp2Ph(UQF3s, 'C')
MUQF3=abs(UQF3)
dUQF3=angle(UQF3)*180/pi
disp 'Fazu stravu stiprumi QF3 aizsardzibai, kA; to moduli, kA un lenki
gradus'
IQF3=SimComp2Ph(IQF3s, 'C')
MIQF3=abs(IQF3)
dIQF3=angle(IQF3)*180/pi
disp 'Fazu spriegumi QF6 aizsardzibai, kV; to moduli, kV un lenki gradus'
UQF6=SimComp2Ph(UQF6s, 'C')
MUQF6=abs(UQF6)
dUQF6=angle(UQF6)*180/pi
disp 'Fazu stravu stiprumi QF6 aizsardzibai, kA; to moduli, kA un lenki
gradus'
IQF6=SimComp2Ph(IQF6s, 'C')
MIQF6=abs(IQF6)
dIQF6=angle(IQF6)*180/pi
disp 'Fazu spriegumi QF7 aizsardzibai, kV; to moduli, kV un lenki gradus'
UQF7=SimComp2Ph(UQF7s, 'C')
MUQF7=abs(UQF7)
dUQF7=angle(UQF7)*180/pi
disp 'Fazu stravu stiprumi QF7 aizsardzibai, kA; to moduli, kA un lenki
gradus'
IQF7=SimComp2Ph(IQF7s, 'C')
MIQF7=abs(IQF7)
dIQF7=angle(IQF7)*180/pi
disp 'Generators C fazes stravas pretsecibas un tiessecibas komponentes
attieciba,%'
IG21=MIQF7s(2)*100/MIQF7s(1)
%DISTANTAIZSARDZIBAS FIKSETAS PRETESTIBAS STARPFAZU CILPAM PRIMARAJOS OMOS
disp 'QF2 Distantaizsardzibas fikseta pretestiba A-B cilpai, Omi'
ZrelAB=(UQF2(1)-UQF2(2))/((IQF2(1)-IQF2(2)))
disp 'QF2 Distantaizsardzibas fikseta pretestiba B-C cilpai, Omi'
ZrelBC=(UQF2(2)-UQF2(3))/((IQF2(2)-IQF2(3)))
disp 'QF2 Distantaizsardzibas fikseta pretestiba C-A cilpai, Omi'
ZrelCA=(UQF2(3)-UQF2(1))/((IQF2(3)-IQF2(1)))
%DISTANTAIZSARDZIBAS FIKSETAS PRETESTIBAS CILPAM FAZE-ZEME, IEVEROJOT
%PARALELAS LINIJAS NULLSECIBAS MIJINDUKTIVITATI
disp 'Bojatas linijas nullsecibas kompensacijas koeficients k0 un
nullsecibas mijinduktivitates kompensacijas koeficients km0'

```

```

k0=(Z10(1)-Z11(1))/Z11(1)
kM0=Zm0/Z11(1)
disp 'QF2 Distantaizsardzibas fikseta pretestiba A-Z cilpai, Omi'
ZrelAZ=UQF2(1)/(IQF2(1)+k0*Iz(24)+kM0*Iz(27))
disp 'QF2 Distantaizsardzibas fikseta pretestiba B-Z cilpai, Omi'
ZrelBZ=UQF2(2)/(IQF2(2)+k0*Iz(24)+kM0*Iz(27))
disp 'QF2 Distantaizsardzibas fikseta pretestiba C-Z cilpai, Omi'
ZrelCZ=UQF2(3)/(IQF2(3)+k0*Iz(24)+kM0*Iz(27))
%DISTANTAIZSARDZIBAS ZONU APTUVENAS VERTIBAS
kdr=0.9;
disp 'Distantaizsardzibas I zonas uz prieksu iestatijums primaros omos ar
Rez = 50 omi'
ZdaI=kdr*Z11(1)+50
disp 'Distantaizsardzibas II zonas uz prieksu iestatijums primaros omos ar
Rez = 50 omi'
ZdaII=kdr*(Z11(1)+kdr*Z11(2))+50
disp 'Linijas pretestiba posmam lidz issleguma vietai, omi'
ZZ(6)
toc %Beidzam uznemt aprekinu laiku

```

Skaitliskās apgrieztās Laplasa transformācijas datorrealizācijas piemērs *MATLAB*©
programmas tekstā

```

%Apgriezta Laplasa transformacija
%FNA.m areja attela funkcija F(p)
clear;
M=15; %Furje rindas locekļu skaits
Tmax=0.1; %Grafika attelotais laika posms, s
NSteps=1000;%Originala f(t) grafika punktu skaits
F0=-1423.4; %Originala f(t) vertiba momenta t = 0 s
K=1; %Sigmas proporcionalitates koeficients
dT=Tmax/NSteps; %Aprekina laika solis, s
Sk=zeros(M,1); %Furje rindas koeficientu vektors
sigma=K*pi/(2*Tmax); %sigma
b=4*sigma/pi;

%Furje rindas koeficientu noteiksana
C0=b*(FNA(sigma)-F0/sigma);
for i=1:M
    Cc1=1; %1. Kombinatorikas koeficients
    a=2*i;
    b=4*b;
    Sk(i)=b*(FNA(sigma*(2*i+1))-F0/(sigma*(2*i+1)));
    for j=1:i
        Cc2=Cc1*a/j; %2. Kombinatorikas koeficients
        if i~=j
            Sk(i)=Sk(i)-(Cc2-Cc1)*Sk(i-j);
        else
            Sk(i)=Sk(i)-(Cc2-Cc1)*C0;
        end
        a=a-1;
        Cc1=Cc2;
    end
end

%Originala f(t) iegusana ar Furje sintezi
for i=1 : NSteps+1
    t=(i-1)*dT; %f(t) laika vertiba
    V(i,1)=t; %laika vertibu saglabasana
    x=acos(exp(-sigma*t));
    y=C0*sin(x)+F0;
    for k=1:M
        y=y+Sk(k)*sin((2*k+1)*x);
    end
    V(i,2)=y; %Funkcijas f(t) originala vertibu saglabasana
end

%Grafika f(t) izveide
figure('Color',[1 1 1])
plot(V(:,1),V(:,2)),grid minor
xlabel('t, s');
ylabel('i, A');

```

Skaitliskās apgrieztās Laplasa transformācijas realizācijai izmantotās ārējās attēla funkcijas ar topoloģisko tīkla režīma parametru risinājumu vienfāzes īsslēgumam datorrealizācijas piemērs *MATLAB*© programmas tekstā

```
function y=FNA(p)
k2=sqrt(2);
%Nominala sprieguma frekvence, Hz
fn=50;
%Nominala lenkiska frekvence, rad/s
Wn=2*pi*fn;
tapr=10e-3;%Faktiskais issleguma laika moments, s
Ll=40;%Liniijas garums, km
%Sistemas pretestiba un induktivitate, omi un H
Rs=1.37;
Ls=10.94/Wn;
%Transformatora pretestiba un induktivitate, omi un H
Rt=0.085;
Lt=10.64/Wn;
%Slodzes pretestiba un induktivitate, omi un H
Rsl=267.81;
Lsl=129.7/Wn;
%Liniijas tiessecibas pretestiba un induktivitate, omi un H
Rl1=0.235*Ll;
Ll1=0.43*Ll/Wn;
%Liniijas nullsecibas pretestiba un induktivitate, omi un H
Rl0=0.391*Ll;
Ll0=1.074*Ll/Wn;
%Liniija tiessecibas Kapacitate, F
C1l=Ll*8.13e-9;
%Liniija nullsecibas Kapacitate, F
C0l=Ll*4.61e-9;
%Vienfazes issleguma parejas pretestibas, omi
Zka=10;%Bojata faze
Zkb=10^6;
Zkc=10^6;
Zkn=0;
Rpap=0.001;%Neliela papildu pretestiba aizvietosanas shemas
realizacijai
%Pirmsavarijas momentanas vertibas induktivitasu stravam un liniijas
kapacitatu spriegumiem tapr momentam, A un V
%!Sis vertibas ir vienigi tiessecibai. Pretsecibai un nullsecibai
simetriska pirmsavarijas rezima gadijuma sis vertibas ir 0!
FIs=-30.85;%Sistemas A fazes stravas lenkis (t = 0 s), gradi
is0=k2*245.52*sin(Wn*tapr+(FIs*pi/180)); %Sistemas A fazes stravas
stiprums, A
FI1=-31.58;%Liniijas A fazes stravas lenkis (t = 0 s), gradi
il0=k2*247.15*sin(Wn*tapr+(FI1*pi/180)); %Liniijas A fazes stravas
stiprums, A
FIc1=-3.94;%Pirma Liniijas Pi-posma kapacitates A fazes sprieguma
lenkis (t = 0 s), gradi
uC10=k2*63521.6*sin(Wn*tapr+(FIc1*pi/180)); %Pirma Liniijas Pi-posma
kapacitates A fazes spriegums, V
FIc2=-6.53;%Otra Liniijas Pi-posma kapacitates A fazes sprieguma
lenkis (t = 0 s), gradi
```

```

uC20=k2*59552.2*sin(Wn*tapr+(FIc2*pi/180)); %Otra Linijas Pi-posma
kapacitates A fazes spriegums, V
%Avarijas jeb issleguma uzspiestas simetrisko komponensu vertibas
induktivitasu stravam un linijas kapacitatu spriegumiem tapr momentam,
A un V
%SISTEMAS STRAVAS SIMETRISKAS KOMPONENTES
FI1Ks=-63.83; %Sistemas A fazes stravas lenkis (t = 0 s) tiessecibai
%Sistemas A fazes stravas stiprums tiessecibai, A
i1Ks0=k2*416.9*sin(Wn*tapr+(FI1Ks*pi/180));
FI2Ks=-64.23; %Sistemas A fazes stravas lenkis (t = 0 s) pretsecibai
%Sistemas A fazes stravas stiprums pretsecibai, A
i2Ks0=k2*422.2*sin(Wn*tapr+(FI2Ks*pi/180));
FI0Ks=-64.23; %Sistemas A fazes stravas lenkis (t = 0 s) nullsecibai
%Sistemas A fazes stravas stiprums nullsecibai, A
i0Ks0=k2*421.95*sin(Wn*tapr+(FI0Ks*pi/180
%LINIJAS STRAVAS SIMETRISKAS KOMPONENTES
FI1Kl=-64.03; %Linijas A fazes stravas lenkis (t = 0 s) tiessecibai
%Linijas A fazes stravas stiprums tiessecibai, A
i1Kl0=k2*418.67*sin(Wn*tapr+(FI1Kl*pi/180));
FI2Kl=-64.23; %Linijas A fazes stravas lenkis (t = 0 s) pretsecibai
%Linijas A fazes stravas stiprums pretsecibai, A
i2Kl0=k2*421.73*sin(Wn*tapr+(FI2Kl*pi/180));
FI0Kl=-64.23; %Linijas A fazes stravas lenkis (t = 0 s) nullsecibai
%Linijas A fazes stravas stiprums nullsecibai, A
i0Kl0=k2*421.69*sin(Wn*tapr+(FI0Kl*pi/180));
%LINIJAS PIRMA PI-POSMA KAPACITATES SPRIEGUMU SIMETRISKAS KOMPONENTES
FI1Kc1=-3.37; %Linijas 1.Pi-posma kapacitates A fazes sprieguma lenkis
(t = 0 s) tiessecibai
u1KC10=k2*58170*sin(Wn*tapr+(FI1Kc1*pi/180)); %Linijas 1.Pi-posma
kapacitates A fazes spriegums tiessecibai, V
FI2Kc1=-158.09; %Linijas 1.Pi-posma kapacitates A fazes sprieguma
lenkis (t = 0 s) pretsecibai
u2KC10=k2*9131.7*sin(Wn*tapr+(FI2Kc1*pi/180)); %Linijas 1.Pi-posma
kapacitates A fazes spriegums pretsecibai, V
FI0Kc1=-158.09; %Linijas 1.Pi-posma kapacitates A fazes sprieguma
lenkis (t = 0 s) nullsecibai
u0KC10=k2*9126.4*sin(Wn*tapr+(FI0Kc1*pi/180)); %Linijas 1.Pi-posma
kapacitates A fazes spriegums nullsecibai, V
%LINIJAS OTRA PI-POSMA KAPACITATES SPRIEGUMU SIMETRISKAS KOMPONENTES
FI1Kc2=-3.48;%Linijas 2. Pi-posma kapacitates A fazes spriegums lenkis
(t = 0 s) tiessecibai
u1KC20=k2*49965*sin(Wn*tapr+(FI1Kc2*pi/180)); %Linijas 2.Pi-posma
kapacitates A fazes spriegums tiessecibai, V
FI2Kc2=-169.86;%Linijas 2. Pi-posma kapacitates A fazes spriegums
lenkis (t = 0 s) pretsecibai
u2KC20=k2*16993*sin(Wn*tapr+(FI2Kc2*pi/180)); %Linijas 2.Pi-posma
kapacitates A fazes spriegums pretsecibai, V
FI0Kc2=-169.06;%Linijas 2.Pi-posma kapacitates A fazes spriegums
lenkis (t = 0 s) nullsecibai
u0KC20=k2*28160*sin(Wn*tapr+(FI0Kc2*pi/180)); %Linijas 2.Pi-posma
kapacitates A fazes spriegums nullsecibai, V
%Briva rezima induktivitasu stravu stiprumu un kapacitatu spriegumi,
A un V
%SISTEMAS BRIVAS STRAVAS STIPRUMA VERTIBAS SIMETRISKAJAM KOMPONENTEM,
A
is1BR0=is0-i1Ks0;

```

```

is2BR0=0-i2Ks0;
is0BR0=0-i0Ks0;
%LINIJAS BRIVAS STRAVAS STIPRUMA VERTIBAS SIMETRISKAJAM KOMPONENTEM,
A
il1BR0=il0-i1Kl0;
il2BR0=0-i2Kl0;
il0BR0=0-i0Kl0;
% LINIJAS PIRMA PI-POSMA KAPACITATES BRIVA SPRIEGUMA VERTIBAS
SIMETRISKAJAM KOMPONENTEM, V
u1C1BR0=uC10-u1KC10;
u2C1BR0=0-u2KC10;
u0C1BR0=0-u0KC10;
% LINIJAS OTRA PI-POSMA KAPACITATES BRIVA SPRIEGUMA VERTIBAS
SIMETRISKAJAM KOMPONENTEM, V
u1C2BR0=uC20-u1KC20;
u2C2BR0=0-u2KC20;
u0C2BR0=0-u0KC20;

%PIRMAS INCIDENCES MATRICA
% 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21
M=[-1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %1
0 -1 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %2
0 0 -1 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %3
0 0 0 -1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %4
0 0 0 0 0 0 -1 1 0 0 0 -1 -1 0 0 0 0 0 0 0 0 %5
0 0 0 0 0 0 0 -1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %6
0 0 0 0 0 0 0 0 -1 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %7
0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 %8
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 %9
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 1 0 0 0 -1 -1 0 %10
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 1 0 0 0 0 0 %11
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 1 0 1 0 0 %12
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 1 0 1 0 %13
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 0 0 1];%14

%ZARU PRETESTIBU LAPLASA TELPA VEKTORS
ZZ=[Rs+Rt+(Ls+Lt) *p %I11
Rpap %I21
Rl1+Ll1*p %I31
Rpap %I41
1/(p*(C11/2)) %I51
1/(p*(C11/2)) %I61
Zka %I71
Rs+Rt+(Ls+Lt) *p %I12
Rpap %I22
Rl1+Ll1*p %I32
Rpap %I42
1/(p*(C11/2)) %I52
1/(p*(C11/2)) %I62
Zka %I72
Rs+Rt+(Ls+Lt) *p %I10
Rpap %I20
Rl0+Ll0*p %I30
Rpap %I40
1/(p*(C01/2)) %I50
1/(p*(C01/2)) %I60
Zka+3*Zkn]; %I70

```

```
%ZARU EDS LAPLASA TELPA VEKTORS
```

```
E =[is1BR0*(Ls+Lt) %I11
    0 %I21
    il1BR0*Ll1 %I31
    0 %I41
    -u1C1BR0/p %I51
    -u1C2BR0/p %I61
    0 %I71=IK1
    is2BR0*(Ls+Lt) %I12
    0 %I22
    il2BR0*Ll1 %I32
    0 %I42
    -u2C1BR0/p %I52
    -u2C2BR0/p %I62
    0 %I72=IK2
    is0BR0*(Ls+Lt) %I10
    0 %I20
    il0BR0*Ll0 %I30
    0 %I40
    -u0C1BR0/p %I50
    -u0C2BR0/p %I60
    0]; %I70=IK0
```

```
MS=size(M,1); %Shemas mezglu skaits
```

```
ZS=size(M,2); %Shemas zaru skaits
```

```
%Shemas pretestibu matricas sastadisana un vienkarsota inversija
```

```
Z=diag(ZZ);
```

```
Mt=M';
```

```
for i=1:ZS
```

```
    Z1(i,i)=1/Z(i,i);
```

```
end;
```

```
Y=M*Z1*Mt; %Shemas vadispeju matrica Y
```

```
B=-M*Z1*E; %Shemas rezima parametru aprekinu brivo mainigo vektors
```

```
U=Y\B; %Iebuveta LVS risinasanas funkcija precizitates paaugstinasanai
```

```
Iz=(Z1*(E+Mt*U));
```

```
%Funkcijas izejas lielums: A fazes stravas stipruma signala briva komponente
```

```
y=Iz(3)+Iz(10)+Iz(17);
```

```
end
```

INFORMĀCIJAS AVOTI

1. Fortescue, C. Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks. In: *Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 37, No. 6, Jun. 1918, pp. 629–716. ISSN: 0097-2444. Available from: DOI: 10.1109/PAIEE.1918.6594104.
2. Papkovs, V. un Zicmane, I. *Elektromagnētiskie pārejas procesi elektriskās sistēmās*. Rīga: RTU Izdevniecība, 2007. 306 lpp. ISBN: 978-9984-32-3.
3. Atabekov, G. I. *The Relay protection of High Voltage Networks*. London: Pergamon Press, 1960. 576 p. ISBN: 978-0080138169.
4. Лосев, С. Б. и Чернин, А. Б. *Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем*. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 528 с.
5. Авербух, А. *Примеры расчетов неполнофазных режимов и коротких замыканий*. 2 изд. Ленинград: Энергия, 1979. 184 с.
6. Чернин, А. Б., Лосев, С. Б., Офицерова, И. И. *Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110–750 кВ*. Москва: Энергия, 1979, 152 с.
7. Izykowski, J. *Power system faults*. Wroclaw: Wroclaw Technical university press, 2011. 190 p. ISBN: 978-83-62098-80-4.
8. Wagner, C. F. and Evans, R. D. *Symmetrical components as applied to the analysis of unbalanced electrical circuits*. 1st ed. New York: McGraw-Hill, 437 p., 1933.
9. Clarke, E. *Circuit analysis of A-C power systems*. New York: Wiley, 1943. 936 p.
10. Вольдек, А. *Электрические машины*. 3 изд. Ленинград: Энергия, 1978. 832 с.
11. Бронштейн, И. Н. и Семендяев, К. А. *Справочник по математике. Для инженеров и учащихся втузов*. 12 изд. Москва: Наука, 1980. 976 с.
12. Анго, А. *Математика для электро- и радиоинженеров*. Москва: Наука, 1964. 772 с.
13. Alekseev, V., Petrov, V., and Naumov, V. Invariance of modal transformations of electrical values in travelling wave fault locator. In: *Proceedings 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, Sochi, Russia, 18–22 May 2020. Piscataway: IEEE, 2020, pp. 1–5, ISBN: 978-1-7281-4591-4. Available from: DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111912.
14. Ульянов, С. А. *Электромагнитные переходные процессы в электрических системах*. Москва: Энергия, 1970. 520 с.
15. Блок, В. М., Обушев, Г. К., Паперно Л. Б. и др. *Пособие к курсовому и дипломному проектированию для электроэнергетических специальностей вузов*, Москва: Высшая школа, 1990. 383 с. ISBN: 5-06-000726-X.
16. Blackburn, J. L. and Domin, J. T. *Protective Relaying Principles and Applications*. 3rd ed., New York: CRC Press, 2006. 628 p. ISBN: 978-1-57444-716-3.
17. Готман, В. *Короткие замыкания и несимметричные режимы в электроэнергетических системах*. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2011. 240 с. ISBN: 978-5-98298-848-5.

18. Vanags, A. *Elektriskie tīkli un sistēmas*. 2. izd. 1. daļa. Rīga: RTU Izdevniecība, 2002. 479 lpp. ISBN: 9984-32-162-2.
19. Kothari, D. P. and Nagrath, I. J. *Modern Power System Analysis*. 3rd. ed. New Delhi: Tata McGraw Hill Education Private Limited, 2009. 694 p. ISBN: 978-0-07-049489-3.
20. Мельников, Н. А. *Электрические сети и системы*. Москва: Энергия, 1969. 456 с.
21. Milton, O. *Engineering materials science*. vol. 3. Academic Press, 1995. 827 p. ISBN: 9780125249959.
22. Serway, R. A. *Principles of Physics*. 2nd ed. London: Saunders College Pub., 1998. 602 p. ISBN: 0-03-020457-7.
23. Carson, J. Wave propagation in overhead wires with ground return. *Bell systems technical journal*, vol. 5, No. 4, Oct. 1926, pp. 539–554. ISSN: 0005-8580. Available from: DOI: 10.1002/j.1538-7305.1926.tb00122.x.
24. Galloway, R. H., Shorrocks, W. B., and Wedepohl, L. M. Calculation of electrical parameters for short and long polyphase transmission lines. *Proceedings IEE*, vol. 111, No. 12, pp. 2051–2059, Dec. 1964. ISSN: 2053-7891. Available from: 10.1049/piee.1964.0331.
25. Щедрин, Н. *Токи короткого замыкания высоковольтных систем*. Ленинград: ОНТИ НКТП СССР, 1935. 456 с.
26. National Electric Association and Bell Telephone System joint subcommittee on development and Research. Engineering report No. 14. Coupling factors for ground-return circuits – general considerations and methods of calculations. *EEI*, vol. 2, Apr. 1932. pp.121–185.
27. Siemens. *Applications for SIMPROTEC Protection Relays*. Nuernberg: Siemens Power Transmission and Distribution Energy Automation Division, 2005. 228 p. Available from: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjUpfDVqeTtAhVqposKHaAkCWIQFjAAegQIAxAC&url=https%3A%2F%2Fwww.downloads.siemens.com%2Fdownload-center%2Fdownload%3FDLA06_4063&usg=AOvVaw2SNGuM5Z7S0haDG4mLTc-h.
28. *Gaisvadu elektropārvades līnijas (GL) ar spriegumu 110–330 kV*. LEK 135 1. izd. 2011, 67 lpp. Pieejams: <https://latvenergo.lv/storage/app/uploads/public/5db/5b8/9c3/5db5b89c3297c008420598.pdf>.
29. Engēlis, A. un Arājs, R. *Augstspriegumu elektriskās līnijas*. Rīga, 2004. 240. lpp.
30. *0,4 kV gaisvadu elektrolīnijas galvenās tehniskās prasības*. LEK014 3. izd. Jūnijs 2017, 23 lpp. Pieejams: <https://latvenergo.lv/storage/app/uploads/public/5ee/b5a/9c9/5eeb5a9c9d14e530296450.pdf>.
31. *Vidsprieguma /6, 10, 20 kV/ gaisvadu elektrolīnijas galvenās tehniskās prasības*. LEK015 3. izd. Janvāris 2016, 42 lpp. Pieejams: <https://latvenergo.lv/storage/app/uploads/public/5db/5b6/530/5db5b653087ed227551484.pdf>.
32. *Правила устройства электроустановок. ПУЭ 7 6 и 7 изд.* (все действующие разделы). Январь 2003, 500 с. Доступно: <https://www.elec.ru/library/direction/pue.html>.
33. Zālītis, I. *Application of estimation of model parameters for protective automation of transmission lines*. Doctoral Thesis. Riga: RTU Press, 2020. 179 p.

34. Izykowski, J. *Fault location on power transmission lines*. Wrocław: Printing House of Wrocław University of Technology, 2008. 221 p. ISBN: 978-83-7493-430-5.
35. *Descriptions of XPLE cable produced by Huadong Cable Group company* [online]. [viewed 18 January 2021]. Available from: <http://huadongswacable.com/xlpe-power-cable-selection-maintenance/>.
36. Riba, J. R. Calculation of the ac to dc resistance ratio of conductive nonmagnetic straight conductors by applying FEM simulations. *European Journal of Physics*, vol. 36, No. 36, Jul. 2015, pp. 1–8. ISSN 1430807. Available from: DOI: 10.1088/0143-0807/36/5/055019.
37. Белоруссов, Н. *Электрические кабели и провода*. Москва: Энергия, 1971. 512 с.
38. Цейтлин, Л. *Индуктивности проводов и контуров*. Москва: ГЭИ, 1950. 227 с.
39. Калантаров, П. Л. и Цейтлин, Л. А. *Расчет индуктивностей*. 3 изд. Ленинград: Энергоатомиздат, 1986. 488 с.
40. Simons, D. M. Calculation of the electrical problems of transmission by underground cables. *Electrical Journal*, vol. 22, No. 8, Aug. 1925, pp. 366–384.
41. Carson, J. Ground return impedance: underground wire. with earth return. *The Bell System Technical Journal*, vol. 8, No. 1, Jan. 1929, pp. 94–98. ISSN: 0005-8580. Available from: DOI: 10.1002/j.1538-7305.1929.tb02307.x.
42. ABB high voltage cable unit. *XPLE land cable systems user's guide*. 5th ed. ABB, 2010. 28 p. Available from: [https://library.e.abb.com/public/ab02245fb5b5ec41c12575c4004a76d0/XLPE Land Cable Systems 2GM5007GB rev 5.pdf](https://library.e.abb.com/public/ab02245fb5b5ec41c12575c4004a76d0/XLPE%20Land%20Cable%20Systems%20GM5007GB%20rev%205.pdf).
43. Miller, M. L. *Structure of polymers*. New York: Reinhold, 1966. 704 p. ISBN: 978-0278915923.
44. *Low voltage armoured cables sold by "Indiamart" company* [online]. [viewed 29 November 2018]. Available from: <https://dir.indiamart.com/jaipur/armoured-cables.html>.
45. Герасимов, В. Г., Грудинский, П. Г., Жуков, Л. А. и др. *Электротехнический справочник*. 6 изд. 2 том. Москва: Энергоиздат, 1981. 640 с.
46. Timmermanis, K. un Rozenkrons, J. *Elektrisko staciju un apakšstaciju elektriskā daļa*. Rīga: Zvaigzne, 1988. 510 lpp. ISBN: 5-405-00195-3.
47. Небрат, И. Л. *Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты*. 1 часть, 4 изд. Санкт-Петербург: ПЭИПК, 2003, 26 с. Доступно: <https://www.elec.ru/viewer?url=files/2014/01/27/Raschety-tokov-korotkogo-zamykanija-dlja-relejnoj.pdf>.
48. *Vidsprieguma tīkla neitrāles darba režīmi*. LEK 136, 1. izd. Aprīlis 2013, 38 lpp. Pieejams: <https://latvenergo.lv/storage/app/uploads/public/5db/5b4/ba5/5db5b4ba55167379779473.pdf>.
49. Stockin, D. R. *McGraw-Hill's NEC 2014 Grounding and Earthing Handbook*. 1. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014. 496 p. ISBN: 978-0071800655.
50. Zālītis, I. *Transformatoru diferenciālās aizsardzības jutības palielināšana starpvijumu īsslēgumiem*. Maģistra darbs. Rīga: RTU, 2016. 109 lpp.
51. Dolgicers, A. and Kozadajevs, J. Experience of transformer's inrush current modeling for the purposes of relay protection. In: *Proceedings 2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, Riga, Latvia, 11–13

- May 2015. Piscataway: IEEE, 2015, pp. 153–156, ISBN: 978-1-4673-7203-9. Available from: DOI: 10.1109/PowerEng.2015.7266310.
52. Dolgicers, A. and Kozadajevs, J. Criteria for inter-winding fault detection within power transformers. In: *Proceedings 2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Riga, Latvia, 14 Oct. 2015. Piscataway: IEEE, 2015, pp. 59–62, ISBN: 978-1-5090-0334-1. Available from: DOI: 10.1109/RTUCON.2015.7343151.
 53. Kozadajevs, J. *Jaudas transformatoru aizsardzība no starpvijumu bojājumiem*. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība, 2016. 134 lpp.
 54. Cardoso, L. M. R. and Oliveira, A. J. M. Leakage inductances calculation for power transformers interturn fault studies. *IEEE transactions on power delivery*, vol. 30, No. 3, Jun. 2015, pp. 1213–1220. ISSN: 0885-8977. Available from: DOI: 10.1109/TPWRD.2014.2371877.
 55. Лейтес Л. В. и Пинцов А. М. *Схемы замещения многообмоточных трансформаторов*. Москва: Энергия, 1974. 192 с.
 56. Butler, H. and Wang, K. L. Finite element analysis of internal winding faults in distribution transformers. *IEEE transactions on power delivery*, vol. 16, No. 3, Jul. 2001, pp. 422–428. ISSN: 0885-8977. Available from: DOI: 10.1109/61.924821.
 57. Веников, В. *Переходные электромеханические процессы в электрических системах*, 4 изд. Москва: Высшая школа, 1985. 536 с.
 58. Федосеев, А. М. и Федосеев, М. А. *Релейная защита электроэнергетических систем*. 2 изд. Москва: Энергоатомиздат, 1992, 528 с. ISBN: 5-283-01171-2.
 59. MATLAB, *Description of modelling and simulation software Simscape Electrical™* (formerly SimPowerSystems™) [online]. [viewed 2 December 2018]. Available from: <https://www.mathworks.com/products/simpower.html>.
 60. Operation Technology Inc. *ETAP 5.5 User Guide*. Operation Technology Inc., 2006. 3386 p. Available from: http://ei.eef.rtu.lv/doc/studiju_materiali/026.pdf.
 61. Zicmane, I. *Elektromehāniskie pārejas procesi elektriskajās sistēmās*. Rīga: RTU Izdevniecība, 2012. 402 lpp. ISBN: 9789934103094.
 62. Шабад, В. *Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах*. Москва: Издательский центр “Академия”, 2013. 192 с. ISBN: 978-5-7695-9822-7.
 63. Sauhats, A., Utans, A., Antonovs, D., and Svalovs A. Angle control-based multi-terminal out-of-step protection system. *MDPI Energies*, vol. 10, No. 3, Mar. 2017, pp. 1–16. ISSN: 1996-1073. Available from: <https://doi.org/10.3390/en10030308>.
 64. Rubcovs, S. and Strelkovs, V. Analysis of the results of the full-scale experiment in the Latvian power system for the creation and automatic prevention of artificial asynchronous regime. In: *Proceedings 2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Riga, Latvia, 12–13 Oct. 2017. Piscataway: IEEE, 2017, pp. 1–6, ISBN: 978-1-5386-3847-7. Available from: DOI: 10.1109/RTUCON.2017.8124814.
 65. Ketners, K. un Dirba, J. *Elektriskās mašīnas*. Rīga: RTU izdevniecība, 2007. 517 lpp. ISBN: 978-9984-32-457-9.

66. Bērziņa, K. *Trolejbusa asinhronā vilces dzinēja izstrāde*. Inženierprojekts. Rīga: RTU, 2016. 68 lpp.
67. Ковач, К. П. и Рац, И. *Переходные процессы в машинах переменного тока*. Москва: Госэнергоиздат, 1963. 744 с.
68. Кравчик, А. Э., Шлаф, М. М., Афонин, В. И. и Собленская, Е. А. *Асинхронные двигатели серии: 4А Справочник/А90*. Москва: Энергоиздат, 1982. 504 с.
69. Bordry, F. *Power converters: definitions, classification and converter topologies*. Geneva: CERN, 2006. 29 p. Available from: <https://cds.cern.ch/record/987498/files/p13.pdf>.
70. Stetz, T. *Autonomous Voltage Control Strategies in Distribution Grids with Photovoltaic Systems*. Dr.-Ing. Dissertation. Kassel: University of Kassel, 2013. 203 p.
71. Anderson, P. M. *Power System protection*. Piscataway: Wiley-IEEE Press, 1998. 1330 p. ISBN: 0-7803-3427-2.
72. RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE. *Vidsprieguma tīklu ar izkliedētas ģenerācijas avotiem elektropārvades līniju aizsardzības paņēmieni zemesslēgumu gadījumos*. Aleksandrs Dolgicers, Ivars Zālītis, Jevgeņijs Kozadajevs (izgudrotāji). Int. Cl.:H02H3/16. Iesniegšanas datējums 15-12-2017. Patenti un Preču Zīmes. LV 15317. 20.05.2018. Pieejams: https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?FT=D&date=20180520&DB=&locale=en_EP&CC=LV&NR=15317B&KC=B&ND=4#.
73. Поливанов, К. *Теоретические основы электротехники часть первая*. Москва-Ленинград: Энергия, 1965. 360 с.
74. Dolgicers, A. and Kozadajevs, J. Phase plane usage for convergence analysis of Seidel method applied for network analysis. In: *Proceedings 2014 IEEE 2nd Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering*, Vilnius, Lithuania, 28–29 November 2014. Piscataway: IEEE, 2015, pp. 1–6, ISBN: 978-1-4799-7122-0. Available from: DOI: 10.1109/AIEEE.2014.7020321.
75. Chapra, S. C. and Canale, R. P. *Numerical methods for engineers*. 6th ed. London: McGraw-Hill Higher Education, 2010. p. 960. ISBN: 978-0-07-340106-5.
76. Zālītis, I., Dolgicers, A., and Kozadajevs J. A distance protection based on the estimation of system model parameters. In: *Proceedings 2017 IEEE Manchester PowerTech*, Manchester, UK, 18–22 June 2017. Piscataway: IEEE, 2017, pp. 1–6, ISBN: 978-1-5090-4238-8. Available from: DOI: 10.1109/PTC.2017.7981277
77. Zālītis, I., Dolgicers, A., and Kozadajevs J. Influence Analysis of Mutual Coupling Effects between a High-Voltage Transmission Line and a Fiber-optic Cable with a Conductive Support Element. In: *2018 IEEE 6th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE'2018)*, Vilnius, Lithuania, 8–10 November 2018. Piscataway: IEEE, 2018, pp. 1–7, ISBN: 978-1-7281-2000-3. Available from: DOI: 10.1109/AIEEE.2018.8592447.
78. Zālītis, I., Dolgicers, A., and Kozadajevs J. An adaptive single-pole automatic reclosing method for uncompensated high-voltage transmission lines. *Electric Power Systems Research*, vol. 166, pp. 210–222, Jan. 2019. ISSN: 0378-7796. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.10.012>.
79. Zālītis, I., Dolgicers, A., and Kozadajevs J. Experimental testing of distance protection performance in transient fault path resistance environment. In: *Proceedings 2017 5th IEEE Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering*, Riga,

- Latvia, 24–25 November 2017. Piscataway: IEEE, 2018, pp. 1–6, ISBN: 978-1-5386-4138-5. Available from: DOI: 10.1109/AIEEE.2017.8270526.
80. Zemite, L., Utans, A., Dolgicers, A., and Zalitis, I. Adaption of extended virtual-real laboratory for education in electrical engineering. In: *Proceedings 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe) conf.*, Palermo, Italy, 12–15 June 2018. Piscataway: IEEE, 2018, pp. 1–4, ISBN: 978-1-5386-5187-2. Available from: DOI: 10.1109/EEEIC.2018.8494561.
 81. Долгицер, А., Антонов, Д., Козадаев, Е., Биела-Даилидовича, Э. Учебные пособия в лаборатории релейной защиты. *Электротехнические комплексы и системы*. 2015, № 4, т. 11, с. 5–12. ISSN: 1999-5458. Доступно: <https://cyberleninka.ru/article/n/uchebnye-posobiya-v-laboratorii-releynoy-zaschity>.
 82. Атабеков, Г. *Основы теории ценей*. Москва: Энергия, 1969. 424 с.
 83. Zalitis, I., Dolgicers, A., and Kozadajevs J. A power transmission line fault locator based on the estimation of system model parameters. In: *Proceedings 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering*, Milan, Italy, 6–9 June 2017. Piscataway: IEEE, 2017, pp. 1–6, ISBN: 978-1-5386-3918-4. Available from: DOI: 10.1109/EEEIC.2017.7977459.
 84. RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE. *Augstsprieguma elektropārvades līniju vienfāzes īsslēgumu atrašanās vietas noteikšanas paņēmieni*. Aleksandrs Dolgicers, Ivars Zālītis, Jevgeņijs Kozadajevs (izgudrotāji). Int. Cl.:H02H7/26. Iesniegšanas datējums 23-12-2016. Patenti un Preču Zīmes. LV 15207. 20.05.2017. Pieejams: https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?FT=D&date=20170520&DB=&locale=en_EP&CC=LV&NR=15207B&KC=B&ND=4#.
 85. Sauhats, A., Kovalenko S., and Zicmane, I. Power system equivalent circuit for controlled load analysis. In: *Proceedings 2017 5th IEEE Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE 2017) conf.*, Riga, Latvia, 24–25 Nov. 2017. Piscataway: IEEE, 2018, pp. 170–174, ISBN: 978-1-5386-4138-5. Available from: DOI: 10.1109/AIEEE.2017.8270529.
 86. Dolgicers, A., Zalitis, I., and Kozadajevs, J. The Modified Seidel Method as a Tool for the Evaluation of the Stability of a Power System. In: *2016 IEEE 4th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE'2016)*, Vilnius, Lithuania, 10–12 November 2016. Piscataway: IEEE, 2017, pp. 27–33, ISBN: 978-1-5090-4474-0. Available from: DOI: 10.1109/AIEEE.2016.7821806.
 87. Gajic, Z. *Differential Protection for arbitrary Three-Phase Power Transformers*. Doctoral Dissertation. Lund: Lund University, 2008. 212 p. ISBN: 978-91-88934-47-5.
 88. Johns, A. T., Aggarwal, R. K., and Song, Y. H. Improved techniques for modelling fault arcs on faulted EHV transmission systems. *IEE Proceedings C-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 141, No. 2, pp. 148–154, Mar. 1994. ISSN: 1350-2360. Available from: DOI: 10.1049/ip-gtd:19949869.
 89. Dolgicers, A. and Zalitis, I. Numerical calculation method for symmetrical component analysis of multiple simultaneous asymmetrical faults. In: *Proceedings 2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University*, Riga, Latvia, 12–13 October 2017. Piscataway: IEEE, 2017, pp. 1–7, ISBN: 978-1-5386-3847-7. Available from: DOI: 10.1109/RTUCON.2017.8124748.

90. Ziegler, G. *Numerical Distance Protection Principles and Applications*. 4th ed. Erlagen: Publicis, 2011. 419 p. ISBN: 978-3-89578-381-4.
91. Elmore, W. A. *Protective relaying theory and applications*. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 2004. 432 p. ISBN:0-8247-0972-1.
92. Чернин, А. Б. и Лосев, С. Б. *Основы вычислений электрических величин для релейной защиты при сложных повреждениях в электрических системах*. Москва: Энергия, 1971. 440 с.
93. Чернин, А. *Вычисление электрических величин и поведение релейной защиты при неполнофазных режимах в электрических системах*. Москва: Госэнергоиздат, 1963. 416 с.
94. Конторевич, И. *Операционное исчисление и процессы в электрических цепях*. 4 изд. Москва: Советское радио, 1975. 320 с.
95. Зиновьев, А. Л. и Филиппов, Л. И. *Введение в теорию сигналов и цепей*. Москва: Высшая школа, 1975. 264 с.
96. Демирчян, Л. Р. и Нейман, К. С. *Теоретические основы электротехники*, 3 изд. 1 том. Ленинград: Энергоиздат, 1981, 536 с.
97. Крылов, В. И. и Скобля, Н. С. *Методы приближенного преобразования Фурье и обращения преобразования Лапласа*. Москва: Наука, 1974. 224 с.
98. Калабеков, Б. А., Лapidус, В. Ю. и Малафеев, В. М. *Методы автоматизированного расчета электронных схем в технике связи*. Москва: Радио и связь, 1990. 272 с. ISBN: 5-256-00674-6.
99. Романовский, П. *Ряды Фурье. Теория поля. Аналитические и специальные функции. Преобразование Лапласа*. 5 изд. Москва: Наука, 1973. 336 с.
100. McKeague, C. P. *Elementary Algebra*. 9th ed. Brooks/Cole, 2011. 576 p. ISBN: 978-0-8400-6421-9.
101. Березин, И. С., Жидков, Н. П. *Методы вычислений*. 1 том. Москва: Наука, 1966, 632 с.
102. Franks, L. E. *Signal Theory*. N. J.: Prentice-hall, 1969. p. 317. ISBN: 978-0138100773.
103. Гоноровский, И. С. *Радиотехнические цепи и сигналы*. Москва: Радио и связь, 4 изд. 1986, 512 с.
104. Karris, S. T. *Signals and systems with MATLAB® Applications*. 2. ed. Fremont: Orchard Publications, 2003. p. 598. ISBN: 0-9709511-8-3.
105. Lee, E. A. and Varaiya, P. *Structure and interpretation of signals and systems*. Addison-Wesley, 2002. 700 p. ISBN: 978-0201745511.
106. Beķeris, E. *Signālu teorijas pamati*. Rīga: RTU Izdevniecība, 2010. 229 lpp. ISBN: 978-9934-10-087-1.
107. Leader Cable Industry Berhad. *XPLE insulated power cable*. Kedah: Leader Cable. 62 p. Available from: <http://www.teddeum.com.sg/wp-content/uploads/2016/12/Leader-xlpe.pdf>.
108. *Cable manufacturer "REKA Cables" webpage with descriptions of available power cables* [Online]. [viewed 8 December 2018]. Available from: <https://www.rekacables.com/>.
109. Draka Prysmian group. *Product catalogue Power cables*, Keila: Draka Keila Cables AS, 2017. 54 p. Available from: https://baltics.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/Prysmian-Group-Baltics_Catalogue_PowerCables_EN.pdf.

110. *Описание кабеля типа АСБл–10* [в сети]. Компания "МК УралСталь Омск". [Просмотрено 2021 г. 15 января]. Доступно: https://www.mkuralsteel-omsk.ru/goods/102725888-kabel_asbl_1_4kh150.
111. *Описание кабеля ААБ2Л–10* [в сети]. Компания "Квант кабеь". [Просмотрено 2021 г. 15 января]. Доступно: <https://kvant-cable.ru/cable/aab2l-3x120-1>.
112. *Описание кабеля ОСБ–20* [в сети]. Компания "Быстрокабель". [Просмотрено 2021 г. 15 января]. Доступно: <https://bystrokabel.ru/item/osb-20kv>.
113. *Energoietaišu tehniskā ekspluatācija*. LEK002 4. izd. Oktobris 2020, 168 lpp. Pieejams: <https://latvenergo.lv/storage/app/uploads/public/5fc0f9f56/5fc0f9f569374439652666.pdf>
114. *0,4 kV uzskaites sadaļņu zemēšanas principi un noteikumi. Galvenās tehniskās prasības*. LEK069 1. izd. Novembris 2005, 29 lpp. Pieejams: http://www.lekenergo.lv/sites/default/files/lek_069_1.pdf.
115. *Vispārējās prasības elektroietaišu ar spriegumu līdz 330 kV ierīkošanai. Vispārējā daļa*. LEK081 1. izd. Jūnijs 2005, 16 lpp. Pieejams: <https://latvenergo.lv/storage/app/uploads/public/5db5b4/24b/5db5b424bf356614265486.pdf>.
116. *Vidsprieguma tīkla neitrāles darba režīmi (izolēta, kompensēta un mazrezistīvi zemēta neitrāle)*. LEK136 1. izd. Aprīlis 2013, 38 lpp. Pieejams: <https://latvenergo.lv/storage/app/uploads/public/5db5b4/ba5/5db5b4ba55167379779473.pdf>.
117. Budahs, M., Zviedrītis, M. *Elektrisko sadales tīklu elektroietaišu ekspluatācija*. Rīga: RVT, 2012. 107 lpp. ISBN: 978-9934-8332-2-9. Pieejams: https://www.rvt.lv/GRAMATAS/Energjetikju_gramatas/16.2ISBNgramata.pdf.
118. Timmermanis, K. un Uškāns, A. *Elektroenerģētikas pamatterminu skaidrojošā vārdnīca*. Rīga: LEEA un Latvenergo, 626 lpp. Pieejams: https://www.rtu.lv/writable/public_files/RTU_1_vardnica.pdf.
119. Mari, L. *Electrical grounding using the high-resistance (HRG) method* [online]. EEPower, 2020 [viewed 16 May 2021]. Available from: <https://eepower.com/technical-articles/electrical-grounding-using-the-high-resistance-hrg-method/#>.
120. *Electrical safety for high resistance grounding systems* [online]. Bender [viewed 18 May 2021]. Available from: <https://www.bender-ca.com/know-how/technology/high-resistance-grounded-system-hrg>.
121. Mari, L. *Electrical grounding using effective, solid, and low-impedance methods* [online]. EEPower, 2020 [viewed 16 May 2021]. Available from: <https://eepower.com/technical-articles/electrical-grounding-using-effective-solid-and-low-impedance-methods/>.
122. Lacroix, B. and Calvas, R. *Earthing systems worldwide and evolutions. Cahier technique Merlin Gerin n°173* [online]. Lyon: Clerc, p. 23 [viewed 19 May 2021]. Available from: https://www.studiecd.dk/cahiers_techniques/System_earthings_worldwide_and_evolution_s.pdf.
123. Preve, C. *Protection of electrical networks*. London: ISTE Ltd, 2006. 508 p. ISBN: 978-1-905209-06-4.
124. Неклепаев, Б. Н. и Крючков, И. П. *Электрическая часть станций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования*. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 608 с.

125. Siemens AG Power Transmission Division. *3FL Silicone Long Rod Insulators for Transmission Lines 69-500 kV*. Berlin: SIEMENS, 2012. p. 12. Available from: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:022fb4e50fbbcd5762aac1b88bc765926d3d6b4f/e50001-g630-a216-x-4a00-rz-ws-lri-3fl-iec-eng.pdf>.
126. *Описание промежуточной опоры П330–2Т и П330–2Т+5 [в сети]*. Компания "Электропоставка". [Просмотрено 2018 г. 10 декабря]. Доступно: <http://elektropostavka.ru/metalopory/promezhutochnye-opory-p330-2t-p330-2t-plus5/>.

2022