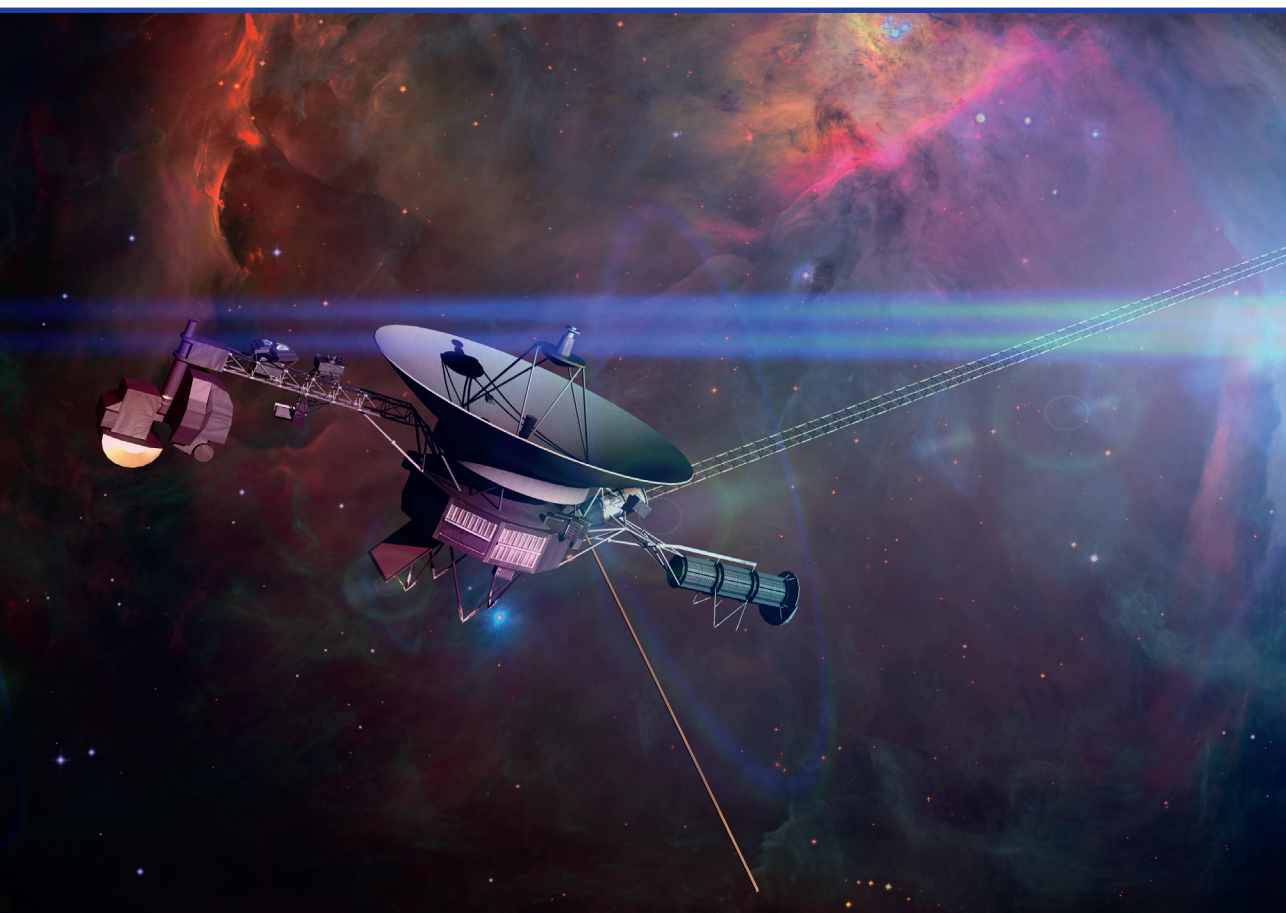


Artūrs Brēķis

AR TERMOAKUSTISKO DZINĒJU DARBINĀMS MAGNETOHIDRODINAMISKAIS ĢENERATORS

Promocijas darbs



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultāte
Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts

Artūrs BRĒĶIS

Doktora studiju programmas “Enerģētika un elektrotehnika”,
studiju apakšvirziena “Elektriskās mašīnas un iekārtas” doktorants

AR TERMOAKUSTISKO DZINĒJU DARBINĀMS MAGNETOHIDRODINAMISKAIS ĢENERATORS

Promocijas darbs

Zinātniskie vadītāji:

LU Fizikas institūta vadošais pētnieks: *Dr. phys.*
Agris GAILĪTIS

RTU profesors *Dr. sc. ing.*
Andrejs PODGORNOVS

Rīga 2023

PATEICĪBAS

Gribu izteikt pateicību par palīdzību darba tapšanā visam Latvijas Universitātes Fizikas Institūta (LUFİ) darba kolektīvam. Īpašs paldies promocijas darba vadītājam, manam darbaudzinātājam, LUFİ Teorētiskās Fizikas Laboratorijas vadītājam Agrim Gailītim par atbalstu un vērtīgajiem padomiem darba tapšanas laikā, par ievirzīšanu zinātniskajā pētniecībā, par motivēšanu turpināt darbu, kā arī par nerimstošas intereses radīšanu par magnetohidrodinamiku. Tāpat atsevišķs paldies par iespēju pirms vairākiem gadiem iesaistīties un strādāt pie 7. ietvarprogrammas Eiropas projekta “*SpaceTRIPS*” iekārtas izbūves toreizējam LUFİ direktoram Jānim Ernestam Freibergam, ar kuru kopā sastrādāties man bija liels gandarījums. Tieši šī pieredze izveidoja manu, kā elektroinženiera praktisko iemaņu bāzi turpmākajai profesionālajai un zinātniskajai darbībai.

Vēlos izteikt paldies arī visiem RTU Elektrisko mašīnu un aparātu katedras mācībspēkiem par atbalstu visu studiju laikā sākot no bakalaura 1. kursa līdz pat doktorantūras noslēgumam; atsevišķs paldies prof. Andrejam Podgornovam par iesaistīšanu katedras dzīvē.

Visbeidzot, lielākais paldies manai ģimenei par neatlaidīgu morālo atbalstu, pacietību visā doktorantūras periodā un motivēšanu ticēt savām spējām.

Artūrs Brēķis
21.08.2022.

Promocijas darbs izstrādāts LU Fizikas Institūtā ar “Seventh Framework package FP-7” Eiropas projekta “SpaceTRIPS: Space Thermoacoustic RadioIsotopic Power System” granta nr: 312639 finansiālo atbalstu, kā arī daļēji ar RTU ERAF līdzfinansēta projekta Nr. 1.1.1.3/18/A/001 «RTU inovāciju granti studentiem», aktivitātes “Produktu attīstības projekts” palīdzību.



ANOTĀCIJA

Atslēgas vārdi: magnetohidrodinamika, MHD ģenerators, šķidrums, metāls, nātrijs, termoakustika.

Promocijas darbs veltīts jauna veida enerģijas pārveidotājam dziļā kosmosa pielietojumiem. Tas sastāv no unikāla maiņstrāvas magnetohidrodinamiskā ģenerators ar šķidru nātriju, kā darba ķermeni, un no termoakustiskā dzinēja, kas ģeneratoru piedzen, liekot šķidrajam metālam svārstīties magnētiskajā laukā. Darba galveno novitāti nosaka fakts, ka abas tehnoloģijas – MHD ģenerators un termoakustiskais dzinējs – ir apvienotas vienā kopīgā iekārtā ar nosaukumu “*SpaceTRIPS*”, kas līdz šim nav ticis veikts nekur pasaulē.

Darbā ir veikta teorētiska, skaitliska un eksperimentāla tehnoloģijas izpēte un prototipa izgatavošana. Pētījumu fokuss galvenokārt ir vērsts uz “*SpaceTRIPS*” iekārtas maiņstrāvas MHD ģeneratoru un ar to saistītajiem jautājumiem. Izveidoti ģenerators matemātiskie modeļi uz elektriskā transformatora ekvivalentās aizvietošanas shēmas bāzes, kā arī uz Maksvela vienādojumu pamata. Izstrādātie modeļi pielietoti, lai noteiktu un izpētītu mašīnas darba parametrus plašos vērtību diapazonos.

Veikti laboratorijas eksperimenti ar katru no abām mašīnām, kā atsevišķi, tā apvienojumā, un mērījumu rezultāti salīdzināti ar teorētiski aprēķinātajiem. Parādīts, ka, izmantojot termoakustisko tehnoloģiju sniegtās iespējas, var iegūt šķidra metāla vibrāciju tipa kustību, kas ir spējīga ģenerēt patērētājam piemērotu 50 Hz sinusoidālu maiņspriegumu bez jebkādu mehāniski kustīgu, dilstošu detaļu esamības. Šāda iekārta, līdz ar to, raksturojas ar augstu darba drošumu un tai nav nepieciešama apkope, kas ir īpaši būtiski tāliem kosmiskiem lidojumiem.

Izgatavoti eksperimentāli modelējoši stendi ģenerators šķidra metāla brīvās virsmas parādību izpētei. Piedāvāta oriģināla metode potenciālai elektrovadoša šķidrums virsmas stabilizācijai elektromagnētiskā ceļā.

Darbs izstrādāts Latvijas Universitātes Fizikas Institutā un Rīgas Tehniskajā universitātē. Promocijas darbs sastāv no 4 pamatnodaļām un tā apjoms ir 143 lappuses, kurās ietverti 188 vienādojumi, 98 attēli, 4 tabulas un 2 pielikumi. Darbā izmantoti 97 literatūras avoti.

ABSTRACT

Keywords: magnetohydrodynamics, MHD generator, liquid metal, sodium, thermoacoustics.

Present Doctoral Thesis is devoted to a new type of energy converter for Deep Space applications. It consists of a unique alternating current magnetohydrodynamic generator with liquid sodium as a working body, and thermoacoustic engine, which drives the generator, by forcing the liquid metal to oscillate in the magnetic field. The main novelty of this work is that both technologies – MHD generator and thermoacoustic engine – are coupled in one device, that is called “*SpaceTRIPS*”, which has not been done anywhere in the world before.

In the PhD thesis an analytical, numerical and experimental investigation is performed to study present technology, as well as construction and building of the whole facility itself. Focus of the research is aimed mostly on “*SpaceTRIPS*” part of the AC MHD generator and on the questions related to them. There are developed mathematical models of the generator that are based on electrical transformer equivalent circuit approach, and also on the basis of the Maxwell equations. Developed models are used, to assess and to study different parameters of the electrical machine in the wide range of values.

There have been laboratory experiments performed with each of the machines, both, separately and coupled, and measurement results are compared with theoretical calculations. It is shown that by using possibilities, that thermoacoustic technologies offer, it is possible to obtain liquid metal vibration type movement that is capable of generating consumer suitable 50 Hz sinusoidal alternating voltage without any mechanically wearing and moving parts. So, this facility is characterized as highly reliable and maintenance free, which is especially important for long term Deep Space flights.

Experimental modeling mockups are constructed to study aspects and phenomena related to generator liquid metal free surface. An original method for potential electrically conducting liquid free surface electromagnetic stabilization is offered.

The work is performed in the Institute of Physics of the University of Latvia and also in the Riga Technical University. Dissertation consists of 4 main paragraphs and it's volume is 143 pages, that has 188 equations, 98 figures, 4 tables and 2 appendixes. There are references to 97 literature sources.

SATURS

PATEICĪBAS	2
ANOTĀCIJA.....	3
ABSTRACT	4
IEVADS	7
Aktualitāte.....	7
Pētījuma objekts, mērķi un uzdevumi	7
Teorētiskās daļas darba uzdevumi:	7
Eksperimentālās daļas darba uzdevumi:	8
Zinātniskā novitāte.....	8
Praktiskā nozīme.....	8
Aizstāvējamās tēzes	8
Izmantotā programmatūra un metodes	9
Darbā biežāk lietotie apzīmējumi un saīsinājumi.....	9
Autora personīgais ieguldījums	9
Darba aprobācija konferencēs.....	11
Autora publikācijas	13
PASAULĒ EKSISTĒJOŠIE ALTERNATĪVIE RISINĀJUMI.....	15
1. TAc DZINĒJA APVIENOJUMS AR MHD ĢENERATORU.....	18
1.1. Darbības princips un vispārējs apskats	18
1.2. Termoakustiskais dzinējs.....	19
1.3. Maiņstrāvas magnetohidrodinamiskais ģenerators	26
2. EKVIVALENTĀ ELEKTRISKĀ AIZVIETOŠANAS SHĒMA MHD ĢENERATORA ANALĪZEI	33
2.1. Transformatora ekvivalentās shēmas pieejas formulējums	33
2.2. Elektriskās mašīnas parametru aprēķins, neievērojot sekundārā, atmagnetizējošā lauka ietekmi.....	40
2.3. MHD ģenerators aprēķins, ievērojot enkura reakcijas lauka ietekmi.....	52
2.4. Kompleksā mainīgā funkciju izmantošana strāvu izplūšanas aprēķinam.....	58
3.MHD ĢENERATORA ANALĪZE, IZMANTOJOT SPRIEGUMU VIENĀDOJUMUS	67

3.1 .Magnetohidrodinamikas vienādojumu sistēma	67
3.2. Ģenerators analītisks modelis.....	68
3.3. Rezultāti un to interpretācija.....	83
4. EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI.....	95
4.1. Termoakustiskās iekārtas atsevišķie eksperimenti	95
4.2. Ar MHD ģeneratoru saistītie eksperimentālie pētījumi.....	102
4.3. MHD ģenerators nātrija kustību modelējošie eksperimenti ar ūdeni	106
4.4. Eksperiments, sajūdzot kopā MHD ģeneratoru ar termoakustisko dzinēju.....	109
4.5. Paņēmiens elektriskās mašīnas šķidra metāla brīvās virsmas elektromagnētiskai stabilizācijai	113
GALVENIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI	120
1. PIELIKUMS.....	123
2. PIELIKUMS.....	135
IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS	136

IEVADS

Aktualitāte

Elektriskās mašīnas ar šķīdta metāla darba ķermeni jeb magnetohidrodinamiskās (MHD) mašīnas pēdējās dekādēs ir piedzīvojušas lielu attīstības vilni. Mūsdienās pieprasījums pēc tādām magnetohidrodinamiskajām mašīnām, kā, piemēram, elektromagnētiskajiem sūkņiem un MHD ģeneratoriem aug. Pieprasījums ir aptvēris arī tādas nozares, kurās tradicionāli tika lietotas cita veida tehnoloģijas, kā, piemēram, kosmosa tehnika.

Savukārt interesi par elektromagnētiskajiem sūkņiem izrāda arī atomenerģētikas nozare. Šāda veida sūkņi tiek arvien vairāk izskatīti kā izdevīgākais risinājums 4. paaudzes ātro neitronu reaktoru dzesēšanas sistēmu izstrādē.

MHD elektrisko mašīnu galvenā priekšrocība ir elektrisku un mehānisku kontaktu, kā arī gultņu neesamība. Līdz ar to šāds pilnīgs bezkontakta izpildījums paver iespēju tās pielietot vietās, kur darba drošuma prasības ir visaugstākās. Aktuāla ir iespēja izmantot šīs MHD mašīnu priekšrocības ilgās vai tālās dziļā kosmosa misijās.

Abi uzskaitītie virzieni ir galvenie MHD elektrisko mašīnu veidi. Promocijas darbs fokusēts uz vienu no tiem. Disertācija ir veltīta jaunas paaudzes un uz jauna darbības principa strādājoša MHD ģenerators izpētei. Novitāti vēl vairāk pastiprina fakts, ka šis ģenerators ir sajūgts ar relatīvi mazpazīstamu tehnoloģiju, kuru sauc par termoakustisko dzinēju.

Pētījuma objekts, mērķi un uzdevumi

Par pētījuma objektu promocijas darbā izvēlēts ar termoakustisku piedziņu darbināms maiņstrāvas magnetohidrodinamiskais ģenerators.

Darba mērķis: **Uz jauna tipa maiņstrāvas MHD ģenerators un termoakustiskā dzinēja bāzes veidotas enerģētiskas iekārtas izgatavošana un izpēte.**

Lai sasniegtu šo mērķi tiek izvirzīti šādi darba uzdevumi, kas arī plānoti atbildēt darba struktūrai:

Teorētiskās daļas darba uzdevumi:

- 1) Eksistējošo līdzstrāvas kondukcijas tipa MHD mašīnu teorijas piemērošana maiņstrāvas režīmam, izmantojot elektriskā transformatora T-veida ekvivalento aizvietošanas shēmu.
- 2) MHD ģenerators analītiska matemātiskā modeļa izstrāde izmantojot elektromagnētiskā lauka vienādojumus apvienotus ar hidrodinamikas vienādojumiem.

Eksperimentālās daļas darba uzdevumi:

- 1) Tālām kosmosa misijām paredzēta termoakustiskā dzinēja un maiņstrāvas MHD ģenerators prototipa izgatavošana un kopīga eksperimentāla testēšana Zemes laboratorijas apstākļos.
- 2) Izgatavotās iekārtas detalizēts apraksts, kā arī atsevišķu tās būtiskāko detaļu un mezglu analīze.
- 3) Individuālu eksperimentu veikšana ar MHD ģeneratoru, nolūkā iespējami detalizēti izpētīt elektrisko mašīnu arī atsevišķi no piedzenošās iekārtas (TAc).
- 4) Atsevišķi individuālie eksperimenti ar vienu pašu TAc iekārtu bez MHD ģenerators.
- 5) Eksperimentālu stendu izstrāde ģenerators šķidrums brīvās virsmas nestabilitātes novēršanas paņēmieni izpētei un eksperimentu veikšana uz tiem.

Zinātniskā novitāte

- 1) Izmantojot transformatora ekvivalentās aizvietošanas shēmas principu, izstrādāta aprēķina metode jauna veida maiņstrāvas MHD ģenerators parametru noteikšanai, kas spējīga ievērot reālo elektriskās mašīnas piesātinājumu.
- 2) Līdz šim zināmo līdzstrāvas kondukcijas tipa MHD ģenerators aprēķinu metožu aspekti pielietoti un pielāgoti maiņstrāvai, izmantojot transformatorshēmas pieeju un elektromagnētisko lauku skaitlisko aprēķinu iespējas ar galīgo elementu metodi.
- 3) Izstrādāta MHD ģenerators aprēķina metode, izmantojot integrālā formā uzrakstītus magnetohidrodinamikas vienādojumus; veikts abu izstrādāto metožu salīdzinājums.
- 4) Piedāvāts risinājums pētāmā MHD ģenerators šķidra metāla brīvās virsmas elektromagnētiskai stabilizācijai.

Praktiskā nozīme

- 1) Izstrādāta automatizēta aprēķina programma ar atgriezenisko saiti "Visual Basic for Applications" vidē MHD ģenerators parametru aprēķinam, kas ievēro arī enkura reakciju.
- 2) Izstrādātās metodes var tikt izmantotas turpmāko šāda veida maiņstrāvas MHD ģenerators projektēšanā un optimizācijā.

Aizstāvāmās tēzes

- 1) Ar termoakustisku dzinēju piedzenams maiņstrāvas magnetohidrodinamiskais ģenerators ar šķidra nātrija darba ķermeņi ir spējīgs ģenerēt elektrisko enerģiju.
- 2) Izstrādātās MHD ģenerators parametru matemātiskās aprēķina metodes ir pielietojamas pētāmās elektriskās mašīnas darba režīmu novērtēšanai.

Izmantotā programmatūra un metodes

MHD ģenerators magnētiskā lauka skaitliskie aprēķini veidoti ar programmu „Quickfield”. Aprēķina automatizācija ar atgriezenisko saiti ir veikta ar “ActiveField” tehnoloģiju, izmantojot “Visual Basic for Applications” (VBA) programmēšanas valodu, “Excel Macros” vidē.

Arī šķidrā metālā inducētās izplūdušās elektriskās strāvas matemātiskai attēlošanai izmantota „Quickfield” vide izmantojot elektriskā lauka režīmu. Ar kompleksā mainīgā pieeju veiktais nātrija strāvas un elektriskā potenciāla sadalījuma aprēķins veikts “Matlab” vidē.

“SpaceTRIPS” iekārtas eksperimentu mērījumu rezultātu apstrāde galvenokārt veikta programmā “Origin PRO”.

Darbā biežāk lietotie apzīmējumi un saīsinājumi

MHD – magnetohidrodinamiskais (ģenerators)

TAc – termoakustiskais (dzinējs)

LUFU – Latvijas Universitātes Fizikas Institūts

SpaceTRIPS – abreviatūra no “Space Thermoacoustic Radio-Isotopic Power System”

Autora personīgais ieguldījums

Autors bija atbildīgs par termoakustiskā dzinēja un MHD ģenerators prototipa izstrādi. Koordinēja tā izgatavošanu, montāžu, pats piedalījās iekārtas salikšanā, kā arī izgatavošanas laikā cieši sadarbojās ar iekārtas konstruktoriem no Francijas, pastāvīgi konsultējoties saistībā ar iekārtas izbūvi, lai prototips tiktu izstrādāts atbilstoši projektētāju rasējumiem. Līdz ar to, autors neuzdod par saviem franču konstruktoru biroja “SERAS” izstrādātos “SpaceTRIPS” iekārtas izgatavošanas rasējumus. Tomēr iekārtas izstrādes gaitā autors bija spiests vairākkārt ieviest arī pats savus jaunievedumus, jaunus mezglus un izmaiņas sākotnējā dizainā. Kā vienu no spilgtām ilustrācijām teiktajam var norādīt reālā termoakustiskā kontūra topoloģijas izveidi. 1.1. attēlā ir parādīta rasējumos projektētā iekārta ar kompakti saliektām skaņas caurulēm, kā arī autora reāli izgatavotā kontūra stilizēta T-veida ģeometrija ar nolūku vienkāršot un atvieglot izgatavošanu un mērsistēmas organizēšanu.

Pilnīgā autora pārziņā bija visu eksperimentu plānošana, sagatavošana, veikšana, datu apstrāde un rezultātu interpretēšana. Arī aprēķinu veikšana, izmantojot izstrādātās metodes, un rezultātu analīze bija autora pārziņā. Pilnībā autora radīts koncepts un dizains bija pludīņu eksperimenti, kā arī kompresora un skaļruņu iekārtas šķidra metāla virsmas stabilizācijas eksperimentiem.

Disertācijā aprakstītais autora paveiktais darbs ir tikai viena daļa no liela mēroga, starptautiska zinātniskā projekta ar nosaukumu “SpaceTRIPS”. Kā jebkurā tehnoloģiskā projektā, prototipēšana parasti ir iteratīvs process, ar katru nākamo iterāciju uzlabojot iepriekšējo. Tādēļ jau darba sākotnējā stadijā netika uzstādīts mērķis uzreiz izgatavot

nevainojami strādājošu iekārtu, atbilstošu 1.1. paragrāfā aprakstītajiem labvēlīgākajiem darba apstākļiem. Darba gaitā autors ir konstatējis iekārtas trūkumus, kurus būtu jānovērš, projektējot līdzīgas konstrukcijas. Līdz ar to, var teikt, ka projekts un disertācija veltīti tam, lai tālākā nākotnē būtu iespējams realizēt konkurētspējīgu elektrisko mašīnu, kas dotajā stadijā (uz disertācijas pabeigšanas brīdi) tāda nebūt vēl nav. No tā izriet, ka reālistiskais plāns pie kā autors darba izstrādes gaitā pieturējās, bija nelielā apmērā eksperimentāli izpētīt un pārbaudīt iekārtas pirmreizējā prototipa darbību. Tāpat arī apgūt iekārtas un tās projektēšanas īpatnības, kā arī saprast kādi uzlabojumi varētu būt veicami turpmākajos eksperimentos vai arī būvējot nākošo prototipu.

Darba aprobācija konferencēs

Promocijas darba rezultāti prezentēti sekojošās vietējās un starptautiskās konferencēs:

1. **Brēķis, A.** “Magnetohydrodynamic generator driven by a thermoacoustic engine”, *11th International Doctoral School of Energy Conversion and Saving Technologies*, Rīgas Tehniskā universitāte, “Ronīši”, Klapkalnciems, 2022. gada 27.-28. maijā.
2. **Brēķis, A.** “Thermoacoustic-to-magnetohydrodynamic energy converter for deep space flights and possibilities to improve it”, *18th International Conference of Young Scientists on Energy and Natural Sciences Issues (CYSENI)*, Lietuvas Enerģētikas Institūts, Kauņa, Lietuva, 2022. gada 24.-27. maijā.
3. **Brēķis, A.,** Alemany, A., Freibergs. “Analysis of Magnetohydrodynamic Generator Driven by Thermoacoustic Engine for Deep Space Applications”, *2020 IEEE 61st International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Rīgas Tehniskā universitāte, Rīga, 2020. gada 5-7. novembrī.
4. **Brēķis, A.,** Freibergs, J., Alemany. A., Maurice, M. X., Roy, E., Zeminiani, E., Eckert, S. “Experimental Investigation of Sound Parameters in SpaceTRIPS Facility of Thermoacoustic-to-MHD Energy Converter”, *11th PAMIR International Conference of Fundamental and Applied MHD*, University of Reims, Reimsa, Francija, 2019. gada 1-5. jūlijā.
5. **Brēķis, A.,** Freibergs, J., Gailītis, A., Alemany. “Maiņstrāvas MHD ģenerators parametru novērtējums”, *LU 77. Starptautiskā zinātniskā konference*, Latvijas Universitātes Fizikas Institūts, Rīga, 2019. gada 22. februārī.
6. Alemany, A., Francois, M. X., Jeantet P., Poli, G., Zeminiani, E., Eckert, S., Freibergs, J., **Brēķis, A.** “SpaceTRIPS”, *The 3rd Russian Conference on Magnetohydrodynamics-2018*, Institute of Continuous Media Mechanics, Perma, Krievija, 2018. gada 18-21. jūnijā.
7. **Brēķis, A.,** Freibergs, J., Gailītis, A., Alemany. “«SpaceTRIPS» : TAc+MHD iekārtas 2017. gadā paveiktais”, *LU 76. Starptautiskā zinātniskā konference*, Latvijas Universitātes Fizikas Institūts, Salaspils, 2018. gada 9. februārī.

8. **Brēķis, A.**, Freibergs, J., Gailītis, A., Alemany. “New Experimental Results from Testing “Space Trips” Facility of Thermoacoustic System Coupled with Magnetohydrodynamic Generator”, *VIII International Scientific Colloquium of Modelling for Materials Processing*, Latvijas Universitāte, Rīga, 2017. gada 21-22. septembrī.
9. **Brēķis, A.**, Freibergs, J., Gailītis, A. “Termoakustiskā MHD ģenerators jaunāko eksperimentu rezultāti”, *LU 75. Zinātniskā konference*, Latvijas Universitātes Fizikas Institūts, Rīga, 2017. gada 3. februārī.
10. **Brēķis, A.**, Gailītis, A. Freibergs, J. “Testing of MHD Generator Prototype for Space Applications”, *17th MHD days 2016 conference*, Maksa Planka Saules Sistēmu Izpētes Institūts, Getingene, Vācija, 2016. gada 30. novembrī – 2. decembrī.
11. **Brēķis, A.**, Gailītis, A. Freibergs, J. “Thermoacoustic MHD Generator Prototyping and Experiments”, *10th PAMIR International Conference of Fundamental and Applied MHD*, Kaljāri Universitāte, Kaljāri, Itālija, 2016. gada 20-26. jūnijā.
12. **Brēķis, A.**, Gailītis, A. Freibergs, J. “Termoakustiskā MHD ģenerators prototipa izstrāde un testēšana”, *LU 74. Zinātniskā konference*, Latvijas Universitāte, Rīga, Latvija, 2016. gada 1. februārī.
13. **Brēķis, A.**, Gailītis, A. Freibergs, J. “Termoakustiskā MHD ģenerators prototipa izstrāde un testēšana”, *RTU 57. Studentu Zinātniskā un Tehniskā konference*, Rīgas Tehniskā universitāte, Rīga, 2016. gada 14. aprīlī.
14. Freibergs, J., **Brēķis, A.** “Space TRIPS facility – prototyping and experiments”, *AIDAA 2015 Conference on Aeronautics and Astronautics / Aerospace & defence meetings Torino*, Politecnico di Torino, Turīna, Itālija, 2015. gada 17-19. novembrī.

Autora publikācijas

Promocijas darba galvenie rezultāti publicēti 8 pilna teksta zinātniskajās publikācijās, no kurām 5 indeksētas SCOPUS un Web of Science:

1. **Brēķis, A.**, Alemany, A., Alemany, O., Montisci, O. Space Thermoacoustic Radioisotopic Power System, SpaceTRIPS: The Magnetohydrodynamic Generator. *Sustainability*, 2021, Vol. 13, No. 23. *Open access*, Pieejams: doi: 10.3390/su132313498, <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/23/13498/htm>, SCOPUS
2. Gailītis, A., **Brēķis, A.** Equivalent Circuit Approach for Acoustic MHD Generator. *Magnetohydrodynamics*, 2020, Vol. 56, No. 1, 3.-13.lpp. ISSN 0024-998X. e-ISSN 1574-0579. Pieejams: doi:10.22364/mhd.56.1.1, SCOPUS
3. **Brēķis, A.**, Alemany, A., Freibergs, J. Initial Experimental Tests on Space TRIPS Facility of Thermoacoustic-to-MHD Energy Converter. *Magnetohydrodynamics*, 2020, Vol. 56, No. 2/3, 255.-267.lpp. ISSN 0024-998X. e-ISSN 1574-0579. Pieejams: doi:10.22364/mhd.56.2-3.17, SCOPUS
4. **Brēķis, A.**, Alemany, A., Freibergs, J. Analysis of Magnetohydrodynamic Generator Driven by Thermoacoustic Engine for Deep Space Applications. No: 2020 IEEE 61st Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2020): *Proceedings*, Latvija, Rīga, 5.-7. novembris, 2020. IEEE, 1.-7.lpp. ISBN 9781728195100. Pieejams: doi:10.1109/RTUCON51174.2020.9316584, SCOPUS
5. **Brēķis, A.**, Freibergs, J., Alemany, A. Space Thermo Acoustic Radio-Isotopic Power System: Space TRIPS. *Magnetohydrodynamics*, 2019, Vol.55, No.1, 5.-14.lpp. ISSN 0024-998X. e-ISSN 1574-0579. Pieejams: doi:10.22364/mhd.55.1-2.1, SCOPUS
6. **Brēķis, A.**, Freibergs, J., Alemany, A., Francois, M., Roy, E., Zeminiani, E., Eckert, S. Experimental Investigation of Sound Parameters in SpaceTRIPS Facility of Thermoacoustic-to-MHD Energy Converter. No: 11th PAMIR International Conference on Fundamental and Applied MHD: *Proceedings*, Francija, Reimsa, 1.-5. jūlijs, 2019. Reimsas Šampanas-Ardenes Universitāte, 191.-195.lpp.

7. **Brēķis, A.**, Freibergs, J., Gailītis, A., Alemany, A. New Experimental Results from Testing “Space Trips” Facility of Thermoacoustic System Coupled with Magnetohydrodynamic Generator. No: *Proceedings of the VIII International Scientific Colloquium “Modelling for Materials Processing”*, Latvija, Rīga, 21.-22. septembris, 2017. Latvijas Universitāte, 107.-112. lpp. ISBN 9934182602. Pieejams: doi:10.22364/mmp2017.16
8. **Brēķis, A.**, Freibergs, J., Gailītis, A., Alemany, A., Roy, E., Jeantet, P., Poli, G., Zeminiani, E., Maurice, F., Gerbeth, G., Eckert, S. Thermoacoustic MHD Generator Prototyping and Experiments. No: *10th PAMIR International Conference Fundamental and Applied MHD: Proceedings*, Itālija, Kaljāri, 20.-24. jūnijs, 2016. Kaljāri Universitāte, 606.-610.lpp. ISBN 978-88-90551-93-2.

Papildus tam disertācijas rezultāti tēžu formā publicēti 3 starptautisku zinātnisko konferenču anotāciju krājumos:

1. **Brēķis, A.**, Freibergs, J., Gailītis, A. Testing of MHD Generator Prototype for Space Applications. No: *17th MHD Days MPS Göttingen: Book of Abstracts*, Vācija, Getingene, 30. novembris – 2. decembris, 2016. Maksa Planka Saules Sistēmu Izpētes Institūts, 13.-13. lpp.
2. Alemany, A., Xavier-Maurice, F., Jeantet, P., Poli, G., Zeminiani, E., Eckert, S., Freibergs, J., **Brēķis, A.** SpaceTRIPS. No: *Third Russian Conference on Magnetohydrodynamics 2018: Book of Abstracts*, Krievija, Perma, 18.-19. jūnijs, 2018. Permas Nepārtrauktas vides mehānikas institūts: Krievijas Zinātņu Akadēmijas Urālu nodaļa, 13.-13. lpp. ISBN 978-5-6040619-4-7.
3. **Brēķis, A.** Thermoacoustic-to-Magnetohydrodynamic energy converter for deep Space flights and possibilities to improve it. No: *Proceedings of the 18th International Conference of Young Scientists on Energy and Natural Sciences Issues (CYSENI)*, Lietuva, Kauņa, 2022. gada 24.-27. maijs, Lietuvas Enerģētikas Institūts. 145.-148. lpp. ISBN 2783-6339.

PASAULĒ EKSISTĒJOŠIE ALTERNATĪVIE RISINĀJUMI

Kosmosa iekārtām: satelītiem, zondēm, kosmosa stacijām u.c., kas lido un atrodas netālu no Saules, elektroapgāde parasti tiek nodrošināta, uzstādot Saules paneļus [1]. Tātad izmantojot fotoelektriskos enerģijas pārveidotājos. Taču attālinoties no Saules, starojuma intensitāte uz laukuma vienību samazinās kvadrātiski [2]. Līdz ar to, ļoti lielā attālumā no Saules, piemēram, Jupitera orbītā, lai saglabātu to pašu fotoelektriskā pārveidotāja attīstāmo jaudu, kāds būtu tipiskam satelītam Zemes tuvumā, tā laukumam jābūt nesamērīgi lielam [3].

Kā risinājumu šai problēmai ir iespējams par primāro enerģijas avotu izmantot kodoldegvielu no radioaktīvajiem izotopiem [4]. Tādi materiāli kā Plutonijs un Amerīcijs – ^{238}Pu un ^{241}Am – ir ar vairākus desmitus vai pat simtus gadu ilgu pussabrukšanas periodu, kas ļauj tiem ilgstoši atbrīvot enerģiju [5]. Kodolreakcijas izdala enerģiju siltuma veidā, kuru tālāk var pārveidot elektroenerģijā. Šim nolūkam var lietot termoelektriskos ģeneratorus, kas pārveido siltumu uz elektrisko spriegumu izmantojot Peltjē efektu. Šāda tehnoloģija ir izdevīga pie nelielām jaudām un tā ir darīts tādās tāla kosmosa misijās kā “Voyager”, “Pioneer” un citās [6]. Taču termoelektriskie pārveidotāji parasti ir ar zemu lietderības koeficientu, kas bieži vien nepārsniedz dažus procentus.

Mūsdienu attīstības kurss dziļā kosmosa misijām ir vērsts arī uz Stirlinga tipa jeb ārdedzes dzinēju un to modifikāciju izpēti [7]–[9]. Tiem ir augstāka efektivitāte. Taču vienlaikus kosmosa industrija šāda tipa iekārtām pieprasa augstu darba drošumu un Stirlinga dzinēji ar to kustīgajām detaļām to izpildīt nespēj.

Daudzsološas ir termoakustisko (TAc) tehnoloģiju izmantošanas iespējas kosmosā. Termoakustiskie pārveidotāji ir samērā mazpazīstamas enerģijas pārveidošanas iekārtas, kuru darbības princips pamatojas uz termodinamisko un akustisko parādību savstarpēju mijiedarbību [10, 11]. Tās pēc sava darbības principa termodinamiskā izpratnē ir radniecīgas Stirlinga tipa pārveidotājiem [12]–[16]. Tomēr tām nav nevienas kustīgas, cietas detaļas un tās ir spējīgas veikt mehānisku darbu, izmantojot mašīnas darbības laikā radītās gāzes spiediena svārstības. Līdz dotajam brīdim termoakustiskās iekārtas kosmosa tehnoloģijās tikušas izmantotas vien 1992. gadā, “Discovery shuttle” agregātā. Taču tad ierīce kalpoja tikai elektronisko sistēmu dzesēšanai [17]–[19].

Attiecībā uz elektroenerģijas ģenerācijas posmu, ir vērts apsvērt elektriskā ģenerators izveidi ar šķīdta metāla darba ķermeni, tādējādi atsakoties no jebkādam cietām, mehāniski dilstošām detaļām [20]–[23]. Ir zināmi daudz un dažādi risinājumi magnetohidrodinamiskajām elektrostacijām, kur sakarsēta plazma tiktu laista cauri pastāvīgam magnētiskajam laukam, tādējādi ģenerējot līdzspriegumu [24]–[26]. Šī tehnoloģija tomēr izrādās tehnoloģiski grūti realizējama, nepieciešamās augstās plazmas temperatūras un atbilstošo karstumizturīgo materiālu neesamības dēļ.

Pirmais mēģinājums iegūt maiņstrāvu izmantojot MHD ģeneratoru ir ticis realizēts izmantojot termoakustisku piedziņu [27]. Šis koncepts pamatojās uz to, ka stāvviļņa tipa termoakustiskajā dzinējā kā darba ķermenis tika izmantota nevis gāze, bet šķidr nātrijs. Rezonatorcaurules galā tika uzmontēts kondukcijas tipa MHD ģenerators. Vienlaikus

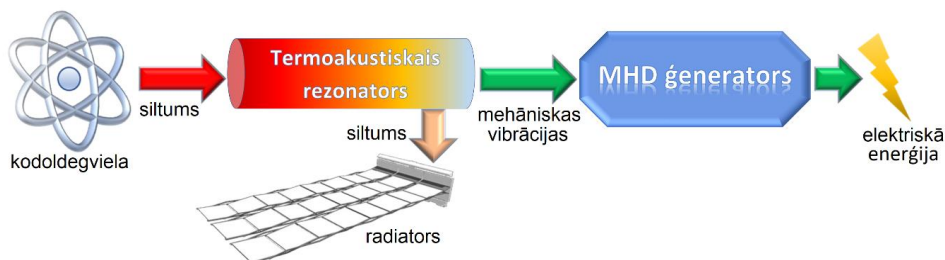
termoakustiskajā dzinējā piepildītais nātrijs periodiski svārstās MHD ģenerators magnētiskajā laukā, tādējādi inducējot pie ģenerators kanāla sienām pievienotajos izvados maīnsprīegumu, kas ir noņemams konduktīvā ceļā. Viens no šīs konstrukcijas trūkumiem ir nekontrolējama siltumpārnese šķidra Na iekšienē visā TAc dzinēja tilpumā, nātrija augstās siltumvadītspējas dēļ. Kritisks punkts ir arī konduktīvu elektrisku kontaktu esamība, kas ar laiku neizbēgami noved pie korozijas un kontaktproblēmām.

Vēlāk ir tikuši piedāvāti varianti [28], [29], [30], [31], [32] augstākminēto siltumpārneses problēmu risināt nodalot abus enerģijas pārveidošanās posmus katru savā atsevišķā pārveidotājā. Tas nozīmēja termoakustiskajā dzinējā par darba ķermeņi lietot gāzi, savukārt elektrovadošā vide atrodas tikai MHD ģeneratorā. Arī šajā gadījumā ģenerētā strāva tiek noņemta nevis induktīvā, bet konduktīvā ceļā, turklāt [30] šķidra metāla vietā šeit tiek lietots elektrolīts, kura zemā īpatnējā elektrovadītspēja šeit ir negatīvs aspekts attiecībā uz efektivitāti un jaudas ģenerāciju. Kā vēl viens potenciāls, taču autoru neizpētīts, trūkums šai iekārtai ir šķidrumsa brīvās virsmas esamība ar no tās izrietošu iespējamu virsmas nestabilitāti šķidrumsa kustības laikā.

Kā viens no jaunākajiem piedāvātajiem radniecīgajiem risinājumiem ir ideja atteikties no šķidrumsa, elektrovadošas vides, to aizstājot ar elektrovadošu gāzi [33]–[35]. Tas būtībā nozīmē magnetogāzīdinamiskā (MGD) ģenerators izveidi, kurā gāzes oscilējošu kustību magnētiskajā laukā nodrošina pieslēgtais TAc dzinējs. No tradicionālo elektrisko mašīnu terminoloģijas viedokļa, šai iekārtai ir daļēji kapacitīvas elektriskās mašīnas iezīmes [36], proti, enerģijas pārveidošanās procesā tiek izmantota elektriskā lauka enerģija. Jonizēta gāze tiek laista cauri kanāla apgabalam ar tajā iepriekš pieliktu spēcīgu elektrisko lauku, radītu ar ārēja kondensatorsa palīdzību. Tas nodrošina lādiņnesēju atbilstošu akumulēšanu un atdalīšanu, pēc kā sadalītie lādiņi kustās cauri tiem paredzētās vietās uz tītām spolēm. Ņemot vērā, ka gāzes kustības virziens ir periodiski mainīgs, tad arī lādiņu kustība, jeb, citiem vārdiem, inducētā strāva ir periodiski mainīga, kas inducē sekundāro strāvu spolēs. Šāds paņēmīens ļauj atteikties no šķidra metāla un līdz ar to izslēdz problēmas saistītas ar šķidrumsa brīvo virsmu un tās stabilitāti. Tomēr konstrukcijas būtisks trūkums ir nepieciešamība pēc ārējiem elektriskā lauka avotiem gāzes jonizācijai. To piedāvāts nodrošināt radot gāzē pietiekami spēcīgas izlādes periodiskus impulsus izmantojot augstsprieguma līdzstrāvas avotu.

Viss augstāk minētais pagaidām padara neiespējamu apskatīto konceptu pielietošanai reālās dziļa kosmosa misijās. Līdz ar to ir pamatota interese meklēt citus enerģijas pārveidošanās mehānismus, kas līdz šim nav vainagojies ar vērā ņemamiem panākumiem.

Autora pētītā MHD ģenerators un termoakustiskā dzinēja apvienotā sistēma ir brīva no uzskaitītajiem trūkumiem, tāpēc tāda veida iekārtas nākotnē būs sevišķi noderīgas lidojumos, piemēram, Jupitera orbītā un aiz tās. Par cik mūsdienu vadošais spēlētājs ekstremāli tālu misiju organizēšanā ir ASV, tad līdz ar šī projekta izstrādi Eiropas zinātne ar Eiropas Kosmosa Aģentūras (ESA) atbalstu tiecas pēc tehnoloģiskās neatkarības šāda tipa misijās. Izgatavotās iekārtas darbības principu raksturojoša secīga enerģijas pārveidošanās ķēde ir parādīta 1. att. No šejienes ir redzams, ka primārais enerģijas avots ir radioaktīvais izotops, kura saražotais siltums tiek novadīts uz specifisku skaņas ģeneratoru. Tā radītā skaņa savukārt tiek aizvadīta uz jaunas konstrukcijas magnetohidrodinamisko ģeneratoru, saražojot elektroenerģiju.



1. att. Izgatavotās iekārtas darbības princips

Promocijas darba eksperimentālā daļa veikta ar Eiropas Komisijas “Seventh Framework” ietvarprogrammas granta finansiālu atbalstu Latvijas Universitātes Fizikas Institūta projektā ar nosaukumu “Space TRIPS”. Projektā iesaistīto pētnieku konsorcijs veido starptautisku zinātnieku grupu, kurā svarīgākā loma ir tieši Latvijai, jo iekārtas prototipa izgatavošana un testēšana ir veikta LU Fizikas Institutā, Salaspilī. Projektā iesaistītas 7 organizācijas:

- 1) Francija – CNRS, AREVA, HEKYOM
- 2) Itālija – Thales Alenia Space
- 3) Vācija – Helmholtz Zentrum Dresden Rossendorf
- 4) Nīderlande – ASTER Thermoacoustics
- 5) Latvija – Latvijas Universitātes Fizikas Institūts

Projekta koordinators: *Dr. phys.* Prof. Antoine Alemany, “HEKYOM”, Francija – Grenoble.

Izgatavotā tehnoloģija ir ieinteresējusi ASV privātu uzņēmumu “Deep Space Industries”, kā arī Eiropas Kosmosa Aģentūru, kuru pārstāvjiem autors vairākkārt prezentējis darbā paveikto.

Pirms sākt iekārtas aprakstu, autors vēlreiz vēlētos atzīmēt, ka turpmākajā nodaļā redzami tehnoloģiskie rasējumi un 3D modeļi nav autora veidoti un darbā ir ievietoti tikai un vienīgi ilustrācijai, saskaņojot to ar projekta koordinatoru un projekta dalībniekiem.

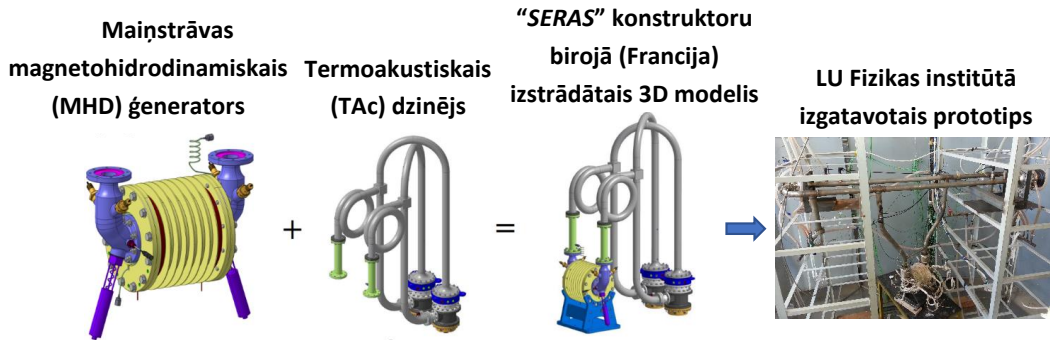
1. TAc DZINĒJA APVIENOJUMS AR MHD ĢENERATORU

1.1. Darbības princips un vispārējs apskats

Termoakustiskais dzinējs pārveido siltumenerģiju mehāniskajā enerģijā – skaņas stāvvilnī, tādējādi ģenerējot spiediena svārstības [37]. Šo mehānisko enerģiju MHD ģenerators pārveido elektriskajā enerģijā, izmantojot elektromagnētiskās indukcijas parādību [38], [39]. Tas tiek panākts šķidram, elektrovadošam metālam, konkrēti, nātrijam [Na] aptuveni 100 °C temperatūrā, spiediena oscilāciju ietekmē kustoties magnētiskajā laukā, periodiski mainot šķidruma kustības virzienu uz pretējo. Izkausēta Na, kā elektriskās mašīnas darba ķermeņa izvēle ir pamatojama ar to, ka tam ir no visiem metāliem augstākā īpatnējā elektrovadītspēja šķidrā agregātstāvoklī: $\sigma_{Na} = 10,36 \cdot 10^6 \frac{S}{m}$. Augstā īpatnējā elektrovadītspēja dod iespēju novērot maksimāli spēcīgu magnetohidrodinamisko mijiedarbību, pārējiem apstākļiem, piemēram, magnētiskā lauka indukcijai paliekot nemainīgai. Vienlaicīgi nātrija blīvums pie tā kušanas temperatūras 97,8 °C ir zems un sastāda $\rho_{Na} = 928 \frac{kg}{m^3}$ [40]. Tas savukārt dod iespēju iegūt iespējami labvēlīgākus apstākļus mašīnas darbam no šķidruma inerces viedokļa. Tas šajā gadījumā ir būtiski, jo jau pats pētāmās tehnoloģijas darbības princips balstās uz spiediena svārstību iegūšanu un izmantošanu maiņvirziena tipa šķidruma plūsmas radīšanai elektriskajā mašīnā [41]. Iekārtas priekšrocības:

- Absolūts bezkontakta izpildījums, nav nevienas mehāniski dilstošas, cietas, kustīgas detaļas vai gultņa.
- Augsts sagaidāmais kopējais lietderības koeficients, kas labvēlīgākajos apstākļos var sasniegt: $\eta_{MHD+TAc} \approx 25 \%$, ko sastāda MHD ģenerators $\eta_{MHD} = 70 \%$ un TAc dzinēja $\eta_{TAc} = 35 \%$.
- Kvazistatisks darbības režīms, kas ir īpaši piemēroti kosmosam. Ar kvazistatisku šeit jāsaprot tas, ka TAc dzinēja kinētiskā enerģija tiek nodota MHD daļai pateicoties tikai un vienīgi gāzes kustībai.
- Iespēja tiešā veidā iegūt 50 Hz sinusoidālu maiņspriegumu.

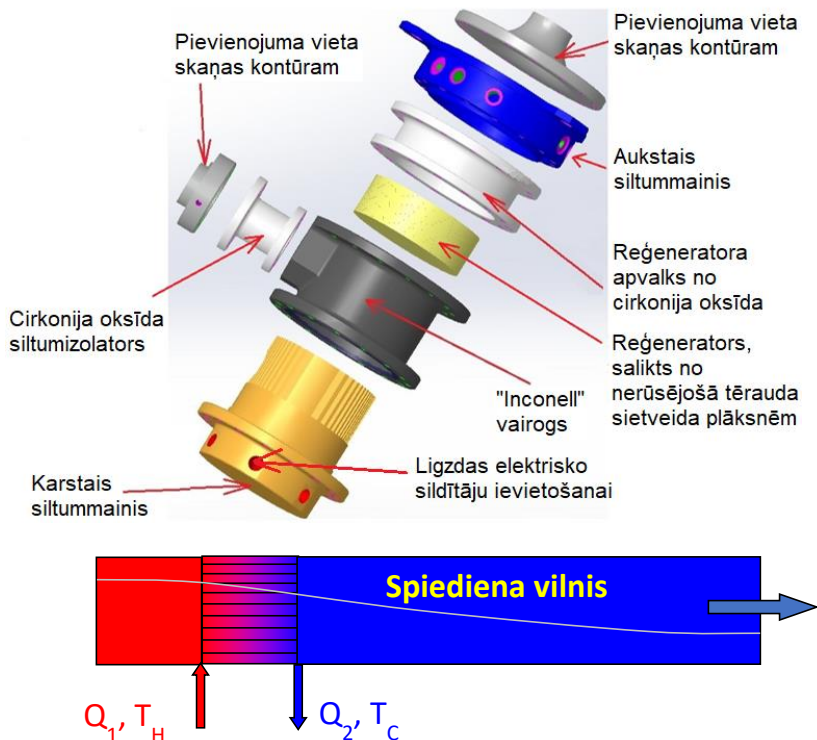
1.1. attēlā ir parādīts iekārtas telpisks modelis gan kopsalikumā, gan atsevišķi izdalot abas mašīnas. Iekārta ir projektēta un rasējumi ir izstrādāti Francijā, Grenoblē, “SERAS-CNRS” laboratorijas konstruktoru birojā. Savukārt, prototips ir izstrādāts Latvijas Universitātes Fizikas Institūta Magnētiskās hidromehānikas laboratorijā. Prototipa izgatavošanas laikā atbilstoši nepieciešamībai konstrukcija un tās atsevišķi mezgli tika autora optimizēti un uzlaboti, taču darbības princips un koncepti tika saglabāti nemainīgi.



1.1. att. Termoakustiskā dzinēja un MHD ģenerators apvienotās sistēmas projektētais modelis (no kreisās – 1., 2. un 3. att.), kā arī reāli izgatavotā prototipa fotogrāfija (4. att.)

1.2. Termoakustiskais dzinējs

Termoakustiskais efekts ir termodinamisks process, kas ļauj pārveidot siltumenerģiju skaņas enerģijā izmantojot izvēlētās darba gāzes temperatūras, blīvuma un spiediena izmaiņas, kā arī to savstarpējo mijiedarbību [42]. Dotajā sistēmā par primāro dzinēju tiek uzskatīts termoakustiskais dzinējs, kas darbojas kā skaņas ģenerators. Tā shēma un sastāvdaļas ir parādītas 1.2. attēlā.



1.2. att. “SpaceTRIPS” termoakustiskā dzinēja shēma un tā sastāvdaļas (augšā); skaņas viļņa izplatīšanās princips termoakustiskajā caurulē (lejā)

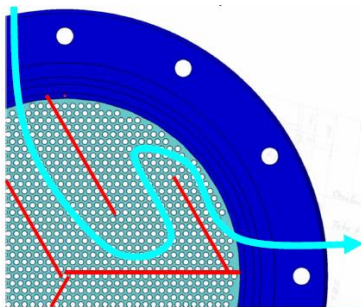


1.3. att. Reģenerators ar cirkonija oksīda keramikas apvalku (pa kreisi), karstais siltummainis (vidū) un samontēts TAC dzinējs ar auksto siltummaini augšdaļā (pa labi)

Termoakustiskā dzinēja galvenā sastāvdaļa ir specifisks siltummainis ar lielu siltumatdeves virsmas laukumu, izveidots no paralēli kopā saliktām un sasietām sietveida nerūsējošā tērauda plāksnēm. Termoakustiskajā literatūrā [43] atkarībā no dzinēja modifikācijas tas tiek saukts par reģeneratoru vai steku (1.3. att., pa kreisi).

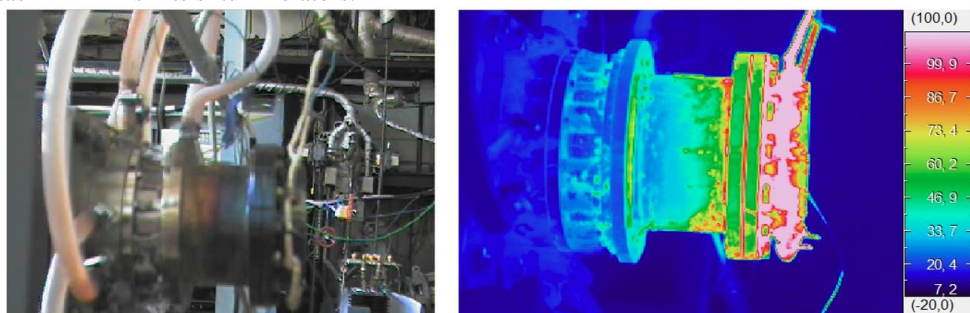
No apkārtējās vides reģenerators ir izolēts ar cirkonija oksīda gredzenveida izolatoru (1.3. att. pa kreisi). Tas ir novietots starp diviem siltummaiņiem, auksto (1.3. att., pa labi) un karsto (1.3. att., pa vidu) – sasildītu līdz 800 °C lielai temperatūrai. Aukstajā siltummainī tiek uzturēta ap 20 °C temperatūra. No “Inconell” tērauda markas izgatavotais karstais siltummainis (1.3. att., pa vidu) tiek sildīts ar elektriskajiem sildītājiem no nihroma un kantāla stieplēm uztītu specifisku spolišu formā, kur spoliēs šajā gadījumā imitē radioaktīvos sildītājus. Šis siltummainis tiek nosegts ar no tā paša “Inconell” materiāla markas izgatavotu apvalku jeb vairogu, pie kura caur papildu keramikas siltumizolatoru pievieno skaņas kontūru.

Zemo temperatūru, savukārt, iegūst izmantojot auksto siltummaini (1.3. att., pa labi). Tā ir sarežģīta detaļa ar specifisku labirintu tās iekšienē, caur kuru laboratorijas apstākļos plūst istabas temperatūras ūdens, kas apskalo 1700 mazas caurulītes ar diametru 1,7 mm, caur kurām plūst dzesējamā gāze – šeit, argons. 1.4. att. ir parādīta dzesējošā ūdens plūšanas shēma aukstā siltummaiņa vienam sektoram. Kā redzams, ūdens plūsmas ceļš ir izveidots ar atdalītājsieniņām, ar mērķi optimizēt dzesējošās plūsmas ceļa trajektoriju. Dzesēšanas un, līdz ar to, akustiskā jauda ir proporcionāla un atkarīga no skaņas ātruma konkrētajā gāzē [17]. No šāda viedokļa vispiemērotākais būtu hēlijs. Tomēr argons, kā darba gāze ir izvēlēts dēļ tā salīdzinoši lielā blīvuma. Tas savukārt noved pie augstākas siltumvadītspējas un, līdz ar to, labākas siltumpārnese starp vielas daļiņām un reģeneratora platēm.



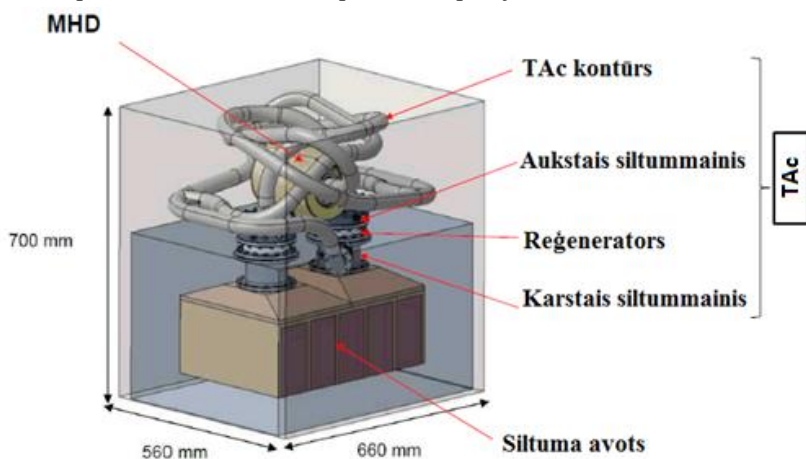
1.4. att. Aukstā siltummaiņa gāzes caurules dzesējošā ūdens plūsmas trajektorijas shēma

Reālā kosmosa pielietojumā Itālijas kosmosa tehnoloģiju izstrādātāja “Thales Alenia Space” zinātnieki paredzējuši dzesēšanu nodrošināt siltumstarojuma veidā, tādējādi nodrošinot aukstā gala temperatūru 150 °C, proti, nodrošinot, lai šī temperatūra vienlaikus ir arī augstāka par Na kušanas temperatūru, kā tas ir aprakstīts [44], [45]. Karstā gala temperatūra paredzēta tāda pati kā laboratorijas eksperimentā – jau minētie 800 °C. 1.2. att. kreisajā pusē redzamais baltais malējais atvads, kā redzams, arī ir no cirkonija oksīda keramikas. Turklāt šim elementam piegulošais skaņas kontūra atloks arī tiek dzesēts. Tas neļauj pa cauruļu sienām siltumam aizplūst prom no karstā siltummaiņa tā paaugstinot lietderības koeficientu, tomēr eksperimenti parādīja, ka šis risinājums nav optimāls. Ziņu par šī materiāla termiski mehāniskajām īpašībām augstas temperatūras un spiediena apstākļos bija ļoti maz, līdz ar to, testējot mašīnu, šie mezgli tika bojāti. Eksperimentu gaitā tie tika nomainīti pret identiskas formas protēzes tipa detaļām no “Inconell” tērauda, kas augstām temperatūrām ir piemērotāks. Tomēr, kā jau bija sagaidāms, un kā parādīja 1.5. att. redzamā ar “NEC” TH9100 termokameru autora uzņemtā termogramma, tas ir samērā slikts siltumizolators.



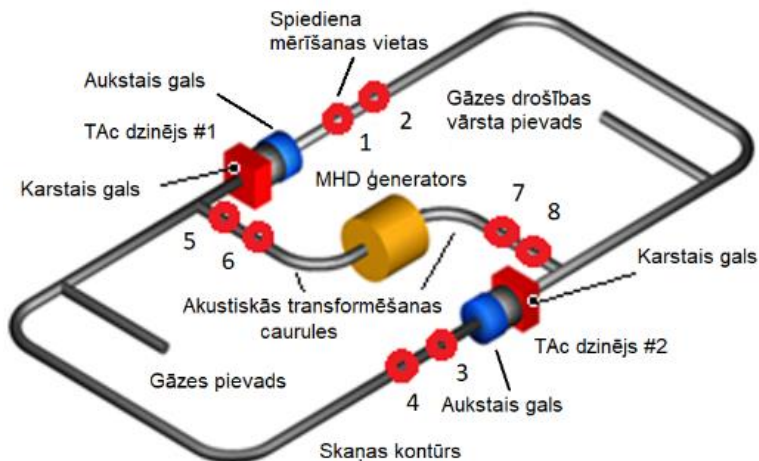
1.5. att. TAc dzinēja uzņemta termogramma mazjaudas režīmā bez siltumizolācijas

Kosmosa prototipam franču kodolenerģētikas uzņēmuma “AREVA” inženieri kā sildelementus paredzējuši 10 radioaktīvā Amerīcija moduļus, kur katrs no tiem nodrošinātu siltumjaudu 145 W, ar masu 4,6 kg gabalā un termālo lietderības koeficientu $\eta_{thermal} = 75\%$. 1.6. att. ir attēlots potenciālais iekārtas kompaktizēts izpildījums kosmosa zondei [44].



1.6. att. “SpaceTRIPS” potenciālais kosmosa variants

Vispārīgi TAc dzinēja konstrukcija var tikt izveidota gan galīga garuma caurulē, radot skaņas stāvvilni, gan noslēgtā cilpā radot skrejvilni. Dotajā iekārtā ir realizēts tieši otrs variants, taču virknē ar vēl otru tādu pašu TAc dzinēju, kas rada konstrukciju, kurā abi toroīdā ieslēgtie TAc dzinēji darbojas kā ierosinātā skrejviļņa pastiprinātāji [46]. Savukārt TAc dzinēja t.s. transformatorcaurulēs aprakstītais skrejvilnis tiek transformēts par stāvvilni. 1.7. att. ir parādīta “SpaceTRIPS” TAc kontūra shēma.



1.7. att. “SpaceTRIPS” kontūra shēma

Skaņas viļņa amplitūda, frekvence un citi parametri ir atkarīgi no [12]:

- Skaņas viļņa izplatīšanās telpas – cauruļu, kā arī siltummaiņu un reģeneratora ģeometrijas.
- Vielas – šeit, inertās darba gāzes – fizikālajām īpašībām, kur vilnis izplatās.
- Temperatūras gradienta reģeneratorā, jeb, īsi sakot, temperatūru starpības uz tā galiem.
- Izmantotās darba gāzes virsspiediena (spiediens virs normāla atmosfēras spiediena).

Pie zināma pievadītā gāzes virsspiediena, stāvoklī, kad temperatūru starpība uz reģeneratora galiem pārsniedz kādu kritisko vērtību, spontāni tiek ģenerēts spiediena vilnis, kas izplatās caurulē ar skaņas ātrumu. Tas rezultējas, kā virsspiediena sinusoidālu svārstību rašanās un tas arī izskaidro minētā skrejviļņa ierosināšanos. Kritiskā ierosmes līkne promocijas darbā ir eksperimentāli uzņemta un demonstrēta 4. nodaļas 4.2. att.

Šis novērojums salāgojas ar faktu, ka skaņa pēc definīcijas ir gāzes spiediena oscilācijas, kas izplatās vidē kā akustisks vilnis. Šādā režīmā cauruļu kontūrā norit akustiskās enerģijas plūsma no viena TAc dzinēja uz otru. Daļa jaudas, savukārt nozarojas uz izvadiem, kuros ir pievienots MHD ģenerators. Minēto izvadu T-veida formas nozarojumu vietās (skat. 1.7. att., akustisko transformatorcauruļu pievienojuma vietas skaņas kontūram) gāzes kustības ātrums ir maksimāls, taču spiediena oscilācijas ir minimālas. Savukārt, izmērot spiedienu pie pašā MHD ģenerators, aina ir pretēja – oscilācijas ir maksimālās, bet ātrums ir tuvs nullei. Dotā īpatnība būtu izskaidrojama ar rezonanses parādību dzinējā – uzspiesto svārstību sakrišanu fāzē ar

brīvajām svārstībām. Tomēr šajā gadījumā ir tikai brīvās svārstības – ārēja svārstību avota nav, jo viens TAc dzinējs pastiprina otru. Rezonanses režīms ir iegūstams atbilstoši pielāgojot mašīnas ģeometriju – cauruļu garumus, šķērsriezumu u.c. [47]. Šeit varētu rasties pretruna ar brīvo svārstību definīciju, proti, ka tām ir vienmēr jābūt rimstošām. Tomēr šajā gadījumā svārstības tiek nepārtraukti mākslīgi uzturētas ar abu TAc dzinēju palīdzību.

Iespējama arī konstrukcija ar vienu TAc dzinēju, tomēr šādam variantam ir vairāki trūkumi, kā, piemēram, nepieciešamība pēc specifiska, ārēja, akustiskā startera, kā arī šāds variants ir jutīgāks pat pret nelielām ģeometriskām izmaiņām akustiskajā topoloģijā, citiem vārdiem attiecībā uz MHD ģeneratoru [10], [11], [43].

1.1. tabula

Termoakustiskās iekārtas raksturīgie nominālie parametri

Darba gāze	Virspiediens	Sagaidāmā oscilāciju amplitūda	Kopējā pievadāmā siltumjauka TAc	Sagaidāmā akustiskā izejas jauda	Sagaidāmais Kamo lietderības koeficients	Temperatūra karstajā siltummainī	Temperatūra aukstajā siltummainī
Argons	40 bar	+/- 6 bar	1000 W	350 W	66 %	800 °C	20 °C

TAc iekārtas nominālie dati ir parādīti 1.1. tabulā. Katra uzbūvētā TAc dzinēja jauda ir 500 W.

Akustiskās jaudas mērījumiem tika pielietota tā saucamā „dpdx” jeb „divu sensoru” metode, kas balstās uz akustiskā gāzes spiediena gradienta mērījumiem [48]. Tas nozīmē, ka jauda tiek aprēķināta no 2 blakus esošiem spiediena devēju rādījumiem. Kā redzams, 1.6. att., šādas mērījumu vietas kontūrā tika iestrādātas 4. Pa divām akustiskās jaudas kontūrā un pa divām transformatorcaurulēs. Izteiksme, pēc kuras aprēķina termoakustiskā dzinēja attīstāmo jaudu, ir sekojoša :

$$P_{AC} = \frac{A}{2\rho\omega\Delta x} (p_{a1}p_{a2} \sin \phi) . \quad (1.1)$$

Šeit jauda ir atkarīga no:

- A – caurules šķērsriezuma laukuma (“SpaceTRIPS” iekārtā – 7,065 cm²),
- Δx – attāluma starp mērījumu punktiem (šeit – 10 cm starp spiediena devējiem),
- ω – svārstību leņķiskās frekvences,
- ρ – gāzes blīvuma, kas ir vienlaikus funkcija no virspiediena,
- p_{a1}, p_{a2} – spiediena svārstību amplitūdām abos devējos,
- φ – fāžu nobīdes leņķa starp abām spiediena svārstību sinusoīdām.

Šāds leņķis ir nepieciešams, jo izmērot tikai spiediena svārstību amplitūdas, netiek iegūta informācija par akustisko impedanci. Vienlaikus, lai iegūtu pilnu priekšstatu par akustisko ainu,

nepieciešami sarežģīti kompleksās akustiskās pretestības mērījumi, kā arī informācija par gāzes pārvietojumu. Savukārt izmantotā gradienta metode no divu blakus esošo devēju mērījumiem vajadzības gadījumā ļauj tālāk iegūt datus kā par skaņas ātrumu, tā arī par paātrinājumu un gāzes tilpumu starp devējiem.

Esošā disertācija ir elektrotehnisks pētījums, tomēr, neskatoties uz to, apakšnodaļas noslēgumā autoraprāt būtu lietderīgi īsi un konspektīvi aprakstīt dažus ar termoakustiku saistītus svarīgākos pamatjautājumus [43].

Kā jau teikts, parasti ar skaņu saprot spiediena svārstības, kas noris līdz ar vides (piemēram, gāzes) oscilējošām kustībām. Tomēr no termoakustikas viedokļa nav jācenšas skaņu apskatīt no tradicionālās pieejas: spiediena - vides kustības ātruma svārstību viedokļa. Tā vietā apskata skaņas parādību no (gāzes) tilpuma pārvietojuma – temperatūras svārstību viedokļa. Piemēram, rakstā [49] ir dota vienkāršota triju termoakustikas vienādojumu sistēma. Šī sistēma sastāv no viena parciālā un diviem parastajiem diferenciālvienādojumiem, kas sajūdz kopā vidējās temperatūras, tilpuma plūsmas, kā arī spiediena izmaiņas, skaņas viļņa izplatīšanās laikā.

Tā kā dzinēja darba ķermenis (vispārīgi šķidrums vai gāze) skaņas viļņa izplatīšanās gaitā veic ciklisku gāzes sildīšanu, izplešanos, atdzesēšanu un saspiešanu (1.7+ att.), tad pilnai termoakustikas teorijai būtu jāiekļauj siltuma izplatīšanās darba ķermenī. Vienlaikus labu tuvinājumu var veikt, piemēram, pieņemot, ka process ir adiabatisks [37]. Tomēr pat, ja nenotiek nekāda siltuma apmaiņa gāzes adiabatiskās saspiešanās laikā, darba gāzes temperatūra mainīsies, no kā arī var spriest par siltuma plūsmas virzienu. Adiabatiskā aproksimācijā, viendimensionāls skaņas viļņu vienādojums ir uzrakstāms sekojoši:

$$c^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \quad , \quad (1.1+)$$

Tad vilnim ar leņķisko frekvenci – ω , un $\omega = kc$, kur k – viļņu skaitlis, atrisinājums ātrumam, kas apmierina augstāminēto viļņu vienādojumu ir pierakstāms sekojoši:

$$v = v_A \cos(\omega t - kx) + v_B \cos(\omega t + kx) \quad . \quad (1.2+)$$

Dotajā formulā v_A – pamatviļņa ātrums, v_B – ātrums atstarotajam vilnim. Ja $v_A = v_B$, tad tas nozīmē, ka tiek apskatīts stāvvilnis. Pretējā gadījumā, ja v_A vai $v_B = 0$, tad iestājas ideāla skrejviļņa gadījums, kas nozīmē to, ka atstarotais vilnis tiek absorbēts. Līdzīgas trigonometriskas izteiksmes varētu uzrakstīt arī gāzes tilpuma, spiediena, un temperatūras svārstībām.

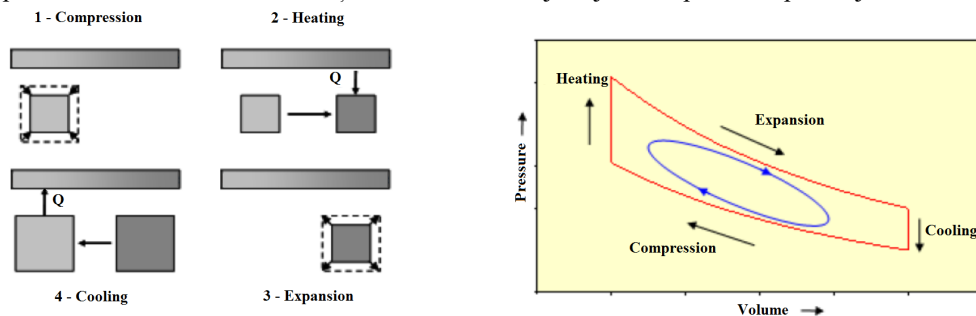
Augstāk izklāstītais pamatā attiecas uz vienkāršu skaņas izplatīšanos telpā. Procesi reģeneratorā ir jāpēta atsevišķi. No tāda viedokļa, termoakustiskā dzinēja darbību var skaidrot 1.7. att. redzamo konstrukciju saliekot no detaļām un cenšoties izsekot skaņas situācijas izmaiņām. Kamēr kontūrs ir viens pats - bez reģeneratoriem (vai arī tie ir auksti), bez jebkādiem atzariem, kā arī tostarp bez MHD iekārtas - tas skaņu ģenerēt nevar, bet var kalpot par rezonatoru no ārpusē nākošam troksnim. Skaņas ātrumu un gāzes blīvumu pieņemot vienādu ar 1, bet 1.7. att. akustiskā kontūra kopgarumu par 2π , rezonanses leņķiskā frekvence arī iznāk 1. Kontūra iekšpusē nonākušais troksnis sastāv no diviem, savstarpēji neatkarīgiem, viens otram pretī skrejošiem viļņiem. Pozitīvajā (pamata) virzienā skrejošajā vilnī gāzes ātrums svārstās fāzē ar spiedienu “P” un izvēlētajās mērvienībās abu amplitūdas ir vienādas: $v=P$. Pretī skrejošajam vilnim “v” ir pretfāzē ar “P”, tātad $v=-P$.

Situācija mainās, ja teoretizētas demonstrācijas nolūkā starp diviem, tieši pretējiem kontūra punktiem pievieno nulles garuma atzarus starp kuriem ieslēdz regulējamu gāzes vārstu. Kad vienā vārsta pusē spiediens ir “P”, tad otrā ir “-P”. Tad, vārstu atverot, uz to darbosies spiediens 2P, un pie vārsta caurlaidības “k” vārstam caurplūst: $v=2kP$. Tieši tik daudz pietrūkst nākamajam kustības periodam. Rezultātā gāze pārplūdis no vienas vietas uz otru, un abi augstākminētie viļņi rims atbilstoši eksponentei: e^{-2kt} , līdz ar to rezonanse izbeidzas.

Lai skaņas plūsmu atjaunotu, abus reģeneratorus jāuzstāda ar siltajiem galiem tieši vārsta pievadū sākpunktos un jāsilda. Tad caur reģeneratoru plūstošā gāze izpletīsies, un tās ātrums karstajā galā būs $v_{max}=v_{min}*(T_{max}/T_{min})$. Pie $(T_{max}/T_{min})/T_{min}=2k$ ātruma pieaugums pamatvilnim (kurš reģeneratoru caurskrien virzienā no aukstā gala uz silto) kompensē cauri vārstam izplūdušo. Šādi vilnis aug līdz to ierobežo siltumapgāde. Bet tas attieksies tikai uz pamatvilni. Pretējā virzienā skrejošā viļņa rimšanas temps dubultosies: e^{-4kt} . Pretvilnim, kā jau tika teikts: $v=-P$. Tādā gadījumā ātruma pieaugums nekompensē aizplūdi “2kP”, bet gan tai pieskaitās.

Pamatvilnis saglabāsies arī tad, ja 0-garuma atzarus pagarināsīm un vārstu aizstāsīm ar MHD ģeneratoru (kurā varētu jau pastāvēt arī zināma fāzes nobīde starp spiedienu un ātrumu). Atzaros ieplūdis/aizplūdis daļa no gāzes, bet ģenerācijas sliekšnis nedaudz izmainīsies. Tomēr neizmainīsies fakts, ka MHD ģeneratorā un tā pievadus (transformatorcaurulēs) pastāv stāvvilnis, kamēr pašā kontūrā - skrejvilnis. Aina vairāk izmainītos, ja atzaru pievienojuma vietas pārbīdītos (piemēram, attālinātos no reģeneratoriem, kā tas ir realitātē) vai arī tiktu pieslēgti citi papildatzari. Vienkāršos vārdos, nākas sabalansēt ātrumus jau četros, pa pāriem simetriskos punktos un runāt par viļņu atstarošanu no tiem. Šie punkti visu kontūru sadala vairākos posmos, kuros visos dominē pozitīvais vilnis, bet ar zināmu negatīvā viļņa piedevu. Tātad katra segmentā pastāv abi viļņi, tikai dažādā attiecībā. Pareizi izvēloties atzaru, tostarp koriģējošo papildatvadu garumus, un to vietu, ģenerāciju var optimizēt. Šai optimizācijai “SpaceTRIPS” iekārtas gadījumā projektētāji lietoja speciāli izveidotu datorprogrammu.

Jāņem vērā, ka šī ir tikai maza daļa no termoakustikas pamatsakarībām, un šeit netiek apskatīti daudzi citi svarīgi aspekti. Tādi ir, piemēram: gāzes kustības un plūsmas nepārtrauktības vienādojumu linearizēšana; apskatīto lielumu sakarības ar dzinēja ģeometriskajiem parametriem; akustiskās parādības, kas saistāmas ar nekontrolētu masas pārnesi; turbulences un robežslāņu ietekme, u.c. Šie jautājumi ir aprakstīti speciālajā literatūrā.



1.7+ att. TAc dzinēja darbību raksturojošais termodinamiskais cikls un darbības principu ilustrējošā enerģijas pārveidošanās diagramma

1.3. Maiņstrāvas magnetohidrodinamiskais ģenerators

No TAc dzinēja nākošā skaņa liek izkausētam nātrijam MHD ģenerators gredzenveida kanālā svārstīties aksiālā virzienā. Elektriskās mašīnas konstruktīvie elementi un to izvietojums ir attēloti 1.8. zīmējumā. Uz mašīnas centrālo asi vērsta, radiālā virzienā magnetizēti samārijakobalta ($\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, ar koercitīvo spēku $H_c=817$ kA/m) pastāvīgie magnēti (2 – šajā apakšnodaļā šeit un turpmāk cipari slīprakstā iekavās atbilst cipariem 1.8. att.) rada aktīvajā daļā – gredzenveida nātrija kanālā (6) – pastāvīgu magnētisko lauku (parādīts ar brūnām bultiņām), kas kustīgajā šķidrajā metālā inducē noslēgtu, azimutālu maiņstrāvu. Šīs maiņstrāvas radītais pulsējošais magnētiskais lauks pēc superpozīcijas principa summējas ar pastāvīgo magnētu radīto magnētisko lauku un inducē elektriskās mašīnas tinumā (7) laikā mainīgu EDS. Līdz ar to, tinumam pieslēdzot slodzi, tajā sāk plūst sinusoidāla maiņstrāva. No teiktā izriet, ka nepieciešamais nosacījums strāvas ģenerācijai ir šķidrās, elektrovadošās vides kustība attiecībā pret magnētisko lauku, jo ir saprotams, ka nekustīgais magnēts pats par sevi tinumā neinducēs. Elektriskās mašīnas spolē ir uztiņti 400 vijumi un ir izmantots standarta emaljēts viendzīslas vara vads 0,6 mm diametrā.

Tādat nātrija strāvas ģenerācijas process ietver sevī trīs ortogonālus vektorus:

- 1) Na oscilējošās plūsmas ātrums aksiālā virzienā: $\mathbf{v}(t)$,
- 2) Pastāvīgo magnētu radītais, pieliktais magnētiskais lauks radiālā virzienā: $\mathbf{B}(z)$,
- 3) Elektriskais lauks azimutālā virzienā: $\mathbf{v}(t) \times \mathbf{B}(z)$.

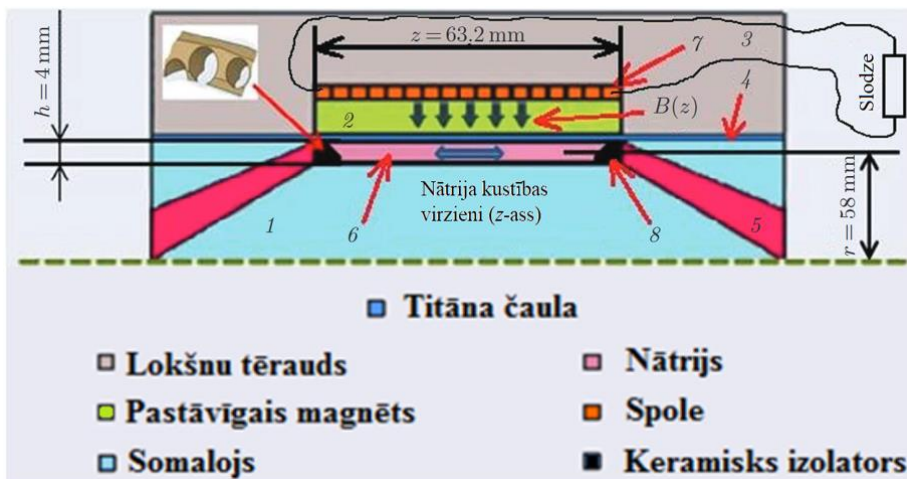
Pēdējais tika izmērīts tukšā Na kanālā un tā vērtība bija 0,33 T.

Mašīnas magnētiskās ķēdes ārējā daļa ir izveidota no radiāli šiltētiem tradicionāla elektrotehniskā tērauda markas M400-50A skārdiem (3), bet iekšējā daļa no augstvērtīga feromagnētiska materiāla – Somaloja (1). Šis zviedru uzņēmuma “Höganäs” ražotais magnētiski mīksts materiāls ir dielektriķis, veidots no epoksīda sveķiem, sapresētiem un sakausētiem ar smalkām dzelzs skaidām, noklātām ar nanopārklājumu. Tā vadītspēja tika mērīta un ir zema – vairākus simtus reižu mazāka kā tipiskam elektrotehniskajam tēraudam. Tas nodrošina ļoti zemu magnētisko zudumu no inducētajām virpuļstrāvām. LU Fizikas Institutā atsevišķā papildus eksperimentā tika eksperimentāli konstatēts, ka tas nereaģē ar nātriju, kā arī ir salīdzinoši viegli apstrādājams. Šis eksperiments tika veikts, jo dotais konstruktīvais elements mašīnas darbības laikā atrodas tiešā saskarē ar šķidru metālu.

1.2. tabula

MHD ģenerators raksturīgie nominālie parametri

Nātrija temperatūra	Nātrija kustības amplitūda	Svārstību frekvence	Sagaidāmā izejas jauda	Nātrija masa	Ārējais diametrs
100 – 120 °C	±25 mm	50 Hz	200 W	480 g	200 mm



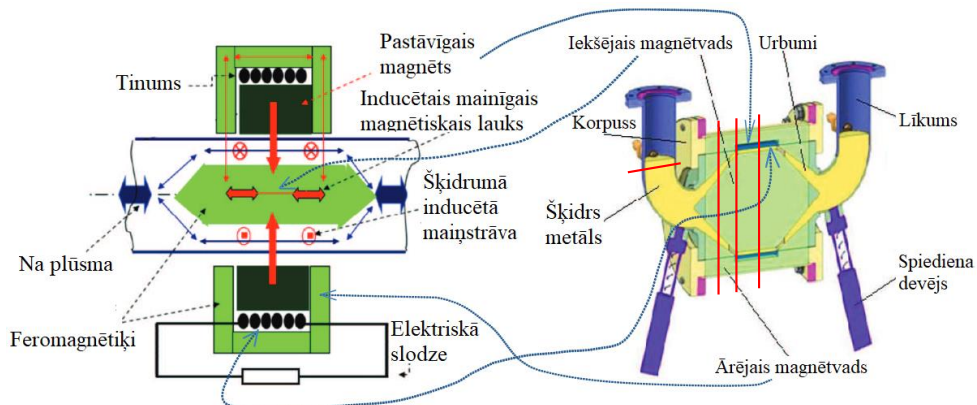
1.8. att. MHD ģenerators šķērsriezuma vienas puses shematiskais attēlojums

Elektriskās mašīnas konstrukcija mašīnas aktīvajā daļā ir aksiāli simetriska un tās “CNRS” konstruktora izstrādātā 3D modeļa aksiālgriezums ir parādīts 1.9. attēlā. Šeit ir jāatzīmē, ka ģenerators magnētiskā sistēma ir veidota nevis no viena gredzenveidīga, monolīta, radiāli magnetizēta pastāvīgā magnēta, bet gan no 16 vienādiem, pa aploci izvietotiem, sekcioniem, savstarpēji elektriski izolētiem, sektorveidīgiem magnētiem, kas viens otram cieši blakus gredzenveidā piekļaujas klāt. Bez tehnoloģiskām priekšrocībām dēļ ērtākas un vienkāršākas izgatavošanas, tam ir nozīme arī no elektromagnētiskā viedokļa. Tādējādi iespējams samazināt pastāvīgo magnētu materiālā inducētās azimutālās virpuļstrāvas rezultējošā mainīgā magnētiskā lauka dēļ. Iemesls šīm virpuļstrāvām ir magnētu materiāla samērā augstā īpatnējā elektrovadītspēja. Šķidru metālu no ārpuses satur kopā 0,2 mm plāna, metināta, “Grade2” markas titāna čaula (4). Tā atdala nātriju no pastāvīgā magnēta. 1.1. un 1.2. tabulās uzrādītie lielumi ir ģenerators konstruēšanas un sākotnējās projektēšanas stadijā par ģenerators nominālajiem parametriem iekārtas projektētāju izvēlētie un pieņemtie ieejas dati [44]. Zinot, piemēram, Na pārvietošanu un frekvenci, iespējams izteikt šķidruma kustības ātrumu un otrādi.

Kā redzams, tad ģeneratorā ir nepieciešama pāreja no gredzenveida šķidruma kanāla uz cilindrisku, ar nemainīgu summāro šķērsriezuma laukumu. Lai šādu pāreju iegūtu, no atsevišķiem diskiem salīmētajā Somaloja serdē tika veikti 72 dažāda diametra specifiskas konfigurācijas azimutāli vairākazimutu urbumi (5). Titāna malējie atloki izgatavoti izmantojot 3D printēšanas tehnoloģiju metāla izstrādājumiem, kas balstīta uz punktmetināšanas metodiku. Tie ir parādīti 1.10. attēlā, kā no vienas, tā no otras puses. Rezultātā atlokā ir iegūta pāreja no apaļa šķērsriezuma urbuma Somalojam piegulošajā pusē uz kantainu taisnstūrveida šķērsriezumu ārpusē.

1.11. attēlā ir parādīta secīga pāreja no gredzenveida kanāla magnētiskā lauka zonā uz apaļu šķērsriezumu likājā pagriezienā. Dotajā attēlā ir parādīts kā šķērsriezums dinamiski mainās atbilstoši 1.9. att. pa labi, iezīmētajām sarkanajām līnijām ejot no labās puses uz kreiso.

Nātrija gredzenveida kanālu abos galos daļēji noslēdz keramiski izolatori (8, kā arī attēloti palielināti 1.8.att, augšā – pa kreisi). Tie ir iestrādāti, lai vismaz daļēji novērstu MHD mašīnām



1.9. att. MHD ģenerators modeļa aksiāls griezumam ar paskaidrojumiem

raksturīgos nevēlamos gala efektus, kas izpaužas kā parazitisku, šuntējošu virpuļstrāvu inducēšanās kanāla galos [50]–[53]. Šādas parazitiskas strāvas veidojas, jo magnētiskais lauks vairs nav konstants. Magnētu galos tas ievērojami krītas, samazinoties gandrīz līdz nullei. Sīkāk tas ir pētīts darba 2. nodaļā, skaitliski aprēķināts un vizualizēts 2.9. att. grafikā. Aprakstītais efekts ir arī iemesls divu elektriskā lauka daļu izcelsmei Oma likuma izteiksmē (2.2.).

Par gala efektiem elektrisko mašīnu un MHD literatūrā tradicionāli sauc parādības, kas ir saistāmas ar induktoru, spoļu, MHD sūkņu u.c. elektromagnētisku iekārtu galīgajiem garumiem. Tas nereti noved pie elektromagnētiskā lauka nehomogenitātēm apskatāmo iekārtu galos un citviet. Piemēram, plakana trīsfāžu elektromagnētiskā sūkņa gadījumā papildus gala efektam garenvirzienā, dēļ skrejoša magnētiskā lauka atstarotā viļņa, atsevišķi izdala vēl arī šķērsefektu sūkņa kanāla limitētā platuma dēļ. Šķidrā metālā inducētās strāvas, līdz ar to, noslēdzas paralēli kanālam. Visa tā rezultātā bieži novērojama virkne nevēlamu parādību, līdzīgi jau aprakstītajām.

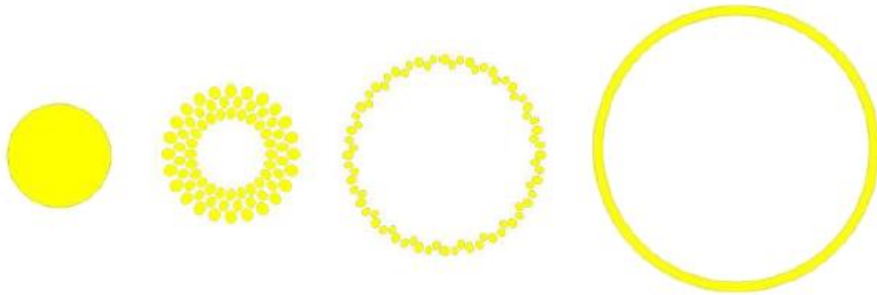
Arī pētāmā MHD ģenerators gadījumā minētās šuntējošās strāvas nelabvēlīgi ietekmē elektriskās mašīnas darbību. Šīs strāvas atspoguļojas aizvietošanas shēmā kā aktīvā pretestība R_0 . Minētais jautājums sīkāk tiks apskatīts nodaļā par mašīnas teorētisko izpēti.

1.12. att. ir parādīti secīgi fragmenti no autora koordinētā MHD ģenerators izgatavošanas procesa un montāžas. No attēlā dotajām fotogrāfijām var spriest par iekārtas salikšanas secību. Pirmajās divās fotogrāfijās (augšējā rindā, no kreisās puses) ir parādīts magnētu līmēšanas process. Līmēšana norit ar atbilstoši tam izstrādātu radiālu vadotņu sistēmu, kā redzams minētajās divās bildēs. Tās darbības princips ir sekojošs:

- Magnēts piekļaujas savam atbilstošajam dzelzs sektoram ar savu magnētisko spēku;
- Magnēta otrajā pusē tiek uzklāta līme;
- Ar vadotnes palīdzību magnēts tiek tuvināts titāna čaulas virsmai līdz tiek pielīmēts;
- Pēc līmes sacietēšanas tās līmējošais spēks ir lielāks par magnētisko spēku, kas tur magnētu pie dzelzs sektora un, līdz ar to, feromagnētiskā palīgdetāļa pa vadotni var tikt atvirzīta nost no magnēta.



1.10. att. Ar 3D printēšanas tehnoloģiju izgatavotie mašīnas malējie titāna atloki ar apakškanālu pāreju no kantainas formas uz apaļu – detaļa parādīta kā no vienas, tā otras puses



1.11. att. Nātrija plūsmas šķērsriezuma maiņa elektriskās mašīnas vairākos secīgos griezumos



1.12. att. MHD ģenerators izgatavošana un salikšanas secība

Tālākajās 2 fotogrāfijās ir parādīta magnētu virsmas noklāšana ar elektrisko izolāciju, tādējādi sagatavojot virsmu spoles uztīšanai, kā arī pati uztītā spole. Apakšējās rindas kreisajā attēlā ir redzama ārējā magnētvasda salikšana no elektrotehniskā tērauda skārdiem, tam pamazām pilnībā aptverot ģenerators spoli. Nākošajos divos foto gatavā elektromagnētiskā iekārta tiek ieslēgta korpusā, tiek pieslēgti pagriezieni, kā arī pievienots Na uzpildes trakts.

Visbeidzot pēdējā fotogrāfijā ģenerators tiek apriekots ar elektriskajiem sildītājiem,

termopāriem, Na līmeņrāžiem, spiediena devējiem un elektromagnētisko plūsmas mērītāju. Pēdējam ir skaidri saskatāma tam speciāli izveidotā C-veida magnētiskā sistēma ar pastāvīgajiem magnētiem un tā ir parādīta ar sarkanu.

Apskatot 1.2. tabulā redzamos MHD ģenerators parametrus, varētu spriest, ka magnētiskais Reynoldska skaitlis ir mazs pateicoties iekārtas mazajiem izmēriem. To ir iespējams novērtēt. Raksta [56] autori piedāvā pētāmā MHD ģenerators magnētiskā Reynoldska skaitļa definējumu, pielietojot svārstību leņķisko frekvenci. Tādā gadījumā Rm vērtība ir iegūstama sekojoši:

$$Rm = \omega L^2 \sigma \mu \mu_0 = 314,16 \cdot 0,004^2 \cdot 10,36 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} = 0,065 \quad , \quad (1.2)$$

kur $\omega = 2\pi f$, kas ir leņķiskā frekvence. Šādu pierakstu ir vērts lietot, interesējoties par skinefektu.

Vēl viens iespējama magnētiskā Reynoldska skaitļa interpretējums jeb definīcija pētāmajam ģeneratoram var tikt sniegts sekojoši. Izmantojot 1.8. att. un 1.2. tabulā norādītos datus, iegūt sekojošu skaitlisku vērtību:

$$Rm = vL\sigma\mu\mu_0 = 7,85 \cdot 0,004 \cdot 10,36 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} = 0,41 \quad , \quad (1.3)$$

kur augstākminētajās formulās esošie lielumi atšifrēti zemāk:

- v — raksturīgais Na plūsmas ātrums, kas var tikt iegūts gan no tabulas 1.2., zinot frekvenci un sagaidāmo šķidruma pārvietojumu, gan arī izmantojot darba 3. nodaļā veikto aprēķinu rezultātus,
- L — raksturīgais izmērs, kas, šajā gadījumā ir ņemts, kā kanāla augstums,
- σ — Na īpatnējā elektrovadītspēja,
- μ — Na relatīvā magnētiskā caurlaidība,
- μ_0 — absolūtā magnētiskā caurlaidība vakuamam.

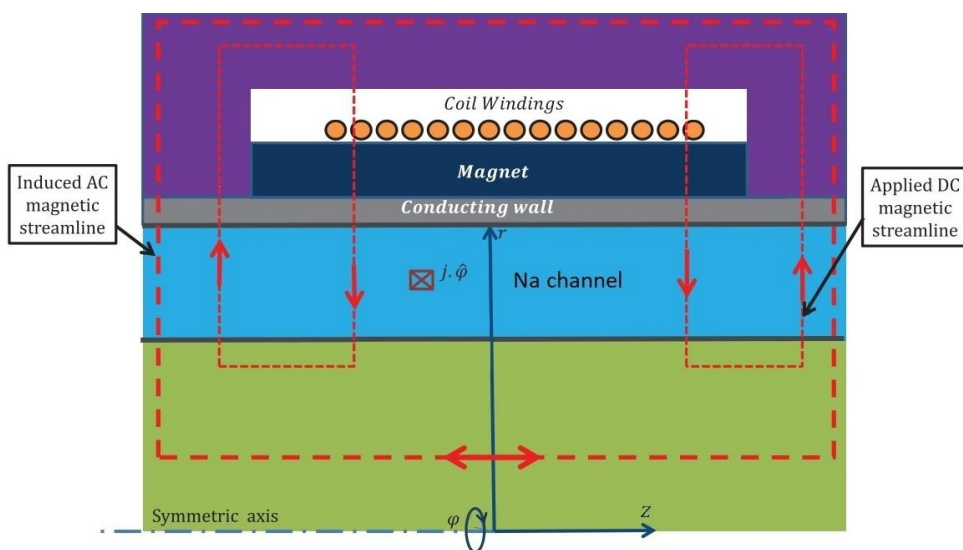
Kā redzams, Rm vērtība abos gadījumos ir mazāka par 1. Šeit gan ir jāatzīmē, ka šādā nostādņē tiek apskatīti tikai lokāli procesi saistīti ar vienu pašu šķidruma plūsmu kanālā. Tomēr sākot interesēties par to, kāds varētu būt Rm skaitlis visam ģeneratoram kopumā, un atceroties to, ka elektromagnētiskās enerģijas pārveidošanās process ļoti būtiskā mērā noris arī pateicoties MHD ģenerators feromagnētiskajām daļām, Rm skaitļa vērtība var ievērojami atšķirties no (1.3.) izteiksmē aprēķinātās. Tādā gadījumā var atsevišķi izdalīt nupat aprēķināto lokālo Rm skaitli no globālā magnētiskā Reynoldska skaitļa, kurā būtu jāņem vērā arī feromagnētiķa magnētiskā caurlaidība kādā magnētiskās ķēdes punktā, kas ir ievērojami atšķirīga no vieninieka. Piemēram, Somaloja ražotāja sniegtajā datu lapā uzrādīta relatīvās magnētiskās caurlaidības vērtība: 350, pie 0,2 T stipra magnētiskā lauka [54], [55]. Tas novestu pie tā, ka arī Rm vērtība var pārsniegt 1, kas parāda to, ka inducētais magnētiskais lauks jau jūtami ietekmē pielikto magnētisko lauku.

Jāņem vērā, ka Rm skaitlis tomēr ir orientējošs lielums, kas, tostarp, ir stipri atkarīgs no pareiza raksturīgā izmēra izvēles. Piemēram, kanāla augstuma vietā izvēloties kanāla garumu, pēc (1.3) formulas aprēķinātais Rm palielinās vairāk kā 9 reizes. Uz enkura reakciju ir attiecināms tieši šis gadījums. Līdz ar to, papildus nupat aprakstītajam ieviestajam Rm iedalījumam globālajā un lokālajā, var sagaidīt, ka savdabīgs “efektīvais” magnētiskais Reynoldska skaitlis būtu starp abiem minētajiem.

Analītiski aprakstīto parādību iespējams pētīt, apskatot indukcijas vienādojumu bezdimensionālā formā, kas ir viens no MHD pamatvienādojumiem, apraksta magnētiskā lauka

un šķidrums plūsmas ātruma saistību kustīgā vadošā vidē, un ir uzraksfīts darba 3. nodaļas sākumā (skat. paragrāfu 3.1.). Salīdzinot atbilstošos locekļus vienādojuma labajā pusē, ir redzams, ka magnētiskā lauka konvekcijas loceklis dominē pār difūzijas locekli, ja $R_m \gg 1$.

Veicot magnētiskā lauka skaitlisku modelēšanu, vizuāli šī inducētā lauka ietekme ir nepārprotami saskatāma, salīdzinot sākotnējā pieliktā un rezultējošā lauka modeļus 2.3. un 2.5. att., kas tiks parādīti darba 2. nodaļā. Kvantitatīvs enkura reakcijas ietekmes novērtējums ir attēlots 2.3. paragrāfā, 2.24. att. No šejienes ir redzams, ka inducētā magnētiskā lauka ietekme spēlē jūtamu un izmērāmu lomu attiecībā uz elektriskās mašīnas enerģētiskajiem parametriem. Šajā attēlā salīdzinot, piemēram, maksimālo lietderības koeficientu gadījumam bez sekundārā lauka un ar pieliktu 200 W nominālo slodzi, redzams, ka sekundārais magnētiskais lauks pasliktina mašīnas lietderības koeficientu par 2%. Šāds samazinājums, kā redzams, ir relatīvi neliels. Tomēr salīdzinot gadījumus pie lielākām slodzes pretestībām, kritums jau ir lielāks, turklāt, ievērojami palielinoties noslodzei, samazinājums jau sāk spēlēt būtisku lomu. Ņemot vērā iepriekšminēto, rezultējošā magnētiskā lauka deformācija lielākā vai mazākā mērā notiek arī pie R_m skaitļa mazāka par 1, jo vispārīgā gadījumā nav novelkama strikta robeža par to kurā gadījumā $R_m \ll 1$.



1.13. att. MHD ģeneratora pieliktā un inducētā magnētiskā lauka shematiska konfigurācija [56]

1.13. att. ir parādīta vienkāršota ģeneratoram pieliktā un inducētā magnētiskā lauka shēma, kas aizgūta no [56] un nedaudz modificēta, vienkāršojot to.

Nodaļas noslēgumā ir vērts pateikt vēl dažus vārdus attiecībā uz MHD ģeneratora konstrukcijas simetriju. Elektriskās mašīnas aktīvā daļa – tā daļa, kurā pamatā notiek elektromagnētiskā enerģijas pārveidošanās – patiešām ir aksiāli simetriska. Tomēr ar būtisku atrunu. Tāda tā ir tikai ģeneratora vidū. Proti, cilindriskajā gredzenveida kanālā no viena

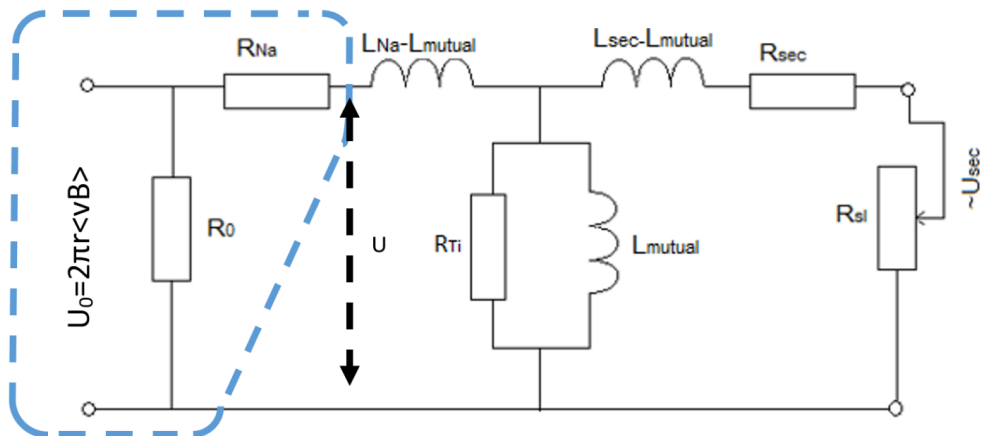
izolatora līdz otram, kanāla pretējās pusēs. Sākoties keramisko izolatoru zonai, reālā ģeometrija ievērojami sarežģījas pateicoties komplicētajai vairākazimutu urbumu sistēmai, kas tostarp iet arī cauri izolatoriem. Skatīt 1.8., 1.11. un 2.17. att. Tas noved pie tā, ka reālās magnētiskās plūsmas ceļš ir telpiski ievērojami sarežģītāks nekā tas būtu 2.2. att. parādītajā pilnīgi aksiāli simetriskā izpildījumā, kāds tika modelēts un pētīts darba teorētiskajās nodaļās. Līdz ar to aksiālā simetrija mašīnas galos zūd un magnētiskajai plūsmai veicamais ceļš caur Somaloju ir komplicētas labirinta struktūras veidā apejot urbumus (vēlreiz skat. 2.17. att.). Sīkāk minētie 2. nodaļas attēli aprakstīti turpmākajā izklāstā.

2. EKVIVALENTĀ ELEKTRISKĀ AIZVIETOŠANAS SHĒMA MHD ĢENERATORA ANALĪZEI

2.1. Transformatora ekvivalentās shēmas pieejas formulējums

Pētāmais maiņstrāvas MHD ģenerators var tikt apskatīts, kā sastāvošs no divām elektriskajām mašīnām:

- 1) Kondukcijas tipa maiņstrāvas MHD ģenerators šķidra Na hidrodinamiskās plūsmas enerģijas pārveidošanai elektriskajā enerģijā. Attēlots 2.1. att. ar zilu, pārtrauktu līniju.
- 2) Transformatora, kas nātrijā inducēto elektrisko strāvu pārveido patērētājam piemērotā elektriskajā spriegumā. 2.1. att. attēla pārējā daļa.



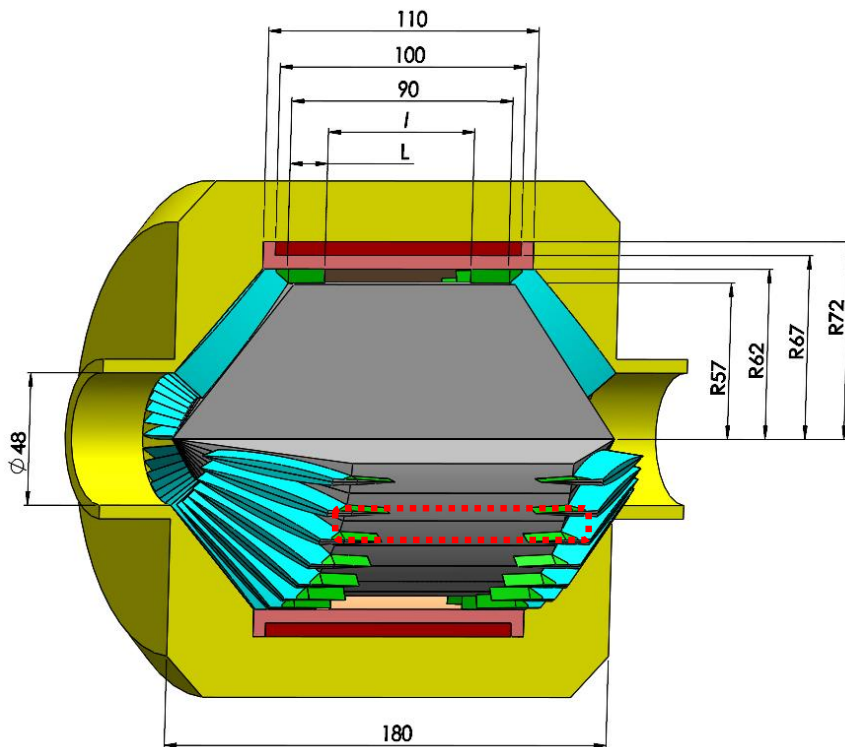
2.1. att. MHD ģenerators elektriskā aizvietošanas shēma

Par kondukcijas tipa MHD sūkņiem un plūsmas mērītājiem sauc šķidra metāla iekārtas, kurās MHD mijiedarbība notiek pateicoties pieliktam magnētiskajam laukam un šķidram metālam ārēji pievadītai strāvai konduktīvā ceļā [38]. Tas nozīmē strāvas pievadu izmantošanu, kas tieša elektriskā kontakta rezultātā nonāk saskarē ar šķidru metālu vai kanālu, kas parasti arī ir no elektrovadoša materiāla. Pretēji tam, indukcijas tipa MHD iekārtās strāvas šķidrā metālā tiek ierosinātas pateicoties elektromagnētiskās indukcijas parādībai [52], [57]. Neskatoties uz to, ka dotajā disertācijā tiek izmantota kondukcijas tipa MHD mašīnu teorija, reāli pētāmā elektriskā mašīna ir induktīva tipa enerģijas pārveidotājs, jo strāva konduktīvā ceļā pievadīta netiek.

Kā zināms, transformatora “T” veida aizvietošanas shēma sastāv no primārā un sekundārā tinumu aktīvo un induktīvo pretestību elektriska slēguma, kur vidējais zars nosaka magnetizēšanas strāvu. Iedomājoties, ka ir pievadīts spriegums primārajā pusē, teorētiski, mērot spriegumu sekundārajā pusē, iespējams noteikt induktivitāti L_{mutual} un otrādi – pievadot spriegumu labajā pusē un mērot no kreisās, var atrast to pašu.

Papildus tam, shēmā ir attēlota MHD mašīnām raksturīgos gala efektus raksturojošā šuntējošā aktīvā pretestība R_0 . Savukārt, pateicoties Somaloja īpašībām, magnētiskie zudumi ir mazi un attēlotajā ekvivalentajā shēmā netiek ņemti vērā.

Kā jau atzīmēts iepriekšējās nodaļas beigās, kopvērtējumā mašīnas konstruktīvais izpildījums, kā arī elektromagnētisko lauku konfigurācija ir visai sarežģīti. Līdz ar to piedāvātās metodes darbības demonstrācijai ir izveidots vienkāršots ģeometrisks modelis (2.2. att.), kas ar pietiekamu precizitāti ļauj izmantot divdimensionālus magnētisko un elektrisko lauku aprēķinus.



2.2. att. Izvērstis MHD ģenerators telpisks aprēķinu modelis, parādot nātrija aizņemto tilpumu

2.2. att. ar pelēku un dzeltenu parādītas galvenās feromagnētiskās daļas; attiecīgi – Somaloja un elektrotehniskā skārda. Ar gaiši sarkanu – spole, savukārt, tumši sarkanu – pastāvīgie magnēti. Ar zilu parādīti feromagnētiskie Na apakškanālu atdalītāji, kas kalpo, kā magnētisks tilts starp iekšējo (apakšējo) un ārējo (augšējo) magnētivadu, kā arī vienlaicīgi no magnētiskā lauka ekranē nātriju apakškanālos. Tā kā reāli izgatavotajā elektriskajā mašīnā šie apakškanāli ir izveidoti kā apaļi urbumi Somalojā, tad par minētajiem atdalītājiem reālā prototipa gadījumā kalpo feromagnētiķa telpas starp urbumiem. Iepriekšminētie magnētiskie starpkanālu atdalītāji šajā gadījumā tiek uzskatīti par laminētiem no elektrotehniskā tērauda skārda ar pakāpeniski samazinātu feromagnētiķa aizpildījuma koeficientu atbilstošu sienas biezumam konkrētajā

vietā. Ar zaļu (attēlā “L”), savukārt attēloti nemagnētiskie keramikas izolatori. Šie nevadošie izolatori ir parādīti arī 2.4. attēlā ar sarkanu. Azimutālā apakškanālu daļējuma izmērs ir:

$$d = \frac{2\pi R}{n}, \quad (2.1)$$

kur n – apakškanālu skaits.

Dotajā aprēķina metodē pieņem, ka Na lokālais kustības ātrums pa visu kanāla tilpumu ir konstants.

Izstrādātā MHD ģenerators aprēķina metode ietver sevī elektriskās mašīnas analīzi, sastāvošu no 2 soļiem. Vispirms zināšanas par MHD ģenerators ģeometriju un tā magnētisko lauku tiek pārvērstas par parasto asinhrono mašīnu un transformatoru teorijā plaši izmantoto ekvivalento aizvietošanas shēmu, 2.1. att. Savukārt, tālāk aizvietošanas shēmas zaru strāvu un spriegumu secīgs aprēķins, no kreisās uz labo pusi (vai otrādi), noved pie visiem nepieciešamajiem elektriskās mašīnas parametriem.

Kā jau minēts, lai analizētu ģenerators darbību, nepieciešams zināt magnētiskā un elektriskā lauka sadalījumu Na darba spraugā. Demonstrāciju nolūkā ir izmantoti automatizēti “Quickfield” vidē veidoti magnētisko lauku matemātiskie modeļi apvienojumā ar VBA programmēšanas valodā izstrādātu programmu aizvietošanas shēmas parametru aprēķinam.

Darbojoties magnetostatiskā aksiālsimetriskā režīmā, izmantojot galīgo elementu metodi (GEM), tika risināti trīs atsevišķi mašīnas magnētiskā lauka sadalījumi:

- 1) Tikai pastāvīgo magnētu radītās galvenās magnētiskās plūsmas lauka modelis, kas tālākajā aprēķinā kalpo kā references lauks.
- 2) Šķidrajā metālā plūstošo strāvu inducētais magnētiskais lauks.
- 3) Ģenerators spolē plūstošās strāvas inducētais magnētiskais lauks.

Papildus tam, tika risināti divi atsevišķi elektriskās strāvas sadalījumi šķidrajā metālā, plakanparalēlā režīmā, kas arī atbilst vienādojuma (2.2.) otrajam un trešajam saskaitāmajiem:

- 1) Nātrijā inducētā pamatstrāva azimutālā virzienā.
- 2) Reakcijas strāva nātrijā, kas izpaužas kā lādiņu uzkrāšanās uz keramisko izolatoru virsmas.

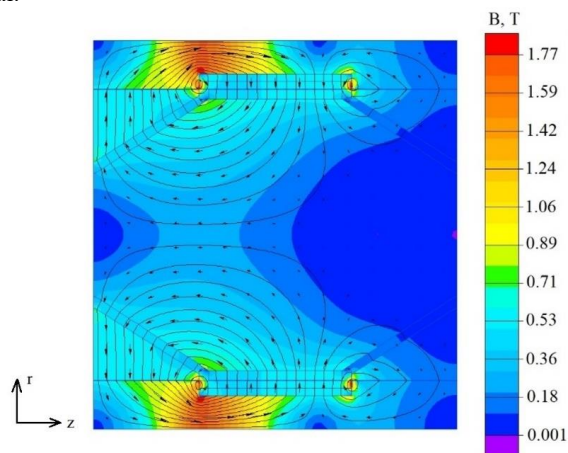
Ar reakcijas strāvu matemātiski jāsaprot, tādu strāvu, kuru izsauc nulles strāvas robežnosacījumi uz keramisko izolatoru virsmas. Izolators virsmai perpendikulārā strāva tiek uzdots vienāda ar nulli, un tas savukārt nozīmē to, ka, ja kādā izolators punktā ieiet konkrēts skaits strāvas līniju, tad tikpat daudz no izolators ir jāiziet ārā. Protams, fiziski izolatorā nekāda strāva neieplūst un tas ir jāsaprot, kā matemātisks spriedums. Tāpēc, neskatoties uz to, ka princips šeit ir līdzīgs, ieviesto reakcijas strāvu nav jāizskata kā nobīdes strāvu, kas spēlē būtisku lomu tikai augstfrekvences gadījumos. Rezumējot: reakcijas strāvu ir jāsaprot kā kompensējošu strāvu, kuru izsauc atbilstošie robežnosacījumi uz izolatoriem, un, kas ar pretēju

zīmi kompensē locekli $vB(z)$. Detalizētāk šie jautājumi ir apskatīti šīs nodaļas 4. paragrāfā (2.4.), kur ir demonstrēts potenciāla un izplūdušās strāvas sadalījuma analītisks aprēķins.

Kondukcijas tipa MHD enerģijas pārveidotāju teorijā jautājumi, kas ir saistīti ar šāda tipa izolatoriem ir plaši pētīti un atspoguļoti fundamentālajā literatūrā [38], [39]. Piemēram, ir zināms, ka strāvas izplūšanas aina ir būtiski atšķirīga gadījumā, ja magnētiskais lauks ir ierobežots līdz ar strāvas pievadiem (2.4. att. (b)), vai arī ja lauks ir iznests ievērojami tālu no elektrodu zonas (2.4. att. (a)). Ietekmi spēlē arī tas, cik strauji magnētiskais lauks krīt pētāmā apgabala galos (jau apskatītie t.s. “gala efekti”). Kā redzams, 2.4. att. (b) redzamais inducētās strāvas virpulis rezultējas strāvās, kas plūst pret pamatstrāvu zonā, kas ir ārpus magnētiskā lauka. Tādējādi vadošās vides apgabali pirms un pēc ieiešanas magnētiskā lauka zonā kalpo, kā paralēli jeb šuntējoši elektriskās ķēdes zari transformatora aizvietošanas shēmā. Līdz ar to, tas rezultātā samazina elektriskās mašīnas lietderības koeficientu. Vienlaikus ir zināms paņēmieni, kā ar doto parādību cīnīties, ievietojot elektriski nevadoša materiāla izolējošu starpsienu magnētiskā lauka ieejas un izejas zonās. Tādējādi 2.4. att. (b) noslēgtās strāvas virpulis var tikt sadalīts divos mazākos. Palielinot izolatoru skaitu, šis dalījums tiek palielināts proporcionāli vēl vairāk. Šis gala efektu samazināšanas paņēmieni, atbilstoši pielāgots, ir pielietots arī pētāmajā elektriskajā mašīnā.

2.3. att. parādītais MHD ģenerators magnētiskā lauka ainas fragments atbilst kopējai visu šo triju lauku superpozīcijai. 2. un 3. lauka modeļi tika lietoti arī lai, izmantojot “Quickfield”, aprēķinātu aizvietošanas shēmas induktivitātes.

Visi pārējie MHD ģenerators parametri zemas jaudas un vāja piesātinājuma režīmā ir iegūstami “Quickfield” magnētiskā lauka rezultātus izmantojot kā ieejas datus izstrādātajai “VBA” programmai.



2.3. att. MHD ģenerators enkura reakcijas ietekmēts magnētiskā lauka sadalījums

Vispārīgā gadījumā Oma likums diferenciālā formā kustīgai, elektrovadošai videi tiek pierakstīts, kā ir parādīts nākošajā darba nodaļā (formula 3.3.). Tomēr turpmākajā esošās nodaļas izklāstā tiek pieņemts, pirmkārt, ka visi apskatāmie vektori ir ortogonāli (piemēram, v un B vienādojumā (2.2+.) ir perpendikulāri viens otram). Otrkārt tiek lietota tikai viena, dominējošā vektora komponente. Tādā gadījumā vektoru apzīmējumi vairs nav vajadzīgi un tie

tiek atņemti. Tad strāvu ģenerējošās daļas aprakstam, kas atbilst kondukcijas tipa MHD ģeneratora daļai, var tikt izmantota inducētās strāvas blīvuma izteiksme, uzrakstīta veidā, kādā ir ņemti vērā elektrisko lauku atbilstošie virzieni [47]:

$$j(x) = \sigma[vB(z) - E_v(x) - E_U(x)] . \quad (2.2)$$

Ņemot vērā nupat atrunāto saistībā ar vektoru apzīmējumiem, piemēram, formulā (2.2) magnētisko lauku faktiski uzskata par vienādu ar: $\mathbf{B} = \{B_r(z); 0; 0\}$. kas nozīmē radiālās komponentes atkarību no “z” koordinātes. Ātrums tādā gadījumā attiecīgi būtu pierakstāms šādi: $\mathbf{v} = \{0; 0; v_z = \text{const}\}$.

Vidējot vienādojumu (2.2.) pa azimutu un rādiusu, var iegūt sekojošu viendimensionālu izteiksmi, kurā “(z)” nozīmē lieluma atkarību no telpas koordinātas vienīgi aksiālā virzienā:

$$j(z) = \sigma[vB(z) - E_v(z) - E_U(z)] . \quad (2.2+)$$

Šī azimutālā strāva, kas plūst šķidrā metālā, ir summa, kas sastāv no trim matemātiski neatkarīgiem locekļiem: magnētiskās indukcijas locekļa $vB(z)$ (šajā paragrāfā ar x apzīmēta 3D koordināta $x = r, \varphi, z$) un diviem elektriskā lauka locekļiem, $E_U(z)$, ko nosaka transformatora daļai atbilstošais ieejas spriegums un:

$$E_v(z) = v \int B(z_1)g(z, z_1)dz_1 = vb(z) , \quad (2.3)$$

kas ir keramikas izolatoru reakcija uz loekli $vB(z)$. Šī pret darbība rezultējas kā elektriskā lauka rašanās, un tas ir izskaidrojams ar to, ka izolatori atrodas kanāla galos, zonās, kur ir straujš magnētiskā lauka kritums magnētu galīgo izmēru dēļ. $vB(z)$ un $E_v(z)$ locekļi ir proporcionāli šķidrums plūsmas ātrumam un lineāri atkarīgi no magnētiskā lauka telpiskā sadalījuma. $E_U(z)$, savukārt, ir atkarīgs no elektriskās slodzes un rodas magnētiskās plūsmas izmaiņas rezultātā. Kā būs redzams tālāk, $E_U(z)$ ir būtisks, jo ir nepieciešams, lai aprēķinātu transformatora ekvivalentās aizvietošanas shēmas ieejas spriegumu.

(2.2 un 2.2+) vienādojuma elektriskā lauka locekļi (otrais un trešais saskaitāmais) ir rakstīti ar mīnusa zīmi, jo tie darbojas pretī loceklim $vB(z)$. Tas pats attiecas uz formulu (2.38). Reizinātājs $b(z)$ savukārt veidojas formālas Grīna funkcijas $g(z, z_1)$ izmantošanā integrāli. Lielumu $b(z)$ var interpretēt, kā izolatoru “ekranēto magnētiskā lauka ekvivalentu”, kas ir ieviests strāvas aprēķināšanai. Grīna funkcijas jēga šeit ir tāda, ka tā parāda svaru ar kādu magnētiskais lauks kādā punktā “ z_1 ” rada elektrisko lauku citā punktā “z”, atbilstoši vienādojumam (2.3.). Skaitliskā aprēķinā ar galīgo elementu metodi, var aprēķināt uzreiz visu integrāli (2.3.). Tomēr minēto Grīna funkciju iespējams iegūt arī izmantojot kompleksā mainīgā funkciju un konformo attēlojumu pieeju [58], kas demonstrēta 2.4. paragrāfā.

Kā zināms, jauda ir vienāda ar:

$$P = Fv, \quad (2.4)$$

kur F – spēks un v – nātrija plūsmas ātrums. Savukārt elektromagnētiskā elementārspēka blīvums df elementārtilpumā dV var tikt uzrakstīts sekojoši:

$$df(x) = j(x)B(z)dV . \quad (2.5)$$

Tādā gadījumā jauda, ko saņem nātrijs, ir izsakāma kā integrālis no $j(x)$ un $B(z)$ parastā reizinājuma, proti sekojošajā izteiksmē, neuzskatot $j(x)B(z)$ par vektoru skalāro reizinājumu:

$$\begin{aligned}
P_{Na} &= v \iiint j(x)B(z) dV = \\
&= \iiint (\sigma v^2 B(z)^2 - \sigma v B(z) E_v(x) - \sigma v B(z) E_U(x)) dV . \quad (2.6)
\end{aligned}$$

Uzrakstīto izteiksmi (2.6.) ir iespējams vienkāršot un pārveidot, sadalot to divos integrāļos un ieviešot jau minēto palīglielumu $b(z)$. Pēc integrēšanas darbības izpildes divu koordinātu virzienos, rezultātā iegūst sekojošu izteiksmi ar diviem vienkāršajiem integrāļiem:

$$\begin{aligned}
P_{Na} &= \sigma v^2 \iiint (B(z)^2 - B(z)b(x)) dV - \sigma v \iiint (B(z)E_U(x)) dV = \\
&= 2\pi r h \sigma v^2 \int (B(z)^2 - B(z)b(z)) dz - 2\pi r h \sigma v \int E_U(z) B(z) dz . \quad (2.6+)
\end{aligned}$$

No aizvietošanas shēmas strāvu caur nātrija elektrisko pretestību var uzrakstīt kā:

$$I_{Na} = \frac{U_0 - U}{R_{Na}} . \quad (2.7)$$

Šeit U_0 – transformatora ieejas spriegums, U – spriegums shēmas punktā aiz nātrija aktīvās pretestības. Tad jaudas izteiksmi transformatora ekvivalentajai shēmai var uzrakstīt šādi:

$$P_{Na.ekv} = \frac{U_0^2}{R_0} + (U_0 - U)I_{Na} + UI_{Na} = U_0^2 \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_{Na}} \right) - \frac{U_0 U}{R_{Na}} . \quad (2.8)$$

Tādā veidā (2.6+) un (2.8) izteiksmēm jābūt vienādām.

Ekvivalentās shēmas primārā tinuma jeb ģenerējošās puses elementi – R_{Na} , U_0 , R_0 – ir nosakāmi no sekojošiem apsvērumiem:

1. Nātrija pretestība:

$$R_{Na} = \frac{2\pi r}{\sigma h l_{active}} , \quad (2.9)$$

ir omiskā pretestība elektriskajai strāvai, kas plūst gredzenveidīgajā Na kanālā ar tilpumu:

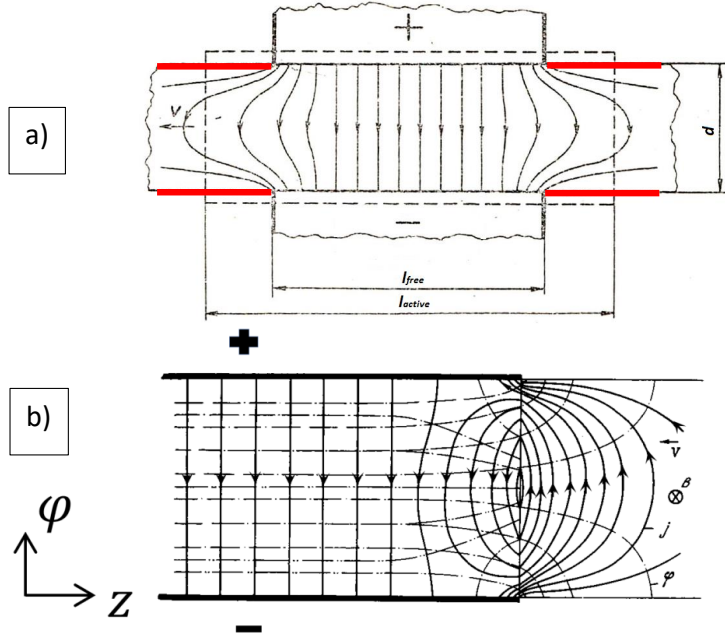
$$\Omega = 2\pi r h l_{active} . \quad (2.10)$$

Neskatoties uz to, ka Na kanāls ir noslēgts un strāva, plūstot pa šo gredzenu, noslēdzas pati uz sevi, Na gredzenam tomēr ir galīga elektriskā pretestība. Šī pretestība tiek aprēķināta kā kanāla garuma attiecība pret Na īpatnējo elektrovadītspēju un kanāla šķērsriezuma laukumu, kur h – ir kanāla augstums un l – aksiālais garums. Tomēr MHD mašīnas gadījumā strāva ir izplūdusi, līdz ar to elektriskā potenciāla un strāvas blīvuma sadalījums nav vienmērīgs pa vadītāja šķērsriezumu. Tāpēc strāvas līnijas ir izliektas, kā parādīts 2.4. att. Tas noved pie tā, ka strāvas faktiski izmantotais šķērsriezums $l_{active} \cdot h$ pārsniedz spraugas brīvo laukumu $l_{free} \cdot h$ un līdz ar to pretestība nedaudz samazinās. 2.4. attēls aizgūts no kondukcijas tipa MHD sūkņu teorijai veltītās monogrāfijas [38], tomēr papildināts ar pētāmajā MHD ģeneratorā iestrādātajiem izolatoriem (ar sarkanu). LU Fizikas Institutā J. Birzvalka vadībā savulaik veiktie pētījumi [38] ir pierādījuši, ka kondukcijas tipa MHD mašīnām:

$$l_{active} = l_{free} + 2 \cdot 0,22d , \quad (2.11)$$

kur $0,22 \approx \frac{\ln 2}{\pi}$.

Lai izskaidrotu 2.4. att. parādītās shēmas sakaru ar pētāmo ģeneratoru, jāvērs uzmanību uz 2.2. att. vienkāršotā modeļa parādīto šķērsriezumu, kurā ar sarkanu punktētu līniju ir norādīts viens nātrija apakškanāls jeb apgabals, kas konceptuāli atbilst 2.4. att. (a). Tas nozīmē, ka 2.2. att. modelī redzami, ar zaļu krāsu attēlotie izolatori ir simboliski parādīti 2.4. att. (a) ar jau minētajām sarkanajām līnijām. Attiecībā uz izolatoriem, šeit ir vēlreiz vērts atgādināt, ka reāli izgatavotā iekārta ir sarežģītāka un atšķirīga no 2.4. att. parādītā. Reāli izveidotie apakškanāli izolatoros ir nevis taisnstūrveida, bet apaļu, aksiāli nesimetrisku (taču simetrisku attiecībā pret azimutu) urbumu formā, kas ir parādīti palielinājumā 1.8. att., augšējā kreisajā pusē.



2.4. att. a) Nātrijā inducētā EDS veidotās strāvas profils, apskatot strāvas līkuma ieplūšanu vienā apakškanālā (attālums “d”) [38]; ar sarkanu – iestrādāti nevadoši keramiskie izolatori atbilstoši 2.6. un 2.11. att.; magnētiskais lauks iznests tālu ārpus elektrodu zonas; b) Inducētās strāvas profils gadījumā, kad magnētiskais lauks ir ierobežots līdz ar elektrodu galiem

2. U_0 aprēķinam tiek veidots skaitlisks elektriskā lauka modelis, kur “Quickfield” aprēķina sekojošu bezdimensionāla lieluma sadalījumu:

$$N(z) = \frac{2\pi r}{U} E_U(z) . \quad (2.12)$$

Pielīdzinot (2.6+) un (2.8) vienādojumu labo pušu pēdējos locekļus, pēc pārveidojumiem iegūst izteiksmi, kuru var uzrakstīt sekojošā veidā:

$$\begin{aligned} U_0 &= \sigma v R_{Na} \iiint \left[\left(\frac{E_U(x)}{U} \right) B(z) \right] dV = \\ &= \frac{1}{2\pi r} 2\pi r h \sigma v R_{Na} \int \frac{E_U(z)}{U} B(z) dz = 2\pi r v \langle B \rangle , \end{aligned} \quad (2.13)$$

kur $\langle B \rangle$ ir magnētiskā lauka $B(z)$ vidējā svērtā vērtība apskatāmajā apgabalā, ar svaru $N(z)$:

$$\langle B \rangle = \frac{1}{l_{active}} \int N(z)B(z)dz, \quad (2.13+)$$

kur $N(z)$ ir svara funkcija, kas ir dota 2.4. paragrāfā, izteiksmē (2.57). Jāatzīmē, ka šeit (2.13) ir integrēts pa visu aprēķina apgabalu. Šajā gadījumā tas nozīmē līdz izolatoru galam, kur, vienlaikus arī magnētiskais lauks nokrītas līdz nullei (skat. 2.7. un 2.9. att).

Ieejas sprieguma veidošanās no ķēžu teorijas viedokļa pamatojama ar to, ka jebkuru reālu elektroenerģijas avotu iespējams elektriskajā shēmā attēlot kā ideālu strāvas vai sprieguma avotu (tādu, kura spriegums nav atkarīgs no caur to plūstošās strāvas) saslēgtu ķēdē ar tā iekšējo pretestību. Konkrētajam gadījumam iekšējā (jeb ieejas) pretestība veidojas 2.1. att. ar zilu pārtrauktu līniju parādītajā apgabalā. Shēmu iespējams atbilstoši papildināt ieejas pusē iezīmējot minēto EDS/strāvas avotu.

Ir vērts atzīmēt arī faktu, ka inducētais EDS nav vienmērīgi sadalīts pa aploces tilpumu, jo magnētiskais lauks B nav vienmērīgs pa garumu. Otrkārt, kanālā eksistē arī jau pieminētie izolatori, kas cenšas mazināt galos inducēto strāvu virpuļu negatīvo ietekmi. Tāpat uz U_0 veidošanos norāda (2.13.) vienādojamā izmantojamā B vidējā vērtība.

3. R_0 aprēķinam tiek pielīdzināti (2.6+) un (2.8) pirmie locekļi, kā rezultātā iegūst šādu izteiksmi:

$$\frac{1}{R_0} = \sigma \left(\frac{\iiint ([B(z)-b(x)]B(z))dV}{(2\pi r(B))^2} \right) - \frac{1}{R_{Na}}. \quad (2.14)$$

Līdzīgi kā darīts iepriekšējos integrāļos, arī šeit azimutāla integrācija noved pie 1D formulas, kur funkcija ir atkarīga tikai no vienas, proti, aksiālās koordinātas z :

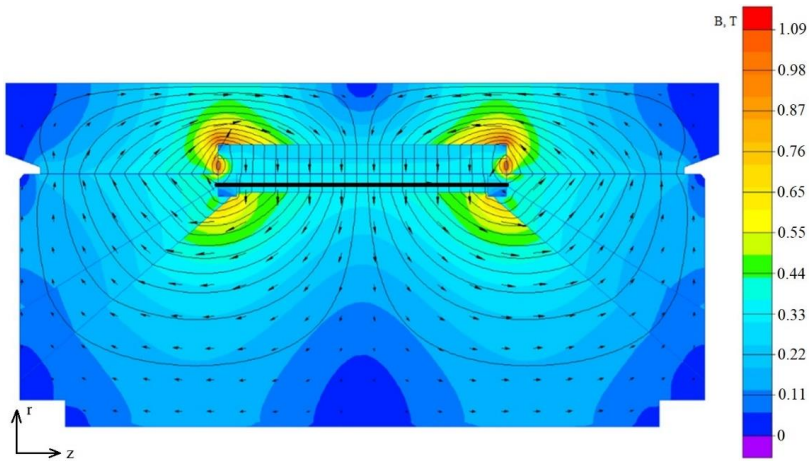
$$\frac{1}{R_0} = \left(\frac{\int ([B(z) - b(z)]B(z))dz - 1}{l_{active}\langle B \rangle^2 R_{Na}} \right). \quad (2.15)$$

2.2. Elektriskās mašīnas parametru aprēķins, neievērojot sekundārā, atmagnetizējošā lauka ietekmi

Balstoties uz piedāvāto MHD ģeneratora aprēķina metodi, iespējams iegūt teorētiski sagaidāmās elektriskās mašīnas raksturlieknes. Tālākajā izklāstā ir demonstrēts autora veiktais aizvietošanas shēmas elementu un raksturliekņu aprēķins.

Kā redzams no izteiksmēm (2.6+), (2.13) un (2.15), aizvietošanas shēmas elementu noteikšanai ir vajadzīgs aprēķināt 2 integrāļus, kuros zemintegrāļa funkcija sastāv no magnētiskā lauka indukcijas un elektriskā lauka intensitātes atkarībā no telpas koordinātas un telpiskā sadalījuma. Šim nolūkam ar programmas "Quickfield" palīdzību, tika veikta mašīnas galvenā magnētiskā lauka matemātiskā modelēšana ar mērķi noteikt magnētiskā lauka sadalījumu Na kanālā. Papildus šai pašā programmā tika izveidots Na inducētās strāvas izplūšanas efekta modelis tā iegūstot pilnu ainu par elektriskā lauka intensitātes, strāvas blīvuma un potenciāla sadalījumu. Tieši pēdējais praktiski tiek pielietots tālākajos aprēķinos.

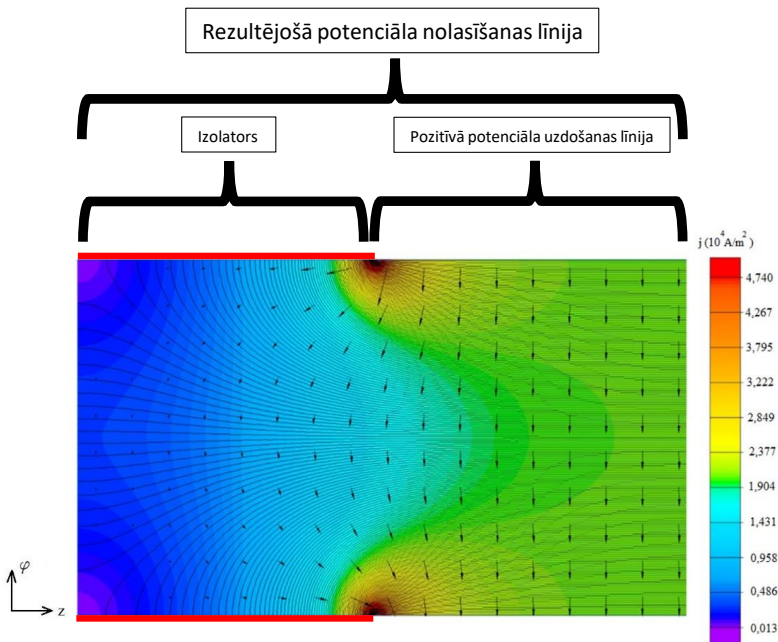
2.5. attēlā ir parādīts magnētiskā lauka sadalījums mašīnas aksiālā – r, z šķēlumā, modelējot mašīnu aksiālsimetriskā divdimensionālā režīmā. Nātrija spraugā novilkta līnija norāda uz



2.5. att. MHD ģenerators referencē lauka jeb pastāvīgo magnētu radītās galvenās magnētiskās plūsmas indukcijas vektora sadalījums 2D modelī, aksiālā šķēlumā

vieta, kur tālākajā aprēķinā izmantotās indukcijas normālās komponentes vērtības tiek nolāsītas. Modelis ir veidots ievērojot mašīnas patiesos izmērus, izmantoto materiālu īpašības, atbilstošu pastāvīgo magnētu koercitīvo spēku un magnētisko caurlaidību.

2.6. attēlā ar krāsām ir parādīts iegūtais Na izplūdušās strāvas blīvuma sadalījums vienā no 72 apakškanāliem – urbumiem atbilstošajā vietā gredzenveida šķidra metāla kanālā. Ar līnijām, savukārt, attēlotas ekvipotenciālās līnijas [59]. Parādīta viena kanāla puse. Tiek pieņemts, ka



2.6. att. MHD ģenerators vienā apakškanālā šķidrā metālā izplūdušās pamatstrāvas modelis; ar sarkanu parādītas keramisko izolatoru vietas atbilstoši 2.4. att. (a) un 2.11. att.

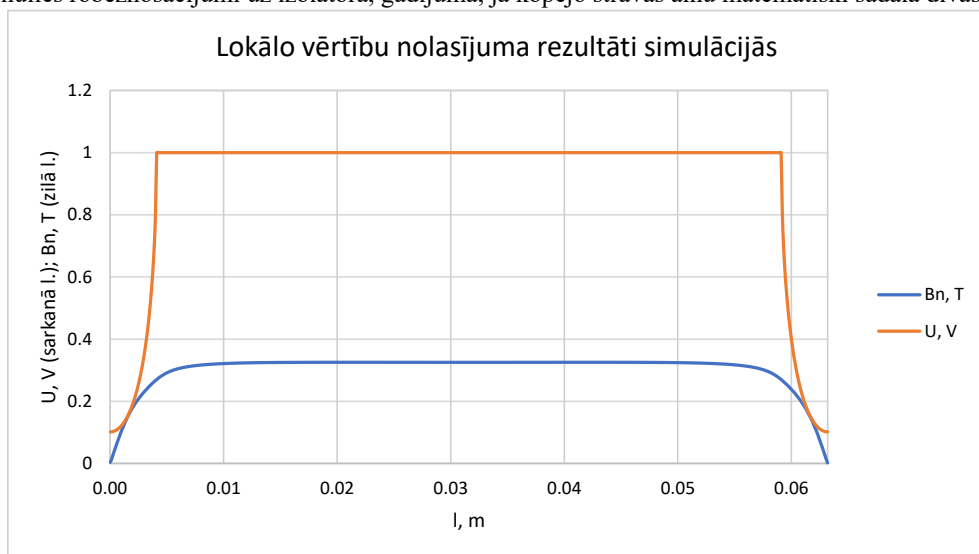
azimutālais kanāls tiek iztaisnots jeb izliekts, taču vienlaikus tiek saglabāts tas pats elektriskais lauks, ko radīja mainīgā magnētiskā plūsma. Modelī pielietotie robežnosacījumi nosaka to, ka potenciāls uz aprēķina apgabala vienas malas ir 1 V, savukārt pretējā malā ir 0 (atbilstoši 2.4. att. (a)). Ar šādu pieeju iegūstams vienādojuma (2.6+) zemintegrāļa izteiksmes loceklis $E_U(z)$.

Jāatzīmē, ka šādu robežnosacījumu izvēle nozīmē savdabīgu relatīvo vienību ieviešanu tālāko aprēķinu atvieglošanai. Reāli inducētais spriegums, protams, var nebūt vienāds ar 1.

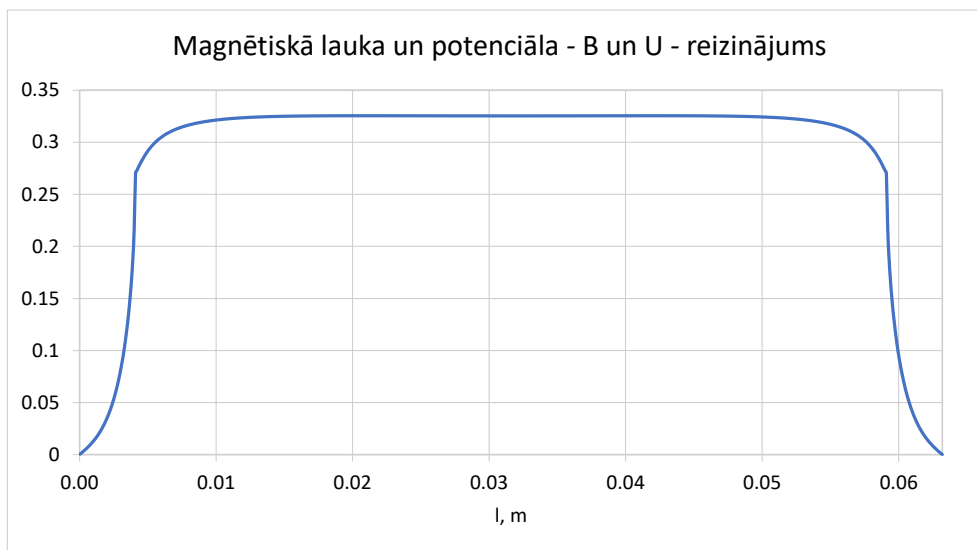
Skaitļošanas rezultātā iegūtās magnētiskās indukcijas un elektriskā potenciāla līknes atkarībā no attāluma koordinātas attēlotas 2.7. att. Viduszonā, kā redzams, potenciāls ir vienāds ar 1 un līdz ar to pēc reizinājuma iegūtā rezultējošā līkne tur neatšķiras no magnētiskā lauka līknes. Savukārt, kā redzams 2.8. att., galos izmaiņas ir izteiktākas.

Loceklis $b(z)$, kas nosaka pretēji nātrija pamatstrāvai galos plūstošās bremsējošās strāvas rašanos, iegūstams atbilstoši izmainot robežnosacījumus. Magnētiskā lauka aprēķinā kanāla vidū iegūtās lauka lokālās vērtības tiek ievietotas strāvas simulācijā kā robežnosacījumi – strāvas blīvuma normālkomponentes vērtības uz aprēķina apgabala robežas. Vienā apakškanāla malā pozitīvas, savukārt otrā tādas pašas negatīvas. Šāda pieeja tiek nodrošināta sadalot galu zonu ļoti mazās daļās ar pietiekami smalku soli. Matemātiskais modelis ir parādīts 2.11. att, savukārt iegūtās līknes – 2.9. un 2.10. att. No 2.11. att. redzamajām ekvipotenciālēm var saprast, ka nulles potenciāls šajā gadījumā ir apakškanāla vidū.

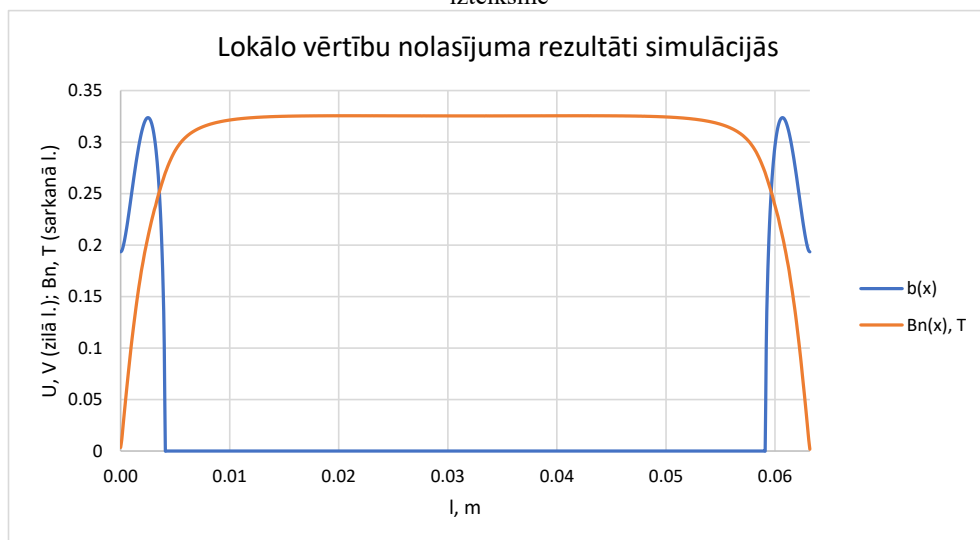
Šeit ir vēlreiz vērts atzīmēt, ka iepriekšējā paragrāfā ieviestais reakcijas strāvas jēdziens nav ar polarizāciju saistītā nobīdes strāva. To ir jāsaprot, kā kompensējošu strāvu, ko izsauc lietotie nulles robežnosacījumi uz izolatora, gadījumā, ja kopējo strāvas ainu matemātiski sadala divās



2.7. att. Magnētiskā lauka indukcijas normālā komponente un pirmā integrāļa aprēķinam nepieciešamais elektriskais potenciāls kā funkcija no attāluma koordinātas

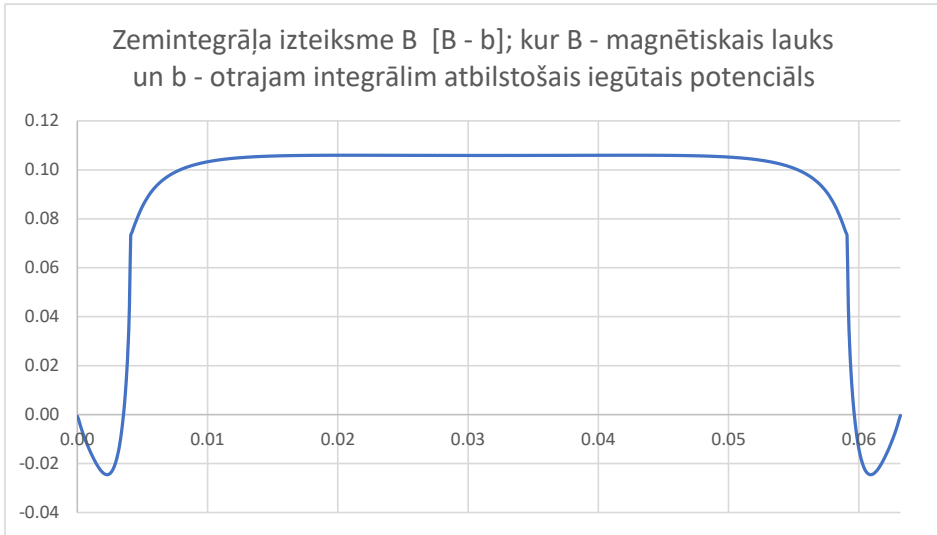


2.8. att. Magnētiskā lauka un elektriskā potenciāla reizinājums pirmajā zemintegrāļa izteiksmē



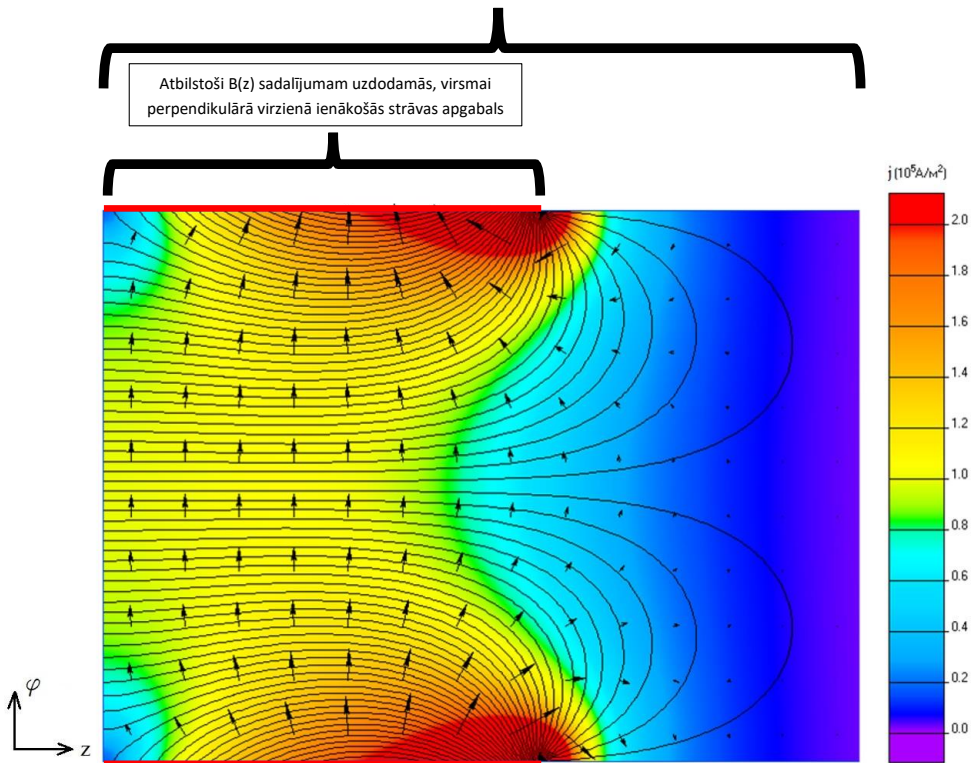
2.9. att. Magnētiskā lauka indukcijas normālā komponente un otrajam integrālim atbilstošais iegūtais potenciāls kā funkcija no attāluma koordinātas

daļās, proti, kur pirmā daļa ir loceklis $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$, savukārt otra atbilstoši vienādojumam 2.2. ir ar pretēju zīmi. Šis matemātiskais spriedums un vienlaikus robežnosacījums matemātiski izpaužas tā, ka izpildās izteiksme: $\text{div}(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = 0$. Detalizēti aprakstītā parādība attēlota 2.4. paragrāfā, konkrēti 2.27. zīmējumā, kas iegūts analītiska aprēķina ceļā, izmantojot konformo attēlojumu pieeju. Jāatzīmē gan, ka esošajā un 2.4. paragrāfā iegūto lauku ainu ir aprēķinātas pretējos apakškanāla galos, tomēr mašīnas konstrukcijas simetrijas dēļ, tie protams ir simetriski.



2.10. att. Otrās zemintegrāļa izteiksmes rezultējošā līkne

Rezultējošā potenciāla nolasišanas līnija



2.11. MHD ģeneratora šķidrājā metālā izplūdušās pret pamatstrāvu vērstās reakcijas strāvas modelis vienā apakškanālā; ar sarkanu parādītas keramisko izolatoru vietas atbilstoši

2.4. att. (a) un 2.6. att.

Tālāk tiek noteikti aizvietošanas shēmas parametri. Nātrija pretestība gredzenveida kanālā tiek noteikta ņemot vērā mašīnas parametrus:

Īpatnējā elektrovadītspēja šķidram nātrijam pie 100 °C : $\sigma_{Na} = 10,36 \cdot 10^6 \frac{S}{m}$.

Apakškanālu/urbumu skaits: $n = 72$.

Kanāla augstums: $h = 0,004 m$.

Mašīnas diametrs; ņemts pa Na kanāla viduslīniju: $D = 0,116 m$.

Kanāla brīvais garums aksiālā virzienā: $l_{free} = 0,058 m$.

Na kanāla garums izstieptā veidā:

$$l_{\pi D} = \pi D = 3,14 \cdot 0,116 = 0,364 m . \quad (2.16)$$

Apakškanāla garums:

$$d = \frac{l_{\pi D}}{n} = \frac{0,364}{72} = 0,0051 m . \quad (2.17)$$

Kanāla aktīvais garums:

$$l_{active} = l_{free} + 2 \cdot 0,22d = 0,058 + 2 \cdot 0,22 \cdot 0,0051 = 0,0602 m . \quad (2.18)$$

Kanāla šķērsgriezuma laukums:

$$S = l_{active} h = 0,0602 \cdot 0,004 = 0,000241 m^2 . \quad (2.19)$$

Nātrija vadītspēja:

$$G_{Na} = \sigma_{Na} \frac{S}{l_{\pi D}} = \frac{10,36 \cdot 10^6 \cdot 0,000241}{0,364} = 6848,63 S . \quad (2.20)$$

Na pretestība:

$$R_{Na} = \frac{1}{G_{Na}} = \frac{1}{6848,63} = 0,000146 \Omega . \quad (2.21)$$

Pielietojot skaitlisko integrēšanu, aprēķinātie integrāļi dotajam gadījumam:

$$\int B(z) E_U(z) dz = 0,01815 . \quad (2.22)$$

$$\int B(z) [B(z) - b(z)] dz = 0,005596 . \quad (2.23)$$

Lai arī vispārīgā gadījumā formāli tie ir nenoteikti integrāļi, tomēr, kā jau tas iepriekš atzīmēts, šajā gadījumā integrēts tiek līdz izolatoru galam – vietai, kur magnētiskais lauks ir nokritis līdz nullei.

Pēc pārveidojumiem un vienkāršojuumiem magnētiskā lauka vidējā vērtība:

$$\langle B \rangle = \frac{2\pi r v}{l_{active}} \int B(z) E_U(z) dz = 0,301 . \quad (2.24)$$

Šūntējošā gala efektu pretestība:

$$\frac{1}{R_0} = \left(\frac{\int ([B(z) - b(z)] B(z)) dz}{l_{active} \langle B \rangle^2} - 1 \right) = \left(\frac{0,005596}{0,0602 \cdot 0,301^2} - 1 \right) = \left(\frac{0,005596}{0,000146} \right) = 157,4 . \quad (2.25)$$

$$R_0 = 0,006353 \Omega .$$

Ti plānās čaulas pretestība aprēķināma sekojoši:

Izmantotā titāna markas “Grade 2” īpatnējā elektriskā pretestība: $\rho_{Ti} = 5,2 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot m$

Čaulas garums:

$$l_{Ti} = \pi D_{Ti} = 3,14 \cdot 0,12 = 0,3768 m . \quad (2.26)$$

Čaulas šķērsriezuma laukums:

$$S_{Ti} = ab = 0,002 \cdot 0,166 = 0,0000332 m^2 . \quad (2.27)$$

Ti čaulas pretestība:

$$R_{Ti} = \rho_{Ti} \frac{l_{Ti}}{S_{Ti}} = 5,2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{0,3768}{0,0000332} = 0,00295 \Omega . \quad (2.28)$$

Zinot sekundārā tinuma vijumu skaitu – 376, atbilstoši transformatoru teorijai reducējot visas trīs noteiktās aizvietošanas shēmas pretestības uz sekundāro tinumu iegūst:

$$R_{Ti} \Rightarrow 0,00295 \cdot 376^2 = 417 \Omega ,$$

$$R_{Na} \Rightarrow 0,000146 \cdot 376^2 = 20,6 \Omega ,$$

$$R_0 \Rightarrow 0,006353 \cdot 376^2 = 898 \Omega .$$

Sekundārā un primārā tinuma, kā arī magnetizēšanās zara induktivitātes tika iegūtas pielietojot “Quickfield” iestrādāto induktivitātes kalkulatoru par pamatu ņemot mašīnas pastāvīgo magnētu radītā magnētiskā lauka aprēķinu. Aprēķinātie rezultāti atkal pēc atbilstošas reducēšanas:

$$L_{Na} = 3,031 \cdot 10^{-6} \Rightarrow 3,031 \cdot 10^{-6} \cdot 376^2 = 0,4285 H ,$$

$$L_{sec} = 3,276 \cdot 10^{-6} \Rightarrow 3,276 \cdot 10^{-6} \cdot 376^2 = 0,4631 H ,$$

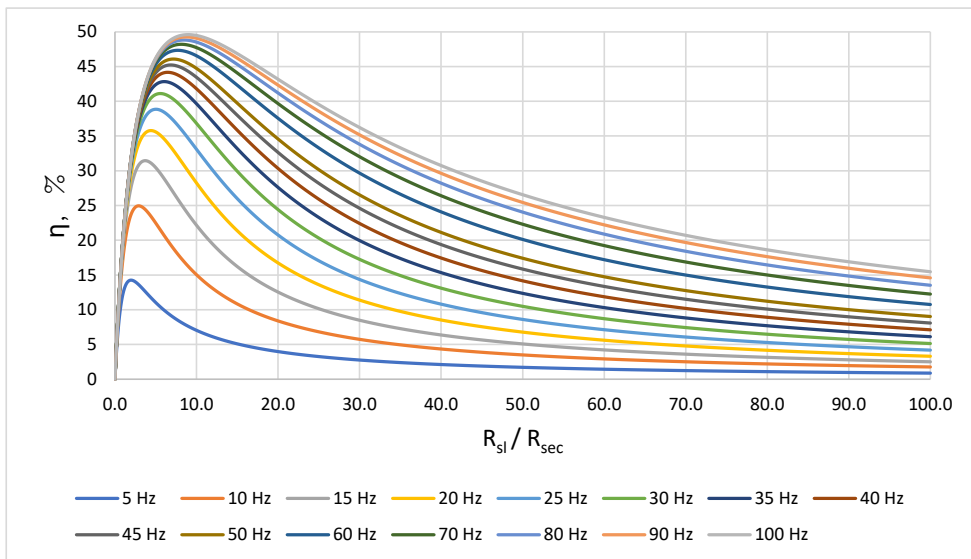
$$L_{mutual} = 2,95 \cdot 10^{-6} \Rightarrow 2,95 \cdot 10^{-6} \cdot 376^2 = 0,4171 H ,$$

$$L_{Na} - L_{mutual} = 0,4285 - 0,4171 = 0,0114 H ,$$

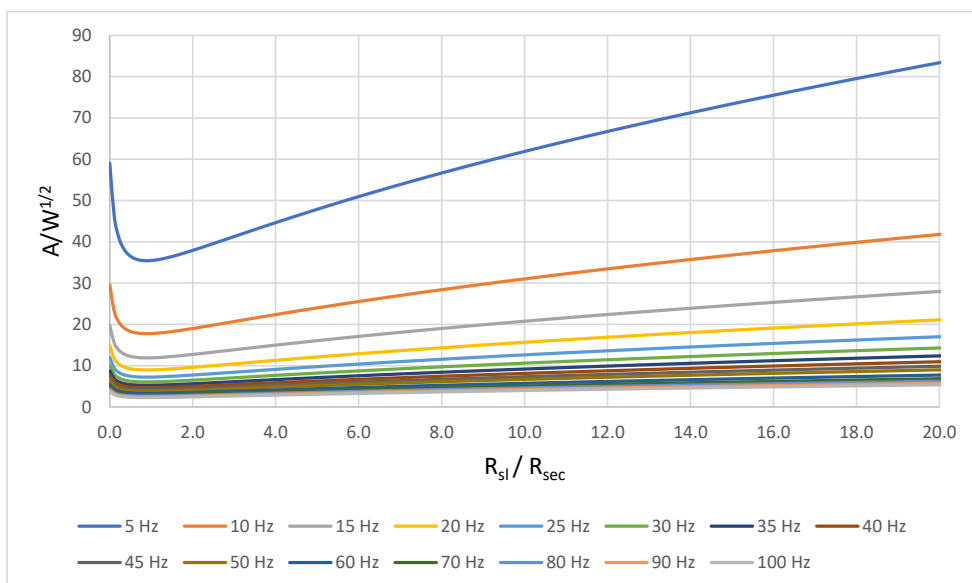
$$L_{sec} - L_{mutual} = 0,4631 - 0,4171 = 0,046 H \Rightarrow \frac{0,046}{376^2} = 3,25 \cdot 10^{-7} H .$$

Reālās mašīnas prototipa sekundārā tinuma induktivitāte tika izmērīta ar induktivitāti mērošu testerī AXIOMET AX-588B. Testera rādījums – 0,39 H. Spoles tinuma aktīvā pretestība tika izmērīta 9 omi.

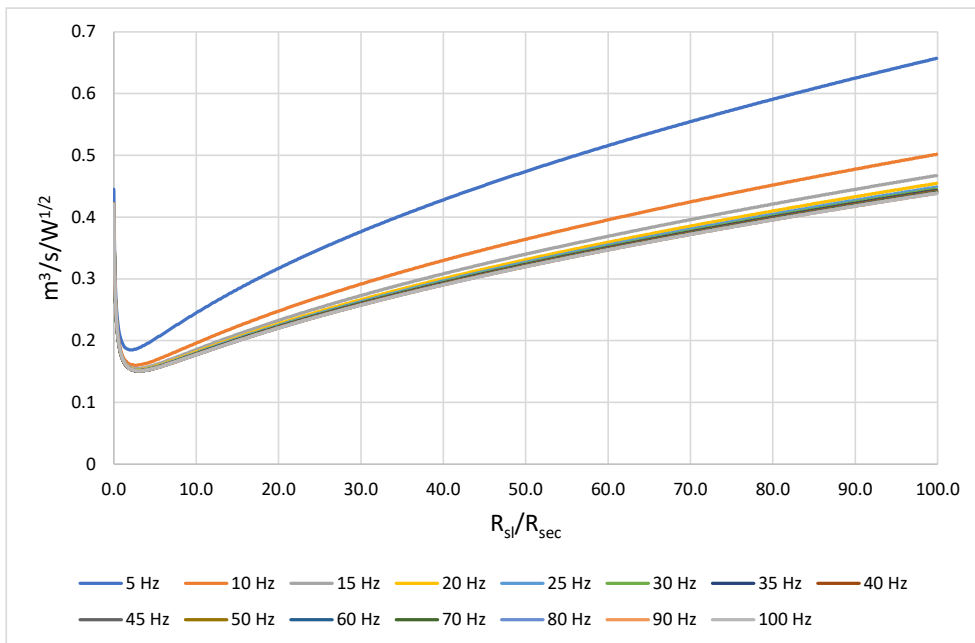
Programmēšanas vidē “Labview” tika sastādīts vienkāršs aprēķina algoritms ar kura palīdzību iespējams atrast aizvietošanas shēmas zaru strāvas un spriegumus. Pateicoties tam tika aprēķinātas elektriskās mašīnas raksturlielnes. Turpmākajā izklāstā attēlotie grafiki ir parādīti atkarībā no elektriskās slodzes pretestības attiecības pret ģeneratora spoles aktīvo pretestību. Aprēķins veikts pie vairākām frekvencēm.



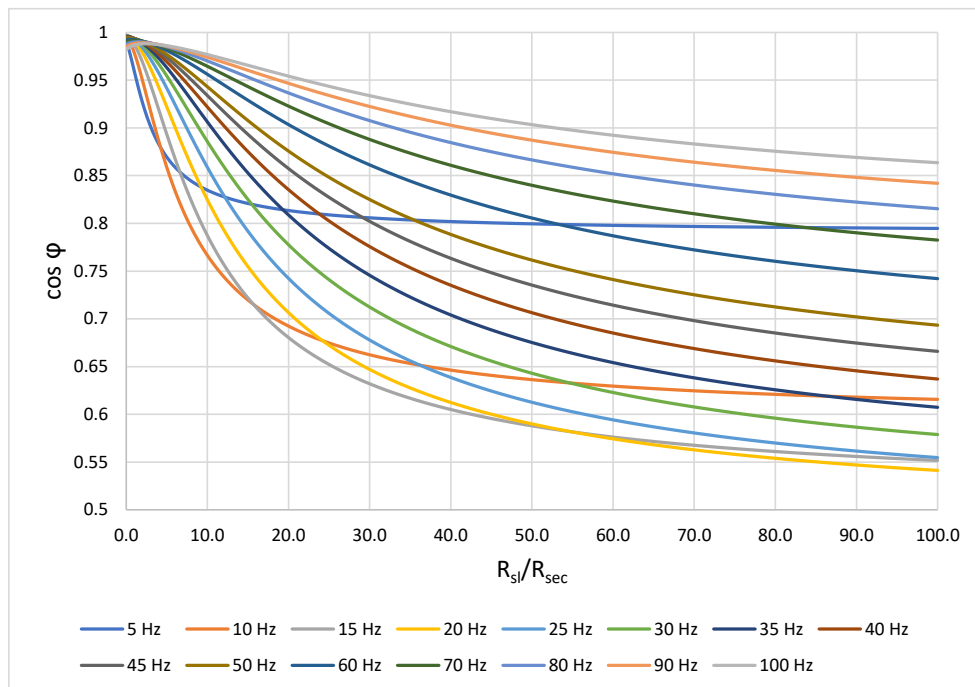
2.12. att. MHD ģenerators aprēķinātā teorētiskā lietderības koeficienta atkarība no slodzes



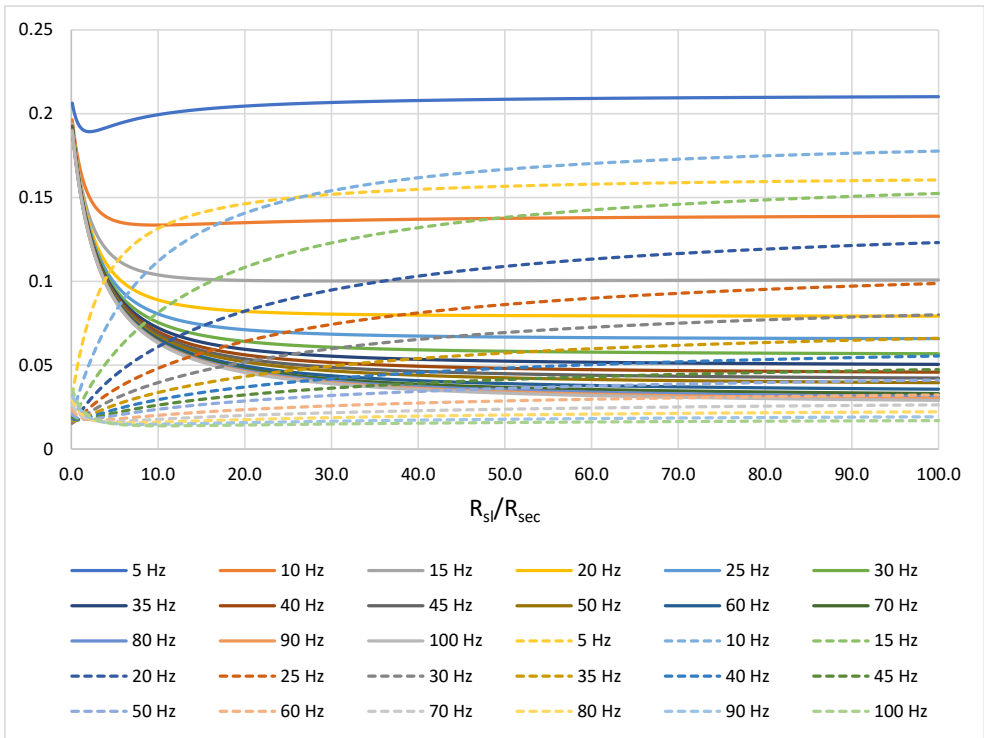
2.13. att. Summārā magnetizēšanās zara strāva, rēķinot uz 1 W elektrisko jaudu, kas izdalās patērētājā



2.14. att. Na caurplūde, rēķinot uz 1 W elektrisko jaudu, kas izdalās patērētājā



2.15. att. MHD ģenerators elektriskais un vienlaikus arī akustiskais $\cos \varphi$; neņemot vērā Na inerci



2.16. att. MHD ģenerators akustiskā pretestība, neņemot vērā nātrija inerci; nepārtrauktās līnijas – kompleksā skaitļa reālā daļa, savukārt raustītās – imaginārā.

Tā kā risinājumā tiek izmantota komplekso amplitūdu metode, tad lielākā daļa parametru aprēķinā ir kompleksie skaitļi, tostarp aizvietošanas shēmas aprēķina gaitā iegūtās shēmas zaru strāvas un spriegumi. Tas ļauj izvairīties no strāvu un spriegumu laika atvasinājumu tiešas lietošanas. 2.16. attēlā ir aprēķināta MHD ģenerators akustiskā impedances jeb pretestība. Tas ir Na spiediens attiecināts pret caurplūdi.

Savukārt 2.15. attēlā ir atrasts akustiskais $\cos \varphi$ – kosinuss no fāžu nobīdes leņķa starp caurplūdi un spiedienu (nākošajā nodaļā tas tiks apzīmēts ar ψ). Šajā gadījumā tas sakrīt ar kosinusu no nobīdes leņķa starp spriegumu un strāvu aizvietošanas shēmas ieejā. Tomēr šāda pieeja ņem vērā tikai to jaudas koeficienta daļu, kas ir nosakāma no elektromagnētiskiem apsvērumiem. Tas nozīmē to, ka tiek apskatīts tikai pretspiediens, ko rada magnētiskais lauks. Lai paaugstinātu aprēķina precizitāti, ir jāņem vērā arī šķidruma inerce.

Tās aprēķinu var veikt no turpmākajā izklāstā parādītiem apsvērumiem. Na plūsmas ātrums ir uzrakstāms kā:

$$v = \frac{Q}{S}. \tag{2.29}$$

Uzrakstot to kompleksā formā, “v” iegūst šādu formu:

$$v(t) = ve^{-i\omega t} = v(\cos \omega t - i \sin \omega t). \tag{2.30}$$

Atvasinot šo izteiksmi, iegūst sekojošu funkciju:

$$\frac{dv(t)}{dt} = -i\omega v e^{-i\omega t} = v\omega(-\sin \omega t - i \cos \omega t) . \quad (2.31)$$

Caurplūdei piešķirot masas dimensiju, iegūst masu laika vienībā (kg/s):

$$Q = vS\rho . \quad (2.32)$$

Tad spiediena izteiksmi var uzrakstīt sekojošā veidā:

$$dp = \rho \frac{dv}{dt} dl = -i\omega \frac{Q}{S(l)} dl . \quad (2.33)$$

$$\Delta p = -i\omega Q \int \frac{dl}{S(l)} . \quad (2.34)$$

Kur $S(l)$ ir elektriskās mašīnas radiāls šķērsriezums dažādās vietās ārpus mašīnas elektromagnētiski aktīvās daļas – tādat slīpi urbtajos apakškanālos, pagriezienos u.c – no vienas brīvās virsmas līdz otrai. Šis minētais ceļš arī aprēķinā tika izvēlēts par integrēšanas robežām (2.34) integrāli. Uzskatāmībai, 2.17. att. ir parādīts izvilkums no “CNRS” konstruktoru birojā, Francijā izstrādātā elektriskās mašīnas “Solidworks” 3D modeļa, kurš tika izmantots aprēķinot minēto integrāli. Attēlā ir attēlots šķidrāis metāls visā mašīnas tilpumā.

Integrāli aprēķinot skaitliski, tas rezultējas vērtībā, kas ir vienāda ar:

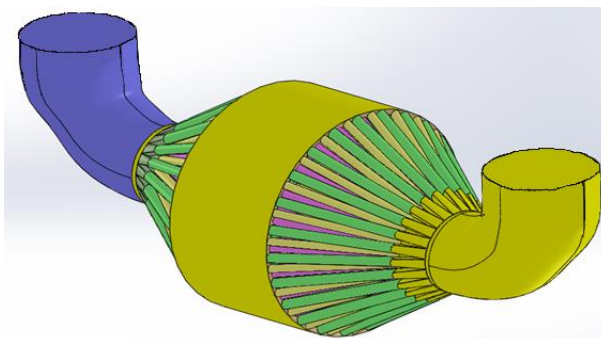
$$\Delta p = -i\omega Q \int_{right}^{left} \frac{dl}{S(l)} \approx -i339 Pa . \quad (2.35)$$

Nātrija blīvums pie 100 °C ir:

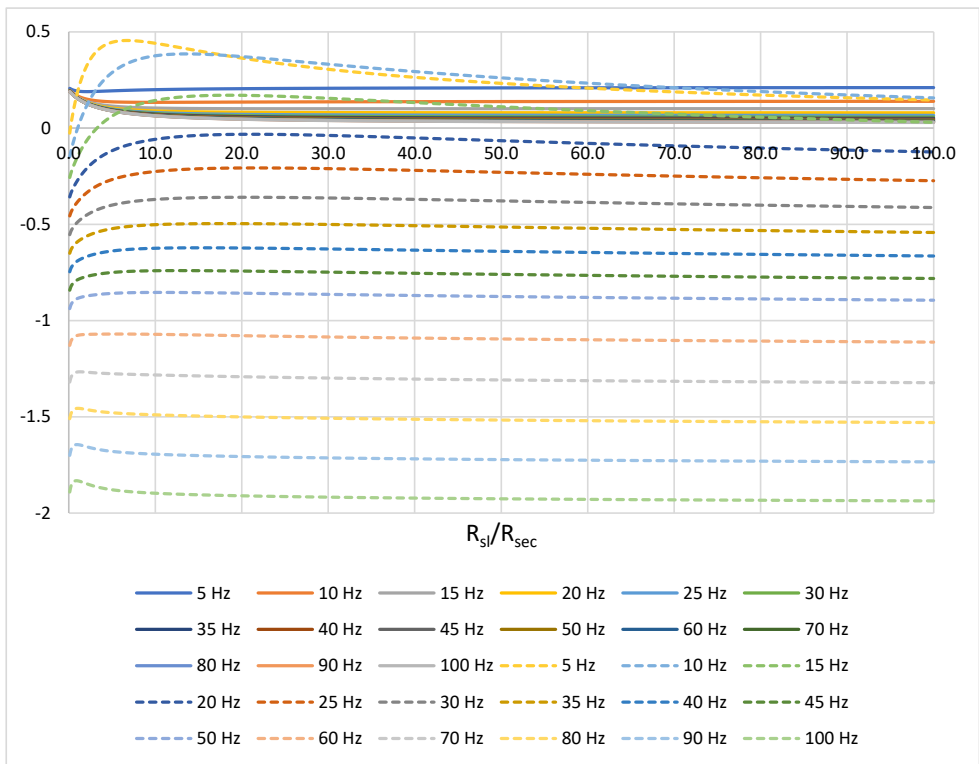
$$\rho = 928 \frac{kg}{m^3} .$$

Zinot šos lielumus, 2.18. attēlā ir aprēķināta MHD ģenerators akustiskā impedance, gadījumā, kad inerce ir klātesoša. 2.19. att. ir aprēķināts atbilstošais pilnais akustiskais $\cos \varphi$.

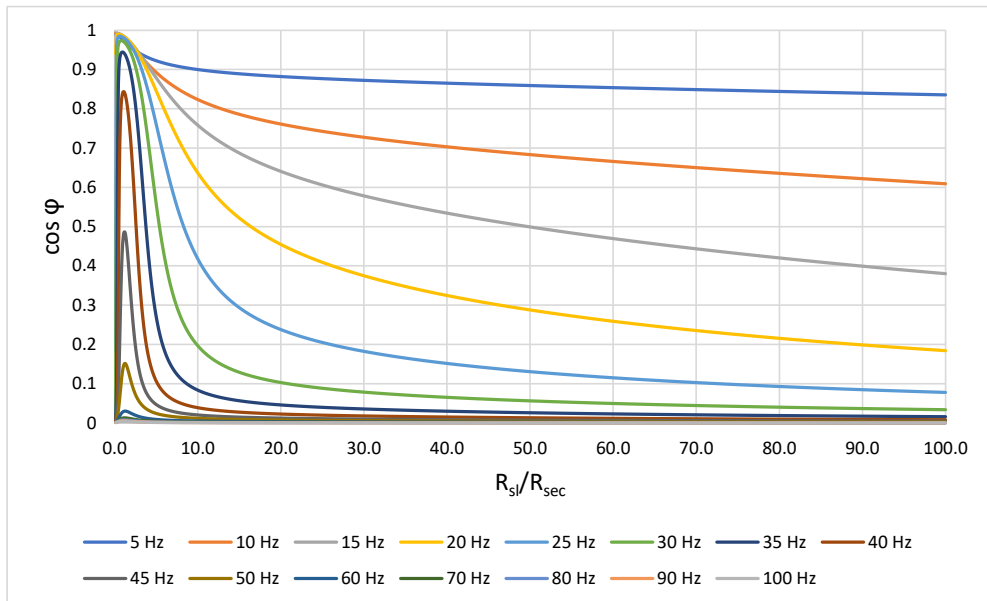
No aprēķinātajām līknēm redzams, ka ievērojot šķidrā metāla inerci, mašīnas akustiskais $\cos \varphi$ ievērojami nokrītas. No lietderības koeficienta grafikiem redzams, ka pie lielākām frekvencēm efektivitāte būs lielāka, taču $\cos \varphi$, paaugstinot frekvenci, krītas. No akustiskās pretestības līknēm var novērot, ka, ievērojot inerci, reālā daļa paliek tāda pati, savukārt imaginārā daļa, paaugstinoties frekvencei, paliek negatīva. Tas var tikt izskaidrots tā, ka 2.18. att. pie aptuveni 20 Hz, kad imaginārā līkne visā pretestību diapazonā paliek negatīva, akustiskais jaudas koeficients sasniedz vērtību tuvu vieniniekam. Palielinot frekvenci tālāk, inerces loma turpina palielināties un paliek dominējoša. Detalizētāk tas ir apskatīts darba 3. nodaļā.



2.17. att. Nātrija tilpuma aizpildītā telpa elektriskās mašīnas iekšienē



2.18. att. MHD ģeneratora akustiskā impedence, ņemot vērā šķidra metāla inerci ; nepārtrauktās līnijas – kompleksā skaitļa reālā daļa, savukārt raustītās – imaginārā.



2.19. att. MHD ģeneratora pilnais akustiskais $\cos \varphi$; ņemot vērā Na inerci

Ir vērts pateikt dažus vārdus attiecībā uz 2.13. un 2.14. attēlu grafiku ordinātu asu mērvienību izvēli. Mērvienība $A/W^{1/2}$ un pārējās tamlīdzīgās vienības ir ērtas lietošanā, ja apskatāmās jaudas ir mazas. Ja 1 W vietā ģenerators atdotu patērētājam, piemēram, 100 vatus, tad strāva desmitkārtšotos – līkne pārvietotos uz augšu 10 reizes. Šo mērvienību izvēli var saprast tā, ka elektriskā jauda ir atkarīga no plūsmas ātruma kvadrāta. Tādā gadījumā ātrums ir atkarīgs no jaudas kvadrātsaknes.

Lietderības koeficienta grafikos ir novērojams, ka līknes maksimums ir atrodams pie slodzes pretestības, kas ir augstāka par ģenerators spoles pretestību. Turklāt, paaugstinoties frekvencei, šī slodzes pretestības vērtība pieaug.

Magnetizēšanās strāvas raksturlīknes ļauj novērtēt mašīnas magnētiskās ķēdes piesātinājuma līmeni. Var redzēt, ka optimums ir līkņu zemākais punkts, kas pie atšķirīgām frekvencēm un dažādām slodzes pretestībām krasi neatšķiras, bet pārvietojas vertikāli.

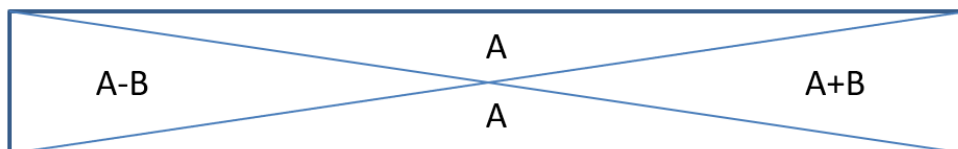
2.3. MHD ģenerators aprēķins, ievērojot enkura reakcijas lauka ietekmi

Iepriekš izklāstītais ir spēkā zemas jaudas režīmā, kad šķidrā metālā un spolē inducēto strāvu magnētiskie lauki jūtami neietekmē pastāvīgo magnētu radīto magnētisko lauku. Lielāku jaudu gadījumā šis lauks tiek ievērojami ietekmēts un var pasliktināt mašīnas darbību. Dotā parādība klasisko elektrisko mašīnu teorijā, kā zināms, tiek dēvēta par enkura reakciju.

Magnetohidrodinamikā tās aprakstam visbiežāk lieto jau darba 1. nodaļā apskatīto magnētisko Reinoldsa skaitli (Rm), izmantojot vienu no tā primitīvākajām interpretācijām, kas nosaka to, ka inducētā magnētiskā lauka attiecība pret pielikto lauku ir proporcionāla Rm . Tiesa gan šāda interpretācija ir pielietojama ar zināmām atrunām. Pirmkārt, ja ir pareizi izvēlēts raksturīgais izmērs. Otrkārt, šāda interpretācija ir derīga tikai vienkāršākās konfigurācijas un ģeometrijas MHD plūsmām. Vienlaikus var teikt arī, ka liela Rm gadījumā zūd jēga runāt par pieliktu magnētisko lauku, jo tas tiks pārnestis vairs pilnīgi neatpazīstamā formā, sarežģītākos gadījumos jaunradītajam laukam pieskaitoties sākumlaukam [60], [61].

Atgriežoties pie pētāmās problēmas, formulas (2.2 – 2.15) ir derīgas jebkuram laika momentam mašīnas maiņstrāvas ciklā. Tas pats attiecas arī uz pašu ekvivalentās shēmas pieeju. Lielas jaudas režīma jauninājums attiecībā pret mazjaudas ir tāds, ka aizvietošanas shēmas šuntējošās pretestības R_0 vērtībai ir atkarība no laika. Ja ir zināms kāds konkrēts $B(z,t)$ sadalījuma profils, tad R_0 nosaka vienādojums (2.15). $B(z,t)$ savukārt ir atkarīgs no strāvām spolē un nātrijā.

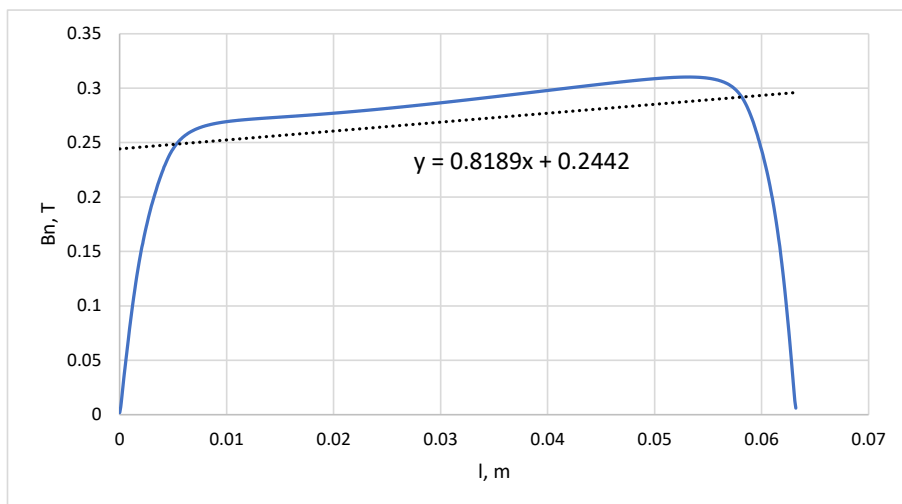
“Quickfield” simulācija veidota tā, ka strāva spolē $I_{sec}(t)$ plūst vienmērīgi pa visu tai atvērto šķērsriezuma laukumu. Savukārt nātrijā izplūdušī strāva tiek modelēta tā, ka tainstūrveidīgais kanāls tiek krusteniski sadalīts četros trijstūros, kā parādīts att. 2.20.



2.20. att. Nātrijā izplūdušās strāvas shematiskais sadalījums “Quickfield” magnētiskā lauka modelī

Kā jau atzīmēts, lai realizētu piedāvāto ciklisko aprēķinu nepieciešams pārnest magnētiskā lauka modeļa datus uz elektriskā lauka, proti strāvas blīvuma sadalījuma, aprēķinu. To var izdarīt izmantojot mazāko kvadrātu metodi, aproksimējot magnētiskā lauka sadalījuma līkni ar taisni, kuru apraksta taisnes vienādojums (2.36). Tipisks aproksimācijas rezultāts ir ilustrēts 2.21. att.

$$y = ax + b. \quad (2.36)$$



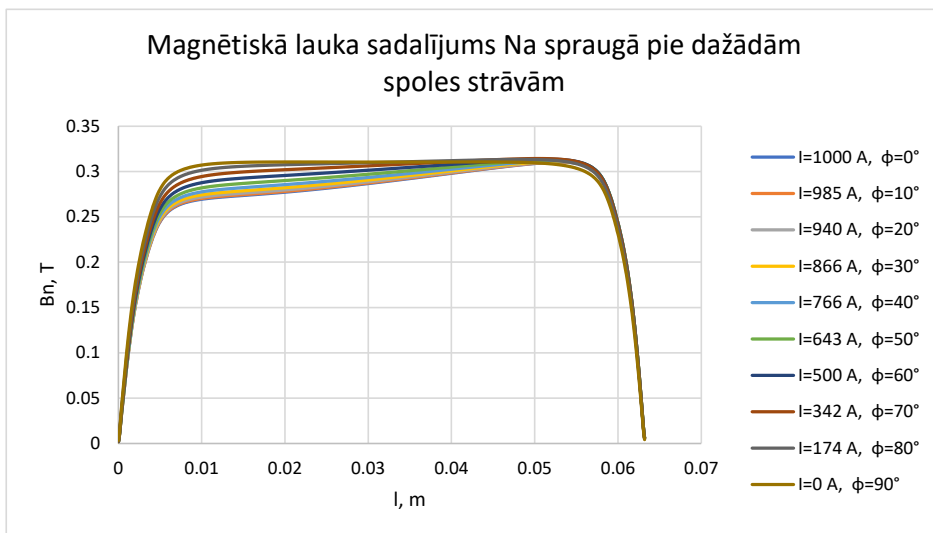
2.21. att. Enkura reakcijas ietekmēta magnētiskā lauka līknes lineāra aproksimācija

Aprēķins tiek sākts kā mazjaudas režīmā, proti, no pastāvīgo magnētu radītā pamatlauka. Tālāk, pēc vajadzīgās patērētāja elektriskās pretestības iestatīšanas, Excel vidē VBA (Visual Basic for Applications) valodā, izstrādātais programmas kods veic shēmas aprēķinu no kreisās puses (ieejas sprieguma – U_0) uz labo, līdz apstājas pie slodzes strāvas un sprieguma krituma uz slodzes pretestību. Kad ir atrastas visas vajadzīgās strāvas, tās tiek ievietotas nākošajā “Quickfield” skaitliskajā simulācijā, izmantojot “Active Field” tehnoloģiju [62], [63] (2.22. att), kā rezultātā tiek atrasts jaunais lauka sadalījums. Dati no jaunatrstā magnētiskā lauka sadalījuma savukārt jau atkal ieiet aizvietošanas shēmas ieejā un tā turpinās līdz tiek aprēķināts viss maiņstrāvas periods. Līdz ar to, konkrētais $R_0(t)$ sadalījums ir atrasts. Tālāk, integrējot pa visu maiņstrāvas periodu, iegūst mašīnas lietderības koeficienta samazināšanās dinamiku pie dažādām attīstāmajām jaudām.



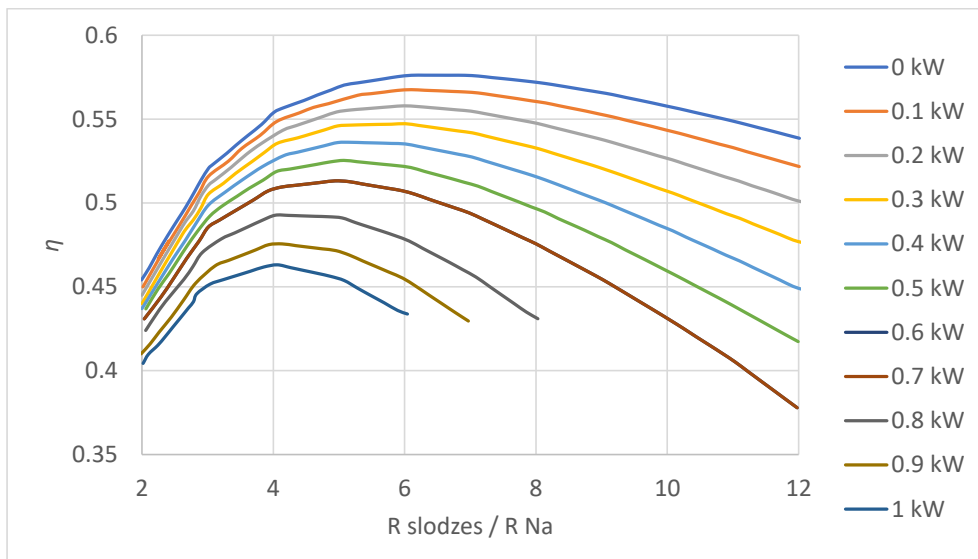
2.22. att. “Excel” un “Quickfield” savstarpējās sasaistes shēma

Attēlā 2.23. ir parādīta enkura reakcijas darbības dinamika pie dažādām spoles strāvām. Tas nozīmē, ka, palielinoties spoles strāvai, līkne sašķiebjas. Protams, vienlaicīgi palielinās arī inducētā strāva nātrijā. 2.23. att. redzamajā leģendā redzamās strāvas ir attēlotas ampervijumos, proti, ņemot vērā to, ka spolē ir 400 vijumu, attēlā redzami, piemēram, maksimālie 1000 A nozīmē 2,5 A stipru strāvu caur vada dzīslu.



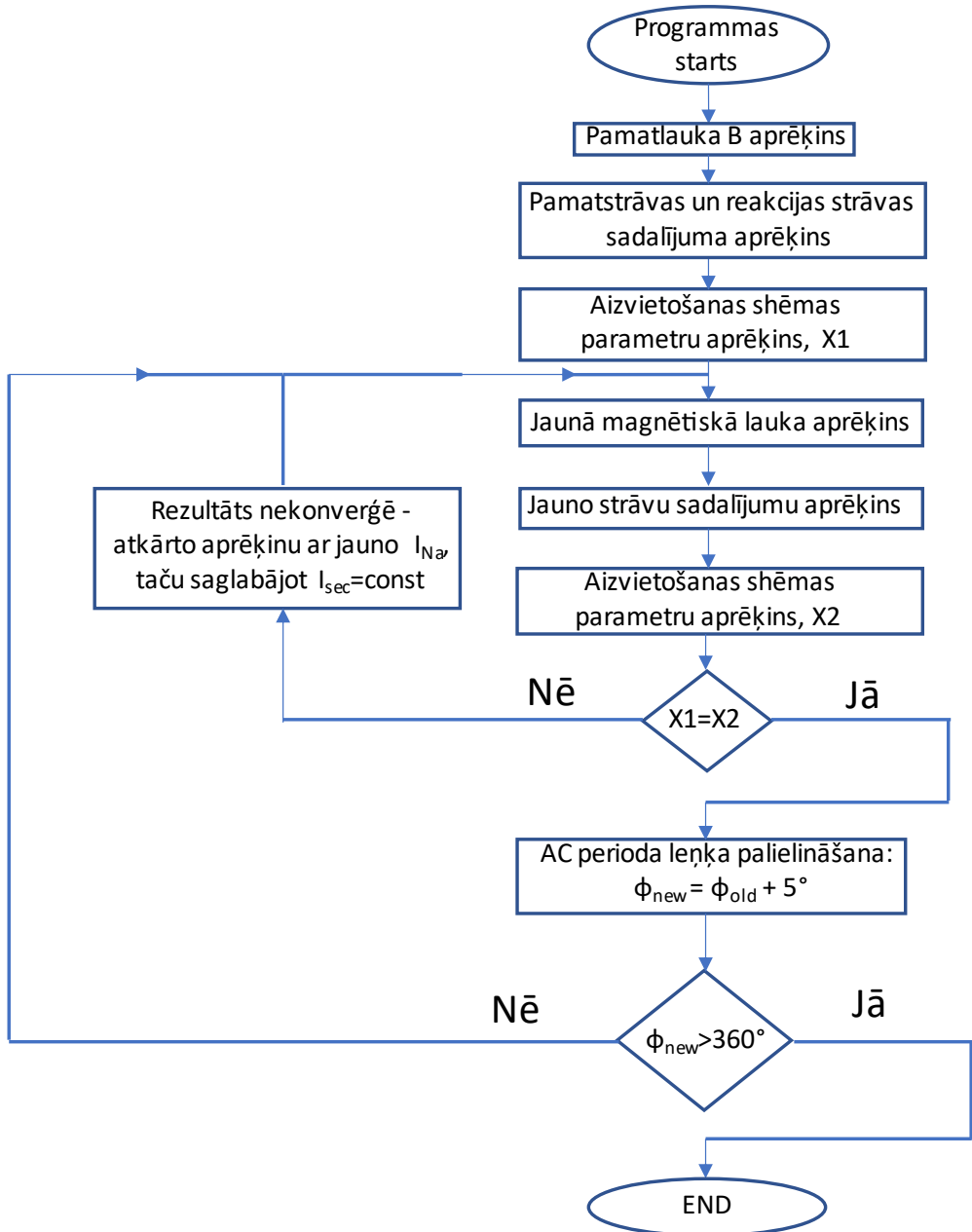
2.23. att. Rezultējošā lauka sadalījums slogotai mašīnai dažādos maiņstrāvas perioda laika momentos pie dažādu ampērvijumu skaita

Lauka atmagnetizēšanās tikai vienā pusē, savukārt neuzmagnetizēšanās otrā galā, izskaidrojama ar mašīnas magnētiskās sistēmas piesātinājuma stāvokli un ievērojamu ģenerators slodzi.



2.24. att. Rezultējošā aprēķinātā sekundārā magnētiskā lauka ietekme uz elektriskās mašīnas lietderības koeficientu ģenerētās lietderīgās jaudas režīmā (>0 kW), kā arī neņemot vērā inducēto strāvu radīto lauku ietekmi (0 kW)

Enkura reakcijas ietekme uz MHD ģenerators lietderības koeficientu ir parādīta 2.24. att. Dotais aprēķins ir veikts pie frekvences 50 Hz, izvēloties vairākus diskrētus mašīnas noslodzes līmeņus līdz pat 1 kW lielai slodzei, kas, pie mašīnas 200 W nominālās jaudas, ir klasificējama jau kā nopietna pārslodze un ir pieļaujams tikai kā teorētisks un hipotētisks vērtējums.



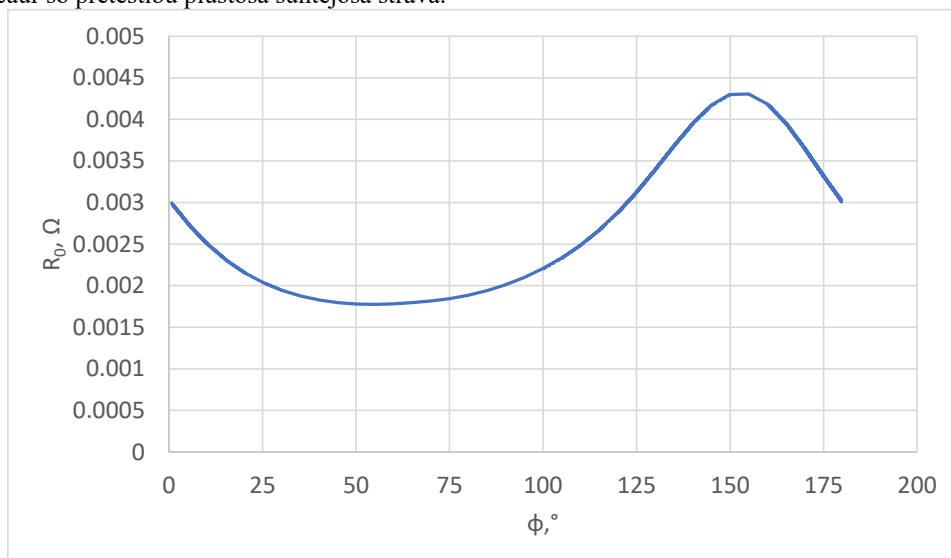
2.25. att. Enkura reakcijas aprēķina blokshēma

Salīdzinot 2.24. att. redzamās līknes var novērot, ka, palielinoties slodzei, līkņu maksimumi novirzās uz mazākas slodzes pretestības pusi. Līdzīga tendence ir novērojama 2.12. att., kur tika demonstrēta lietderības koeficienta atkarība no frekvences. Tas var tikt izskaidrots ar induktīvā rakstura strāvu īpatsvara palielināšanos ekvivalentajā aizvietošanas shēmā, proti, vidējā – magnetizēšanās zara – strāvas pieaugumu.

Sastādītās aprēķina programmas teksts ir dots 1. pielikumā. Papildus aprakstītajam aprēķina pamatciklam, programma ietver sevī konverģences pārbaudi. Tas nozīmē, ka aprēķinot visus datus katrā maiņstrāvas perioda laika momentā, tiek veiktas vidēji ap 2-3 precizējošas apakšiterācijas. Tas norisinās tā, ka katrā apakšiterācijā spoles strāva saglabājas nemainīga, taču pārējie parametri tiek pārrēķināti un precizēti. Tiklīdz secīgās divās apakšiterācijās rezultāti sakrīt un sāk atkārtoties, pieņem, ka aprēķins ir nokonverģējis un pāriet pie nākošā maiņstrāvas perioda leņķa, tas ir – pie lielās iterācijas. Programmas principiālais algoritms parādīts 2.25. att.

Attēlotā blokshēma ir vienkāršots algoritms. 1. pielikumā atrodamā reālā programma papildus veic virkni apakšdarbību. Piemēram, veic rezultātu saglabāšanu speciāli izveidotā Excel faila attiecīgā tabulā, datu pārvietošanu un pārkopēšanu uz nepieciešamajām faila datu lapām un, kā arī veic citas manipulācijas ar skaitļiem, kuri var tikt izmantoti tālākai analīzei.

Programmas izpildes rezultātā iegūtā šuntējošās pretestības R_0 līknes atkarība no laika, jeb maiņstrāvas perioda leņķa parādīta 2.26. att. Kā redzams, šī atkarība nav sinusoidāla, turklāt tā mainās ar dubultu frekvenci. R_0 svārstību iemesls ir saskatāms vienādojumā (2.15). Ja pēc integrēšanas izpildes labā puse vienādojumam, magnētiskā lauka sadalījuma līknei nošķiebjoties, palielinās, tad kreisajā pusē $1/R_0$ arī palielinās. Līdz ar to R_0 samazinās un pieaug caur šo pretestību plūstošā šuntējošā strāva.



2.26. att. Šuntējošās pretestības atkarība no AC perioda leņķa

Lai iegūtu aprēķina izteiksmes N_a strāvas ievietošanai 2.20. att. trijstūros, magnētiskā lauka sadalījumu atbilstoši taisnes vienādojumam (2.36) pārraksta kā:

$$B(z) = \bar{B} + z \frac{dB}{dz} . \quad (2.37)$$

Kā zināms, strāvas blīvuma izteiksme, ievērojot 2.1. paragrāfā atrunāto attiecībā uz to, ka tiek ņemts vērā elektriskā lauka virziena vērsums, var tikt uzrakstīta sekojoši:

$$j = \left(vB(z) - \frac{U}{d} \right) \sigma . \quad (2.38)$$

Formulas izvedumam pieņem, ka $\sigma = 1$. Tad ievietojot vienu formulu iekš otras :

$$j = v\bar{B} + vz \frac{dB}{dz} - \frac{U}{d} . \quad (2.39)$$

Tālāk integrē strāvas blīvumu līdz Na kanāla vidum :

$$h \int_0^{\frac{l}{2}} j dz = h \left(\bar{B}lv - \frac{Ul}{d_s} \right) + uh \frac{dB}{dz} \int_0^{\frac{l}{2}} z dz . \quad (2.40)$$

Ievieš sekojošu apzīmējumu (2.40) izteiksmes pirmajam saskaitāmajam:

$$h \left(\bar{B}lv - \frac{Ul}{d_s} \right) = \frac{I_{Na}}{2} . \quad (2.41)$$

Tālāk (2.40) integrāli pārraksta vēlreiz sekojošā veidā:

$$uh \frac{dB}{dz} \int_0^{\frac{l}{2}} z dz = \frac{uh\bar{B}}{\bar{B}} \frac{dB}{dz} \int_0^{\frac{l}{2}} z dz . \quad (2.42)$$

Visbeidzot, tālāk integrējot un pēc vienkāršiem pārveidojumiem iegūst:

$$\begin{aligned} h \left(\bar{B}lv - \frac{Ul}{d_s} \right) + uh \frac{dB}{dz} \int_0^{\frac{l}{2}} z dz &= \frac{I_{Na}}{2} + \frac{U}{2\pi r} \cdot \frac{h}{\bar{B}} \cdot \frac{dB}{dz} \cdot \frac{l^2}{8} = \\ &= \frac{I_{Na}}{2} + \frac{U\sigma S}{2\pi r\sigma S} \cdot \frac{h}{\bar{B}} \cdot \frac{dB}{dz} \cdot \frac{l^2}{8} \end{aligned} \quad (2.43)$$

Atbilstošos locekļus saīsinot un vienkāršojot augstākminēto izteiksmi vēl vairāk, iegūst:

$$\begin{aligned} \frac{I_{Na}}{2} + \frac{U\sigma S}{2\pi r\sigma S} \cdot \frac{h}{\bar{B}} \cdot \frac{dB}{dz} \cdot \frac{l^2}{8} &= \frac{I_{Na}}{2} + \frac{Uh}{R_{Na}\sigma S\bar{B}} \cdot \frac{dB}{dz} \cdot \frac{l^2}{8} = \\ &= \frac{I_{Na}}{2} + \frac{Uh}{R_{Na}d_s\bar{B}} \cdot \frac{dB}{dz} \cdot \frac{l}{8} . \end{aligned} \quad (2.43+)$$

kur d_s ir apakškanāla garums:

$$d_s = \frac{\pi D}{72} = \frac{3,14 \cdot 0,116}{72} = 5,06 \text{ mm} . \quad (2.44)$$

Ja (2.43) otro saskaitāmo apzīmē ar "B", bet no aizvietošanas shēmas iegūto nātrija strāvas ceturtdaļu ar "A", tad iegūtie lielumi ir ievietojami 2.20. att. atbilstošajos trijstūros. Ceturtdaļa no I_{Na} , atbilst izvēlētajam principam par taisnstūra sadalījumu četros pēc laukuma vienādos trijstūros.

2.4. Kompleksā mainīgā funkciju izmantošana strāvu izplūšanas aprēķinam

Elektriskā potenciāla sadalījumu, kā arī strāvas izplūšanu MHD ģeneratora viena Na apakškanāla apkārtņē tāpat ir iespējams analītiski aprēķināt, izmantojot konformu attēlojumu pieeju. Šis paņēmiens nozīmē vienas kompleksās plaknes $z=x+iy$ konformu attēlojumu citā kompleksā plaknē $Z=X+iY$. Par konformu attēlojumu sauc tādu “ z ” plaknes attēlojumu “ Z ” plaknē, kurā nemainās leņķis starp jebkurām divām krustiskām līnijām un deformācijas koeficients ir vienāds visos virzienos no līniju krustpunkta [64].

Konformā attēlošana iepriekš, ar neredz savādāku pieeju (pie tam attēlošanu veicot veselas divas reizes), ir tikusi pielietota arī kondukcijas tipa MHD sūkņu elektriskā potenciāla un strāvas sadalījuma aprēķinam literatūrā [38], kur attēlojuma rezultātā iegūst aprēķina apgabalu ar vienkāršākiem robežnosacījumiem, nekā sākotnējie. Tomēr autora piedāvātajā variantā robežnosacījumi paliek tādi paši, taču attēlojuma jēga ir tāda, ka Laplasa vienādojuma atrisinājums, kuru var viegli atrast vienā ģeometrijā, tiek attēlots savādākā – konkrēti interesējošajā ģeometriskajā apgabalā.

Uzdevuma nostādni var formulēt sekojoši. Vispārīgā gadījumā elektriskā potenciāla sadalījumu apraksta Puasona vienādojums:

$$\Delta\varphi = \operatorname{div}(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad , \quad (2.45)$$

Tomēr pētāmajā konfigurācijā ne “ \mathbf{B} ”, ne “ \mathbf{v} ”, nav atkarīgi no azimutālā leņķa. Atbilstošie vektori ir vērsti tā, lai $\operatorname{div}(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ būtu nulle. Šāds pats pieņēmums ir veikts arī [38]. Tas noved pie tā, ka Puasona vienādojuma vietā var tikt izmantots jau minētais Laplasa vienādojums:

$$\Delta\varphi = 0 \quad . \quad (2.46)$$

Piedāvātās pieejas izmantošanai ir vairāki ierobežojumi.

- 1) Pirmkārt: tā ir izmantojama plakanparalēla uzdevuma gadījumā. Tā kā pētāmā elektriskā mašīna tās centrālajā, aktīvajā daļā ir aksiāli simetriskas ģeometrijas, tad tas nozīmē, ka ir nepieciešams veikt pāreju no cilindriskās koordinātu sistēmas uz Dekarta koordinātām. Lai šāda pāreja tiktu veikta pietiekoši korekti un adekvāti, nepieciešams, lai izpildās nosacījums:

$$R \gg h \quad . \quad (2.47)$$

Tas nozīmē, ka Na kanāla vidusrādiussam “ R ” ir jābūt ievērojami lielākam par kanāla augstumu “ h ”. Šādu sakarību magnetohidrodinamikā plaši lieto arī elektromagnētisko sūkņu teorijā [65], un, kā redzams no 2.2. att., tā izpildās arī šajā gadījumā.

- 2) Otrkārt: lai veiktu šādu pāreju, nepieciešams veikt gredzenveida kanāla pārgriešanu vienā vietā un – pēc tam – iztaisnošanu jeb izliekšanu. Šāda ģeometriskā transformācija tiek veikta saglabājot to pašu elektrisko lauku sadalījumu, līdz ar to, aksiāli simetriska uzdevuma vietā tiek risināts plakans uzdevums.

Ieviestās kompleksās plaknes “X” koordinātu ass vērsta Na plūsmas virzienā, savukārt “Y”-azimutālajā virzienā (kur azimutāls – pirms pārveidošanas).

Aprēķinam tiek veikti arī sekojoši pieņēmumi:

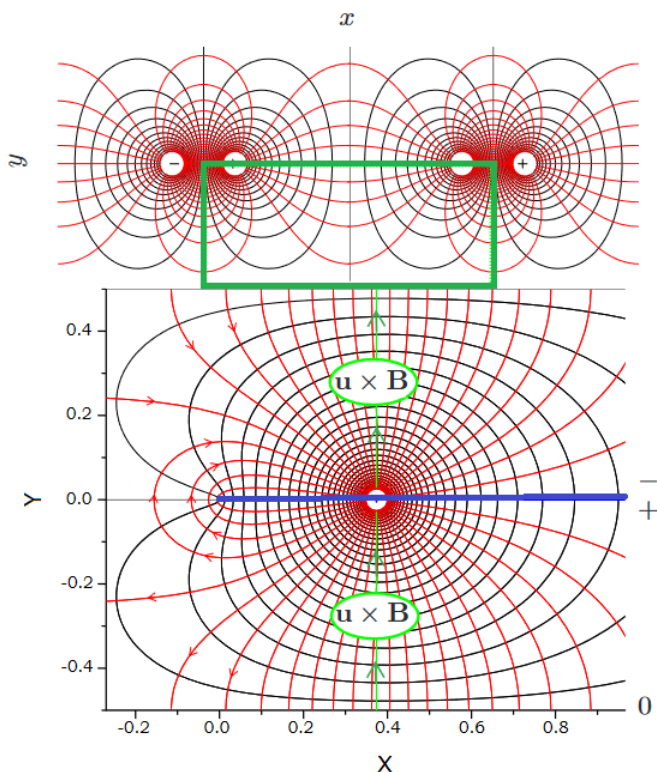
- 1) Elektriskais potenciāls pa kanāla augstumu ir nemainīgs. Šāda pieeja vēlreiz pamatojama ar (2.47).
- 2) Apskata tikai vienu pusi simetriskajam apakškanālam, tādējādi uzskatot, ka strāva un elektriskais lauks neietekmē apakškanāla otras puses galu. Šāds pieņēmums ir pamatojams ar to, ka izpildās sekojoša sakarība:

$$l \gg d . \quad (2.48)$$

Tas nozīmē, ka kanāla garums “l” aksiālā (pirms pārveidošanas) virzienā, citiem vārdiem, “X” koordinātes virzienā, atbilstoši 2.27. att. apakšējam attēlam, ir daudz lielāks par kanāla platumu “d”. Tas uzskatāmi ir ilustrēts arī 2.4. att. (a).

- 3) Cilindriskā Na kanāla vietā tiek apskatīts viens tā apakškanāls. Tas nozīmē to, ka par aprēķina apgabalu pieņem bezgalīgi garu spraugu, kas tiek orientēta aksiālā virzienā (pēc iztaisnošanas – “X” ass virzienā, atbilstoši 2.27. att. apakšējam attēlam). Tātad neierobežojoties ar izolatora galu un faktiski ieejot zonā, kurā Na kanāla vairs nav, tāpēc, ka tas ir pārgājis azimutālajos urbumos jau citā plaknē. Uzskatāmu ainu par modelējamo ģeometriju var iegūt 2.27. att. kā arī 2.2. un 2.4. att.

Aprēķinātās reakcijas strāvas konformais attēls, kā piemērs, ir parādīts 2.27. att. [58]. Praksē tas nozīmē to, ka plakne tiek it kā “salocīta” pa kādas konkrētas locījuma vietas līniju. Augšējā, horizontālā, zaļā locījuma līnija 2.27. att. augšā atbilst zilajai viduslīnijai 2.27. att. lejā. Šī zilā līnija ir arī Na apakškanālus atdalošais izolators. Izklāstītais locījums veikts, salokot zaļo līniju tā, ka abi līnijas galapunkti saiet kopā, tādējādi attēlojot augšējā zīmējuma pusplakni apakšējā attēlā. Attēla augšā ir parādīts izplūdušās strāvas konformais attēlojums, savukārt lejā ir parādīts rezultējošās funkcijas zīmējums. Jāsaprot, ka šis zīmējums reprezentē strāvas sadalījumu pirms integrēšanas (vienādojums 2.3), izmantojot Grīna funkciju. Tas nozīmē to, ka 2.27. att. apakšā tiek iegūtas tikai no viena punkta izejošās un ienākošās strāvas līnijas. Būtu izvēlēts cits attālums starp lādiņiem 2.27. att. augšā, arī rezultējošā strāvas veidošanās aina 2.27. att. apakšā būtu cita. Darbā [66] parādīts, ka šīs Grīna funkcijas funkcijas veidošanai var izmantot arī Laplasa vienādojuma atrisinājumu kā aproksimāciju trigonometriskas rindas veidā, to uzrakstot kā summu.



2.27. att. Reakcijas strāvas konformais attēlojums [58].

Līdzīgā veidā atrodamais ģenerators pamatstrāvas attēlojums ir identisks MHD mašīnu teorijā labi zināmajiem kondukcijas tipa elektromagnētisko sūkņu kanālu strāvu konformajiem pārveidojumiem un ir atrodams sekojošā monogrāfijā [38].

Būtiski ir vēlreiz atzīmēt, ka apakškanāli ir pa ģenerators aploci periodiski sadalīti. No tāda viedokļa arī 2.27. att. parādītā aina atbilstoši reālajai situācijai būtu attiecīgi pagarināma, tomēr no teorētiskā viedokļa tā var būt bezgalīgi gara, kas arī tiek pieņemts esošajā modelī. Ilustrēsim teikto sekojoši. 2.27. attēla augšējā zīmējumā ir attēlots elektriskā lauka spēka līniju un ekvipotenciāļu sadalījums diviem atsevišķiem, blakus esošiem pretējas zīmes lādiņiem. Atbilstoši šim pašam attēlam, redzams, ka tiem blakus atrodas tāds pats lādiņu pāris. Līdz ar to, šis zīmējums tādā pašā veidā ir attiecīgi bezgalīgi pagarināms, kā uz labo tā uz kreiso pusi. Pēc konformās attēlošanas iegūtā 2.27. attēla apakšējā bilde analogiski ir pagarināma uz augšu un uz leju.

Formulēsim robežnosacījumus. Iepriekšējos paragrāfos jau vairākkārt tika pieminēts, ka uz izolatora virsmas, normāles virzienā – tātad perpendikulāri ienākošās strāvas ir vienādas ar nulli. Tādā gadījumā, atbilstoši vienādojumiem (2.2.) un (2.2+), kad trešā saskaitāmā (kas atbilst slodzes reakcijai uz pētāmo

elektromagnētisko procesu) iekavās vēl nav, un kamēr ir tikai viens pretēji $vB(z)$ darbojošais elektriskā lauka loceklis:

$$j(x) = \sigma[vB(z) - E_v(x)] , \quad (2.49)$$

nulles strāvas robežnosacījums ir pierakstāms sekojoši:

$$vB(z) = E_v(x) . \quad (2.50)$$

No matemātikas ir zināms, ka jebkura analītiska, kompleksa funkcija no “z” automātiski apmierina 2D Laplasa vienādojumu. Jaunievietā kompleksā plakne $Z=X+iY$ ir saistāma ar “z” plakni, izmantojot izteiksmi:

$$Z(z) = \frac{\arccos e^{-\frac{\pi z}{d}}}{\pi} . \quad (2.51)$$

Dalījums ar “d” iekš eksponentes ir jau minētās apakškanālu periodicitātes dēļ. Kā jau teikts, šī funkcija attēlo 2.27. att. apakšējo z-pusplakni uz pilno Z-plakni, turklāt:

$$\begin{aligned} y &< -\varepsilon , \\ 0 &< \varepsilon \ll 1 , \end{aligned} \quad (2.52)$$

kur ε – bezgalīgi mazs lielums. Tomēr attēlošana notiek izņemot bezgalīgi garu masīvu ar taisniem griezumumiem jeb šķēlumiem. Šie pārtraukumi arī atbilst Na kanālā ievietotajiem nevadošajiem izolatoriem, un tie ir dislocēti sekojošās vietās:

$$\begin{aligned} X &= \frac{-\ln|\cos \pi x|}{\pi} , \\ Y &= n , \quad \text{kur } n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \end{aligned} \quad (2.53)$$

Ģeometriski katrs šāds griezumums atbilst savam intervālam:

$$n - \frac{1}{2} < x < n + \frac{1}{2} , \quad (2.54)$$

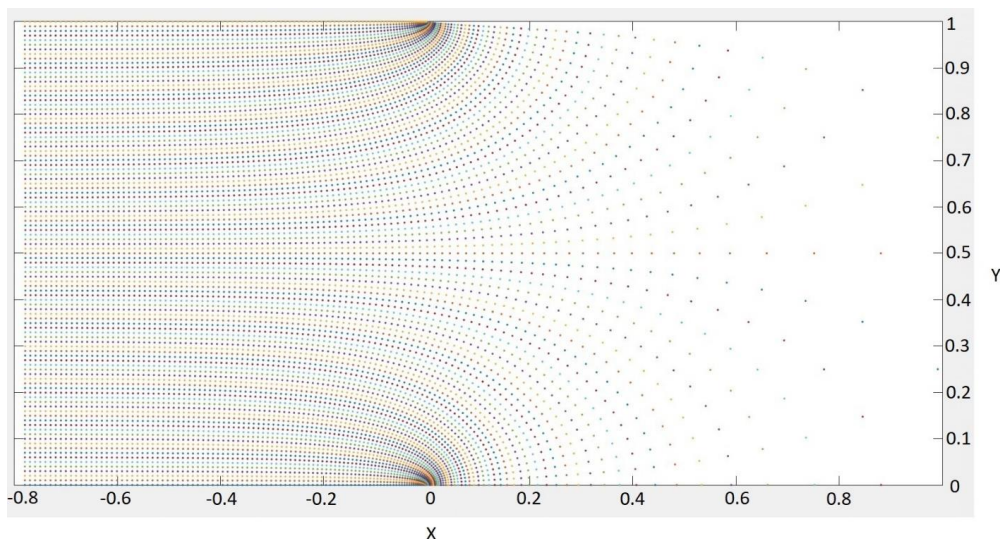
uz vienas un tās pašas līnijas:

$$y = -\varepsilon .$$

Ja kadam $\Phi_{reakc}(z)$ potenciālam x-ass ir lauka līnija, tādā gadījumā potenciālam $\Phi_{reakc}(z(Z))$, visas Z-plaknes griezumumi ir daļa no tās pašas lauka līnijas, līdz ar to izpildās atbilstošie robežnosacījumi. 2.27. att. augšējā zīmējuma koordinātu asu sākumpunkti atrodas attēla vidū, proti, zaļā taisnstūra augšējās malas viduspunktā.

Pārliecināsimies, ka izpildās sakarība (2.11), kas dod no literatūras iegūto jau minēto korekciju $0,22 \approx \frac{\ln 2}{\pi}$. Šim nolūkam, pielīdzinot $\Phi(z) = z$, var iegūt pamatstrāvas attēlojumu, kas parādīts 2.28. att. Aprēķinātās pamatstrāvas aina kompleksajā plaknē šeit ir parādīta punktveida datu attēlojumā. Ar vienu krāsu parādīti punkti, kas atrodas uz ekvipotenciālēm. Kā redzams, lauka sadalījums ir identisks skaitliski iegūtajam 2.6. att., 2.2. apakšnodaļā.

Šeit, Z-plaknē, iegūtais lauks raksturojas ar to, ka:



2.28. att. Ar kompleksā mainīgā pieeju aprēķinātās pamatstrāvas aina, attēlojot vienkrāsainas ekvipotenciāles

- 1) Pie $X < 0$, apakšējā robežā $x=0$, savukārt augšējā robežā $x=1$, kas arī atbilst 2.1. paragrāfā skaitliski aprēķinātajam 2.7. att. viduszonā.
- 2) Pie $X > 0$, apakšējā robežā;

$$x = \frac{\arccos e^{-\pi X}}{\pi}, \quad (2.55)$$

savukārt augšējā robežā:

$$x = 1 - \frac{\arccos e^{-\pi X}}{\pi}, \quad (2.56)$$

līdz ar to, izteiksme, kas ļauj iegūt nepieciešamā potenciāla vērtības uz aprēķina apgabala robežas, analogiski, kā tas tika darīts skaitliskajā aprēķinā, ir sekojoša:

$$\Phi_{\text{pam}}(Z) = 1 - \frac{2\arccos e^{-\pi Z}}{\pi} = N(z), \quad (2.57)$$

kur $N(z)$ ir 2.1. paragrāfa izteiksmē (2.13+) ieviestā svara funkcija. Šāds iedalījums svara un Grīna funkcijās ļauj atsevišķi izdalīt un noteikt divus atsevišķus svarus. Viens no tiem ir tāds, ar kādu 2.27. att. apakšējā zīmējumā

daļa strāvas līniju apliecās ap izolatoru. Savukārt otrs nosaka, cik liela daļa līniju aiziet uz tuvākajiem kaimiņizolatoriem.

3) Pie $X \ll 0$:

$$X = \frac{-\ln(\operatorname{ch}(\pi y))}{\pi} \approx \frac{\ln(2)}{\pi} - y . \quad (2.58)$$

Šāda lauka līniju izstiepšanās izrādās, ka ir vienāda ar jau pērito korekciju, koordinātu atskaiti sākot no izolatora gala:

$$\Delta X = y - |X| = \frac{\ln(2)}{\pi} , \quad (2.59)$$

kas apstiprina [38] monogrāfijā sniegtos rezultātus.

Lielākās grūtības konformo attēlojumu pieejai ir atrast funkcionālās sakarības, kuras sasaista abas kompleksās plaknes. Analītiska funkcija, derīga reakcijas strāvas konformajam attēlojumam (2.27. att. augšējais zīmējums), tika atrasta kā:

$$\Phi_{reakc}(z) = \frac{1}{\pi} \{ \ln[\sin(\pi[(x + iy) + a])] - \ln[\sin(\pi[(x + iy) - a])] \}; \quad a \leq \frac{1}{2} , \quad (2.60)$$

kur a – puse no attāluma starp 2.27. att. tuvākajiem diviem blakus esošiem lādiņiem. Tātad starp malējo lādiņu un zaļā taisnstūra vertikālo malu. Šāds potenciāls tiek radīts pateicoties bezgalīgi garam masīvam ar lineāriem lauka līniju avotiem, kas atrodas sekojošās koordinātās:

$$X = n - a , \quad \text{kur } n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots , \quad (2.61)$$

kā arī, attiecīgi atbilstošām, lineārām lauka līniju noplūdēm:

$$X = n + a , \quad \text{kur } n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots , \quad (2.62)$$

kas atbilst 2.27. att. augšējai bildei. Tādā gadījumā vienādojumam (2.3) ir derīga sekojoša Grīna funkcija:

$$g(x, x_1) = \frac{2}{\pi} \ln \left| \frac{\sin(\arccos(e^{-\pi x}) + \arccos(e^{-\pi x_1}))}{\sin(\arccos(e^{-\pi x}) - \arccos(e^{-\pi x_1}))} \right| , \quad (2.63)$$

kas veidojas konformā attēlojuma rezultātā, ja izpildās nosacījums (2.48) un $z, z_1 > 0$, kur z, z_1 ir kompleksi skaitļi, un atskaites punkts ir izolatora gals. Par koordinātu izvietojumu var gūt priekšstatu 2.27. attēlā. Reizinātājs “2” pirms naturāllogaritma ir ieviests tā iemesla dēļ, ka tikai puse no lauka līnijām ieiet Z-plaknē. Tas ir tāpēc, ka tiek attēlota tikai pusplakne “z”.

Kā jau iepriekšējā lappusē teikts, ir iespējams novērtēt cik liela daļa lauka līniju, kas iziet no kaut kāda punkta “ x_1 ” (2.27. att. apakšā), aiziet uz tādu pašu pretējo punktu, kur lauka līnijas ieplūst tuvākajā augšējā (vai apakšējā) izolatorā. Un tāpat iespējams novērtēt, cik liela daļa lauka līniju it kā “apliecas” ap izolatora galu, un nonāk atpakaļ ģeometriski tajā pašā punktā, taču šī paša izolatora pretējā pusē. Šim nolūkam pieņem, ka 2.27. att. augšējā zīmējuma zaļā taisnstūra augšējās malas garuma dimensija ir vienāda ar 1. Tādā gadījumā var pārliecināties, ka 2.27. att. augšējā attēlā no jebkura lādiņa izejošās līnijas sadalās uz diviem tuvākajiem blakuslādiņiem atbilstoši sekojošai attiecībai:

$$(1 - 2a) : 2a , \quad (2.64)$$

pie tam tā, ka maksimumam atbilst tuvākais lādiņš (nav grūti saskatīt 2.27. att. ka katram lādiņam viens blakus esošais ir tuvāks, savukārt otrs ir tālāks).

Reakcijas strāvai atrastā inversā funkcija, kas dod 2.27. att. apakšējo zīmējumu ir sekojoša:

$$\Phi_{reakc}(Z(z)) = \frac{1}{\pi} \ln \left(\cos \left(\frac{1}{2i} \ln \left(\frac{1 + i \left(\operatorname{tg}(\pi a) \left(1 + \frac{2}{e^{\pi(x+iy)} - 1} \right) \right)}{1 - i \left(\operatorname{tg}(\pi a) \left(1 + \frac{2}{e^{\pi(x+iy)} - 1} \right) \right)} \right) \right) \right) . \quad (2.65)$$

No šī zīmējuma var redzēt, kā attīstās loceklis $\mathbf{v} \times \mathbf{B}(z)$, kas inducējas konkrētā punktā:

$$x = \frac{-\ln|\cos \pi a|}{\pi} = 0.37381 . \quad (2.66)$$

Strāvai (2.27. att. apakšējā attēlā ar zaļu vektoru) atdurties pret izolatoru, tā veido pozitīvu lādiņu zem izolatora, savukārt negatīvu virs tā. Šeit $\mathbf{v} \times \mathbf{B}(z)$ sadalās. Novērtējums liecina par to, ka, kā izrādās:

$$20\% = (1 - 2a) , \quad (2.67)$$

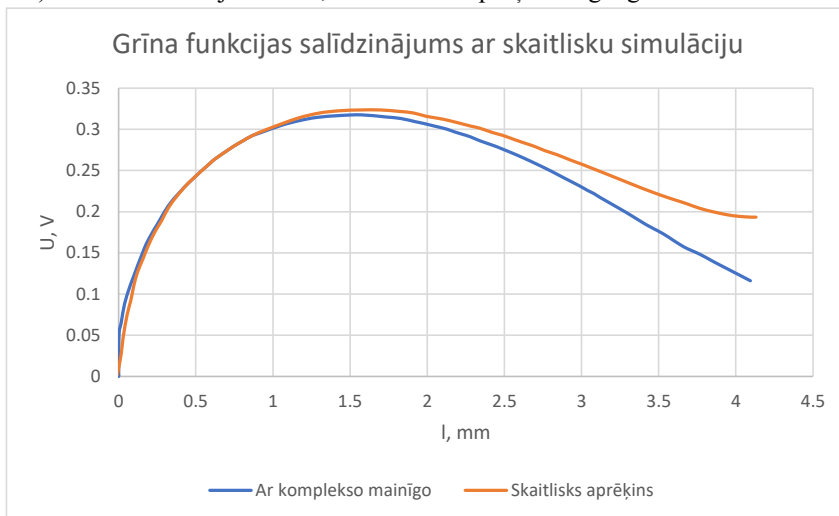
“apliecas” ap izolatora galu un, dodot savu artavu, piedalās pamatstrāvas plūsmā. Savukārt:

$$80\% = 2a , \quad (2.68)$$

atgriežas uz $\mathbf{v} \times \mathbf{B}(z)$ sākumpunktu.

Kā redzams 2.27. att., parādītā aprēķinātā aina samērā labi līdzinās skaitliski aprēķinātās strāvas zīmējumam 2.11. att., nodaļas sākumā, 2.2 apakšnodaļā. Tomēr ir vērojamas atšķirības. Skaitliskajā aprēķinā var redzēt, ka 2.11. att. kreisās sānu malas tuvumā strāvu vektori ir paralēli

sānu malai. Savukārt 2.27. att. analītiskajā aprēķinā strāva it kā ieplūst labajā sānu malā (aprēķināta ģenerators kanāla pretējā puse, taču mašīnas simetrijas dēļ tās, protams, ir vienādas). Tas ir izskaidrojams ar to, ka skaitliskā aprēķinā ar galīgo elementu metodi aprēķina



2.29. att. Reakcijas strāvas analītiska aprēķina salīdzinājums ar skaitlisku

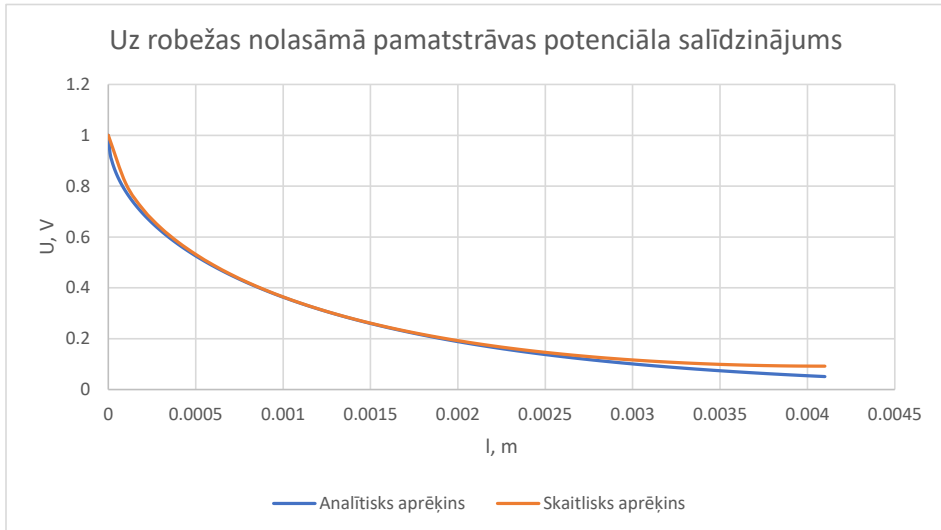
apgabals tiek mākslīgi ierobežots līdz ar novilkto sānu līniju, kas arī atbilst izolatora galam. Analītiskā aprēķinā, ņemot vērā konformā attēlojuma īpatnības, kā arī faktu, ka lauks netiek ierobežots ar sānu malu, aina veidojas savādāka. Skaitliskā aprēķina apgabala šāda pati atbilstoša pagarināšana, pavirzot sānu malu tālāk, vairs nedod nozīmīgu informāciju par lauka sadalījumu no reālā prototipa viedokļa. Tas ir tā iemesla dēļ, ka aiz izolatora seko azimutālie urbumi, kas vairs neatrodas tajā pašā plaknē, kurā skaitliskais aprēķins, kā arī, kā jau iepriekš teikts, tie ir apgabali, kuros vairs neizpildās mašīnas aksiālā simetrija.

Iegūtajos reakcijas strāvas attēlos, kā jau izdiskutēts, ir novērojami punktveida apgabali, kuros strāvas līnijas tiecas saiet kopā. Turpretim, ekvipotenciāles cenšas veidot riņķus ap šo punktu. Kompleksā mainīgā funkciju teorijā šādus apgabalus sauc par singulārajiem punktiem, un tie liecina par to, ka šajā punktā neizpildās Košī-Rīmaņa nosacījumi. Tas noved pie tā, ka funkcija dotajā punktā nav analītiska, proti, funkcijai neeksistē atvasinājums, vai arī tā šajā punktā nav definēta [64].

2.29. att. dots salīdzinājums analītiskam aprēķinam ar Grīna funkciju un ar galīgo elementu metodi (skat. 2.9. un 2.11. att.) skaitliski iegūtajam rezultējošajam elektriskajam potenciālam, kas nolasīts uz strāvas aprēķina apgabala robežas. Kā redzams, līknes pēc formas un maksimumiem labi sakrīt. Zināma nesakritība ir novērojama izolatoru galos. Tas var būt izskaidrojams ar doto zonu tiešu atrašanos zem magnētu robežām, kā arī plūsmas pāriešanu uz slīpajiem aizejošajiem urbumiem jeb apakškanāliem.

Visbeidzot 2.30. att. ir parādīts salīdzinājums no analītiskajiem aprēķiniem iegūtajam elektriskajam potenciālam pēc izteiksmes (2.57) un uz aprēķina apgabala robežas nolasītajam skaitliskajā simulācijā 2.7. att. Attēlotās līknes 2.30. att. atbilst 2.7. att. redzamās līknes krītošajai daļai labajā pusē. Redzams, ka iegūtā līkņu sakritība šajā gadījumā ir labāka nekā

reakcijas strāvai 2.29. att. Vienīgā saskatāmā atšķirība atkal ir novērojama tuvāk Na pamatkanāla robežai, kur tas sazarojas apakškanālos.



2.30. att. Pamatstrāvas elektriskā potenciāla aprēķina salīdzinājums analītiskam un skaitliskam aprēķinam

Noslēdzot paragrāfu par kompleksā mainīgā teorijas izmantošanu potenciāla aprēķinam, vēlreiz jāuzsver, ka izklāstītā pieeja ir lietota ar ierobežotu precizitāti. Reālās konstrukcijas gala efektus ierēķināt ir nesalīdzināmi sarežģītāk, komplicētās urbumu ģeometrijas dēļ Na kanāla galos. Tomēr, neskatoties uz to, zināmā tuvinājumā ar piedāvāto metodi tas ir ierēķināts. Turklāt jāuzsver apskatāmās parādības nozīmīgums no praktiskā viedokļa. Interesējoties par pētāmās elektriskās mašīnas režīmiem ar maksimāli augstu lietderības koeficientu un citiem enerģētiskajiem parametriem, apskatītā strāvas perturbācija spēlē būtisku lomu, kā tas jau ir vairākkārt atzīmēts citētajā kondukcijas tipa MHD mašīnu teorijā [38], [39].

Nodaļas noslēgumā ir vērts rezumēt ekvivalentās shēmas lietojuma svarīgākos “ekvivalentos” aspektus attiecībā uz pētāmo iekārtu:

- 1) Trīs elektriski saslēgtas transformatorshēmas induktivitātes ;
- 2) Nātrija viens apakškanāls izstiepts, kā bezgalīgi gara lente aksiālā virzienā, kā arī iztaisnots, pārejot no cilindriskās koordinātu sistēmas uz Dekarta koordinātām;
- 3) Nātrijā inducētais spriegums (šajā nodaļā saukts par “ārejo spriegumu”) tiek pielīdzināts jeb pārrēķināts spriegumu starpībai, kas tiek modelēta, kā pieslēgta iepriekšējā punktā minētajai bezgalīgajai lentei (2.4. att. (a)).

Šie 3 punkti pamato T-veida ekvivalentās transformatorshēmas lietojamību MHD ģeneratoram.

3. MHD ĢENERATORA ANALĪZE, IZMANTOJOT SPRIEGUMU VIENĀDOJUMUS

3.1 .Magnetohidrodinamikas vienādojumu sistēma

Turpmākajā nodaļā tiek piedāvāta alternatīva pieeja transformatora aizvietošanas shēmai. Tā balstās uz analītisku vienādojumu izvedumiem strāvām, Na ātrumam un citiem lielumiem [67]. Meklējamās funkcijas iegūtas, izmantojot MHD vienādojumu sistēmas vienādojumus viendimensionālā tuvinājumā, proti, bez skaitliskās modelēšanas. Kā parādīts, izstrādātā metode dod adekvātus rezultātus, kas ir salīdzināmi un labi sakrīt ar aizvietošanas shēmas pieeju iegūto, kā arī ar eksperimentu rezultātiem [68]. Tomēr pirms sākt piedāvātās metodes izklāstu, autoraprāt ir lietderīgi diferenciālā formā uzrakstīt vispārīgo magnetohidrodinamikas vienādojumu sistēmu uz kuras pieeja ir bāzēta [69]–[71].

Lēni kustīgām, izotropām un nemagnētiskām, elektrovadošām vidēm elektromagnētiskā lauka vienādojumu sistēma ir pierakstāma sekojoši:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j}, \quad (3.1)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (3.2)$$

$$\mathbf{j} = \sigma[\mathbf{E} + (\mathbf{v} \times \mathbf{B})], \quad (3.3)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \quad (3.4)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}. \quad (3.5)$$

Apskatot procesus nesaspiežamā, šķidrā, elektrovadošā vidē (šķidrā metālā), vienādojumu sistēmai (3.1) – (3.5.) pievieno šķidruma plūsmas nepārtrauktības vienādojumu (3.7), kā arī šķidruma kustības vienādojumu, ko hidrodinamikā sauc par Navjē-Stoksa vienādojumu (3.6):

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \operatorname{grad}) \mathbf{v} \right] = -\operatorname{grad} p + \eta \Delta \mathbf{v} + \rho \mathbf{g} + [\mathbf{j} \times \mathbf{B}], \quad (3.6)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = 0, \quad (3.7)$$

kur t – laiks,

ρ – šķidra metāla blīvums,

\mathbf{v} – šķidruma ātrums,

p – spiediens,

η – šķidruma dinamiskā viskozitāte,

\mathbf{g} – brīvās krišanas paātrinājums.

Redzams, ka Navjē-Stoksa vienādojums ietver sevī ārējo spēku locekli. Šajā gadījumā tas ir elektromagnētiskā spēka blīvums. MHD procesos nereti tieši šim saskaitāmajam ir būtiskākā loma.

Kā zināms, hidrodinamikas vienādojumu sistēmai (3.6) – (3.7) līdz šim brīdim nav atrasts vispārīgs atrisinājums [72]. Turklāt nav pat zināms vai tāds vispār eksistē un ASV bāzētais Kleja Matemātikas Institūts to ir iekļāvis starp tūkstošgades matemātikas problēmām [73].

Kombinējot Faradeja, Ampēra un Oma likumus diferenciālā formā (3.1.-3.3.), kā arī

izmantojot magnētiskā lauka un ātruma nepārtrauktību (attiecīgi 3.4. un 3.7.) iespējams iegūt magnētiskā lauka pārnesei jeb indukcijas vienādojumu [61], [65]. Bez ārējiem strāvas avotiem, kā arī pieņemot, ka ātrums ir konstants, tas ir pierakstāms sekojoši :

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \frac{1}{\sigma \mu} \Delta \mathbf{B} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{B} . \quad (3.8+)$$

Šī ir viena no magnetohidrodinamikā svarīgākajām un biežāk lietotajām izteiksmēm, un, kopā ar Navjē-Stoksa vienādojumu, tie ietver sevī mijiedarbību starp magnētisko lauku un elektrovadoša šķidrums plūsmu. Ieviešot kādu izvēlētu raksturīgo garumu un ātrumu, kā arī visu indukcijas vienādojumu bezdimensionalizējot, iegūst ērtu formu vienādojuma analīzei, kas ļauj viegli salīdzināt viena vai otra locekļa pārsvaru pār citiem :

$$\frac{\partial \tilde{\mathbf{B}}}{\partial \tilde{t}} = \frac{1}{Rm} \tilde{\Delta} \tilde{\mathbf{B}} + (\tilde{\mathbf{v}} \cdot \tilde{\nabla}) \tilde{\mathbf{B}} . \quad (3.9+)$$

Šeit loceklis $\Delta \mathbf{B}$ apraksta magnētiskā lauka difūziju, $\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$ – lauka nestacionāro dabu, savukārt $(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{B}$ – magnētiskā lauka konvekciju.

Turpmāk piedāvātajā MHD ģenerators aprēķina metodē, tiek pielietots tā saucamais elektrodinamiskais jeb cieta ķermeņa tuvinājums, kas nosaka to, ka šķidrums tilpums tiek uzskatīts par kustīgu, cietu ķermeni. Proti, tiek pieņemts, ka šķidrums lokālais ātrums visos tilpuma punktos ir vienāds [49].

3.2. Ģenerators analītisks modelis

3.1. tabulā ir apkopoti dotās apakšnodaļas formulās izmantotie apzīmējumi un atbilstošie izmantotie lielumi.

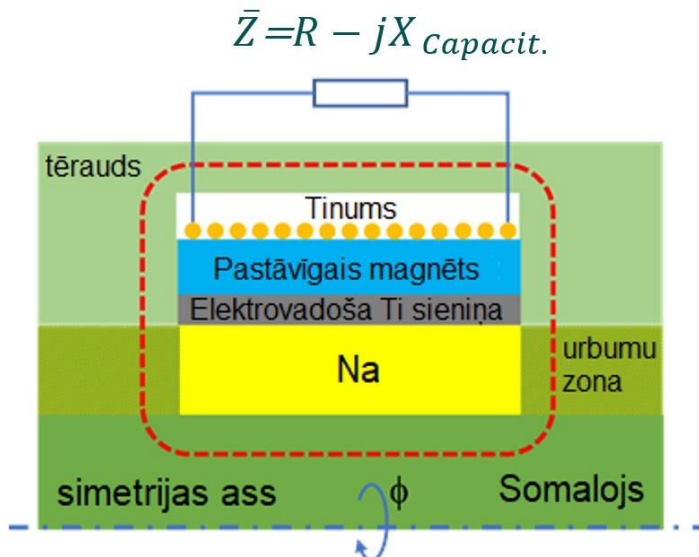
3.1. tabula

Modelī izmantotie apzīmējumi un to vērtības

Apzīmējums	Parametrs	Vērtība/mērvienība
B	Magnētiskā lauka indukcija Na spraugā	[0,33 T]
B_0	Magnētiskā lauka indukcija Somalojā	[T]
μ_0	Somaloja magnētiskā caurlaidība	200
l_0	Magnētiskās spēka līnijas garums caur Somaloju	[0,06 m]
S_0	Somaloja šķērsriezuma laukums	[0,009852 m ²]
B_f	Magnētiskā lauka indukcija elektrotehniskajā tēraudā	[T]
μ_f	Elektrotehniskā tērauda magnētiskā caurlaidība	3280
l_f	Magnētiskās spēka līnijas garums caur elektrotehnisko tēraudu	[0,06 m]
S_f	Elektrotehniskā tērauda šķērsriezuma laukums	[5,7555 · 10 ⁻³ m ²]
B_e	Magnētiskā lauka indukcija Na kanāla galu pievados ārpus elektriskās mašīnas aktīvās zonas	[T]
l_e	Magnētiskās spēka līnijas garums caur Na	[2 · 10 ⁻³ m]
S_e	Šķērsriezuma laukums, caur kuru plūst magnētiskā plūsma Na kanāla galu pievados	[5,538 · 10 ⁻³ m ²]

S_s	Na gredzenveida spraugas, kā arī vienlaicīgi brīvās virsmas šķērsriezuma laukums uz kuru iedarbojas termoakustiskā dzinēja attīstītais spiediens	$[1,432 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2]$
I_1	Strāva Na	[A]
I_2	Strāva spolē	[A]
I_w	Strāva Ti čaulā	[A]
n	Spoles vijumu skaits	[400]
Φ_0	Magnētiskā plūsma	[Wb]
r_1	Na elektriskā pretestība	$[0,2475 \text{ m}\Omega]$
r_2	Slodzes elektriskā pretestība (elektriskās mašīnas spolei – 9 Ω)	$[\Omega]$
r_w	Ti čaulas elektriskā pretestība	$[2,95 \text{ m}\Omega]$
D	Na gredzenveida kanāla diametrs	$[0,114 \text{ m}]$
V	Na kustības ātrums	$[\text{m/s}]$
q	Lādiņš uz slodzes kondensatora	[C]
C	Slodzes kondensatora kapacitāte	[F]
ω	Mainstrāvas/svārstību leņķiskā frekvence	$[314 \text{ rad/s}]$
m	Na masa	$[0,464 \text{ kg}]$
ΔP	Na pievadītais spiediens	[Pa]
ν	Kinemātiskā viskozitāte	$[0,77 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}]$
ρ	Blīvums	$[928 \text{ kg/m}^3]$

Modelis ir bāzēts uz Ampēra teorēmas pielietošanu. Tas nosaka, ka Na strāvas radītais magnētiskais lauks ir nātrijā plūstošo, inducēto strāvu radīts (3.1. att). Attēlā var redzēt, ka kopsummā 3 dažādas elektriskās strāvas šķērso apgabalu, kas ir ierobežots ar magnētiskās plūsmas līniju: elektriskā strāva nātrijā I_1 ; inducētā zudumu strāva vadošajā titāna sienīnā I_w , kā arī inducētā sekundārā strāva ģeneratora spolē I_2 un slodzē.



3.1. att. Elektriskās mašīnas pētāmā magnētiskā ķēde

Uzrakstot pilnās strāvas likumu, kurā par integrēšanas kontūru ņemta augstākminētā plūsmas līnija, iegūst:

$$\frac{B_0}{\mu_0} l_0 + \frac{B_f}{\mu_f} l_f + 2 \frac{B_e}{\mu_0} l_e = I_1 + I_2 n + I_w. \quad (3.8)$$

Izmantojot magnētiskās plūsmas nepārtrauktības principu:

$$B_f S_f = B_e S_e = B_0 S_0, \quad (3.9)$$

tad apvienojot (3.8) un (3.9):

$$B_0 \left(l_0 + \frac{\mu_0 S_0}{\mu_f S_f} l_f + 2 \frac{S_0}{S_e} l_e \right) = \mu_0 (I_1 + I_2 n + I_w). \quad (3.10)$$

Apzīmēsim turpmāko lielumu ar L'_0 un nosauksim to par ekvivalento garumu:

$$L'_0 = l_0 + \frac{\mu_0 S_0}{\mu_f S_f} l_f + 2 \frac{S_0}{S_e} l_e. \quad (3.11)$$

Tad magnētiskā plūsma var tikt izteikta, kā:

$$\Phi = \frac{S_0}{L'_0} \mu_0 (I_1 + I_2 n + I_w). \quad (3.12)$$

Uzrakstam spriegumu vienādojumus 3 atsevišķām elektriskām ķēdēm: strāvai šķidrā nātrijā, strāvai spolē un parazitiskai strāvai elektriskās mašīnas konstruktīvajā elementā – šuntējošā titāna sienīnā/ čaulā.

- Strāva I_1 attiecas uz gredzenveida kanālu, aizpildītu ar nātriju, ar vidējo kanāla diametru D un elektrisko pretestību r_1 . Pieliktais magnētiskais lauks šķeļot nātrija oscilējošo šķidrums plūsmu ar ātrumu V :

$$I_1 r_1 + \pi D V B = - \frac{d\Phi}{dt}. \quad (3.13)$$

Atvasinot izteiksmi (3.13), iegūst:

$$- \frac{d^2 \Phi}{dt^2} = \frac{r_1 dI_1}{dt} + \frac{\pi D B dV}{dt}. \quad (3.14)$$

- Strāvas I_2 ķēde, kuru veido ģenerators spole, slodzes elektriskā pretestība un jaudas koeficientu koriģējošs kondensators. Pēdējie divi veido impedanci: $Z=R-jX_{\text{Capacit.}}$, kas pētāmajā shēmā parādīta 3.1. att. Tad kopējā pretestība r_2 un kondensatora kapacitāte C , kas ļauj uz plāksnēm uzkrāt lādiņu $q = C \cdot U$:

$$I_2 r_2 + \frac{q}{C} = -n \frac{d\Phi}{dt} . \quad (3.15)$$

Atkal atvasinot:

$$-\frac{d^2\Phi}{dt^2} = \frac{r_2}{n} \frac{dI_2}{dt} + \frac{I_2}{nC} . \quad (3.16)$$

- Visbeidzot, elektriskā ķēde ar pretestību r_w , kas veidojas pateicoties nevēlamas strāvas I_w plūsmas konstruktīvajā elementā, kas satur kopā šķidru metālu.

$$r_w I_w = -\frac{d\Phi}{dt} . \quad (3.17)$$

Atkal atvasinot:

$$-\frac{d^2\Phi}{dt^2} = \frac{r_w dI_w}{dt} . \quad (3.18)$$

Tālāk apvienojot izteiksmes (3.8) – (3.18) iespējams iegūt 3 sekojošus diferenciālvienādojumus:

$$\frac{d^2\Phi}{dt^2} = \frac{S_0}{L'_0} \mu_0 \left(\frac{d^2 I_1}{dt^2} + n \frac{d^2 I_2}{dt^2} + \frac{d^2 I_w}{dt^2} \right) = - \left(\frac{r_2}{n} \frac{dI_2}{dt} + \frac{1}{nC} I_2 \right) , \quad (3.19)$$

$$\frac{r_1 dI_1}{dt} + \frac{\pi DB dV}{dt} = \frac{r_2 dI_2}{n dt} + \frac{1}{nC} I_2 , \quad (3.20)$$

$$\frac{r_w dI_w}{dt} = \frac{r_2 dI_2}{n dt} + \frac{1}{nC} I_2 . \quad (3.21)$$

Ievietojot vienādojumā (3.19) I_1 un I_w no izteiksmēm (3.20) un (3.21) un veicot nepieciešamos pārveidojumus, var iegūt vienu vienādojumu, kas nosaka strāvu spolē I_2 :

$$\begin{aligned} & - \left(\frac{r_2}{n} \frac{dI_2}{dt} + \frac{1}{nC} I_2 \right) = \\ & = \frac{S_0}{L'_0} \mu_0 \left(\frac{d^2 I_2}{dt^2} \left(\frac{r_2}{nr_1} + \frac{r_2}{nr_w} + n \right) + \frac{dI_2}{dt} \frac{1}{C} \left(\frac{1}{nr_1} + \frac{1}{nr_w} \right) - \frac{\pi DB}{r_1} \frac{d^2 V}{dt^2} \right) , \end{aligned} \quad (3.22)$$

un atbilstošos locekļus pārgrupē:

$$-\frac{S_0}{L'_0} \mu_0 n \left[\frac{d^2 I_2}{dt^2} \left(r_2 \left(\frac{1}{nr_1} + \frac{1}{nr_w} \right) + n \right) + \frac{dI_2}{dt} \left(\frac{1}{C} \left(\frac{1}{nr_1} + \frac{1}{nr_w} \right) \right) \right] - \left(r_2 \frac{dI_2}{dt} + \frac{1}{C} I_2 \right) =$$

$$= -n \frac{S_0}{L'_0} \mu_0 \frac{\pi DB}{r_1} \frac{d^2 V}{dt^2} . \quad (3.23)$$

Ievieš kompleksos skaitļus:

$$V = V_0 e^{i\omega t} ,$$

$$I_2 = I_0 e^{i(\omega t + \phi)} ,$$

kur ϕ ir fāžu nobīdes leņķis starp slodzes strāvu un Na ātrumu. Tādā gadījumā:

$$-\frac{S_0}{L'_0} \mu_0 n \left[-\omega^2 I_0 e^{i(\omega t + \phi)} \left\{ r_2 \left(\frac{1}{nr_1} + \frac{1}{nr_w} \right) + n \right\} + \frac{i\omega}{C} I_0 e^{i(\omega t + \phi)} \left(\frac{1}{nr_1} + \frac{1}{nr_w} \right) \right] -$$

$$- \left(r_2 i\omega I_0 e^{i(\omega t + \phi)} + \frac{1}{C} I_0 e^{i(\omega t + \phi)} \right) = \frac{S_0}{L'_0} \mu_0 n \frac{\pi DB}{r_1} \omega^2 V_0 e^{i(\omega t)} . \quad (3.24)$$

Likvidējot kopīgo locekli $e^{i(\omega t)}$, pārejot uz komplekso skaitļu trigonometrisko formu un vienkāršojot izteiksmi, iegūst:

$$n^2 \frac{S_0}{L'_0} \mu_0 I_0 (\cos \phi + i \sin \phi) \{ \alpha \omega^2 - i \omega \beta \} - I_0 (\cos \phi + i \sin \phi) \left\{ r_2 i \omega + \frac{1}{C} \right\} =$$

$$= n \frac{S_0}{L'_0} \mu_0 \frac{\pi DB}{r_1} \omega^2 V_0 . \quad (3.25)$$

Apzīmējot ar:

$$\alpha = r_2 \left(\frac{1}{n^2 r_1} + \frac{1}{n^2 r_w} \right) + 1, \quad (3.26)$$

$$\beta = \frac{1}{C} \left(\frac{1}{n^2 r_1} + \frac{1}{n^2 r_w} \right), \quad (3.27)$$

un atdalot vienādojuma reālās un imaginārās daļas, iegūst :

$$1) \quad n^2 \frac{S_0}{L'_0} \mu_0 I_0 (\alpha \omega^2 \cos \phi + \omega \beta \sin \phi) - I_0 \left(\frac{\cos \phi}{C} - r_2 \omega \sin \phi \right) =$$

$$= n \frac{S_0}{L'_0} \mu_0 \frac{\pi DB}{r_1} \omega^2 V_0 , \quad (3.28)$$

$$2) \quad n^2 \frac{S_0}{L'_0} \mu_0 I_0 (\alpha \omega^2 \sin \phi - \omega \beta \cos \phi) - I_0 \left(r_2 \omega \cos \phi + \frac{\sin \phi}{C} \right) = 0 . \quad (3.29)$$

No pēdējā (3.29) vienādojuma izsaka $\tan \phi$ fāžu nobīdes leņķim starp slodzes strāvu un Na ātrumu (Vienlaicīgi arī ar slodzes spriegumu, jo tas sakrīt fāzē ar ātrumu. Tiek pieņemts, ka atskaites punkts visiem trim fāžu nobīdes leņķiem – gan ϕ , gan turpmāk ieviestajiem ψ (3.32) un θ (3.55) – ir viens un tas pats, proti, ātrums $V = V_0 e^{i\omega t}$):

$$\tan \phi = \frac{r_2 L'_0 \omega + n^2 S_0 \mu_0 \omega \beta}{n^2 S_0 \mu_0 \omega^2 \alpha - \frac{L'_0}{C}} . \quad (3.30)$$

No (3.28) vienādojuma iegūst formulu slodzes strāvai:

$$I_0 = \frac{n S_0 \mu_0 \omega^2}{L'_0 \cos \phi \left[n^2 \frac{S_0}{L'_0} \mu_0 (\alpha \omega^2 + \beta \omega \tan \phi) - \frac{1}{C} + r_2 \omega \tan \phi \right]} \frac{\pi DB V_0}{r_1} . \quad (3.31)$$

Nātrija ātrums ir atkarīgs no pievadītajām spiediena oscilācijām, kas ir pievadītas ģenerators galiem un no mijiedarbības ar pielikto magnētisko lauku. Līdz ar to arī spiediena diference uz mašīnas izvadiem ir pierakstāma kompleksā formā:

$$\Delta P e^{i(\omega t + \psi)} \quad (3.32)$$

Lai iegūtu formulu Na ātruma aprēķinam, nepieciešams atrisināt integrālā formā uzrakstītu šķidruma kustības vienādojumu:

$$\Delta P S_s - I_1 \pi DB - KV = m \frac{dV}{dt} \quad (3.33)$$

kur K – berzes koeficients.

Uzskatot, ka strāvas atvasinājums pēc laika ir kaut kāda zināma funkcija, tad visērtāk ir uzrakstīt un izmantot paša kustības vienādojuma atvasinājumu:

$$\frac{d\Delta P}{dt} S_s - \pi DB \frac{dI_1}{dt} - K \frac{dV}{dt} = m \frac{d^2 V}{dt^2} \quad (3.34)$$

Tad, izmantojot (3.20) vienādojumu, raksta:

$$\frac{dI_1}{dt} = \frac{r_2}{nr_1} \frac{dI_2}{dt} + \frac{I_2}{nr_1 C} - \frac{\pi DB}{r_1} \frac{dV}{dt} \quad (3.35)$$

$$\frac{dI_1}{dt} = \frac{r_2}{nr_1} I_0 i \omega e^{i(\omega t + \phi)} + \frac{1}{nr_1 C} I_0 e^{i(\omega t + \phi)} - \frac{\pi DB V_0}{r_1} i \omega e^{i(\omega t)} \quad (3.36)$$

$$\frac{dI_1}{dt} = I_0 i \omega e^{i(\omega t + \phi)} \left(i \omega \frac{r_2}{nr_1} + \frac{1}{nr_1 C} \right) - \frac{\pi DB V_0}{r_1} i \omega e^{i(\omega t)} \quad (3.37)$$

Pārejot uz kompleksiem skaitļiem un ievietojot (3.37) kustības vienādojuma atvasinājumā (3.34), iegūst:

$$\Delta P S_s i \omega e^{i(\omega t + \psi)} - \pi DB \left(I_0 e^{i(\omega t + \phi)} \left(i \omega \frac{r_2}{nr_1} + \frac{1}{nr_1 C} \right) - \frac{\pi DB}{r_1} V_0 i \omega e^{i(\omega t)} \right) - K i \omega V_0 e^{i(\omega t)} = -m \omega^2 V_0 e^{i(\omega t)} \quad (3.38)$$

Vienkāršojot ar kopīgo locekli $e^{i(\omega t)}$ un ievietojot (3.38) slodzes strāvas I_0 izteiksmi (3.31):

$$\Delta P S_s i \omega e^{i\psi} - \pi DB \frac{n S_0 \mu_0 \omega^2}{L'_0 \cos \phi \left[n^2 \frac{S_0}{L_0} \mu_0 (\alpha \omega^2 + \beta \omega t g \phi) - \frac{1}{C} + r_2 \omega t g \phi \right]} \cdot \frac{\pi DB V_0}{r_1} e^{i\phi} \left(i \omega \frac{r_2}{nr_1} + \frac{1}{nr_1 C} \right) + \frac{(\pi DB)^2}{r_1} V_0 i \omega - K i \omega V_0 = -m \omega^2 V_0 \quad (3.39)$$

Pārveidojot trigonometriskā formā, saīsinot ar “ n ” locekli un iznesot pirms iekavām V_0 :

$$V_0 \left[\left(\frac{S_0 \mu_0 \omega^2}{L'_0 \cos \phi \left[n^2 \frac{S_0}{L_0} \mu_0 (\alpha \omega^2 + \beta \omega t g \phi) - \frac{1}{C} + r_2 \omega t g \phi \right]} \right) \cdot \frac{(\pi DB)^2}{r_1} (\cos \phi + i \sin \phi) \cdot \left(i \omega \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{r_1 C} \right) - i \omega \left(\frac{(\pi DB)^2}{r_1} - K \right) - m \omega^2 \right] = \quad (3.40)$$

$$= \Delta PS_s i \omega (\cos \psi + i \sin \psi) \quad .$$

Analoģiski kā iepriekš, vienādojumam atdala reālās un imaginārās daļas:

$$1) - \Delta PS_s \omega \sin \psi =$$

$$= V_0 \left[\left(\frac{S_0 \mu_0 \omega^2}{L'_0 \cos \phi \left[n^2 \frac{S_0}{L_0} \mu_0 (\alpha \omega^2 + \beta \omega t g \phi) - \frac{1}{C} + r_2 \omega t g \phi \right]} \cdot \right) - m \omega^2 \right] \cdot \left(\frac{(\pi DB)^2}{r_1} \cdot \left(-\omega \sin \phi \frac{r_2}{r_1} + \frac{\cos \phi}{r_1 C} \right) \right) \quad , \quad (3.41)$$

$$2) \Delta PS_s \omega \cos \psi =$$

$$= V_0 \left[\left(\frac{S_0 \mu_0 \omega^2}{L'_0 \cos \phi \left[n^2 \frac{S_0}{L_0} \mu_0 (\alpha \omega^2 + \beta \omega t g \phi) - \frac{1}{C} + r_2 \omega t g \phi \right]} \frac{(\pi DB)^2}{r_1} \right) - \left(\omega \cos \phi \frac{r_2}{r_1} + \frac{\sin \phi}{r_1 C} \right) \right] \cdot \left(-\omega \left(\frac{(\pi DB)^2}{r_1} - K \right) \right) \quad . \quad (3.42)$$

Rezultātā, izdalot vienu vienādojumu ar otru, iegūst formulu $\operatorname{tg} \psi$ fāžu nobīdes leņķim starp spiedienu un caurplūdi:

$$\operatorname{tg} \psi = - \left[\left(\frac{S_0 \mu_0 \omega^2}{L'_0 \cos \phi \left[n^2 \frac{S_0}{L_0} \mu_0 (\alpha \omega^2 + \beta \omega t g \phi) - \frac{1}{C} + r_2 \omega t g \phi \right]} \frac{(\pi DB)^2}{r_1} \right) - m \omega^2 \right] \cdot \left(-\omega \sin \phi \frac{r_2}{r_1} + \frac{\cos \phi}{r_1 C} \right)$$

$$\cdot \frac{1}{\left[\left(\frac{S_0 \mu_0 \omega^2}{L'_0 \cos \phi \left[n^2 \frac{S_0}{L_0} \mu_0 (\alpha \omega^2 + \beta \omega t g \phi) - \frac{1}{C} + r_2 \omega t g \phi \right]} \frac{(\pi DB)^2}{r_1} \right) - \left(\omega \cos \phi \frac{r_2}{r_1} + \frac{\sin \phi}{r_1 C} \right) \right] \cdot \left(-\omega \left(\frac{(\pi DB)^2}{r_1} - K \right) \right)} \quad . \quad (3.43)$$

Tā kā:

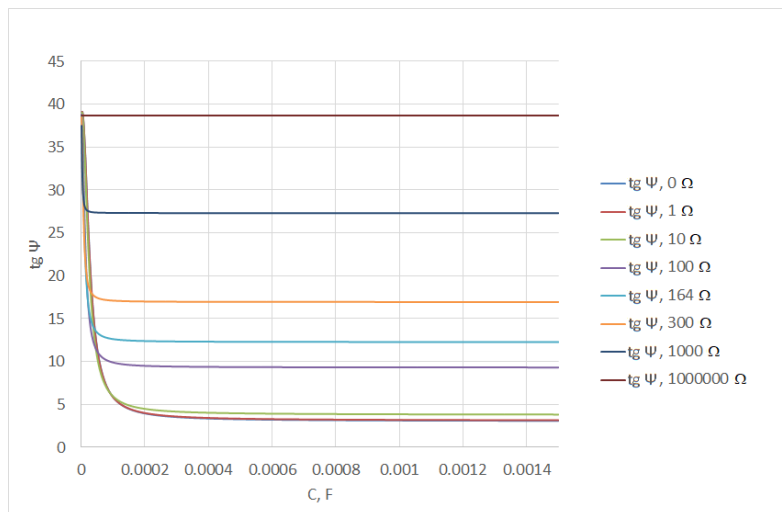
$$\sin \psi = \frac{\operatorname{tg} \psi}{\sqrt{(1 + \operatorname{tg}^2 \psi)}} \quad , \quad (3.44)$$

tad, no pēdējā vienādojuma (3.41) reālās daļas izsaka izteiksmi Na ātrumam:

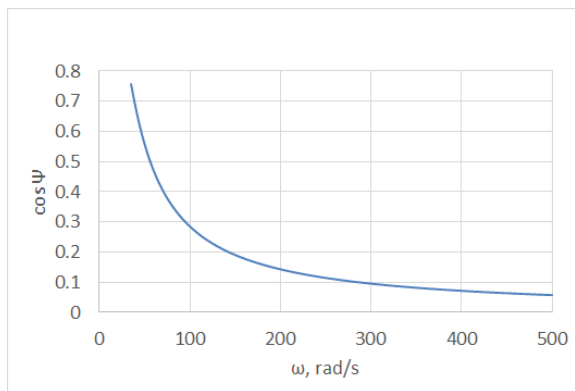
$$V_0 = \frac{-\Delta P S_s \omega \frac{tg\psi}{\sqrt{(1 + tg\psi^2)}}}{-S_0 \mu_0 \omega^2} \cdot \left[\left(\frac{L'_0 \cos \phi \left[n^2 \frac{S_0}{L'_0} \mu_0 (\alpha \omega^2 + \beta \omega tg\phi) - \frac{1}{C} + r_2 \omega tg\phi \right]}{\cdot \frac{(\pi DB)^2}{r_1} \left(-\omega \sin \phi \frac{r_2}{r_1} + \frac{\cos \phi}{r_1 C} \right)} \right) - m \omega^2 \right] \quad (3.45)$$

Jau iepriekšējā nodaļā par transformatora aizvietošanas shēmu tika ieviests lielums, kas tika nosaukts par akustisko jaudas koeficientu. Ir vērts atzīmēt vēl dažus ar doto lielumu saistītus aspektus. Šā parametra nozīmīgumu nosaka fakts, ka no leņķa ψ ir atkarīgs no ģenerators izdalāmās lietderīgās elektriskās jaudas apjoms, jo tas raksturo elektriskajai mašīnai pievadīto mehānisko enerģiju. Šī enerģija ir proporcionāla reizinājumam $\Delta P \cdot V$. Lai optimizētu enerģijas pārveidošanos, $\cos \psi$ ir jābūt iespējami lielam. Izmantojot pēdējās iegūtās izteiksmes, attēlos 3.2. un 3.3. ir parādītas aprēķinātās līknes, no kurām redzams, ka $\cos \psi$ var būt liels tikai pie mazām frekvencēm. Ir būtiski atzīmēt arī faktu, ka šis lielums neietekmē mašīnas lietderības koeficientu, bet limitē tikai mehānisko jaudu ieejā, un tātad – elektrisko jaudu izejā. 3.3. att. ir parādīts aprēķina gadījums optimālajam režīmam. Par optimālo šajā gadījumā pieņemta slodzes pretestība – 134 Ω , kas, kā tālāk būs redzams, atbilst gadījumam ar lielāko lietderības koeficientu. Minētais aprēķins parādīts gadījumam bez kondensatora elektriskajā ķēdē – tātad $C = \infty$.

Salīdzinot iepriekšējā nodaļā iegūtos datus, piemēram 2.19. att. ar 3.3. att., redzams, ka tendences sakrīt un paaugstinoties frekvencei, akustiskais jaudas koeficients krītas.



3.2. att. Tg ψ maiņa atkarībā no slodzes kondensatora kapacitātes pie dažādām slodzes pretestībām.



3.3. att. Akustiskā jaudas koeficienta atkarība no svārstību leņķiskās frekvences

Pie kondensatora kapacitātes $C=0$, ķēdē strāva neplūst, jo, kā bija redzams (3.15):

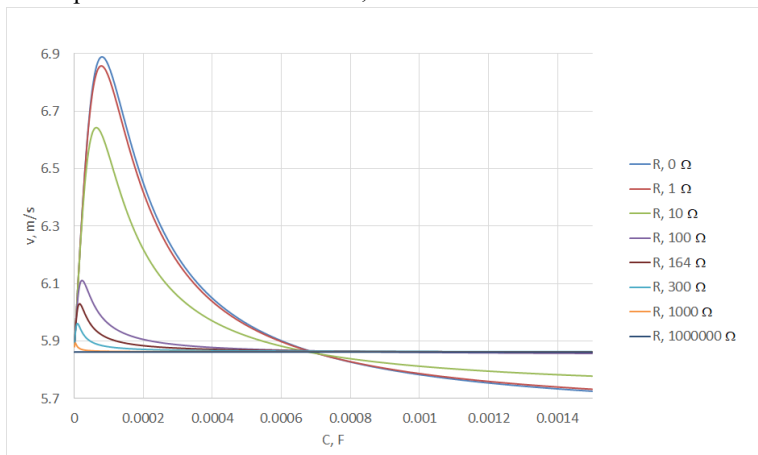
$$q = C \cdot U \Rightarrow \frac{dq}{dt} = I_2 = 0 . \quad (3.46)$$

Tas noved pie tā, ka Na plūsmas ātrums nav atkarīgs no slodzes. Līdz ar to, pie mazām C vērtībām ātruma atvasinājums pēc kapacitātes, $\frac{dv}{dC}$, ir praktiski konstants, jo inducēto strāvu nātrijā kapacitāte ietekmē vāji.

To apstiprina fakts, ko var redzēt 3.2. att., ka $tg \psi$ vienmēr ir liels un līdz ar to:

$$\frac{tg \psi}{\sqrt{1 + tg^2 \psi}} = \sin \psi \sim 1 . \quad (3.47)$$

Tad saskaņā ar vienādojumu (3.45), ja $C \rightarrow 0$ (tiekas uz nulli), ātrums ir atkarīgs tikai no pieliktā spiediena un Na inerces. No otras puses, gadījumā, kad $I_2=0$, saskaņā ar enerģijas nezūdamības likumu visai pievadītajai mehāniskajai enerģijai ir jāizkliedējas nātrijā, Džoula siltuma zudumu veidā (kā arī daļai enerģijas – zudumos Ti sienīņā). Līdz ar to, inducētajai strāvai Na ir jābūt ievērojamai, kas noved pie liela elektromagnētisko spēku pretspēka spiediena spēkiem. Tas noved pie relatīvi zema Na ātruma, ko var redzēt 3.4. att.

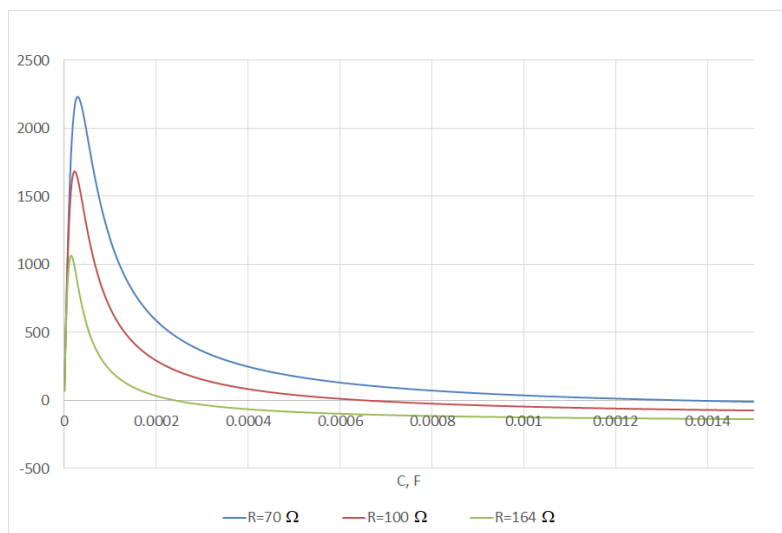


3.4. att. Na ātruma atkarība no slodzes kondensatora kapacitātes pie dažādām pretestībām

Attēls 3.4. parāda, ka ātrums paliek neatkarīgs no slodzes elektriskās pretestības pie divām C vērtībām. Tas ir izskaidrojams ar to, ka vienādojuma (3.45) izteiksme, kas atrodas saucēja iekavās, ir vienāda ar nulli divos C gadījumos (3.5. att.). Pirmā vērtība ir $C=0$, savukārt otrā ir atkarīga no slodzes pretestības, kā redzams 3.5. att. No fizikālā viedokļa šī pieslēgtā kapacitāte kompensē mašīnas rezultējošo induktīvo pretestību. Šādos apstākļos Na kritisko ātrumu, jeb pārliekuma punktu nosaka tikai inerces un ātrums paliek neatkarīgs no slodzes pretestības. No 3.4. att. ir redzams, ka punktā pie $C=0,68$ mF visas ātruma līknes saiet kopā un šķērso vienu un to pašu punktu. Tas nepārprotami liecina par to, ka ātrums šajā punktā nav atkarīgs no elektriskās slodzes.

Ir arī vērts atzīmēt, ka, pie lielām slodzes pretestībām r_2 , induktivitāte nav jūtami atkarīga no slodzes. Taču situācija mainās pie mazākām pretestībām (lielākas mašīnas noslodzes), kā redzams 3.5. att. Tomēr, neskatoties uz to - Na kritisko ātrumu tas ietekmē maz, jo, kā redzams 3.4. att, šī vērtība ir saglabājusies diezgan tuvu iegūtajām vērtībām pie mazām slodzēm. Vispārīgi, no 3.4. att. rezultātiem redzams, ka ātrums var mainīties robežās no 5,8 – 6,9 m/s. Tas nozīmē, ka inerces locekļi joprojām ir dominējoši un būtu samazināmi, samazinot elektriskās mašīnas šķidruma kopējo masu, tādējādi palielinot mašīnas lietderības koeficientu. Dotais aprēķins (un arī visi citi – ja vien nav minēts savādāk) veikts pie pievadītā nominālā spiediena 6 bar, atbilstoši 1.1. tabulas datiem.

Visbeidzot jāapskata otrs robežgadījums, kad $C \rightarrow \infty$, citiem vārdiem, ja kondensatora plātes ir sabīdītas kopā un reaktīvā pretestība $X_c=0$. Šajā gadījumā kapacitāte nespēlē nekādu lomu. Ja pārējie parametri ir nemainīgi, ātrums ir atkarīgs tikai no slodzes pretestības.



3.5. att. Na ātruma izteiksmes saucēja iekavās ieslēgtais loceklis atkarībā no slodzes kondensatora kapacitātes pie dažādām slodzes pretestībām

Koeficients “K” vienādojumos reprezentē šķidruma mehānisku berzi attiecībā pret sienām. Tas ir atkarīgs no plūsmas rakstura, kā arī no δ – lieluma, kas raksturo konkrētās plūsmas hidrodinamisko robežslāni un tā lielumu. Tas ir proporcionāls kinemātiskās viskozitātes un apgriezti proporcionāls šķidruma svārstību leņķiskās frekvences kvadrātsaknei:

$$\delta \sim \sqrt{\frac{\nu}{\omega}} . \quad (3.48)$$

Berzes spēks “ τ ” uz laukuma vienību ir uzrakstāms sekojoši:

$$\tau \sim \rho \nu \frac{V_0}{\delta} \rightarrow \tau \sim \rho \nu \frac{V_0}{\sqrt{\frac{\nu}{\omega}}} = \rho \sqrt{\nu \omega} V_0 . \quad (3.49)$$

Tā kā ir spēkā sekojoša sakarība:

$$F_v = \tau S = K V_0 , \quad (3.50)$$

kur F_v – berzes spēks, un S – kopējais nātrija un sieniņu saskares laukums, tad berzes koeficientu nosaka pēc izteiksmes:

$$F_v = \rho \sqrt{\nu \omega} V_0 S \rightarrow K = \frac{1}{2} \rho \sqrt{\nu \omega} S . \quad (3.51)$$

Berzes spēks ne vienmēr ir vērsts pretēji šķidruma plūsmai. Lai šim apgalvojumam veiktu kvantitatīvu novērtējumu, ir nepieciešams uzrakstīt raksturīgo laika ilgumu vienam svārstību periodam [74],[56]:

$$\tau_{osc} \sim \frac{2\pi}{\omega} , \quad (3.52)$$

kā arī salīdzināt to ar raksturīgo laiku, kas ir nepieciešams, lai viskozitātes ietekme pārnestos no caurules sienas uz plūsmas centru (nākošajā izteiksmē - raksturīgais izmērs “ d ”):

$$\tau_v \sim \frac{d}{\sqrt{\omega \nu}} . \quad (3.53)$$

Ja:

$$\tau_v \gg \tau_{osc} \rightarrow \frac{d}{2\pi} \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} \gg 1 . \quad (3.54)$$

Plūsmas virziens maina savu virzienu vēl pirms viskozitātes efekti paspēj izpausties pietiekami tālu no sienas. Tad kādu laika brīdi berzes loceklis kustības vienādojumā (3.33) ir pozitīvs. Tālāk nākošajā laika momentā tas, protams, jau ir pretējs plūsmai. Tāpēc piedāvātajā modelī aprēķinos viskozitātes ietekme tika vājināta 2 reizes. Tomēr, neskatoties uz to, veiktie aprēķini ir parādījuši, ka šī viskozitātes loma ir relatīvi vāja un, kā būs redzams tālāko rezultātu izklāstā (3.18. att. (a)), attiecībā uz mašīnas lietderības koeficientu, tā sāk spēlēt jūtamu lomu tikai pie zema pieliktā magnētiskā lauka.

Kā iepriekš izklāstīts, pēc svārstību pusperioda mašīnas šķidrums maina kustības virzienu uz pretējo, turklāt tas nenotiek momentāli. Pie sienas esošajā robežslānī ir nepieciešams zināms laiks, lai tas varētu notikt. Līdz ar to, ja svārstību frekvence ir augsta, virziena maiņas brīdī šķidruma viskozitātes ietekme pie sienām joprojām ir augsta. Tā nav paspējusi nokristies līdz līmenim, kāds ir plūsmas centrā. Tāpēc šajā īsajā laika posmā sekas ir tādas, ka berzes spēki šķidrumu lielākoties virza nevis plūsmai pretojas. Tas ir vēl viens alternatīvs skaidrojums tam,

kā ir izskaidrojama koeficienta “1/2” izvēle koeficienta “K” priekšā [75], [76]. Šis jautājums turpmāk jāpēta dziļāk.

Analizējot mašīnas darbību, būtiskākā loma tomēr ir iekārtas lietderības koeficientam. MHD ģeneratoram tas veidojas kā attīstītās elektriskās jaudas attiecība pret termoakustisko viļņu pievadīto mehānisko jaudu. Tomēr pirms sākt efektivitātes analīzi, ir vērts apskatīt dažus elektriskās mašīnas aspektus saistītus ar magnētisko Reinoldsa skaitli.

Uzrakstot kustības vienādojumu (3.33) eksponentformā un labajā pusē ātrumam izpildot atvasināšanas darbību, izteiksmi iespējams pārrakstīt kā:

$$\Delta P S_s e^{i\psi} - \pi D B I_{10} e^{i\theta} - K V_0 = m i \omega V_0 , \quad (3.55)$$

kur jaunieviestais parametrs θ – fāžu nobīdes leņķis starp strāvu nātrijā un šķidrums ātrumu. Ir iespējams novērtēt cik liels ir šis lielums. Ņemot vērā Oma likumu diferenciālā formā (3.3) un zinot, ka strāvas blīvums:

$$j = \frac{I}{S} , \quad (3.56)$$

kur S – kanāla šķērsgriezuma laukums un $I = I_{10} e^{i\theta}$, kā arī izmantojot vienu no Maksvela vienādojumiem (3.2), proti, Faradeja likumu, pēc vienkāršiem pārveidojumiem var uzrakstīt:

$$\frac{I_{10}}{S} e^{i\theta} \sim \sigma (i \omega b l + V_0 B_0) . \quad (3.57)$$

Zināms, ka pie zema magnētiskā Reinoldsa skaitļa inducētais magnētiskais lauks ir mazāks par pielikto lauku:

$$Rm = \frac{b}{B_0} \sim \mu \sigma V_0 l \ll 1 , \quad (3.58)$$

kur “ l ” ir sistēmas raksturīgais izmērs. Apkopojot pēdējās izteiksmes iespējams uzrakstīt:

$$e^{i\theta} \sim \left(\frac{i \omega b l}{V_0 B_0} + 1 \right) \frac{\sigma V_0 B_0}{I_{10}} S \rightarrow \sigma (i \omega l^2 \mu \sigma + 1) \frac{\sigma V_0 B_0}{I_{10}} S . \quad (3.59)$$

Ja izpildās sekojoša sakarība:

$$\omega \mu \sigma l^2 = Rm^* \ll 1 , \quad (3.60)$$

un, līdz ar to, arī:

$$\frac{I_{10}}{S} \sim \sigma V_0 B_0 , \quad (3.61)$$

tādā gadījumā inducētās strāvas nātrijā daļa, kas radusies dēļ pulsējošā magnētiskā lauka, ir zemāka par inducētās strāvas daļu, kas radusies dēļ šķidrums kustības pastāvīgo magnētu laukā. Tas ir arī pilnīgā saskaņā ar Lenca elektromagnētiskās inerces likumu, šeit uzskatot par sākotnējo strāvu – šķidrums kustības radīto. Šādos apstākļos: $\theta \sim 0$.

Atgriežoties pie mašīnas efektivitātes analīzes, berzes loceklis var tikt adaptēts kustības vienādojumā kopā ar elektromagnētisko spēku, kā ekvivalenta strāva sekojošā formā (3.62). Nākošajā vienādojumā (3.63) ir redzams, ka loceklis iekavās sastāv no diviem saskaitāmajiem. Pirmais no tiem, kā redzams, ir proporcionāls I_{10} un tātad reprezentē reālo elektromagnētisko locekli. Savukārt otrs ir apskatāmais berzes loceklis, kas veido nupat ieviesto ekvivalento strāvu:

$$\frac{KV_0}{\pi DB_0} . \quad (3.62)$$

Ņemot to vērā, šķidruma kustības vienādojums tagad var tikt pārrakstīts kā:

$$\Delta PS_s e^{i\psi} - \pi DB_0 \left(I_{1o} e^{i\theta} - \frac{KV_0}{\pi DB_0} \right) = m i \omega V_0 . \quad (3.63)$$

Pārveidojot to trigonometriskā formā, iegūst:

$$\Delta PS_s (\cos \psi + i \sin \psi) - \pi DB_0 I_{1o} (\cos \theta + i \sin \theta) - KV_0 = m i \omega V_0 , \quad (3.64)$$

un, analogiski kā iepriekš, atdalot reālās un imaginārās daļas, reālā daļa tiek iegūta sekojoša:

$$\Delta PS_s \cos \psi = I_{1o} \cos \theta \pi DB_0 + KV_0 , \quad (3.65)$$

bet, ja $\theta \rightarrow 0$, tad:

$$\Delta PS_s \cos \psi - KV_0 \approx I_{1o} \pi DB_0 . \quad (3.66)$$

Un atbilstošā imaginārā daļa:

$$\Delta PS_s \sin \psi - m \omega V_0 = I_{1o} \sin \theta \pi DB_0 , \quad (3.67)$$

analogiski, bet, ja $\theta \rightarrow 0$, tad:

$$\Delta PS_s \sin \psi - m \omega V_0 \approx 0 . \quad (3.68)$$

Paceļot abus vienādojumus kvadrātā, tos var sasummēt:

$$(\Delta PS_s \sin \psi - m \omega V_0)^2 + (\Delta PS_s \cos \psi - KV_0)^2 = (I_{1o})^2 (\pi DB_0)^2 . \quad (3.69)$$

No pēdējā vienādojuma iespējams iegūt izteiksmi strāvai nātrijā:

$$I_{1o} = \sqrt{\frac{(\Delta PS_s \sin \psi)^2 - 2m\omega \Delta PS_s \sin \psi V_0 + (m\omega V_0)^2 + (\Delta PS_s \cos \psi)^2 - 2\Delta PS_s \cos \psi KV_0 + (KV_0)^2}{(\pi DB_0)^2}} . \quad (3.70)$$

Šī izteiksme var tikt vienāršota, izmantojot (3.62):

$$\Delta P \cdot S_s \approx \frac{I_{1o} \pi D B_0 + K V_0}{\cos \psi} , \quad (3.71)$$

no kā var iegūt analogisku vienkāršotu izteiksmi V_0 .

No otras puses, neņemot vērā berzi, izteiksme vienkāršojas:

$$I_{1o} = \frac{\Delta P S_s \cos \psi}{\pi D B_0} . \quad (3.72)$$

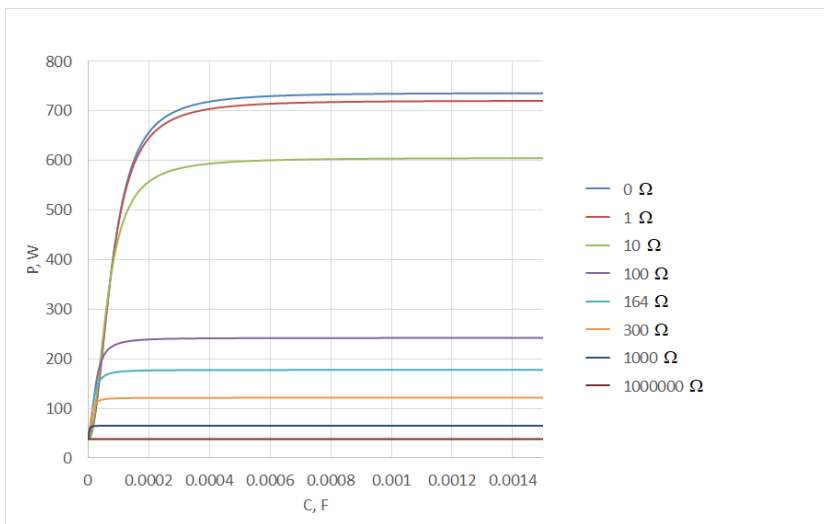
Pie lielām "C" vērtībām strāva nātrijā ir atkarīga tikai no slodzes omiskās pretestības. Elektromagnētiskais spēks pilnībā nolīdzsvaro spiediena spēku (ņemot vērā arī faktu, ka $\cos \psi$ ir praktiski konstants pie fiksētas pretestības "r₂"). Kā sekas tam ir tādas, ka ģeneratoram pievadītā mehāniskā jauda:

$$\frac{\Delta P S_s V_0 \cos \psi}{2} , \quad (3.73)$$

arī pieņem konstantu vērtību atkarībā no izvēlētās slodzes pretestības (3.6. att). Ņemot vērā izteiksmi (3.71), mehāniskās jaudas izteiksme pieņem formu:

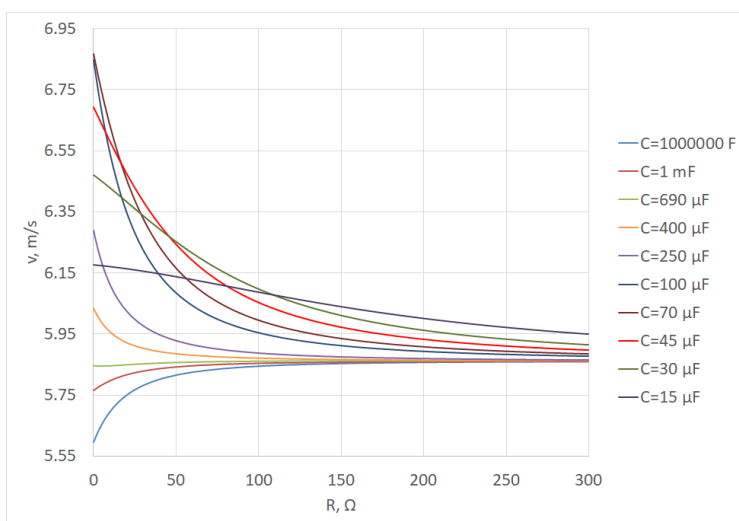
$$\frac{\Delta P S_s V_0 \cos \psi}{2} \approx \frac{(I_{1o} \pi D B_0 + K V_0) V_0}{2} . \quad (3.74)$$

Tādā gadījumā mehāniskās jaudas formula veidojas kā summa, sastāvoša no elektromagnētiskajiem spēkiem un berzes spēkiem.



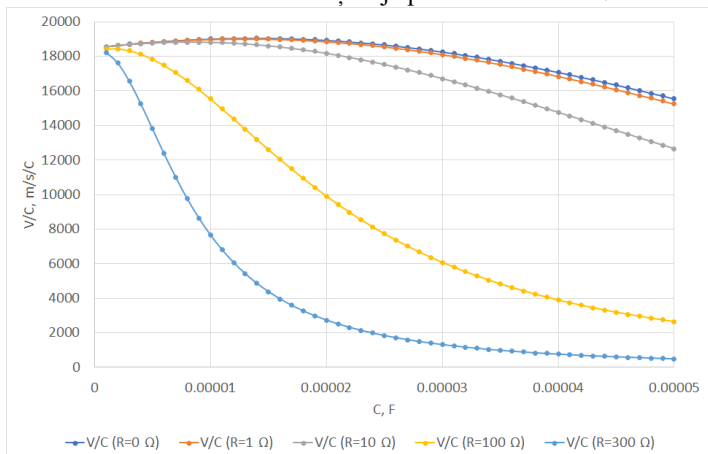
3.6. att. Mehāniskā jauda atkarībā no slodzes kondensatora kapacitātes pie dažādām slodzes pretestībām

Līdzīgā stilā var attēlot ātruma atkarību no slodzes pretestības 3.7. att. No šejienes redzams, ka ātrums pie dažādām kapacitātēm jūtami atšķirīgs tikai pie relatīvi mazām slodzes pretestībām un pie lielākām tas paliek praktiski nemainīgs. Analizējot doto zīmējumu sīkāk, var redzēt, ka pretestības vērtības robežgadījumā pie $R=0$ kritiskais ātrums ir minimāls pie bezgalīgi lielas kapacitātes, proti, pie kondensatora plātņu īsslēguma. Kapacitātei tālāk samazinoties, šī ātruma vērtība palielinās līdz, kapacitātei sasniedzot vērtību ap $690 \mu\text{F}$, ātrums paliek pilnībā neatkarīgs no slodzes pretestības. Tālāka kapacitātes samazināšana turpina palielināt ātrumu līdz tas sasniedz maksimumu pie $v=6,8 \text{ m/s}$, pēc kā turpmāka “C” pazemināšanās ātrumu jau sāk samazināt.



3.7. att. Na ātruma atkarība no slodzes pretestības pie dažādām kondensatora kapacitātēm

Līdzīgi apskatot Na ātruma un kapacitātes attiecību V/C (3.8. att.) redzams, ka pie mazām pretestības vērtībām šī attiecība ir praktiski konstanta. Pie lielākām pretestībām ir vērojams V/C līknes straujš kritums jau pie neliela kapacitātes pieauguma. Šie novērojumi, kas veikti pie salīdzinoši mazām kapacitātēm labi saskan ar 3.4. att. rezultātiem, kur, kā bija redzams, taisnes slīpuma koeficients ātruma līknes sākuma daļā bija praktiski konstants.



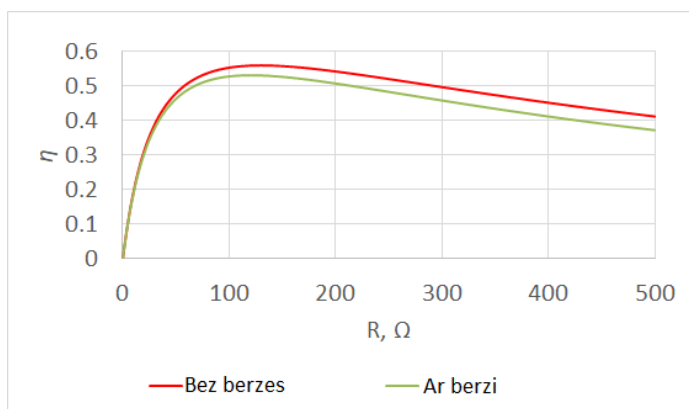
3.8. att. V/C attiecība atkarībā no slodzes kondensatora kapacitātes pie dažādām slodzes reostata pretestībām

Kā jau atzīmēts iepriekš, pētāmā MHD ģenerators lietderības koeficients ir izsakāms kā:

$$\eta = \frac{P_{elec}}{P_{mech}} = \frac{r_2 I_0^2}{\Delta P V_0 S_s \cos\psi} \quad (3.75)$$

To iespējams izteikt arī savādākā formā, atsevišķi izdalot dažādus elektriskās mašīnas zudumus:

$$\eta = \frac{r_2 I_0^2}{r_2 I_0^2 + r_1 I_1^2 + r_w I_w^2 + \frac{F_v V_0}{4}} \quad (3.76)$$



3.9. att. Lietderības koeficienta atkarība no pretestības, apskatot Na viskozitātes ietekmi

3.9. att. redzams, salīdzinājums MHD ģeneratora lietderības koeficienta aprēķinam apskatot gadījumu, kad šķidrums iekšējās berzes radītie zudumi netiek ņemti vērā, kā arī gadījumam, kad tos ņem vērā. Kā redzams, viskozitāte attiecībā uz mašīnas efektivitāti spēlē relatīvi mazu lomu un tās zudumi ir nelieli. Šī iemesla dēļ, tālākie rezultāti dotajā nodaļā ir demonstrēti gadījumam bez berzes zudumiem.

Izslēdzot no vienādojumiem kapacitāti, vienādojumi ievērojami vienkāršojas. Izteikti tas ir redzams ātruma izteiksmei. Turklāt, ja ņem vērā, ka ātruma izteiksmes (3.45) saucēja iekavās ieslēgtais loceklis ir mazs, V_0 formulu var pārrakstīt sekojoši:

$$V_0 \cong \frac{-\Delta P S_t g \psi}{\sqrt{1 + t g \psi^2 m \omega}} . \quad (3.77)$$

Šī izteiksme liecina par to, ka Na plūsmas ātrumu pamatā nosaka inerces spēki. Par to var pārliecināties sekojoši. Uzskatot, ka Na masa ir ievērojami liela (teiksim, pārsniedz 100 g) un leņķiskā frekvence ir, pieņemsim ne mazāka par $\omega = 100 \text{ rad/s}$, formula (3.77) dod tādu pašu rezultātu, kā vispārējā gadījumā (3.45). Tas atbilst gadījumam, kad ΔP un V_0 ir nobīdīti fāzē tuvu 90° , tomēr pilnīgi šādu stāvokli nesasniedzot, jo pretējā gadījumā mašīnai pievadītā jauda būtu vienāda ar 0.

Lai noteiktu MHD ģeneratora pārējos zudumus, izteiksmes (3.76) saucējā jānosaka atlikušie locekļi. Strāvas spolē un Na jau ir atrastas, savukārt inducēto strāvu T_i čaulā var iegūt no izteiksmēm (3.13) un (3.17):

$$\frac{r_1}{r_w} I_{1o} + \frac{\pi D V_0 B}{r_w} = I_w . \quad (3.78)$$

Līdzīgi kā iepriekšējos gadījumos, ieviešot kompleksās amplitūdas:

$$I_w = I_{w0} e^{i(\omega t + \gamma)} . \quad (3.79)$$

Tad:

$$\frac{r_1}{r_w} I_{1o} e^{i\theta} + \frac{\pi D V_0 B}{r_w} = I_{w0} e^{i\gamma} . \quad (3.80)$$

Visbeidzot, līdzīgi, kā vienādojumā (3.70), iegūst izteiksmi, kuru izmanto zudumu noteikšanai šķidrā nātrija tilpumu saturošajā titāna apvalkā:

$$I_{w0} = \sqrt{\frac{(r_1 I_{1o} - \pi D B V_0)^2}{r_w^2}} . \quad (3.81)$$

3.3. Rezultāti un to interpretācija

Pirms sākt turpmāko matemātiskā modeļa izmantošanas rezultātā iegūto aprēķinu analīzi ir jāatgādina, ka izveidotais modelis neietver tādu aspektu, kā, piemēram, virsmas efekts (angļu literatūrā zināms kā skinefekts), kas neizbēgami izpaudīsies nātrijā, kad frekvence pieaugs pietiekami augstu. Šajā sakarībā ir vērts izvērtēt svārstību intensitāti. Jāpielieto jau 1. nodaļas beigās apskatītais lielums, ko reizēm dēvē arī par ekranēšanas parametru vai bezdimensionālo frekvenci [61], [77]:

$$S = \mu_0 \sigma \omega L^2 = \left(\frac{L}{\delta_{iesp}} \right)^2 \ll 1 , \quad (3.82)$$

kur $\omega = 2\pi f$, L – raksturīgais izmērs un δ_{iesp} ir elektromagnētiskā lauka iespiešanās dziļums:

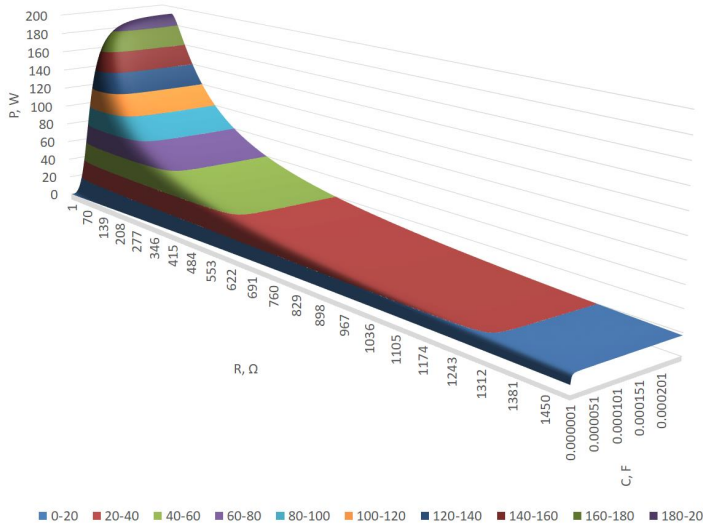
$$\delta_{iesp} = \frac{1}{\sqrt{\pi\sigma\mu_0 f}} . \quad (3.83)$$

Bezdimensionālā frekvence “S” nosaka cik spēcīgi inducētās strāvas izspiež magnētisko lauku ārā no elektrovadošās vides [78], un, kā redzams, nav atkarīga no plūsmas ātruma, atšķirībā no magnētiskā Reynolds skaitļa:

$$Re_m = \mu_0\sigma LV_0 . \quad (3.84)$$

Izmantojot Na fizikālās īpašības un kanāla augstumu ($L=4$ mm), vienādojums (3.82) arī dod prasīto: $S \ll 1$.

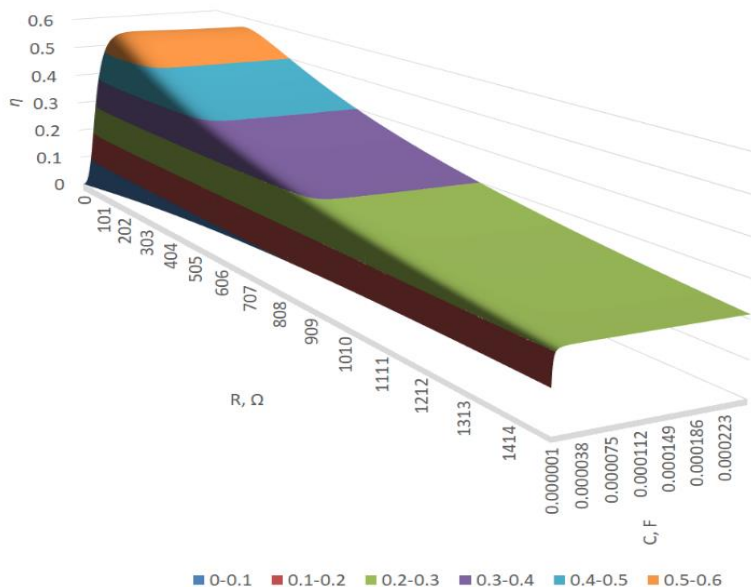
Jāatceras arī, ka elektriskās mašīnas jaudas koeficients vienmēr ir $\cos \varphi < 1$. Fāžu nobīdes leņķis starp strāvu un spriegumu ietekmē no ģeneratora noņemamās iespējami maksimālās jaudas apmēru. Pieslēdzot pietiekami lielas kapacitātes kondensatoru, iespējams šo jaudu maksimizēt. Tiecoties pēc maksimālā lietderības koeficienta, nepieciešamā kapacitātes vērtība, protams, ir cita. Tas arī ir redzams turpmākajos divos attēlos. Attēlos 3.10 un 3.11. ir parādīti trīsdimensionāli grafiki izdalītās jaudas un lietderības koeficienta atkarībām no aktīvās pretestības un kondensatora kapacitātes.



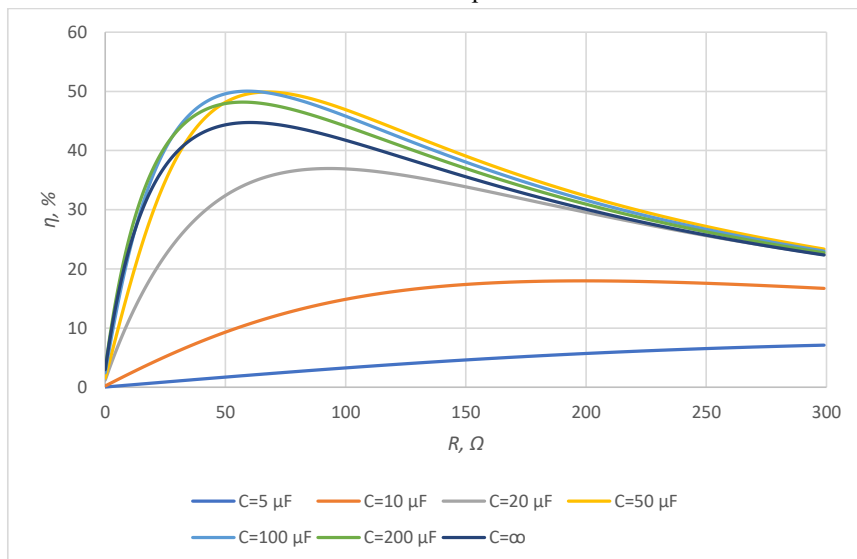
3.10. att. MHD ģeneratora attīstītās lietderīgās elektriskās jaudas atkarība no slodzes reostata pretestības un kondensatora kapacitātes

Kā redzams (3.10. att), jauda tomēr saglabājas nemainīga plašā kapacitātes diapazonā, īpaši attiecīgi lielām pretestībām. Izskaidrojums tam var tikt meklējams faktā, ka “SpaceTRIPS” programmā izstrādātās mašīnas jaudas koeficients ir samērā augsts. Arī lietderības koeficienta (3.11. att) gadījumā aina ir līdzīga, tomēr, lielu strāvu (mazu pretestību) gadījumā, ir novērojams vāji izteikts lietderības koeficienta maksimums pie konkrētas kapacitātes. Lai pārlicinātos par rezultātu pareizību un modeļa potenciālo atbilstību reālajam prototipam, 3.12. att. ir parādīts analogisks aprēķins, veikts ar iepriekšējā nodaļā piedāvāto transformatora

aizvietošanas shēmas metodi. Tā kā 3.11. att. lietderības maksimums ir grūti saskatāms, tad 3.12. att. ir parādīts divās dimensijās. Šeit var skaidri redzēt, ka lietderības koeficients būs maksimāls pie slodzes kondensatora kapacitātes starp 20-100 μF . Tas arī liecina par to, ka abas piedāvātās aprēķina metodes ir adekvāti salīdzināmas, dod vienlīdz ticamus rezultātus, kā arī vienlīdz detalizēti apraksta elektriskās mašīnas enerģētiskos un fundamentālos parametrus.

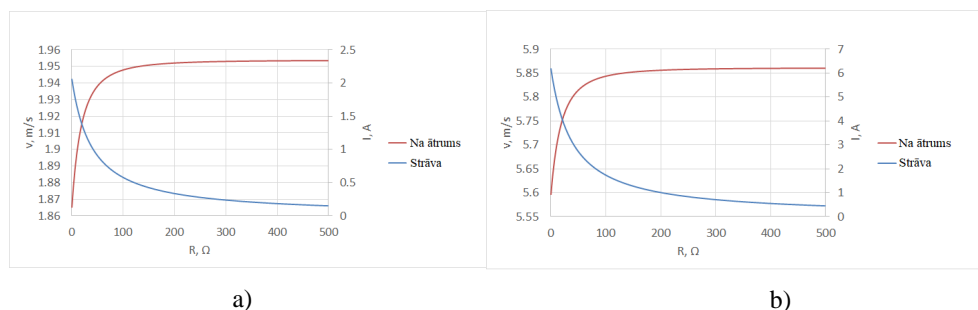


3.11. att. MHD ģenerators lietderības koeficienta atkarība no slodzes reostata pretestības un kondensatora kapacitātes



3.12. att. Ar transformatora aizvietošanas shēmu atrastā lietderības koeficienta atkarība no pretestības pie dažādām kapacitātēm

Ņemot vērā iepriekš teikto, turpmākās parādītās līknes ir aprēķinātas bez kondensatora slodzes ķēdē. Pie 3.13. att. ir parādītas ātruma un slodzes strāvas izmaiņas atkarībā no slodzes pretestības divos gadījumos – mašīnas projektētajā, nominālajā režīmā pie pievadītā spiediena $\Delta P = 6 \text{ bar}$, kā arī pie $\Delta P = 2 \text{ bar}$. Kā jau noprotsams un redzams, spiediens ir ārējs, neatkarīgs parametrs. Tas noved pie tā, ka atkarība no spiediena ir lineāra – palielinoties spiedienam 3 reizes, arī strāva un ātrums palielināsies tikpat. No līknēm var redzēt, ka sākotnēji slodzes pretestībai sākot pieaugt no nulles, vienlaicīgi ir novērojams straujš Na ātruma pieaugums. Elektriskajai pretestībai turpinot paaugstināties virs aptuveni 200Ω , ātrums nostabilizējas un paliek nemainīgs. Savukārt, strāvai aina ir pretēja un, piemēram, $\Delta P = 6 \text{ bar}$ gadījumā, sākot no maksimālās vērtības $I=6\text{A}$, paaugstinot pretestību strāva sākotnēji strauji samazinās, pēc kā asimptotiski tuvojas nullei. No tā izriet, ka pie lielām slodzes elektriskajām pretestībām iekārtas darbību pamatā nosaka inerces spēki.



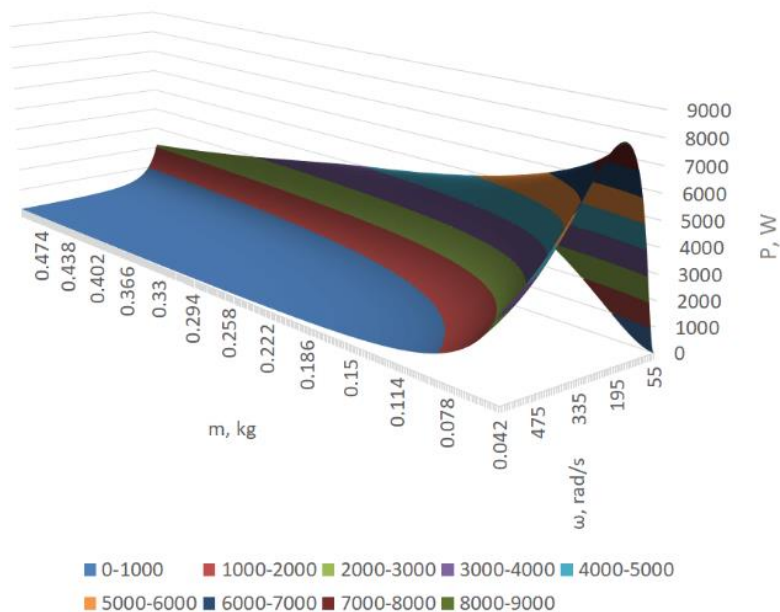
3.13. att. Na ātruma un slodzes strāvas atkarības no elektriskās pretestības: a) pie pievadītā spiediena $\Delta P = 2 \text{ bar}$; b) pie spiediena $\Delta P = 6 \text{ bar}$

Attēlos 3.14. un 3.15. ir parādīta attiecīgi jaudas un lietderības koeficienta atkarība masas un leņķiskās frekvences 3D grafikos. Kā redzams un jau iepriekš atzīmēts, attīstāmā jauda samazinās palielinoties masai, jo šķidruma inerces ierobežo kustības ātrumu pie jebkuras frekvences. No otras puses, masai turpinot palielināties, mašīna arvien vairāk paliek inerces spēku vadīta, kas noved pie fāžu nobīdes leņķa starp Na strāvu un ātrumu tuvu $\pi/2$. Sekas no tā ir tādas, ka ģeneratoram pievadītā mehāniskā jauda paliek neapmierinoši zema, kā iepriekš varēja redzēt 3.6. att.

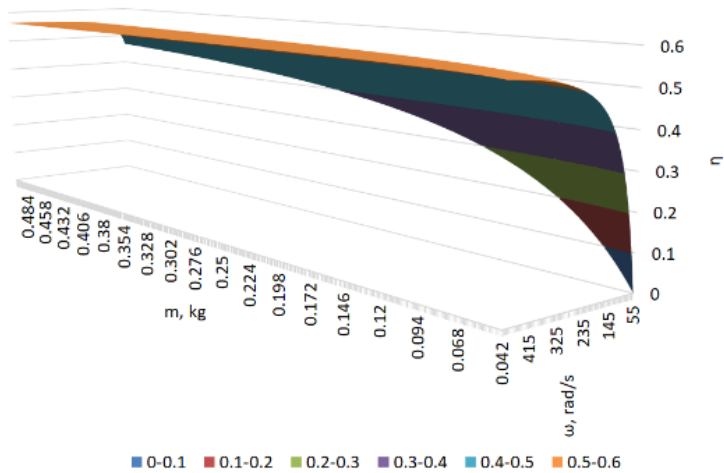
Vispārējs izskaidrojums faktam, ka šāda fāžu nobīde starp Na strāvu un ātrumu vispār eksistē ir meklējams faktā, ka apskatīts tiek induktīva rakstura enerģijas pārveidotājs, atšķirībā no kondukcijas tipa mašīnām, kurās nekādas fāžu nobīdes, protams, nebūtu. Tomēr pētāmās iekārtas spolē inducētais spriegums, kā zināms, ir atkarīgs no vijumu skaita, kā arī no frekvences, un pie ļoti zemām frekvencēm spriegums un strāva ir ļoti zemi. Rezultātā arī džoula zudumi ir ļoti mazi, bet tādā gadījumā ātrumam un strāvai ir gluži pretēja, jau minētā, tendence - savstarpēji nobīdīties fāzē tuvu $\pi/2$, kas seko no vienādojuma (3.30), (ja neiekļauj kondensatoru).

Kā redzams no att. 3.15., lietderības koeficients tiecas uz konstantu vērtību neatkarīgi no nātrija masas un pie pietiekami lielas frekvences. Šie rezultāti var tikt izskaidroti ar to, ka, modelis neņem vērā iepriekš minēto virsmas efektu, kas kļiedē nātrija strāvu pie augstām frekvencēm. Līdz ar to, teorētiski var tikt atrasts frekvences maksimums pēc kura lietderības koeficients sāk samazināties.

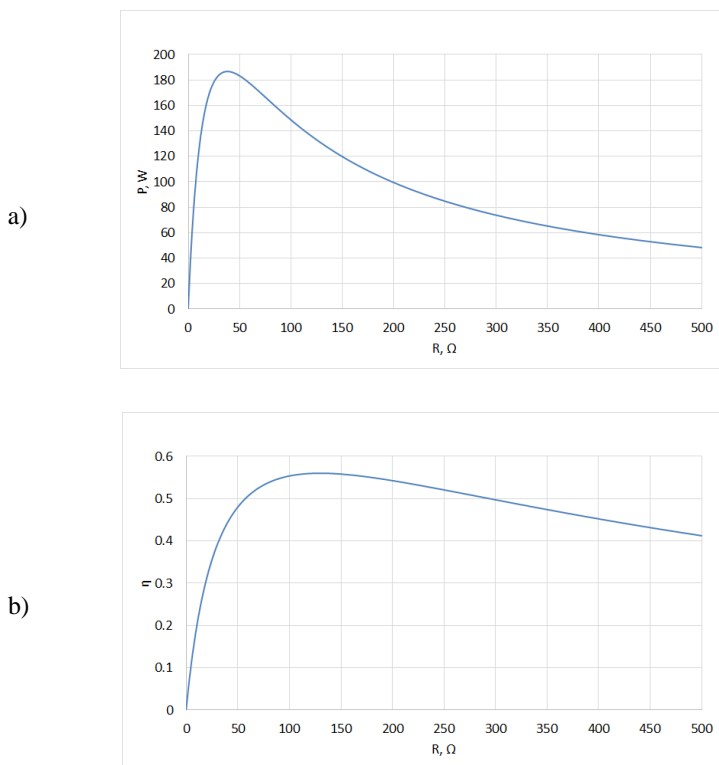
Attēlā 3.16. ir parādītas aprēķinātās elektriskās jaudas un lietderības koeficienta atkarības no pretestības pie frekvences un masas, kas atbilst reāli izstrādātajam prototipam. Kā redzams, maksimālā jauda šajā gadījumā pie $\omega=314$ rad/s un $m=0,464$ kg ir sasniegta pie pretestības 40 Ω . Apskatot lietderības koeficienta līkni, šis maksimums salīdzinājumā ar jaudu ir nobīdīts un sasniedz pretestību 100 Ω . Tas nozīmē, ka izvēloties MHD ģeneratora optimālo darba režīmu ir jāmeklē kompromiss starp maksimālo jaudu un maksimālo mašīnas efektivitāti, jeb lietderības koeficientu.



3.14. att. Elektriskās jaudas atkarība no Na masas un leņķiskās frekvences

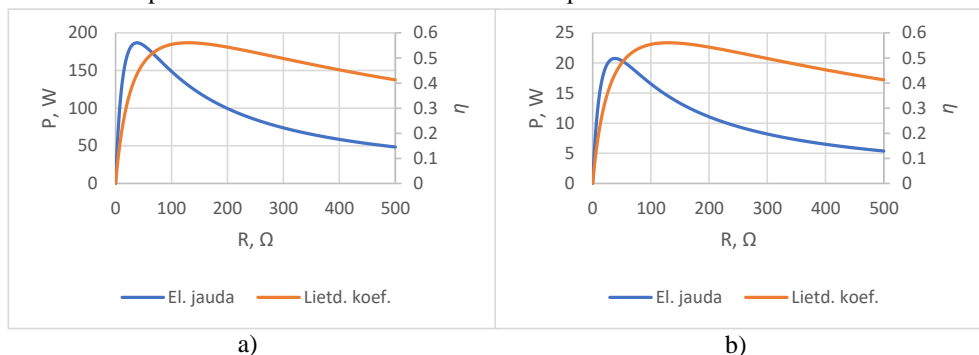


3.15. att. Lietderības koeficienta atkarība no Na masas un leņķiskās frekvences



3.16. att. MHD ģenerators enerģētisko parametru atkarība no slodzes pretestības pie $\omega=314$ rad/s un $m_{Na}=0,464$ kg: a) elektriskā jauda; b) lietderības koeficients

Ir jāuzsver, ka atšķirībā no 3.13. att. novērotā, kur bija redzams, ka ātrums un strāva ir lineāri atkarīgi no spiediena, elektriskās jaudas gadījumā tas tā nav. Līdz ar to, 3.17. att. ir aprēķināti abi jau iepriekš apskatītie gadījumi pie $\Delta P = 6 \text{ bar}$ un 2 bar jaudai un paša MHD ģenerators lietderības koeficientam – tātad atsevišķi no TAc dzinēja lietderības koeficienta. Vērtība $\Delta P = 2 \text{ bar}$ ir apzināti izvēlēta, lai būtu iespējams salīdzināt darba nākošajā, ceturtajā nodaļā iegūtos eksperimentālos datus ar teorētiski aprēķinātajiem. No šejienes ir redzams, ka spiediena palielināšana 3 reizes, izsauc elektriskās jaudas pieaugumu 9 reizes. Vienlaikus salīdzinot spiediena līknes ar lietderības koeficienta grafikiem, ir kārtējo reizi redzams, ka jaudas un lietderības maksimumi nav vērojami pie vienas un tās pašas slodzes pretestības, bet gan ir nobīdīti viens pret otru. Masa un frekvence šeit ir tāda pati kā 3.16. att.



3.17. att. MHD ģenerators elektriskās jaudas un lietderības koeficienta atkarības no elektriskās pretestības: a) pie pievadītā spiediena $\Delta P = 2 \text{ bar}$; b) pie spiediena $\Delta P = 6 \text{ bar}$

Savukārt, attēlā 3.18. ir demonstrēti iegūtie rezultāti MHD ģenerators jaudas un lietderības koeficientam atkarībā no pieliktā magnētiskā lauka nātrija kanālā. Dotais aprēķins veikts pie slodzes pretestības 130Ω , frekvences, $\omega=314 \text{ rad/s}$, $m_{\text{Na}}=0,464 \text{ kg}$. Ja aplūko, piemēram, jaudas līkni, tad iegūtie rezultāti ir labi saprotami. Pieaugot magnētiskajam laukam, sākotnēji straujais jaudas pieaugums ir izskaidrojams ar nātrijā inducētās strāvas strauju pieaugumu, kas savukārt izsauc atbilstošu strāvas pieaugumu slodzē. Magnētiskajam laukam turpinot palielināties, jauda sasniedz savu maksimumu pie noteiktas lauka vērtības, pēc kā sākas jaudas samazinājums. Tas ir izskaidrojams ar to, ka pie lieliem magnētiskajiem laukiem elektromagnētiskie spēki sāk prevalēt pār inerces spēkiem. Rezultātā nātrija kustība tiek traucēta un elektromagnētiskie spēki sāk pulsējošo Na ātrumu samazināt, kas tālāk jau samazina attīstāmo jaudu. Dotā parādība ir raksturojama ar MHD mijiedarbības parametru jeb Stjuarta skaitli [79]:

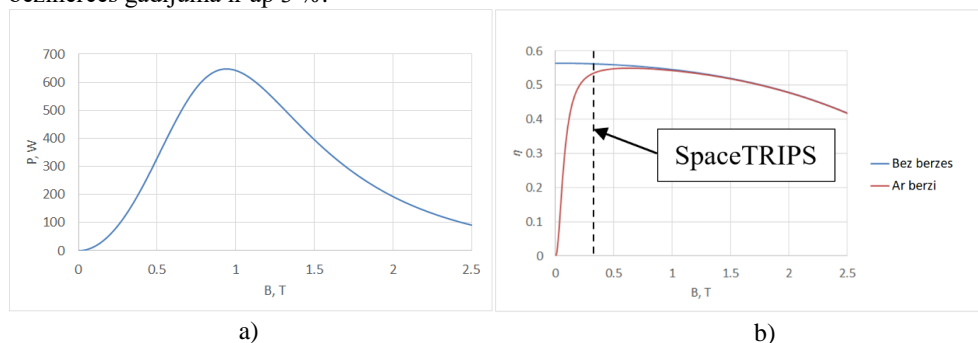
$$N = \frac{B^2 L \sigma}{\rho V} . \quad (3.85)$$

Stjuarta skaitļa, zināma arī kā MHD mijiedarbības parametra, izmantošana pamatojas uz šķidrums kustības vienādojuma analīzi, ko, līdzīgi, kā indukcijas vienādojumam, var veikt bezdimensionālā formā. Šāda analīze šeit netiek veikta, jo ir plaši sastopama literatūrā, piemēram, [70], [80]. Šāda, vienkāršota analīze parāda, ka neatkarīgi no spiediena spēkiem, kas pētāmajā mašīnā veic dzinējspēka lomu, kā arī vienkāršībai neņemot vērā berzes spēkus, paliek divu tipu spēki, kas kontrolē plūsmu. Tie ir elektromagnētiskie un inerces spēki. Inerces loma

šajā mašīnā ir ļoti būtiska un, kā tālāk tiks parādīts, palielinoties frekvencei, tā pieaug. Ņemot vērā augstāk minēto, var teikt, ka neatkarīgi no spiediena spēkiem, šķidruma plūsma rezultējas no līdzsvara starp elektromagnētiskajiem un inerces spēkiem, ko arī nosaka Stjuarta skaitlis.

Kā redzams no izteiksmes (3.85), elektromagnētisko spēku relatīvais samērs ar inerces spēkiem ir kvadrātiski atkarīgs no magnētiskā lauka, kas vēlreiz pamato augstāk aprakstīto plūsmas bremsēšanas mehānismu. Nav grūti noprast, ka pie 3.18. att. (a) magnētiskā lauka optimuma Stjuarta skaitlis ir aptuveni vienāds ar 1. No otras puses, savukārt ir vēlreiz acīmredzams, ka palielinoties frekvencei, palielinās inerces loma.

Apskatot lietderības koeficienta atkarību no magnētiskā lauka gadījumam, kad neievēro šķidruma viskozitāti 3.18. att. (b), ir redzams, ka lietderība ir maksimāla pie zema magnētiskā lauka. Taču šajā gadījumā 3.18. att. (a) parāda, ka attīstāmā jauda ir zema un tiecas uz nulli. Savukārt, ietverot inerci, aina mainās un lietderības koeficients ir vienāds ar nulli pie zema magnētiskā lauka vērtības. Paaugstinot lauku tālāk, lietderības koeficients kāpj un sasniedz optimumu virs 0,5 T, pēc kā sākas tā lēna samazināšanās. Kā redzams no 3.18. att. (b), reāli izgatavotajam “SpaceTRIPS” prototipam atbilstošajā gadījumā pie pastāvīgo magnētu radītā magnētiskā lauka Na spraugā ap $B=0,33T$, atšķirība lietderības koeficientam inerces un bezinerces gadījumā ir ap 3 %.



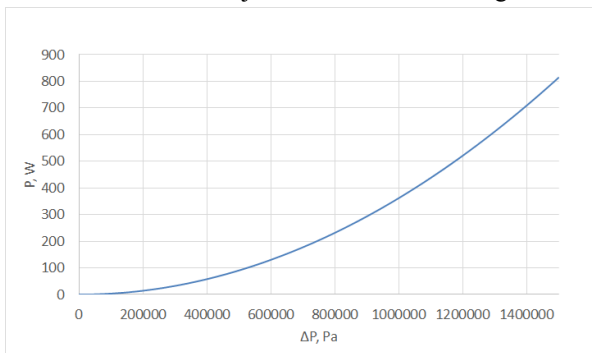
3.18. att. Elektriskās mašīnas enerģētisko parametru atkarība no pieliktā magnētiskā lauka: a) elektriskā jauda; b) lietderības koeficients

Visbeidzot, pēdējā līkne 3.19. att. reprezentē izdalītās elektriskās jaudas atkarību no pieliktā spiediena differences ΔP . Kā redzams, jauda ir kvadrātiski atkarīga no spiediena. Tas ir izskaidrojams ar to, ka inducētā Na strāva ir proporcionāla ΔP . Savukārt no Oma likuma ir zināms, ka jauda ir kvadrātiski atkarīga no strāvas, kas arī izskaidro līknes formu. Tai pat laikā, lietderības koeficients mainoties spiedienam saglabājas nemainīgs, jo pieliktā mehāniskā jauda un attīstāmā elektriskā jauda mainās vienādi.

Ir vērts uzsvērt vēl vienu pētāmās elektriskās mašīnas priekšrocību. Tā ir iespēja pielāgot strāvu slodzei atbilstoši pielāgojot ģeneratora spoles induktivitāti mašīnas izstrādes gaitā. Klasiskā konduktīvā MHD ģeneratorā ar elektrodiem noņemamā sprieguma līmenis ir ar kārtu līdz dažiem voltiem, kamēr strāva var būt nepieļaujami augsta. Savukārt piedāvātajā induktīvajā sistēmā sprieguma līmenis var tikt pieskaņots slodzei. Atkarībā no slodzes rakstura un mašīnas spoles induktivitātes, ir iespējams liels regulēšanas diapazons. Ir zināms, ka spriegums ir aptuveni proporcionāls induktivitātei “L”, bet strāva ir proporcionāla $\omega L/Z$, kur Z – spoles

kopējā impedancē. Līdz ar to, uzdotajai frekvencei atbilstoši piemēklējot “L” un “Z”, var variēt kā ar spriegumu, tā ar strāvu.

Tomēr attiecībā uz induktivitāti vienlaikus ir jāatceras 3.4. att. novērotais, ka, pie zināmas, konkrētas C vērtības, ātrums paliek pilnīgi neatkarīgs no slodzes pretestības. Tāpēc, neskatoties uz to, ka, salīdzinot ar darba 2. nodaļu, šis nodaļas vienādojumos induktivitāte atklāti neparādās, tā tik un tā spēlē būtisku lomu. Tomēr, lai uzskatāmāk salīdzinātu abas metodes, induktivitāti var ieviest formulās arī šeit. Šim nolūkam jāuzraksta summārās magnētiskās plūsmas izteiksme:



3.19. att. Attīstāmās elektriskās jaudas atkarība no pieliktā spiediena svārstību amplitūdas

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 . \quad (3.86)$$

Šeit nātrija strāvas radītā magnētiskā plūsma ir:

$$\Phi_1 = L_1 I_1 , \quad (3.87)$$

savukārt ģeneratora spoles un slodzes strāvas radītā plūsma:

$$\Phi_2 = L_2 I_2 = L_1 I_2 n , \quad (3.88)$$

kā arī magnētiskā plūsma no inducētās strāvas titāna sienīņā:

$$\Phi_3 = L_w I_w = L_1 I_w . \quad (3.89)$$

Tādā gadījumā sprieguma diferenciālvienādojumu (3.15) jau laicīgi pārejot uz kompleksajām amplitūdām pēc atvasināšanas operācijas veikšanas var pārrakstīt par sekojošu vienkāršu, algebrisku vienādojumu:

$$I_2 r_2 + \left(\frac{q}{C} + n L_2 i \omega I_2 \right) = -n (L_1 i \omega I_1 + L_w i \omega I_w) . \quad (3.90)$$

Kad pieslēgtā kapacitāte pilnībā kompensē spoles induktivitāti, izteiksmes kreisās puses iekava paliek vienāda ar nulli un tāpēc:

$$I_2 r_2 = -n (L_1 i \omega I_1 + L_w i \omega I_w) . \quad (3.91)$$

Divas pārējās izteiksmes (3.13) un (3.17) tiek pārrakstītas līdzīgā veidā:

$$I_1 r_1 + \pi D V B_o = -(L_1 i \omega I_1 + n L_2 i \omega I_2 + L_w i \omega I_w) , \quad (3.92)$$

$$I_w r_w = -(L_1 i \omega I_1 + n L_2 i \omega I_2 + L_w i \omega I_w) . \quad (3.93)$$

Tad no uzrakstītajiem trijiem vienādojumiem, var iegūt Na strāvas izteiksmi šādā formā:

$$I_1 = \frac{-\pi DVB_o \left[1 + \frac{L_w i\omega}{r_w} + \frac{nL_2 L_w \omega^2}{r_w r_2} \right]}{L_w i\omega \frac{r_1}{r_w} + r_1 + L_1 i\omega + \frac{L_2 L_1 \omega^2}{r_2} + \frac{nL_2 L_1 \omega^2 r_1}{r_2 r_w}}, \quad (3.94)$$

vai, kas ir tas pats :

$$I_1 = \frac{-\pi DVB_o \left[1 + \frac{L_w i\omega}{r_w} + \frac{nL_2 L_w \omega^2}{r_w r_2} \right]}{r_1 \left[\frac{L_w i\omega}{r_w} + 1 + \frac{L_1 i\omega}{r_1} + \frac{nL_2 L_1 \omega^2}{r_2 r_1} + \frac{nL_2 L_1 \omega^2}{r_2 r_w} \right]}. \quad (3.95)$$

Pēdējās izteiksmes iekavu locekļi ir bezdimensionāli lielumi. Un ņemot vērā to, ka locekļis:

$$L_1 i\omega + \frac{nL_2 L_1 \omega^2}{r_2}, \quad (3.96)$$

pēc lieluma ir dominējošs, tad izteiksmi (3.95) var ievērojami vienkāršot:

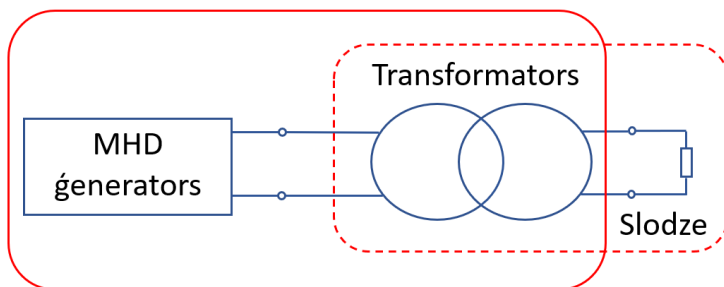
$$I_1 = \frac{-\pi DVB_o}{L_1 i\omega + \frac{nL_2 L_1 \omega^2}{r_2}} = \frac{-\pi DVB_o}{L_1 i\omega + \frac{n^2 L_1^2 \omega^2}{r_2}} = \frac{-\pi DVB_o}{L_1 \left(i\omega + \frac{n^2 L_1 \omega^2}{r_2} \right)}. \quad (3.97)$$

Izmantojot šo izteiksmi, var tikt vienkārši izteikts Na ātrums. To izsakot, ir jāatceras no kustības vienādojuma, ka nātrijs atrodas dinamiskā līdzsvarā starp spiediena spēkiem $\Delta P \cdot S$, berzes spēkiem KV , inerces spēkiem $i\omega mV$ un elektromagnētiskajiem spēkiem $I_1 B_o \pi D$. Tad:

$$V = \frac{\Delta PS}{\frac{-(\pi DB_o)^2}{L_1 \left(i\omega + \frac{n^2 L_1 \omega^2}{r_2} \right)} + K + i\omega m}. \quad (3.98)$$

Rezumējot un salīdzinot abas aprēķinu metodes, jāsaka, ka būtiskākā atšķirība abās pieejās ir tajā, ka transformatorshēmas pieejā tiek skaitliski modelēti un aprēķināti MHD ģenerators elektromagnētisko lauku sadalījumi, izmantojot galīgo elementu metodi. Arī magnētiskā lauka nevienmērības izraisītos zudumus, kā arī gala efektus iespējams ierēķināt tikai izmantojot skaitlisko modelēšanu.

Var ievērot, ka induktivitāte un Na ātrums ir lielumi, kuru lietojums atšķiras abās pieejās. Ja transformatora ekvivalentās ķēdes formulējumā ātrums tiešā veidā parādās tikai shēmas ieejā, tad šajā nodaļā apskatītajā metodē ar to tiek operēts ievērojami plašāk. Kā nupat parādīts, līdzīgi tikai otrādi ir ar induktivitātēm. Tomēr arī aprēķinā ar ekvivalento shēmu ātrums netieši var tikt iegūts. Piemēram, iepriekšējās nodaļas 2.14. att demonstrētās caurplūdes iegūšana tika veikta operējot tikai un vienīgi ar aizvietošanas shēmas elektriskajiem lielumiem.



3.20. att. Salīdzinājums ekvivalentās transformatorshēmas metodei un Maksvela vienādojumu pieejai

Iespējams veikt salīdzinājumu arī savādākā veidā. 3.20. att. ir parādīts pētāmās sistēmas koncepts, ar nepārtrauktu sarkanu līniju atdalot šajā nodaļā piedāvāto Maksvela vienādojumu aprēķina pieeju. Savukārt ar raustītu sarkanu līniju parādīta ekvivalentās transformatorshēmas pieeja.

Kā bija redzams, formulu izvedums veikts izmantojot slodzes pretestības un kondensatora virknes slēgumu. Šāda izvēle pamatojas ar ērtāku un praktiskāku formulu izrakstīšanas veidu. Nepieciešamības gadījumā nav problēmu pārveidot un pārreķināt ķēdi uz ekvivalentu paralēlslēgumu, izmantojot teorētiskajā elektrotehnikā labi zināmo ekvivalento vadītspēju pieeju, aizstājot divus virknē savienotus elementus ar tiem ekvivalenti atbilstošiem paralēliem [81]. Zemāk redzamajās vispārīgajās izteiksmēs indeksi “v” nozīmē – virkne; “p” – paralēli. Ja $Z_p = Z_v$ un $Y_p = Y_v$, tad:

$$Z_v = R_v + jX_v, \quad (3.99.)$$

$$Y_v = \frac{1}{Z_v} = \frac{1}{R_v + jX_v}, \quad (3.100.)$$

$$Z_p = \frac{1}{Y_p} = \frac{1}{G_p - jB_p}, \quad (3.101.)$$

$$Y_p = G_p - jB_p, \quad (3.102.)$$

tad ir spēkā sakarības starp atsevišķiem ekvivalento ķēžu elementu parametriem:

$$R_v = \frac{G_p}{G_p^2 + B_p^2}, \quad (3.103.)$$

$$X_v = \frac{B_p}{G_p^2 + B_p^2}, \quad (3.104.)$$

$$G_p = \frac{R_v}{R_v^2 + X_v^2}, \quad (3.105.)$$

$$B_p = \frac{X_v}{R_v^2 + X_v^2}. \quad (3.106.)$$

Jāatzīmē, ka reālā eksperimentā, protams, dēļ praktiskiem apsvērumiem vairumā gadījumu piemērotāks būtu paralēlslēgums. Galvenokārt tas ir dēļ fakta, ka pēkšņas slodzes maiņas

gadījumā pretestības un kondensatora virknes slēgumā spriegums uz slodzes vairs nav konstants, atšķirībā no paralēlslēguma.

Jautājumi, kas saistīti ar ģenerators darbības elektromagnētisko stabilitāti promocijas darbā nav pētīti. Tomēr ir pamats uzskatīt, ka mašīnas stabils darbs tiek nodrošināts pateicoties triju savstarpējā līdzsvarā esošu locekļu pārdalei: pieliktajam spiedienam uz ģenerators galiem, elektromagnētiskajiem spēkiem, kā arī inerces spēkiem. Tas nozīmē to, ka, piemēram, gadījumā, ja spiediens pēkšņi tiek samazināts, strāva un Na ātrums automātiski nostabilizēties nostāsies jaunā līdzsvara stāvoklī. Šis jaunais stāvoklis ir atkarīgs no Na masas, kas savukārt nosaka sistēmas inerci, kā jau minēts iepriekš. Tas ir vēl viens iemesls, kāpēc Na masas iespējama samazināšana ir būtiska. Līdzīga parādība var tikt sagaidāma, kad spiediena svārstību amplitūdas uz abiem ģenerators galiem ir atšķirīgas.

Attiecībā uz turbulences iespējamo ietekmi, jāatzīmē, ka šajā nodaļā piedāvātās metodes aprobācija ir veikta lamināras plūsmas apstākļos un ar turbulenci saistīti jautājumi nav apskatīti. Tomēr atsevišķi svarīgi apsvērumi var tikt veikti. Pirmkārt, pārejas robeža no lamināra uz turbulentu režīmu pieaug palielinoties pieliktajam magnētiskajam laukam. Otrkārt, nātrija plūsma nav stacionāra, kā arī inducētais sekundārais magnētiskais lauks ir pulsējošs, kā tas ir dotajā gadījumā. Tie abi ir šķidrums plūsmas nestabilitātes iespējamie faktori. Eksperimentāli var būt sagaidāms, ka atsevišķas turbulentes struktūras veidojas tikai svārstību perioda maksimumā, kad ātrums ir maksimāls. Šis jautājums ir turpmāk jāpēta detalizētāk, taču daži aspekti ir eksperimentāli parādīti nākošajā nodaļā.

Rezumējot disertācijas teorētisko pētījumu daļu, var redzēt, ka, gan otrajā, gan trešajā darba nodaļā piedāvātie aprēķina modeļi ir vienkārši no tā viedokļa, ka tiek detalizēti pētīts tikai atsevišķi MHD ģenerators. Nodaļas noslēgumā ir vērts atzīmēt, ka klasiskajā MHD literatūrā nereti ir atrodami prognozējoši vērtējumi attiecībā uz MHD mašīnu jebkad nākotnē maksimāli sasniedzamo lietderības koeficientu. Piemēram, [38] ir prognozēts, ka, ņemot vērā magnetohidrodinamisko mašīnu dabu un tajās ieslēgtos resursus (jau minētie neizbēgamie gala efekti, šuntējošie zari ekvivalentajās shēmās u.c.), labākajā un stipri idealizētā gadījumā lietderības koeficients varētu jebkad maksimāli sasniegt ne vairāk par 0,65-0,75%. Dotajā nodaļā veiktie teorētiskie aprēķini parāda to, ka pētāmais ģenerators ir relatīvi tuvu pietuvojies minētajam sliekšnim.

4. EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI

4.1. Termoakustiskās iekārtas atsevišķie eksperimenti

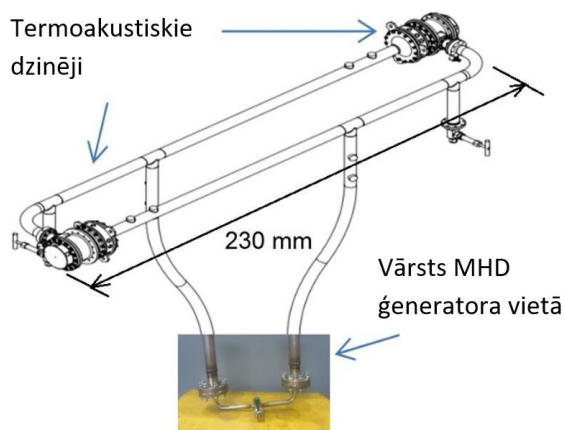
Lai iespējami labāk izprastu “*SpaceTRIPS*” iekārtas darbību un tās nianse darboties dažādos režīmos, tika veikta apjomīga sērija ar eksperimentiem. Uzbūvētā termoakustiskā iekārta un MHD ģenerators tika testēti divējādi:

- 1) Sajūdzot abas iekārtas kopā, kā sākotnēji paredzēts.
- 2) Atsevišķi atdalot abas mašīnas un testējot katru neatkarīgi no otras.

TAc iekārtas neatkarīgie testi tika veikti atslēdzot MHD ģeneratoru un to aizvietojo ar regulējamu mehānisku vārstu, tādējādi gūstot iespēju manuāli regulēt dzinēja akustisko pretestību skaņas vilnim.

Dzinēja testēšana tika veikta vadoties pēc principa – sasniegt vēlamo režīmu un automatizēti pierakstīt mašīnas darbību raksturojošos parametrus. Šie parametri ir:

- Momentānā attīstāmā skaņas jauda (skat. 1. nodaļu un formulu (1.1)).
- Skaņas viļņa ģenerācijas sākuma brīdis.
- Svārstību frekvence.
- Temperatūru starpība uz reģeneratora galiem.
- Virsspiediens un tā izmaiņas.
- Attīstītās spiediena svārstības dzinēja izvados.



4.1. att. Izstrādātais laboratorijas prototips TAc iekārtas individuālajiem, atsevišķajiem testiem MHD ģeneratoru aizvietojo ar regulējamu, akustisku slodzi mehāniska vārsta veidā

Termoakustiskā dzinēja eksperimentu plāns ir sekojošs:

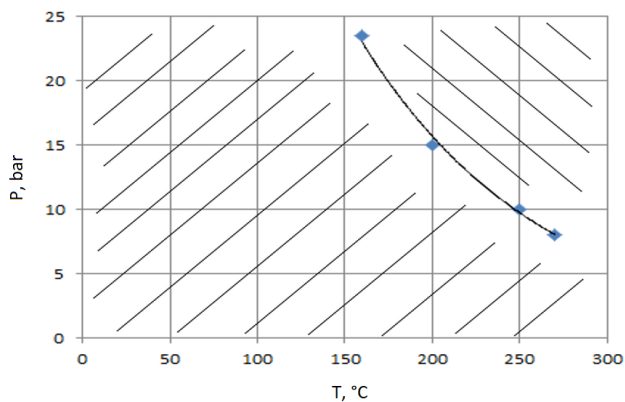
- 1) Rezonatorcauruļū kontūrā tiek ielaists zema spiediena argons.

- 2) Tiek ieslēgti karstā siltummaiņa elektriskie sildītāji un pakāpeniski tiek celta tā temperatūra.
- 3) Palaista aukstā siltummaiņa ūdens dzesēšanas sistēma
- 4) Soli pa solim līdz ar temperatūru tiek celts gāzes virsspiediens

Jau darba 1. nodaļā varēja ievērot un noprast, ka 1.1 att. un vēl jo vairāk 1.6. att. piedāvātais termoakustiskā dzinēja izpildījums ar sarežģītā konfigurācijā saliektām skaņas caurulēm atšķiras no 1.7. att. Kā redzams, atšķirība ir tajā, ka 1.7. att. un 4.1. att. akustiskā kontūra shēmas ir šķietami “izstieptas”. Iemesls šādai ģeometrijas izmaiņai ir tāds, ka tā iespējams vienkāršot izgatavošanu, drošāk noblīvēt savienojumus un labāk pielāgot kontūru un mērīšanas shēmu laboratorijas apstākļiem un eksperimentu sesijai. Līdz ar to arī reāli izgatavotā iekārta ir izveidota šādi stilizētā “T” veidā. Vienlaikus akustiskā kontūra ģeometrija ir saglabājusies tāda pati, līdz ar to pilnībā saglabājot dzinēja akustisko performanci, kā arī neizmainot tā darba režīmu.

1.7. att. un 4.1. att. ir redzami skaņas kontūra ceļā ieslēgti 2 īsi cauruļu atvadi – pieslēgvietas dzinējam pievadāmajai gāzei no balona, kā arī pārspiediena drošības vārstam. Šiem atvadiem ir arī cita, būtiskāka nozīme. Tie vpapildu gāzes tilpumu kontūra akustiskajai noskaņošanai. Mērķis tam ir dzinēja darbības optimizācija atbilstoši konkrētajai slodzei, kā arī termoakustiskā transformācijas koeficienta maksimizēšana, kas noved pie iespējami lielākās izejas jaudas konkrētajos apstākļos.

Lai izpētītu robežu pie kuras TAc dzinējam var notikt termoakustiskā ierosme, 4.2. att. ir parādīts kopsavilkums no vairākiem eksperimentiem [82]. Šeit ir attēlota pievadāmās temperatūru starpības un gāzes virsspiediena reģistrētie mērījumu punkti no 4 eksperimentiem. Pie šīm kritiskajām vērtībām rezonatorkontūrā spontāni inducējas skaņas vilnis un termoakustiskais dzinējs tiek palaists. Iesvītrotais laukums virs līknes apzīmē apgabalu, kurā akustiskā ierosme ir iespējama, proti, pie šāda spiediena un temperatūru diferences mašīna tiks palaista. Pretējā virzienā iesvītrotais apgabals, savukārt, norāda uz sektoru, kurā spiediens un temperatūra būs par zemu un mašīna netiks startēta. Kā redzams, līknes raksturs ir hiperbolisks, proti, pie mazas temperatūru starpības nepieciešamais spiediens būs augsts, turpretī pie augstas temperatūru starpības pietiks ar mazu virsspiedienu.

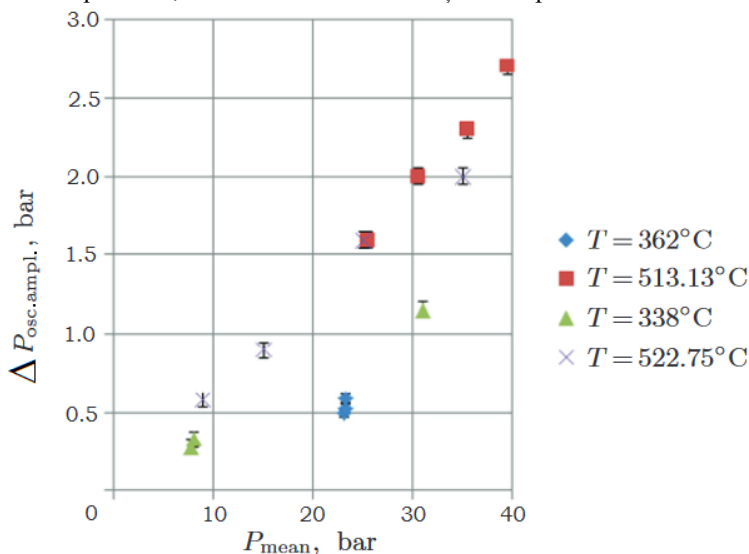


4.2. att. Eksperimentāli uzņemta dzinēja kritiskā termoakustiskās ierosmes līkne

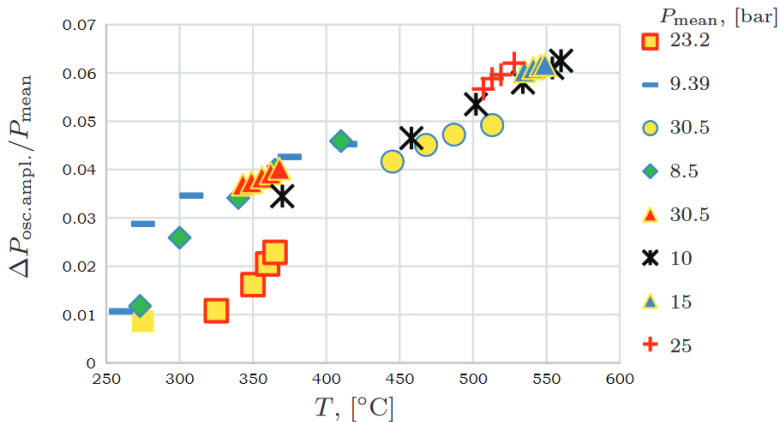
Jāatgādina, ka reģistrētā ΔT° uz reģeneratora galiem ir karstā punkta temperatūra mīnus T° ar ūdeni dzesētajā aukstajā siltummainī, kas ievērojami neatšķiras no istabas temperatūras. Šī iemesla dēļ rezultējošā temperatūru starpība var tikt pieņemta vienāda ar karstā siltummaiņa temperatūru.

4.3. attēlā atšķirībā no 4.2. att., ir parādīts eksperimentālo rezultātu kopsavilkums no dažādiem testiem, dzinējam attīstot jau nostabilizētu, stacionāru režīmu [45]. Dotajā grafikā parādītie mēģinājumi veikti pie akustiskās slodzes vārsta stāvokļa, kad tas ir pilnīgi aizvērts. Šajā gadījumā fāžu nobīdes leņķis starp spiedienu un skaņas ātrumu ir tuvu 90° , jo lietderīgā mehāniskā jauda netika attīstīta. Redzams, ka pie nominālā 40 bāru virsspiediena maksimālā sasniegtā spiediena svārstību amplitūda ir 2,7 bāri, kas tika attīstīti pie $T=513^\circ\text{C}$. Šāds rezultāts ir apmierinošs, jo termoakustisko dzinēju tipiski attīstāmās spiediena svārstības parasti sastāda ap 5-10 % no virsspiediena. Šādas vērtības nodrošina pietiekami augstu skaņas jaudas pārvadi uz reģioniem ar lielu akustisko impedanci, kāda šajā gadījumā būtu MHD ģenerators šķidrums virsmas zonā. Šie jautājumi ir plaši aprakstīti termoakustiskajā literatūrā [83].

Dzinējā tika izmantoti spiediena devēji "SensorTechnics SQ219-15185" ar mēr diapazonu 50 bar un precizitāti 50 mbar. Ar to ir izskaidrojams arī 4.3. att. redzamo eksperimentālo spiediena mērījumu kļūdu relatīvi mazais intervāls. Temperatūra tika mērīta katru 5. sekundi, savukārt spiediena rādījumi tika pierakstīti ar biežumu 1000 reizes sekundē. Auksto siltummaiņu kopējā dzesējošā ūdens caurplūde tika turēta konstanta 1 L/s. Karstā gala temperatūra tika mērīta ar K tipa termopāri, tā galu ievietojot karstā siltummaiņa centrā atbilstoši izurbtā 6,4 cm dziļā urbumā. Eksperimentos izmantotā mērsistēma tika bāzēta uz "National Instruments" mērīšanas šasiju "NI CompactDAQ-9188" un moduļu NI 9211, 9213 (termopāriem) un 9205, 9206 (visiem pārējiem mēraparātiem) aparātūras. Datu ievākšanas programmatūra tika izstrādāta "LabView" programmēšanas vidē. Eksperimentu laikā, regulējot temperatūru un virsspiedienu, frekvences svārstības iekļāvās diapazonā 50-60 Hz.



4.3. att. Dzinēja attīstīto spiediena svārstību amplitūda atkarībā no pievadītā virsspiediena pie dažādām konstantām temperatūru diferencēm



4.4. att. Spiediena svārstību amplitūdas attiecība pret gāzes virsspiedienu atkarībā no temperatūru starpības pie dažādiem virsspiedieniem [84]

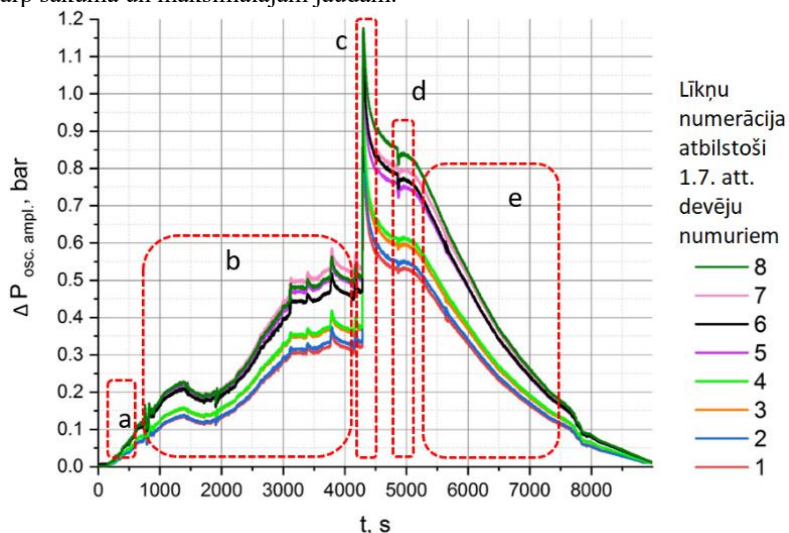
4.3. att. redzamo datu vispārinātāks attēlojums parādīts 4.4 att., attiecinot oscilāciju amplitūdas pret virsspiedienu. Šis grafiks norāda uz to, ka apskatītajos režīmos virsspiediena un temperatūras izmaiņas izsauc jūtamu ietekmi uz svārstībām. Kā redzams, līknes apgabalos pie zemākas jaudas, kad temperatūra ir zem 400 °C, mērījumu punktiem ir izklaidētāks raksturs, salīdzinot ar augstākas jaudas un attiecīgi lielākas temperatūras režīmiem. Tas var tikt izskaidrots ar dzinēja darbības stabilizētāku režīmu pie lielākām jaudām, tuvākām nominālajai. Nākotnes eksperimentos būtu vērts noskaidrot vai šāda pati tendence saglabājas pie temperatūrām, tuvākām 800 °C.

Turpmāk ir detalizētāk analizēts viens konkrēts TAC dzinēja eksperiments, kurā ir labi izdalāmi atsevišķi dažādi darbības posmi. 4.5. att. ir parādīta šajā testā attīstīto spiediena svārstību atkarība no laika visā eksperimenta garumā, tomēr mērījumu datu pieraksts ir ticis sākts uzreiz pēc oscilāciju sākšanās. Spiediena oscilāciju amplitūdas tika izgūtas ar frekvenci - 1 reize sekundē un šajā eksperimentā maksimālais pievadītais virsspiediens bija nominālie 40 bar.

Lai novērtētu TAC dzinēja patieso darbību, konkrēti, tā siltumparametrus, nepieciešams apskatīt mašīnas darbu maksimāli līdzsvarotā stāvoklī. Šim nolūkam, apskatāmā līkne ir sadalīta 5 laika fragmentos, kas ir aprakstīti tālāk.

- Brīdis īsi pēc svārstību sākšanās. Atbilstošā temperatūra redzama arī 4.6. att., pa labi – 250 °C. Šo fragmentu var izmantot, novērtējot oscilāciju sākumtemperatūru.
- Laika periods līdz brīdim, kad tiek palielināta kopējā dzesēšanas caurplūde līdz 1 L/s (0,5 L/s caur katra TAC dzinēja auksto siltummaini), kas bija maksimāli iespējami ieregulējamā. Šis mērījumu fragments ir mazāk būtisks, jo netiek aiznests pietiekami daudz siltuma, līdz ar ko auksto siltummainiņu patiesās temperatūras nav zināmas.
- Reģistrētie dati uzreiz pēc ievērojamas ūdens plūsmas palielināšanas, kas sniedz informāciju par mašīnas akustisko darbību tikai pie paaugstinātām jaudām. Mašīnas darbs nav stabils, jo šis akustiskais režīms ir virs nominālā, turklāt var redzēt, ka

- spiediena līmenis pārejot no šī sektora uz nākamo krītas. Tomēr metāls ir uzņēmis siltumenerģiju, tā tiek lietota un ir iegūstama informācija par akustiskajiem zudumiem.
- d) Kvizistabils darbības režīms ir sasniegts. Šis ir laika brīdis īsi pirms sildītāju atslēgšanas, kas ļauj novērtēt ieejas un izejas siltumparametrus. Stabilizētais spiediens ir ievērojami augstāks, ja salīdzina ar 4.5. att. (a) sektoriem: a) un b), ūdens plūsmas dēļ.
- e) Visbeidzot, atslēdzot sildītājus, karstajos siltummaiņos tiek akumulētas lielas siltumenerģijas, kas atkal sniedz kvizistabīlu darba režīmu, kamēr temperatūra lēnām krīt līdz akustiskās svārstības apstājas. No šiem datiem iespējams izgūt starppunktus starp sākuma un maksimālajām jaudām.



4.5. att. Uzņemtā spiediena svārstību amplitūdu mērījumu līkne TAc dzinēja atsevišķajā eksperimentā

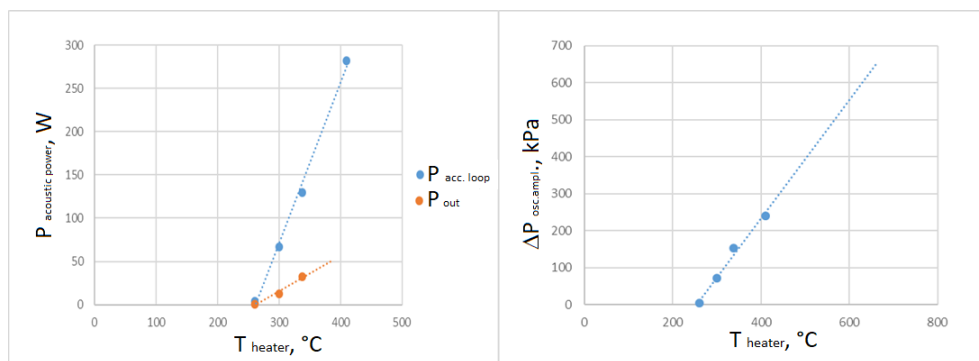
Apskatot sīkāk 4.5. attēlā redzamo nostabilizēto režīmu "d", TAc dzinēja parametri apkopoti 4.1. tabulā. Jāatzīmē, ka tabulā parādītais auksto siltummaiņu aiznestais siltums ir aprēķināts, zinot ūdens caurplūdi un temperatūru starpību starp ienākošo un izejošo ūdens plūsmu.

4.1. tabula

Izmērītās parametru vērtības 4.4. att. "d" sektorā (vidējā vērtība no abiem TAc dzinējiem)

Parametrs	Karstā siltummaiņa temperatūra	Aukstā siltummaiņa temperatūra	Karno lietderība: $\frac{T_{Hot} - T_{Cold}}{T_{Hot}}$	Akustiskā jauda kontūrā	Akustiskā izejas jauda
Vērtība	338°C	15°C	0,529	130 W	32,5 W

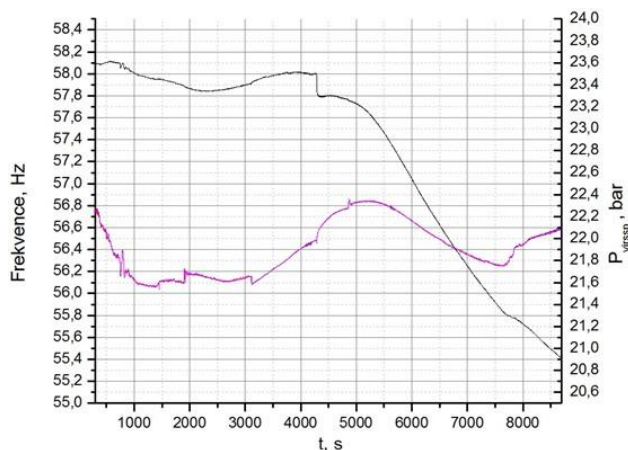
Parametrs	Aukstā siltummaiņa aiznestā siltumjauda	Sildītāju elektriskā jauda	Gāzes svārstību frekvence	Svārstību amplitūda transformatorcaurulēs
Vērtība	30 W	576 W	58 Hz	0,6 bar



4.6. att. a) Attīstītās akustiskās jaudas izejā un termoakustiskajā kontūrā; b) Izmērītās un ekstrapolētās slodzei pieejamās spiediena svārstību amplitūdas

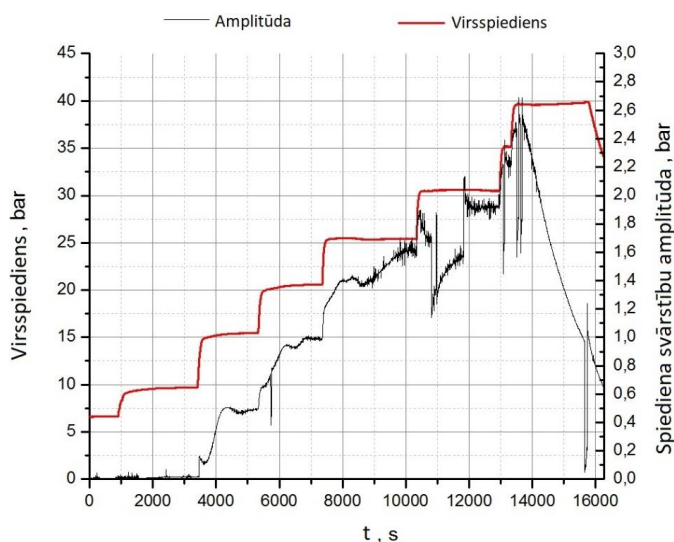
Savstarpējs salīdzinājums attīstītajām akustiskajām jaudām skaņas kontūrā un transformatorcauruļu izejās parādīts 4.6. att. (a). Šīs ir vērtības izgūtas no atbilstošajiem gāzes spiediena devēju pāriem (skat. 1.7. un 4.5. att.). Var redzēt, ka attiecība starp abām parādītajām akustiskajām jaudām augstākajā punktā sasniedz 4,5. No otras puses, attīstīto spiediena svārstību amplitūdu attiecība kontūrā un izejā, kā var novērot 4.5. attēlā, salīdzinot atbilstošās līknes, ir aptuveni vienāda ar 1,6. Balstoties uz šo attiecību un uz iepriekš teikto, spiediena svārstības, kas var tikt pieejamas MHD ģeneratoram, ir attēlotas 4.6. att. (b). Salīdzinot šos rezultātus ar MHD+TAc apvienotā eksperimenta rezultātiem [59], [85], ir redzams, ka patiesās spiediena svārstības pie 400 °C ir 1,2 bar, kas ir nedaudz mazāk par šeit uzrādītajām vērtībām. Tomēr, neskatoties uz to, ekstrapolējot 4.6. att. (b) līkni, var droši secināt, ka dzinējs būs spējīgs attīstīt 6 bar spiediena amplitūdu, gadījumā, ja tam tiek pievadīti 800 °C. Tiek uzskatīts, ka akustiskās jaudas plūsma, tāpat kā enerģija, kontūrā recirkulē nepārtraukti. Kad šī enerģija nonāk rezonatorā, tā tiek pastiprināta līdz zināmai vērtībai (akustiskajai izejas jaudai). Šī vērtība ir atbilstoša jaudai, kas tiks izmantota MHD ģeneratorā, vai arī akustiski izkliedēta neatgriezeniskos enerģijas zudumos uz mehāniskā vārsta, kas, kā jau minēts, tiek pieslēgts dzinēja izvadiem, kas tiek saukti par transformatorcaurulēm. Termoakustiskos dzinējus parasti projektē tā, lai attīstītā skaņas jauda akustiskajā kontūrā sastādītu vidēji ap 50-70 % no mašīnai pievadītās siltumjaudas [13], [86]–[89]. Tad, ņemot vērā to, ka dzinēja sildītājiem tika pievadīti 576 W (4.1. tabulas dati), redzams, ka dzinējs, attīstot 285 W (4.6. att., (a)), šādu stāvokli ir praktiski sasniedzis.

4.5. attēlam atbilstošā virsspiediena (violetā līkne) un spiediena svārstību frekvences dinamika (melnā līkne) parādīta 4.8. att. No šejienes ir redzams, ka dotajā testā frekvence svārstījās 1 herca robežās no 56 līdz 57 Hz. Gāze tika ielaista kontūrā zem 23 bar spiediena; tātad aptuveni puse no nominālā. Redzamais frekvences līknes iekritums diapazonā no 4000-4500 sekundeī sakrīt ar iepriekš aprakstīto aukstā siltummaiņa dzesējošā ūdens plūsmas palielināšanas brīdi. 4.8. att. ir parādīta dinamika attīstāmajām spiediena svārstībām citam TAc eksperimentam. Šajā mēģinājumā tika sasniegtas lielākās spiediena oscilācijas no visiem jebkad



4.7. att. Gāzes virsspiediens un spiediena svārstību frekvence atkarībā no laika

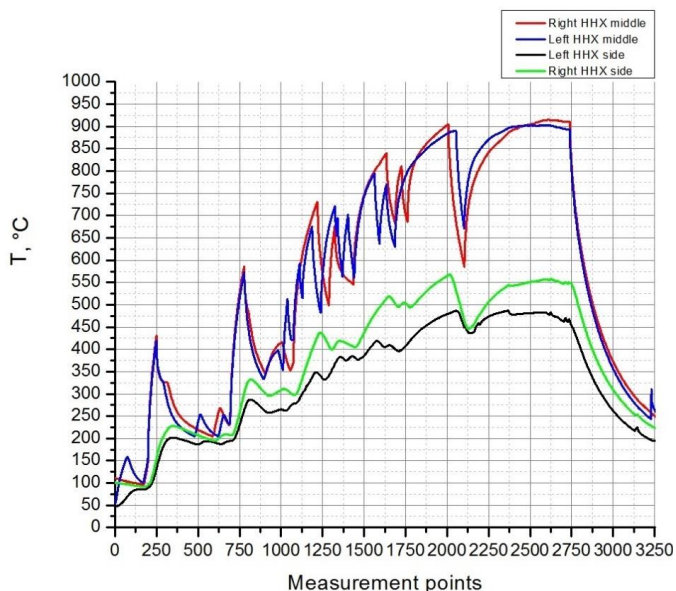
veiktajiem “*SpaceTRIPS*” testiem. Kā redzams, spiediena svārstības sākušās virsspiediena celšanas brīdī no 10 uz 15 bar. Svārstību pīķis sasniedzis 2,7 bar amplitūdu pie 40 bar virsspiediena, kas sastāda gandrīz pusi no nominālā svārstību lieluma. 4.9. att. ir parādīta temperatūras augšanas dinamika. Dotie mērījumi ir veikti 2 vietās: zaļā un melnā līkne ir uzņemtas siltummaiņa malā termopāri ievietojot 6,4 cm dziļā urbumā. Līdzīgs urbums ir veikts arī siltummaiņa centrā, kā jau aprakstīts šīs apakšnodaļas sākumā, taču termopāris, kas ir ievietots tajā, tiek izmantots sildītāja termoregulatora vadībai. Jāatzīmē, ka siltummaiņa malā esošais urbums ir novietots tuvāk siltummaiņi ievietotajiem sildītājiem, līdz ar to dotais apgabals sasilst vairāk nekā siltummaiņa centrs. Šajā eksperimentā par references punktu tiek uzskatīts tieši siltummaiņa vidus, pēc kā arī nosaka karstā siltummaiņa temperatūru. Līdz ar to,



4.8. att. Eksperiments ar augstākajām attīstītajām spiediena oscilācijām; virsspiediens un svārstību amplitūda atkarībā no laika

siltummaiņa vidū esošā temperatūra ir zemāka par 4.9. att. redzamajām temperatūrām zaļajai un melnajai līknei.

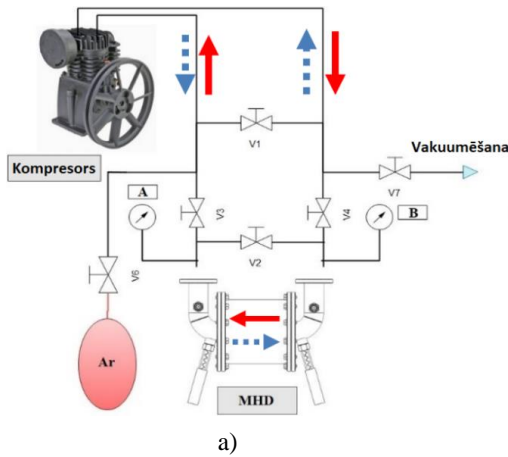
4.9. att. sarkanā un zilā līkne ir temperatūras mērījumi termopārim, kas ir piemērināti uz karsto siltummaiņu virsmas. Kā redzams, temperatūra savā pīķa punktā šeit sasniedz vairāk kā 900 grādus. Doto mērījumu salīdzinājums ar datiem no siltummaiņa urbumiem vēlreiz liecina par to, ka temperatūras sadalījums metāliskajā siltummaiņī ir ievērojami nevienmērīgs. “SpaceTRIPS” eksperimentos veiktie temperatūru mērījumi veikti reizi sekundē, taču 4.9. att. redzamie dati vidējoti pa katrām četrām sekundēm. Sarkanās un zilās līknes redzamās temperatūru svārstības ir izskaidrojamas ar termoregulatoru darbību, periodiski sildītājam ieslēdzoties – temperatūrai kāpjot - un atslēdzoties – siltummaiņim dzīstot.



4.9. att. Temperatūru mērījumi TAc dzinēja karsto siltummaiņu dažādās vietās atkarībā no laika

4.2. Ar MHD ģeneratoru saistītie eksperimentālie pētījumi

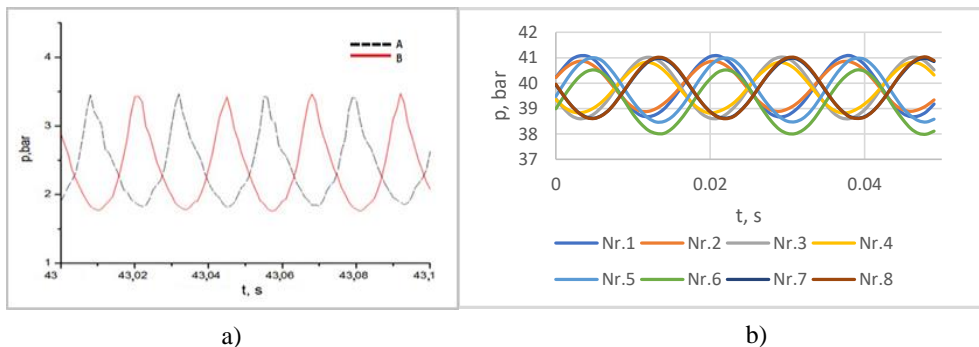
MHD ģeneratora testēšanai neatkarīgi no termoakustiskā dzinēja tika izstrādāts un izgatavots speciāls laboratorijas stends (4.10. att.). Tas ir bāzēts uz atbilstoši pārbūvēta 2 cilindru 2,2 kW gaisa kompresora, kas modelē TAc dzinēja darbību. Šim nolūkam ir ticis piemēlēts tāds kompresors, lai tā virzuļu savstarpējā fāžu nobīde kustības laikā būtu 180°. Tas nozīmē, ka cilindri darbojas pretējās fāzēs, un, stāvoklī, kad viens virzulis ir, piemēram, augšējā pozīcijā, otrs tajā pašā brīdī ir zemākajā. Kompresors tika modificēts tā, ka ir noņemts tā filtrs, kā arī likvidēti visi kompresora cilindriem oriģināli pienākošie gāzes plūsmas vienvirziena vārsti, atstājot cilindrus atklātus. Tālāk kompresoram ir pieslēgta manuāli regulējama, grozāmu vārstu sistēma (4.10. att. V1-V7) kas ļauj regulēt izejā iegūstamo spiedienu diferenci. Kā parādīts dotajā attēlā, šai vārstu sistēmas izejai, ir pieslēgts MHD ģenerators. Rezultātā,



4.10. att. Izstrādātais kompresora stends MHD ģenerators neatkarīgajiem testiem:
a) uzbūves shēma; b) eksperimentālā stenda foto

kompresoram darbojoties, alternējošā spiedienu starpība tiek pievadīta ģenerators pagriezieniem un, attiecīgi, šķidrums brīvajai virsmai, liekot nātrijam svārstīties. 4.10. att. (a), parādītās sarkanās bultiņas norāda spiediena virzienu cikla pirmā pusperioda laikā, savukārt zilās, raustītās bultas norāda virzienu nākošajā pusperiodā. Kompresora motora rotācijas frekvence tika regulēta ar frekvenču pārveidotāju un tika regulēta robežās no 15-55 Hz. Kompresora skrītulis tika nomainīts uz tādu, kurš pēc diametra un izmēriem ir identisks motora ($2p=2$) skrītulim, līdz ar to, ieregulētā motora frekvence ir arī virzuļu kustības maiņas frekvence.

Pienākošais gāzes spiediens tika mērīts ar 4.10. att. parādītajiem spiediena devējiem "A" un "B". Īss šo spiediemu mērījumu fragments atkarībā no laika ir parādīts 4.11. att. (a), kur atbilstoši 4.10. att. (a) bultiņu apzīmējumiem, rezultāti ir attēloti ar nepārtrauktu un svītrlīniju. Kā redzams, iegūtās spiediena svārstības ir nesinusoidālas, ar izteiktiem līknes pīkiem tajos virzuļa stāvokļos, kad šķidrums virsmai pievadāmais spiediena līmenis kāpj. Šī parādība var liecināt



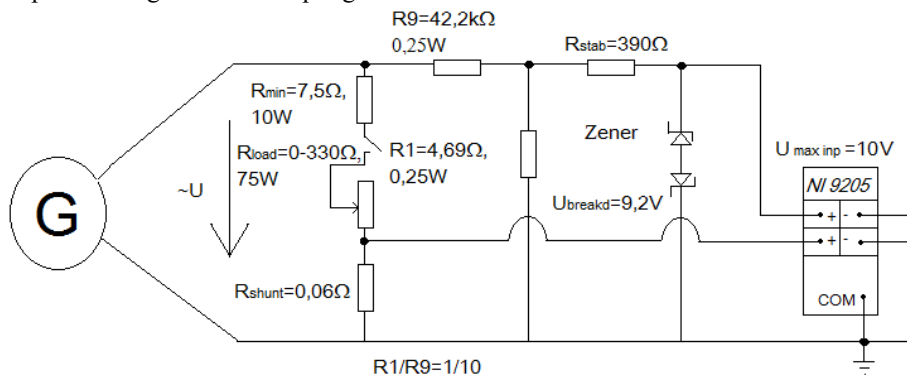
4.11. att. Eksperimentāli iegūto spiediena oscilogrammu salīdzinājums:
a) kompresors+MHD ģenerators; b) TAc dzinēja neatkarīgais tests

par to, ka šajā gadījumā gāze tiek nevēlami saspiesta, kas ir viena no ideālo gāzu likumiem - Boila-Mariota gāzu likuma - darbības sekas, pieņemot, ka gāzes temperatūra ir nemainīga.

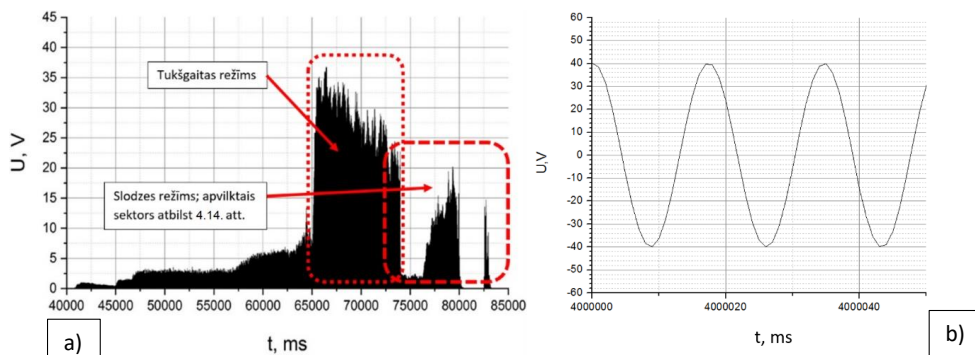
No otras puses, aprakstīto ainu var salīdzināt ar 4.11. att. (b), kur ir attēlotas līknes no Tac dzinēja tipiska eksperimenta īsa laika fragmenta, kas ir izgūtas no visiem 8 dzinēja spiediena devējiem, kur devēji numurēti atbilstoši 1.7. un 4.5. att. Redzams, ka Tac dzinēja testos tika iegūtas sinusoidālas svārstības. Tas var tikt izskaidrojams ar relatīvi lielām ģeometriskas un termodinamiskas dabas atšķirībām abos eksperimentos. Šis aspekts var atstāt potenciāli negatīvu iespaidu uz ģenerēto sprieguma līmeni MHD ģeneratorā un tas turpmāk ir jāpēta dziļāk. Attiecībā uz kompresora attīstīto spiediena svārstību līmeni, ir redzams, ka 4.11. att. (a) sasniegtās amplitūdas sastādīja nedaudz zem 1 bar. Tac dzinējā no 4.11. att. (b) redzams, ka dotajā fragmentā amplitūda ir nedaudz virs bāra, taču pie ievērojami lielāka virsspiediena. Ierobežojošais faktors, kas liedz kompresoram sasniegt lielākas spiedienamplitūdas šajā gadījumā ir tā jauda, kā arī iespējamās gāzes noplūdes caur blīvējumiem, tostarp cilindru gredzeniem. Jāatzīmē, ka arī šajā eksperimentā kompresora cilindru iekšējā telpā un tam pievadāmo vārstu sistēmā ir ielaists argons, cauruļu traktu iepriekš vakuumējot. Papildus Tac dzinēja darba gāzes funkciju pildīšanai argons kalpo arī citam mērķim. MHD ģeneratora testos tas nodrošina telpas aizpildīšanu ar inerti cēlgāzi, apgabalā, kas ir tiešā saskarē ar Na šķidrums brīvo virsmu. Šādi rīkojoties tiek nepieļauta sārnu metāla agresīva, ķīmiska reakcija ar gaisu vai gaisā esošo mitrumu.

Kā kompresora eksperimentā, tā arī Tac+MHD apvienotajā testā, attīstāmā elektriskā jauda tika novadīta uz izgatavotu, vienkāršu jaudas mērīšanas moduli [47]. Modulis, savukārt, tiek pieslēgts jau minētajai NI DAQ mērīšanas sistēmai. Izgatavotā moduļa shēma (4.12. att.) pamatā sastāv no:

- 1) Regulējama reostata, kas kalpo par MHD ģeneratora elektriskās slodzes pretestību;
- 2) Sprieguma dalītāja, kas ļauj reģistrēt inducēto spriegumu, lielāku par NI DAQ mērkartei pieļaujamajiem +/- 10V;
- 3) Zemomīga šunta, kas kalpo ģeneratorā un līdz ar to – slodzē - plūstošās strāvas stipruma mērīšanai, izmantojot uz šunta krītošā sprieguma krituma nolaišanās paņēmieni;
- 4) Divām pretēji vērstām Zēnera diodēm, kas nodrošina mērkartes aizsardzību pret pārlieku augstu inducēto spriegumu.



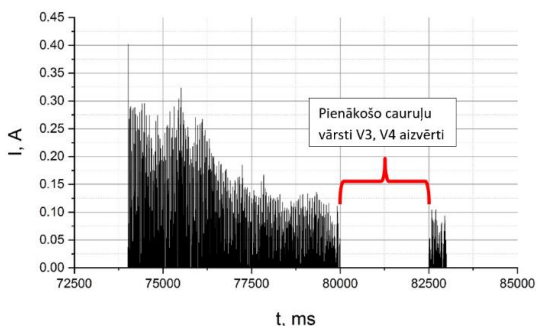
4.12. att. MHD ģeneratora attīstāmās elektriskās jaudas mērīšanai izstrādātā moduļa elektriskā shēma



4.13. att. a) Elektriskās mašīnas spolē inducētais spriegums atkarībā no laika kompresora+MHD ģenerators eksperimentā ar Na; b) 4.19. att. reģistrētā signāla fragments

No shēmas redzams arī, ka ir paredzēta iespēja ar slēdzi pārslēgties no tukšgaitas režīma uz slodzi un atpakaļ. Kompresora eksperimentā ģenerētais spriegums atkarībā no laika ir parādīts 4.13. att. Eksperimenta gaitā slodzes reostata elektriskā pretestība tika mainīta no zemas uz augstu atbilstoši 4.13. att. (a), turklāt šāds pats eksperimentēšanas plāns tika realizēts gan kompresora testos, gan arī tālāk, 4.4. paragrāfā aprakstītajā TAc+MHD testā. Tajā pašā laika skalā ar 4.13. att. (a), attēlotā ģenerators poles un slodzes strāva ir parādīta 4.14. att. Strāva šeit ir attēlota laika fragmentā, kas ir 4.13. att. (a) norādīts, kā slodzes režīms. Jāatzīmē, ka 4.13. un 4.14. attēli faktiski ir oscilogrammas, kurās tiek parādīti pozitīvie pusperiodi. Līdz ar to, pietiekami palielinot kādu konkrētu laika fragmentu, ir saskatāma mērāmā signāla sinusoīda, kuras piemērs ir demonstrēts 4.14. att. (b), no kā, neveicot detalizētu harmonisko analīzi, var spriest arī par mērāmā sprieguma apmierinošo kvalitāti. Dotais 4.14. att. (b) fragments ir izgūts no 4.19. att., TAc+MHD testa.

No šiem grafikiem ir redzams, ka lielākais inducētais spriegums tukšgaitā sasniedza 37 V amplitūdu. Slodzes režīmā ar augstāko iespējamo reostata pretestību tika iegūti 20 V un 0,125 A, kas atbilst 160 Ω pretestībai. Pretēji tam, pie zemākās ieregulētās pretestības tika iegūti 2,5 V un 0,4 A, kas dod 6,25 Ω . Kā redzams, attīstītie spriegumi un strāvas ir relatīvi mazi, kas var tikt izskaidrots ar zemu kompresora pievadīto spiediena oscilāciju līmeni, kā arī jau aprakstīto nesinusoidalitāti. Kā iemesls tam var tikt minēts kompresora sistēmas un tās pievadcauru salīdzinoši īsais garums.



4.14. att. Elektriskās mašīnas spolē un slodzē plūstošā strāva atkarībā no laika kompresora+MHD ģenerators eksperimentā ar nātriju

4.3. MHD ģenerators nātrija kustību modelējošie eksperimenti ar ūdeni

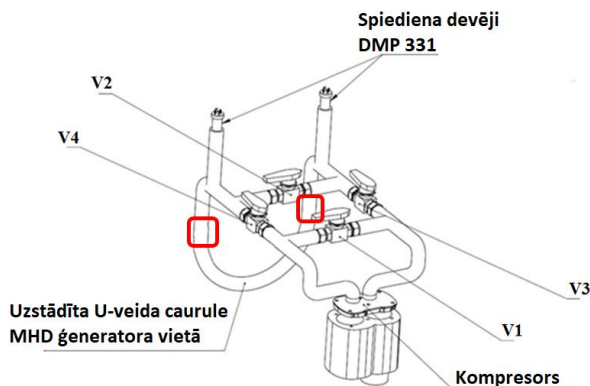
Pirms eksperimentēt ar nātriju, kompresora sistēma tika testēta ar ūdeni. MHD ģenerators vietā tika izmantota saliekta, caurspīdīga U – veida caurule (4.15. att.). Šāda eksperimenta pamatojums ir Na un ūdens līdzīgās fizikālās īpašības, tādas, kā blīvums un viskozitāte, kas tādējādi ļauj modelēt šķidrā metāla kustību. Eksperimenta mērķis bija vizuāli novērtēt Na brīvās virsmas nestabilitāti un periodiskumu, kā arī svārstību regularitāti. Nosauktie aspekti ir būtiski stabilai elektriskās izejas jaudas ģenerācijai reālā eksperimentā ar šķidru metālu. Tāpat kā Na eksperimentā, arī testā ar ūdeni šķidrums tilpums bija 0,5 L un pielietā šķidrums virsma nosacīti iezīmēta 4.15. att. ar sarkanu.

Eksperiments parādīja, ka kompresora spiediena oscilāciju izraisītās šķidrums virsmas svārstības ir nestabilas, rezultējoties neregulārās, haotiskās šļakatās (4.16. att. (a)). Ūdens virsmai pievadītā reģistrētā spiediena svārstības bija tādas pašas, kā 4.11. att. (b) un svārstījās atbilstoši minētajai oscilogrammai.

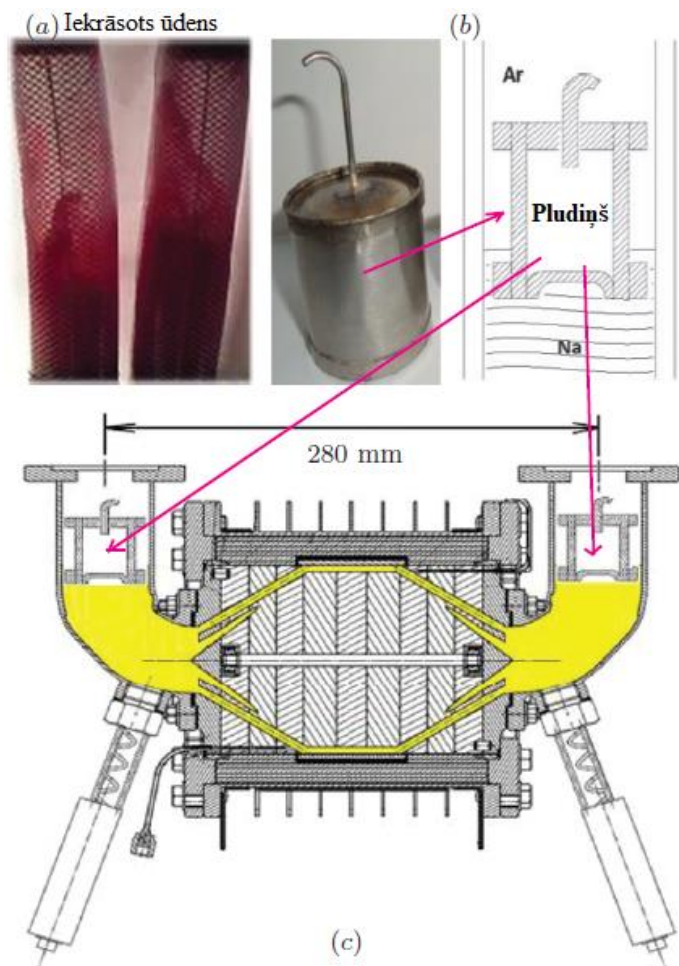
Lai tālākos plānotos testus varētu turpināt, kā pagaidu risinājums piedāvāti un no 316 L markas nerūsējošā tērauda izgatavoti dobi, cilindriski pludiņi (4.16. att. (b)). Tie tika novietoti tieši uz šķidrums virsmas (4.16. att. (c)). Pretējā gadījumā, bez jebkādas mākslīgi izveidotas stabilizācijas būtu pamats gaidīt ievērojamu inducētā sprieguma un, līdz ar to, ģenerētās jaudas samazinājumu mašīnas izejā. Tas tika novērots arī eksperimentāli atsevišķā MHD ģenerators testā ar nātriju bez pludiņiem, tukšgaitas spriegumam pie relatīvi zemas frekvences – 12 herciem – sasniedzot 3V, pie slodzes strāvas 0,034 A. Atkārtojot šo eksperimentu vairākas reizes, varēja redzēt, ka šis rezultāts pat nav viennozīmīgs, mērījumu vērtībām vēl vairāk samazinoties un atkal palielinoties. Pie augstākām frekvencēm, pat tukšgaitas spriegums bija vēl zemāks par 3V.

Atgriezoties pie ūdens eksperimentiem, tie tika veikti testējot arī sekojošas pludiņu formas (4.17. att):

- 1) Diskveida;
- 2) Muciņas formas;
- 3) Sfērisku, lodveida.



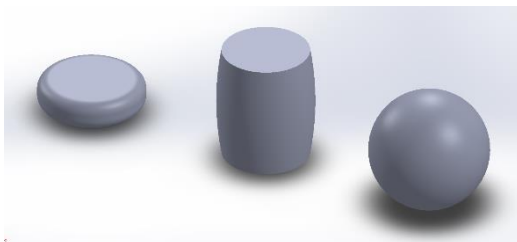
4.15. att. 3D modelis veiktajam MHD ģenerators plūsmu modelējošajam ūdens eksperimentam uz kompresora stenda



4.16. att. a) Eksperimenta rezultāti uz kompresora stenda ar iekrāsotu ūdeni; b) Izgatavotie Na brīvo virsmu stabilizējošie pludiņi; c) Pludiņu novietojums MHD ģeneratorā

Galvenie kritēriji, lai noteiktu MHD ģeneratoram piemērotāko pludiņu, ir sekojoši:

- a) Spēja vienmērīgi oscilēt neiesprūstot caurulē. Šis kritērijs tika izpildīts ar sfēriskajiem un diskveida pludiņiem. Tomēr sfērisko pludiņu gadījumā tika novērots, ka tas viegli sāk rotēt, tādējādi izraisot papildu šļakatas un viļņus. Testējot diskveidīgos pludiņus, tika novērots, ka kustības laikā tā aksiālās simetrijas ass nav stabili vertikāla, līdz ar to pludiņš sāk sūpoties. Tas noved pie tā, ka ūdens virsmas un pludiņa kustība vairs nav paralēlās plaknēs. Līdz ar to, par piemērotāko tika atzīta cilindriskā glāzveida forma, kurā cilindra augstums ir lielāks par diametru.
- b) Šķidrums-gāzes sadurvietai un, līdz ar to, šķidrums brīvajai virsmai ir jāpaliek iespējami stabili pilna svārstību perioda laikā.



4.17. att. Izgatavotie trīs dažādu veidu koka pludiņi ūdens eksperimentiem

Vairāki ūdens eksperimentā uzņemtie videokadri ir attēloti 4.18. attēlā. Lai izmēritu pludiņa pārvietojumu pilna gājiens laikā, blakus caurulei tika novietots lineāls. 4.18. att. kreisajā pusē ir parādīts gadījums, kad šķidrums nekustas. Savukārt, 4.18. att. pa labi, ir redzams gadījums, kad pludiņš svārstības laikā ir maksimāli attālinājies no līdzsvara stāvokļa pie frekvences 45 Hz. Šāda pati frekvence tika ieregulēta arī Na eksperimentā 4.11. att. (a), 4.13. att. un 4.14. att. Kā redzams no 4.18. att., pludiņa gājiens ir aptuveni 2 mm. No šiem kadriem var novērtēt virsmas stabilizācijas efektu. Tie parāda, ka šķidruma virsma joprojām nav absolūti gluda, kā tas būtu vēlams, lai varētu norisināties paredzama un novērtējama Na masas pārnese. Tomēr, neskatoties uz to, uz šķidruma virsmas plānā slānī novērojami viļņi telpā starp pludiņa virsmu un cauruli ir ievērojami mazāki un mazāk haotiski nekā testā ar iekrāsotu ūdeni.

Uzkonstruētā pludiņa shematiska skice ar izmēriem ir attēlota 2. pielikumā. Kā redzams, attālums starp pludiņa sienu un cauruli sastāda mazāk kā 0,5 mm. Šāds attālums tika eksperimentāli piemeklēts, kā optimums, lai nodrošinātu pietiekami brīvu kustību, vienlaikus nepadarot pludiņus par blīvītiem virzuļiem. Pludiņa augšdaļā ir iestrādāta tieva caurule, kas paredzēta spiediena izlīdzināšanai tā iekštelpā un ārpus pludiņa; pretējā gadījumā gāzes spiediena palielināšanās TAC dzinēja darba laikā varētu pludiņu deformēt. Caurules gals, kā redzams, ir saliekts virzienā uz leju, un tas ir darīts ar nolūku pēc iespējas nepieļaut potenciāli joprojām varbūtējo nātrija šķakatu nokļūšanu pludiņa iekšienē, kas ar laiku rezultētos tā nogrimšanā.

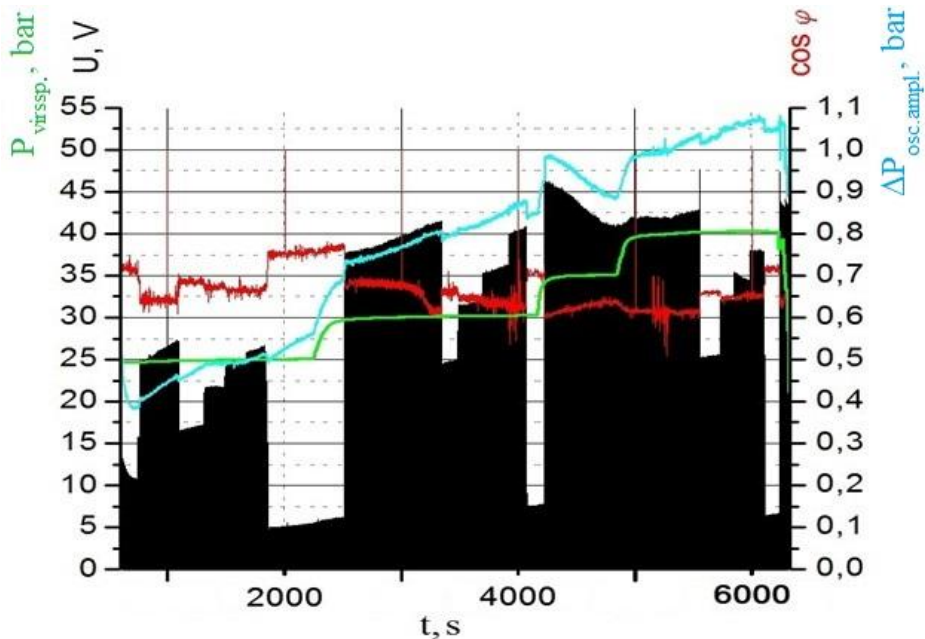
Pludiņu konstruēšana tika veikta izejot no elementārās fizikas apsvērumiem par šķidruma cēlējspēku, izmantojot informāciju par ūdens un nātrija, kā arī pludiņā izmantotā materiāla blīvumiem, projektējot iegrimi šķidrumā ne lielāku kā līdz cilindra vidum, kā redzams 4.18. att.



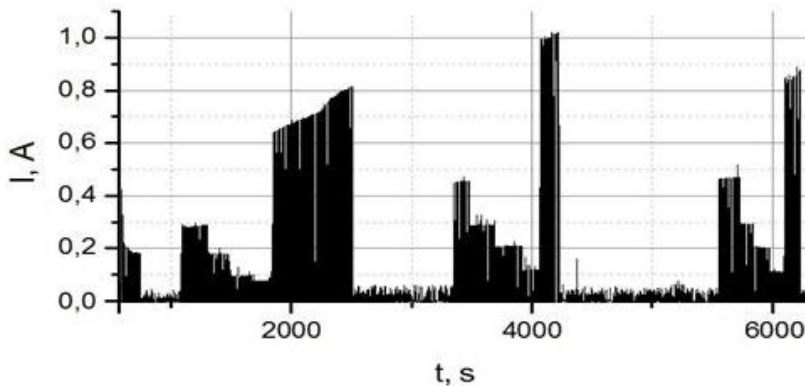
4.18. att. Eksperimentālie videokadri no ūdens testa ar cilindriskiem pludiņiem

4.4. Eksperiments, sajūdzot kopā MHD ģeneratoru ar termoakustisko dzinēju

Pēc abu mašīnu atsevišķajiem testiem MHD ģenerators tika pieslēgts TAc dzinējam un tika veiksmīgi aizvadīts pirmais eksperiments iekārtas apvienojot. Izejas sprieguma un strāvas oscilogrammu līknes sinusoidu pozitīvajiem pusperiodiem ir parādītas attiecīgi 4.19. un 4.20. attēlos (ar melnu), līdzīgi kā 4.13. un 4.14. att. Papildus tam, 4.19. attēlā, tajā pašā laikā skalā, ar dažādām krāsām ir parādītas arī citas eksperimenta laikā reģistrētās līknes.



4.19. att. Reģistrētais spriegums, spiediens un akustiskās jaudas koeficients MHD+TAc eksperimentā



4.20. att. Reģistrētā slodzes strāva MHD+TAc eksperimentā

1. Zaļā līkne – gāzes virsspiedienu
2. Sarkanā līkne – akustiskais jaudas koeficients, jeb $\cos \varphi$, kur φ ir fāžu nobīdes leņķis starp Na caurplūdes jeb ātruma un spiediena līknēm
3. Zilā līkne – spiediena oscilāciju amplitūda

Kā redzams, detalizēti elektriskās strāvas un sprieguma mērījumi tika veikti pie 3 dažādiem virsspiedieniem: 25, 30 un 40 bar. Regulējot slodzes reostata pretestību, strāvai un spriegumam ir novērojama precīza un arī sagaidāma antikorelācija, līdzīgi kā tas bija novērojams kompresora testā 4.14. un 4.13. att. (a). Tas nozīmē, ka palielinoties elektriskajai pretestībai un samazinoties strāvai, atbilstošajā laika momentā palielinās spriegums. Toties negaidīts var likties fakts, ka lielākā reģistrētā slodzes strāva 1A pie 8V sprieguma krituma uz slodzes pretestības ir novērojama pie 30 bar virsspiediena, nevis 40. Izskaidrojums tam var tikt atrasts 4.21. att., kur ir parādīta abu TAc dzinēju karsto siltummaiņu atbilstošā temperatūras izmaiņas dinamika. Redzams, ka abas puses ir izteikti nesimetriskas un ir vērojams gandrīz 100°C liels termiskais disbalanss, kas var ietekmēt saražotās izejas jaudas līmeni ģeneratorā. Ar termisko disbalansu šeit tiek saprasta atšķirība attiecīgo abu temperatūru mērošo termopāru rādījumos, katra TAc dzinēja karstākajā punktā, karstajā siltummainī.

Iemesls nesimetrijai ir meklējams tajā, ka abos siltummaiņos implementētie sildītāji nav iestrādāti pilnīgi vienādi. Kopējā pievadītā elektriskā jauda TAc dzinēja sildītājiem šajā eksperimentā sastādīja 250+250=500W. Tas arī noved pie zema kopējā TAc+MHD lietderības koeficienta, kas, līdz ar to, sasniedz 1.6%.

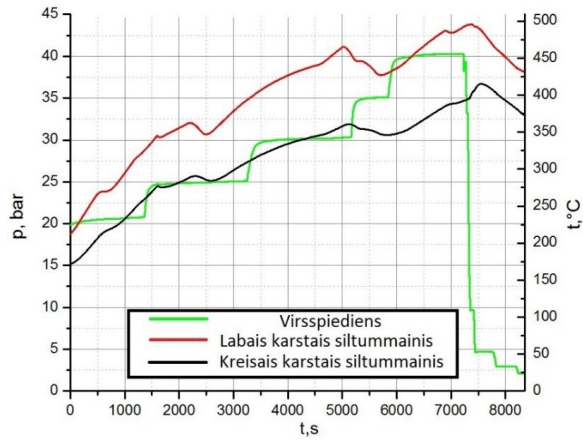
Turpinot analizēt 4.19. attēlu un salīdzinot eksperimentāli iegūtos datus ar 2.19. att. aprēķinātajām līknēm, var redzēt, ka eksperimentāli iegūtais akustiskais jaudas koeficients ir pat augstāks par teorētiski prognozēto. 4.22. attēlā, attēlojot to tajā pašā laika skalā, ir parādīta eksperimentāli attīstītā nātrija caurplūde (a), kā arī svārstību frekvence (b) atkarībā no laika.

Caurplūde tika mērīta izmantojot MHD tehnikā plaši pazīstamā kondukcijas tipa elektromagnētiskā plūsmas mērītāja metodi. Šim nolūkam tika speciāli izstrādāts un izgatavots mēraparāts ar kontaktelektrodiem un pastāvīgajiem magnētiem [47]. Izmantojot caurplūdes mērījumus un zinot konkrētās interesējošās vietas caurules šķērsriezuma laukumu, var aprēķināt vidējo vērtību Na ātrumam.

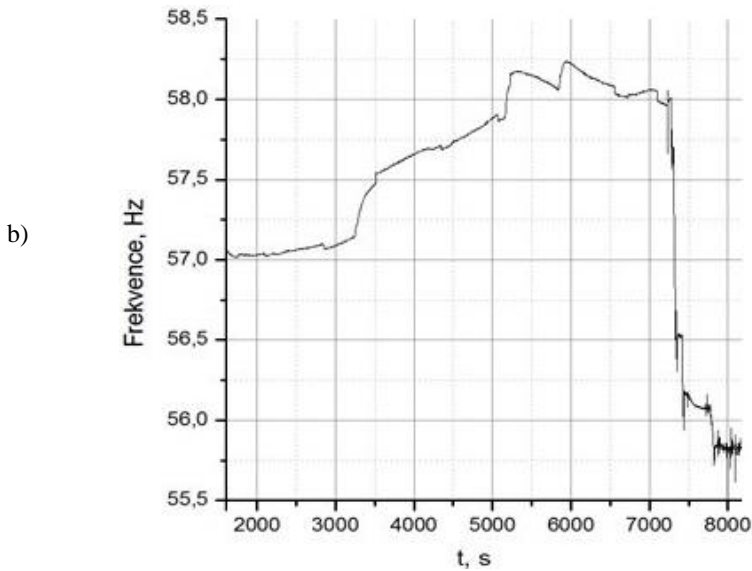
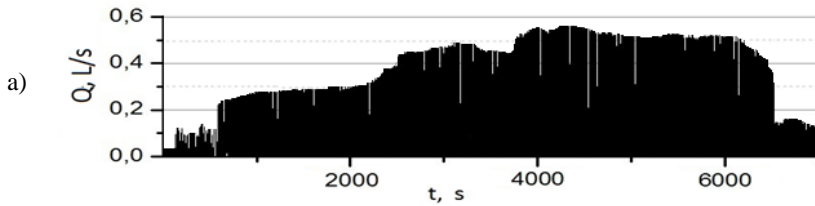
Ņemot vērā pievadīto spiediena svārstību līmeni, kā redzams, maksimālā caurplūdes amplitūda eksperimentā pārsniedza 0,5 L/s. Savukārt, kā redzams no 4.22. att., b), svārstību frekvence mainījās 2 Hz robežās.

Demonstrētā jaudas koeficienta līkne (4.19. att.) ir iegūta no caurplūdes un spiedienu mērījumiem.

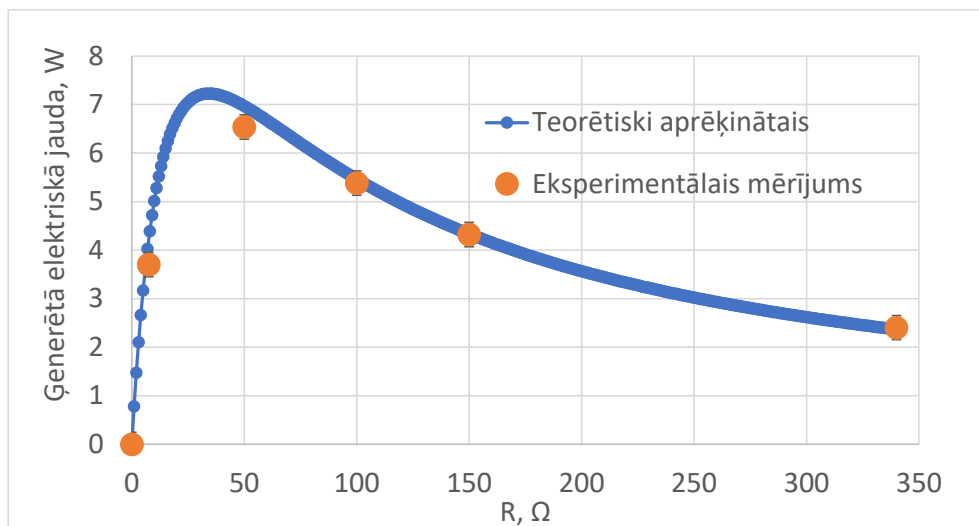
Eksperimentāli attīstītās elektriskās jaudas, kā novērojams 4.19. un 4.20. att., ir samērā zemas, salīdzinot ar ģeneratora nominālajiem parametriem. Tomēr, šajā gadījumā ir jāņem vērā pievadīto spiediena svārstību līmenis. Salīdzinot eksperimentāli iegūtos datus ar teorētiski aprēķinātajiem pie tā pašā attīstītā TAc spiediena, ir iegūta laba rezultātu sakritība. Šāds salīdzinājums ir demonstrēts 4.23. attēlā; dotā eksperimentālā līkne ir uzņemta pie jau minētās 500 W pievadītās siltumjaudas. Analītiski aprēķinātā līkne savukārt ir iegūta izmantojot darba 3. nodaļā piedāvāto izstrādāto MHD ģeneratora aprēķina metodi. Ņemot vērā izmantoto



4.21. att. Virsspiediena izmaiņas un karsto siltummaiņu temperatūra MHD+TAc eksperimentā



4.22. att. a) Eksperimentāli uzņemta nātrija caurplūde atkarībā no laika TAc+MHD eksperimentā; b) Atbilstošā Na caurplūdes un spiediena svārstību frekvence



4.23. att. Eksperimentāli attīstītā elektriskā jauda TAc+MHD testā un tās salīdzinājums ar teorētiski aprēķināto

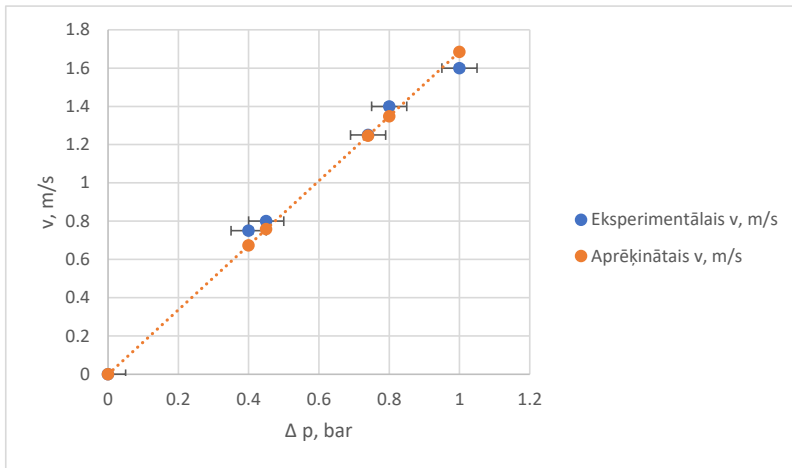
mērparātu precizitāti, tad mērījumu kļūdas vērtība uz abscisu ass 4.23. att. ir +/- 2 omi, kas ir pārāk maza, lai tiktu saskatāma dotajā mērogā. Savukārt novērtētā kļūdas vērtība ordinātu ass virzienā sastāda 250 mW. 4.24. attēlā savukārt ir otrādāk, un uz abscisu ass redzami spiediena kļūdu intervāli ir lielāki par ātruma mērījumu kļūdām.

4.24. att. attēlots salīdzinājums eksperimentāli iegūtajam Na ātrumam un spiedienam $v=f(\Delta p)$ ar aprēķināto, izmantojot MHD vienādojumu sistēmas pieeju. Kā redzams, arī šeit iegūtā lineārā sakarība ir ar labu sakrītību. Līknes lineārais raksturs var tikt izskaidrots sekojoši. Spiediens un caurplūde ir savā starpā saistīti ar sekojošu sakarību:

$$P = ZQ, \quad (4.1)$$

kur Z ir kompleksā akustiskā impedances. Tas nozīmē to, ka šī impedances raksturo fāzes nobīdi starp spiedienu un caurplūdi jeb ātrumu. Kā jau skaidrots iepriekšējās nodaļās, sistēmas iespējami optimālai darbībai šai fāzes nobīdei ir jābūt iespējami mazai. Par to ir viegli pārliecināties apskatot vienādojumu (3.77). Tas savukārt nozīmē arī to, ka, pie konstantas slodzes un frekvences, ātruma atkarība no $tg \psi$ ir lineāra līknes sākuma daļā, proti, pie maziem ātrumiem, līdz aptuveni 5 m/s.

Šeit ir vērts arī atzīmēt aprakstītās impedances nozīmi attiecībā uz abu mašīnu – TAc un MHD – savstarpējo adaptāciju. Projektējot šāda tipa no divām mašīnām apvienotu iekārtu ir jātiecas uz to, lai šo abu mašīnu impedances iespējami labi sakristu.



4.24. att. Eksperimentāli iegūto ātruma un spiediena svārstību amplitūdu salīdzinājums ar teorētiski aprēķināto, izmantojot promocijas darbā izstrādāto metodi

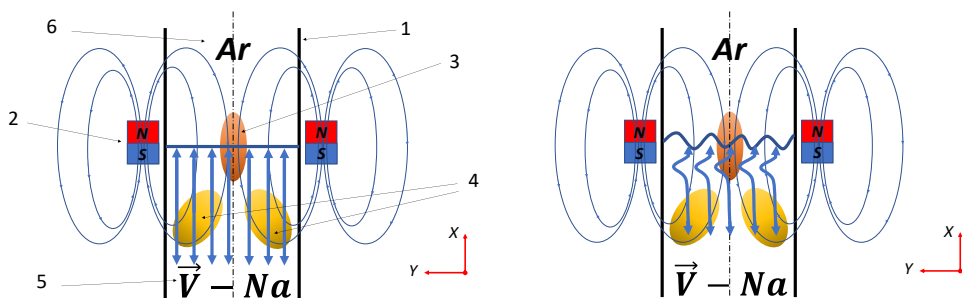
4.5. Paņēmiens elektriskās mašīnas šķidra metāla brīvās virsmas elektromagnētiskai stabilizācijai

Kā jau atzīmēts, izgatavotā un pētītā MHD ģenerators galvenais trūkums ir šķidra nātrija brīvās virsmas esamība, kas, noteiktos apstākļos mašīnai darbojoties, paliek nestabila. Ar nestabilitāti šajā gadījumā tiek saprasta šķidrums plakanās virsmas viļņošana, kas ar laiku, nestabilitātei attīstoties, pāriet sarežģītās, turbulentās, haotiskās plūsmas struktūrās. Nevienā tehniskā ierīcē nav vajadzīga un nav pieļaujama kāda nekontrolējama parādība. Līdz ar to, robežai starp argonu un nātriju ir jābūt definētai, jo pretējā gadījumā var tikt sagaidāma argona burbuļu vai gāzes ieslēgumu nokļūšana šķidrā metālā. Šīs problēmas nerisināšana neļauj MHD ģeneratoram normāli strādāt.

“SpaceTRIPS” projekta ietvaros LU Fizikas Institūta sadarbības partneris, vācu MHD institūts “HZDR (*Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf*)” Drēzdenē veica maiņvirziena plūsmas virsmas stabilizācijas pētījumus, sadalot kanālu vairākos mazākos apakškanālos [44]. Tādējādi tiek samazināts katra jaunizveidotā apakškanāla šķērsriezuma laukums. Šāds risinājums dod stabilizācijas efektu, tomēr uzreiz parādās būtisks trūkums: hidrauliskās pretestības ievērojama palielināšanās, pieaugot kopējam sienīņu saskares laukumam ar ko šķidrums un plūsma nonāk kontaktā.

Turpmākajā izklāstā ir piedāvāta autora oriģināla metode virsmas nestabilitātes problēmu risināt izmantojot bezkontakta paņēmienu. Piedāvātā metode balstās uz pielikta, ārēja magnētiskā lauka izmantošanu. Pieliktā lauka līnijas tiek orientētas paralēli maiņvirziena šķidrums plūsmas virziena vektoram, kā attēlots 4.25. att. shēmā. Ar cipariem norādīto pozīciju atšifrējums ir sekojošs:

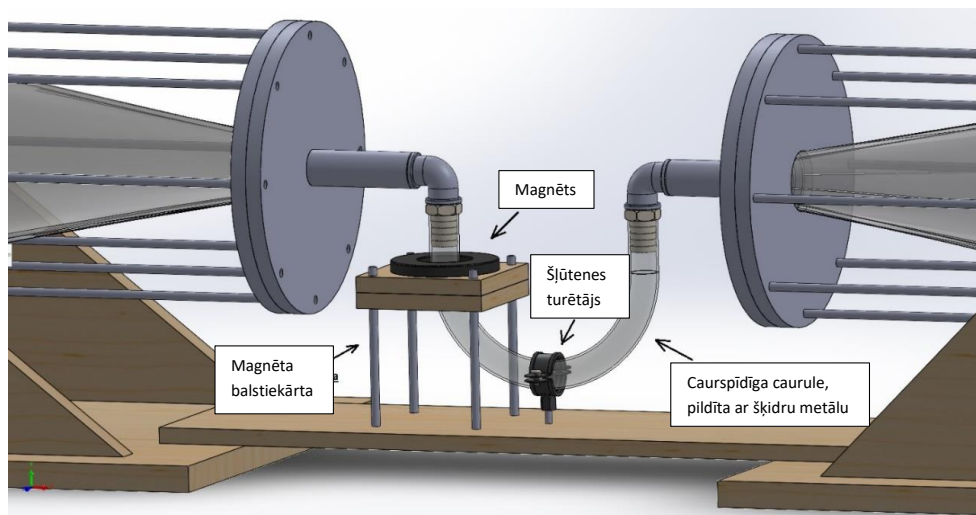
1. Šķidruma caurule;
2. Magnētiskā lauka avots;
3. Sektors, kurā magnētiskās plūsmas līnijas ir paralēlas šķidruma plūsmas līnijām;
4. Apgabali, kuros šķidruma plūsma šķērso magnētiskā lauka līnijas arī veicot taisnvirziena kustību;
5. Stabilizējama elektrovadošais šķidrums;
6. Virs šķidruma brīvās virsmas esošā gāze.



4.25. att. Principsēma piedāvātajai ģenerators šķidruma virsmas stabilizācijas metodei

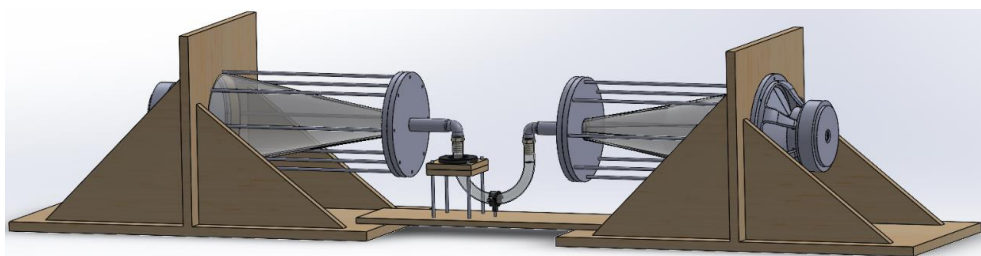
Šajā gadījumā piedāvātais darbības princips var tikt izskaidrots sekojoši. Tiklīdz kāds no šķidruma slāņiem nestabilitātes attīstības gaitā centīsies novērsties no taisnvirziena šķidruma plūsmas (4.25. att., pa kreisi – idealizēts gadījums) trajektorijas telpas virzienos – uz augšu, vai uz leju – tā tūlīt radīsies no “X” atšķirīgas ātruma komponentes (4.25. att., pa labi). Šīs ātruma komponentes nekavējoties šķērsos magnētiskās plūsmas līnijas, kas, savukārt, inducēs elektriskās strāvas šķidrajā metālā, brīvās virsmas reģionā. Magnētiskais lauks, mijiedarbībā ar inducētajām strāvām, centīsies nostādīt no savas trajektorijas aizgājušās šķidruma plūsmas līnijas atpakaļ savā sākotnējā vietā. Tas rezultētos šķidruma virsmu stabilizējošā efektā.

Pamatojums šādai hipotēzei ir jaunākajā MHD literatūrā atrodamā informācija par iespējam stabilizēt taisnvirziena nemainīgas orientācijas elektrovadoša šķidruma plūsmas ar pieliktu magnētisko lauku, vērstu tajā pat virzienā, kurā plūst šķidrums [90], [91]. Šādi eksperimenti ir realizēti Ilmenau Tehnoloģiskās Universitātes Plūsmu mehānikas institūtā, Vācijā, prof. J. Koļesņikova vadībā. Būtiska atšķirība tomēr ir tajā, ka minētajā literatūrā apskatītās plūsmas nav oscilējošas un, līdz ar to, ir ar nemainīgu virzienu. Šī iemesla dēļ, uz doto brīdi faktiski neeksistē zinātniskā literatūra par atbilstošās pētāmās plūsmas stabilizāciju. Tas ir arī saprotams, jo pielietojumu mainīgvirziena oscilējošām elektrovadošu šķidrumu plūsmām līdz šim ir bijis ļoti maz.



4.26. att. Izstrādātā skaļruņu stenda 3D modeļa palielinājums ar paskaidrojumiem

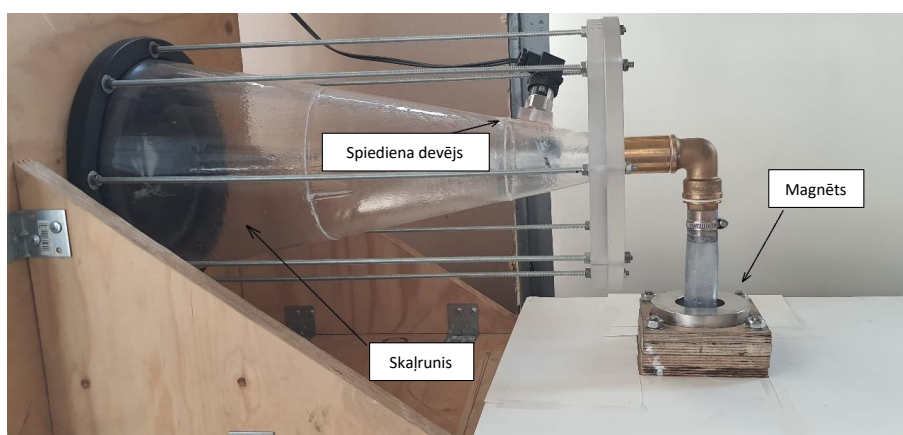
Attiecībā uz pašu nestabilitāti, hidrodinamikas literatūrā šāda tipa radniecīgu efektu jau izsenis dēvē par Faradeja nestabilitāti [92]. Šī parādība ir novērojama, kad uz šķidruma tilpumu ar atklātu augšējo brīvo virsmu iedarbojas vertikālas vibrācijas [93]. Kad kustības paātrinājums pārsniedz noteiktu kritisku vērtību (Faradeja sliekšni), šķidruma plakanā hidrostatiskā virsma kļūst nestabila un sāk viļņoties [94], [95]. Šo, t.s. Faradeja viļņu rašanās un veidošanās mehānisms ir relatīvi plaši izpētīts, piemēram, ir zināms, ka inducēto viļņu frekvence ir puse no pieliktās vibrāciju frekvences [96]. Tostarp daudz pētījumu saistībā ar šāda tipa nestabilitātēm ir veikts ferrofluīdu jeb magnetizējamo šķidrumu tematikā, piemēram [97]. Tomēr daudzi ar to saistītie aspekti joprojām nav skaidri. Tai skaitā to var attiecināt uz šķidrās, elektrovadošas vides brīvās virsmas mijiedarbību ar magnētisko lauku. Arī svārstību ierosinātājs šajā gadījumā ir fundamentāli jauna tipa, kas var ienest korekcijas izpratnē par doto problēmu.



4.27. att. Skaļruņu stenda 3D modeļa kopskats

Lai eksperimentāli pierādītu piedāvātās stabilizācijas metodes darbību, tika izgatavots atsevišķs testu stends (4.26., 4.27. un 4.28. att.). Tas sastāv no diviem viens otram pretī novietotiem zemfrekvenču skaļruņiem “Helix Q 10W” ar ilgstoši pieļaujamo nominālo jaudu 500 W. Skaļruņi, caur 1 kW D-klases audiopastiprinātāju “Behringer NX1000”, pieslēgti

sinusoidālu signālu ģeneratoram “M&R Systems WG-820”. Elektriski tie ir saslēgti tā, ka, padodot sinusoidālu signālu, to membrānas kustas pretfāzē, jeb t.s. “push-pull” režīmā, līdzīgi, kā iepriekšējās apakšnodaļās aprakstītais kompresora stends. Arī šajā gadījumā eksperimenta mērķis ir modelēt termoakustiskā dzinēja darbību mazākā mērogā. Katram skaļrunim ir piestiprināts no orgstikla izgatavots caurspīdīgs konuss ar pāreju uz mazāku diametru. No konusa tālāk aiziet 90° pagrieziens, pie kā, līdzīgi kā kompresora eksperimentā, ir pieslēgta U-veida caurspīdīga gumijas caurule, piepildīta ar šķidru metālu – InGaSn (Indija-Gallija-Alvas) eitektisko sakausējumu. Skaļruņu membrānām vibrējot, šķidrums var tikt svārstīts. InGaSn tiek izmantots, lai simulētu nātrija kustību. Konkrētā izvēle pamatojas ar InGaSn eitektikas zemo kušanas temperatūru, spēju palikt šķidram istabas temperatūrā, zemāku agresivitāti un vienkāršāku manipulēšanu ar metālu. Vienlaikus ir ņemts vērā, ka InGaSn blīvums ir ievērojami lielāks par Na blīvumu. Skaļruņu ierobežotās jaudas dēļ to spēja veikt



4.28. att. Puse no izgatavotā skaļruņu stenda kopā ar testsekciju



4.29. att. Magnēta novietojums attiecībā pret šķidruma virsmu

gāzes un šķidruma pārvietojumu ir ierobežota, tāpēc ir iespējami minimizēts izmantojamā šķidruma daudzums, un tika izmantoti ap 70 mL InGaSn. Vienā līmenī ar šķidruma virsmu ir novietots aksiāli magnetizēts NdFeB gredzenveida pastāvīgais magnēts, kā redzams 4.29. att, kas rada magnētisko lauku atbilstoši 4.25. att. shēmai.

Eksperimenti tika veikti ar videokameru filmējot brīvo virsmu tās kustības laikā dažādos leņķos. Turpmāk (4.30. att. un 4.31. att.) demonstrēti secīgi videokadri no 20 un 40 Hz svārstību testiem variantos ar pieliktu ārēju magnētisko lauku, kā arī bez tā. Pie 20 Hz skaļruņa svārstību frekvences filmēts ar videoieraksta frekvenci 480 kadri sekundē, savukārt pie 40 Hz - ar 960 kadriem sekundē. Eksperimentā izmantotās gumijas caurules diametrs - 25 mm - kas sastādīja pusi no magnēta vīduscauruma diametra.

4.30. att. redzamajos rezultātos var redzēt, ka prognozētais sagaidāmais elektromagnētiskās stabilizācijas efekts ir novērots. Ir skaidri saskatāms šļakatu intensitātes samazinājums un ir novērojama uzlecošo šķidrums šļakatu augstuma samazināšanās. Vienlaikus jāatzīmē, ka virsmas viļņošana ir novērojama joprojām un pilnībā nav slāpēta. Tam ir iespējami sekojoši iemesli. Lai nodrošinātu pietiekami spēcīgu magnetohidrodinamisko mijiedarbību jābūt spēcīgam magnētiskajam laukam un/vai šķidrums elektrovadītspējai. InGaSn elektrovadītspēja salīdzinot ar Na ir vairākas reizes zemāka. No otras puses, izmantotais NdFeB pastāvīgais magnēts spējīgs nodrošināt tikai samērā vāju magnētisko lauku. Tas tika izmērīts un aksiālā lauka komponente centrā sastādīja 0.26 T, savukārt, pie magnēta iekšējās sienas, magnēta vidū – 0.505 T. Kā redzams, papildus tam arī magnētiskā lauka sadalījums ir nehomogēns. Arī tas varētu negatīvi atspoguļoties uz elektromagnētiskās stabilizācijas efektu, salīdzinot ar potenciāli homogēnu lauku.

Vienlaikus redzams arī, ka 4.30. un 4.31. att., rezultātos ir saskatāms literatūrā [93] aprakstītais novērojamo viļņu virsotņu skaita pieaugums, pieaugot frekvencei, piemēram, no 20 uz 40 Hz. Mainoties frekvencei izmainās arī virsmas un viļņu struktūra līdz ar to atrašanās vietu.

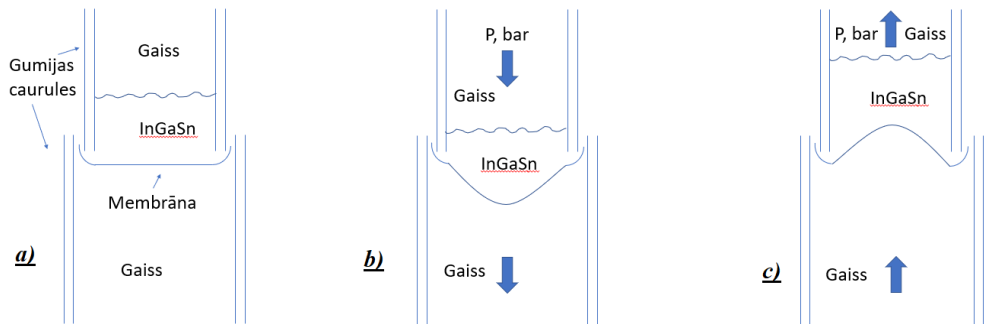
Skaļruņu sistēmas ierobežotās jaudas un skaļruņa kartona membrānas ierobežotā pārvietojuma dēļ pie “*SpaceTRIPS*” iekārtas nominālās 50 Hz frekvences novērotais šķidrums pārvietojums bija pārlietu mazs un sastādīja nepilnu milimetru. Līdz ar to, tas nesasniedza TAc+MHD iekārtas reālo nātrija pārvietojumu, kam, kā parādīts 1. nodaļa 1.2. tabulā, būtu jābūtu vairāki centimetri. Šī iemesla dēļ virsmas stabilizācija pie šādas frekvences nav novērojama. Lai vēl vairāk samazinātu kustināmā šķidrā metāla daudzumu, U-veida gumijas caurule tika aizstāta ar vertikālu, taisnu šļūtenes fragmentu, kura apakšējais gals ir aiztaisīts ar gumijas membrānu, kā parādīts 4.32. att. (a). Ar gumiju noslēgtā caurule tiek piepildīta ar šķidru metālu un tās otrs gals tiek pieslēgts vienam no skaļruņiem. Kā redzams, otrajā gala pievienota caurule ar lielāku diametru un noblīvēta kopā ar plānu, elastīgu gumijas membrānu. Resnākās caurules otru galu pieslēdz otram skaļrunim. Skaļruņu darbības laikā membrāna kustas, kā parādīts 4.32. att. (b) un (c). Tādējādi gūta iespēja ievērojami samazināt šķidra metāla tilpumu un, attiecīgi, masu.



4.30 att. InGaSn brīvās virsmas elektromagnētiskās stabilizācijas eksperiments pie 20 Hz:
 a) Ar pieliktu magnētisko lauku – augšā; b) Bez magnētiskā lauka - apakšā



4.31. att. InGaSn brīvās virsmas elektromagnētiskās stabilizācijas eksperiments pie 40 Hz:
 a) Ar pieliktu magnētisko lauku – augšā; b) Bez magnētiskā lauka - apakšā



4.32.att. Eksperiments ar membrānu

Ņemot vērā aprakstītā eksperimenta rezultātus, ir skaidrs, ka implementējot piedāvāto stabilizācijas metodi “*SpaceTRIPS*” iekārtai, stabilizācijas efekts būtu ievērojami lielāks dēļ Na vairākkārt augstākās elektrovadāmības pār InGaSn. Tomēr, lai šo hipotēzi eksperimentāli pārbaudītu, būtu jāveic caurspīdīgs eksperiments ar nātriju. Šāda tipa vizualizējoši MHD eksperimenti ar sārmu metāliem parasti saistāmi ar lielām tehniskām grūtībām. Šī iemesla dēļ turpmākajos pētījumos ir vērts apsvērt iespējas veikt modelējošus InGaSn eksperimentus ievērojami spēcīgākā magnētiskajā laukā.

Vienlaikus jāatzīmē, ka piedāvātajai stabilizācijas metodei jau 4.25. att. shēmā ir saskatāms acīmredzams trūkums, kas ir saistāms ar magnēta galīgajiem izmēriem. Magnētiskā lauka konfigurācija aksiāli magnetizētam pastāvīgajam magnētam raksturojas ar to, ka izteikta lauka vertikālā komponente ir magnēta vidū, proti, šķidruma brīvās virsmas apgabalā. Zem šī apgabala (šķidruma iekšienē) magnētiskās plūsmas līnijas noliecas un noslēdzas. Principskāmas 4. pozīcijā ir iezīmēti skaidri saskatāmie sektori, kuros šķidruma plūsma šķēļ magnētiskā lauka līnijas jebkurā gadījumā. Tas nepārprotami izraisīs papildu hidrauliskās pretestības pieaugumu šajos apgabalos inducēto strāvu dēļ, kas neizbēgami rezultēsies hidrauliskajos zudumos. Šo hidraulisko zudumu kvantitatīvu novērtēšanu būtu nepieciešams veikt turpmākajos pētījumos.

GALVENIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI

Promocijas darbā paveiktais, disertācijas izstrādes gaitā gūtie galvenie rezultāti un secinājumi jau ir lielākoties aprakstīti pamatnodaļās, taču, neskatoties uz to, autoraprāt ir vērts rezumēt galvenos punktus un gūtās atziņas.

Par darba 1. nodaļu:

1. Izpētīta un izgatavota uz fundamentāli jaunu konceptu un unikālu darbības principu balstīta elektriskā mašīna, kopā ar tās piedzenošo iekārtu.
2. Izgatavotās un izpētītās elektriskās mašīnas novitāte balstās tajā, ka MHD ģenerators ir indukcijas tipa, atšķirībā no līdz šim pasaulē plaši zināmajiem indukcijas tipa MHD ģeneratoriem.
3. Indukcijas tipa MHD ģenerators var tikt realizēts radot maiņvirziena elektrovadoša šķidrums plūsmu magnētiskajā laukā, kas norit pateicoties izmantotajam termoakustiskajam efektam.

Par darba 2. nodaļu:

4. Izstrādāta pilnīga MHD ģenerators aprēķina metode, kas balstās uz elektriskā transformatora ekvivalentās aizvietošanas shēmas izmantošanu mašīnas parametru iegūšanai.
5. Izveidota speciāla automatizēta aprēķina programma "Visual Basic for Applications" (VBA) programmēšanas vidē, kas ņem vērā arī enkura reakciju, proti, elektriskās mašīnas sekundārā, demagnetizējošā magnētiskā lauka ietekmi.
6. Piedāvāts analītisks paņēmieni nepieciešamo MHD ģenerators šķidrā metālā inducēto strāvu analītiskam aprēķinam, balstoties uz literatūrā atrodamo indukcijas tipa magnetohidrodinamisko sūkņu aprēķina metodēm. Analītiskie aprēķini salīdzināti ar "Quickfield" vidē autora izstrādātajiem skaitliskajiem modeļiem un ir iegūta laba sakritība.

Par darba 3. nodaļu:

7. Izstrādāta arī savādāka MHD ģenerators aprēķina metode, kas atšķirībā no darba 2. nodaļā aprakstītās transformatora ekvivalentās shēmas metodes izmanto Maksvela vienādojumus integrālā formā, proti, uzrakstītus kā spriegumu vienādojumus.
8. Parādīts, ka abas piedāvātās metodes darbojas līdzvērtīgi. Norādīts uz abu metožu principiālajām atšķirībām, kas sevī iekļauj MHD ģenerators induktivitāti un šķidra metāla ātrumu, proti, kā ar minētajiem lielumiem katrā metodē tiek operēts.
9. Izmantojot izstrādātās metodes, izanalizētas iespējas paaugstināt MHD ģenerators enerģētiskos parametrus – lietderības koeficientu un attīstāmo jaudu – pieslēdzot slodzei kondensatoru. Secināts, ka attiecīgos, specifiskos darba režīmos tos iespējams paaugstināt.

10. Pamatota nepieciešamība maksimāli samazināt elektriskās mašīnas šķidrā metāla masu. Tas ir pierādīts ar ievērojamo nātrija inerces lomu un nozīmi MHD ģeneratora darbības laikā. Šis pamatojums parādīts ar abām izstrādātajām aprēķina metodēm, proti, kā darba 2., tā 3. nodaļā.

Par darba 4. nodaļu:

11. Veikti individuāli eksperimenti ar katru no mašīnām. Gan atsevišķi ar termoakustisko dzinēju, gan atsevišķi ar MHD ģeneratoru. Šādi darīts ar mērķi iespējami detalizētāk izpētīt “*SpaceTRIPS*” tehnoloģijas darbības nianšes.
12. Atsevišķajos TAc dzinēja eksperimentos parādīts, ka mašīna spēj attīstīt līdz 2,7 bar lielu gāzes spiediena svārstību amplitūdu pie 40 bar virrspiediena, kas ir pietiekami, lai nodrošinātu atbilstošu šķidra metāla kustību gadījumā, ja dzinējam tiek pieslēgts MHD ģenerators ar šķidru nātriju kā darba ķermeni.
13. TAc eksperimentu sesijas rezultātā iegūta dzinēja kritiskā ierosmes līkne, kas nosaka reģeneratora temperatūru starpības un virrspiediena robežu, pie kuras dzinējs ir spējīgs uzsākt darbu un patstāvīgi strādāt.
14. Piedāvāta elektriskās mašīnas testēšanas koncepcija un atbilstoši tai izstrādāts MHD ģeneratora individuālās testēšanas stends, kas ir bāzēts uz divvirzuļu kompresora. Izmantojot stendu, veikti MHD ģeneratora eksperimenti ar Na un parādīts, ka pētāmā elektriskā mašīna spēj ģenerēt sinusoidālu maiņspriegumu.
15. Pirms Na testiem, veikts papildus priekšizpētes eksperiments uz kompresora stenda ar ūdeni nātrija vietā. Eksperimenta gaitā novērots un apzināts MHD ģeneratora fundamentāls trūkums, proti, šķidrumsa brīvās virsmas nestabilitātes rašanās, virsmas kustības rezultātā.
16. Izstrādāti un izgatavoti pludiņi, kā eksperimentāls pagaidu risinājums virsmas nestabilitātes slāpēšanai. Testi veikti, kā ar ūdeni, tā ar nātriju un iegūts ievērojams šļakatu samazinājums.
17. Pierādīts, ka izgatavotais magnetohidrodinamiskais ģenerators apvienojumā ar termoakustisko dzinēju ir darboties spējīgi un mašīnas izejā attīsta lietderīgo elektrisko jaudu, ko spēj uzņemt pieslēgts elektriskās enerģijas patērētājs.
18. Analizējot TAc dzinēja attīstīto Ar spiediena oscilāciju izmaiņas, no apvienotā TAc+MHD eksperimenta rezultātiem secināts, ka novērojama neliela MHD ģeneratora darbības ietekme uz dzinēju, brīdī, kad ģeneratoram pieslēdz elektrisko slodzi. Tas ir izskaidrojams ar ģeneratora spolē inducētās strāvas magnētiskā lauka pret darbību Na kustībai.
19. Salīdzināta eksperimentāli attīstītā MHD ģeneratora elektriskā jauda TAc+MHD testā ar teorētiski aprēķināto un ir iegūta laba rezultātu sakritība. Salīdzinājums veikts, izmantojot 3. nodaļā piedāvāto teorētisko modeli, kurā apskata MHD ģeneratora attīstītās elektriskās jaudas attiecību pret TAc dzinēja pievadīto spiediena starpību.
20. “*SpaceTRIPS*” prototipa laboratoriskie testi veikti zemas jaudas režīmā, tomēr darbā veiktie aprēķina parāda, ka iekārtas potenciālais, maksimālais lietderības koeficients labvēlīgākajos apstākļos var ievērojami pārsniegt konkurējošo termoelektrisko pārveidotāju lietderības koeficientus.

21. Izstrādāta un prezentēta metode elektromagnētiskai šķidra metāla brīvās virsmas stabilizācijai ar pastāvīgu magnētisko lauku.
22. Izstrādāts modelējošs stends piedāvātās stabilizācijas metodes testēšanai, kas balstās uz diviem pretēji novietotiem un pretfāzēs vibrējošiem skaļruņiem.
23. Veikts modelējošs metodes vizualizācijas eksperiments ar InGaSn eitektiku. Pierādīts un parādīts, ka ar elektromagnētiskā lauka palīdzību, pēc autora izstrādātās shēmas, iespējams samazināt MHD ģeneratora darbības laikā radītās šļakatas un zināmā mērā stabilizēt šķidra metāla brīvo virsmu.

1. PIELIKUMS

Zemāk redzama "VBA" vidē izstrādātā MHD ģenerators enkura reakcijas aprēķina programma izmantojot "ActiveField" tehnoloģiju.

```
Sub MyMacro()
```

```
'Naakamaas rindinjas izveide ===== konverģences apakshiteraācijas
```

```
=====
```

```
Dim g As Integer
```

```
g = 1
```

```
Dim i As Integer
```

```
i = 2
```

```
Dim c As Integer
```

```
c = 0
```

```
n = Cells(i, 19).Value
```

```
B = Cells(i, 20).Value
```

```
Do While c < 180
```

```
GoTo Thispartofthecode
```

```
Do While n <> Cells(i - 1, 19) And B <> Cells(i - 1, 20)
```

```
Thispartofthecode:
```

'Rezultaatu tabulas pagarinaashana pavelkot uz leju

Sheets("Rezultati").Select

Range(Cells(i, 5), Cells(i, 9)).Select

Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(i, 5), Cells(i + 1, 9)),
Type:=xlFillDefault

Range(Cells(i, 21), Cells(i, 26)).Select

Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(i, 21), Cells(i + 1, 26)),
Type:=xlFillDefault

'=====

=====

'ELCUT nokonfigureeshana

Set ELC = CreateObject("ELCUT.Application")

ELC.MainWindow.Visible = True

Dim prb As ELCUT.Problem

Set prb = ELC.Problems.Open("C:\Users\Desktop\SpaceTRIPS\
\macros\elcut-faili\MHD(jauns).pbm")

prb.LoadModel

Dim mdl As ELCUT.Model

Set mdl = prb.Model

'Straavu bliivumu iekopeeshana ELCUTaa

Dim spole As Double

spole = ActiveSheet.Cells(i, 8).Value

Dim coil As LabelBlockMS

Set coil = prb.DataDoc.Labels(qfBlock).Item("coil").Content

With coil

.TotalCurrent = False

.Loading = -spole

End With

prb.DataDoc.Labels(qfBlock).Item("coil").Content = coil

Dim trissturis1 As Double

trissturis1 = ActiveSheet.Cells(i, 23).Value

Dim sodium1 As LabelBlockMS

Set sodium1 = prb.DataDoc.Labels(qfBlock).Item("sodium1").Content

With sodium1

.TotalCurrent = False

.Loading = trissturis1

End With

```
prb.DataDoc.Labels(qfBlock).Item("sodium1").Content = sodium1
```

```
Dim trissturis2 As Double
```

```
trissturis2 = ActiveSheet.Cells(i, 24).Value
```

```
Dim sodium2 As LabelBlockMS
```

```
Set sodium2 = prb.DataDoc.Labels(qfBlock).Item("sodium2").Content
```

```
With sodium2
```

```
    .TotalCurrent = False
```

```
    .Loading = trissturis2
```

```
End With
```

```
prb.DataDoc.Labels(qfBlock).Item("sodium2").Content = sodium2
```

```
Dim trissturis3 As Double
```

```
trissturis3 = ActiveSheet.Cells(i, 25).Value
```

```
Dim sodium3 As LabelBlockMS
```

```
Set sodium3 = prb.DataDoc.Labels(qfBlock).Item("sodium3").Content
```

```
With sodium3
```

```
    .TotalCurrent = False
```

```
    .Loading = trissturis3
```

```
End With
```

```
prb.DataDoc.Labels(qfBlock).Item("sodium3").Content = sodium3
```

```
Dim trissturis4 As Double
trissturis4 = ActiveSheet.Cells(i, 26).Value
Dim sodium4 As LabelBlockMS
Set sodium4 = prb.DataDoc.Labels(qfBlock).Item("sodium4").Content
With sodium4
    .TotalCurrent = False
    .Loading = trissturis4
End With
```

```
prb.DataDoc.Labels(qfBlock).Item("sodium4").Content = sodium4
```

```
'=====
=====
```

```
If Not (prb.Solved) Then prb.SolveProblem
```

```
Dim res As ELCUT.Result
prb.AnalyzeResults
Set res = prb.Result
```

```
Dim Wnd As ELCUT.FieldWindow
Set Wnd = res.Windows(1)
Dim Cnt As ELCUT.Contour
Set Cnt = Wnd.Contour
```

```
Cnt.Delete
```

```
Cnt.AddLineTo ELC.PointXY(-31.6, 58)
```



```
Cnt.AddLineTo ELC.PointXY(31.6, 58)
```

```
Dim table As ELCUT.TableWindow
```

```
Set table = res.GetTable(Cnt)
```

```
' Включение показа описания величины в заголовке таблицы
```

```
table.Columns.ShowDescription = False
```

```
' Создание таблицы в 6320 строк
```

```
table.Rows.TabulateNumber 6320, False
```

```
table.Rows.Select
```

```
table.GetData
```

```
'Starprezultaatu ierakstisana excell failaa no simulaacijas
```

```
ActiveSheet.Paste
```

```
Destination:=Worksheets("Starprezultati").Range("A1:R6321")
```

```
table.Close
```

```
Cnt.Delete True
```

```
'=====
```

```
=====
```

```
'Skaitiitaju palielinaashana
```

```
i = i + 1
```

```
'Indukciju izguushana no starprezultaatiem
```

```
Sheets("Starprezultati").Select
ActiveSheet.Range("J1:J6321").Select
Selection.Copy
Sheets("Indukcijas").Select
ActiveSheet.Paste
Destination:=Worksheets("Indukcijas").Range("B1:B6321")
```

'Indukciju iekopeeshana Integrāla1 apreekina lapaa

```
Sheets("Integralis1").Select
ActiveSheet.Paste
Destination:=Worksheets("Integralis1").Range("A1:A6321")
```

'Indukciju iekopeeshana Integrāla2 apreekina lapaa

```
Sheets("Integralis2").Select
ActiveSheet.Paste
Destination:=Worksheets("Integralis2").Range("A2:A6322")
Range("B1:IID1").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteAll, Operation:=xlNone,
SkipBlanks:=False, Transpose:=True
```

'Starprezultaatu lapas attiiriishana

```
Sheets("Starprezultati").Select
Columns("A:R").Select
Selection.ClearContents
```

'Integrala1 iekopeeshana rezultaatu lapaa

```
Sheets("Integralis1").Select  
Range("D6323").Select  
Selection.Copy  
Sheets("Rezultati").Select  
Range("B15").Select  
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone,  
SkipBlanks:=False, Transpose:=False
```

'Integrala2 iekopeeshana rezultaatu lapaa

```
Sheets("Integralis2").Select  
Range("IIG6324").Select  
Selection.Copy  
Sheets("Rezultati").Select  
Range("B16").Select  
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone,  
SkipBlanks:=False, Transpose:=False
```

'R0 iekopeeshana tabulaa

```
Range("B21").Select  
Selection.Copy  
Cells(i, 11).Select  
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone,  
SkipBlanks:=False, Transpose:=False
```

'Bvid iekopeeshana tabulaa

Range("B18").Select

Selection.Copy

Cells(i, 10).Select

Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone,
SkipBlanks:=False, Transpose:=False

'Grafiku, trendlainu un taisnes vienaadojumu koeficientu iegushana

Sheets("Indukcijas").Select

Range("B6323").Select

Selection.Copy

Sheets("Rezultati").Select

Cells(i, 19).Select

Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone,
SkipBlanks:=False, Transpose:=False

Sheets("Indukcijas").Select

Range("B6324").Select

Selection.Copy

Sheets("Rezultati").Select

Cells(i, 20).Select

Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone,
SkipBlanks:=False, Transpose:=False

'Mazaas konvergences iteraacijas jauno veertiibu pieskirsana

n = Cells(i, 19).Value

B = Cells(i, 20).Value

Cells(i, 18) = c

Cells(i, 4) = c

'I sl iekopeeshana rezultaatu lapaa

Cells(i, 9).Select

Selection.Copy

Range("B26").Select

Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone,
SkipBlanks:=False, Transpose:=False

'Argumentu un modulju iekopeeshana rezultaatu tabulaa

Range("B45").Select

Selection.Copy

Cells(i, 12).Select

Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone,
SkipBlanks:=False, Transpose:=False

Range("B46").Select

Selection.Copy

Cells(i, 13).Select

Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone,
SkipBlanks:=False, Transpose:=False

Range("B50").Select

Selection.Copy

Cells(i, 14).Select

Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone,
SkipBlanks:=False, Transpose:=False

Range("B51").Select

Selection.Copy

Cells(i, 15).Select

Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone,
SkipBlanks:=False, Transpose:=False

'Naakamaa rindinja Loop pabeidz konvergences cikla apakshiteraaciju

ELC.Quit

Set ELC = Nothing

Loop

'Lielaas iteraacijas lenkja graadu palielinaashana

$c = c + 5$

Cells(i, 18) = c

Cells(i, 4) = c

'Nokonvergeeto veertiibu atsevishkja izdaliishana

Sheets("Indukcijas").Select

ActiveSheet.Range("B1:B6321").Select

Selection.Copy

Sheets("NokonvergeetsB").Select

```
ActiveSheet.Range(Cells(1, g), Cells(6321, g)).Select  
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone,  
SkipBlanks:=False, Transpose:=False
```

```
Sheets("Rezultati").Select  
Range("B21").Select  
Selection.Copy  
Sheets("RezulteejoshaisR0").Select  
Cells(g, 1).Select  
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone,  
SkipBlanks:=False, Transpose:=False
```

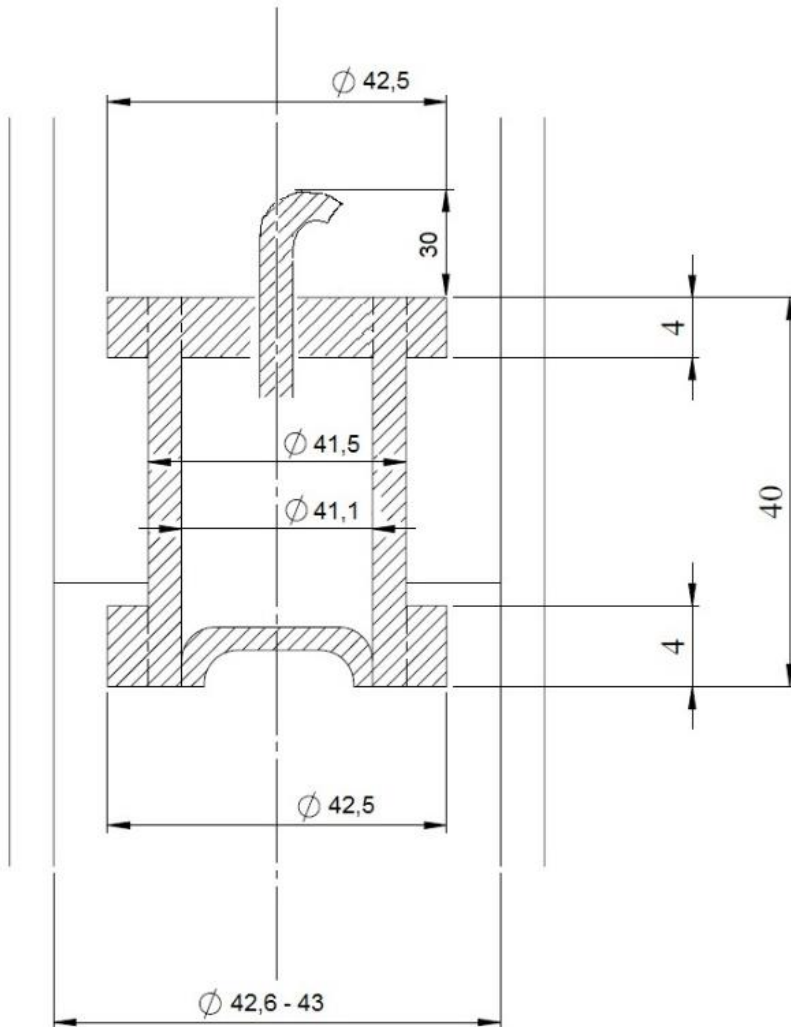
```
g = g + 1
```

'Naakamaa rindinja Loop pabeidz lielaa cikla iteraaciju

Loop

2. PIELIKUMS

Parādīta priekš MHD ģenerators šķidra metāla testiem izstrādātā nerūsējošā tērauda pludiņa shēma ar izmēriem.



IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS

Bibliogrāfijas organizēšanai un noformēšanai promocijas darbā tika izmantots *IEEE* stils inženierzinātnēs, izmantojot bezmaksas programmatūru *Mendeley (Elsevier Inc., ASV)*.

- [1] “What Powers a Spacecraft?,” 2019. <https://spaceplace.nasa.gov/what-powers-a-spacecraft/en/>.
- [2] “Basics of Space Flight - Inverse square law.” <https://solarsystem.nasa.gov/basics/chapter6-1/>.
- [3] N. T. Redd, “NASA’s Juno Mission to Jupiter to Be Farthest Solar-Powered Trip,” 2011. <https://www.space.com/12541-juno-jupiter-mission-solar-panels-power.html>.
- [4] F. Moring, “Space Nuclear Power,” *Aviat. Week Sp. Technol. (New York)*, vol. 160, no. 22, pp. 537–553, Jan. 2003, doi: 10.1016/B0-12-227410-5/00715-8.
- [5] G. L. Bennett, “Introduction to Space Nuclear Power and Propulsion,” *Encycl. Nucl. Energy*, pp. 155–167, Jan. 2021, doi: 10.1016/B978-0-12-819725-7.00133-1.
- [6] J. Sharp, “Thermoelectric Energy Conversion Devices,” *Ref. Modul. Mater. Sci. Mater. Eng.*, Jan. 2016, doi: 10.1016/B978-0-12-803581-8.01093-6.
- [7] G. Benvenuto and F. de Monte, “Analysis of free-piston Stirling engine linear alternator systems,” *J. Propuls. power*, vol. 11, no. 5, 1995.
- [8] D. Zudell, “Stirling Convertor Sets 14-Year Continuous Operation Milestone,” 2020. <https://www.nasa.gov/feature/glenn/2020/stirling-convertor-sets-14-year-continuous-operation-milestone>.
- [9] C.-H. Cheng and H.-S. Yang, “Stirling Engine Technology and Its Application on Solar Power Generation,” in *Innovative Design, Analysis and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering*, 2014, pp. 3–9.
- [10] S. Backhaus and G.W. Swift, “2. A thermoacoustic-Stirling heat engine: Detailed study.pdf,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 107, no. 6, pp. 3148–3166, 2000.
- [11] S. Backhaus and G. Swift, “New Varieties of Thermoacoustic Engines,” *Ninth Int. Congr. Sound Vib.*, pp. 1–8, 2002, [Online]. Available: <http://www.lanl.gov/thermoacoustics/Pubs/ICSV9.pdf>.
- [12] M. Veselý and T. Vít, “Difference between working gases in thermoacoustic engine,” 2014, doi: 10.1051/C.
- [13] K. Wang *et al.*, “Experimental Study on a 500 W Traveling-wave Thermoacoustic

- Electric Generator,” *Energy Procedia*, 2014.
- [14] H. Kang, P. Cheng, Z. Yu, and H. Zheng, “A two-stage traveling-wave thermoacoustic electric generator with loudspeakers as alternators,” *Appl. Energy*, vol. 137, pp. 9–17, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.09.090.
- [15] A. Al-Kayiem and Z. Yu, “Design of a Traveling Wave Thermoacoustic Engine Driven Cooler with Hybrid Configuration,” *World Congr. Eng.*, vol. II, pp. 1–6, 2014, doi: 2078-0958.
- [16] E. A. Zinoviev, G. V. Vorotnikov, A. I. Dovgyallo, and S. O. Nekrasova, “Boundaries of thermoacoustic instability in the thermoacoustic engine with cryogenic cooling,” *J. Int. Acad. Refrig.*, vol. 19, no. 4, 2020, doi: 10.17586/1606-4313-2020-19-4-20-26.
- [17] I. Girgin and M. Türker, “THERMOACOUSTIC SYSTEMS AS AN ALTERNATIVE TO CONVENTIONAL COOLERS,” *MSU Barbar. Nav. Sci. Eng. Inst.*, vol. 8, pp. 14–32, Apr. 2011.
- [18] D. McKelvey, S. Ballaster, and S. Garrett, “Shipboard electronics thermoacoustic cooler,” Naval Postgraduate School Monterey, California, 1995.
- [19] S. L. Garrett, J. A. Adeff, and T. J. Hofler, “Thermoacoustic refrigerator for space applications,” *J. Thermophys. Heat Transf.*, vol. 7, no. 4, pp. 595–599, 1993, doi: 10.2514/3.466.
- [20] V. S. Slavin, G. C. Bakos, T. A. Milovidova, and K. A. Finnikov, “Space power installation based on solar radiation collector and MHD generator,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, 2006, doi: 10.1109/TEC.2005.860401.
- [21] D. W. Price *et al.*, “Pamir-3U Magnetohydrodynamic generator results,” 1995.
- [22] D. W. Swallow *et al.*, “Results from the Pamir-3U pulsed portable MHD power system program,” 1996.
- [23] Y. Wang, X. Duan, P. Yan, H. Xue, and Q. Li, “A pulsed magnetohydrodynamic generator for electric launcher,” 2005, doi: 10.1109/TMAG.2004.838972.
- [24] L. Hu, H. Kobayashi, and Y. Okuno, “Performance of a Liquid Metal MHD Power Generation System for Various External Forces,” Jul. 2014, doi: 10.2514/6.2014-3558.
- [25] A. Geri, G. M. Veca, and A. Salvini, “Performance evaluation of MHD generators: Applications,” *IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. Rec. IEMDC*, pp. 10–12, 1997, doi: 10.1109/iemdc.1997.604139.
- [26] Jyoti Gupta, Manish Kumar Singla, and Parag Nijhawan, “Magnetohydrodynamic system – a need for a sustainable power generation source,” *Magnetohydrodynamics*, vol. 57, no. 2, pp. 251–272, 2021, doi: 10.22364/mhd.57.2.9.

- [27] G. W. Swift, A. "Migliori, and J. C. Wheatley, "Liquid metal thermoacoustic engine," 1986.
- [28] D. Hamman and G. Gerbeth, "Recent developments in Liquid metal MHD thermoacoustic engines," in *Proceedings of The sixth international Beer Sheva seminar on MHD flows and turbulence.*, B. H. and U. Y., Eds. Beer-Sheva: Ben Gurion University of Negev, 1993, pp. 441–453.
- [29] J. C. Domínguez-Lozoya, H. Perales, and S. Cuevas, "Analysis of the oscillatory liquid metal flow in an alternate MHD generator," *Rev. Mex. Fis.*, vol. 65, no. 3, pp. 239–250, 2019, doi: 10.31349/RevMexFis.65.239.
- [30] A. A. Castrejón-Pita and G. Huelsz, "Heat-to-electricity thermoacoustic-magnetohydrodynamic conversion," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, no. 17, 2007, doi: 10.1063/1.2733026.
- [31] G. Ibáñez, S. Cuevas, and M. L. de Haro, "Optimization analysis of an alternate magnetohydrodynamic generator," *Energy Convers. Manag.*, vol. 43, no. 14, pp. 1757–1771, 2002, doi: 10.1016/S0196-8904(01)00133-9.
- [32] C. Vogin and A. Alemany, "Analysis of the flow in a thermo-acoustic MHD generator with conducting walls," *Eur. J. Mech. B/Fluids*, vol. 26, no. 4, pp. 479–493, 2007, doi: 10.1016/j.euromechflu.2006.10.006.
- [33] S. Carcangiu, A. Montisci, and R. Pintus, "Performance analysis of an inductive MHD generator," *Magnetohydrodynamics*, vol. 48, no. 1, pp. 115–124, 2012, doi: 10.22364/mhd.48.1.14.
- [34] A. Alemany, S. Carcangiu, R. Forcinetti, A. Montisci, and J. P. Roux, "Feasibility analysis of an MHD inductive generator coupled with a thermoacoustic resonator," *Magnetohydrodynamics*, vol. 51, no. 3, pp. 531–542, 2015, doi: 10.22364/mhd.51.3.13.
- [35] S. Carcangiu, R. Forcinetti, and A. Montisci, "Simulink model of an iductive MHD generator," *Magnetohydrodynamics*, vol. 53, no. 2, pp. 255–265, 2017, doi: 10.22364/mhd.53.2.4.
- [36] N. Levins, E. Kamoliņš, and S. Vītoļiņa, *Bezkontakta elektriskās mašīnas*. Rīga: RTU, 2011.
- [37] N. Rott, "Thermoacoustics," in *Advances in Applied Mechanics*, Vol. 20., C.-S. Yih, Ed. Michigan: Elsevier, 1980, pp. 135–174.
- [38] Ю. Бирзвалк, *Основы теории и расчёта кондукционных МГД-насосов постоянного тока*. Рига: Зинатне, 1968.
- [39] И. М. Толмач and Е. И. Янговский, *Магнетогидродинамические генераторы*.

- Москва: Наука, 1972.
- [40] Ситтиг, *Наприй, его производство, свойства и применение*. Москва: Госатомиздат, 1961.
- [41] С. Н. Hansen, “Fundamentals of acoustics,” 1951.
- [42] A. T. A. M. De Waele, “Basic operation of cryocoolers and related thermal machines,” *J. Low Temp. Phys.*, vol. 164, no. 5–6, pp. 179–236, 2011, doi: 10.1007/s10909-011-0373-x.
- [43] Gregory W. Swift, *Thermoacoustics A Unifying Perspective for Some Engines and Refrigerators, Second Edition*. 2018.
- [44] М.-Х. Francois *et al.*, “The SpaceTRIPS project: Space thermoacoustic radioisotopic power system,” in *Proceedings of 23rd Conference of the Italian Association of Aeronautics and Astronautics AIDAA2015*, 2015, pp. 17–19.
- [45] A. Brėķis, J. E. Freibergs, and A. Alemany, “Space thermo acoustic radio-isotopic power system: Space trips,” *Magneto hydrodynamics*, vol. 55, no. 1–2, pp. 5–14, 2019, doi: 10.22364/mhd.55.1-2.1.
- [46] G. Benvenuto and G. Bisio, “Thermoacoustic systems, Stirling engines and pulse-tube refrigerators: analogies and differences in the light of generalized thermodynamics,” in *Proceedings of the 24th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, 1989, pp. 2413–2418 vol.5, doi: 10.1109/IECEC.1989.74812.
- [47] A. Brėķis, “Teramoakustiskā maiņstrāvas magneto hidrodinamiskā ģeneratora teorētiskā un eksperimentālā izpēte, Maģistra darbs,” RTU, 2017.
- [48] K. de Blok, “Two-sensor method for thermoacoustic power measurements,” 2013. <http://www.aster-thermoacoustics.com/wp-content/uploads/2013/07/Measuring-acoustic-power.pdf>.
- [49] A. Alemany, A. Krauze, and M. Al Radi, “Thermo acoustic - MHD electrical generator,” *Energy Procedia*, vol. 6, pp. 92–100, 2011, doi: 10.1016/j.egypro.2011.05.011.
- [50] О. А. Лиелаусис, *Гидродинамика жидкометаллических МГД-устройств*. Рига: Зинатне, 1967.
- [51] А. В. Тананаев, *Гидравлика МГД машин*. Москва: Атомиздат, 1970.
- [52] Я. Я. Лиелпетер, *Жидкометаллические индукционные МГД-машины*. Рига: Зинатне, 1969.
- [53] А. И. Вольдек, *Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом*. 1970.
- [54] Höganäs, “Hoganas: Somaloy ferromagnetic material data sheet,” 2018.

- https://www.hoganas.com/globalassets/download-media/sharepoint/brochures-and-datasheets---all-documents/somaloy_somaloy-3p-material-data_2273hog.pdf.
- [55] “Somaloy, powders for electromagnetic applications.” <https://www.hoganas.com/en/powder-technologies/soft-magnetic-composites/products/coated-powders-for-electromagnetic-applications/>.
- [56] S. M. H. Mirhoseini and A. Alemany, “Analytical study of thermoacoustic MHD generator,” *Magnetohydrodynamics*, vol. 51, no. 3, pp. 519–530, 2015, [Online]. Available: <http://mhd.sal.lv/contents/2015/3/MG.51.3.12.R.html>.
- [57] А. И. Вольдек, *Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом*. Москва: Энергия, 1970.
- [58] A. Gailītis and A. Brēķis, “Equivalent circuit approach for acoustic mhd generator,” *Magnetohydrodynamics*, vol. 56, no. 1, pp. 3–13, 2020, doi: 10.22364/mhd.56.1.1.
- [59] A. Brēķis, J. E. Freibergs, A. Gailītis, and A. Alemany, “New Experimental Results from Testing ‘Space Trips’ Facility of Thermoacoustic System Coupled with Magnetohydrodynamic Generator,” in *Proceedings of the VIII International Scientific Colloquium Modelling for Materials Processing*, Sep. 2017, pp. 107–112, doi: 10.22364/mmp2017.16.
- [60] Д. Шерклиф, *Курс магнитной гидродинамики*. 1967.
- [61] A. Gailītis, *Lekciju konspekts magnetohidrodinamikā*. Rīga: Latvijas Universitāte, 2001.
- [62] T. A. Ltd., “Quickfield ‘Active Field’ tehnoloģijas apraksts.” <https://active.quickfield.com/HTML/Welcome.htm>.
- [63] L. Lavrinoviča, “Promocijas darbs: Bezkontakta sinhrono dzinēju izstrāde un optimizācija izmantošanai mazjaudas elektroiekārtās,” 2014.
- [64] K. Šteiners, *Augstākā matemātika VI*. Rīga: “Zvaigzne,” 2001.
- [65] I. Bucenieks and L. Goldšteins, “Pastāvīgo magnetu sūkņi - Nepārtrauktas vides fizikas laboratorijas darbs.pdf,” Rīga, 2016.
- [66] L. Magone, “Termoakustiskais MHD ģenerators - bakalaura darbs,” Latvijas Universitāte, 2014.
- [67] A. Brekis, A. Alemany, O. Alemany, and A. Montisci, “Space Thermoacoustic Radioisotopic Power System, SpaceTRIPS: The Magnetohydrodynamic Generator,” *Sustainability*, vol. 13, no. 23, 2021, doi: 10.3390/su132313498.
- [68] A. Brēķis, A. Alemany, and J. Freibergs, “Analysis of magnetohydrodynamic generator driven by thermoacoustic engine for deep Space applications,” Nov. 2020, doi: 10.1109/RTUCON51174.2020.9316584.

- [69] М. Кирко И, *Жидкий металл в электромагнитном поле (электронная книга)*. Москва, Ленинград: Энергия, 1964.
- [70] И. М. Кирко *et al.*, *Прикладная магнитная гидродинамика - учебное пособие по теоретическому курсу*. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2007.
- [71] Л. А. Верте, *Магнитная гидродинамика в металлургии*. Москва: "Металлургия," 1975.
- [72] L. Goldsteins, "Promocijas darbs: Experimental and numerical analysis of behaviour of electromagnetic annular linear induction pump," l'Université Grenoble Alpes, Grenoble, 2015.
- [73] "Clay Mathematics Institute - Millenium problems, 'Navier-Stokes equation.'" <https://www.claymath.org/millennium-problems/navier-stokes-equation>.
- [74] S. T. Mirhoseini, "Extrapolation of Electromagnetic Interactions to New Applications," Brussels University of Leuven, 2014.
- [75] Л. Ландау and Е. Лифшиц, *Механика сплошных сред*. Москва: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954.
- [76] Л. Лойцянский, *Механика жидкости и газа*. Москва: Наука, 1978.
- [77] A. Cramer, V. Galindo, and M. Zennaro, "Frequency dependence of an alternating magnetic field driven flow," *Magnetohydrodynamics*, vol. 51, no. 1, pp. 133–148, 2015, doi: 10.22364/mhd.51.1.13.
- [78] V. Dzelme, "Liquid metal stirring by rotating permanent magnets, Numerical modelling using Elmer and OpenFOAM, MHD Modelling School 2019," Riga, 2019.
- [79] P. A. Davidson, *An Introduction to Magnetohydrodynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [80] Davidson, *Introduction to MHD (2017!!! - jāsameklē šī grāmata)*. 2017.
- [81] J. Briedis, I. Dūmiņš, U. Lasis, U. Ratnieks, and K. Tabaks, *Elektrotehnikas teorētiskie pamati*. Rīga: Zvaigzne ABC, 1999.
- [82] A. Brēķis *et al.*, "Experimental investigation of sound parameters in SpaceTrips facility of thermoacoustic-to-MHD energy converter," in *Proceedings of the 11th International PAMIR Conference - Fundamental and Applied MHD*, Jul. 2019, pp. 211–215.
- [83] M. A. G. Timmer, K. de Blok, and T. H. van der Meer, "Review on the conversion of thermoacoustic power into electricity," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 143, no. 2, pp. 841–857, Feb. 2018, doi: 10.1121/1.5023395.
- [84] A. Brēķis, J. E. Freibergs, and A. Alemany, "Initial experimental tests on space trips facility of thermoacoustic-to-mhd energy converter," *Magnetohydrodynamics*, vol. 56,

- no. 2–3, pp. 255–267, 2020, doi: 10.22364/mhd.56.2-3.17.
- [85] Brėķis A *et al.*, “Thermoacoustic MHD generator prototyping and experiments,” in *Proceedings of the 10th International PAMIR Conference - Fundamental and Applied MHD*, Jun. 2016, pp. 606–610.
- [86] D. M. Sun, K. Wang, X. J. Zhang, Y. N. Guo, Y. Xu, and L. M. Qiu, “A traveling-wave thermoacoustic electric generator with a variable electric R-C load,” *Appl. Energy*, vol. 106, pp. 377–382, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.01.051.
- [87] D. M. Sun, K. Wang, L. M. Qiu, B. H. Lai, Y. F. Li, and X. B. Zhang, “Theoretical and experimental investigation of onset characteristics of standing-wave thermoacoustic engines based on thermodynamic analysis,” *Appl. Acoust.*, vol. 81, pp. 50–57, 2014, doi: 10.1016/j.apacoust.2014.02.002.
- [88] Z. Wu, L. Zhang, W. Dai, and E. Luo, “Investigation on a 1kW traveling-wave thermoacoustic electrical generator,” *Appl. Energy*, vol. 124, pp. 140–147, 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.02.063.
- [89] Z. Wu, G. Yu, L. Zhang, W. Dai, and E. Luo, “Development of a 3kW double-acting thermoacoustic Stirling electric generator,” *Appl. Energy*, vol. 136, pp. 866–872, 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.04.105.
- [90] P. Vieweg, Y. Kolesnikov, and C. Karcher, “EXPERIMENTAL STUDY OF A LIQUID METAL FILM FLOW IN A STREAMWISE MAGNETIC FIELD,” in *Proceedings of the 10th international conference “Electromagnetic Processing of Materials 2021,”* 2021, pp. 150–154.
- [91] Y. Kolesnikov, D. Krasnov, and T. Boeck, “Evolution of a round jet in a duct in the presence of a uniform axial magnetic field,” *Magnetohydrodynamics*, vol. 53, no. 1, pp. 119–127, 2017, doi: 10.22364/mhd.53.1.13.
- [92] M. Faraday, “On a Peculiar Class of Acoustical Figures; and on Certain Forms Assumed by Groups of Particles upon Vibrating Elastic Surfaces,” *Philos. Trans. R. Soc. London*, vol. 121, pp. 299–340, Jan. 1831, [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/107936>.
- [93] X. Zhao, J. Tang, and J. Liu, “Electrically switchable surface waves and bouncing droplets excited on a liquid metal bath,” *Phys. Rev. Fluids*, vol. 3, no. 12, pp. 1–14, 2018, doi: 10.1103/PhysRevFluids.3.124804.
- [94] Л. Ландау and Е. Лифшиц, *Теоретическая физика, Том I, Механика*. Москва: Наука, 1988.
- [95] Е. М. Лифшиц and Л. П. Питаевский, *Теоретическая физика, Том X, Физическая*

Кинетика. Москва: Наука, 1979.

- [96] H. W. Müller, H. Wittmer, C. Wagner, J. Albers, and K. Knorr, “Analytic stability theory for faraday waves and the observation of the harmonic surface response,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 78, no. 12, pp. 2357–2360, 1997, doi: 10.1103/PhysRevLett.78.2357.
- [97] V. V. Mekhonoshin and A. Lange, “Faraday instability on viscous ferrofluids in a horizontal magnetic field: Oblique rolls of arbitrary orientation,” *Phys. Rev. E - Stat. Physics, Plasmas, Fluids, Relat. Interdiscip. Top.*, vol. 65, no. 6, Jun. 2002, doi: 10.1103/PhysRevE.65.061509.



Artūrs Brēķis dzimis 1992. gadā Rīgā. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvis bakalaura grādu enerģētikā (2014), elektroinženiera kvalifikāciju (2016; ar izcilību), kā arī profesionālo maģistra grādu elektrotehnoloģiju datorvadībā (2017). Vairākkārtējs "Latvenergo" un Latvijas Elektroenerģētiķu un energobūvnieku asociācijas (LEEA) studiju darbu konkursu laureāts, 2017. gadā iekļauts RTU Zelta fondā. Kopš 2015. gada strādā Latvijas Universitātes Fizikas institūtā (LU FI), sākotnēji par zinātnisko asistentu, kopš 2017. gada – LU FI Magnētiskās hidromehānikas laboratorijas pētnieks. 2016. gadā stažējies Sardīnijas Energopētniecības laboratorijā "*Sardegna Ricerche*", Itālijā. Paralēli zinātniskajam darbam Latvijas Universitātē kopš 2021. gada veic pedagoģisko darbu RTU Elektrisko mašīnu un aparātu katedrā, docējot elektrodinamikas pamatus. Zinātniskās intereses saistītas ar kosmosa tehnoloģijām, magnetohidrodinamiku, šķidriem metāliem un termoakustiku.