



RĪGAS TEHNISKĀ  
UNIVERSITĀTE

Ilgvars Gorņevs

# CILVĒKA ENERĢIJAS IEVĀCĒJS KĀ PRAKTISKI IZMANTOJAMS BAROŠANAS AVOTS ELEKTRONISKĀM IERĪCĒM

Promocijas darbs



# RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultāte  
Fotonikas, elektronikas un elektronisko sakaru institūts

**Ilgvars Gorņevs**

Doktora studiju programmas "Elektronika" doktorants

## CILVĒKA ENERĢIJAS IEVĀCĒJS KĀ PRAKTISKI IZMANTOJAMS BAROŠANAS AVOTS ELEKTRONISKĀM IERĪCĒM

Promocijas darbs

Zinātniskie vadītāji  
profesors *Dr. phys.*

JURIS BLŪMS

profesors *Dr. sc. ing.*

DMITRIJS PIKUĻINS

Rīga 2024

Gorņevs, I. Cilvēka enerģijas ievācējs kā praktiski izmantojams barošanas avots elektroniskām ierīcēm. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība, 2024. 168 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-08” 2024. gada 23. februāra lēmumu, protokols Nr. 29.

NACIONĀLAIS  
ATTĪSTĪBAS  
PLĀNS 2020



**EIROPAS SAVIENĪBA**

Eiropas Sociālais  
fonds

---

I E G U L D Ī J U M S T A V Ā N Ā K O T N Ē

Promocijas darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda “Rīgas Tehniskās universitātes akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās” Nr. 8.2.2.0/18/A/017 daļēju atbalstu.

# PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2024. gada 24. maijā plkst. 15 Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultātē, Āzenes ielā 12, 201. auditorijā.

## OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors Dr.sc.ing. Artūrs Āboltiņš,  
Rīgas Tehniskā universitāte

Vadošais pētnieks Dr.sc.comp. Atis Elsts,  
Elektronikas un datorzinātņu institūts, Latvija

Asociētais profesors Ph.D. Kai Yang,  
Huazhong Zinātnes un tehnoloģijas universitāte, Ķīna

## APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Ilgvars Gorņevs ..... (paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, piecas nodaļas, nobeigums ar rezultātiem un secinājumiem, literatūras saraksts, 99 attēli, septiņas tabulas, pieci pielikumi, kopā 168 lappuses, ieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 133 nosaukumi.

## ANOTĀCIJA

Promocijas darbā pētīta elektroenerģijas iegūšana no neviļus notiekošām cilvēka kustībām — enerģijas ievākšana. Darbā izdalīti atsevišķi posmi, pētot īstenojamā barošanas avota sastāvdaļas un vadoties pēc to savstarpējas saderības. Izraudzīts elektromagnētiskais ģenerēšanas princips, tam raksturota konkrētas konstrukcijas ievācēja darbība, noteikti priekšnosacījumi sprieguma paaugstināšanai līdz izmantojamam līmenim, un piedāvāta metode tā taisngriešanas posma optimizācijai. Beigās praktiski apvienoti iepriekšējo nodaļu rezultāti un gūtās atziņas, lai pilnveidotu un eksperimentāli novērtētu iegūtā mazjaudas barošanas avota veiktspēju. Tai skaitā pārbaudīta hibrīdā enerģijas ievācēja izveide, uzlabojot atsevišķus darbības parametrus, kas nav bijis paveicams ar konkrētā elektromagnētiskā ievācēja individuāliem uzlabojumiem. Praktiskas izmantošanas novērtēšanai izveidota vides parametru mērīšanas sistēma, kas ar atbilstošu algoritmu pielāgo savu patēriņu mainīgas pieejamās elektroenerģijas apstākļiem.

Darbā ir 168 lappuses, 99 attēli, 7 tabulas, 133 izmantotie literatūras avoti.

## **ABSTRACT**

In the doctoral thesis, the generation of electrical energy from involuntary human movements, known as energy harvesting, is researched. The work studies the individual components of the implementable power source, guiding the research based on their mutual compatibility. The electromagnetic generation principle has been selected, the operation of a harvester of a specific design has been characterized, the prerequisites for boosting the voltage to a usable level have been determined, and a method for the optimization of its rectification stage has been proposed. Finally, the insights and results of the research are practically combined to improve the performance of the created low-power source and evaluate it experimentally. Among them, the creation of a hybrid energy harvester was tested by improving individual operating parameters, which could not be achieved with individual improvements of the given electromagnetic harvester. A system for measuring environmental parameters has been created for the evaluation of practical use of the obtained power source, the system adjusts its consumption to accommodate the variable available electrical energy.

The thesis contains 168 pages, 99 figures, 7 tables and 133 references.

## SAĪSINĀJUMI

EDS — elektrodzinējspēks;

*MEMS* — mikroelektromehāniska sistēma (angļu val. — *Micro-Electromechanical Systems*);

MOP — metāla-oksīda-pusvadītāja (lauktranzistors);

*RMS* — vidējais kvadrātiskais (lielums) (angļu val. — *Root-Mean-Square*);

*SPICE* — datorsimulācijas programma elektriskajām ķēdēm (angļu val. — *Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*)

EM — elektromagnētisks;

TE — termoelektrisks;

ACP — analogciparu pārveidotājs;

# SATURS

Saīsinājumi .....	6
Ievads .....	9
1. Enerģijas ievākšanas un izmantošanas iespējas .....	15
1.1. Kustību enerģijas ievācēju tehnoloģijas.....	15
1.2. Elektromagnētiskā principa kustību enerģijas ievācēju piemēri cilvēka kustībām .....	16
1.2.1. Konstrukciju paraugi.....	16
1.2.2. Apvienošana hibrīdajā slēgumā .....	23
1.2.3. Apkopojums .....	26
1.3. Elektriskie pārveidotāji zemsprieguma avotiem .....	27
1.4. Zemas elektroenerģijas izmantošanas iespējas un izaicinājumi .....	37
1.5. Kopsavilkums .....	44
2. Elektromagnētiskais kustību enerģijas ievācējs .....	46
2.1. Matemātiskais modelis .....	46
2.2. Praktiska ievācēja pārbaude.....	48
2.3. Zemsprieguma taisngriešana .....	50
2.3.1. Pasīva taisngriešana ar MOP lauktranzistoru .....	50
2.3.2. Taisngriešana ar Šotki pārejas diožu tiltu .....	57
2.4. Kopsavilkums .....	59
3. Pašrezonanses pārveidotāju darbības analīze un efektivitātes novērtēšana ar elektromagnētisko enerģijas ievācēju kā avotu .....	61
3.1. Elektroenerģijas pārveidotāju raksturlielumi .....	61
3.2. Kontrolēto apstākļu eksperiments.....	66
3.2.1. Eksperimenta gaita.....	66
3.2.2. Elektriskā shēma .....	67
3.2.3. Rezultāti .....	69
3.3. Reālu darbības apstākļu eksperimenta gaita un rezultāti .....	73
3.4. Kopējais rezultātu novērtējums .....	76
3.5. Kopsavilkums .....	79
4. Taisngriešanas posma optimizācija ar gludinošā filtra kapacitāti .....	81
4.1. Stacionāra signāla analīze .....	81
4.2. Īsa signāla analīze pilnā tilta slēgumam.....	85
4.2.1. Analītiskais modelis.....	85



4.2.2. Modeļa pārbaude datora simulācijas vidē.....	95
4.3. Īsa signāla analīze sprieguma reizinātāja slēgumam.....	101
4.4. Kapacitātes ietekmes eksperimentālā pārbaude.....	106
4.4.1. Tilta slēguma pārbaude.....	106
4.4.2. Reizinātāja slēguma pārbaude.....	108
4.5. Kopsavilkums.....	111
5. Mazjaudas barošanas avota un no ārējiem avotiem neatkarīgas datu mērīšanas sistēmas izveide.....	113
5.1. Enerģijas ievākšanas snieguma uzlabojumi.....	113
5.1.1. Dažādi taisngriežu slēgumi un kapacitātes optimizācija.....	113
5.1.2. Enerģijas ievācēju apvienošana.....	121
5.2. Zema patēriņa datu mērīšanas un nosūtīšanas sistēma.....	129
5.2.1. Slēguma un komponentu izvēle.....	129
5.2.2. Atsevišķu funkciju patēriņa novērtējums.....	132
5.2.3. Darbības algoritms ierobežotai elektroenerģijai.....	134
5.3. Sistēmas eksperimentālā pārbaude un rezultāti.....	137
5.4. Kopsavilkums.....	142
Nobeigums.....	144
Izmantotās literatūras saraksts.....	146
Pielikumi.....	155
1. pielikums.....	156
2. pielikums.....	160
3. pielikums.....	163
4. pielikums.....	166
5. pielikums.....	168

## IEVADS

Pēdējo dekadžu laikā elektronikas izmēru samazināšanās portatīvās iekārtas ir padarījusi par ikdienas sastāvdaļu, to funkcionalitāte pilnveidojusies un dažādojusies, izmainot arī cilvēku paradumus. Apvienojot vairākas viedierīces savstarpējā tīklā, radās lietu internets (angļu val. — *Internet of Things*), kur šīs “lietas” — ierīces — ir spējīgas ievākt informāciju ar sensoru palīdzību, apstrādāt, dalīties ar to un pat ietekmēt dažādus procesus, tādējādi apgādājot cilvēku ar detalizētu un plašu informāciju, kā arī sniedzot dažādas notiekošā kontroles iespējas. Ir izveidojušies un strauji attīstījušies risinājumi, kas paredzēti, lai atvieglotu, uzlabotu un pat pilnībā automatizētu procesus visdažādākajās jomās, piemēram, loģistikā, drošībā, veselības aprūpē, industriālo procesu un vides uzraudzībā [1]–[4]. Pieaugot atsevišķo ierīču skaitam, arvien aktuālāks kļūst elektrobarošanas izaicinājums, jo bateriju attīstība iepaliek viedierīču enerģijas prasībām joprojām augošajā uzdevumu dažādībā [5]–[7]. Nodrošināt uzticamu barošanu ir īpaši svarīgi ierīcēm, kas rūpējas par drošības un veselības uzturēšanu, piemēram, elektroniskajām slēdzenēm [8], [9] un ārkārtas medicīniskās palīdzības sistēmām [10].

Regulāra bateriju nomaiņa vai akumulatoru uzlāde ir resursus prasoša, tālab izdevīgāk ir pēc iespējas retāk apkopt daudzējādās viedierīces, padarot tās mazāk atkarīgas no regulārās uzlādes vai bateriju nomaiņas, izcilā gadījumā sasniedzot to pilnīgi pašpietiekamu darbību. Šim nolūkam nepieciešams ierīci pieslēgt pie ārēja enerģijas avota tā, lai netiktu ierobežota tās izmantošana. Pētnieki piedāvā dažādus risinājumus, kuros konkrētās ierīces, teiksim, sensormezgla, barošanai tiktu piesaistīts atsevišķs mazs ģenerators, kas pārveido elektroenerģijā, piemēram, apkārtējās gaismas [11] vai vibrāciju [12] enerģiju. Ja runā par cilvēku kā pētāmo objektu, tad viņam pašam ir jākalpo par šo sistēmu enerģijas avotu. Protams, jāsaprot, ka vienkārši likt cilvēkam darbināt ģeneratoru ir nelietderīgi, jo tas ir fiziski apgrūtinājoši, tamdēļ jācenšas izmantot tādas metodes, kas cilvēkam nebūs jūtamas un netraucēs ikdienas gaitām. Tās dēvē par enerģijas ievākšanu jeb enerģijas atlikumu savākšanu (angļu val. — *energy harvesting, energy scavenging*), to pamatā ir ideja „savākt enerģiju” no procesiem un parādībām, kas jau notiek, un būtiski neiejaukties to ritējumā. Bez šaubām, iegūstot elektrobarošanas sistēmu, kas papildina sensoru sistēmas darbības mūžu, tajā pašā laikā neradot būtisku apgrūtinājumu cilvēka ikdienas gaitām, šādu ierīču ilgstoša lietošana sagādātu mazāk neērtību. Tādā veidā pieaugtu individuālo veselības uzraudzības sistēmu izplatība un dažādība, potenciāli nodrošinot augstākas detalizētības līmeni informācijai par personas veselības stāvokli un to ietekmējošajiem faktoriem.

Enerģijas avotus ievākšanai var raksturot pēc iespējām to darbību kontrolēt un paredzēt [13]. Kā vispieejamākos un acīmredzamākos cilvēka enerģijas veidus var nosaukt siltuma un mehānisko enerģiju. Siltums ir cilvēka vielmaiņas nemainīgs blakusprodukts, kas caur ādas virsmu nonāk apkārtējā vidē, tātad tas ir vairāk paredzams, toties mehāniskā enerģija ir vairāk kontrolējama un izpaužas ļoti dažādos veidos: gan kā apzinātas kustības (iešana, priekšmeta pacelšana), gan neapzinātas (krūškurvja izplešanās elpojot, rokas atvēziens soļojot, pēdas trieciens pret zemi). Siltuma enerģijas iegūšana ir atkarīga no apkārtējās vides temperatūras, jo nepieciešama temperatūru starpība [14] vai relatīvā izmaiņa [15] elektroenerģijas plūsmas radīšanai, toties mehāniskās enerģijas izpausmēm apkārtējā vide sniedz minimālus

ierobežojumus un var izvēlēties starp dažādiem kustību avotiem [2], [16], [17]. Lai gan minēto variantu klāsts šķiet plašs, aktuālo izvēli var ierobežot ne vien lietotāja ērtums, bet arī iegūstamās elektriskās jaudas un enerģijas apjoms, kas pārsvarā ir samērā mazs, tālab var būt nepietiekams vēlamajam patērētājam. Protams, ierīces patēriņu var arī samazināt, piemēram, ar tās uzdevumu klāsta ierobežošanu un arvien efektīvāku komponentu izmantošanu, toties praktiski lietderīgai enerģijas ievācēju un funkcionējošo ierīču kopdarbībai var būt nepieciešams algoritms, kas ņems vērā tieši konkrētā barošana avota iespējas un ierobežojumus [7].

**Promocijas darba tēmas aktualitāte** ir saistīta ar izaicinājumiem izmantot cilvēka enerģijas ievākšanu kā praktisku, reālos apstākļos lietojamu barošanas avotu. Lai gan enerģijas ievākšana ir plaši pētīta, tai ne vienmēr ir rasts pielietojums mazjaudas iekārtu elektrobarošanai. Tas var būt saistīts ar nepietiekamu ģenerēto enerģiju vai grūtībām to uzkrāt un nodrošināt stabilu darbību, kā arī problēmām, kas saistītas ar enerģijas ievācēju iekļaušanu ikdienā izmantojamos aksesuāros un apģērbā. Iegūstot risinājumus elektroenerģijas avotiem no cilvēka enerģijas, būtu iespējams nodrošināt augstāku izplatību integrētām sensoru sistēmām dažādos ikdienas apģērbos un aksesuāros, kas veic vides un cilvēka veselības parametru uzraudzību, padarot šo praksi par plaši izmantojamu un tālab viegli pieejamu.

Lai veiksmīgi apvienotu enerģijas ievācējus ar viedierīcēm, nepieciešami vairāki starpposmi, kas savstarpēji sadarbojas, jo ir jānodrošina ne tikai ģenerators izejas jaudas, bet arī elektriskā sprieguma pielāgošana patērētājam, savukārt tam jābūt spējīgam darboties ar ievācēja ierobežoto enerģijas pieejamību. Lielākā daļa pētījumu balstās atsevišķos starpposmos, un tā rezultātā iegūtās atziņas var nebūt savietojamas vienotas sistēmas izveidei. Veicot šo posmu izpēti secīgi, būs iespējams skaidrāk noteikt esošās iespējas un robežas, kā arī izšķirt nepieciešamos soļus turpmākajiem pētījumiem vienotas enerģijas ievācēja un patērētāja sistēmas izveidei.

Apkopojot iepriekš minētos faktus, tika izvirzīts **promocijas darba mērķis** — izpētīt cilvēka kustību enerģijas ievākšanu praktiski lietojama elektroenerģijas avota izveidei mazjaudas elektronikas sistēmām, apskatot atsevišķus tā izstrādes posmus un izmantojot plašpatēriņa elementus.

Izvirzītā mērķa sasniegšanai noteikti šādi **pamatuzdevumi**:

1. Apkopot un novērtēt publicētos kustību enerģijas ievākšanas, pārveidošanas un izmantošanas risinājumus, nosakot to priekšrocības un trūkumus.
2. Raksturot neinerčiāla elektromagnētiskā kustību enerģijas ievācēja darbības parametrus.
3. Apzināt elektromagnētiskā kustību enerģijas ievācēja maiņsprieguma taisngriešanas iespējas.
4. Pārbaudīt komerciāli pieejamu zema līdzsprieguma pārveidotāju lietošanu ar elektromagnētiskā kustību enerģijas ievācēja taisngrieztu signālu.
5. Novērtēt elektroenerģijas iegūšanas ierobežojošos apstākļus un piedāvāt praktiskus risinājumus.
6. Izstrādāt uzkrāto enerģiju uzraugošu algoritmu no plašpatēriņa elementiem veidotai elektroniskai vides vai cilvēka fizioloģisko parametru mērīšanas sistēmai.

7. Praktiski pārbaudīt iegūtā cilvēka enerģijas ievācēja lietošanu elektroniskās sistēmas barošanā.

Promocijas darba **praktiskā nozīmība un zinātniskā novitāte:**

1. Neinerciālam elektromagnētiskajam cilvēka kustību enerģijas ievācējam raksturota tā izejas enerģijas atkarība no uzbūves parametriem.
2. Praktiski apzināti ieguvumi un trūkumi zema maiņsprieguma taisngriešanai ar MOP lauktranzistoru, kuram pievadīts nemainīgs aizvara spriegums.
3. Noteikti priekšnosacījumi pašstartējošo (angļu val. — *self-starting*) zema līdzsprieguma pārveidotāju izmantošanai ar elektromagnētisko cilvēka kustību enerģijas ievācēju.
4. Izstrādāts analītiskais modelis pilnā tilta taisngrieža gludinošās kapacitātes ietekmes novērtējumam uz iegūto spriegumu pirmajiem impulsiem pārtraukta ieejas signāla gadījumā.
5. Taisngriešanai lietojot sprieguma divkāršotāja un pilnā tilta slēgumu, eksperimentāli apstiprināta gludinošās kapacitātes ietekme uz iegūtā signāla vērtību un zemsprieguma pārveidotāja produktivitāti pie nepastāvīga ieejas signāla, ko izraisa reālu cilvēka kustību radītās ievācēja ģenerācijas izmaiņas.
6. Eksperimentāli nodemonstrēta kustību un termoelektriskā enerģijas ievācēja konstruktīva elektriskā mijiedarbība un novērtēts praktiskais apvienošanas ieguvums, izmantojot atsevišķus zemsprieguma pārveidotājus ar kopēju elektroenerģijas uzkrāšanas elementu.
7. Izstrādāts darbības algoritms ar plašpatēriņa komponentēm izveidotai vides parametru mērīšanas iekārtai, kas vadās pēc pieejamās elektroenerģijas, barošanas sprieguma un sava patēriņa, lai mainīgas ģenerācijas apstākļos nodrošinātu nepārtrauktu un pilnvērtīgu funkciju izpildi un barošanas sprieguma kontroli.
8. Izveidotā un uzlabotā cilvēka enerģijas ievākšanas sistēma pārbaudīta ar vides parametru mērīšanas iekārtu reālistiskos, kontrolētos apstākļos, pierādot kopējās sistēmas neatkarīgu darbību, un ļaujot novērtēt veikto izstrādes soļu pamatotību.

**Aizstāvamās tēzes:**

1. Lai zema līdzsprieguma pārveidotājs slogotu kustību enerģijas ievācēju un diožu taisngriezi atbilstoši sev efektīvākam darba punktam, tā ieejas pretestībai un lietderībai jābūt vienādi atkarīgai no ieejas sprieguma sagaidāmajā vērtību diapazonā, kur taisngrieztajam spriegumam prioritāra ir augstāka vērtība iekritumu laikā nevis atsevišķi impulsu pīķa vai vidējā vērtība.
2. Īsu, pārtrauktu maiņsprieguma signālu gadījumā taisngriežu slēgumu lielākā veiktspēja pastāv pie noteiktas filtrējošās kapacitātes, kas apskatītajās shēmu kombinācijās nodrošina līdz 10 % augstāku taisngrieztā sprieguma vidējo kvadrātisko vērtību.
3. Kombinētajam kustību un siltuma enerģijas ievācējam, izmantojot katram ģeneratoram individuāli pielāgotu zemsprieguma pārveidotāju un kopīgu uzkrājošo elementu, var nodrošināt to konstruktīvu mijiedarbību, kas palielina enerģijas plūsmas vērtību un samazina tās izkliedi no 16 % elektromagnētiskajam atsevišķi līdz 3 %.

Pētījuma izstrādes laikā rezultāti prezentēti septiņās starptautiskās zinātniskajās konferencēs:

1. 11th European Conference on Renewable Energy Systems (ECRES 2023), Latvija, Rīga, 18.–20. maijs, 2023, ar ziņojumu “Enhancing the Performance of Human Motion Energy Harvesting through Optimal Smoothing Capacity in the Rectifier” (Gorņevs, I., Blūms, J.).
2. 7th European Conference on Renewable Energy Systems (ECRES 2019), Spānija, Madride, 10.–12. jūnijs 2019, ar ziņojumu “Towards the Creation of Fully Autonomous Wearable System for Subject’s Microclimate Measurement and Data Transmission” (Blums J., Gorņevs I., Jurkāns V.).
3. 16th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC 2018), Igaunija, Tallina, 8.–10. oktobris, 2018, ar ziņojumu “Performance Analysis of Low Voltage Converters for Completely Integrable Wearable Human Motion Energy Harvester” (Gorņevs, I., Blūms, J., Jurkāns, V.).
4. 16th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC 2018), Igaunija, Tallina, 8.–10. oktobris, 2018, ar ziņojumu “Harvesting Electrical Power from Body Heat Using Low Voltage Step-up Converters with Thermoelectric Generators” (Jurkāns, V., Blūms, J., Gorņevs, I.).
5. 3rd Renewable Energy Sources, Research and Business (RESRB 2018), Beļģija, 18.–20. jūnijs, 2018, ar ziņojumu “Energy Generation and Accumulation by Fully Integrated Human Motion Energy Harvester” (J. Blums, I. Gorņevs, V. Jurkāns).
6. 9th International Symposium on Flexible Organic Electronics (ISFOE16), Grieķija, 4.–7. jūlijs, 2016, ar ziņojumu “Human Motion Energy Harvesters for Wearables” (Blūms, J., Terļeckā, G., Gorņevs, I., Viļumsone, A).
7. International Conference of Young Scientists on Energy Issues, Lietuva, Kauņa, 29.–31. maijs, 2013, ar ziņojumu “Investigation of Electromagnetic Harvester with Flat Structure and Low Voltage Rectifier” (Gorņevs, I., Blūms, J.).

Promocijas darba izstrādes posmu pētījumi atspoguļoti dažādos zinātniskos izdevumos:

1. **Gorņevs, I.**; Blūms, J. “Enhancing the Performance of Human Motion Energy Harvesting through Optimal Smoothing Capacity in the Rectifier”. *Sustainability* 2023, 15, 13564. Pieejams: doi: 10.3390/su151813564, SCOPUS.
2. **Gorņevs, I.**, Jurkāns, V., Blūms, J. “Development of Wearable Multiple Source Energy-Harvesting System for Smart Clothing”, *IEEE Access*. Pieejams: doi: 10.1109/ACCESS.2023.3313559, SCOPUS.
3. Blūms, J., **Gorņevs, I.**, Terļeckā, G., Jurkāns, V., Viļumsone, A. “Wearable Human Motion and Heat Energy Harvesting System with Power Management”, no *Energy Harvesting*, R. Manyala, Red., London, UK: InTech, 2018, 21.–40. lpp., ISBN 978-953-51-5992-6. Pieejams: doi: 10.5772/intechopen.74417.
4. Jurkāns, V., Blūms, J., **Gorņevs, I.** “Harvesting Electrical Power from Body Heat Using Low Voltage Step-up Converters with Thermoelectric Generators”. No: *2018 16th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC): Proceedings*, Igaunija, Tallina, 8.–10. oktobris, 2018, 94.–97. lpp., ISBN 978-153867312-6. ISSN 1736-3705. Pieejams: IEEE Xplore, doi:10.1109/BEC.2018.8600958, SCOPUS.

5. **Gorņevs, I.**, Blūms, J., Jurkāns, V. “Performance Analysis of Low Voltage Converters for Completely Integrable Wearable Human Motion Energy Harvester”. No: *2018 16th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC): Proceedings*, Igaunija, Tallina, 8.–10. oktobris, 2018, 90.–93. lpp. ISBN 978-1-5386-7313-3. e-ISBN 978-1-5386-7312-6. ISSN 1736-3705. e-ISSN 2382-820X. Pieejams: IEEE Xplore, doi:10.1109/BEC.2018.8600954, SCOPUS.
6. Blūms, J., Terļecka, G., **Gorņevs, I.**, Viļumsone, A. “Flat Inductors for Human Motion Energy Harvesting”. *SPIE Proceedings*, 2013, Vol.8763: Smart Sensors, Actuators, and MEMS VI, 876311.-876318.lpp. ISSN 0277-786X. Pieejams: doi:10.1117/12.2016995, SCOPUS.
7. **Gorņevs, I.**, Blūms, J. “Investigation of Electromagnetic Harvester with Flat Structure and Low Voltage Rectifier”. No: *10th International Conference of Young Scientists on Energy Issues (CYSENI 2013): Conference Proceedings*, Lietuva, Kauņa, 29.–31. maijs, 2013, 206.–213. lpp. ISSN 1822-7554.

Autora personīgais ieguldījums publikācijās:

- 1., 5., un 7. publikācijā autors uzņēmās pētījuma idejas izvirzīšanu un īstenošanu, veica literatūras pārskatu, plānoja un veica eksperimentus, apstrādāja datus un veica rezultātu interpretāciju un analīzi, kā arī definēja secinājumus. Publikāciju izveidē un dažādu pētījuma posmu realizācijā ieguldījumu sniedza visi līdzautori, iesaistoties pētījuma plāna apspriešanā un rezultātu analīzē, kā arī palīdzot veikt mērījumus.
- 2. publikācijā autors veica atsevišķu pētījuma daļu izstrādi un palīdzēja kopējās idejas izvirzīšanā, eksperimentālo mērījumu plānošanā un realizācijā. Nodrošināja kopējo datu apstrādi, interpretāciju un vizualizāciju, raksturoja metodes un rezultātus, kā arī definēja galvenos secinājumus. Autors izstrādāja būtisku publikācijas teksta daļu.
- 3. publikācijā autors veica atsevišķu pētījuma daļu izstrādi un palīdzēja kopējās idejas izvirzīšanā, eksperimentālo mērījumu plānošanā un realizācijā. Veica daļēju datu apstrādi, interpretāciju un vizualizāciju, kā arī palīdzēja kopējo secinājumu definēšanā. Autors palīdzēja saturiskā izklāsta veidošanā.
- 6. publikācijā autors palīdzēja teorētiskā pamatojuma un pētījuma plāna izveidošanā, kā arī mērījumu veikšanā, veica daļēju datu apstrādi un analīzi, kā arī sniedza ieguldījumu teksta gala versijas tapšanā.
- 4. publikācijā autors piedalījās pētījuma plāna, metožu un rezultātu apspriešanā, palīdzēja veikt mērījumus un iegūto rezultātu interpretāciju.

Iegūts Latvijas patents “Energētiski neatkarīga elektroniskā sistēma un paņēmieni cilvēka un/vai vides parametru noteikšanai un komunikācijai” (LV15580B, 20.12.2021), Juris Blūms, Ilgvars Gorņevs, Vilnis Jurkāns, Gaļina Terļecka.

Dažādi darba pētījumu posmi noritēja, piedaloties Eiropas Reģionālās attīstības fondu projektos: “Nanolīmenī modificētu tekstiliju virsmu pārklājumu sintēze un enerģētiski neatkarīgas mērīšanas sistēmas integrācija viedapģērbā ar medicīnisko novērojumu funkcijām”, kurā autors strādāja pie kustību enerģijas ievākšanas uzlabojumiem; “Hibrīdās enerģijas ieguves sistēmas”, kurā autors līdzdarbojās triboelektrisko generatoru elektriskā

snieguma izpētē [18]–[21], kā rezultātā tapa atziņas par konkrētā enerģijas ievākšanas veida izmantošanas ierobežojumiem promocijas darba pētījuma mērķiem.

Promocijas darbs ietver ievadu, piecas nodaļas, nobeigumu un pielikumus. Pirmajā nodaļā sniegts ieskats dažādās publicētajās cilvēka kustību enerģijas ievākšanas tehnoloģijās un to apvienošanas piemēros, kā arī izvērtēti zema sprieguma paaugstināšanas pārveidotāji un iespējas izmantot iegūto elektroenerģiju. Otrajā nodaļā analizēts darbā izmantotais kustību enerģijas ievācējs, tam piedāvāts vienkāršots matemātiskais modelis, kā arī praktiski apzināta ģenerētā sprieguma taisngriešana. Nodaļa balstīta autora pētījumos, kas publicēti [22]–[24]. Trešajā nodaļā praktiski novērtēti konkrēta darbības principa pārveidotāji zema sprieguma paaugstināšanai, sniegts to salīdzinājums kontrolētos un reālistiskos darba apstākļos, nosakot priekšnosacījumus izmantošanai ar doto avotu, nodaļa balstīta autora raksta [25] rezultātos. Ceturtajā nodaļā piedāvāts un praktiski pārbaudīts matemātiskais modelis taisngrieža filtrējošās kapacitātes ietekmes raksturošanai dotā ģenerētā signāla gadījumā, kā arī efekts apstiprināts sprieguma divkāršotāja slēgumam. Nodaļas galvenie rezultāti publicēti [26]. Piektā nodaļa veltīta praktiska barošanas avota un patērētāja izveidei, apvienojot darbā apzinātos elektriskā snieguma uzlabojumus un atziņas, kā arī darbības novērtējumam kontrolētos, bet realitātei pietuvinātos cilvēka kustību apstākļos. Nodaļa balstīta autora rakstos [24], [26]–[28]. Nobeigumā apkopoti promocijas darba galvenie rezultāti un secinājumi.

# 1. ENERĢIJAS IEVĀKŠANAS UN IZMANTOŠANAS IESPĒJAS

## 1.1. Kustību enerģijas ievācēju tehnoloģijas

Cilvēks ir būtiskas mehāniskās enerģijas avots, protams, izmantojot to tiešā veidā, tiks apgrūtinātas kustības, kas ir nevēlami, tālab nodaļā apskatītas publicētās iespējas iegūt elektroenerģiju no neviļus notiekošajām kustībām — enerģijas ievākšana. Dažādos principus, ar kuru palīdzību šo mehānisko enerģiju pārveidot elektriskajā, var iedalīt pēc izmantotā fizikālā efekta: pjezoelektriskais, elektromagnētiskais, elektrostatiskais un triboelektriskais pārveidošanas veids. Pjezoelektriskie mehāniskās enerģijas ievācēji ir realizēti, iespējams, visplašākajā kustību enerģijas ievācēju klāstā, elektromagnētiskie ir nedaudz senāki un arī izplatīti sava labi izpētītā efekta un salīdzinoši vienkāršās realizācijas dēļ, elektrostatiskie ir ērtāk ražojami mazos izmēros ar automatizētiem procesiem, bet triboelektriskie uzrāda ļoti cerīgas jaudas blīvuma vērtības un var izmantot dažādu fizisko īpašību materiālus.

Elektrostatiskie ievācēji pārsvarā ir mehāniski sarežģīti, turklāt prasa rūpīgu uzlādes un izlādes kontroli un ārēju barošanas avotu. Tiecoties pēc augstākas enerģijas, tiem jāpalielina kapacitāte un darba spriegums, kas pie kustīgiem klājumiem paaugstina caursites risku. Elektromagnētiskie ievācēji parasti sniedz salīdzinoši zemu spriegumu, triboelektriskie un pjezoelektriskie ievācēji ģenerē augstu spriegumu, bet savas augstās iekšējās pretestības dēļ zemu strāvu, kas no elektroenerģijas pārveidošanas viedokļa ir papildu sarežģītība [29]. Visi veidi izejā sniedz maiņstrāvu, kas rada nepieciešamību pēc papildu taisngriešanas posma, tomēr ir prezentēti, piemēram, triboelektrisko ģeneratoru varianti, kuros vienas polaritātes impulsi jau tiek atdalīti ar mehāniskās konstrukcijas palīdzību [30], [31].

Visiem mehāniskās enerģijas pārveidošanas principiem ir savs priekšrocību un trūkumu klāsts, kaut kur tie savstarpēji pārklājas, bet citur, šķiet, var potenciāli aizpildīt viens otra trūkumus. Tādā veidā, piemēram, rodas dažādi hibrīdie risinājumi [32]–[34], kuros apvienojas vairāki ģenerēšanas principi. Starp mehāniskās enerģijas ievākšanas principiem ar savu izstrādes vienkāršību un potenciālo daudzveidību var izcelt elektromagnētisko principu, kas arī izvēlēts tālākajam pētījumam. Tam ģenerēšanai nav vajadzīga sākotnēja uzlāde kā elektrostatiskajiem ievācējiem [35], [36] un īpaši materiāli kā pjezoelektriskajiem [37], [38] un triboelektriskajiem ievācējiem [39], [40]. Lai gan triboelektriskais ģenerācijas princips šobrīd strauji attīstās un tiek uzskatīts par perspektīvu uzrādīto jaudas blīvumu dēļ, tā fizikālie procesi ir tikai izprašanas stadijā, kas arī novērots publikācijās ar autora līdzdalību [18]–[21].

Lielākai enerģijas savākšanas lietderībai var tikt izmantotas dažādu vienlaicīgi strādājošu ievācēju kombinācijas, radot kombinētos (hibrīdos) ievācējus. Pārsvarā elektromagnētiskos enerģijas ģeneratorus apvieno ar pjezoelektriskajiem dažādās mehāniskās struktūrās, kā parādīts apskata rakstos [41], [42], bet publikācijās sastopami risinājumi arī ar triboelektriskajiem ģeneratoriem [43]. Daži autori tiecas uz teorētisku dažādu ievācēju enerģijas summēšanu, piemēram, [34], [44], apvienojot dažādus avotus vienotā ierīcē un izmērot to sniegumu atsevišķi, tad saskaitot rezultātus, tāda pieeja izvairās no praktiskām apvienošanas problēmām. Elektriska ievācēju apvienošana rada vairākus izaicinājumus, tie nosaka gan



sistēmas lietderību, gan izveides vienkāršību. Izvērstāks ieskats publicētajos ievācēju apvienošanas veidos pieejams pielikumā 1.

Kopumā var secināt, ka enerģijas ievācēju apvienošanā jāņem vērā individuālo ģeneratoru sniegums un savstarpējā ietekme. Tieši saslēdzot, ģenerētie signāli var destruktīvi ietekmēt viens otru vai arī ievācēji viens otru slopot, tālab izdevīgāk tos savstarpēji izolēt. Vienkāršākais veids ir diode, kas neļaus strāvai plūst no viena ģeneratora uz otru. Vēloties iegūt augstāku izejas spriegumu, izolētās ģeneratoru izejas var saslēgt virknē, bet lietderīgai darbībai ir jā rūpējas par līdzvērtīgu izejas spriegumu. Tas ir nozīmīgi arī paralēlam slēgumam, lai avoti spētu darboties vienlaidus, bet vāja atsevišķa ģeneratora gadījumā paralēlais slēgums nesniegs augstākus zudumus par noplūdēm caur diodi.

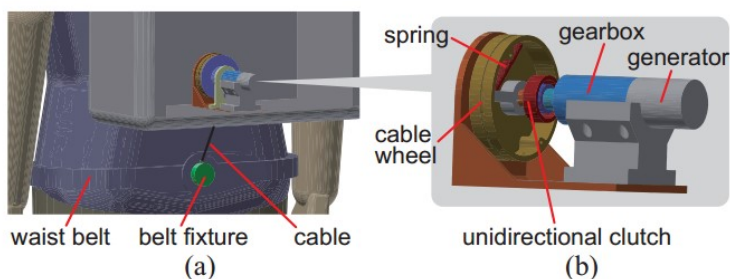
## **1.2. Elektromagnētiskā principa kustību enerģijas ievācēju piemēri cilvēka kustībām**

Tipiski kustību enerģijas pārveidotāji tiek veidoti ārējo spēku pārvietojumam vienā dimensijā un rezonanses nosacījumiem. Tas ir ērti izvietojam uz konkrētiem mehānismiem, kur vibrāciju raksturs ir labi zināms, toties citos apstākļos, kur svārstības var būt neperiodiskas vai arī bez noteikta virziena, šādi ievācēji nevarēs nodrošināt efektīvu kustību enerģijas izmantošanu. Dabiskiem kustību avotiem parasti sastopams mazāk stabils un paredzams kustību raksturs, tamdēļ šajā apakšnodaļā tiks apskatīti pētnieku piedāvātie risinājumi elektromagnētiskajiem kustību enerģijas ievācējiem, lai padarītu tos izmantojamus cilvēka kustībām, atsevišķi iedalot individuālu slēgumu, kurā tiek lietots tikai elektromagnētiskā principa ievācējs, un hibrīdo, kur tiek apvienoti vairāki ģenerēšanas principi.

### **1.2.1. Konstruktiju paraugi**

No visām cilvēka kustībām tieši staigāšana pievērsusi visvairāk uzmanības mehāniskās enerģijas savākšanas risinājumu izveidei, sākot meklēt risinājumus ar apaviem [45], [46], tad mugursomām [47], [48] un pat ceļgala locītavu [49]–[51]. Ērtāk ir papildināt apģērba elementus, kas tā pat tiek lietoti, piemēram, mugursomas un apavus, bet no šiem abiem somām ir nenoliedzama priekšrocība — liela ietilpība. Senākais mugursomu tehniskais risinājums ir lietot inerciālu svārsta sistēmu, kas ļautu cilvēka soļošanas laikā iegūt augstāku svārsta amplitūdu un rezultātā ģenerēt lielāku elektroenerģiju, bet cilvēku kustības ir ar zemu frekvenci, tādēļ atsvara masa rezonanses frekvences samazināšanai jāizvēlas liela, pat vairāki desmiti kilogramu [47], [48]. Efektivitātes palielināšanai tika piedāvāta svārsta stingruma maiņa, kurai notiekot dinamiski, rezonanses frekvence var pielāgoties dažādiem soļošanas ātrumiem bez atsvara masas maiņas [52], ģenerējot 4-10 W. Atsakoties no inerciāla ievācēja principa, tika gan samazināta masa, gan prasības pret konkrētu pārvietošanās ātrumu efektīvai darbībai, piemēram, darbos [16], [53] parādīts ģenerators mugursomā, kuru iegriež pie kājām piesieta trose. Lai gan šādā veidā tika demonstrēta 9 W ģenerācija pie mazākas masas, garie kabeļi risinājumu padarīja neērtu.

Vairāk pievērsoties cilvēka kustību īpatnībām, darba [54] autori veica mērījumus mugursomas svārstībām soļošanas laikā atkarībā no tās masas un iešanas ātruma. Tika konstatēts, ka relatīvais pārvietojums horizontālā virzienā dominē zemākiem ātrumiem, bet līdz ar ātruma pieaugšanu pakāpeniski samazinās, un to pārspēj vertikālais pārvietojums. Balstoties uz to, tika izdarīts secinājums, ka, ļaujoties uz tikai vienu kustības virzienu, kā tas darīts inerciālajās sistēmās [47], [48], [52], īpaši pie lēnas iešanas tiek zaudēta būtiska kustību daļa. Lai izmantotu šo esošo svārstību īpašību, autori piedāvā neinerčiāla pārveidotāja variantu mugursomai, kas arī tiek iegriezts ar trosi līdzīgi kā [16], bet tā ir īsa uz izvietota tā, lai nebūtu traucējoša un izmantotu gan vertikālas, gan horizontālas svārstības (1.1. att., a).

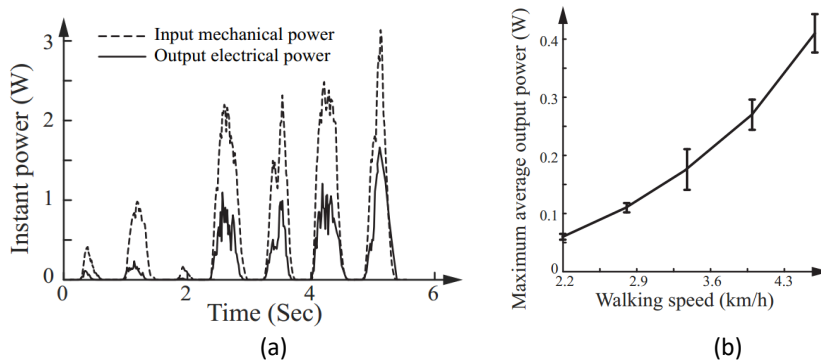


1.1. att. Kustību enerģijas ievācēja izvietojums (a) un ģeneratora uzbūve (b) [54].

Troses ārējais gals piestiprināts pie jostas (1.1. att., a, *belt fixture*), lai būtu cieša sasaiste ar ķermeni, bet iekšējais ir aptīts ap disku (1.1. att., b, *cable wheel*), tādā veidā, izmainoties mugursomas pozīcijai attiecībā pret vidukli, trose tiek pavilkta un iegriezts ģenerators. Relatīvais mugursomas pārvietojums ir 3–6 cm diapazonā, tam pielāgots diska izmērs un atspere, kas to atgriež sākuma stāvoklī (1.1. att., b, *cable wheel* un *spring*). Ģenerators pie diska pieslēgts ar 1:100 pārnēsūmkārību un vienvirziena sajūgu (1.1. att., b, *gearbox* un *unidirectional clutch*), tādējādi ģenerators darbojas tikai momentos, kad mugursoma novirzās no sākumstāvokļa, bet netraucē tai atgriezties sākuma pozīcijā. Trose ātri un netraucēti uztinas atpakaļ, lai ģenerators ir gatavs nākamajai novirzei jebkurā virzienā. Kopējā konstrukcijas masa ir 500 g.

Darba [54] autori pievērsuši uzmanību eksperimentālo datu uzticamībai un atkārtojamībai, veicot soļošanas pārbaudi uz elektriskā skrejceļa ar fiksētu ātrumu, kā arī uzdodot konkrētu atpūtas laiku starp ātruma maiņu un veicot mērījumus vairākkārt. Šādā veidā samazinās noguruma un citu faktoru ietekme uz rezultātiem. Ģeneratoram piemeklēta optimālā rezistīvā slodze labākā snieguma novērtēšanai, un, lai gan pīķa jauda pārsniedz 1 W (1.2. att., a, *Output electrical power*), autori kopējās darbības novērtējumam lieto lielāko vidējo jaudu (1.2. att., b), pie 4 km/h tā ir 0,3 W. Autori [54] nepaskaidro izmantoto terminu „lielākā vidējā jauda” (*maximum average power*), visdrošākais, ka tas nozīmē lielāko jaudas vērtību starp dažādiem eksperimentiem, kuru gaitā jauda tika rēķināta kā vidējā vērtība. Izvēle vadīties pēc vidējās vērtības ir pamatojama, jo pīķa jauda ir momentāna vērtība, tā var būt nepastāvīga un sniedz ieskatu ļoti īsā darbības laikā, kas nav plānotais darba režīms piedāvātajam kustību enerģijas ievācējam. Papildus novērtēta mehāniskās enerģijas pārveidošanas efektivitāte (1.2. att., a,

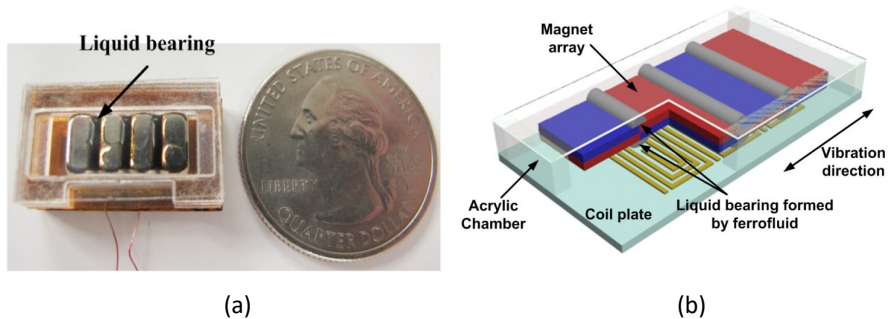
*Output electrical power* pret *Input mechanical power*), tā ir tuvu 50%, bet nav dota informācija par ieejas enerģijas noteikšanas metodi. Apskatīta ievācēja ietekme uz cilvēka stāju, kur novērota pat neliela kāju un gurnu locītavu noslodzes samazināšanās, iemesls tam nav ticis novērtēts.



1.2. att. Kustības enerģijas ievācēja mugursomā eksperimentāli noteiktā momentānā mehāniskā un elektriskā jauda sākot soļot (a) un vidējā elektriskā jauda pie dažādiem ātrumiem [54].

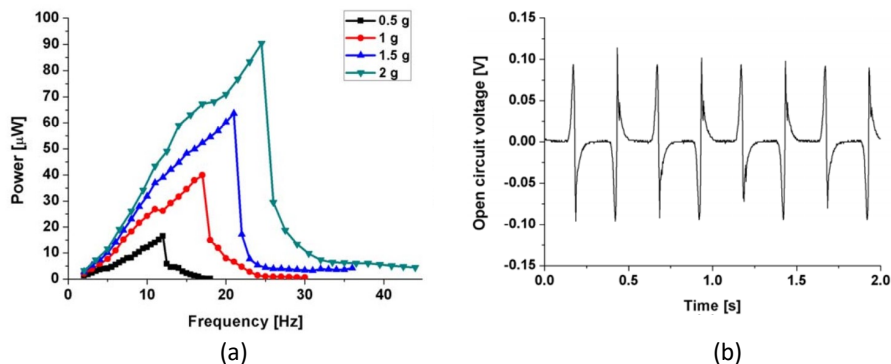
Popularitāti starp pētniekiem sāka iegūt arī universāli kustību enerģijas pārveidotāji, kas vairs nebija domāti konkrētam apģērbam vai aksesuāram, bet gan brīvai integrēšanai jebkurā atbilstošā vietā vai pat nēsāšanai līdzī. Šādā pielietojumā jācenšas samazināt izmēru, kas novedīs pie mazākas ģenerētās elektroenerģijas. Efektivitātes uzlabošanai var censties iegūt mehānisku rezonansi kustību enerģijas ievācējā, bet salīdzinoši augstā rezonanses frekvence ar šauru joslu, kas parasti raksturīgi rezonanses tipa pārveidotājiem, rada sarežģījumus izmantot šādus ievācējus cilvēka staigāšanas mehāniskās enerģijas pārveidošanai, kur frekvence parasti nepārsniedz 2–4 Hz [55].

Kā vienu no veidiem, kā izveidot ne rezonanses veida elektromagnētisko pārveidotāju, darbā [56] tiek piedāvāts izmantot virs spolēm brīvi slīdošu magnētu masīvu, kurš veidots no pretēji vēršiem magnētiem straujāk mainīga magnētiskā lauka radīšanai. Inovatīvā darba [56] ideja ir pielietot feromagnētisku šķidrums slīdes berzes samazināšanai (1.3. att., *Liquid bearing*). Tā kā magnētiskais lauks sasniedz augstākās vērtības pie magnētu robežām, tur arī koncentrēsies feromagnētiskais šķidrums pat magnētu kustības laikā. Šķidruma "gultņu" sniegumu autori uzlabo ar hidrofobu pārklājumu virsmām, pa kurām magnētiem jāpārvietojas.



1.3. att. Kustību enerģijas pārveidotāja prototips ar feromagnētiskā šķidruma "gultņiem" (a) un tā shematiskā konstrukcija (b) [56].

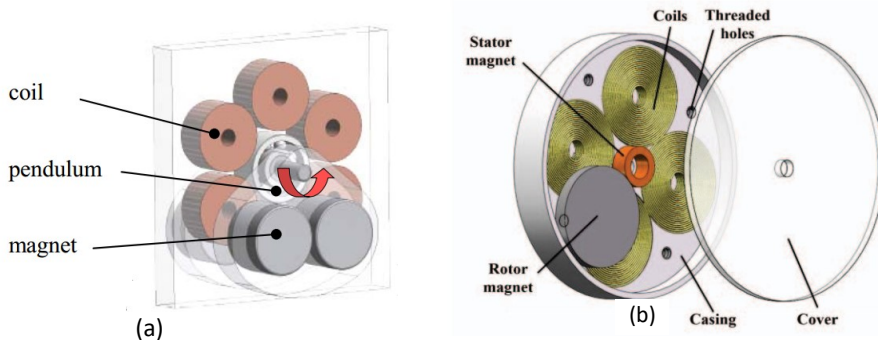
Piedāvātā ideja praktiski pārbaudīta uz lineāra pārvietojuma iekārtas pie dažādām frekvencēm un paātrinājuma (1.4. att., a). Pieaugot frekvencei un paātrinājumam, ģenerētā jauda palielinās, kas atbilst neinerciālam principam. Dotajai konstrukcijai ir arī kritiskā frekvence, darba [56] autori norāda, ka pie tās magnētu kustība ietaises tilpumā palēninās, jo tie atsitas pret iekšsienām neperiodiski. Tā kā kritiskā frekvence pat pie maza paātrinājuma ir virs 10 Hz, tai nebūtu jātraucē plānotajam pielietojumam zemfrekvences kustībām. Ģenerētais tukšgaitas spriegums pie 2 Hz svārstībām redzams (1.4. att., b), amplitūda ir ap 100 mV pie kopējiem izmēriem 20,7 x 12 x 4,5 mm un svara 2,5 g.



1.4. att. Uz feromagnētiskā šķidruma slidošo magnētu enerģijas ievācēja eksperimentālie dati. Izejas jaudas uz salāgotas slodzes atkarība no svārstību frekvences pie dažādiem paātrinājumiem (a) un tukšgaitas spriegums pie 2 Hz svārstībām (b) [56].

Aplūkojot cilvēka kustības, var ievērot, ka liela to daļa ir ap rotācijas asi, piemēram, roku un kāju kustība soļošanas laikā, tātad te var būt noderīgi lietot ne tikai taisnvirziena pārvietojumu. Vairāki autori izmanto rotējoša svārsta kustību savos mehāniskās enerģijas pārveidotājos, lai tie dabiski pielāgotos dažādiem svārstību leņķiem. Piemēram, [57] tika piedāvāts jauns elektromagnētiskā kustību enerģijas ievācēja variants, rotorā izvietojot

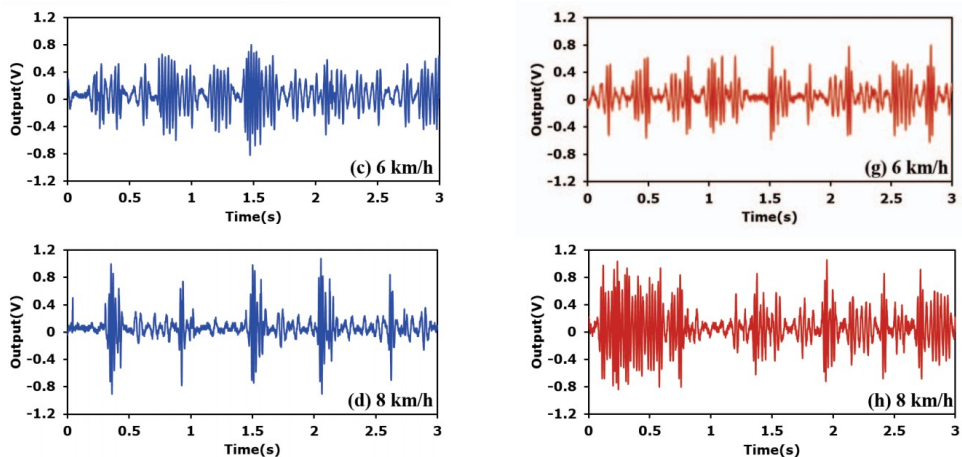
magnētus, bet statorā spoles (1.5. att., a). Ar šādu pieeju lineāra ārējā kustība tiek pārveidota rotācijā. Gluži kā iepriekš minētajā risinājumā, [17] darba autori arī lieto cilvēka kustību pārveidošanu rotācijā, tikai piedāvā vienkāršotu konstrukciju. Tās pamatā ir riņķveidā izvietotas plakanas spoles, kuru centrā ir statisks cilindruveida magnēts, pie kura pievilksnās spēku dēļ turas diskveida magnēts rotors (1.5. att., b, *Stator magnet* un *Rotor magnet*). Tādā veidā diskveida magnēts ripo apkārt asij bez liekām detaļām un to ieviestās papildu berzes.



1.5. att. Cilvēka kustību enerģijas ievācējs ar rotoru: (a) ar gultņu asi [57] un (b) ar magnētisko asi [17].

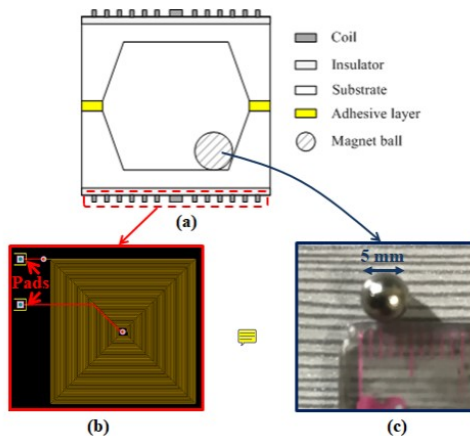
Veicot mērījumus uz cilvēka, [17] autori noteikuši, ka uz poftes paātrinājums ir lielāks nekā pie delnas gan lēnas, gan raitas pārvietošanās gadījumos (2 un 6 km/h), tāpēc tur izvietot svārstību enerģijas ievācēju ir izdevīgāk. Līdzīgus rezultātus apstiprina arī [58] darba pētījums. Augstāko ģenerētā sprieguma vērtību iegūst pie lielākā ātruma, kas apstiprina neinerciālo dabu, pie ātras iešanas ar 8 km/h pēc tilta taisngrieža nomērīti 0,59 V, ko [17] norāda kā potenciāli izmantojamu valkājamās elektronikas barošanai.

Darba [17] autori gan nepievērs uzmanību ģenerētā sprieguma frekvencei pie 8 km/h, kas izmainīja iepriekš stabilo tendenci (1.6. att.). Ja mazākiem ātrumiem (2–6 km/h) frekvence un amplitūda vienmēr bija augstāka mērījumiem uz poftes, tad 8 km/h mērījumam pārveidotājs pie delnas uzrāda būtiski biežākas svārstības, turpretim ģeneratoram uz poftes sprieguma impulsa frekvence pat samazinās attiecībā pret 6 km/h. Paātrinājuma mērījumu dati apstiprina poftes pārākumu un šo tendenci tikai līdz 6 km/h ātrumam, tālāk paātrinājuma dati vairs nav doti. Tamdēļ nav līdz galam skaidrs, kamdēļ [17] autori izvēlējās lietot 8 km/h datus, jo šādas izmaiņas ģenerētā signāla tendencē, kas nesaskan ar iepriekšējo, var nozīmēt citu enerģijas ievācēja darba režīmu, tā nepiemērotību augstākām frekvencēm vai arī gadījuma kļūdu mērījumos. Turklāt šajā ātrumā poftes ģenerētais signāls ir pārāks tikai ar 3% lielāku amplitūdu, nenoliedzami, tas sniedz lielāku pīķa jaudu, taču augstākā frekvence pie delnas varētu dot lielāku enerģiju ar minimālu pīķa vērtības samazināšanos. Vēl var norādīt, ka jaudas blīvumu autori rēķinājuši no, domājams, vērtības starp maksimumiem (angļu val. — *peak-to-peak*), kas nevar izdalīties uz tieši pieslēgtas rezistīvās slodzes, padarot vērtību pārspīlētu.



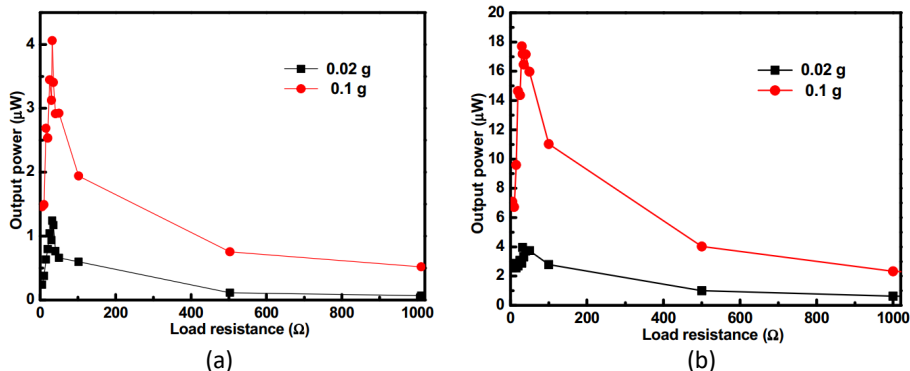
1.6. att. Kustību enerģijas pārveidotāja ar magnētisko asi izejas spriegums pie dažādiem ātrumiem; pozīcija uz potītes (c, d) un delnas (g, h) [17].

Ir arī autori, kas vēlējušies iziet no divām brīvības pakāpēm savos kustību enerģijas ievācējos, lietojot pa virsmu brīvi ripojošas struktūras [59]–[61]. Vairumā šādi enerģijas ievācēji lieto elektrostatisko principu, kur elektrovadoša struktūra (piliens) slīd pa lādētu dielektrisku virsmu [59], [60], bet darbā [61] tiek lietota magnēta lodīte, kura atrodas noslēgtā telpā ar vadošām spirālveida spolēm uz ārsienām. Lietojot elektromagnētisko principu, kā norāda darba [61] autori, tiek iegūta lielāka izejas jauda un enerģijas ievācējs ilgāk saglabā savu funkcionalitāti. Šādu konstrukciju var fiziski samazināt ar MEMS tehnoloģijām, bet darbā [61] idejas demonstrēšanai izmantota iespiedplate, kuras aizmugurē ir papildu slānis biežumam ar izveidotu iedobumu, savienojot divas šādas plates, rodas vajadzīgā struktūra (1.7. att.).



1.7. att. Kustību enerģijas pārveidotājs: struktūra šķērsgriezumā (a), spole (b) un magnētiskā lodīte (c) [61].

Kustību enerģijas ievācēja tilpums darbā ir  $9 \text{ cm}^3$ . Tas iesākumā tika pārbaudīts ar salāgotu rezistīvu slodzi, kas vienai 60 vijumu spolei ir  $32 \Omega$ , mērījumi veikti tikai augšējai spolei. Pie  $1 \text{ Hz}$  neregulārām  $0,1 \text{ g}$  ( $1 \text{ g} = 9,81 \text{ m/s}^2$ ) svārstībām ar roku tika izmērīti maksimums  $4,1 \mu\text{W}$  uz slodzes, pie maza  $0,02 \text{ g}$  paātrinājuma svārstībām lielākā izejas jauda bija  $1,2 \mu\text{W}$  (1.8. att., a). Ģenerētā sprieguma vērtība no maksimuma līdz maksimumam (*peak-to-peak*) uz slodzes ir  $22,8 \text{ mV}$  pie  $0,1 \text{ g}$  paātrinājuma un attiecīgi  $12,6 \text{ mV}$  pie  $0,02 \text{ g}$ . Lai gan sprieguma vērtības ir ļoti mazas, enerģija tiek ģenerēta arī pie maza paātrinājuma svārstībām, turklāt konstrukcija neprasa tikai viena kustību virziena svārstības.



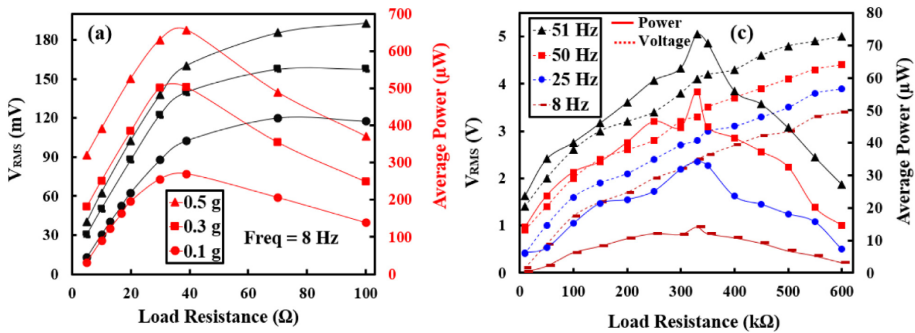
1.8. att. Kustību enerģijas ievācēja ar magnēta lodīti izejas jauda pret slodzes pretestību pie dažādiem paātrinājumiem, mērīta tikai augšējā spole (a) un abas spoles (b) [61].

Veicot mērījumus ar abām konstrukcijā izveidotajām spolēm, pie  $0,1 \text{ g}$  paātrinājuma iegūti  $17,7 \mu\text{W}$ . Salīdzinot jaudas pret slodzes pretestību grafikus vienai un abām spolēm, salāgotā slodze abos gadījumos ir tie paši  $32 \Omega$  (1.8. att.). Tas liek secināt, ka [61] autori izejas jaudu ieguvuši kā matemātisku summu jaudai no abām slodzēm, jo, savienojot divas spoles virknē, optimālā izejas jauda būtu pie divtik lielas slodzes pretestības ( $64 \Omega$ ), bet, savienojot paralēli, pie divtik mazas ( $16 \Omega$ ). Lai gan spoļu savienošana virknē palielinātu izejas spriegumu, kas pie tik mazām vērtībām varētu būt svarīgi, tas visdrošāk netika darīts ģenerētā signāla formas dēļ — ja tā atšķiras abām spolēm, signāls var tikt daļēji dzēsts. Tas var radīt sarežģījumus tālākā ģenerētās elektroenerģijas izmantošanā, jo pēc būtības tie ir vairāki savstarpēji nesavienojami maiņstrāvas avoti ar ļoti mazu spriegumu. Darba [61] autori nepaskaidro arī būtisko atšķirību starp ģenerēto jaudu vienai augšējai ( $4,1 \mu\text{W}$ ) un abām ( $17,7 \mu\text{W}$ ) spolēm, jaudu attiecība abām ir virs 4 reizēm. Eksperimenta raksturojumā sacīts, ka prototips svārstīts ar roku un mērīts paātrinājums, no tā, visticamāk, noteikta un uzraudzīta frekvence, bet ir iespējams, ka ar šādu metodi pārveidotajam ar daudzām brīvības pakāpēm mērījumi nav pietiekami atkarojami, jo var mainīties kustību plakne un vektors, kas potenciāli rada atšķirīgu magnētiskā laukā izmaiņu spolēs. Var izteikt minējumu, ka kustības visu eksperimentu laikā bija tādā plaknē, kurā bumbiņa atradās būtiski tuvāk apakšējai spolei, tamdēļ tā ģenerē vairāk nekā augšējā, vai arī mērījumu svārstības atšķīrās un dažādos piegājenos deva dažādu sniegumu.

## 1.2.2. Apvienošana hibrīdajā slēgumā

Domājot par augstākas jaudas iegūšanu un arī praktiski izmantojamu elektroenerģiju, tiek piedāvāti dažādi hibrīdie risinājumi, kuros apvienoti vismaz divi dažādi enerģijas ievākšanas principi. Pētījumos autori piedāvā dažādus veidus ievācēju apvienošanai un novērtēšanai, dotajā sadaļā tiks aplūkoti vien tādi piemēri, kas tikuši realizēti praktiski un pārbaudīti ar cilvēka kustībām.

Samērā biežs ir elektromagnētiskā un pjezoelektriskā ģenerators apvienojums, kurā magnēts kustas noslēgtā telpā gar vai cauri spolēm, un galos iedarbojas uz pjezoelektrisko materiālu. Protams, šādā kustībā var rasties rezonanses nosacījumi, bet daudzi autori parāda sekmīgu ievācēju darbošanos arī cilvēka kustību gadījumā. Darbā [62] ir atsevišķi apskatīts abu ģenerators sniegums iekš enerģijas ievācēja atkarībā no slodzes, tas ir darīts pie rezonanses frekvences elektromagnētiskajam un arī nomērītajām harmonikām pjezoelektriskajam (1.9. att., a un b).



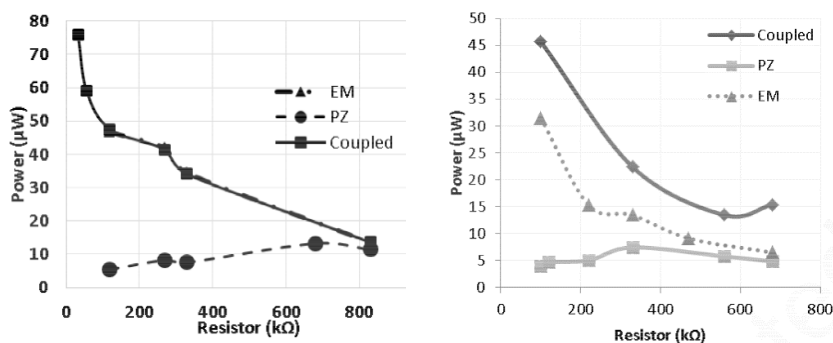
1.9. att. Izejas sprieguma un vidējās jaudas atkarība no slodzes pretestības elektromagnētiskajam (a) un pjezoelektriskajam (b) ģeneratoram hibrīdajā ievācējā [62].

Darba [62] autori apgalvo, ka ģeneratori strādā vienā fāzē, tālab tie tiek apvienoti kopā pirms pilnā tilta taisngrieža un staigāšanas laikā var uzlādēt 100  $\mu F$  kondensatoru līdz 2,5 V pa 10 min. Nav minēts apvienošanas slēgums, turklāt hibrīdajā ievācējā abiem ģeneratoriem ir pāris. Lai gan darbā ir dotas tikai vidējās kvadrātiskās (*RMS*) vērtības un amplitūda nav zināma, var izteikt minējumu, ka elektromagnētiskais ģenerators var sniegt ieguldījumu vien pašā izejas kondensatora uzlādes sākumā, vēlāk vien radot zudumus augstākā sprieguma avota darbībā. Papildus var novērot, ka optimālās slodzes pretestība abiem ģeneratoriem atšķiras par kārtu, tātad vismaz viens no ģeneratoriem netiks slogots optimāli.

Citos darbos vairāk pievēršas dažādo ģenerators apvienošanas detaļām. Piemēram, [63] autori ar pjezoelektriskā ģenerators konstrukciju panāk, ka tā optimālā slodze rezonanses nosacījumos ir ļoti tuva elektromagnētiskā ģenerators iekšējai pretestībai. Šādā veidā tos var līdzvērtīgi slogot konkrētā slodzes vērtību diapazonā. Līdzvērtīgais izejas spriegums un salāgotās slodzes jauda ļauj tos pieslēgt kopējam izejas kondensatoram caur tilta taisngriežiem. Hibrīdais ievācējs pie cilvēka skriešanas ar 12,5 km/h ātrumu spēj uzlādēt 10 mF kondensatoru līdz 5 V pa 10 s, bet nav sniegti dati, vai dotā parametru savietojamība ir spēkā arī mazākas mehāniskās iedarbes gadījumā.



Darba [64] autori arī apzinājās, ka dažādo pārveidošanas principu ģenerētais spriegums ir būtiski atšķirīgs, kā arī ģenerācija hibrīdajā ievācējā var nebūt vienlaicīga. Elektromagnētiskajam ģeneratoram tiek lietots sprieguma reizinātāja slēgums četrkārši augstas vērtības iegūšanai, kas, atbilstoši simulācijas datiem, būtu pietiekami 3,3 V iegūšanai. Savukārt pjezoelektriskajam ģeneratoram nepieciešama sprieguma samazināšana, ko autori nodrošina ar komerciāli pieejamu mikroshēmu *LTC3588-1*, kas satur pilnā tilta taisngriezi un nepieciešamās komponentes impulsvēda līdzsprieguma samazināšanai un kontrolei. Autori pārbaudījuši izejas jaudu abiem atsevišķi un kopā, kad izejas saslēgtas uz viena kondensatora. No tā konstatēts, ka elektromagnētiskais ievācējs ģenerē vairākas reizes augstāku vidējo jaudu un lielāku spriegumu, tālab to kopējā slēgumā atstāt bez sprieguma regulācijas nav lietderīgi. Savukārt, apvienojot paaugstināto elektromagnētiskā un taisngrieztu pjezoelektriskā ģeneratora signālu ar vienas mikroshēmas *LTC3588-1* palīdzību, novērots, ka augstākas slodzes gadījumā pjezoelektriskā ģeneratora ieguldījums ir nebūtisks. Tas tika apstiprināts, slogojot ģeneratorus atsevišķi un kopā (1.10. att., a), kur kopējais slēgums uzrāda sakrītošas jaudas vērtības ar elektromagnētisko atsevišķi. Tālab autori pēc sprieguma reizinātāja pieslēdz atsevišķu *LTC3588-1* izejas sprieguma regulēšanai uz atsevišķa izejas kondensatora, kas jau slēgts virknē ar izejas kondensatoru pēc otras *LTC3588-1* no pjezoelektriskā ģeneratora. Abām mikroshēmām iestatīts uzturēt mazāku izejas spriegumu (1,8 V), lai mazāk slogotu ģeneratorus, bet summā sanāktu spriegums virs trim voltiem dažādu patērētāju vajadzībām. Rezultātā redzams izejas jaudas pieaugums salīdzinājumā ar ģeneratoriem atsevišķi (1.10. att., b).



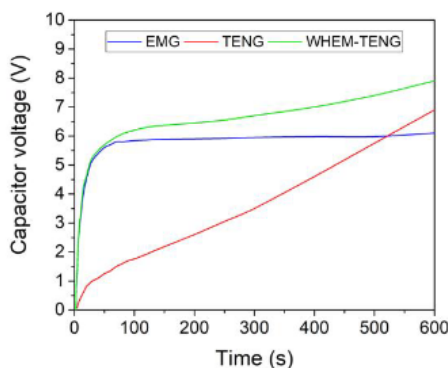
1.10. att. Elektromagnētiskā (EM) un pjezoelektriskā (PZ) ģeneratora vidējā jauda uz slodzes atsevišķā slēgumā un hibrīdajā (*Coupled*): lādējot izejas kondensatoru paralēli līdz augstākam spriegumam (a) un lādējot atsevišķus kondensatorus līdz zemākam (b), lai tos saslēgtu virknē [64].

Darba [64] autori diemžēl neapskata, kā virknē slēgto kondensatoru spriegums un individuālo ģeneratoru sniegums mainās slogošanas laikā, jo dažādās jaudas un atšķirīgie ģenerēšanas momenti var novest pie negatīva sprieguma uz kāda kondensatora, kā tas raksturots pielikumā 1. Darbā var arī novērot testa mērījumu metodes nozīmi, jo, pārbaudot doto hibrīdo ievācēju praktiski uz cilvēka, tas sniedza ne vairāk kā 0,83 V nepilnu piecu minūšu laikā, kas var norādīt uz nepiemērotu konstrukciju vai elektrisko slēgumu dotajām kustībām.

Izplatību iegūst arī kombinācijas ar triboelektriskajiem enerģijas ievācējiem, kurā parasti magnēta kustības laikā radītā berze tiek lietota triboelektriskajam efektam. Šādā savienojumā

optimālā sloģošanas pretestība var atšķirties vēl būtiskāk nekā variantos ar pjezoelektriskajiem ievācējiem, piemēram, [65] izveidotajā hibrīdajā enerģijas ievācējā optimālā sloģošana ģeneratoriem ir pie 700  $\Omega$  un 6 M $\Omega$ . Abi ģeneratori apvienoti pēc individuālas taisngriešanas, kas brīvas roku kustības gadījumā sniedz 100  $\mu$ F kondensatora uzlādi līdz 2 V pa 39 s, demonstrēts, ka ar doto sniegumu ir pietiekami pašu veidota elektriskā rokas pulksteņa darbināšanai.

Darbos [66], [67] tiek pētīta doba aprobe, kurā ripo magnēta lodīte. Autori pievērs uzmanību individuālu ģeneratoru snieguma uzlabošanai, apskatot gan attāluma ietekmi starp divām spolēm un triboģeneratoriem [66], gan arī papildu ģeneratoru savstarpējo slēģumu [67] izdevīgāko variantu ar cilvēka kustībām. Lai iegūtu salīdzināmu izejas spriegumu, elektromagnētiskajam ģeneratoram pievienots sprieguma četrkāršs reizinātājs, triboelektriskajam tikai pilnā tilta taisngriezis, pateicoties tam, abi sniedz ieguldījumu izejas kondensatora spriegumā arī virs 5 V (1.11. att.). Grafikā var redzēt, ka triboelektriskais ģenerators spējīģs sniegt augstāku spriegumu, bet var novērtēt, ka tam ir aptuveni desmit reizes mazāka vidējā uzlādes jauda.



1.11. att. Hibrīdā enerģijas ievācēja izejas kondensatora uzlāde pie skriešanas ar vidēģi 23 km/h, darbojoties tikai elektromagnētiskajam (*EMG*), triboelektriskajam (*TENG*), vai abiem kopā (*WHEM-TENG*) [66].

Pēc aptuveni 1,5 minūtēm lēnas gaitas, hibrīdais ievācēģs [67] ir bijis spējīģs uzlādēt izejas kondensatoru līdz 2 V un nodrošināt komerciāla ciparu temperatūras sensora darbību, ja kontroles shēma tiek barota ārēģi. Darbos [66], [67] autori ir novērtēģuģi triboelektriskā ģenerators tukšgaitas sprieguma izmaiņu pēc 10 tūkstoģiem iedarģbu, rezultātā spriegums samazināģs par 6–10 %, bet nav ticis novērtēģts praktiskais jaudas zudums un vai šī tendence turpināģs.

Tiek arī publicēti hibrīdie enerģijas ievācēģi, kuros apvienoti vairāk nekā divi ģenerēģanas principi. Piemēram, darbā [68] tiek apvienots pjezoelektriskais, elektromagnētiskais un triboelektriskais efekts. To individuālās optimālās slodģes pretestības ir dažādāģs kārtāģs, elektromagnētiskā ģenerators tukšgaitas spriegums ir vismaz desmitkārt mazāģks par pārēģjiem ģeneratoriem, bet tā pat visi tiek saslēģti kopā pēc taisngrieģanas ar pilnā tilta slēģumu. Pa minūti staigāģšanas ar 5 km/h izeģas kondensators (560  $\mu$ F) tiek uzlādēģs līdz 3–22 V, atkarībā no pozģcijas uz ķermeņa.

Retāk sastopami ir hibrīdie risinājumi, kuri izmanto arī siltuma enerģiju. Darbā [15] tiek lietots piroelektriķis, kam elektriskā sprieguma radīšanai nepieciešama temperatūras izmaiņa, un daļa no tā elektrodiem ir saslēgta ķēdē, lai veidotu elektromagnētisko ģeneratoru, kad garām pārvietosies magnēts. Laboratorijas eksperimentos tas uzrādīja tukšgaitas spriegumu milivoltu līmenī, kamēr piroelektriskais ģenerators sasniedza 9 V. Autori tomēr izlēma saslēgt abus paralēli pirms taisngrieža, dati par savstarpējo sloģošanu nav uzrādīti. Savukārt darbā [69] kustību enerģijas ievākšanai tiek lietots triboelektriskais efekts, bet termoelektriskais ģenerators realizēts ar Peltjē elementiem, kas ģenerē no temperatūras gradienta. Dotais darbs atšķiras no pārējiem ar to, ka autori dažādo ģeneratoru parametru salāģošanai lieto atsevišķas spriegumu pārveidošanas mikroshēmas: *LTC3588* sprieguma pazemināšanai no triboelektriskā, un *LTC3108* sprieguma paaugstināšanai no termoelektriskā ievācēja.

### 1.2.3. Apkopojums

Publicētas dažādas pieejas enerģijas ievākšanai no cilvēka, daļa autoru tās apskata vairāk kā teorētiskus avotus, savukārt citi cenšas parādīt iespējamo praktisko ieguvumu no tāda elektroenerģijas avota. Kopēji var novērot atšķirīgas tendences enerģijas ievācēju izpētē un pārbaudēs. Lai gan daudzi autori ievieš kontrolētus cilvēka pārbaudes apstākļus, piemēram, pārvietojoties uz elektriskā skrejceļa [17], [63], [66], [68], pārbaude ar brīvām kustībām ir visai izplatīta [15], [61], [65], [67], [69], bet rezultātu atkārtojāmība un izkliede tiek minēta ļoti reti [54]. Nenoliedzami, brīvas kustības būs tās, ar kurām rezultātā saskarsies enerģijas ievācēji, bet eksperimentu gaitā tās nesniedz kvantitatīvi salīdzināmas vērtības. Sastopami arī piemēri, kur enerģijas ievācēja testi vai optimizācija notiek apstākļos, kas neatbilst reālajiem, tālab pārbaude ar cilvēka kustībām uzrāda būtiski sliktākus rezultātus [64], [65].

Ģenerētā sprieguma pārveidošanu uzkrāšanas nolūkam pārsvarā realizē ar diožu tilta taisngriezi vai sprieguma daudzkrāšotāju, ja sākotnējais līmenis nav pietiekams vēlamajam mērķim. Daudzi autori ir publicējuši enerģijas ievācējus, kas arī praktiskos testos ir spējīgi uzlādēt izejas kondensatorus līdz pietiekamam spriegumam mazjaudas patērētājiem: elektriskajiem rokas pulksteņiem [65], komerciāliem galda higrometriem [15], [68], ciparu temperatūras sensora mikroshēmai [67], cilvēka pulsa sensoram [66] un litija akumulatora uzlādei GPS iekārtā [63]. Domājams, patērētāja paraugdemonstrējumi pārsvarā ir kvalitatīvam izejas parametru pietiekamības novērtējumam, jo kvantitatīvi dati par patēriņu un darbības stabilitāti netiek sniegti, bet pārbaudes apstākļi mēdz atšķirties no tiem, kas lietoti snieguma novērtējumam.

Skatoties uz enerģijas ievācējiem kā potenciāliem barošanas avotiem, aktuālo izejas jaudu izdevīgāk novērtēt pēc elektroenerģijas uzkrāšanas ilguma, jo publikācijās var būt sniegtas pārspīlētas vērtības, piemēram, rēķinot pīķa jaudu maiņsprieguma vērtībām starp maksimumiem (angļu val. — *peak-to-peak voltage*) [17], [63]. Vidējā izejas jauda, ko uzrāda, piemēram, hibrīdie enerģijas ievācēji cilvēkam staigājot, ir prezentēta plašā diapazonā: zem mikrovata [62], [64], pāris mikrovati [15], [65], vairāki desmiti mikrovatu [66], [67] un pat pāris milivatu [68]. Apskatīto hibrīdo ievācēju raksturlielumi salīdzināšanai pieejami pielikumā 2.

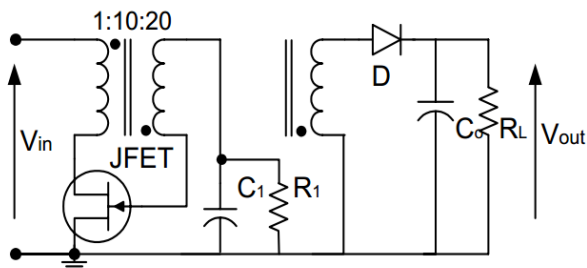
### 1.3. Elektriskie pārveidotāji zemsprieguma avotiem

Iepriekšējā apakšnodaļā tika apskatīti vairāki publicēti risinājumi, kur enerģijas ievācēji baro kādu mazjaudas patērētāju. Pārsvārā tiek lietoti pasīvi risinājumi ģenerētā sprieguma pārveidošanai, kas ir pamatojams ar to vienkāršību un lētumu. Ja enerģijas ievācēja izejas sprieguma amplitūda ir pietiekama, tad tiek lietoti tilta taisngrieži, pretējā gadījumā tiek izmantoti sprieguma reizinātāji, kas gan pārsvārā tiek lietoti salīdzinoši augstas frekvences, piemēram, kilohercu un megahercu svārstību avotiem [70]–[72], tomēr sastopami pielietojumi arī pāris desmitu hercu avotiem [73], [74]. Augstākam sprieguma paaugstināšanas koeficientam reizinātājos var nākties lietot aktīvo taisngriešanu, diemžēl šī metode prasa nepārtrauktu barošanu, kas laikā nepastāvīga ieejas signāla gadījumā var sniegt būtiskus zudumus, piemēram, darbā [74] pielietotā shēma astoņkārsai sprieguma paaugstināšanai vienlaidus patērē ap  $24 \mu\text{W}$ , faktiski nodrošinot vien sešu reižu paaugstināšanu. Arī jāņem vērā, ka sprieguma reizinātājā katrs signāla pusperiods uzlādē vienu daudzkārsošanas pakāpes kapacitāti, tātad, ja ieejas signāls ir īss un satur, teiksim, 2 pilnus periodus, tas paspēs uzlādēt tikai četras pakāpes. Teorētiski tas nodrošina sprieguma četrkārsošānu, bet trīs no četriem ieejas pusperiodiem nesniedz izejas enerģijas plūsmu pie vajadzīgā sprieguma, turklāt, ja līdz nākamajiem ieejas periodiem reizinātāja kondensatori paspēs izlādēties, tad šāda neefektīva darbība turpināsies. Toties reizinātāji nereti tiek piedāvāti kā pārveidotāju kontroles shēmu sākotnējās barošanas sprieguma avots, kas vēlāk tiek atslēgts [71], [75], [76].

Cilvēka kustības var būt nepastāvīgas, tālab arī enerģijas ievācēja ģenerētais spriegums var būt stipri mainīgs. Šī iemesla dēļ spriegumu paaugstināšanas koeficientam, autoraprāt, vērts būt pietiekami augstam, lai arī vājākas ģenerācijas gadījumā izejas spriegums būtu izmantojamā diapazonā, tas vēl jo vairāk apgrūtina sprieguma reizinātāja izmantošanu. Toties, ja elektromagnētiskā ģeneratora izejas spriegums ir pietiekams tā taisngriešanai, var lietot līdzsprieguma pārveidotājus, bet grūtības var sagādāt paša pārveidotāja barošana. Lai pārveidotājs būtu spējīgs darboties pāris simtu milivoltu līmenī, piedāvāti dažādi varianti, piemēram, lietot kondensatoru vai akumulatoru, kas sniegtu pārveidotājam nepieciešamo starta spriegumu un potenciāli tiktu uzlādēts darba laikā [77], [78], vai pat izmantot mehānisku slēdzi, kas impulsveida pārveidotājā cilvēka kustību laikā patvaļīgi darbosies tranzistora vietā [79], līdz barošanas kondensators tiks pietiekami uzlādēts galvenās shēmas startam. Tomēr pietiekami lieli pūliņi ieguldīti arī pārveidotājos, kas nepalaujas uz ārēju vai iepriekš uzkrātu enerģiju, bet tikai uz to, ko reāllaikā spēj sniegt enerģijas ievācēji.

Centieni radīt pārveidotāju, kas būtu pašpietiekams arī pie ļoti zema ieejas sprieguma, ir visai seni — jau 1997. gadā publicēta shēma, kas pati startējas pie ne vairāk kā 300 mV ieejā [80]. Lai varētu izmantot komerciāli pieejamās elektronikas komponentes, nācās izveidot startēšanās bloku, kas sniegtu pietiekami augstu spriegumu to barošanai. Risinājums tika atrasts kardiostimulatoru shēmtehnikā, tas turpmāk kļuva samērā izplatīts zemsprieguma pārveidotāju startēšanās nodrošināšanai. Ideja ir lietot paaugstinošo transformatoru pārveidotāja ieejā, kas tālāk ar jau lielāku spriegumu vadīs slēdzi un īslaicīgi pārtrauks ieejas strāvas plūsmu, tādējādi nodrošinās pulsējošu strāvu un turpmāku transformatora darbību. Šo zemsprieguma bloku var lietot kā barošanu atsevišķam paralēli slēgtam augstākas efektivitātes pārveidotājam [80], vai

arī strukturāli apvienot ar galveno pārveidotāju, tādējādi samazinot komponentu skaitu, turpmāk dažādi autori pārsvarā lieto šo pieeju. Piemēram, darbā [81] piedāvāts izmantot trīs tinumus uz vienas magnētiskās serdes, kur divi kalpo kā iepriekš minētā zemsprieguma startēšanās shēma, bet trešais ir daļa no sprieguma impulsveida pārveidotāja (1.12. att.).

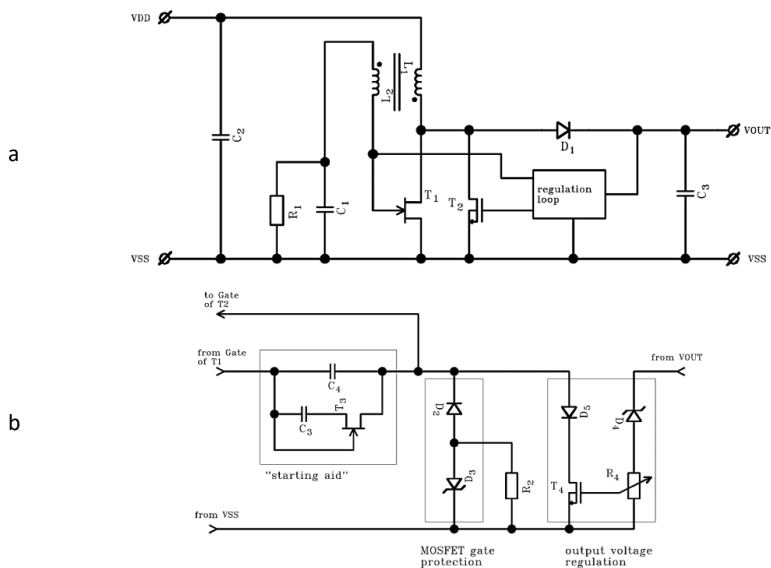


1.12. att. *Flyback* pārveidotājs līdz ar zemsprieguma startēšanās shēmu [81].

Ar šādu vienkāršotu shēmu ērti paskaidrot principu zemsprieguma startēšanās shēmai, jo tas pamatā nav mainījies kopš sākotnēji piedāvātā [80]. Ieejā tiek lietots  $n$  kanāla *JFET* tranzistors (angļu val. — *Junction Field-Effect Transistor*), jo normālā stāvoklī tas vada strāvu, tāpēc tā var plūst arī pie maza ieejas sprieguma bez jebkādas papildu vadības. Parādoties spriegumam ieejā (1.12. att.,  $V_{in}$ ), primārajā tinumā sāk plūst strāva, tā inducē spriegumu sekundārajā tinumā, kurš ir slēgts pretēji primārajam. Šādā veidā rodas pozitīvs spriegums uz *JFET* aizvara, kas tā  $p-n$  pārejas dēļ darbojas kā diode un ļauj strāvai plūst uz zemi, līdz ar to kondensators  $C_1$  tiek uzlādēts negatīvi. Kad strāva ieejā sasniedz savu maksimālo vērtību, spriegums uz primārā tinuma ir samazinājies līdz nullei, tam seko spriegums arī sekundārajā tinumā. Tā rezultātā negatīvais spriegums uz  $C_1$  ir pieslēgts pie *JFET* aizvara, liekot tā kanālam sašaurināties un samazināt strāvu primārajā tinumā. Līdz ar strāvas samazināšanos, sekundārajā tinumā tiek ģenerēts pretējs spriegums nekā pirmīt, tagad tas darbojas virknē ar kondensatoru  $C_1$ , tādējādi ātri aizverot *JFET*  $n$  kanālu pilnībā un pārtraucot strāvas plūsmu primārajā tinumā. Tiklīdz kā spriegums uz *JFET* aizvara pieaug, ieejā atkal sāk plūst neliela strāva, tā rada spriegumu sekundārajā tinumā gluži kā no sākuma, ātri atverot tranzistoru ar pozitīvu spriegumu, līdz ar ko viss cikls sākas pa jaunam. Rezistors  $R_1$  izlādē kondensatoru  $C_1$ , lai iesākumā *JFET* būtu atvērts. Tā kā šādā realizācijā jau ir transformators, kurā primārais tinums tiek atslēgts un ieslēgts augstā frekvencē, autori [81] pievienoja trešo tinumu no *flyback* izejas topoloģijas, tādā veidā iegūstot līdzsprieguma impulsveida pārveidotāju, kura slēdža vadību nodrošina zems ieejas spriegums. Kā acīmredzami trūkumi šādai pieejai ir slēdža darbība pašrezonansē, tātad tas nav kontrolējams un nav iespējams kontrolēt izejas sprieguma vērtību, un *JFET* salīdzinoši lielā atvērtā stāvokļa pretestība rada papildu zudumus.

Metode, ar kuras palīdzību var paaugstināt ieejas spriegumu no līmeņa krietni zem lauktranzistoru sliekšņa vērtības, bija pietiekami interesanta, lai trūkumi tiktu laboti. Iepriekš nosauktās nepilnības tika samazinātas darbā [82], kur, atšķirībā no autoru [81] veikuma, transformatoram nav nepieciešams trešais tinums, ir ieviests papildu slēdzis zudumu no *JFET* mazināšanai un izejas sprieguma kontrole. Startēšanās daļa ar *JFET* un transformatoru joprojām nav mainījies, bet tālāk seko *boost* impulsveida pārveidotāja topoloģija (1.13. att., a), kas

sastāv no  $L_1$ ,  $T_2$ ,  $D_1$ ,  $C_3$  un kontroles mezgla (*regulation loop*). Sākotnēji process norit kā iepriekš paskaidrots līdz momentam, kad sekundārajā tinumā parādās negatīvs spriegums, kas aizver JFET ( $T_1$ ) kanālu. Tā kā  $T_1$  aizvars ir papildus pieslēgts pie kondensatoriem  $C_3$  un  $C_4$  (1.13. att., b, ievads *From Gate of T1*), kondensatori tiek uzlādēti cauri  $D_2$  un sprostvirzienā slēgtai Zēnera diodei  $D_3$ , kas ierobežo sprieguma vērtību tranzistora  $T_2$  aizvara pasargāšanai. Tālāk seko pozitīvs spriegums uz sekundārā tinuma, tas virknē ar  $C_3$  un  $C_4$  ir pieslēgts pie  $T_2$  aizvara (1.13. att., b, izvads *To Gate of T2*). Pozitīva sprieguma vērtības uz  $n$  kanāla MOP lauktranzistora  $T_2$  ļauj tam sākt vadīt strāvu, tā kā  $T_2$  un  $T_1$  ir slēgti paralēli, sekundārajā tinumā strāvas vērtība pieaug straujāk un līdz augstākam līmenim. Šis savukārt rada augstāku inducēto spriegumu sekundārajā tinumā, tamdēļ  $T_2$  tiek atvērts arvien vairāk. Ātri vien strāva caur MOP lauktranzistoru kļūst augstāka par cauri JFET plūstošo, strāvas izmaiņa primārajā tinumā kļūst pietiekami strauja, lai kondensatori  $C_3$  un  $C_4$  (1.13. att., b) tiek uzlādēti līdz spriegumam, kas tuvs  $T_2$  atvēršanās sliekšņa vērtībai vai pat lielāks par to. Šis rada ļoti labvēlīgus apstākļus MOP vadībai, jo negatīvs spriegums uz sekundārā tinuma ir slēgts virknē ar kondensatoriem un summāri uz  $T_2$  aizvara sanāk neliela vērtība, tātad tas aizveras līdz ar  $T_1$ , bet sekundārā tinuma spriegumam pieaugot,  $T_2$  tiek strauji atvērts to pašu virknes kondensatoru  $C_3$  un  $C_4$  (1.13. att., b) dēļ. Var tikt sasniegts tāds stāvoklis, kad  $T_1$  vispār netiek atvērts, jo uz  $C_1$  (1.13. att., a) sprieguma vērtības ir pārāk stipri negatīvas, tātad turpinās strādāt tikai  $T_2$ .

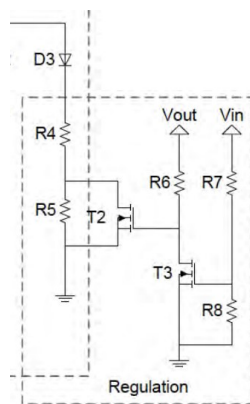


1.13. att. Zemsprieguma pārveidotāja kopējā (a) un kontroles mezgla (b) principiālā shēma [82].

Lai  $T_2$  varētu izslēgties, kondensatoriem  $C_3$  un  $C_4$  (1.13. att., b) jāspēj izlādēties, citādi tie var uzturēt uz MOP lauktranzistora aizvara pietiekami augstu spriegumu, un tas paliks vadošā stāvoklī. Šim nolūkam kondensatori pie zemes pieslēgti ar diodi  $D_5$  un tranzistoru  $T_4$  — dotie elementi kalpo arī kā iezes sprieguma kontrole (1.13. att., b, *output voltage regulation*). Tiklīdz izejā  $V_{OUT}$  sasniegts zināms sprieguma līmenis, ko nosaka Zēnera diode  $D_4$  un potenciometrs

$R_4$ , tranzistors  $T_4$  sāk vadīt strāvu, liekot kondensatoriem  $C_3$  un  $C_4$  izlādēties straujāk, kas noved pie ātrākas  $T_2$  pārslēgšanās. Tātad, jo augstāks spriegums izejā, jo lielāka strāva plūst caur tranzistoru  $T_4$ , sekojoši ātrāk samazinās spriegums uz  $T_2$  aizvara, samazinot atvērtā slēdža laiku un neļaujot spriegumam izejā pieaugt.

Dotais slēgums tika papildināts arī turpmāk, ieviešot korekcijas un izmainot funkcionalitāti pēc vajadzības. Piemēram, lai uzlabotu pārveidotāja efektivitāti darbā ar konkrētiem enerģijas ievācējiem, autori [83] piedāvā ieviest iespēju ieregulēt maksimālās jaudas punktu darba režīmā. To var paveikt, ja enerģijas ievācējam izmēra tukšgaitas spriegumu tipiskajā darba diapazonā, un ieregulē pārveidotājam uzturēt pusi no tā. Šāda funkcionalitāte tika panākta ar nelielu izmaiņu jau iepriekš raksturotajā kontroles mezglā (1.13. att., b, *output voltage regulation*), papildus ieviešot vēl vienu tranzistoru, kas pieslēgts ieejai, un rezistorus paralēli regulējošajam tranzistoram  $T_2$  (1.14. att.). Ieejas spriegums vada tranzistoru  $T_3$ , bet tas invertējoši vada  $T_2$ , tātad, kad ieejā spriegums pieaug,  $T_2$  sāk vērties ciet, tālab strāvai cauri diodei  $D_3$  uz zemi jāplūst cauri rezistoram  $R_5$ . No tā izriet, ka pie lielāka ieejas sprieguma noplūdis mazāka strāva no galvenā slēdža vadības kondensatoriem, tātad slēdzis būs vaļā ilgāk, līdz ar ko slogos ieeju stiprāk un samazinās tās spriegumu. Ar rezistoriem  $R_4$  un  $R_5$  var ieregulēt diapazonu, kurā jāmainās ieejas spriegumam.

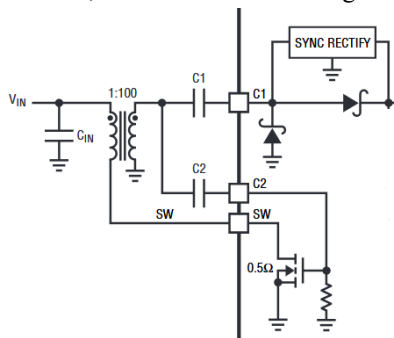


1.14. att. Maksimālās jaudas punkta ieregulēšanas shēma zemsprieguma pārveidotājam [83]

Kā redzams, dotā shēma neregulē izejas spriegumu, ja nu vienīgi gadījumā, kad ieejā ir visai zems līmenis, tad izejai neļaus pieaugt pārāk stipri. Darba [83] autorus virzīja vēlme radīt efektīvāku pārveidošanu un iespēju to pielāgot individuālam enerģijas ievācējam, bet izejas spriegumu viņi uzskatīja par labu esam virs 2 V, nebija gan nekā minēts par tā augstāko robežu vai stabilitāti. Skaidrs, ka šāda efektīvākā darba režīma piergulēšana nav dinamiska, autori rezistoru vērtības piemeklēja eksperimentāli, bet neskatoties uz to pie 0,3 V ieejas līdzsprieguma (avotam 0,6 V tukšgaitā, 9  $\Omega$  iekšējā pretestība) tika noteikta efektivitāte 74 % [83].

Attīstoties pusvadītāju tehnoloģijām, izmainījās arī pieeja transformatora slēgumam, un radās komerciāli risinājumi, piemēram, *Linear Technology* (tagad jau *Analog Devices*) *LTC3108* mikroskāma, kas ar 1:100 attiecības transformatoru var startēties no 20 mV [84].

Ražotājs nesniedz visas funkcionalitātes detaļas, bet pēc mikroshēmas ieejas bloku attēlojuma (1.15. att.) var gūt priekšstatu par tās darbības pamatprincipu. Būtiska atšķirība no iepriekš raksturotās pieejas zemsprieguma startēšanās un pašrezonanses nodrošināšanai ir aizstāt *JFET* ar, domājams, ļoti zema, iespējams, nulles sliekšņa sprieguma (angļu val. — *zero threshold voltage, native*) MOP lauktranzistoru (1.15. att., *SW* ieeja). Ja sliekšņa spriegums ir pāris desmitu milivoltu robežās ap nulli, pat neliels spriegums sekundārajā tinumā var atvērt tranzistoru. Parasta *n*-MOP gadījumā tas būtu sākotnēji aizvērts, neļaujot strāvai plūst primārajā tinumā, bet nulles sprieguma MOP lauktranzistoriem ir salīdzinoši augstas noplūdes [85], kas ar lielas tinumu attiecības transformatoru varētu radīt nepieciešamo sprieguma vērtību. Iespējams arī variants, ka aizvaram pieslēgtajam rezistoram ir pietiekami augsta vērtība, lai uz tā radušais elektriskais vai termiskais troksnis nedaudz atvērtu tranzistoru pat bez ieejas signāla. Tālāk, kad strāva primārajā tinumā tuvojas piesātinājumam un spriegums sekundārajā tinumā sāk kristies, sākas tinuma induktivitātes rezonanse ar  $C_2$ , šīs svārstības arī nosaka turpmāko spriegumu uz tranzistora aizvara, liekot tam cikliski atslēgt un ieslēgt primāro tinumu.



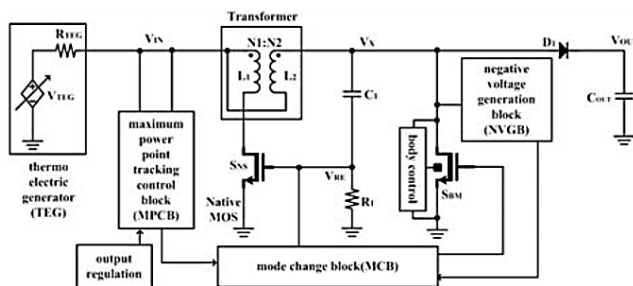
1.15. att. Ieejas ķēdes principiālā shēma *LTC3108* mikroshēmai [84].

Atšķirības no iepriekš apskatītajiem variantiem redzamas arī tālākajā jaudas ceļā, šoreiz sekundārais tinums tiek lietots gan startēšanās, gan izejas sprieguma nodrošināšanai. Daļēji tas ir līdzīgs *flyback* slēgumam kā [81], tikai kondensators  $C_1$  nav galējā izeja, bet gan slēgts virknē tai. Var secināt, ka negatīvā impulsa laikā tas tiek uzlādēts, lai transformatora tiešā impulsa laikā  $C_1$  būtu virknē ar transformatoru, nodrošinot augstāku izejas spriegumu. Šādā veidā tiek lietotas abas transformatora izejas signāla polaritātes, tamdēļ šī pieeja atbilst *forward* slēguma principam. Atbilstoši ražotāja datiem, pie 20 mV ieejas sprieguma shēma sniedz 35 % lietderību, kas pieaug līdz 40 % pie aptuveni 70 mV, bet pie lielākām sprieguma vērtībām krītas, tikmēr efektīvākais darba punkts, kā norāda ražotājs, ir ar 1:20 transformatoru — 60 % pie 100 mV ieejā (startēšanās spriegums) [84]. Izvēloties augstākus startēšanās spriegumus, efektivitāte pieaug.

Komerčiāli pieejamā risinājuma krītošā efektivitāte pie lielāka ieejas sprieguma var kļūt problemātiska, ja enerģijas ievācējs ir spējīgs sniegt augstāku sprieguma vērtību, bet, izvēloties zemākas tinumu attiecības transformatoru, tiktu zaudēta enerģija vājākas ģenerācijas darba apstākļos. Kā vienu iespējamo risinājumu šādiem apstākļiem piedāvā darba [86] autori, apvienojot iepriekš apskatītās pārveidotāja *flyback* un *boost* topoloģijas pieejas. Doma ir lietot



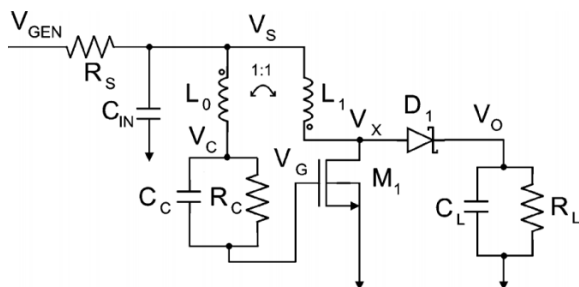
vienu no tām, lai startētos pie zema sprieguma, bet otru, kad spriegums ir pietiekami augsts ieejā. Lai abi varianti varētu darboties neatkarīgi, sekundārā tinuma negatīvais izvads jāpievieno primārā pozitīvajam (1.16. att., *Transformer*). Kad ieejā tiek pieslēgts zems spriegums, pašrezonanse sākas gluži kā *LTC3108* shēmā, sekundārā tinuma spriegums tiek taisngriezts, un enerģija uzkrājas izejas kondensatorā. Ja ieejā ir pietiekami augsts spriegums, zemsprieguma startēšanās tranzistors tiek atslēgts, piesaistot tā aizvaru zemei, un vadības bloki sāk lietot otro tranzistoru (1.16. att.,  $S_{BM}$ ), kas ķēdē ar spoli  $L_2$  (sekundārais tinums), diodi un izejas kondensatoru veido *boost* topoloģiju. Turklāt šajā režīmā piedāvāta arī optimāla enerģijas ievācēja slogošana, proti, kad spole  $L_2$  ir uzlādēta un tranzistors  $S_{BM}$  to atslēdz, tiek nomērīts ieejas spriegums, puse no šīs vērtības ir atskaites punkts ieejas spriegumam nākamā spoles uzlādes laikā.



1.16. att. Blokskāme zemsprieguma startēšanās un boost pārveidotāja neatkarīgai izmantošanai [86].

Shēma startējas pie 40 mV, *flyback* topoloģija atslēdzas pie 100 mV, lietderība no sākuma ir nedaudz virs 35 %, tuvojoties pārslēgšanās līmenim kritas līdz 20 %, tālāk atkal aug un sasniedz 61 % pie 300 mV [86]. Salīdzinot ar komerciāli pieejamo *LTC3108* pielīdzināmā konfigurācijā (startēšanās spriegums 50 mV, lietojot 1:50 transformatoru, darbā [86] lietots 1:60 transformators), tam iesākumā ir 50 % lietderība, pie 100 mV ir 40 %, bet pie 300 mV nedaudz zem 25 % [84]. Acīmredzams ir ieguvums pie augstāka ieejas sprieguma, turklāt, kā norāda darba [86] autori, šādā veidā pieaugošs ieejas spriegums nevar sabojāt jutīgo pašrezonanses shēmu. Te gan jāsapina, ka mērījumus autori [86] veica, pakāpeniski paaugstinot spriegumu no 40 mV līdz 300 mV, diemžēl informācija nav dota par to, cik efektīvi shēma uzsāks darbu *boost* režīmā ar uzreiz augstu vai lēcienvēidā pieaugošu spriegumu ieejā, piemēram, enerģijas ievācēja sniegumam strauji uzlabojoties. Domājams, ka pārslēgšanās kontrole barojas no izejas sprieguma, sekojoši, uzreiz pieslēdzot ieejā virs 100 mV, būs nepieciešams kāds brīdis barošanas līmeņa sasniegšanai un režīmu maiņai, tātad augstāka sprieguma drošība darbosies vien lēnu izmaiņu gadījumā. Arī jāpiemin, ka citi *boost* topoloģijas pārveidotāji zemsprieguma enerģijas ievācējiem, piemēram, bez zemsprieguma startēšanās [77] vai ar to kā iepriekš apskatītais [83] sasniedz lietderību ap 75 % pie ieejas sprieguma ap 300 mV, tas ļauj izteikt minējumu, ka [86] rodas papildu strāvas noplūdes primārajā tinumā, jo nulles sliekšņa sprieguma tranzistors pat ar iezemētu aizvaru var radīt salīdzinoši augstu noplūdi.

Vēl viena interesanta pieeja parādīta darbā [87], tajā autori, saskaroties ar tehnoloģiskajiem ierobežojumiem tādās transformatora startēšanās shēmās kā [84], [86], pievērsās pārveidotāju zemajai ieejas pretestībai, kas pārāk stipri noslogo augstas pretestības avotus. Piemēram, komerciālajai *LTC3108* shēmai tā ir no 10  $\Omega$  līdz aptuveni 6  $\Omega$  (atkarīgs no konfigurācijas) ar spriegumu līdz 100 mV ieejā, bet pie augstāka sprieguma nokrīt līdz 2 – 3,5  $\Omega$  [84]. Darbā [86] dotais parametrs nav uzrādīts vispār, toties mērījumi veikti ar 5  $\Omega$  pretestības avotu, domājams, ieejas pretestība vērtība varētu būt izraudzīta tuva. Zemās ieejas pretestības vērtības skaidrojamas ar to, ka enerģija tiek pārveidota ar transformatoru, kurš pārveido arī pretestību, tamdēļ autori [87] piedāvā lietot atkal nedaudz pārveidotu *boost* tehnoloģiju (1.17. att.).



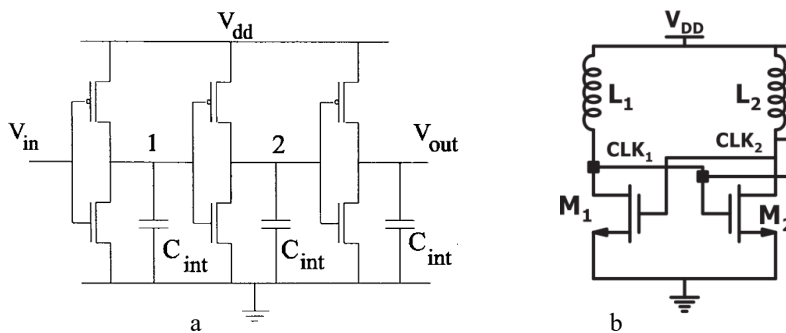
1.17. att. Principiālā shēma zemsprieguma startēšanās pārveidotājam ar 1:1 transformatoru un nulles sprieguma MOP lauktranzistoru [87].

Galvenās atšķirības ir 1:1 tinumu attiecības transformators, tādējādi samazinot parazitisko parametru vērtības, un viena slēdža izmantošana (1.17. att.,  $M_I$ ). Darbība sākas ar īsu strāvas impulsu primārajā tinumā  $L_0$ , kas uzlādē tranzistora  $M_I$  aizvara kapacitāti un  $C_C$ , tā kā tas ir nulles sliekšņa sprieguma tranzistors, tas atveras un ļauj strāvai plūst sekundārajā tinumā  $L_I$ , tā kā  $L_0$  ir pretēji slēgts, tajā rodas impulss, kas darbojas virknē ar ieejas spriegumu, atverot  $M_I$  vēl stiprāk. Kad sekundārajā tinumā strāva ir sasniegusi maksimālo vērtību, primārajā tinumā vairs nav inducētā sprieguma, toties barošanas spriegums būs samazinājies, jo cauri  $L_I$  un  $M_I$  tas ir pieslēgts zemei. Rezultātā spriegums uz aizvara būs zemāks, tas vērsies ciet, sekundārais tinums  $L_I$  uzkrāto enerģiju virknē ar ieeju nodos caur diodi uz izeju, krītošā strāva radīs negatīvu spriegumu primārajā tinumā. Tas būs uz  $M_I$  aizvara, kas ne tikai aizvērs tranzistoru, bet arī samazinās tā noplūdes aizvērtajā stāvoklī. Kad  $L_I$  ir izlādējies, inducētais pretspriegums uz  $L_0$  arī krītas, arī ieejas spriegums atgriežas sākotnējā, ļaujot procesam atsākties.

Pārslēgšanās raksturlielumi būs atkarīgi no shēmas elementu parametriem, bet darba [87] autori papildus piedāvā ieviest maksimālās jaudas darba punkta ieregulēšanu ar mikrokontrolleri. Mērķis ir pārveidotājam uzstādīt ieejas pretestību līdzvērtīgu avota — enerģijas ievācēja — iekšējai pretestībai, to var paveikt, mainot tranzistora darba cikla attiecību. Dotās kontroles nolūkam mikrokontrollerim ik pa laikam jāmērī šī brīža tranzistora ieslēgtā stāvokļa ilgumu un jānodrošina tā atrašanos nepieciešamo vērtību diapazonā, attiecīgi pieregulējot noplūdi no aizvara ar tam papildus pieslēgtu slodzi pret zemi.

Darbā [87] autori savu pieeju pārbaudījuši dažādās konfigurācijās ar atšķirīgiem transformatoriem un vairumā pašu veidotiem pusvadītāju elementiem, izmantojot enerģijas



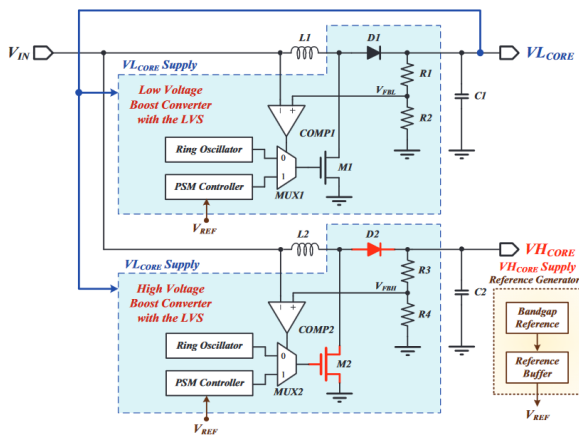


1.18. att. Zemsprieguma svārstību ģeneratoru piemēru principiālās shēmas: ar invertējošajiem elementiem virknē [88] (a) un  $LC$  svārstis ar šķērsslēgtiem tranzistoriem [92] (b).

Vēl izplatīts svārstību ģeneratora paveids, ko lieto zemsprieguma startēšanās shēmās, ir  $LC$  oscilators ar šķērsslēgtiem tranzistoriem (angļu val. — *LC tank cross-coupled oscillator*), principiālā shēma redzama 1.18. att. (b). Šādā realizācijā induktoram virknē slēgta kapacitāte no tranzistora aizvara. Kad uz, teiksim,  $M_2$  aizvara spriegums ir pieaudzis līdz barošanas līmenim  $V_{DD}$ , strāvas plūsma ierobežojas, tādēļ induktora  $L_1$  spriegums maina zīmi un tagad darbojas virknē ar barošanu, uzlādējot aizvara kapacitāti vēl vairāk. Pietiekami augsts spriegums uz aizvara atver tranzistoru, kas iezemē pretējā  $LC$  kontūra viduspunktu, izlādējot kapacitāti (aizvaru) un uzlādējot otru induktoru. Pa to laiku aizvara  $M_2$  kapacitāte sāk atkal izlādēties cauri  $L_1$ , tranzistors aizveras, ļaujot sākties svārstībām pretējā pusē ar uzlādētu  $L_2$ . Šādā veidā puses viena otru cikliski atslēdz, radot svārstības punktus  $CLK_1$  un  $CLK_2$  pretējā fāzē. Skaidrs, ka izmantošanai ar zemu spriegumu nepieciešami zema sliekšņa sprieguma tranzistori, bet papildu sarežģījumus var radīt nepieciešamība pēc induktīviem elementiem. Neskatoties uz to, ir publicēti risinājumi ar integrētiem induktoriem uz čipa [92], kas startējas pie 170 mV un izejā sniedz aptuveni 4 reizes augstāku līdzspriegumu, pie augstākām vērtībām sasniedz un uztur 1 V (ne vairāk par 0,5 mW), maksimālā lietderība 30 %. Darbā [93] piedāvāts risinājums ar integrētiem induktoriem un starta spriegumu 200 mV, izejā sniedzot 1.5 V ar maksimālo lietderību 22 %. Zemāku startēšanās spriegumu piedāvā autori [94] — 100 mV, no kuriem var iegūt 639 mV pie 10  $\mu$ A slodzē. Efektivitātes novērtējums nav dots, bet startēšanās shēmas patēriņš gan (80  $\mu$ W), pēc tā var izteikt minējumu, ka efektivitāte ir zem 8%. Vēl zemākas startēšanās sprieguma vērtības sasniedz darba [95] autori, nolaižoties līdz 60 mV, bet ar 70 mV jau tiek sasniegti 1 V izejā pie 1  $\mu$ A slodzes strāvas un lietderībā līdz 25 %. Zemāks spriegums panākts, apvienojot vairākus  $LC$  svārstību kontūrus un tādējādi iegūstot augstāku spriegumu tālākai izmantošanai. Diemžēl publikācijas [93]–[95] piedāvāto risinājumu novērtējušas tikai datortsimulācijas veidā.

Ja ir pieejami svārstību ģeneratori zepam spriegumam, tos var dažādi modificēt savām vajadzībām. Bet, lai visur shēmā nelietotu zemsprieguma komponentes, kas nav tik efektīvas, piedāvāti modulāri varianti. Piemēram, darba [96] autori parāda nestandarta pielietojumu  $LC$  oscilatoram — tas kalpo kā barošanas avots *boost* shēmas darbībai. Lai to panāktu, oscilatoram lietoti nulles sliekšņa sprieguma tranzistori zemai startēšanās vērtībai, tālāk pretējo svārstību

izvadi caur maiņsprieguma reizinātāju uzlādē kondensatoru. Tādā veidā shēma spējīga no 50 mV uzlādēt kondensatoru līdz 300 mV, kas ir pietiekams zema sliekšņa sprieguma slēdža vadībai *boost* slēgumā vēl vienam starpposmam. Kad šis starpposms ir devis vismaz 800 mV, sāk darboties galvenais *boost* pārveidotājs 1,2 V nodrošināšanai un tiek atslēgti iepriekšējie posmi. Arī darbā [97] apskatīta vairāku posmu struktūra, bet tajā savukārt lietots zemsprieguma gredzenveida oscilators, tas vada slēdzi *boost* pārveidotājā (1.19. att., *Ring oscillator* un *M1*), kamēr visiem citiem kontroles blokiem ar šo spriegumu nepietiek, tādējādi izejā (1.19. att.,  $V_{L_{CORE}}$ ) sāk pieaugt neregulēts spriegums. Kad tas sasniedzis vērtību, lai varētu ieslēgties kontrole, vadāms svārstību ģenerators pārņem vadību caur multiplexeri (1.19. att., *MUX1*). Šādā veidā piedāvāts iegūt nepieciešamo barošanu citam paralēli slēgtam *boost* pārveidotājam, kas jau nodrošinās pietiekami augstu izejas spriegumu (1.19. att.,  $V_{H_{CORE}}$ ). Rezultātā izejā tiek iegūti līdz 2,4 V, shēma spējīga startēties pie 275 mV, maksimālā lietderībā norādīta 75,8 %, bet nav sacīts, pie kādiem darba apstākļiem. Šāda sistēmas dalīšana augsta un zema sprieguma blokos ir pamatojama, jo pirmais pārveidotājs var tikt veidots tā, lai primārais uzdevums būtu darbs ar zemu spriegumu, tādējādi var ziedot efektivitāti un izejas sprieguma vērtības, jo ar to nodarbosies otrais pārveidotājs. Autori gan nesniedz skaidrojumu, kādam nolūkam gredzenveida oscilators un pārslēdzams ģenerators shematiski parādīts arī „augstsprieguma daļas” svārstību nodrošināšanai (1.19. att., *High Voltage Boost Converter*), jo, ja tomēr ir centieni to iedarbināt uzreiz pie zemām ieejas vērtībām, zemsprieguma avots var tikt noslogots un traucēta sistēmas startēšanās. “Zemsprieguma daļa” acīmredzot kalpo kā konstanta barošana galvenajam pārveidotājam, jo netiek minēta tās atslēgšana. Iespējams, ka „augstsprieguma daļas” neregulējamā un regulējamā svārstību avota pārslēgšanas mērķis ir ātrāk iegūt pietiekami augstu spriegumu galveno loģisko bloku vadībai, bet gredzenveida oscilators tajā startējas pie augstāka sprieguma nekā “zemsprieguma daļā”.



1.19. att. Vairāku pakāpju zemsprieguma paaugstināšana ar gredzenveida oscilatoru un atsevišķiem boost pārveidotājiem [97].

Apskatot zema maiņsprieguma pārveidotājus, ir publicēti dažādi piemēri, kuri abus ieejas signāla pusperiodus pārveido atsevišķi, tādējādi iztiekot bez sākotnējās taisngriešanas.

Piemēram, [98] piedāvā zemsprieguma startēšanai lietot dotajā nodaļā apskatīto risinājumu ar transformatoru, kas varētu nodrošināt sākotnēju barošanas kondensatora uzlādi pārveidotāja kontroles shēmai, kas tālāk pie augstāka iegūtā izeja sprieguma atslēdz startēšanās daļu un nodrošina impulsveida maiņsprieguma pārveidošanu līdzspriegumā. Darba autori izveidojuši shēmu praktiski, kontrolei lietojot mikrokontrolleri, bet ieejas signālam 50 Hz maiņsprieguma avotu. Shēma startējas pie 150 mV, mikrokontrolleris uzsāk efektīvāku pārveidošanu pie 1,1 V izejas sprieguma, lai tālāk paaugstinātu un uzturētu spriegumu 1,8 V līmenī. Augstākā norādītā efektivitāte ir 71 %, autori ņēmuši vērā mikrokontrollera patēriņu. Diemžēl nav paskaidrots, kālab mikrokontrollera startēšanās notiek pie sprieguma, kas ir būtiski zem ražotāja norādītajiem 1,8 V. Visticamāk, startēšanās shēma nespēj efektīvi paaugstināt spriegumu dotajos apstākļos, un kontroles daļai vismaz sākotnēji ir ārēja barošana. Dotajam risinājumam var būt nepieciešams arī iegūt augstāku izejas spriegumu, pretējā gadījumā nāksies paļauties vien uz reāllaika ģenerēto jaudu, jo, piemēram, īslaicīgi augstāks patēriņš samazinās izejas kondensatora spriegumu, kas var novest gan pie patērētāja, gan sprieguma pārveidotāja kontrollera negaidītas izslēgšanās.

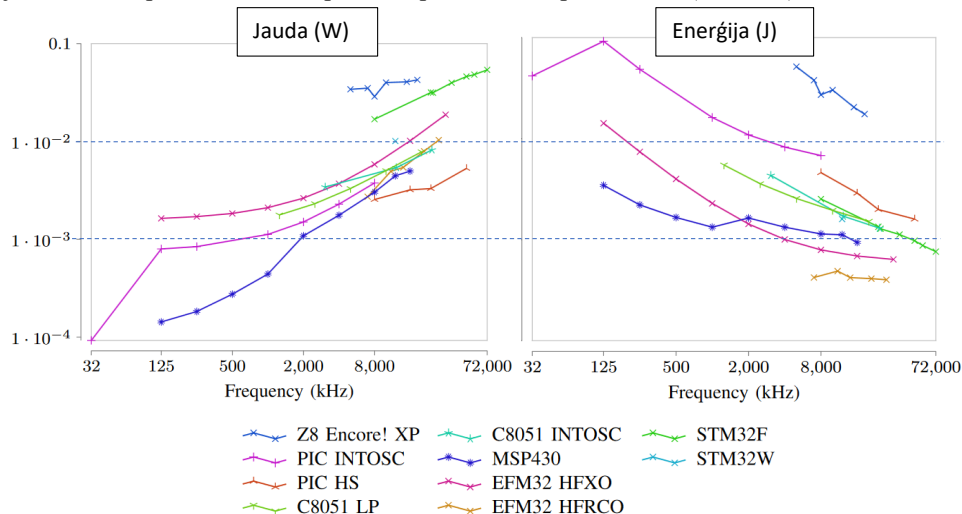
Publicēta arī metode, kurā apskatītā zemsprieguma startēšanās shēma ar transformatoru modificēta izmantošanai abām polaritātēm [99]. Arī tā tiek lietota impulsu pārveidotāja kontroles barošanai, kas pie 1,8 V izejā pārņem vadību. Autori to pārbaudījuši ar bipolāru, bet nemainīgu spriegumu, tālab par metodes izmantošanu maiņspriegumam nav skaidrs. Savukārt komerciāli pieejama mikroshēma *LTC3109* [100], kas faktiski ir analoga pirmīt apskatītajai *LTC3108*, apvienojot divas tās ieejas pakāpes (1.15. att.) ar papildu pārslēgšanās shēmu starp tām atkarībā no polaritātes. Ražotājs norāda, ka mikroshēma izmantojama arī zemam maiņspriegumam.

Tiek publicēti arī varianti, kuros tiek lietotas enerģijas ievācēja īpašības pārveidotāju funkcionēšanas nodrošināšanai. Piemēram, darbā [75] tiek piedāvāts paļauties uz elektromagnētiskā ģenerators spoles induktivitāti impulsveida pārveidotāja darbībai. Sākotnēji caur diodi tiek uzlādēts kondensators, kas ieejas impulsu iztrūkuma momentā tiek secīgi pieslēgts paša ģenerators spolei, uzlādējot to, kas nodrošina uzkrātās elektroenerģijas izmantošanu sprieguma paaugstināšanai. Savukārt darbā [76] papildus piedāvāts aprīkot elektromagnētisko ģeneratoru ar diviem tinumiem, kas tiks lietoti kontroles shēmas startēšanai un sinhronizācijai, lai noteiktu optimālo sloģošanu un polaritātes pārslēgšanās mirkli. Šādā veidā tiek ietaupīta elektroenerģija, jo kontroles shēma var iztikt bez sarežģītiem blokiem signāla uzraudzībai. Šādas pieejas ir specifiskas un atkarīgas no enerģijas ievācējiem, abu minēto pētījumu autori tās ir pārbaudījuši praktiski, bet tikai ar samērā labos apstākļos strādājošiem avotiem, ģenerējot tukšgaitas spriegumu virs 2 V pie salīdzinoši augstas frekvences (85–89 Hz) un nodrošinot ieejas jaudu milivatu līmenī, tālab lietojamība vājākai un nepastāvīgākai ģenerācijai nav zināma.

#### **1.4. Zemas elektroenerģijas izmantošanas iespējas un izaicinājumi**

Salīdzinot vairāku ražotāju ergoefektīvos mikrokontrollerus, darba [101] autori pakļāva tos vienotam testam ar dažādām matemātiskām, komunikācijas un datu drošības nodrošināšanas

operācijām. Operāciju kopa tika pielāgota, lai vienādas funkcijas varētu veikt dažādu tehnisko iespēju paraugi. Tika novērots, ka, darbojoties ar augstākām takts frekvencēm, mikrokontrolleriem nepieciešama augstāka jauda, bet arī mazāka kopējā enerģija (1.20. att.). Tāda pati tendence ir mikrokontrolleru veiktspējai: 16 bitu modeļi testu veica ātrāk par 8 bitu modeļiem, bet lēnāk nekā 32 bitu mikrokontrolleri, un veikšanas laiks ir tieši saistīts ar kopējo patērēto enerģiju. Piemēram, 16 bitu mikrokontrollerim *MSP430G2553* mazākais enerģijas un augstākais jaudas patēriņš ir darbojoties ar 16 MHz takts frekvenci, patērējot ap 1 mJ pie 5 mW jaudas, toties pie 125 kHz tiek patērēti aptuveni 4 mJ pie 0,1 mW (1.20. att.).



1.20. att. Jaudas un enerģijas patēriņš energoefektīviem mikrokontrolleriem, veicot vienotu uzdevumu kopu [101].

Jāņem gan vērā, ka praktiskās shēmās, kur enerģijas ievācējs ir vienīgais barošanas avots, ne vienmēr var sagaidīt šādu testu uzrādītās mazākās enerģijas un jaudas patēriņa vērtības. Iemesls tam ir pārsvarā zemā ģenerētā jauda, kura vien retos gadījumos ir pastāvīga, tamdēļ izmantot to tiešā veidā nav droši un var nākties paļauties uz ilgākā laika posmā uzkrāto enerģiju. Izmantojot uzkrāto elektroenerģiju, līdz ar to mainīsies arī barošanas spriegums, bet mikrokontrolleri var nodrošināt konkrētu veiktspēju tikai pie noteikta barošanas sprieguma, un no tā atkarīgs arī patēriņš. Darba [101] autori testiem lietoja dažādu darba frekvenci un zemāko iespējamo spriegumu, bet dotajam parametram konkrēti skaitļi nav doti. Pirmīt minētajam *MSP430G2553* mikrokontrollerim ražotājs nosaka, ka darbība visā spriegumu diapazonā no 1,8 V līdz 3,6 V iespējama ar maksimums 6 MHz takts frekvenci [102], kas testos pēc darba [101] autoru pētījuma atbilst aptuveni 1,5 mJ enerģijai. Kā redzams, tas jau ir par pusi augstāks patēriņš nekā mazākais nomērītais, turklāt, ja mērījumi tika veikti pie nemainīgi zema barošanas sprieguma, teiksim, 1,8 V, bet realitātē tas darba laikā kritīsies no 3,6 V, enerģijas patēriņš būs vēl augstāks.

Lai gan aktīvā shēmu darbība ir galvenais jaudas patērētājs, jāņem vērā arī gaidīšanas un dīkstāves režīma enerģijas patēriņu. Parasti to var konfigurēt un gaidīšanas laikā iegūt ļoti zemu

patēriņu, piemēram, ražotājs sola, ka iepriekš pieminētais mikrokontroleris *MSP430G2553* pie 2,2 V barošanas un strādājoša pārraugtaimera (angļu val. — *watchdog timer*) patērē 500 nA [102]. Teorētiski, dotais taimeris varētu tikt lietots regulārai sistēmas pamodināšanai iecerēto uzdevumu veikšanai, bet bez tā patēriņš nokrīt līdz 100 nA [102], citi ražotāji tādā režīmā sola vēl zemāku patēriņu, teiksim, *PIC16F18877* mikrokontroleru saimei ražotājs norāda 50 nA pie 1,8 V barošanas dziļā miega laikā bez taimeriem [103]. Paļauties uz tamlīdzīgu enerģijas taupīšanas veidu izvēlējās darba [104] autori, lai no hibrīdā gaismas un termoelektriskā ievācēja varētu nodrošināt barošanu cilvēka parametru mērīšanai.

Sistēma darbā [104] sastāv no komerciāla zema līdzsprieguma pārveidotāja, kas iegūst 5 V izejā kondensatora uzlādei, kam pieslēgts mikrokontroleris, sensori un *Bluetooth* zema patēriņa bezvadu saziņas bloks. Komponentu barošana notiek caur zema sprieguma krituma lineāro regulatoru, lai tiktu uzturēti 3,3 V, jo tas ir sensoru augstākais darba spriegums. Sistēmas kontrole notiek caur mikrokontroleri, kas sazinās ar ārējiem blokiem, veic to iestatīšanu, tad norit parametru mērījumi un datu nosūtīšana 10 sekundes, pēc kā sensori tiek atslēgti un raidīšanas bloks iemidzināts. Cikls atkārtojas ik pēc 20 min, lai dotajā laikā tiktu iekrāta elektroenerģija. Dotais sadalījums ir izvēlēts, lai, ņemot vērā shēmas patēriņu un uzkrājošā kondensatora kapacitāti, sistēma bez enerģijas ievācēju padeves varētu funkcionēt aptuveni 50 h, kondensatoram izlādējoties no 5 V līdz 3,3 V. Praktiskā pārbaudē sistēma spējusi funkcionēt 46 h, kas uzskatāms par pietiekami tuvu rezultātu, kā arī nodemonstrēts, ka pie atbilstoša apgaismojuma uzlāde notiek ātrākā laikā nekā izlāde.

Lai gan ir demonstrēta strādājoša sistēma, kas spējīga uzturēt savu darbību, vairākas darba [104] autoru tehniskās izvēles nelielas pamatotas. Piemēram, par zemāko darba spriegumu izvēlēti 3,3 V, kaut gan atsevišķo bloku zemākais spriegums ir 2,7 V, kas teorētiski ļauj izmantot lielāku uzkrātās elektroenerģijas rezervi. Izvēlēta kapacitātes vērtība ir 50 F, autori tās uzlādi bija paredzējuši aptuveni stundas laikā, bet aprēķinam tika lietota atsevišķo enerģijas ievācēju maksimālā izejas jauda pārspīlēti ideālos apstākļos, neņemot vērā pārveidošanas un uzkrāšanas zudumus. Praktiski noteikts, ka kondensatoru gaismas enerģijas ievācējs saulainā dienā uzlādē no 3,3 V līdz 5 V pa 12 h, bet termoelektriskā ievācēja sniegums netika pārbaudīts uz cilvēka, kas liek izteikt minējumu, ka reālistiskos apstākļos sistēmas startēšanās no izlādēta stāvokļa būs aprūtināta vai pat neiespējama. Autori kā zemāko funkcionēšanas spriegumu min 3,3 V, bet nav norādīta nekāda barošanas sprieguma uzraudzīšana, tālab nav skaidrs, kā tiks pārtraukta sistēmas darbība pie nepietiekama līmeņa, jo pretējā gadījumā var notikt nepilnīgi vai kļūdaini mērījumi.

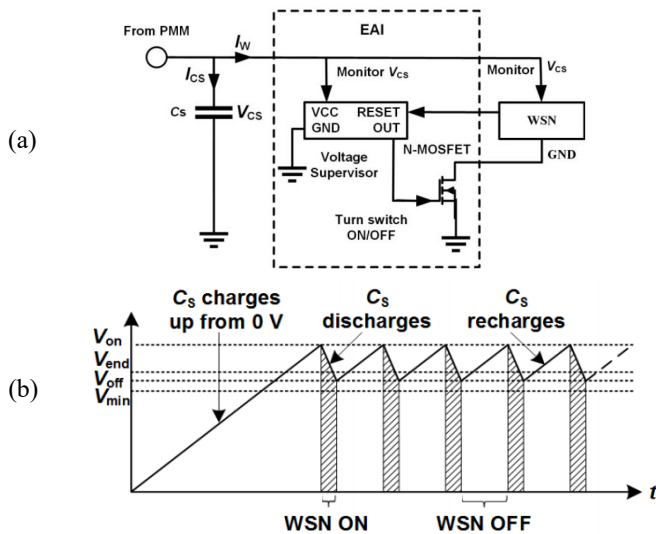
Kamēr vien barošanas spriegums ir zem mikrokontrolerim nepieciešamā, tas nespēj aktivēties un veikt pilnvērtīgu savu iekšējo bloku, piemēram, taimeru, ieeju/izeju vadības un oscilatoru kontroli, līdz ar ko strāvas patēriņš var būt būtiski augstāks. Ja apskata situāciju, kurā enerģijas ievācējs uzlādē elektroenerģiju uzkrājōšu elementu no sprieguma, kas zemāks par mikrokontrolera startēšanai nepieciešamo, var gadīties, ka nenokonfigurētas sistēmas patēriņš ir pielīdzināms ģenerētajai enerģijai vai pat pārāks. Tā rezultātā sistēma nespēs sasniegt startēšanās sliekšni un uzsākt darbību. Protams, var censties samazināt parazitiskās noplūdes mikrokontrolerī, bet loģiskajām sistēmām zem startēšanās sliekšņa sprieguma tāpat būs



nenoteiktības apgabals, kurā tā elementi nesasnies stabilu darba sprieguma līmeni vienlaikus, padarot sistēmas uzvedību neprognozējamu.

Lai novērstu šo startēšanas problēmu, ir publicēti dažādi risinājumi, kuru pamatā ir papildu bloks starp elektroenerģijas pārveidotāju un patērētāju. Kaut gan tas palielina kopējo elementu skaitu un sistēmas sarežģītību, kopumā tas ir universālāks risinājums, jo nav piesaistīts konkrētam patērētājam vai enerģijas avotam. Kā iespējamu risinājumu var lietot atsevišķu shēmu, kas pieslēdz barošanu mikrokontrollerim tikai pie sprieguma, kas augstāks par startēšanās vērtību [105], vai arī tādu, kas atslēdz vai pārstartē sistēmu līdz ar barošanas sprieguma pazemināšanos [106], lai nepieļautu sistēmas nekontrolētu darbību. Apvienojot šīs abas pieejas, kā to darījuši vairāki autori [107]–[109], iegūst atsevišķu shēmu — enerģijas kontroles bloku — pirms patērētāja, kas tam pieslēdz un atslēdz barošanu fiksētos sprieguma līmeņos atbilstoši stabilam darba diapazonam. Šāda pieeja labi tiek galā ar startēšanas patēriņa problēmu un nepieļauj funkcionālu problēmu sākšanos pie sprieguma krituma, bet reālos darba apstākļos var iztēloties sekojošu problēmu — ja enerģijas ievācēja produktivitāte samazinās, bet sistēma šobrīd veic kādu laika un enerģijas ietilpību darbību, uzkrātās elektroenerģijas var nepietikt, sistēma izslēgsies, kā rezultātā ir ne tikai nepaveikta funkcija, bet arī nepieciešamība startēt sistēmu un sākt visu no jauna. Pretējs scenārijs, kurā sistēma pabeidz funkciju vēl pie lielas uzkrātās elektroenerģijas rezerves, izskatās mazāk neproduktīvs, jo paredzētās darbības ir sekmīgi veiktas, toties arī tam ir nepilnības, jo, piemēram, papildu enerģiju vai nu jāuzkrāj atsevišķā elementā, vai arī no tās jāatsakās, kā to dara darbā [109], kur barošanas pieslēgšanas un atslēgšanas spriegums aptuveni atbilst sistēmas funkciju enerģijas patēriņam. Lai neizniekotu jau tā nelielos ievāktās enerģijas apjomus un nelietotu augstas ietilpības uzkrājošos elementus, autori [105] piedāvā mērīt uzkrātā sprieguma vērtību un attiecīgi pieregulēt biežumu, ar kuru sistēmas veic mērījumus ar datu nosūtīšanu. Šāda realizācija izlieto uzkrāto enerģijas apjomu efektīvāk, bet kā nepilnību var norādīt fiksētu funkciju kopumu, kuram autori izvēlējušies regulēt biežumu atbilstoši pieejamajai enerģijai. Tā rezultātā pie samazināta pieejamās enerģijas apjoma, piemēram, laiks starp mērījumiem palielināsies, ja apjoms vēl vairāk kritīsies, sistēma nespēs nosūtīt visus pirmīt iegūtos datus, tādējādi padarot iepriekšējās darbības veltas.

Autori [110] piedāvā atkarībā no pieejamās enerģijas mainīt ne tikai biežumu, bet arī skaitu darbībām, iedalot funkcijas obligātās un maināmās. Lai atvieglotu patērētāja konfigurāciju un nomaiņu, pirms tā ir slēgts atsevišķs bloks pieejamās enerģijas pārraudzībai, ko literatūrā mēdz dēvēt par *Energy-aware interface (EAI)*. Kamēr uzkrātā enerģija uz galvenā kondensatora  $C_s$  nav pietiekama mikrokontrollera, sensoru un raidītāja darbināšanai (kopā *Wireless sensor node, WSN*) (1.21. att., a), šis *EAI* būtībā ir vienīgais slogotājs enerģijas ievācējam. *EAI* bloka galvenā sastāvdaļa ir sprieguma pārraudzības mikroshēma *LTC2935-1* no *Analog Devices* kompānijas [111], kas ar *n-MOP* lauktranzistora palīdzību pieslēdz un atslēdz barošanu galvenajam patērētājam, šādā veidā ļaujot ātrāk uzkrāt enerģiju uz kondensatora  $C_s$ .



1.21. att. Blokhēma enerģijas pārraudzības starpposma slēgumam (a) un tā darbību noteicošo spriegumu ilustrācija (b). Galvenie apzīmējumi: *PMM* (Power Management Module, elektroenerģijas pārveidotājs pēc enerģijas ievācēja), *EAI* (Energy-aware interface, enerģijas pārraudzības starpposms), *WSN* (Wireless sensor node, patērētājs ar mikrokontrolleri, sensoriem un raidītāju) [110].

Enerģijas pārraudzības starpposmam autori [110] izvēlējušies vairākus sprieguma līmeņus, kas noteiks patērētāja darbību. 1.21. att. (b) parāda, kā tie saistās ar spriegumu uz barošanas kondensatora  $C_S$ .  $V_{on}$  (3.16 V) ir fiksēts ar *LTC2935-1*, tad tiek pieslēgta barošana patērētājam, kad uzkrāts pietiekams enerģijas apjoms vismaz vienai mērījumu sērijai ar datu noraidīšanu.  $V_{end}$  tiek aprēķināts ar patērētāja mikrokontrolleri, pie tā uzkrātās enerģijas apjoms pietiekams iegūto datu nosūtīšanai, bet mērījumi jāpārtrauc.  $V_{off}$  ir spriegums pēc datu nosūtīšanas, pie tā patērētājs tiek atslēgts, jo tam sekojošais  $V_{min}$  ir mazākais spriegums patērētāja darbības nodrošināšanai, tātad tas arī ir fiksēts kā  $V_{on}$ .  $V_{min}$  sasniegšana ir nevēlama, tamdēļ starp to un  $V_{off}$  ir izvēlēts drošības atstatums. Ja tomēr tiek sasniegts  $V_{min}$  (2,4 V), *EAI* atslēdz barošanu patērētājam, pretējā gadījumā zems spriegums var radīt nestabilitāti sistēmas funkcionalitātē, efektīvāk ir enerģiju neizniekot un ļaut spriegumam izaugt.

Darbā [110] patērētājs satur mitruma un temperatūras sensoru, akcelerometru, raidītāju un to visu kontrolējošo mikrokontrolleri. Obligātās darbības, kurām jānotiek līdz ar  $V_{on}$  iestāšanos, ir sistēmas inicializācija un visu devēju mērījums, tālāk seko mainīgās funkcijas: programma nomēra  $V_{CS}$  spriegumu un aprēķina  $V_{end}$ , ja šobrīd  $V_{CS} > V_{end}$ , tiek veikta papildu akcelerometra mērījumu sērija. Mitrums un temperatūra netiek atkārtoti mērīti, jo to izmaiņu ātrums salīdzinājumā ar paātrinājuma maiņu ir niecīgs. Mainīgo funkciju daļa atkārtojas līdz iestājas  $V_{CS} < V_{end}$ , tad iegūtie dati tiek nosūtīti un *EAI* tiek pārstartēts (1.21. att.), līdz ar ko atslēdzas barošana patērētājam.  $V_{end}$  tiek aprēķināts, balstoties uz nepieciešamību atvēlēt pietiekami

daudz enerģijas līdz mazākajam sistēmas darba spriegumam  $V_{min}$ , to izsaka sekojošā sakarība [110]:

$$\frac{C V_{end}^2}{2} - \frac{C V_{min}^2}{2} \geq E_{tx-temp-mitr} + (N + 1)E_{tx-aksel} + E_{aksel} + E_{reset}, \quad (1.1)$$

kur  $E_{tx-temp-mitr}$  ir enerģija atsevišķi temperatūras un mitruma mērījumu nosūtīšanai, J;

$E_{tx-aksel}$  ir enerģija paātrinājuma datu nosūtīšanai, J;

$E_{aksel}$  ir enerģija vēl vienam paātrinājuma mērījumam, J;

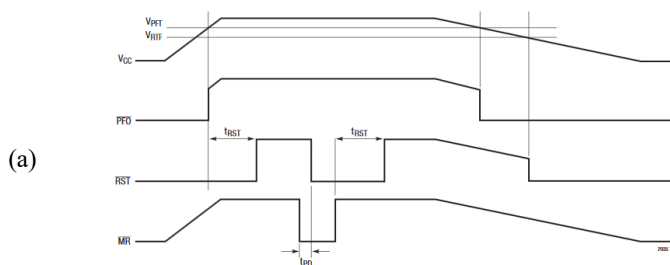
$E_{reset}$  ir enerģija sistēmas atslēgšanai un  $EAI$  pārstartēšanai, J.

Ar  $N$  tiek apzīmēts jau notikušo paātrinājuma mērījumu skaits, tātad  $N + 1$  pārbauda, vai pietiks enerģijas vēl viena mērījuma nosūtīšanai. Tieši šī mainīgā dēļ  $V_{end}$  nav fiksētas vērtības, jo, pieaugot mērījumu skaitam, pieaugs arī patēriņš to masīva nosūtīšanai. Enerģiju katrai darbībai autori [110] noteica empīriski, ieprogramējot mikrokontrolleri darīt tikai konkrētu uzdevumu. Netiek gan minēts, pie kāda darba sprieguma tas darīts.

Piedāvātās metodes pārbaudei darbā [110] tika veikta eksperimentu sērija trijās konfigurācijās: pjezoelektriskais enerģijas ievācējs (10 Hz svārstības no mehāniska manipulatora) + piedāvātais  $EAI$  + patērētājs ar iepriekš raksturoto algoritmu; pjezoelektriskais enerģijas ievācējs + patērētājs ar iepriekš raksturoto algoritmu; barošanas avots + patērētājs ar iepriekš raksturoto algoritmu. Otrajā un trešajā konfigurācijā algoritms bija nedaudz izmainīts, jo tur nav  $EAI$ , pēc nosūtīšanas mikrokontrolleris ieiet miega režīmā un pamostas ar sava iekšējā zemfrekvences taimera palīdzību. Kā galvenos kritērijus snieguma salīdzinājumam lieto strāvas patēriņu starp darba cikliem (pēc  $V_{end}$  sasniegšanas) un kopējo darba spēju. Pirmajā konfigurācijā sistēma spēja darboties ar strāvas patēriņu  $0,95 \mu A$  starp cikliem, otrajā konfigurācijā ar enerģijas ievācēja devumu nepietika pat iestartēt sistēmu, patērējot  $316 \mu A$  un netiekot tālāk par barošanas sprieguma robežu. Būtībā trešā konfigurācija ar barošanas avotu ievācēja vietā parāda, cik patērētu otrā konfigurācija, ja spētu veiksmīgi startēties —  $28 \mu A$  starp darba cikliem.

Rezultāti ļauj secināt, ka atsevišķs enerģijas pārvaldības bloks ļauj salāgot nepietiekamas jaudas avotu ar patērētāju, ļaujot pārvarēt ieslēgšanās patēriņu un samazinot to dīkstāves laikā. Konkrētais piegājiens arī atļauj mazāk koncentrēties uz patērētāja dīkstāves patēriņa optimizāciju, jo šajā laikā tas tiks atslēgts no barošanas, kas dod iespēju ērtāk mainīt patērētāja konfigurāciju. Tomēr jāņem vērā, ka patērētāja bloki ikreiz tiks inicializēti, kas biežas ieslēgšanas gadījumā var radīt būtisku enerģijas patēriņu, iespējams, novēršot atslēgšanas ekonomiju. Darba [110] autori diemžēl nav norādījuši ārējā barošanas avota spriegumu trešajā konfigurācijā — ja tas ticis uzturēts nemainīgi augsts, teiksim, startēšanās sprieguma  $3,16 V$  līmenī, tad dati drīzāk uzskatāmi par maksimālo, nevis nominālo patēriņu, jo realitātē spriegums un līdz ar to patēriņš kristos. Pētījumā netika minēts, vai bija centieni shēmas patēriņu starp cikliem samazināt. Nedaudz mulsinošs ir arī autoru [110] izvēlētais  $EAI$  ieslēgšanās spriegums,  $3,16 V$ , kura nav  $LTC2935$  ražotāja datu lapā (1.22. att., b), vai nu tā ir kļūda, un bija domāti  $3,15 V$ , vai arī autori bija izmērījuši viņu konkrētās mikroshēmas ieslēgšanās līmeni un lietojuši to precīzākai enerģijas novērtēšanai.

Jāatzīmē autoru [110] neraksturīgā mikroshēmas *LTC2935-1* izmantošana, jo pēc savas būtības tā ir sprieguma pārraudzības mikroshēma bateriju izlādes noteikšanai. Tai ir 2 izejas, viena signalizē, ka barošanā ir uzstādītais spriegums (1.22. att., *PFO*), bet otra dod zemu signālu nedaudz pēc barošanas sprieguma krituma zem uzstādītās normas (1.22. att., *RST*). Nepieciešamo minimālo barošanas spriegumu  $V_{PTF}$  (1.22. att., a,  $V_{CC}$  līkne) ieregulē ar 3 binārā līmeņa ieejām (1.22. att., b,  $S2-S0$ ), pieslēdzot zemu vai augstu līmeni katrā ieejā, izvēlas kādu no ražotāja fiksētām sprieguma vērtībām, toties pārstartēšanas līmenis  $V_{RTF}$  (1.22. att., a,  $V_{CC}$  līkne) ir 150 mV zem  $V_{PTF}$ . Tas domāts, lai atslēgtu patērētāja mikrokontrolleri pārāk zema sprieguma gadījumā, kamēr  $V_{PTF}$  ir kā brīdinājums kritušam līmenim. Toties autoru [110] piedāvātais *EAI* pieslēdz barošanu pie 3,16 V līmeņa ( $V_{on}$  1.21. att., b), bet ārkārtas atslēgšana ir būtiski zemāk pie 2,4 V ( $V_{min}$  1.21. att., b), ja vien pats patērētājs to nepārstartē pirmīt ( $V_{off}$  1.21. att., b). Tātad *LTC2935-1* uztur patērētāja darbību arī krietni zem sava  $V_{PTF}$  līmeņa un ir „pārstartējama”, lai gan ražotājs paredz tikai paša patērētāja pārstartēšanu caur mikroshēmu.



(b)

LTC2935-1/LTC2935-2		LTC2935-3/LTC2935-4				
RESET THRESHOLD (V)	POWER-FAIL THRESHOLD (V)	RESET THRESHOLD (V)	POWER-FAIL THRESHOLD (V)	S2	S1	S0
3.30	3.45	2.44	2.56	Low	Low	Low
3.15	3.30	2.32	2.44	Low	Low	High
3.00	3.15	2.20	2.32	Low	High	High
2.85	3.00	2.08	2.20	Low	High	Low
2.70	2.85	1.96	2.08	High	High	Low
2.55	2.70	1.84	1.96	High	Low	Low
2.40	2.55	1.72	1.84	High	Low	High
2.25	2.40	1.60	1.72	High	High	High

1.22. att. *LTC2935* mikroshēmas ieeju un izeju līmeņi laikā (a) un to izvēles iespējas atkarībā no ieeju  $S0-S2$  līmeņa (b).  $V_{cc}$  ir barošanas spriegums, *PFO* (*Power Fail Output*, invertēta) ir derīga barošanas sprieguma signāls, *RST* ir pārstartēšanas iezija, *MR* ir pašas mikroshēmas pārstartēšanas iezija [111].

Lai panāktu darbā [110] raksturoto funkcionalitāti, iespējams, tika lietota *LTC2935* sprieguma iestatīšanas īpašība — jo vairāk no ieejām  $S2-S0$  piesaistītas zemam spriegumam, jo augstāks ir  $V_{PTF}$  līmenis, turklāt tas ir maināms dinamiski. Tas paver iespēju kādu no  $S2-S0$  ieejām nulles līmeņa iegūšanai pieslēgt nevis zemei, bet gan, piemēram, pašas mikroshēmas patērētāja pārstartēšanas izejai (*RST*). Šādā konfigurācijā tur būs loģiskās nulles signāls līdz tiks sasniegts  $V_{PTF}$ , tad pēc mazas aiztures ( $t_{RST}$ , 1.22. att., a, *RST* līkne) pieslēgtajā  $S2-S0$  parādīsies loģiskais 1, tādējādi pazeminot uzstādīto  $V_{PTF}$  atbilstoši (1.22. att., b). Šī pieceja ļautu izmantot uzkrāto enerģiju līdz būtiski zemākām sprieguma vērtībām, turklāt, pievadot zemu

līmeni pārstartēšanas  $MR$  ieejā (1.22. att., a,  $RST$  un  $MR$  līknes), nolaidīsies arī  $RST$  līmenis, atkal paceļot  $V_{PTF}$ , rezultātā  $LTC2935$  tiks „pārstartēta” līdz ar patērētāju. Ja šai pieejai traucē  $t_{RST}$  aizture (200 ms), proti, spriegums pa šo laiku jau ir krities zem  $V_{PTF}$ , iepriekš raksturoto  $S2-S0$  līmeņu izmaiņu var veikt caur patērētāja mikrokontrolleri, bet  $RST$  izeju izmantot tā vadībai, rezultātā, kad tiks pārstartēts mikrokontrolleris,  $S2-S0$  atkal redzēs zemu līmeni un  $LTC2935$  tiks „pārstartēta”.

Darbā [110] nav paskaidrots iemesls tieši  $LTC2935-1$  lietošanai, jo tas izeju vadībai lieto *open-drain* slēgumu, bet  $LTC2935-2$  ir *push-pull* slēgums. Tādējādi sanāk, ka  $LTC2935-2$  spēj izejas pieslēgt tieši pie zemes vai barošanas, kamēr  $LTC2935-1$  tikai pie zemes, tādā darbā dotā slēguma (1.21. att., a) realizācijai patērētāju ieslēdzošais tranzistors jāpieslēdz pie augsta līmeņa ar papildu elementiem, kas sarežģīs sistēmu un var ieviest papildu strāvas noplūdes. Iespējams, ka tādā veidā tiek samazināta strāvas noplūde uz  $n$ -MOP lauktranzistoru (1.21. att., a) vai arī tā aizvars vienkārši nav paredzēts izturēt pilnu barošanas sprieguma līmeni, iemesls nav minēts.

## 1.5. Kopsavilkums

Nodaļā tika apskatītas publicētās iespējas iegūt elektroenerģiju no neviļus notiekošajām kustībām — enerģijas ievākšanu — un pārveidot to līdz izmantojamam spriegumam, kā arī novērtētas iespējas praktiski pielietot nelielo elektroenerģijas daudzumu. Starp mehāniskās enerģijas ievākšanas principiem ar savu izstrādes vienkāršību un potenciālo daudzveidību var izcelt elektromagnētisko principu. Tam ģenerēšanai nav vajadzīga kontroles shēma kā elektrostatiskajiem ievācējiem un īpaši materiāli kā pjezoelektriskajiem un triboelektriskajiem ievācējiem.

Ir publicēti dažādu konstrukciju enerģijas ievācēji ar elektromagnētisko principu cilvēka kustībām, augstākam sniegunam tie apvienoti hibrīdajos slēgumos ar citu principu ievācējiem. Rezultātā demonstrēti piemēri, kas ar cilvēka kustībām iegūst pietiekamu elektroenerģiju mazjaudas patērētājiem atbilstošā spriegumā. Lai gan pētījumos ir demonstrētas sistēmas, kuras var veikt autonomus uzdevumus paša cilvēka vai apkārtējās vides uzraudzībai, kā barošanas avotu izmantojot enerģijas ievācējus, tieši cilvēka kustību gadījumā elektromagnētiskais ievācējs vairumā tiek demonstrēts ar patērētāju bez konkrēta uzdevuma kā vien parādīt, ka barošana ir iespējama.

Ņemot vērā plašo ievācēju klāstu, iegūtās elektroenerģijas pārveidošana mēdz būt specifiska konkrētam ģeneratora piemēram. Piedāvāti dažādi sprieguma paaugstināšanas risinājumi, sākot ar sprieguma reizinātāja shēmām no komerciāli pieejamām diodēm, beidzot ar pašu veidotu pusvadītāju ierīcēm, kas spējīgas funkcionēt bez ārējas barošanas. Tādiem risinājumiem pieejamas arī komerciālas mikroshēmas, kas pārsvarā domātas līdzspriegumam. Starp plašpatēriņa elementiem atrodami mikrokontrolleri un sensoru shēmas, kuru zemais patēriņš var atbilst enerģijas ievācēju sniegunam. Neskatoties uz to, loģisko shēmu kontroles algoritmam var būt noteicoša nozīme uzticamas izmantošanas nodrošināšanai.

Lai gan sasniegumi šajā nozarē ir acīmredzami plaši, daudzos pētījumos iezīmējas pāris kopējas nepilnības:

- eksperimentālā pārbaude neparāda darbības stabilitāti paredzētajos darba apstākļos, tālab iegūtos rezultātus ne vienmēr var attiecināt uz praktiski sagaidāmajiem;
- maz vai vispār netiek pievērsta uzmanība elektroenerģijas pārveidošanas efektivitātei;
- apvienojot ievācējus, to savietojamība un individuālais ieguldījums netiek novērtēts;
- minimāli pievērsta uzmanība, kā konkrētie avoti un patērētāji var līdzdarboties reālās sistēmās, kur jāsaskaras, piemēram, ar pārtrauktu enerģijas plūsmu.

Izvērtējot cilvēka kustību enerģijas ievākšanu kā potenciālu barošanas avotu, jāņem vērā publikācijās novērotās nepilnības, tālab promocijas darba pētījumu izraudzīts veikt atsevišķos posmos, kas apskata īstenojamā barošanas avota sastāvdaļas, vadoties pēc to savstarpējās saderības. Iesākumā aplūkoti paša ievācēja uzlabojumi, lai tā izejas signāls būtu pēc iespējas augstāks, kā arī saderīgs ar turpmāku sprieguma pārveidošanu. Tālāk novērtēts ievācējam piemērotākais sprieguma pārveidotājs, kā arī tā ierobežojumi un iespējas. Kad ir veikti individuāli sistēmas uzlabojumi, lai iegūtu augstāko iespējamo sniegumu konkrētajos apstākļos, pārbaudītas iespējas izmantot apvienošanu ar papildu avotu, izveidojot hibrīdo ievācēju. Visbeidzot enerģijas ievācēju sistēma ar patērētāju, kas ir spējīgs veikt sensoru tīkliem raksturīgu uzraudzības uzdevumu, novērtēta sagaidāmajos cilvēka kustību apstākļos. Turklāt, lietojot vien plašpatēriņa komponentes, tiek demonstrētas sistēmas praktiskās realizācijas iespējas un plašāks izmantošanas un uzlabojumu potenciāls

## 2. ELEKTROMAGNĒTISKAIS KUSTĪBU ENERĢIJAS IEVĀCĒJS

Lai izpētītu kustību enerģijas ievācēju kā praktiski lietojamu barošanas avotu, jāsāk ar paša ģenerators raksturojumu. Elektromagnētisko kustību enerģijas ievācēju varianti, kā parādīja publicēto risinājumu analīze, pārsvarā ir monolītas struktūras ar iekšējo tilpumu, kurā pārvietojas magnētiskā lauka avots. Toties, ja šādu struktūru sadala pa komponentēm, var iegūt fiziski mazāku un cilvēkam piemērotāku enerģijas ievācēja uzbūvi. Galvenā priekšrocība izpaužas kā iespēja lietot ķermeņa daļas, kas tāpat pārvietojas viena gar otru — rokas gar torsu un kājas viena gar otru —, tādējādi pazūd nepieciešamība pēc nelietderīgā tilpuma magnēta kustībām, turklāt nebūs jāiekļaujas ierobežotos rezonanses nosacījumos.

Šajā nodaļā tiks piedāvāts dotā ievācēja matemātiskais modelis un apskatīts praktiskais sniegums reālistiskos apstākļos, novērtētas iespējas ģenerētās maiņstrāvas taisngriešanai turpmākas izmantošanas nolūkam.

### 2.1. Matemātiskais modelis

Tā kā elektromagnētiskā ģenerators detaļu kustībai jānorit vienai gar otru, tiem jābūt plakaniem. Šajā gadījumā spole izveidojama kā spirāle, tālāk teorētiski apskatīsim, no kā atkarīgs enerģijas daudzums, kas tiks ģenerēts spolē, homogēnam magnētiskam laukam ar plakānu fronti šķērsojot doto induktoru gar tā diagonāli. Aprēķinu vienkāršošanai modeļa spole veidota no viena vijuma, kas aizpilda visu tās laukumu.

Vijumā ģenerēto elektrodzinējspēku (EDS) var aprēķināt ar Faradeja likumu, kas nosaka, ka EDS ir vienāds ar magnētiskās plūsmas izmaiņu ātrumu noslēgtā kontūrā. Var pieņemt, ka, esot tiešā magnēta virsmas tuvumā, vijumu ieskaujošais magnētiskais lauks ir homogēns un perpendikulārs tam. Dotajā gadījumā EDS raksturo vienādojums (2.1).

$$\varepsilon = B \frac{dS_{vijums}}{dt}, \quad (2.1)$$

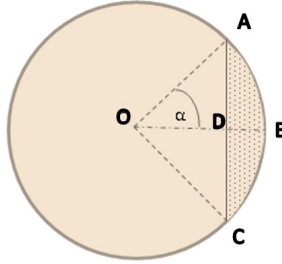
kur  $\varepsilon$  — elektrodzinējspēks vijumā, V;

$B$  — magnētiskā lauka indukcija, T;

$S_{vijums}$  — vijuma laukums, ko šķērso magnētiskais lauks, m<sup>2</sup>;

$t$  — šķērsošanas laiks, s.

Pieņemts, ka magnēts virzīsies cauri apla centram, tātad tā trajektorija sakrīt ar diagonāli. Lai aprēķinātu EDS, jānosaka magnētiskā lauka šķērsotais apla laukums atkarībā no laika. Lauka fronte vienkāršībai pieņemta kā taisne, kas perpendikulāra diagonālei, tāpēc šķērsoto laukumu var raksturot kā segmentu (2.1. att.,  $ABC$ ), kura laukums atbilst izteiksmei (2.2). Sekojoši, noietais ceļš laika momentā  $t$  ir vienāds ar dotā segmenta augstumu  $DB$  (2.3). Atbilstošais leņķis trīsstūrim  $AOC$  nosakāms ar vienādojumu (2.4).



2.1. att. Magnēta šķērsotā laukuma (segments  $ABC$ ) aprēķins, izmantojot sektora  $AOCB$  un trīsstūra  $AOC$  laukuma starpību.

$$S_{vijums} = S_{AOCB} - S_{AOC} = \alpha \cdot r^2 - (r - h)\sqrt{r^2 - (r - h)^2}, \quad (2.2)$$

$$h = v \cdot t, \quad (2.3)$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{r-h}{r}\right), \quad (2.4)$$

kur  $S_{vijums}$  — magnēta šķērsotā vijuma laukums,  $m^2$ ;

$\alpha$  — puse no sektora  $AOCB$  leņķa, grādi;

$r$  — vijuma rādiuss,  $m$ ;

$h$  — magnēta šķērsotā segmenta dziļums  $DB$ ,  $m$ ;

$v$  — kustības ātrums,  $m/s$ ;

$t$  — kustības laiks,  $s$ .

Ievietojot (2.3) un (2.4) izteiksmē (2.2), tiek iegūts magnēta šķērsotais laukums, ko tālāk nepieciešams atvasināt pēc laika (2.1), lai iegūtu izteiksmi ģenerētajam elektrodzinējspēkam (2.5). Saskaņā ar Džoula-Lenca likumu, uz slodzes izdalīto jaudu var izteikt ar (2.5), tālāk kopējo enerģiju aprēķināt kā jaudas integrāli laikā (2.7).

$$\varepsilon = 2 \cdot r \cdot v \cdot B \sqrt{1 - \left(1 - \frac{v \cdot t}{r}\right)^2}, \quad (2.5)$$

$$P = I \cdot U = \frac{U^2}{R} = I^2 \cdot R, \quad (2.6)$$

$$E = \int P dt, \quad (2.7)$$

kur  $E$  — enerģija, kas izdalās uz slodzes,  $J$ ;

$P$  — momentānā uz slodzes izdalītā jauda,  $W$ ;

$R$  — slodzes pretestība,  $\Omega$ ;

$U$  — spriegums uz pieslēgtās pretestības,  $V$ ;

$I$  — strāva slodzē,  $A$ .

Pieņemot, ka pieslēgtās slodzes pretestība atbilst paša tinuma pretestībai, spriegums uz tās būs puse no nomērītās EDS vērtības. Savukārt integrēšanas periods ir no kustības sākuma ( $t = 0$ ), kad magnēts nav virs vijuma, līdz laikam, kad magnēts ir pārklājis visu apla laukumu



( $t = 2r/v$ ). Rezultātā iegūst izteiksmi (2.8), kas izsaka maksimālo enerģiju, ko varēs iegūt no dotā vijuma uz salāgotas slodzes pretestības  $R$  konkrētos apstākļos.

$$E = 1.33 \cdot \frac{B^2 r^3 v}{R} \quad (2.8)$$

Doto sakarību var vienkāršot, ņemot vērā vijuma pretestību kā (2.9), kur garums  $l$  atbilst riņķa līnijas garumam (2.10). Apvienojot izteiksmes ar (2.8), iegūst sakarību maksimālajai enerģijai, kas ņem vērā vijuma vadītāja šķērsriezuma laukumu un materiāla īpašības (2.11).

$$R = \frac{l \rho}{S_{\text{šķērs}}}, \quad (2.9)$$

$$l_{\text{riņķa līnija}} = 2\pi r, \quad (2.10)$$

$$E = 0.665 \cdot \frac{B^2 r^2 v S_{\text{šķērs}}}{\pi \rho}, \quad (2.11)$$

kur  $\rho$  — vadītāja materiāla īpatnējā pretestība,  $\Omega \cdot m$ ;

$l$  — vadītāja, šajā gadījumā riņķa līnijas, garums,  $m$ ;

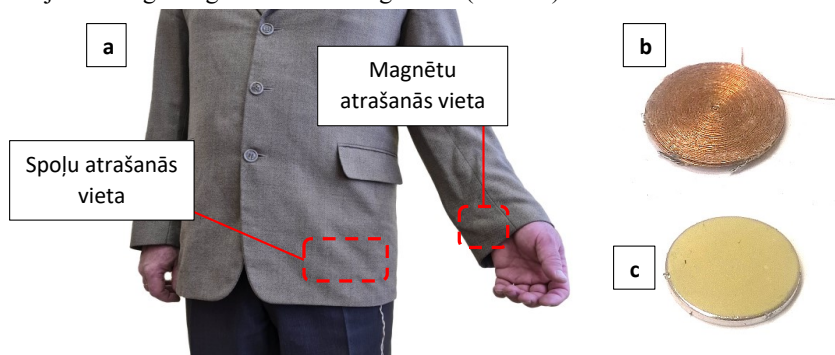
$S_{\text{šķērs}}$  — vadītāja šķērsriezuma laukums,  $m^2$ .

Vienādojums (2.11) raksturo teorētiski iegūstamo enerģiju no konkrēto parametru kopuma. Tā kā modelis ir vienkāršots, tas nav domāts kvantitatīvi precīzām vērtībām, bet gan sakarību novērtējumam. Iegūtajā vienādojumā redzams, ka ģenerētā enerģija pieaug kvadrātiski līdz ar dotās spoles rādiusu un magnētiskā lauka indukciju, tamdēļ šo parametru palielināšana ir primāra. Tā kā magnētiskajam laukam ir jānosedz viss induktora izmērs, spoles izmērus un līdz ar to enerģijas daudzumu ierobežo magnēta laukums. Izriet, ka visizdevīgāk lietot magnēta izmēriem atbilstošu spoli, kopējos izmērus, protams, limitēs paredzētās izvietojuma vietas ierobežojumi. Augstāka sprieguma iegūšanai būtu nepieciešams izmantot vairākus vijumus, bet līdz ar to vada šķērsriezuma laukums  $S_{\text{šķērs}}$  samazināsies un tāpat iegūstamā enerģija kritīsies. Lai pieaugtu vijumu skaits ar nemainīgu  $S_{\text{šķērs}}$ , vadītāja platumam jāsamazinās, bet dziļumam jāpieaug, toties var radīt sarežģītumus spoļu izveidē nestandarta vada formas dēļ. Šīs problēmas risinājumam var izvēlēties mazāk vijumu, tāpat resnāku vadu, bet vairākas spoles izvietot citu virs citas, saslēdzot tās virknē. Rezultātā magnētiskā lauka šķērsoto vadu šķērsriezuma laukums pieaugs, bet virknes slēgums nodrošinās spoļu slāņu summāro spriegumu. Paralēlais slēgums nebūtu izdevīgs tamdēļ, ka, esot citai virscitas, dilstošā magnētiskā lauka dēļ pat fiziski vienādas spoles ģenerētu atšķirīgu spriegumu, un tā rezultātā tās tiktu savstarpēji slogotas.

## 2.2. Praktiska ievācēja pārbaude

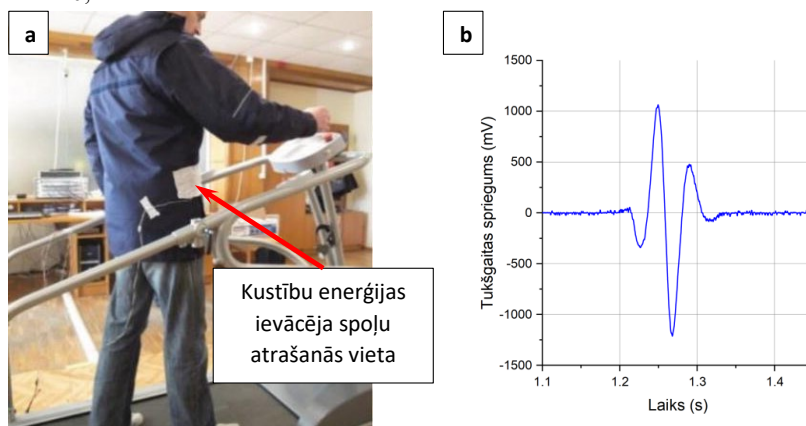
Dotā elektromagnētiskā cilvēka kustību ievācēja izveides īpatnības, uzbūve un izvietojums ir apskatīti G. Terļeckas promocijas darbā [112] un publikācijās ar autora līdzdalību [23], [24], [113]. Tika praktiski noskaidroti priekšnosacījumi vairāku spoļu izvietojumam blakus, lai to impulsi magnēta kustības laikā konstruktīvi pārklātos, kā arī spoļu slāņu skaits, virs kura jaudas blīvums ievācējam sāk kristies, jo papildu spoļu sniegums ir mazāks par zudumiem pieaugušās pretestības dēļ. Iegūts izkārtējums, kurā 3 piecu slāņu spoles izvietotas rindā apģērba sānos

iegurņa augstumā, bet piedurknes galā attiecīgi atrodas divi magnēti, kuriem poli ir pretēji vērsti straujāk mainīga magnētiskā lauka iegūšanai (2.2. att.).



2.2. att. Elektromagnētiskā kustību enerģijas ievācēja prototips vīriešu žaketē (a), atsevišķi viena daudzslāņu spoles (b) un magnēts (c) ar 20 mm diametru.

Dotajam ievācēja izkārtojumam veikta eksperimentālā pārbaude. Reālistisku kustības apstākļu nodrošināšanai soļošana veikta ar fiksētiem ātrumiem diapazonā no 3 līdz 6 km/h, to uzturēšanai lietots elektriskais skrejceļa trenāžieris. Pārbaudīti atšķirīgi prototipi: vīrieša žakete (2.2. att.) un ziemas virsjaka (2.3. att., a), tajā izmantotas nedaudz lielākas spoles (25 mm, žaketē 20 mm) un attiecīgi magnēti ar augstāku indukciju (0,26 T, žaketē 0,2 T), bet elementi atrodas tuvāk pleca locītavai (zem elkoņa, žaketē pie delnas), tātad tiem ir mazāks relatīvais ātrums. Vada diametrs un spoļu skaits abiem prototipiem ir vienāds — 3 piecu slāņu spoles rindā, tītas ar 0,22 mm vadu.



2.3. att. Virsjaka ar elektromagnētisko kustību enerģijas ievācēju eksperimentā uz skrejceļa (a) un tukšgaitas sprieguma paraugs (b).

Mērot ģenerēto tukšgaitas spriegumu, var novērtēt, vai tas būs pietiekams turpmākai izmantošanai, kā arī noteikt sagaidāmo signāla formu un teorētiski maksimālo jaudu dotajā konfigurācijā. Rokai pārvietojoties gar sānu, kur atrodas ievācēja spoles, tiek ģenerēta viena impulsa kopa (2.3. att., b), to atkārtošanās periods atkarīgs no cilvēka rokas kustībām un

soļošanas ātruma, eksperimentā tas nebija īsāks par 500 ms. Signālam raksturīgi augstāki pīķi kopas vidū, jo spoles izvietotas un saslēgtas tādā veidā, lai, magnētam virzoties pāri tām, katras spoles pēdējais pusperiods pārklātos ar nākamās spoles pirmo pusperiodu. Tā kā ir trīs spoles virknē, vidējās spoles spriegums pilnībā summējas ar malējo pusperiodiem, bet formas asimetriju izraisa izmaiņas magnēta trajektorijā — vai nu magnēta centrs nešķērso visu spoļu centrus, vai arī mainās tā attālums. Doto asimetriju pilnībā novērst, domājams, nav iespējams, jo tā atkarīga no cilvēka kustībām un apģērba īpašībām. Augstākā amplitūda eksperimentos variēja diapazonā 0,2–1,2 V, atkarībā no iešanas ātruma un apģērba veida. Teorētiski maksimālā jauda noteikta, pieņemot, ka spriegums uz salāgotas slodzes būs puse no tukšgaitas sprieguma, tālāk momentāno jaudu var noteikt ar (2.6), lai aprēķinātu vidējo jaudu laikā: tā palielinās līdz ar kustības ātrumu no 0,18 līdz 0,5 mW, kas atbilst neinerčiālas sistēmas uzvedībai. Pieaugot ātrumam, pastiprinās arī rezultātu izkliede — pie 3 km/h tā ir ap 13 %, bet pie 6 km/h vidēji 25 %, atkarībā no apģērba blīvuma un, protams, cilvēka kustības īpatnībām. Blīvāks apģērbs (virsjaka) pārsvarā sniedza mazāku izkliedi, jo atsevišķajām ģeneratora daļām ir mazāka brīvkustība. Lielāka relatīvā ātruma, bet mazāku izmēru prototips (žaketē) uzrādīja caurmērā par 10 % zemāku vidējo jaudu. Absolūtās vērtības abiem prototipiem nevar viennozīmīgi salīdzināt, jo tie pārbaudīti ar dažādiem subjektiem, lai gan līdzīgie augumi un fiksēts soļošanas ātrums ļauj pieņemt, ka kustību parametriem jābūt tuviem. Iegūtie elektriskie parametri kalpo kā vadlīnija, parādot, ka konkrētais ievācēja prototips ir potenciāli izmantojams turpmākai sprieguma paaugstināšanai.

## 2.3. Zemsprieguma taisngriešana

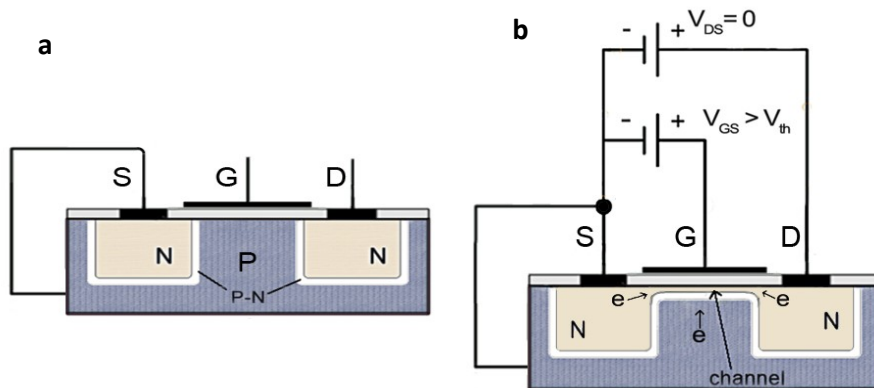
Enerģijas ievācēja ģenerētais maiņspriegums ir salīdzinoši zems un ar nevienmērīgu amplitūdu, praktiskajos eksperimentos tukšgaitas maksimālā amplitūda nepārsniedza 1,2 V. Lai elektroenerģijas turpmāka izmantošana būtu pēc iespējas efektīvāka, nepieciešams zems sprieguma kritums uz taisngriešanas elementiem. Aktīvā taisngriešana tam būtu vispiemērotākā, bet tai nepieciešama nepārtraukta ieejas signāla uzraudzīšana un tātad arī barošana, šajā aspektā pasīvie elementi ir izdevīgāki, jo to funkcionēšana nav atkarīga no barošanai pieejamās elektroenerģijas. Dotajā apakšnodalā piedāvāta metode taisngriešanai izmantot tranzistorus nepilnīgi atvērtā stāvoklī, novērtējot tās sniegumu un izmantošanas iespējas. Esošajam kustību enerģijas ievācēja prototipam tiks arī pārbaudīta taisngriešanas lietderība ar diskrētiem pasīvajiem elementiem — īpaši zema sprieguma krituma diodēm.

### 2.3.1. Pasīva taisngriešana ar MOP lauktranzistoru

#### 2.3.1.1. Darbības princips

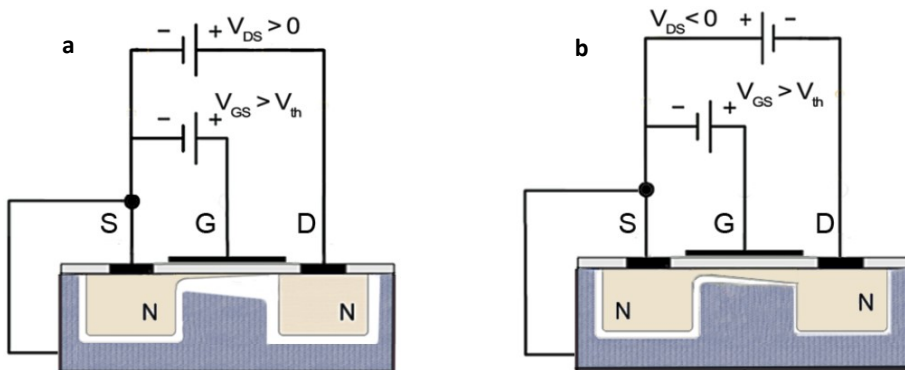
Metāla-oksīda-pusvadītāja (MOP) lauktranzistoru (angļu val. — *MOSFET*) darbības principa apskatei vienkāršotā veidā lietots  $N$  kanāla MOP lauktranzistors ar inducēto kanālu. Tam ir  $P$  tipa pamats (substrāts) un  $N$  tipa apgabali, kas kalpo par izteci un noteci (2.4. att., *source* un *drain*), un metālisks aizvars (*gate*), ko no pusvadītāja atdala nevadoša oksīda kārtiņa.

Uz izteces un noteces apgabalu robežas rodas  $P-N$  pāreja; ņemot vērā, ka iztece vairumā MOP lauktranzistoru korpusu tiek elektriski savienota ar substrātu, veidojas parazītiska diode uz noteci. Lai gan šis efekts var tikt izmantots shēmās [114], tas pārsvarā ir nevēlams, jo ierobežo iespējas izmantot pretēju polaritāti lauktranzistora iztecei un notecēi.



2.4. att. Vienkāršota ilustrācija  $N$  tipa MOP lauktranzistoram bez pievadīta aizvara sprieguma (a) un ar to (b), inducējot vadošu kanālu. Apzīmējumi:  $S$  — iztece (angļu val. — *source*),  $G$  — aizvars (angļu val. — *gate*),  $D$  — notece (angļu val. — *drain*),  $e$  — elektronu virzība, formējot kanālu, *channel* – kanāls starp izteci un noteci,  $V_{th}$  — kanāla izveidošanās sliekšņa spriegums.

Pievadot elektrisko spriegumu starp izteci un aizvaru (2.4. att., *source* un *gate*), elektriskais lauks pievelk brīvos elektronus (2.4. att., b), tā rezultātā inducējas kanāls starp izteci un noteci. Sprieguma vērtība, pie kuras inducējas kanāls, piemērā nosaukta par  $V_{th}$ . Tālāka šīs vērtības palielināšana tikai paplašinās kanālu. Toties, ja pie nemainīga aizvara–izteces (*gate–source*) sprieguma tranzistoram tiks pievadīts noteces–izteces (*drain–source*) spriegumu, notiks kanāla sašaurināšanās pie noteces (2.5. att., a). Tas notiek tāpēc, ka uz kanāla izveidojusies potenciālu nevienmērība: ja aizvara–izteces spriegums, teiksim, būtu 3 V (2.5. att., a,  $V_{GS}$ ), bet noteces–izteces spriegums 2 V (2.5. att., a,  $V_{DS}$ ), aizvara–noteces potenciālu starpība būtu tikai 3 – 2 = 1 V, tamdēļ kanāls sašaurinās pie noteces, jo tur ir zemāks spriegums pret aizvaru nekā izteces pusē.



2.5. att. Inducētā kanāla un  $P$ - $N$  pārejas nevienmērīgā sašaurināšanās un paplašināšanās atkarībā no izteces–noteces sprieguma virziena: ja noteces spriegums augstāks (a) un zemāks par nulli (b).

Tālāka noteces–izteces (*drain-source*) sprieguma paaugstināšana arī paplašinās  $P$ - $N$  apgabalu noteces pusē, jo šādi pieliktais spriegums ir sprostvirzienā pret substrātu, ar ko ir savienota iztece. Toties pats kanāls turpinās atkāpties no noteces apgabala, jo noteces–izteces potenciālu starpība turpinās samazināties attiecībā pret pretējo apgabalu. Kanāla sašaurināšanās un atkāpšanās MOP lauktranzistora darbībā novērojama kā caur to plūstošās strāvas piesātinājums, kad, paaugstinot noteces–izteces spriegumu, strāva vairs nepalielinās. Turpmākai lineārai darbībai būtu jāpalielina aizvara–izteces spriegums, ja vien tas iespējams, necaursitot dielektriķi.

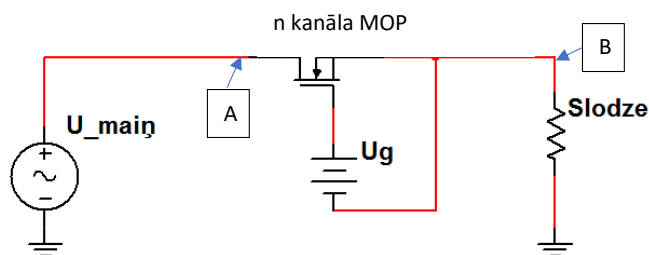
Šādu kanāla sašaurināšanos potenciāli var izmantot strāvas bloķēšanai pie pieaugoša noteces–izteces sprieguma — ja inducētais kanāls ir pietiekami mazs, tad teorētiski jebkāds pozitīvs noteces–izteces spriegums liks tam atkāpties un sašaurināties, ierobežojot turpmāku strāvas plūsmu. Turpretim, ja noteces–izteces spriegums kļūst negatīvs, jānotiek pretējam efektam: spriegums starp noteci un aizvaru būs augstāks nekā starp aizvaru un izteci, tamdēļ kanāls noteces pusē paplašināsies (2.5. att., *b*). Šī parādība varētu tikt lietota īpaši mazu spriegumu taisngriešanai, turklāt nepieciešamais vadības spriegums (aizvara–izteces spriegums) būtu laikā nemainīgs, tātad neatkarīgs no ieejas signāla pusperioda kā tas ir nepieciešams aktīvajiem taisngriežiem. Aizvara–izteces sprieguma vērtība šādā gadījumā noteiktu taisngriešanas parametrus: pievadot aizvaram tādu spriegumu, kas nepieciešams kanāla formēšanai ar mazu vadītspēju virzienā no noteces uz izteci, var uzstādīt piesātinājuma strāvu, tātad teorētiski arī taisngrieža sprostvirziena strāvu. Protams, pavisam neliels kanāls arī ierobežos nepieciešamajā virzienā plūstošo strāvu.

Pēc iepriekš raksturotā var rezumēt, ka, pieliekot maiņspriegumu starp izteci–noteci, viens pusperiods sašaurinās tik tikko izveidoto kanālu un strāva tiks ierobežota, kamēr pretējais pusperiods paplašinās kanālu un strāva pieaugs. Taisngriešana šajā gadījumā notiek MOP lauktranzistora parazītiskās diodes virzienā, proti, tiek caurlaista strāva pretēji normālam slēdža darba režīmam, kas teorētiski sniedz papildu priekšrocību: ja uz aizvara nepieciešamais spriegums netiks nodrošināts, piemēram, sistēmai esot bez barošanas ilgstoši, tad taisngriešanas

uzdevumu veiks parazītiskā diode. Protams, šis ir neizdevīgs scenārijs, jo tai sliekšņa spriegums parasti ir salīdzinoši augsts — vairāki simti milivoltu.

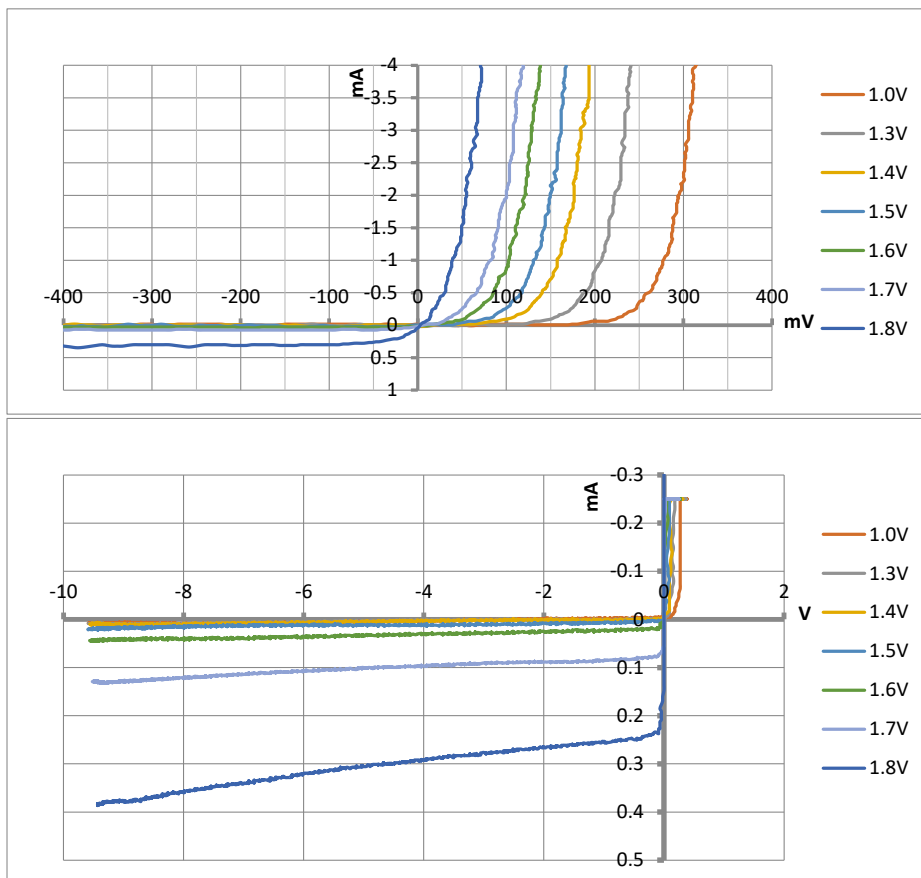
### 2.3.1.2. Aizvara sprieguma ietekmes eksperimentālā pārbaude

Lai pārbaudītu iepriekš raksturotā efekta praktiskās izpausmes, izmērītas MOP lauktranzistoru volt–ampēru raksturlīknes pie dažādām aizvara sprieguma vērtībām. Mērīšanas shēma sastāv no sinusoidāla signāla avota ar maināmu amplitūdu, slodzes pretestību, un MOP lauktranzistora, kuram pievadīts aizvara spriegums ar galvaniski atsaistītu, regulējamu līdzsprieguma avotu (2.6. att.). Spriegumu uz taisngriešanas elementa nosaka kā potenciālu starpību starp punktiem *A* un *B*, bet strāvu ķēdē aprēķina no sprieguma *B*, kas krīt uz zināmas rezistīvas slodzes pretestības vērtības.



2.6. att. Voltampēru raksturlīkņu mērīšanas principiālā shēma.  $U_g$  – fiksēts aizvara spriegums. Punktos *A* un *B* mērīts sprieguma kritums pret zemi.

Sprieguma vērtībai uz aizvara jābūt tuvu lauktranzistora atvēršanās sliekšņa spriegumam, jo stipri zemākas vērtības neinducēs pietiekamas vadītspējas kanālu, un tiks novērota tikai parazītiskās diodes darbība, bet augstākas vērtības radīs lineāru pretestības apgabalu reģionā ap nulles izteces–noteces spriegumu vērtību. Mērījumu veikšanai izvēlēti dažādi pieejamie plašpatēriņa MOP lauktranzistori ar inducēto kanālu. Apstrādājot rezultātus, iegūtas volt–ampēru raksturlīknes pie dažādām aizvara sprieguma vērtībām, raksturīga aina redzama nākamajā attēlā (2.7. att.).



2.7. att. Voltampēru raksturlīknes IRF7832 MOP lauktranzistoram atkarībā no aizvara sprieguma dažādā diapazonā.

Kā parāda 2.7. att., izmantojot dažādu aizvara–izteces spriegumu, MOP lauktranzistoram mainās voltampēru raksturlīknes parametri. Atbilstoši pirmīt paredzētajam, sprostvirzienā, kas faktiski ir lauktranzistora kā slēdža normālais darba virziens, novērojams strāvas piesātinājums, kas atkarīgs no izmantotā aizvara sprieguma. Toties tiešajā taisngrieža virzienā, kas MOP lauktranzistoram ir parazitiskās diodes virziens, iespējams iegūt dažādu atvēršanās sliekšņa spriegumu, kas pazeminās līdz ar augstāku aizvara sprieguma vērtību. Lai skaitliski novērtētu dažādu lauktranzistoru vadītspēju tiešajā un sprostvirzienā, izvēlēts salīdzināt izteces–noteces strāvu pie neliela pretēji slēgta sprieguma. Salīdzinājumam patvaļīgi izvēlētas trīs aizvara sprieguma vērtības, kas ir zemākas par lauktranzistora atvēršanās spriegumu, un pēc kurām tranzistors sāk straujāk atvērties abos virzienos.

Dažādu  $N$  tipa MOP lauktranzistoru izteces–noteces strāvas salīdzinājums pie izteces–noteces sprieguma  $-50$  mV un  $50$  mV, atkarībā no aizvara sprieguma.

Modelis	Aizvara spriegums	Izteces–noteces strāva (mA)		Modelis	Aizvara spriegums	Izteces–noteces strāva (mA)	
		$-50$ mV	$50$ mV			$-50$ mV	$50$ mV
<i>BUZ12</i>	2,6	-0,1	1	<i>IRF7403</i>	2	-0,02	0,2
	2,7	-0,5	1,2		2,1	-0,07	0,6
	2,8	-0,9	5		2,2	-0,25	1,5
<i>IRF7832</i>	1,6	-0,03	0,1	<i>IRF7303</i>	1,5	-0,01	0,1
	1,7	-0,07	0,25		1,6	-0,05	0,25
	1,8	-0,2	1,5		1,7	-0,16	1,1
<i>IRF7413</i>	1,6	-0,01	0,05	<i>IRF840</i>	2,7	-0,025	0,25
	1,7	-0,03	0,1		2,8	-0,1	0,5
	1,8	-0,08	0,3		2,9	-0,3	1

Kā var redzēt tabulā 2.1, ar šādu metodi iespējams iegūt taisngriezi, kas jau pie  $50$  mV tiešajā virzienā vada strāvu tuvu vai pat virs  $1$  mA, bet tai pašā laikā tam būs būtiska noplūdes strāva sprostvirzienā. Var arī novērot, ka pie aizvara sprieguma izmaiņām par  $0,1$  V taisngrieža vadītspēja pieaug vai samazinās vairākas reizes. Šis rada acīmredzamus sarežģījumus dotās metodes izmantošanai praksē, jo izriet, ka stabili taisngriešanas parametru uzturēšanai aizvara–izteces spriegums jānodrošina nemainīgs vismaz milivoltu desmitu robežās.

### 2.3.1.3. Salīdzinājums ar Šotki pārejas diodi

Iepriekšējā sadaļā tika teorētiski pamatotas un arī praktiski novērotas MOP lauktranzistoru volt–ampēru raksturlielnes, kas norāda uz iespēju tos izmantot kā pasīvus taisngriešanas elementus zema sprieguma avotiem. Tomēr lielās sprostvirziena strāvas esamība var samazināt vai pat pilnībā novērst jebkādu ieguvumu no zemāka sliekšņa sprieguma, tamdēļ sniegumu vērts praktiski salīdzināt ar diskreto pusvadītāju, ņemot vērā arī zudumus. Mērīšanas shēma atbilst parādītajai 2.6. att., bet signāla avots ir mazs elektromagnētiskais kustību enerģijas ievācējs, kas sastāv no vienas trīs slāņu spoles, virs kuras tiek automātiski pārvietots magnēts. Mazāks ģenerators izvēlēts izmantotās automatizēto kustību iekārtas izmēru ierobežojumu dēļ. Izejas tukšgaitas sprieguma amplitūda ir ap  $220$  mV, kas aptuveni atbilst zemākajai novērotajai prototipa testos (nodaļa 2.2), slodzes pretestība izvēlēta  $3,7$   $\Omega$ , kas sakrīt ar kustību enerģijas ievācēju pretestību.

Salīdzināšanai izvēlēta Šotki pārejas diode *IN5822*, tai noteikta  $0,9$   $\mu$ A noplūdes strāva sprostvirzienā pie  $-0,2$  V, tamdēļ salīdzināšanai izvēlēts lauktranzistors *IRF7832* ar aizvara spriegumu  $1,5$  V, jo tam noplūde pie tiem pašiem  $-0,2$  V ir desmit reizes augstāka —  $9,4$   $\mu$ A. Sprostvirzienā noplūdes tika apskatītas pie sprieguma, kas tuvs avota tukšgaitas spriegumam, lai precīzāk novērtētu augstāko noplūdes strāvu. Savukārt tiešajā virzienā pie  $50$  mV sprieguma



krituma dotā Šotki pārejas diode vada 11  $\mu\text{A}$ , pie 100 mV jau 78  $\mu\text{A}$ , bet tranzistors attiecīgi 32  $\mu\text{A}$  un 280  $\mu\text{A}$ .

Tā kā tiek lietots viena pusperioda taisngriezis, otrs pusperiods var tikt izmantots sprostvirziena zudumu ietekmes novērtēšanai. Ja no volt–ampēru raksturlīknēm (2.7. att.) izsaka pretestību kā matemātisku funkciju no sprieguma, uz tā izdalīto jaudu var noteikt pēc (2.6) ar sprieguma mērījumiem. Šis paņēmieni ir nepieciešams tieši sprostvirzienam, jo tiešajā virzienā sprieguma kritums uz slodzes ir būtiski augstāks, tamdēļ var tikt uzticamāk izmērīts, lai izmantotu strāvas un tātad arī jaudas aprēķinam. No jaudas uz slodzes un taisngrieža tiešajā un sprostvirzienā iegūstama enerģija (2.7), efektivitāti tālāk var izteikt ar sekojošo lietderības koeficienta izteiksmi (2.12). Aprēķinā netiek ņemta vērā enerģija, kas nepieciešama aizvara sprieguma uzturēšanai.

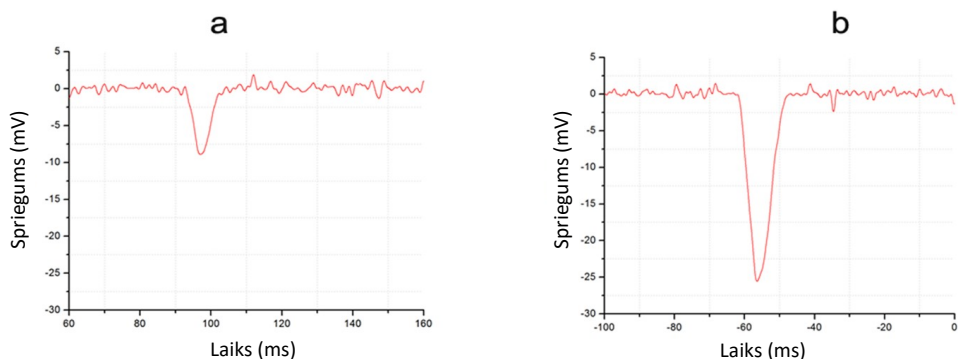
$$\eta = \frac{E_{slodze}}{E_{slodze} + E_{taisngr} + E_{sprostv}} \cdot 100\%, \quad (2.12)$$

kur  $\eta$  — lietderības koeficients konkrētajam taisngriežim;

$E_{slodze}$  — enerģija uz slodzes pēc taisngrieža, J;

$E_{taisngr}$  — enerģija, kas izdalās uz taisngrieža tiešajā vadīšanas virzienā, J;

$E_{sprostv}$  — enerģija, kas izdalās uz taisngrieža un slodzes sprostvirziena noplūžu laikā, J.



2.8. att. Taisngrieztā pusperioda signāls uz slodzes, izmantojot Šotki pārejas diodi *IN5822* (a) un MOP lauktranzistoru *IRF7832* ar aizvara spriegums 1.5 V (b).

Slodzes pretestība ir vienāda ar avota iekšējo pretestību, tamdēļ pat ideālā taisngriešanas procesā uz slodzes būtu tikai puse no ieejas tukšgaitas sprieguma — 110 mV. 2.8. att. parāda, ka ar MOP lauktranzistora shēmu ir iegūstams augstāks taisngriežtais impulss uz slodzes, kas atbilst iepriekš noteiktajai augstākai vadītspējai pie vienādā sprieguma krituma. Arī absolūtās sprieguma pīķa vērtības ir tuvas strāvas vadītspējas aptuveni trīskāršajai attiecībai: 8,5 mV pret 25 mV (2.8. att., a un b). Lai gan ir iegūta augstāka taisngrieztā pīķa vērtība, jāņem vērā zudumi sprostvirzienā, tamdēļ, izmantojot sakarību (2.12), aprēķināta katra pusperioda taisngrieža darba efektivitāte:  $\eta_{IN5822} = 3\%$ ,  $\eta_{IRF7832} = 11\%$ . Abiem taisngriežiem aprēķins veikts desmit impulsu garam signālam. Nelielās vērtības paskaidrojamas gan ar zemo tukšgaitas spriegumu, kura dēļ taizngrieži darbojās mazas vadītspējas režīmā, gan arī ar zemo slodzes

pretestību, kuras dēļ ķēdē ir salīdzinoši augstāka strāva, palielinot zudumus gan uz taisngrieža, gan avota iekšējās pretestības. Lai gan kopējā efektivitāte abiem taisngriežiem ir zema, MOP lauktranzistora shēma uzrāda būtiski augstāku vērtību. Skaidrs, ka atšķirība nebūtu dažādās kārtās, ja mērījumi tiktu veikti pie stiprāk atvērtiem taisngriežiem, bet eksperiments parāda iespējamo ieguvumu, strādājot tuvu robežvērtībām.

Apkopojot rezultātus, dotajai metodei ir novērojami vairāki trūkumi. Lai gan īsā laika periodā aizvara spriegumu varētu nodrošināt kondensators, tādējādi enerģija tiktu patērēta vien tā uzlādes laikā, ilgstošā darbībā šis variants prasītu regulāru uzraudzību, jo notiktu gan izlāde caur elementu parazītiskajām noplūdēm, gan arī sprieguma maiņa līdz ar ieejas signāla ietekmi uz kondensatoru caur lauktranzistora izvadu savstarpējo kapacitatīvo saikni. Ja spriegums ir jāuzrauga un jāpielāgo regulāri, funkcionalitāte tuvojas aktīvās taisngriešanas principam. Lai gan uzraudzīšana dotajā variantā nav nepieciešama nepārtraukti, kas var ietaupīt enerģiju, aktīvajos taisngriežos slēdži tiek atvērti un aizvērti pilnībā, būtiski uzlabojot taisngriešanas efektivitāti. Ar pusperioda taisngriezi ieejas signāls netiek izmantots lietderīgi, nepieciešams izmantot pilna perioda, piemēram, tilta taisngrieža slēgumu, kas arī sarežģītu katra aizvara sprieguma uzraudzības un uzturēšanas sistēmu, padarot to risinājumu komplicētāku un, domājams, mazāk lietderīgu. Praktiskai izmantošanai būtu jānovērtē arī temperatūras ietekme uz taisngriešanas parametriem pie nemainīga aizvara sprieguma, kā arī voltampēru raksturlienes pastāvīgums dažādiem viena modeļa MOP lauktranzistoru paraugiem.

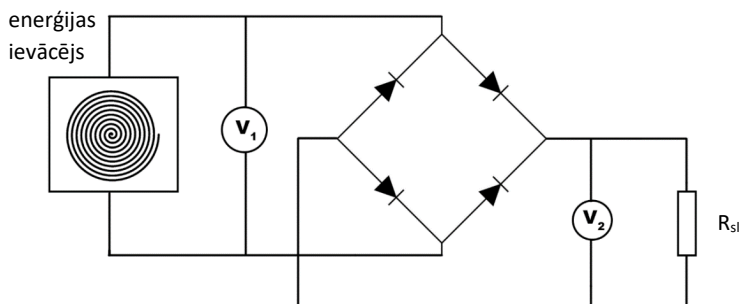
Ņemot vērā sarežģītumus, MOP lauktranzistora pasīvais taisngriezis labāk izmantojams vienkāršiem slēgumiem, kur ieejas signāla amplitūda ir par zemu diskreto diožu atvēršanās spriegumam pie izmantotās slodzes, un kur nodrošināt nemainīgu aizvara spriegumu ir vienkāršāk nekā uzraudzīt ieejas signālu un vadīt lauktranzistoru kā slēdzi. Šāds slēgums arī izdevīgs dažādu voltampēru raksturliķņu emulācijai testa nolūkiem, piemēram, nepieciešamo shēmas parametru novērtēšanai.

### 2.3.2. Taisngriešana ar Šotki pārejas diožu tiltu

Ja kustību enerģijas ievācējs ir spējīgs ģenerēt sprieguma impulsus amplitūdā tuvu viena volta vērtībai, zemāka sprieguma krituma Šotki pārejas diožu izmantošana var būt pietiekami lietderīga mazas izejas jaudas iegūšanai. Ņemot vērā, ka apskatītais pasīvais MOP lauktranzistoru taisngriezis prasa ne mazāk sarežģītu individuālu pieeju kā aktīvā taisngriešana, turpmākai ievācēja darbībai vērts apskatīt stabilu variantu, kas neprasa kontroli vispār.

Eksperimentālai pārbaudei izvēlēts īpaši zema sprieguma krituma Šotki diožu modelis *DFLS120L*, kas tiešajā virzienā pie 100 mV krituma vada ap 970  $\mu$ A, bet sprostvirzienā pie  $-0,2$  V ap 24  $\mu$ A, tātad aptuveni divas ar pusi reizes augstāka noplūdes strāva nekā eksperimentā ar MOP lauktranzistoru *IRF7832*. Dotās tiešā virziena vērtības ir iegūstamas arī ar iepriekš pārbaudīto lauktranzistoru pie 1,6 V aizvara sprieguma (2.7. att.), bet diskreto diožu gadījumā kontrole nav vajadzīga, kas būtiski atvieglo to izmantošanu. Lai gan noplūdes strāva dotajai diodei ir augstāka nekā MOP lauktranzistora eksperimentā, tas pirmīt parādīja, ka zema ieejas sprieguma gadījumā labākas taisngriešanas efektivitātes iegūšanai primāra ir tiešā virziena vadītspēja.

Izvēlēts pilnā tilta taisngrieža slēgums, jo tajā spriegums uz elementiem pretējās vadītspējas laikā ir mazāks nekā avota tukšgaitas spriegums, jo paralēli darbojas diodes tiešajā virzienā, un zemāks sprostvirziena sprieguma kritums nozīmē zemākus zudumus. Turklāt tilta slēgumā tiek dubultota signāla frekvence, ko vieglāk nofiltrēt par stabilu signālu nekā pusperioda taisngriežu gadījumā, kas var izrādīties svarīgi tik īsam signālam kā novērots praktiskajos mērījumos (nodaļa 2.2). Tomēr tiešajā virzienā divi virknē slēgti elementi nozīmē augstāku sprieguma kritumu, tamdēļ dotais risinājums izmantojams vien augstākam ieejas spriegumam. Lai pārbaudītu, vai to var sniegt reālie ievācēju modeļi normāla darba apstākļos, izmantots žaketes prototips (2.2. att.) ar optimizētu spoļu un magnētu izvietojumu. Shēma saslēgta atbilstoši (2.9. att.), kur slodzes pretestība mainīta no 10 līdz 200  $\Omega$ , enerģijas ievācēja pretestībai esot 17  $\Omega$ .



2.9. att. Mērīšanas shēma kustību enerģijas ievācēja prototipam ar pilnā tilta taisngriezi.

Reģistrēti ģenerētie impulsi no 40 secīgām rokas kustībām, aprēķināta sprieguma vidējā kvadrātiskā vērtība (angļu val. — *true RMS*) gan ieejā ( $V_1$ ), gan izejā uz slodzes ( $V_2$ ), to savukārt var izmantot ķēdes strāvas aprēķinam. Pieņemot, ka diožu sprostvirziena strāva ir par vairākām kārtām mazāka par tiešā virziena vērtībām, dotajam slēgumam ieejas strāvas vidējo kvadrātisko vērtību var uzskatīt par sakrītošu ar izejā noteikto. Ja strāvas vērtības sakrīt, elektriskā slēguma lietderības koeficientu var izteikt kā izejas un ieejas spriegumu attiecību. Vidējā kvadrātiskā vērtība rēķināta ar vienas sekundes laika soli, tas iekļauj divas pilnas impulsu kopas, tamdēļ aprēķinātā vidējā jauda skaitliski sakrīt ar enerģiju. Rezultāti parādīti sekojošajā tabulā (2.2. tab.).

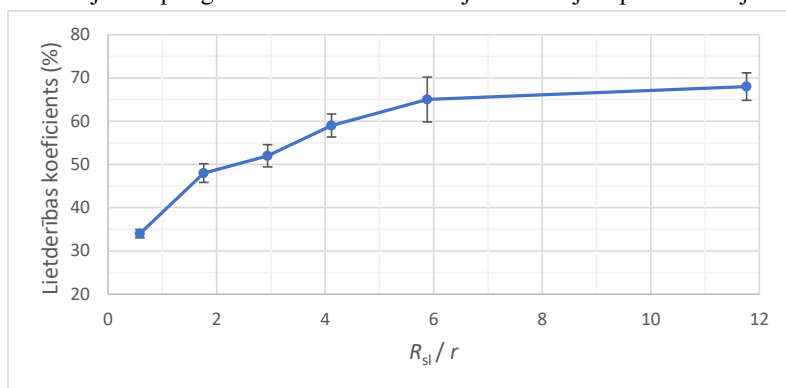
2.2. tabula

Taisngriešanas rezultāti, lietojot pilnā tilta slēgumu un dažādas slodzes pretestības

	10 $\Omega$	30 $\Omega$	50 $\Omega$	70 $\Omega$	100 $\Omega$	200 $\Omega$
<i>RMS</i> uz slodzes (mV)	57,77 $\pm$ 1,14	98,65 $\pm$ 2,28	106,99 $\pm$ 2,24	133,59 $\pm$ 2,02	157,54 $\pm$ 3,43	168,83 $\pm$ 1,83
<i>RMS</i> ieejā (mV)	168,66 $\pm$ 1,64	204,01 $\pm$ 2,23	206,43 $\pm$ 2,71	227,87 $\pm$ 2,47	242,50 $\pm$ 4,54	247,7 $\pm$ 2,85
<i>RMS</i> strāva (mA)	5,78	3,29	2,14	1,91	1,58	0,84
Izejas jauda/enerģija ( $\mu$ W, $\mu$ J)	166,84	162,19	141,47	127,47	124,09	71,26

Ieejas jauda/enerģija ( $\mu\text{W}$ , $\mu\text{J}$ )	487,13	335,43	220,86	217,44	191,02	104,55
Lietderības koef. (%)	34	48	52	59	65	68

Kā redzams, efektivitāte pieaug līdz ar slodzes pretestību, kas ir pašsaprotami, jo zemāka strāva samazina sprieguma kritumu uz taisngrieža elementiem, tātad arī zudumus. Lai uzskatāmāk attēlotu tās atkarību no slodzes ( $R_{sl}$ ) un enerģijas ievācēja iekšējās pretestības ( $r$ ), efektivitāte parādīta grafiski atkarībā no pretestību proporcijas (2.10. att.). Tās pieaugums acīmredzami samazinās un paliek nebūtisks pēc aptuveni 6 reizes augstākas slodzes pretestības nekā avota iekšējā pretestība, var izteikt minējumu, ka dotajai shēmai efektivitāte piesātinās ap 70 %. Līdz ar pieaugošo slodzes pretestību palielinās izejas spriegums, toties krītas uz slodzes izdalītā enerģija. Tas ir jāņem vērā reālās sistēmās, lai, slogojot izeju pēc taisngrieža, iegūtu praktiski izmantojamu sprieguma vērtību un veicamajām funkcijām pietiekamu jaudu.



2.10. att. Elektromagnētiskā kustību enerģijas ievācēja taisngriešanas efektivitāte ar Šotki diožu pilnā tilta slēgumu atkarībā no slodzes ( $R_{sl}$ ) un avota iekšējās pretestības ( $r$ ) attiecības.

## 2.4. Kopsavilkums

Šajā nodaļā tika apskatīts elektromagnētiskais kustību enerģijas ievācējs, kurā lietotas plakanas spirālveida spoles un plakans magnēts. Izvietojot dotās komponentes uz atsevišķām ķermeņa daļām, kas kustas viena gar otru, piemēram, roka pret vidukli, tiek samazināts konstrukcijas tilpums, turklāt netiek ieviesta mehāniskās rezonances nepieciešamība. Tas padara apskatīto struktūru atšķirīgu no publikācijās visbiežāk piedāvātajiem variantiem — noslēgtām sistēmām ar mehāniskās rezonances noteiktu lietderīgāko pārveidojamo kustību frekvenci.

Enerģijas ievācējs raksturots ar vienkāršotu matemātisko modeli. Tas parāda viena tinuma apaļas spoles iegūtās elektroenerģijas atkarību no tās rādiusa, izmantotā vadītāja elektriskajām īpašībām, magnēta indukcijas un kustības ātruma. No tā var secināt, ka augstākas enerģijas iegūšanai primāri jāpalielina spoles rādīsus un magnētiskā lauka indukciju, jo enerģija ir atkarīga no šo parametru vērtību kvadrātiem. Savukārt papildu augstāka ģenerētā sprieguma iegūšanai ar apaļas šķērsgriezuma formas vadu izdevīgāk izmantot mazāku vijumu skaitu ar

resnāku vadītāju, un iegūtās spoles likt vienu virs otras slāņos, saslēdzot virknē. Praktiskos apstākļos izmēru ierobežo pieejamā vieta, bet spoļu slāņu skaitu magnētiskā lauka indukcija.

Lai novērtētu enerģijas ievācēja potenciālu turpmākai izmantošanai, tā prototips ar spolēm apgērbta sānos un magnētiem piedurknē pārbaudīts praktiski, soļojot ar fiksētu ātrumu. Spoles savstarpēji saslēgtas tā, lai to ģenerētie impulsi pārklājos summētos. Atkarībā no pieejamās vietas, sniegumu dotajam ievācējam var uzlabot, lietojot vairākus magnētus virknē ar pretēji vērstu polaritāti, tādējādi iegūstot līdz 1,2 V amplitūdu. Ģenerācija notiek secīgu impulsu kopu veidā, kuras atkārtojas ar vismaz 500 ms periodu, katra parasti ietver divus asimetriskus sinusoidālus periodus. Ievācējam jānodrošina abu sastāvdaļu atbilstošs izvietoējums apgērbtā, lai kustības laikā tie pēc iespējas simetriskāk šķērso viens otru, tātad sniegums ir papildus atkarīgs no valkātāja auguma, stājas un gaitas.

Iegūtā sprieguma amplitūdas lielākās vērtības ir teorētiski pietiekamas diožu taisngriežim, bet potenciāli augstākas efektivitātes dēļ piedāvāta zema maiņsprieguma taisngriešana ar MOP lauktranzistoru, kuram, atšķirībā no aktīvo taisngriežu sistēmām, nepieciešams pievadīt laikā nemainīgu aizvara spriegumu tuvu atvēršanās sliekšņa līmenim. Novērtētas voltampēru raksturlielnes vairākiem MOP lauktranzistoriem pie dažāda aizvara sprieguma, ieguvuma un zudumu salīdzināšanai izvēlēts paraugs ar desmitkārtīgi augstāku noplūdes strāvu un trīs reizes lielāku tiešā virziena strāvu nekā konkrētai Šotki diodei. Savstarpēji salīdzinot doto elementu pusperioda taisngriežus ar 220 mV amplitūdas ieejas signālu no elektromagnētiskā kustību enerģijas ievācēja un ņemot vērā noplūdes zudumus, MOP lauktranzistors uzrādīja 11 % efektivitāti, bet diode 3 %. Neskatoties uz ieguvumu, nemainīga aizvara sprieguma uzturēšana var izrādīties sarežģīta, it īpaši realizējot pilna perioda taisngriezi, tamdēļ dotā metode praktiskām shēmām, domājams, ir nelietderīga, kā arī ir nepieciešama padziļināta izpēte voltampēru raksturlielnes atkarībai no citiem parametriem, piemēram, temperatūras.

Ekspiments ar MOP lauktranzistoru kā taisngriezi parādīja, ka zemā darba sprieguma līmenī svarīgāk nodrošināt augstāku tiešā virziena vadītspēju, bet paaugstinātās sprostvirziena noplūdes ir sekundāras, tamdēļ elektromagnētiskā kustību enerģijas ievācēja maiņsprieguma taisngriešana pārbaudīta ar augstākas vadītspējas un arī noplūžu diskretu elementu Šotki pārejas diodēm. Izmantots pilnā tilta slēgums, mērījumi veikti ar rezistīvu slodzi. Efektivitāte sagaidāmi pieaug līdz ar slodzes vērtību, bet sāk piesātināties virs aptuveni 6 reizes augstākas slodzes vērtības nekā avota iekšējā pretestība, sasniedzot 68 % pie pretestību attiecības 11,8.

Var secināt, ka izveidotā kustību enerģijas ievācēja prototipa parametri ir pietiekami efektīvai plašpatēriņa diskretu taisngriešanas elementu izmantošanai, bet arī labākā uzrādītā snieguma gadījumā izejā nebūs pietiekami augsts spriegums elektronisko ierīču barošanai. Pārtrauktas ģenerācijas raksturs traucē sprieguma reizinātāja izmantošanai, jo pauze starp impulsu kopām neļaus uzlādēt pietiekami daudzas reizinātāja pakāpes, lai nodrošinātu augstu sprieguma paaugstināšanas koeficientu. Toties nodemonstrētā taisngriešana dod iespēju izmantot zema līdzsprieguma pārveidotājus.

### 3. PAŠREZONANSES PĀRVEIDOTĀJU DARBĪBAS ANALĪZE UN EFEKTIVITĀTES NOVĒRTĒŠANA AR ELEKTROMAGNĒTISKO ENERĢIJAS IEVĀCĒJU KĀ AVOTU

Iepriekšējā nodaļā apskatīts elektromagnētiskais kustību enerģijas ievācējs, kas praktiskos darba apstākļos ar diskretu elementu taisngriezi un rezistīvu slodzi uzrādīja līdz 68 % augstu elektrisko efektivitāti. Tas potenciāli ir pamata posms reālos apstākļos izmantojama barošanas avota izveidei, taču tālāk jānodrošina sprieguma paaugstināšana līdz elektriskajām shēmām izmantojamam vairāku voltu spriegumam, kā arī elektroenerģijas uzkrāšana.

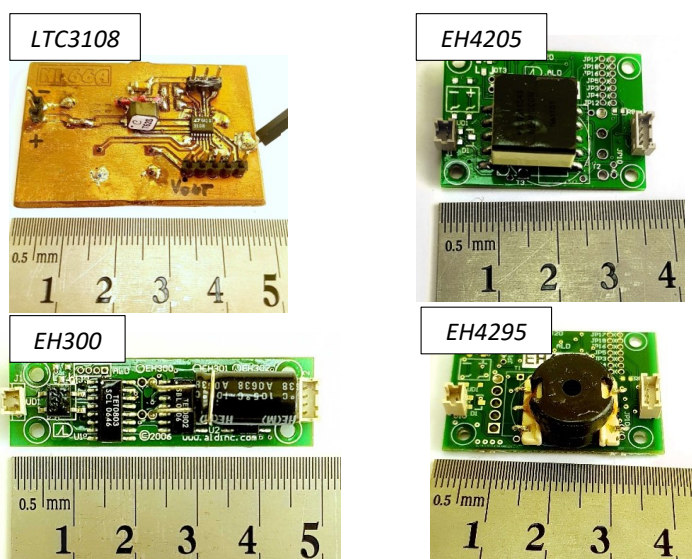
Apskatot elektroenerģijas pārveidotāju variantus zema sprieguma avotiem (nodaļa 1.3), izceļas slēgums ar transformatoru un tranzistoru ieejā, kas tam bez ārējiem barošanas avotiem ļauj pašrezonansē cikliski atslēgt un pieslēgt ieejas signālu, iegūstot augstu sprieguma paaugstināšanas koeficientu. Šajā principā balstās dažādi komerciāli pieejami risinājumi, kas atvieglo enerģijas ievācēju sistēmu izstrādi un pielāgošanu. Tomēr pārsvarā tie ir domāti līdzspriegumam, kas dotā enerģijas ievācēja gadījumā pēc taisngriešanas būs pulsējošs un pārtraukts, turklāt dabisko apstākļu dēļ ar mainīgu amplitūdu un periodu. Šādu pašstartējošo (angļu val. — *self-starting*) zemsprieguma pārveidotāju salīdzināšanai izvēlēti trīs komerciāli pieejami modeļi: *LTC3108*, *EH4295* un *EH4205*. Izvēle balstījās uz īpaši zemu, bet atšķirīgu startēšanās spriegumu, respektīvi, 20 mV, 60 mV un 75 mV, plašā diapazonā atšķirīgu ieejas pretestību, iespējām iegūt augstu izejas spriegumu (5 V) un, protams, praktisko pieejamību. Salīdzināšanas mērķis ir nevis konkrēto modeļu pārbaude, bet gan noteiktā pārveidošanas principa lietojamības novērtējums dotajā darbības režīmā, kas atšķiras no ražotāja paredzētā, atkarībā no pārveidotāja ieejas parametriem.

Nodaļā tiks apskatīti pārbaudāmo elektroenerģijas pārveidotāju raksturlielumi, tālāk veikti kontrolētu un reālu apstākļu eksperimenti ar enerģijas ievācēju. Novērtējot rezultātus, tiks noteiktas iespējas un izvirzīti priekšnosacījumi šī pārveidošanas principa lietošanai neinerģiskam elektromagnētiskajam cilvēka kustību enerģijas ievācējam, kā arī citu ievācēju gadījumos, kam raksturīga pārtraukta un mainīga ģenerācija.

#### 3.1. Elektroenerģijas pārveidotāju raksturlielumi

*LTC3108* [84] darbības princips jau nedaudz tika aplūkots nodaļā 1.3: tas darbojas kā *forward* slēguma pārveidotājs, kas tieši balstās uz transformatora koeficientu sprieguma paaugstināšanai, bet tam papildus izmanto izejai virknē slēgtu kondensatoru, kas uzkrāj lādiņu pretējā impulsa laikā, un tad summējas ar tiešā impulsa spriegumu. Apvienojot *LTC3108* ar 1:100 transformatoru, ražotāja norādītais startēšanās spriegums ir 20 mV. Iesākumā mikroshēma uzlādē savu barošanas kondensatoru līdz vismaz 2 V, tad sāk darboties tajā iestrādātie aktīvie taisngrieži augstākai sprieguma paaugstināšanas efektivitātei, bet, barošanas kondensatoram sasniedzot 2,5 V, visi mikroshēmas bloki var sākt funkcionēt — sākas izejas galvenā uzkrājošā elementa uzlāde.

Dotais elektroenerģijas pārveidotāja modelis sevī ietver diezgan plašu funkciju klāstu, tas ir domāts kā pilnvērtīgs elektroenerģijas pārveidošanas un uzraudzības bloks ar nelielu ārējo komponentu skaitu (3.1. att.). Tam var iestatīt izejas spriegumu vienā no četrām diskrētām vērtībām, kad šis līmenis ir sasniegts, par to signalizē atsevišķa izeja ar augstu loģisko līmeni. Šo var lietot, lai iestartētu mikrokontrolleri tikai tad, kad barošanas spriegums ir normālas funkcionēšanas līmenī. Tomēr jāatzīst, ka tiešā veidā dotā funkcija var būt ne visai izdevīga, jo derīgās barošanas signāls tiek ieslēgts līdz ar 92,5 % sasniegšanu no iestatītā izejas sprieguma, bet izslēgts pie krituma līdz 91 % [84]. Tik neliela līmeņu atšķirība var radīt problēmas zemas jaudas enerģijas ievācējiem, jo, piemēram, pēc startēšanās mikrokontrolleru sistēmās parasti jāveic loģisko bloku sākotnējā konfigurācija, kas var prasīt īslaicīgu, bet salīdzinoši augstu patēriņu, tas var izlādēt nelielas kapacitātes uzkrājošo kondensatoru par noteiktajiem 1,5 procentu punktiem, liekot atslēgt barošanu. Lai to novērstu, var būt nepieciešams lietot augstākas kapacitātes uzkrājošo kondensatoru, bet tas paildzinās uzlādes laiku. Vēl var dot signālu izmantot tikai mikrokontrollera startēšanai, bet izslēgšanas kontroli nodrošināt atsevišķi pie stipri zemāka sprieguma sasniegšanas. Šādi risinājumi diemžēl sarežģīs izstrādi un var radīt papildu elektroenerģijas patēriņu.



3.1. att. Pārbaudāmie zemsprieguma elektroenerģijas pārveidotāji.

Pārējie izvēlētie zemsprieguma elektroenerģijas pārveidotāji *EH4205* un *EH4295* ir no vienas ražotāja sērijas [115], [116], tamdēļ darbības princips sakrīt. Atšķirībā no *LTC3108*, kas ir atsevišķa mikroshēma, dotie pārveidotāji ir gatavu shēmas bloku veidā ar visiem galvenajiem elementiem uz tiem (3.1. att.). Ražotājs nesniedz shēmas detaļas, elementi uz platēm ir vai nu aizlieti ar epoksīdsveķiem, vai ar neidentificējamu modeļu uzrakstiem. Datu lapā sniegtais funkcionalitātes raksturojums ļauj vien saprast, ka darbības princips atbilst iepriekš raksturotajam — transformatora sekundārajā tinumā radušais spriegums atslēdz primāro tinumu

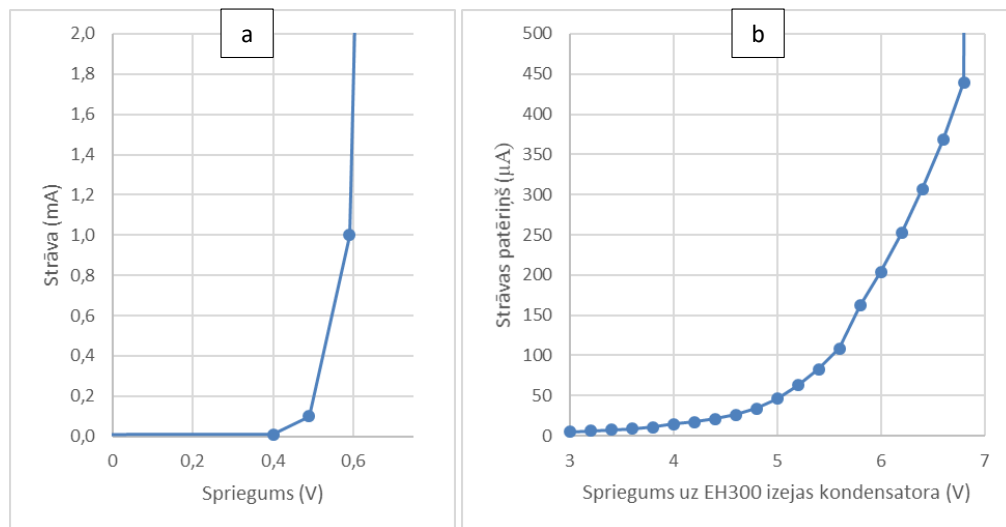
no ieejas, spriegumam krītot, ieeja tiek atkal pieslēgta un process atkārtojas. Ražotājs norāda, ka transformatora slēdža frekvence atkarīga gan no ieejas signāla avota pretestības, sprieguma, gan no izejas slodzes, tamdēļ tā darbības parametri var mainīties darba laikā. Abi bloki domāti tikai zema līdzsprieguma pārveidošanai par augsta maiņsprieguma signālu (no maksimuma līdz maksimumam 15 V), par elektroenerģijas uzkrāšanu atbild papildus pieslēdzams bloks, kas arī nosaka izejas sprieguma līmeni. Nevienam no izvēlētajiem pārveidotājiem ražotāji nesniedz informāciju par darbību ar mainīgu, pulsējošu ieejas spriegumu.

No ražotāja piedāvātajiem sprieguma regulēšanas blokiem izvēlēts *EH300*, kas ierobežo izejas spriegumu pie 7 V [117]. Arī dotajam uzlādes regulēšanas blokam ir atsevišķa izeja, kas dod derīga barošanas sprieguma signālu, bet, atšķirībā no *LTC3108*, tam ir būtiski plašāka ieslēgšanās un izslēgšanās līmeņu histerēze — barošana tiek pieslēgta, sasniedzot 3,5 V izejā, bet atslēgta, spriegumam nokrītot līdz 1,9 V. Tik plašu diapazonu var izmantot daudzi mikrokontrolleri, jo darba sprieguma diapazons no 1,8 līdz 3,6 V ir samērā izplatīts. Teorētiski tas ļautu loģisko elementu sistēmām startēties un paveikt nepieciešamās operācijas, izmantojot sākotnēji lielāku uzkrātās elektroenerģijas apjomu. Protams, ja kādai no patērētāja sastāvdaļām mazākais darba spriegums ir augstāks par izslēgšanās līmeni, teiksim, 2 V, nekontrolēta barošanas sprieguma krišana līdz 1,9 V var radīt neparedzamas darbības kļūdas, piemēram, loģiskais bloks var pārstāt funkcionēt paredzami un “iesprūst” startēšanās režīmā ar nekontrolētu elektroenerģijas patēriņu — šāds scenārijs zemas ieejas jaudas gadījumā var turpmāk vispār neļaut paaugstināt uzkrājošā kondensatora spriegumu. Šādā gadījumā var būt nepieciešama ārēja sprieguma uzraudzīšana, kas, līdzīgi kā *LTC3108* gadījumā, sarežģīs izstrādi un, iespējams, ieviesīs papildu elektroenerģijas tēriņus.

Lai gan ražotājs nesniedz detaļas arī par uzkrāšanas regulēšanas bloka *EH300* uzbūvi, tās sastāvdaļu noteikšana liekas vienkāršāka (3.1. att., *EH300*). Pirmais, kas šķiet acīmredzams, ir taisngriešanas tilts ieejā, to var atpazīt pēc raksturīgā virsmas montāžas korpusa ar četriem kontaktiem. Izmērot sprieguma kritumu uz tā, iegūta voltampēru raksturlīkne (3.2. att., a). Tā kā tilta slēgumā virknē ir divi taisngriešanas elementi, sprieguma kritumu var dalīt ar divi viena elementa raksturošanai. Pie 1 mA strāvas sprieguma kritums ir 590 mV, tātad ap 280 mV uz viena elementa, kas var liecināt par germānija diožu izmantošanu. Tālākās trīs mikroshēmas, visticamāk, veic sekojošus uzdevumus: sprieguma regulators 7 V ierobežošanai uz kondensatora, komparators, lai noteiktu derīga izejas sprieguma līmeni, sprieguma reference komparatoram un slēdži izejas signālu pieslēgšanai un atslēgšanai. Lai noteiktu, vai sprieguma regulācija notiek ar ieejas sprieguma ierobežošanu, *EH300* ieejai pieslēgts regulējams barošanas avots un, mainot spriegumu, mērīts spriegums uz uzkrājošā kondensatora. Tā kā sprieguma krituma vērtības faktiski sakrīta ar pirmīt nomērītajām ieejas tilta vērtībām (3.2. att., a), bet izejas spriegums nepiesātinājās pie 7 V, var secināt, ka sprieguma regulācija nenotiek ar ieejas signāla ierobežošanu, piemēram, lietojot lineāro sprieguma regulatoru. Aizvietojot doto 1 mF uzkrājošo elektrolītisko kondensatoru ar regulējamu barošanas avotu, kuram virknē slēgts ampērmētrs, noteikts strāvas patēriņš no uzkrātās enerģijas atkarībā no sprieguma (3.2. att., b). Var novērot, ka strāvas patēriņš sāk strauji pieaugt, izejas spriegumam tuvojoties 7 V, bet pie šī sprieguma tie jau ir 5,9 mA. Tātad dotā shēma veic sprieguma ierobežošanu ar liekās uzkrātās

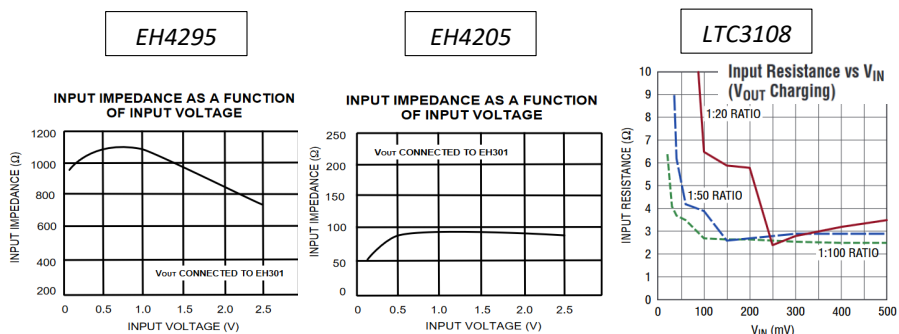


elektroenerģijas izdalīšanu uz pašas shēmas elementiem, kas, pieaugot izejas spriegumam, ievieš būtiskus zudumus, jo nomērītais strāvas patēriņš sāk strauji pieaugt jau ap 5 V (3.2. att., b), kas ir būtiski zem maksimālajiem 7 V.



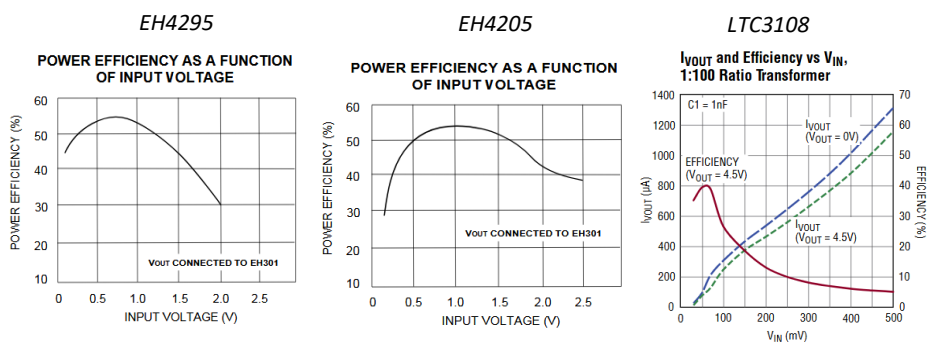
3.2. att. *EH300* moduļa parametru mērījumi: ieejas tilta voltampēru raksturlīkne (a) un strāvas patēriņš atkarībā no iegūtā sprieguma (b).

Izvēlētajiem trim zemsprieguma pārveidotājiem atšķiras ne vien startēšanās spriegums, bet arī nominālā ieejas pretestība: *LTC3108* ar 1:100 attiecības transformatoru startējas pie 20 mV un sloģo enerģijas avotu ar aptuveni 6,5  $\Omega$ , *EH4295* startējas pie 60 mV ar nominālo ieejas pretestību 950  $\Omega$ , bet *EH4205* startējas pie 75 mV ar nominālo ieejas pretestību 50  $\Omega$ . Dotās vērtības ļauj realizēt pārbaudi ar ekvivalento slodzi, kas ir par kārtu zemāka, pielīdzināma un par kārtu augstāka nekā avota iekšējā pretestība, līdzīgi kā nodaļā 2.3.2. Ieejas pretestība visiem pārveidotājiem atkarīga no ieejas sprieguma (3.3. att.), bet būtiska atšķirība ir pretestības tendencē — vienīgi *LTC3108* mikroshēmai pretestība krītas, spriegumam pieaugot virs startēšanās līmeņa. Šāda sakarība var radīt efektu, kurā ģenerators spriegums sloģošanas laikā tieksies uz 20 mV līmeni, jo tajā ir augstākā sloģojošā pretestība. Pārējiem pārveidotājiem pie startēšanās sprieguma ir zemāka pretestība, tamdēļ sloģošanas laikā ģenerators spriegums iespēju robežās būs virs tā.



3.3. att. Zemsprieguma pārveidotāju ieejas pilnā pretestības atkarība no ieejas sprieguma, ražotāju dati [84], [115], [116].

Ražotāji norādījuši jaudas efektivitāti arī atkarībā no ieejas sprieguma (3.4. att.). Var novērot, ka visiem pārveidotājiem efektivitāte nav augstākā pie startēšanās sprieguma, *EH4205* modelim tā pat ir viszemākā pie dotā sprieguma. Tikai pārveidotājiem *EH4295* un *EH4205* augstākās efektivitātes punkts tiek sasniegts tuvu tam ieejas spriegumam, kas nodrošina augstāko ieejas pretestību, savukārt *LTC3108* tas atbilst aptuveni divas reizes mazākai ieejas pretestībai nekā augstākā. Tas ļauj pieņemt, ka ieejas pretestības rakstura dēļ pārveidotājam *LTC3108* augstākās efektivitātes punkts var netikt sasniegts, savukārt pārējiem slogošana sekmēs tieksanos uz augstākas efektivitātes darba režīmu. Jāatzīmē arī pārveidotāja *EH4205* efektivitātes atkarības stāvais raksturs pie ieejas sprieguma zem 0,5 V, tātad dotajā diapazonā salīdzinoši nelielas ģenerācijas izmaiņas var radīt būtisku efektivitātes pieaugumu vai kritumu.



3.4. att. Zemsprieguma pārveidotāju jaudas efektivitāte, ražotāju dati [84], [115], [116].

Mazā ieejas pretestība *LTC3108* pārveidotājam (ap 6,5  $\Omega$ ) liek bažīties par pārāk stipru enerģijas ievācēja noslogošanu, jo tam pretestība ir ap 19  $\Omega$ . Toties īpaši zemais darbības spriegums, iespējams, ļaus izmantot elektromagnētiskā ģenerators spēju sniegt relatīvi augstu strāvu. Turklāt tā efektivitāte pie dotā ieejas sprieguma ir augstāka nekā *EH4205* pie startēšanās līmeņa. Savukārt *EH4205* ieejas pretestības ziņā (50  $\Omega$ ) ir vistuvākais dotajam elektromagnētiskajam enerģijas ievācējam starp izvēlētajiem pārveidotājiem, šī iemesla dēļ *EH4205* varētu uzņemt lielāku ieejas enerģiju nekā pārējie, bet tam ir augstākais startēšanās un

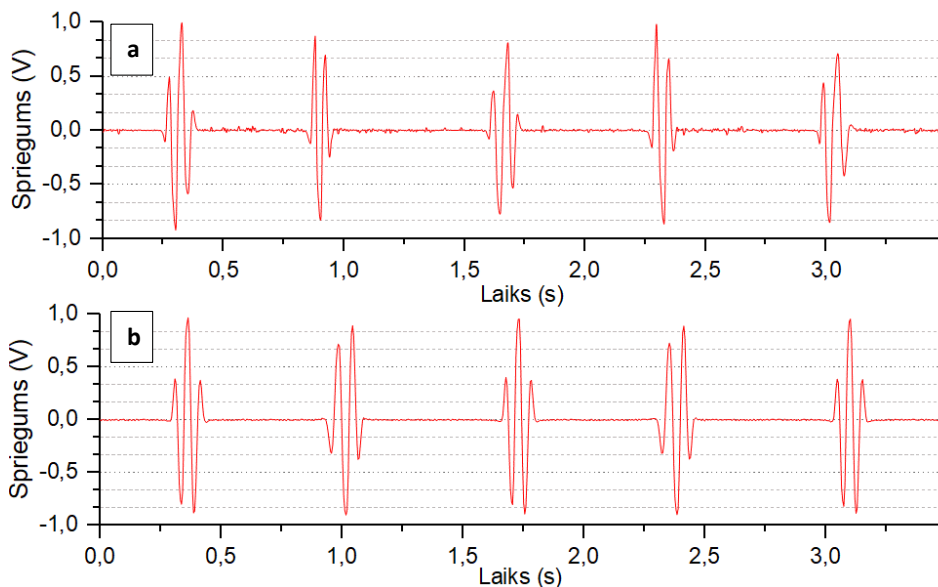
darba spriegums. Ķēdē papildus starp enerģijas ievācēju un pārveidotājiem būs taisngriešanas elementi, uz kuriem vismazākais sprieguma kritums un tātad arī zudumi būs ar visaugstāko slodzi, tātad 950  $\Omega$  no *EH4295*. Tam pie ieejas sprieguma zem 0,5 V ir visaugstākā efektivitāte starp pārveidotājiem, bet salīdzinoši lielās pretestības dēļ tas saņems vismazāk enerģijas. Turklāt visi dotie raksturlielumi ir stabilam līdzspriegumam, bet praktiski būs pulsējošs un ar mainīgu amplitūdu izkļiedes dēļ. Šādu savstarpējo pretrunu dēļ bez eksperimentālas pārbaudes nevar viennozīmīgi noteikt piemērotāko ieejas parametru pārveidotāju konkrētā signāla avotam.

## 3.2. Kontrolēto apstākļu eksperiments

### 3.2.1. Eksperimenta gaita

Apskatot dažādo pārveidotāju raksturlielumus, noskaidrots, ka to parametri mainās atkarībā no ieejas signāla. Tātad atšķirīgu ieejas parametru pārveidotāju objektīvai salīdzināšanai cilvēka kustības nebūs piemērotas to nepastāvības dēļ, ko parādīja iepriekšējie eksperimenti (nodaļa 2.2). Pārveidošanas principa pārbaudei dabiskās kustības nepieciešams aizstāt ar atkārtojamām kustībām, tomēr tām jāatbilst reālajam paraugam, pretējā gadījumā eksperimenti var sniegt ar reālām kustībām nesamērojamus rezultātus, kā tika konstatēts dažās citu autoru publikācijās nodaļā 1.2. Tamdēļ tika izstrādāts mehāniskais manipulators, kas nodrošina kustību enerģijas ievācēja magnētu pārvietošanu ar stabiliem parametriem, kurus var pielāgot konkrēta cilvēka kustību raksturlielumiem (Pielikums 3).

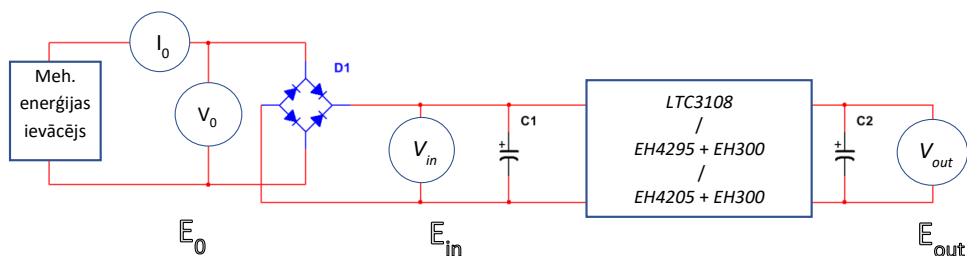
Lai eksperiments netiktu pārlietu idealizēts un tā rezultāti būtu pielietojami praksē, jāizvēlas pamatoti parametri roku kustības ātrumam, biežumam un kopējam eksperimenta ilgumam. Atbilstoši datiem no viedpulksteņu lietotājiem vairākās valstīs [118], darba dienās vienas stundas laikā lielākais soļu skaits ir vidēji 500–525 soļi. Nenoliedzami, šis skaits neobligāti tiek sasniegts vienā piegājienā, bet uz to var balstīties kā praktiski iespējamu paraugu. Lai magnēta kustības ātrums un frekvence atbilstu konkrētajam subjektam, kuram tika veidots apģērba prototips ar ģeneratoru, iesākumā viņam tika lūgts vienmērīgā un ērtā ātrumā noiet nelielu attālumu. Soļošanas laikā tika reģistrēti spoļu ģenerētie tukšgaitas impulsi (3.5. att., a). Pieņemot, ka dabiskas soļošanas laikā rokas kustas sinhroni ar kājām, laiks starp 2 ģenerētajām impulsu kopām atbilst viena soļa ilgumam. Impulsu kopu atkārtotāšanās periods ir vidēji 660 ms, tamdēļ kopējam aktivitātes ilgumam izvēlētas 350 s, kas ir laiks aptuveni 525 soļiem dotajā ātrumā. Savukārt rokas kustības ātruma izvēlei pieņemts, ka izmērītais impulsa kopas ilgums ir proporcionāls magnēta kustības ātrumam gar enerģijas ievācēju. Žakete tika ievietota mehāniskajā manipulatorā, attālums no magnēta līdz spolēm aptuveni 1 mm, tā kustības ātrums iestatīts, lai tiek ģenerēti atbilstoša ilguma impulsi kā eksperimentā ar subjekta rokas kustībām. Manipulatora aizture pirms kustības pretējā virzienā iestatīta tā, lai magnēts šķērsotu spoles vidēji ik pēc 0,66 s, rezultātā impulsu kopu ilgums ir ap 150 ms. Iegūto automatizēto kustību ģenerācijas paraugs parādīts sekojošajā attēlā (3.5. att., b), tas uzrāda labu atbilstību dabiskajām kustībām (3.5. att., a) bez impulsu formas un perioda izmaiņām.



3.5. att. Elektromagnētiskā kustību enerģijas ievācēja signāla paraugs ar reālām cilvēka kustībām (a) un ar pielāgotu parametru mehānisko manipulatoru (b).

### 3.2.2. Elektriskā shēma

Enerģijas ievācējs pieslēgts shēmai, kas sastāv no pilnā tilta slēguma taisngrieža ( $DI$ ), spriegumu gludinošā filtra kondensatora ( $CI$ ) un enerģijas ievācēja komplekta (3.6. att.). Tilta taisngriezis izvēlēts atbilstoši iepriekš veiktajiem eksperimentiem, kas parādīja tā sekmīgu darbību ar slodzes pretestības un dotā enerģijas ievācēja iekšējās pretestības attiecību sākot no 0,6 (nodaļa 2.3.2). Tas veidots no  $DFLS120$  Šotki pārejas diodēm. Visu atsevišķo posmu novērtēšanai shēmā tiek mērīti sekojoši parametri: enerģijas ievācēja strāva un spriegums ( $I_0$  un  $V_0$ ), spriegums pēc taisngrieža uz tā gludinošā filtra kondensatora  $CI$  — ieejas spriegums enerģijas pārveidotājam ( $V_{in}$ ) —, kā arī pārveidotāja izejas spriegums uz uzkrājošā kondensatora  $C2$  ( $V_{out}$ ). Tā kā ražotājs elektroenerģijas uzkrāšanas blokam  $EH300$  lieto 1 mF izejas kondensatoru ( $C2$ ), tāda pati vērtība izvēlēta  $LTC3108$  izejai un visu pārveidotāju ieejai ( $CI$ ). Eksperimenta gaitā ievācējs tika mainīts no  $LTC3108$  uz  $EH4205$  un  $EH4295$  kombināciju ar  $EH300$ . Turpmāk nodaļas tekstā  $EH300$  netiks atsevišķi pieminēts, uzskatot, ka dotajā eksperimentu sērijā tā ir neatņemama apskatāmā zemsprieguma pārveidotāja sastāvdaļa.



3.6. att. Eksperimentālā principiālā shēma. Parādīti sprieguma un strāvas mērīšanas punkti ( $I_0$ ,  $V_0$ ,  $V_{in}$  un  $V_{out}$ ). Symboliski attēlota kopējā ieejas elektriskā enerģija ( $E_0$ ), elektroenerģijas pārveidotāja ieejas ( $E_{in}$ ) un izejas enerģija ( $E_{out}$ ).

No ieejas strāvas un sprieguma mērījumiem tiek aprēķināta enerģijas ievācēja momentānā jauda, tālāk iegūta enerģija kā šīs jaudas integrālis laikā (3.1). Pieņemot, ka sprostvirzienā slēgto diožu strāva ir necīga salīdzinājumā ar tiešo virzienu, var uzskatīt, ka strāva  $I_0$  plūst arī pēc taisngrieža, tamdēļ ar izteiksmi (3.1) tiek aprēķināta ieejošā jauda pārveidotājā un kondensatorā  $C1$ . No izejas kondensatora  $C2$  sprieguma  $V_{out}$  tiek noteikta uzkrātā enerģija  $E_{out}$  atbilstoši formulai (3.2). Spriegums visas elektroniskās sistēmas ieejā ( $V_0$ ) tika mērīts pēc strāvas šunts ( $I_0$ ), pieņemot, ka šunts pretestība ( $1 \Omega$ ) un, respektīvi, zudumi uz tās ir attiecināmi uz kustības enerģijas ievācēja savienotājvadiem un kontaktiem, nevis elektroenerģijas pārveidotāju.

Augstākā enerģija, ko var iegūt no jebkura ģenerators, tiek izdalīta uz salāgotas slodzes, uz kuras spriegums ir puse no ģenerators tukšgaitas sprieguma. Lai iegūtu priekšstatu par teorētiski maksimālo enerģiju, ko iespējams iegūt no dotā kustību enerģijas ievācēja, papildus tika veikts tukšgaitas eksperiments, kurā bija mērīts ievācēja spriegums ( $V_0$ ) bez slodzes (taisngrieža tilts  $D1$  atslēgts). Pieņemot, ka elektriskā signāla frekvence ir zema, ģenerators iekšējās pretestības noteikšanai var ignorēt reaktīvos parametrus un uzskatīt to par tīri aktīvu. Elektromagnētiskā enerģijas ievācēja pretestība tika izmērīta ar visiem izmantotajiem savienotājvadiem, kas ved līdz tālākajai shēmai. Teorētiski maksimālā momentānā jauda tika aprēķināta ar izteiksmi izmantojot enerģijas ievācēja iekšējā pretestību  $19 \Omega$ . Teorētiski maksimālā enerģija  $E_{0 \max}$  izteikta kā maksimālās momentānās jaudas integrālis laikā atbilstoši (2.7).

$$E_{0in} = \int I_0 \cdot V_{0in} dt, \quad (3.1)$$

$$E_{kond} = \frac{C \cdot V_{kond}^2}{2}, \quad (3.2)$$

$$P_{0 \max} = \frac{\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)^2}{R_i}, \quad (3.3)$$

kur  $E_0$  — enerģijas ievācēja izejas enerģija, J;

$E_{in}$  — zemsprieguma pārveidotāju un kondensatora  $C1$  ieejas enerģija, J;

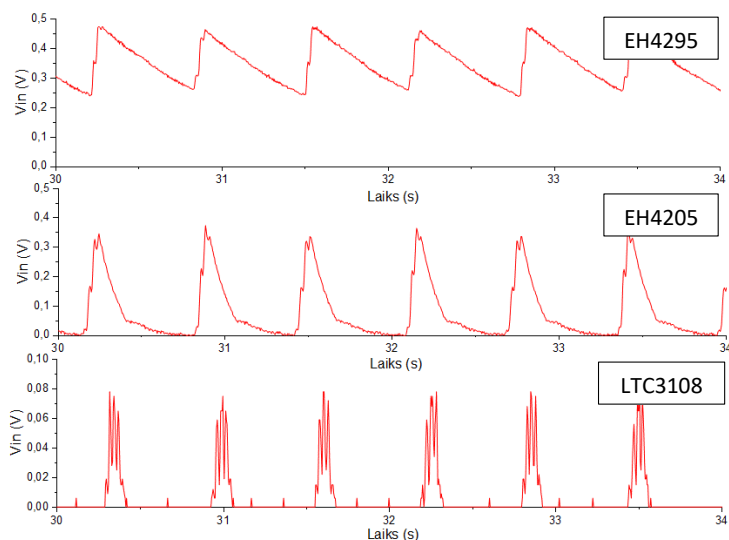
$I_0$  un  $V_0$  — enerģijas ievācēja izejas strāva, A, un spriegums, V;

$E_{kond}$  — kondensatorā uzkrātā elektroenerģija, J;

$V_{\text{kond}}$  — spriegums uz kondensatora, V;  
 $C$  — kondensatora kapacitāte, F;  
 $P_{0\text{ max}}$  — teorētiski maksimālā enerģijas ievācēja momentānā jauda, W;  
 $\varepsilon$  — tukšgaitā nomērītais elektrodzinējspēks, V;  
 $R_i$  — enerģijas ievācēja iekšējā pretestība,  $\Omega$ .

### 3.2.3. Rezultāti

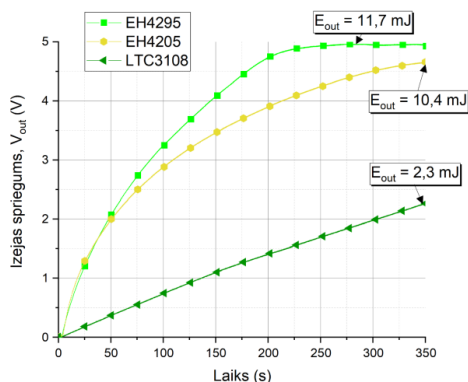
No sākuma vērts apskatīt ieejas spriegumu pārveidotājos (3.7. att.). Kopumā redzams, ka impulsi atkārtojas vienmērīgi, tātad kustību avots un pārbaudāmā sistēma strādā stabili. Sprieguma līmeņi parāda likumsakarīgu ainu — augstākās ieejas pretestības pārveidotājs (*EH4295*) sasniedz kopēji augstāko spriegumu. Vidējās pretestības pārveidotājam (*EH4205*) var novērot straujāku sprieguma kritumu, kas pie aptuveni 50 mV palēninās. Visticamāk, pārveidotājs pie dotā sprieguma beidz funkcionēt un tamdēļ mazāk noslogo avotu. Savukārt viszemākās ieejas pretestības pārveidotājs (*LTC3108*) noslogo enerģijas ievācēju un taisngriezi visstiprāk, tamdēļ saskaras ar straujākajām sprieguma izmaiņām un ilgāko tā iztrūkumu starp impulsi kopām. Tam var arī novērot visaugstākās svārstības pašas impulsi kopas laikā.



3.7. att. Pārveidotāju ieejas spriegums ( $V_{\text{in}}$ ) pēc taisngriešanas.

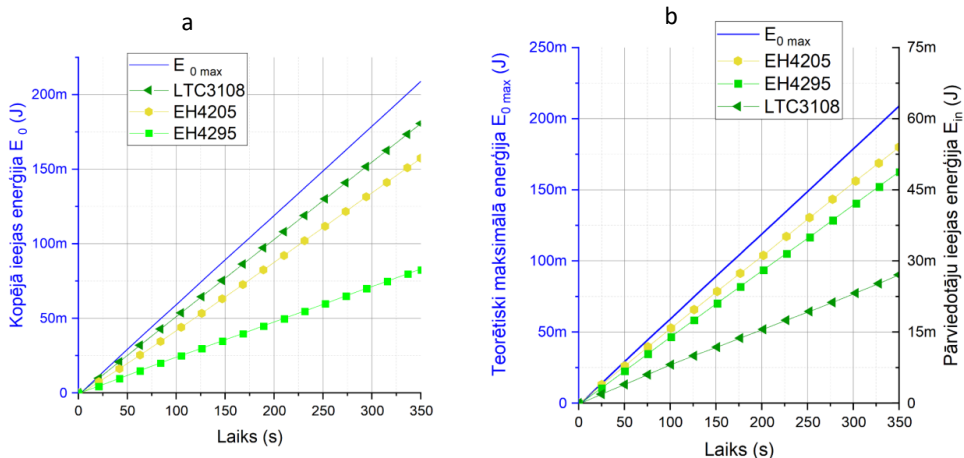
Izejas kondensatorā iegūtais spriegumus redzams sekojošajā grafikā (3.8. att.). Augstākā kontrolēto apstākļu eksperimentā iegūta sprieguma vērtība ir 5V, to sasniedza vien pārveidotājs ar augstāko ieejas pretestību *EH4295*. Tam bija nepieciešamas 280 s, bet zemas ieejas pretestības pārveidotāji *EH4205* un *LTC3108* pa 350 s sasniedza atbilstoši 4,66 V un 2,25 V. Ja pieņem, ka daudziem mikrokontrolleriem darbībai vajag vismaz 1,8 V, visi pārveidotāji šo līmeni pārsniedza mazāk nekā sešās minūtēs. Kā redzams, atvēlētajā intervālā visi bija spējīgi

uzlādēt izejas kondensatoru, pierādot, ka dotais pārveidošanas princips ir izmantojams praktiskiem mērķiem arī ar mainīgu un pārtrauktu ieejas signālu.



3.8. att. Pārveidotāju izejas kondensatora ( $C_2$ ) spriegums laikā un augstākā uzkrātā enerģija.

Kopējā elektroenerģija, kuru darbības laikā uzņēma shēmas, parādīta sekojošajā attēlā (3.9. att., a). Šī enerģija daļēji tiek patērēta pārveidotāju darbībai, daļēji uzkrāta izejas kondensatorā, bet vēl daļa pazūd siltuma veidā shēmas elementos. Līdz ar šiem datiem vērts apskatīt teorētiski maksimālo ģenerators enerģiju, kas aprēķināta no tukšgaitas mērījumiem. Redzams, ka vistuvāk teorētiski maksimālajai enerģijai uzņēma sistēma ar zemākās ieejas pretestības pārveidotāju ( $LTC3108$ ). Toties, ja salīdzina enerģiju pēc taisngrieža, respektīvi, pašu pārveidotāju ieejas enerģiju, aina ir atšķirīga (3.9. att., b). No visiem pārveidotājiem augstāko enerģiju uzņēma vidējās pretestības pārveidotājs  $EH4205$ , par kārtu augstākas pretestības pārveidotājs  $EH4295$  uzņēma vien nedaudz mazāk enerģijas, bet vismazāk  $LTC3108$ . Šo grafiku salīdzinājums labi parāda taisngriešanas posma zudumu ietekmi. Lai gan pārveidotāju uzņemtā enerģija izskatās nemainīgi pieaugoša laikā, tikai tukšgaitas rezultātu grafiks ir taisne, pārveidotāju līknēm ir mazs izliekums, kas liecina par augstāku ieejas jaudu darbības sākumā.



3.9. att. Elektroenerģija eksperimenta laikā: a — teorētiski maksimālā  $E_{0\max}$  un faktiski kopējā uzņemtā  $E_0$ ; b — teorētiski maksimālā  $E_{0\max}$  un tikai pašu pārveidotāju faktiski uzņemtā  $E_{in}$ .

Salīdzinot augstāko iegūto spriegumu uz izejas kondensatora (3.8. att.), redzams, ka *EH4295* uzkrājis vairāk enerģijas nekā *EH4205*, kaut gan no ievācēja uzņemtās enerģijas apjoma tendence bija pretēja (3.9. att., b). Viszemāko spriegumu un tātad arī enerģiju uz izejas kondensatora sniedza *LTC3108* pārveidotājs, kas atbilst zemākajai ieejas enerģijai starp pārveidotājiem (3.9. att., b). Lai katras shēmas veikumu izteiktu uzskatāmāk, tiks aprēķināta efektivitāte. Elektroenerģijas pārveidošanas efektivitāti dotajā eksperimentā var apskatīt dažādos veidos, lai uzsvērtu atsevišķi konkrētas pārveidotāja daļas vai arī kopējo lietderību. Turpmāk tiks apskatītas sekojošas attiecības: izejas enerģijas  $E_{out}$  attiecība pret kopējo enerģiju  $E_0$  — kopējā sistēmas efektivitāte (3.4); izejas enerģijas attiecība pret ieejas enerģiju kondensatorā  $CI$  un pašā pārveidotājā  $E_{in}$  — zemsprieguma pārveidotāja efektivitāte (3.5); kondensatora  $CI$  un pārveidotāja ieejas enerģijas attiecība pret kopējo sistēmas ieejas enerģiju — taisngrieža  $DI$  efektivitāte (3.6).

$$\eta_0 = \frac{E_{out}}{E_0}, \quad (3.4)$$

$$\eta_{in} = \frac{E_{out}}{E_{in}}, \quad (3.5)$$

$$\eta_{D1} = \frac{E_{in}}{E_0}, \quad (3.6)$$

kur  $\eta_0$  — kopējais lietderības koeficients;

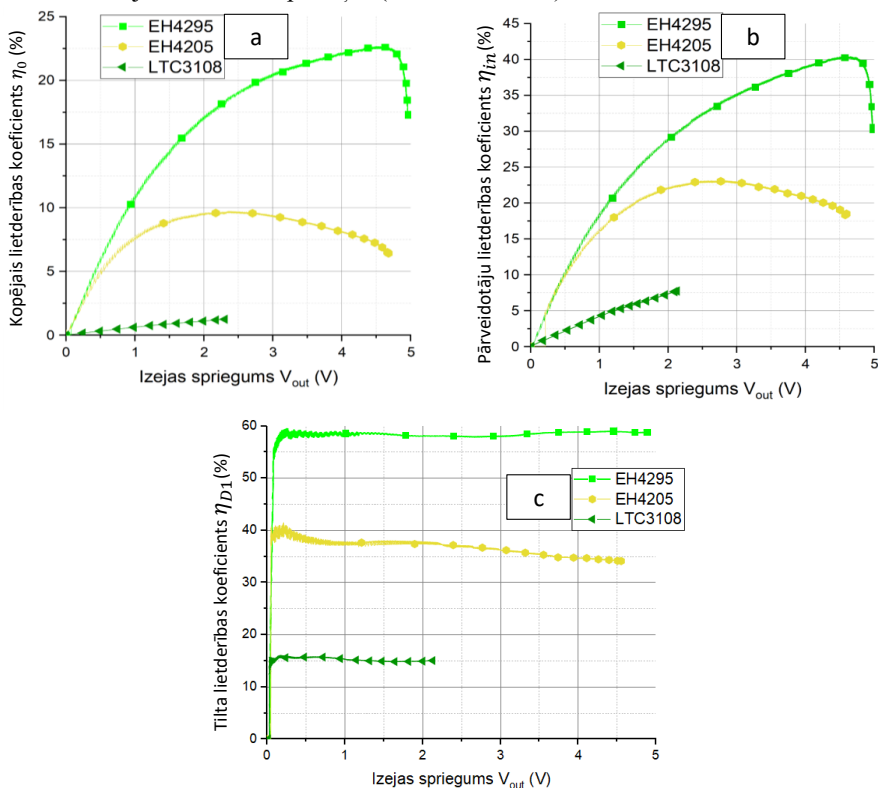
$\eta_{in}$  — zemsprieguma pārveidotāja lietderības koeficients;

$\eta_{D1}$  — taisngrieža tilta lietderības koeficients.

Tā kā ieejas signāls eksperimenta laikā tika uzturēts nemainīgs, efektivitāti vērts attēlot nevis atkarībā no eksperimenta laika, kas neietekmē shēmas parametrus, bet gan uzlādes līmeņa izejas kondensatorā. Kopējā sistēmas efektivitāte (3.4) sniedz visas sistēmas elektriskās



enerģijas pārveidošanas efektivitāti dotajos apstākļos (3.10. att., a). Pieņemot, ka mehāniskās kustības parametri ir atbilstoši stabilām cilvēka rokas kustībām, to var uzskatīt par augstāko sistēmas efektivitāti konkrētajam subjektam soļošanas laikā. Zemsprieguma pārveidotāja (3.5) un taisngrieža efektivitāte (3.6) sniedz priekšstatu, cik lietderīgi atbilstošie shēmas posmi funkcionē dotajā sistēmā un apstākļos (3.10. att., b un c).



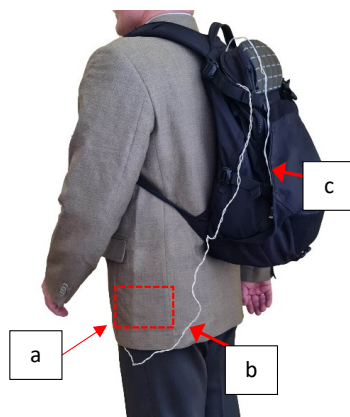
3.10. att. Elektriskās sistēmas posmu elektroenerģijas efektivitātes atkarība no izejas sprieguma uz C2: kopējais (a), zemsprieguma pārveidotāju (b) un taisngrieža tilta (c) lietderības koeficients.

Kā redzams iepriekšējos grafikos (3.10. att., a un b), shēma ar augstākās pretestības pārveidotāju *EH4295*, augstāko efektivitāti sasniedz pie 4,6 V, kas ir tuvu maksimālajam sasniedzamajam sprieguma līmenim, bet tālāk seko strauja efektivitātes krišanās. Turpretim slēgums ar *EH4205* pie dotajiem ieejas signāla parametriem augstāko efektivitāti sasniedz pie aptuveni 2,5 V, kas ir tuvu pusei no augstākā sasniedzamā līmeņa, tālāk efektivitāte krītas. Tā kā izejas spriegumu stabilizējošā daļa šiem pārveidotājiem ir tā pati (*EH300*), var secināt, ka *EH4205* ar doto ieejas signālu nav spējīgs efektīvi paaugstināt spriegumu virs dotās 2,5 V vērtības. Savukārt shēmai ar *LTC3108* efektivitātes līknes stāvums nedaudz samazinās jau pēc 1,2 V izejā, bet pēc tā vēl nevar pateikt, kur būs augstākā vērtība. Iespējams, ka saraustītais ieejas signāls dotajam pārveidošanas principam traucē sasniegt augstāko efektivitāti līdz ar ražotāja norādīto augstāko izejas spriegumu.

Taisngrieža tilta efektivitāte (3.10. att., c) visu pārveidotāju shēmām sākotnēji pieaug kopā ar izejas spriegumu līdz aptuveni 0,2 V, tātad mērījumu sākumā pārveidotāju patērētā jauda bija augstāka, visticamāk, sākotnēji izlādētā izejas kondensatora  $C_2$  dēļ. Tālāk pēc izsvārstīšanās seko salīdzinoši stabila lietderības koeficienta vērtība. Tas apstiprina iepriekš ievēroto tendenci ieejas enerģijai (3.9. att., b), kas uzrādīja teju nemainīgi pieaugošu raksturu ar nelielu izliekumu sākumā, kas nozīmē augstāku shēmu patēriņu. Viens no trim apskatītajiem zemsprieguma pārveidotājiem (*EH4205*) uzrādīja papildu patēriņa pieaugumu arī vēlāk, to labi parāda krītoša taisngrieža efektivitāte pēc 2,2 V izejas sprieguma. Nedaudz virs šīs sprieguma vērtības arī paša zemsprieguma pārveidotāja efektivitāte sāk samazināties (3.10. att., b, *EH4205*), kas ļauj secināt, ka pārveidotājam augstāka izejas sprieguma uzturēšanai dotajos darba apstākļos nepieciešama lielāka ieejas strāva, kas rezultējas ar zudumu pieaugumu taisngrieža posmā un kopēju efektivitātes kritumu. Ņemot vērā tā efektivitātes stāvo atkarību no ieejas sprieguma (3.4. att.), var izteikt minējumu, ka pie zemāka ieejas sprieguma, piemēram, reālu kustību vājākas ģenerācijas apstākļos, dotais efekts tiks novērots jau pie zemāka izejas sprieguma, kā arī var parādīties pārējiem zemsprieguma pārveidotājiem.

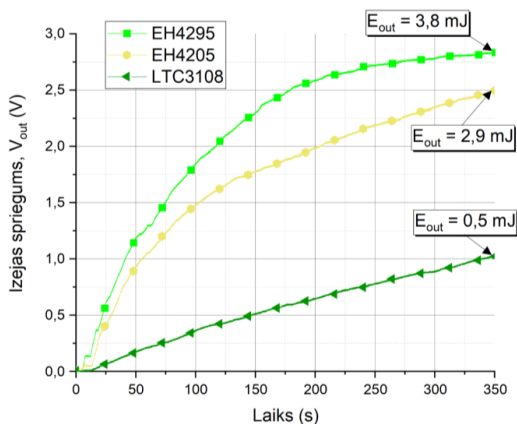
### 3.3. Reālu darbības apstākļu eksperimenta gaita un rezultāti

Mērījumu rezultātu tendences apstiprināšanai eksperiments tika atkārtots ar cilvēku kā kustību avotu, jo reāli apstākļi ieviesīs laikā nepastāvīgas izmaiņas ģenerētā signāla amplitūdā un frekvencē, ko ir vērts novērtēt līdz ar iepriekš veiktajiem stabilā signāla mērījumiem. Eksperimentam tā pati mērījumu shēma kopā ar mēraparatūru ievietoti mugursomā, bet savienošanai ar elektromagnētisko kustību enerģijas ievācēju lietots vads (3.11. att.). Dotajā veidā netiek būtiski ietekmētas dabiskās rokas kustības, kas ir svarīgi ticamai reālu apstākļu eksperimenta norisei. Tā kā mērīšanas shēma jāsaslēdz un mērīšanas process jāstartē pirms visa salikšanas mugursomā, atsevišķi izvadīts izejas kondensatora (3.6. att.,  $C_{out}$ ) izlādēšanas slēdzis (3.11. att., d). Tas tiek lietots, kad cilvēks ir soļošanas sākumposmā, lai izlādētu pa sagatavošanās laiku uzkrāto elektroenerģiju. Cilvēks ar žaketi 6 minūtes soļoja vienmērīgā tempā pa aptuveni 80 m garu gaiteni, galapunktos apgriežoties. Soļošanas mērījumi domāti, lai salīdzinātu iegūtās individuālās sprieguma un efektivitātes tendences nevis absolūtās vērtības, tāpēc atkārtoti piegājieni katram pārveidotājam netika veikti.



3.11. att. Reālu mērīšanas apstākļu eksperiments. Kustību enerģijas ievācējs atrodas žaketē (a), ar vadiem (b) tas pieslēgts mērījumu shēmai, kas ar mēriekārtām atrodas mugursomā. Izvadīts izejas kondensatora izlādes slēdzis (c).

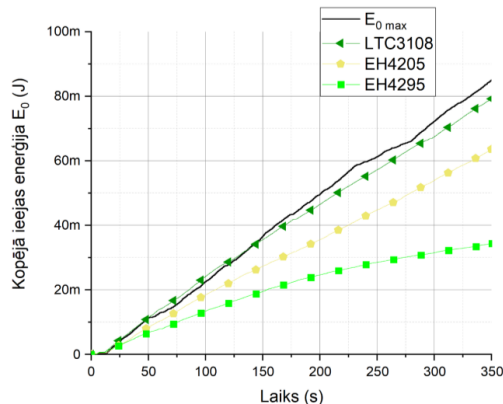
Apstrādājot datus, par sākuma punktu uzskatīta izejas kondensatora manuālā izlāde, kas notiek pēc tam paredzētā slēdža nospiešanas. Uz izejas kondensatora nomērītais spriegums parādīts sekojošajā attēlā (3.12. att.). Kā redzams, uzlādes tendence ir palikusi nemainīga, augstāko spriegumu izejā uzkrāj pārveidotājs ar lielāko ieejas pretestību, bet zemāko spriegumu ar vismazāko pretestību gluži kā iepriekš (3.8. att.). Lai gan kontrolēto apstākļu mērījumos augstākās ieejas pretestības pārveidotājam izejas spriegums sāka piesātināties tuvu 5 V līmenim, reālos apstākļos tas notiek ap 2,75 V, tas var norādīt uz kopēji zemāku amplitūdu ģenerētiem sprieguma impulsiem.



3.12. att. Spriegums un maksimālā enerģija uz izejas kondensatora eksperimentā ar cilvēku.

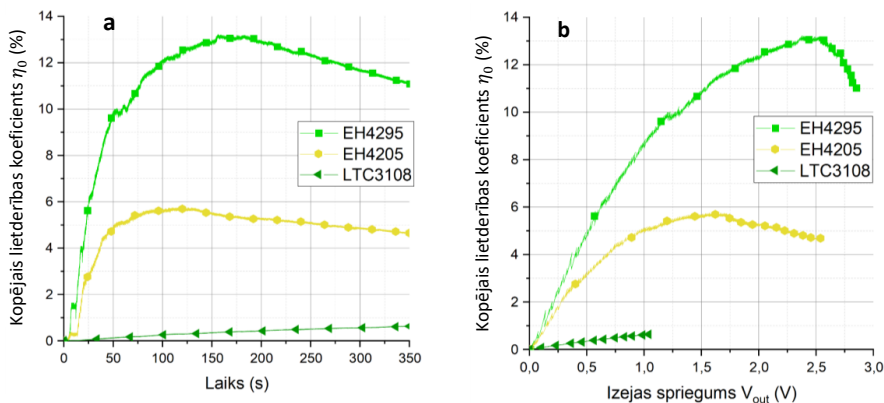
Tika veikts arī tukšgaitas mērījums, lai aprēķinātu dotajos apstākļos maksimāli iespējamo enerģiju. Visu triju sistēmu uzņemtā enerģija ( $E_0$ ) parādīta sekojošajā grafikā (3.13. att.). Uzņemtās enerģijas vērtības eksperimentā ar cilvēku sarindojušās tādā pašā secībā kā mērījumos ar mehānisko manipulatoru, apstiprinot noteikto sakarību starp pārveidotāja ieejas

pretestību un uzņemto enerģiju. Vienīgi zemākās ieejas pretestības pārveidotāja (*LTC3108*) shēma laika posmā līdz 150 s uzrāda ar teorētiski maksimālo enerģiju sakrītošu, vai pat augstāku ieejas enerģiju. Tas skaidrojams ar dabisko faktoru radīto neideālo kustību raksturu, tamdēļ pat secīgi atkārtotu individuālo mērījumu (tukšgaita un ar pieslēgtu shēmu) absolūtās vērtības salīdzināt nav vērts. Uz ģenerētā signāla izkliedi norāda arī grafikā redzamo līkņu forma — kontrolēto apstākļu mērījumos tika iegūtas vizuāli teju nevainojamas taisnes (3.9. att.), bet dotajām līknēm ir acīmredzamas svārstības, arī sākuma izliekums ir izteiktāks nekā automatizēto kustību eksperimentā, bet augstākās pretestības pārveidotāja (*EH4295*) shēma papildus uzrāda izteiktu izliekumu laikā ap 200 s, kas neatbilst citur novērotajiem. Visticamāk, tas norāda uz kāda kustības parametra pārmaiņu, piemēram, soļošanas ātruma vai stājas maiņa soļošanas gaitā. Laika ziņā tas sakrīt ar izejas sprieguma pieauguma samazinājumu (3.12. att.), kas ļauj secināt, ka pirmīt novērotais izejas sprieguma piesātinājums konkrētajai shēmai nav saistīts ar nemainīgi zemāku ģenerāciju — eksperimenta sākuma parametri bija līdzīgi visiem trim piegājieniem, bet viena eksperimenta laikā ģenerētā jauda samazinājās valkātāja kustību izmaiņas vai apģērba deformācija dēļ.



3.13. att. Sistēmu kopējā ieejas enerģija un teorētiski maksimālā eksperimentā ar cilvēku, atkarība no laika.

Lai gan enerģijas attēlojums laikā parādīja, ka vienā mērījumu sērijā notika būtiska ģenerācijas izmaiņa, pārējie mērījumi uzrādīja tikai nelielas kopējās enerģijas pieauguma svārstības. Dotajā situācijā tas neizmainīja kontrolēto apstākļu uzrādīto rezultātu tendenci, proti, augstākais un zemākais iegūtais spriegums atbilst to pašu pārveidotāju shēmām. Šī apstākļa dēļ mērījumi netika atkārtoti vienmērīga kopējās ieejas enerģijas ( $E_0$ ) pieauguma iegūšanai, turklāt šādas neparedzētas izmaiņas vēl labāk parāda reālo apstākļu ietekmi un ļauj to salīdzināt ar vienmērīgākas ģenerācijas paraugiem. Tā kā vienas shēmas mērījuma ietvaros bija novērota acīmredzama kopējās enerģijas  $E_0$  izmaiņa soļošanas laikā (*EH4295* mērījumos), ir vērts apskatīt kopējās efektivitātes (3.4) atkarību gan no laika (3.14. att., a), gan no izejas sprieguma (3.14. att., b).



3.14. att. Kopējās sistēmas enerģijas efektivitātes (3.4) atkarība no laika (a) un izejas sprieguma (b) eksperimentā ar soļojošu cilvēku.

Var novērot, ka sistēmas ar pārveidotāju *EH4295* efektivitāte laikā (3.14. att., a) sāk kristies jau ap 200 s, kas sagaidāmi sakrīt ar kopējās ieejas enerģijas (3.13. att.) un izejas sprieguma (3.12. att.) pieauguma straujuma samazinājumu. Sistēma ar doto pārveidotāju uzrāda augstāko efektivitāti pie aptuveni 2.5 V (3.14. att., b), tas ir ļoti tuvu augstākajam sasniegtajam spriegumam ar esošo ieejas signālu. Sistēma ar vidējās pretestības pārveidotāju *EH4205* uzrāda efektivitātes augstāko punktu pie aptuveni 1,5 V, kaut gan izejas spriegumam nav novērota piesātinājuma daba (3.12. att.). Savukārt sistēmai ar zemākās pretestības pārveidotāju *LTC3108* enerģijas efektivitāte un arī izejas spriegums (3.12. att.) turpina pieaugt visā mērījuma laikā, neuzrādot acīmredzamu augstāko vērtību.

### 3.4. Kopējais rezultātu novērtējums

Gan kontrolētu apstākļu eksperimentos, kur ieejas signāla amplitūda un periods nemainās laikā, gan reālos mērījumos, kur parādās nekontrolējamas ģenerētā enerģijas daudzuma izmaiņas, dotais zemsprieguma pārveidošanas princips bija spējīgs nodrošināt sprieguma paaugstināšanu un elektroenerģijas uzkrāšanu kondensatorā. Kontrolēto apstākļu un cilvēka soļošanas eksperimentos iegūtās tendences spriegumam (3.8. att. un 3.12. att.) un efektivitātei (3.10. att. (a) un 3.14. att. (b)) sakrīt, kas norāda uz pietiekami precīzi atveidoto reālo cilvēka kustību raksturu.

Tā kā mehāniskais manipulators bija iestafīts atdarināt dotā cilvēka rokas kustību ātrumu un periodu, kontrolēto apstākļu rezultātus var uzskatīt par sasniedzamo maksimumu nemainīgu kustību gadījumā. Šādos apstākļos tika aprēķināta pašu pārveidotāju elektroenerģijas efektivitāte, to var salīdzināt ar datu lapās pieejamo informāciju. Lai gan doto zemsprieguma pārveidotāju ražotāji sniedz jaudas efektivitāti (3.4. att.), enerģijas efektivitātei ilgstošākā uzkrāšanas posmā jābūt tai pielīdzināmai. Ražotāju dati balstās uz ieejas līdzsprieguma vērtību, tamdēļ līdz ar pirmīt iegūto augstāko efektivitāti (3.10. att., c) var izteikt taisngriezta signāla (3.7. att.) vidējo kvadrātisko vērtību kontrolēto apstākļu eksperimentā (3.1. tab.). Tā kā noteiktā efektivitāte pārveidotājiem *EH4295* un *EH4205* pieaug un tad krītas eksperimenta gaitā, vidējā

kvadrātiskā sprieguma aprēķinam lietoti dati pirms efektivitātes samazināšanās. Aprēķinātās sprieguma vērtības apstiprina iepriekš izteikto minējumu, ka pārveidotājs *LTC3108* ieejas pretestības rakstura dēļ noslogos avotu tā, lai spriegums tiektos uz tā startēšanās līmeni, kur pretestība ir augstākā, diemžēl augstāka efektivitāte tam ir pie lielāka sprieguma (3.4. att.).

3.1. tabula

Augstākais eksperimentāli noteiktais pārveidotāju lietderības koeficients kontrolētos apstākļos un ražotāju dati.

	Taisngrieztā signāla vidējā kvadrātiskā vērtība	Augstākā pārveidotāja enerģijas efektivitāte mērījumos ( $\eta_{in}$ )	Ražotāju dotā jaudas efektivitāte pie atbilstoša līdzsprieguma (3.4. att.)
<i>EH4295</i>	326 mV	40,5 %	52 %
<i>EH4205</i>	131 mV	23,2 %	29 %
<i>LTC3108</i>	19 mV	7,8 %	35 %

Kā redzams iepriekšējā tabulā, visiem pārveidotājiem eksperimentāli noteikta par vismaz piektdaļu mazāka efektivitāte nekā ražotāja paredzētā. Starpības iemesls, domājams, ir ieejas signāla veids (ražotājs, bez šaubām, lieto stabilu līdzspriegumu) un enerģijas zudumi izejas kondensatora uzlādes laikā. Visbūtiskākā starpība ir *LTC3108* efektivitātei, atšķirībā no augstākas ieejas pretestības pārveidotājiem, tam bija visstiprākās svārstības ieejas signālā un visilgāk pārtrauktais ieejas spriegums (3.7. att.), visticamāk, tas neļauj pārveidotāja ieejas ķēdei uzturēt stabilu svārstību režīmu. Savukārt pārējiem pārveidotājiem, neskatoties uz to, ka *EH4205* starp impulsu kopām arī izslēdzas zemā sprieguma dēļ līdzīgi kā *LTC3108*, starpība līdz ražotāja noteiktajai efektivitātei ir procentuāli tuva (20 un 22 %). Šis ļauj izteikt secinājumu, ka periodiska izslēgšanās dotā principa pārveidotājiem ir mazāk traucējoša nekā regulāras, straujas sprieguma svārstības, ko katras impulsu kopas laikā piedzīvoja vienīgi zemākās pretestības pārveidotājs (3.7. att.). Lai gan signālu var padarīt stabilāku ar augstāku filtrējošo kapacitāti *CI*, tas novestu pie zemākas pīķu amplitūdas, bet tik zemas amplitūdas signāliem tā ir būtiska pārveidošanas efektivitātei.

Spricētot pēc pārveidotāju ieejas enerģijas plūsmas izmaiņas (3.13. att.), tikai viena cilvēka kustību eksperimenta gaitā (*EH4295*) notika acīmredzama ģenerācijas pavājināšanās. Laika ziņā tā saskan ar izejas sprieguma un sistēmas efektivitātes pieauguma palēnināšanos. Savukārt pārveidotājs *EH4205* arī bez būtiskām ieejas signāla izmaiņām uzrāda efektivitātes kritumu bez acīmredzama izejas sprieguma piesātinājuma, ar cilvēka kustībām tas notika pie zemākas izejas sprieguma vērtības. Starpība var būt saistīta ar stāvāku efektivitātes atkarību no ieejas sprieguma (3.4. att., *EH4205* pie ieejas sprieguma zem 0.5 V), kuras dēļ pārveidotājs stiprāk reaģē uz atšķirīgu ģenerēto signālu.

Novērots, ka dotajos eksperimentos novērtētā diožu tilta efektivitāte ir zemāka nekā pirmīt pārbaudītā ar rezistīvu slodzi (nodaļa 2.3.2), piemēram, 50  $\Omega$  ieejas pretestības pārveidotājam (*EH4205*) ar doto enerģijas ievācēju būtu jānodrošina ap 50 % tilta efektivitāti (2.10. att., slodzes un avota iekšējās pretestības attiecība ap 2.6), bet faktiski uzrādīti 34–42 % (3.14. att., c). Pie resistīvas slodzes, kas teju 12 reizes augstāka nekā avota iekšējā pretestība, tilta lietderības koeficients bija 68 %, slogošana ar 50 reizēm augstāku pretestību teorētiski radītu līdzīgu vai augstāku efektivitāti (*EH4295* ar aptuveni 1 k $\Omega$ ), bet iegūti 59 %. Nenoliedzami,

nelineāro taisngrieža elementu efektivitāte mainīsies pie atšķirīgas ieejas signāla amplitūdas, bet vērā ņemams neatbilstības iemesls ir papildu sloģojošais elements dotajā eksperimentā — filtrējošais kondensators pēc tilta —, kā arī impulsveida sloģošana ar zemsprieguma pārveidotājiem.

Apskatot dotās sistēmas kā potenciālus barošanas avotus, kopējā efektivitāte, iegūtais spriegums, enerģija un tās uzkrāšanas laiks ir svarīgākie parametri, tamdēļ šie dati apkopoti 3.2. tabulā, attiecīgais spriegums vai lietderības koeficients norādīti iekavās, jo to sasniegšanas laiks pārsvarā atšķiras. Idealizētu kustību apstākļos visos pārbaudāmajos variantos, bet reālu rokas kustību apstākļos divos no trim, tika sasniegts spriegums, kas ir virs daudzu mikrokontrolleru startēšanās sprieguma 1,8 V. Vienīgi pārveidotājs *LTC3108* mērījumu laikā uzrādīja savu augstāko enerģijas efektivitāti pie augstākā izejas sprieguma, kas teorētiski padara to par izdevīgāku kandidātu elektroenerģijas uzkrāšanai pie lielāka sprieguma, bet tam ir nepieciešams stabilāks un augstāks ieejas signāls. Dotā kustību enerģijas ievācēja gadījumā *LTC3108* savas zemās ieejas pretestības dēļ rada būtiskākos zudumus taisngriešanas posmā, tamdēļ, lai sasniegtu pārējo apskatīto pārveidotāju enerģijas uzkrāšanas ātrumu, tam būtu jāstrādā ar augstāko ražotāja norādīto efektivitāti, kas reālistiski mainīga ieejas signāla gadījumā nav ticami.

3.2. tabula

Kontrolēto un reālo apstākļu iegūtā sprieguma un kopējās efektivitātes salīdzinājums.

Parametrs	Pārveidot. modelis	<i>Mehāniskais manipulators</i>		<i>Cilvēks</i>	
		Vērtība	Laiks	Vērtība	Laiks
<i>Lielākais izejas spriegums <math>V_{out}</math> (enerģija <math>E_{out}</math>)</i>	<i>EH4295</i>	<b>4,97 V (11,7 mJ)</b> (pie $\eta_0 = 17,4\%$ )	282 s	<b>2,83 V (3,8 mJ)</b> (pie $\eta_0 = 11,1\%$ )	350 s
	<i>EH4205</i>	<b>4,66 V (10,4 mJ)</b> (pie $\eta_0 = 6,6\%$ )	350 s	<b>2,50 V (2,9 mJ)</b> (pie $\eta_0 = 4,7\%$ )	350 s
	<i>LTC3108</i>	<b>2,27 V (2,3 mJ)</b> (pie $\eta_0 = 1,3\%$ )	350 s	<b>1,02 V (0,5 mJ)</b> (pie $\eta_0 = 0,6\%$ )	350 s
<i>Lielākā kopējā sistēmas efektivitāte <math>\eta_0</math></i>	<i>EH4295</i>	22,7 % (pie $V_{out} = 4,56$ V)	184 s	13,2 % (pie $V_{out} = 2,37$ V)	156 s
	<i>EH4205</i>	9,7 % (pie $V_{out} = 2,37$ V)	68 s	5,8 % (pie $V_{out} = 1,56$ V)	110 s
	<i>LTC3108</i>	1,3 % (pie $V_{out} = 2,27$ V)	350 s	0,6 % (pie $V_{out} = 1,02$ V)	350 s

Augstākās efektivitātes un iegūtā sprieguma momentu nesakritība ļauj secināt, ka pārveidotājiem ir efektīvāks izejas sprieguma punkts, virs kura turpināt elektroenerģijas uzkrāšanu pie tāda paša ieejas sprieguma paliek mazāk lietderīgi. Par to ne vienmēr liecina drīza izejas sprieguma piesātināšanās kā *EH4295* gadījumā, un tas parādās gan stabila, gan reālistiski mainīga ieejas signāla mērījumos, atšķiras vien izejas sprieguma vērtība, pie kuras tiek sasniegta augstākā efektivitāte. No tā var secināt, ka dotais efekts ir vairāk atkarīgs no ieejas amplitūdas, nevis pastāvīguma, un ir atšķirīgs dažādiem pārveidotājiem. Visticamāk, pārsniedzot augstākās efektivitātes sprieguma līmeni, ir vērts aktīvi sākt izmantot elektroenerģiju vai novirzīt to uz citu enerģijas uzkrāšanas elementu, lai turpinātu darboties augstākās lietderības režīmā. Jāsaka, ka divu uzkrāšanas elementu pieeju var realizēt ar

*LTC3108* mikroshēmu, bet pārslēgšanās līmeni papildu elementa uzlādei nevar mainīt, tā sakrīt ar iestatīto spriegumu. Diemžēl dotā pieeja nešķiet pilnvērtīgi pielietojama dotajam kustību enerģijas ievācējam, jo, kā to pierādīja reālu kustību eksperiments, vajākas vai stiprākas ģenerācijas gadījumā efektīvākais pārveidotāju izejas spriegums būtiski mainās. Var secināt, ka praktiskai izmantošanai lietderīgāk pielietot pārveidotāju, kas sagaidāmajā ieejas un izejas spriegumu diapazonā neuzrāda krasu atšķirību starp augstāko un efektīvāko izejas spriegumu, jo uzkrātās elektroenerģijas rezerves nodrošināšanai vai patērētāja barošanas nolūkam var būt nepieciešama lielāka izejas sprieguma vērtība.

Atsevišķi izanalizējot pārveidotāju *EH4295* un *EH4205* sprieguma stabilizācijas bloku *EH300*, konstatēts, ka tas ierobežo izejas spriegumu, patērējot uzkrāto enerģiju, nevis limitējot ieejošo vai izejošo. Konkrētajam blokam tas nozīmē būtisku strāvas patēriņa pieaugumu jau virs 5 V sasniegšanas, kas paskaidro sprieguma ierobežošanos ap šo līmeni mērījumos ar augstākās pretestības pārveidotāju *EH4295* (3.8. att.). Līdz piecu voltu līmenim *EH300* strāvas patēriņš pieaug lēni, bet pie 3 V tie jau ir 5  $\mu\text{A}$ , kas var būtiski paātrināt uzkrājošā kondensatora izlādi. Šī pieaugošā patēriņa tendence var radīt efektivitātes krišanos līdz ar pieaugošu izejas spriegumu, kā tas novērots pie 5 V līmeņa pārveidotājam *EH4295* (3.10. att., a un b), tomēr ar to nevar paskaidrot pārveidotāja *EH4205* efektivitātes krišanos pēc noteikta izejas sprieguma, jo eksperimentā ar cilvēka kustībām augstākās efektivitātes punkts 1.53 V (3.2. tab.) ir būtiski zem *EH300* pieaugošā patēriņa līmeņa (3.2. att., a). Būtībā *EH300* bloks ir aizvietojams ar citām komponentēm pēc nepieciešamības, piemēram, ja nav vajadzības pēc izejas sprieguma ierobežošanas dotajā posmā, visas bloka funkcijas veiktu taisngriešanas elementi ar kondensatoru.

Uz izejas kondensatora ir iegūts pietiekami augsts spriegums dažādu integrālshēmu darbībai, tālab var novērtēt enerģijas pietiekamību loģisko shēmu barošanai. Iepriekš darba nodaļā 1.4 tika noskaidrots, ka mikrokontrollerim *MSP430G2553* pie 6 MHz takts frekvences dažādu matemātisku, komunikācijas un datu drošības nodrošināšanas operāciju veikšanai nepieciešami 1.5 mJ enerģijas pie 1.8 V sprieguma. Labākais rezultāts ar cilvēka kustībām bija 2.83 V (3.2. tab., *EH4295*) — mikrokontrollerim līdz savam zemākajam barošanas spriegumam (1,8 V) ir pieejami 2.3 mJ, tātad ir pat neliela enerģijas rezerve. Iespējams, ar to pietiktu papildu patēriņa kompensācijai, kas radies no sākotnēji augstāka barošanas sprieguma. Tā kā iekrātā rezerve nav būtiska, bet ģenerācija var būt nepastāvīga, šādās sistēmās acīmredzot ir svarīga barošanas sprieguma uzraudzīšana, lai atliktu enerģijas prasīgu operāciju veikšanu līdz atbilstoša līmeņa uzkrātajai enerģijai.

### 3.5. Kopsavilkums

Nodaļā tika apskatīti trīs dažādu ieejas parametru zemsprieguma pārveidotāji, kas darbojas pēc radniecīga pamatprincipa. Mērķis bija noskaidrot to funkcionēšanas īpatnības un izmantošanas iespējas ar elektromagnētiskā kustību enerģijas ievācēja ģenerēto signālu pēc taisngriešanas, kas atšķiras no to ražotāju paredzētā stabilā līdzsprieguma.

Eksperimenta nolūkiem izveidots mehānisko kustību avots, lai elektromagnētiskajam enerģijas ievācējam varētu nodrošināt nemainīgus apstākļus ģenerācijai. Tā ātrums un periods





## 4. TAISNGRIEŠANAS POSMA OPTIMIZĀCIJA AR GLUDINOŠĀ FILTRA KAPACITĀTI

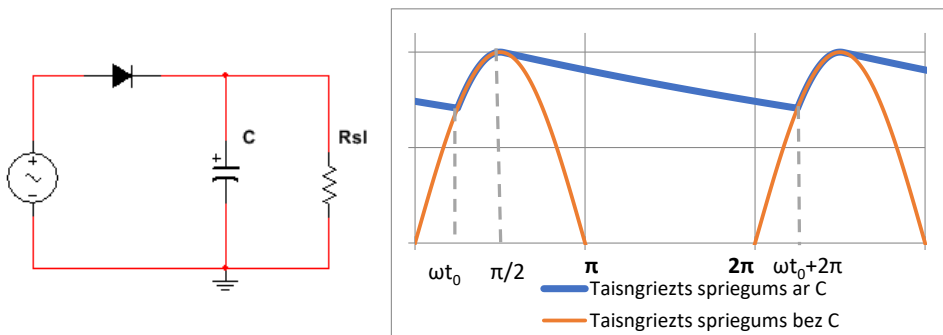
Kā parādīja iepriekšējās nodaļas mērījumi, būtiskus enerģijas zudumus sprieguma pārveidošanā ieviesa taisngriešanas posms. Viens risinājuma variants ir izmantot zemāka sprieguma krituma taisngriešanas elementus vai arī aktīvo taisngriešanu, tas nodrošinās augstāku enerģiju pārveidotāju ieejā un rezultātā lielāku kopējo efektivitāti. Tomēr pašu pārveidotāju efektivitātes pieaugums var būt nebūtisks vai pat izpalikt, jo, kā bija novērots, salīdzinot zemsprieguma pārveidotāju darbības efektivitātes nodaļā 3.4 — straujas ieejas signāla svārstības ietekmē apskatītā pārveidošanas principa efektivitāti. Tātad jācenšas iegūt ne vien augstāku, bet arī stabilāku signālu pārveidotāju ieejā, proti, ar mazākiem sprieguma iekritumiem. To nodrošina filtrējošais jeb gludinošais (angļu val. — *smoothing*) kondensators pēc taisngrieža, bet arī tas pašsaprotami iespaido zudumus taisngriezī — kā novērots nodaļā 3.4, tādām pašām tilta slēgumam ar tīri rezistīvu slodzi ir augstāka efektivitāte nekā pielīdzināmas pretestības pārveidotājam ar filtrējošo kondensatoru.

Šajā nodaļā tiks apzināta filtrējošā kondensatora kapacitātes ietekme uz taisngrieztu signālu, cenšoties iegūt pēc iespējas augstāku amplitūdu ar mazākiem sprieguma iekritumiem. Iesākumā tiks aplūkoti jau esošie taisngriežu filtrējošo kondensatoru analīzes veidi, tālāk uz to pamata tiks veidots analītiskais modelis esošajai situācijai, ņemot vērā dotā barošanas avota īpatnības. Modelis iesākumā tiks pārbaudīts ar datorsimulācijām, lai novērtētu tā matemātisko precizitāti pie dažādu parametru maiņas, beigās tiks veikta praktiska pārbaude.

### 4.1. Stacionāra signāla analīze

Gludinošais filtrs pēc taisngriešanas elementiem ir būtisks posms maiņstrāvas pārveidošanā līdzstrāvā, bez tā būtu tikai atsevišķi sprieguma impulsi ar iekritumu līdz nullei starp tiem, kas elektronikas elementu prasībām reti kad ir apmierinoši. Centieni analizēt šo svarīgo sastāvdaļu nav jaunums, tie sākās ar grafisku analīzi dažādiem vakuuma diožu slēgumiem gan ignorējot, gan ņemot vērā rezistīvus zudumus ķēdē pirms filtra elementiem [119]. Pārsvārā autori [120]–[122] vienkāršo analītisko modeli, ņemot vērā tikai slodzes pretestību ķēdē un ignorējot pārējos zudumus, citi cenšas izveidot simbolisku risinājumu sistēmās ar zudumiem [123], [124]. Analīzes vienkāršošanai taisngrieža elementus modelē kā ideālus slēdzus, precīzākiem aprēķiniem var iekļaut sprieguma kritumu vai ekvivalento pretestību, kas ir atkarīga no vēlamā analizējamā parametra, piemēram, pīķa, vidējās vai vidēji kvadrātiskās strāvas [119]. Uzsvars tiek likts uz stabilu stāvokli sistēmā, proti, ieejā ir ilgs, periodisks un nemainīgs signāls, lai noteiktu tādus parametrus kā strāva taisngriezī un sprieguma krišanās uz slodzes starp ieejas impulsiem.

Lai uzskatāmāk analizētu taisngrieža un kondensatora sadarbību, apskatīsim tā vienkāršoto variantu pusperioda taisngriezim grafiski, ņemot vērā slodzes pretestību kā vienīgo zudumu cēloni, piemēram, kā tas darīts [121] darbā. Šāda principiālā shēma un izejas sprieguma vērtības parādītas sekojošajā attēlā (4.1. att.).



4.1. att. Principiālā shēma gludinošā filtra modelim un izejas sprieguma grafiks.

Ja shēmā nebūtu gludinošā filtra kondensatora, tad izejas signāls būtu atsevišķi impulsi, bet, pievienojot kondensatoru, uz tā esošo spriegumu var sadalīt 2 ciklos [121]:

$$v_{out}(\omega t) = V_p \sin(\omega t) \text{ pie } \omega t_0 < \omega t < \frac{\pi}{2} \quad (4.1)$$

$$v_{out}(\omega t) = V_p e^{-\frac{\omega t - \frac{\pi}{2}}{\omega C R_{sl}}} \text{ pie } \frac{\pi}{2} < \omega t < 2\pi + \omega t_0 \quad (4.2)$$

kur  $v_{out}$  — spriegums uz kondensatora un slodzes, V;

$V_p$  — ieeja signāla amplitūda, V;

$\omega$  — ieejas signāla leņķiskā frekvence, rad;

$t$  — laiks, s;

$C$  — kondensatora kapacitāte, F;

$R_{sl}$  — slodzes pretestība.

Kad ieejas signāla impulss ir pietiekami augsts, lai diode atvērtos (4.1. att., moments  $\omega t_0$ ), izejas signāla formu var raksturot ar to pašu funkciju kā ieejas signālam, ko visos iepriekš minētajos modeļos uzskata par sinusoīdu ((4.1), kur  $V_p$  ir ieejas sprieguma amplitūda, ja uzskata, ka uz diodes nav zudumu). Kad taisngrieztais impulss pēc pīķa vērtības sāk kristies (4.1. att., moments  $\pi/2$ ), diode aizveras, jo spriegums uz kondensatora ir augstāks nekā ieejā. Izejas spriegums šajā posmā raksturojams kā kondensatora eksponenciālā izlāde caur slodzi (4.2). Šis tuvinājums strādā, ja laika konstante  $R_{sl} \cdot C$  ir pietiekami liela, lai slodzes sprieguma kritums būtu lēnāks nekā ieejas signāla impulsa kritums, pretējā gadījumā diode neaizvērtos. Pienākot nākamajam impulsam, tas „pārtver” dilstošo signālu (4.1. att., moments  $\omega t_0 + 2\pi$ ), un viss atkārtojas.

Lai noskaidrotu sprieguma vērtības uz slodzes šajos ciklu pārslēgšanās punktos no (4.2) uz (4.1), nepieciešams zināt laika momentu  $t_0$ , kad notiek pārslēgšanās. Darbā [121] tas tiek skaitīts no jauna cikla sākuma, uzskatot, ka ieejas signāls sākas laikā  $\omega t = 0$ . Momentu  $t_0$  var noteikt, saprotot, ka tajā laika brīdī sinusoīda nākamajam impulsam (4.1) un eksponenciāli dilstošais spriegums (4.2) sastopas, tātad ir vienādi (4.3) [121].

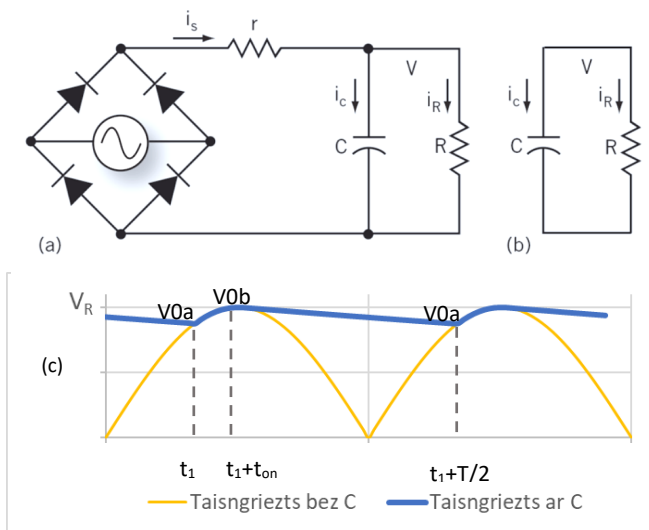
$$V_p \sin(\omega t_0) = V_p e^{-\frac{\omega t_0 - \frac{\pi}{2}}{\omega C R_{sl}}} \quad (4.3)$$

$$\omega t_0 = \text{ArcSin} \left( e^{-\frac{\omega t_0 - \frac{\pi}{2}}{\omega C R_{sl}}} \right) \quad (4.4)$$

Izsakot  $\omega t_0$  no (4.3), iegūstam izteiksmi (4.4), kuru varam ievietot vienādojumā (4.2), iegūstot zemāko vērtību, līdz kurai nokritīsies izejas spriegums uz slodzes starp barošanas avota impulsiem. Šāds vienkāršots modelis ļauj saprast, ka, palielinot kapacitātes  $C$  vērtību, eksponenciālais kritums laikā starp ieejas impulsiem samazināsies. Būtībā izvēloties slodzes laika konstantes  $R_{sl} \cdot C$  vērtību tā, lai tā ir būtiski augstāka par taisngrieztā signāla periodu ( $\pi/\omega$ ), iegūstam pīķa detektoru, kas izejā uzturēs spriegumu taisngrieztā pīķu amplitūdā. Šādi arī vienkārši pamatot pilnā tilta taisngrieža izmantošanu, jo pēc taisngriešanas tas divkārsi ieejas signāla frekvenci, samazinot laiku starp impulsiem  $\pi/\omega$ , kā rezultātā spriegums paspēj mazāk samazināties.

Pamatojoties uz šādiem rezultātiem, var secināt, ka, ja svarīgs tikai pēc iespējas augstāks un stabilāks izejas signāls, kondensatora kapacitāte jāizvēlas lielāka, bet realitātē zudumi shēmā ievieš būtiskas izmaiņas. Ja parādās papildu pretestība avotā, taisngrieža elementos vai vados, uz tās būs sprieguma kritums, kas attiecīgi samazinās lietderīgo spriegumu uz  $R_{sl}$ . Zināms, ka strāva kondensatorā izsakāma kā  $I_{kond} = C \frac{dV}{dt}$ , tātad tā ir proporcionāla kapacitātei  $C$ , līdz ar to sprieguma kritums ķēdē uz zudumu pretestības arī būs proporcionāls kapacitātes vērtībai. Šādā situācijā vērtības izvēle vairs nav tik viennozīmīga, literatūrā tas ir ticis apskatīts gan grafiskā izklāstā [119], gan tīri analītiski simboliskā formā [123], [124].

Darba [124] autors norāda, ka shēma stabilā darba režīmā cikliski pārslēdzas starp 2 stāvokļiem (4.2. att., a un b). Papildus iepriekšējiem analīzes mēģinājumiem, autors [124] filtrā ieejošo signālu raksturo kā  $A|\sin(\omega t + \theta)|$ , ieviešot aizturi  $\theta$  ( $t_l$ ), jo, diodēm sākot vadīt signālu, avota spriegums nebūs nulle. Vēl tiek ņemts vērā, ka, taisngriezim atveroties, uz kondensatora jau ir galēja sprieguma vērtība  $V0a$ , kas tālāk laikā pieaug līdz  $V0b$ , bet pēc diožu aizvēršanās paspēj nokrist tieši līdz tam pašam  $V0a$ , lai cikls var atsākties (4.2. att., c).



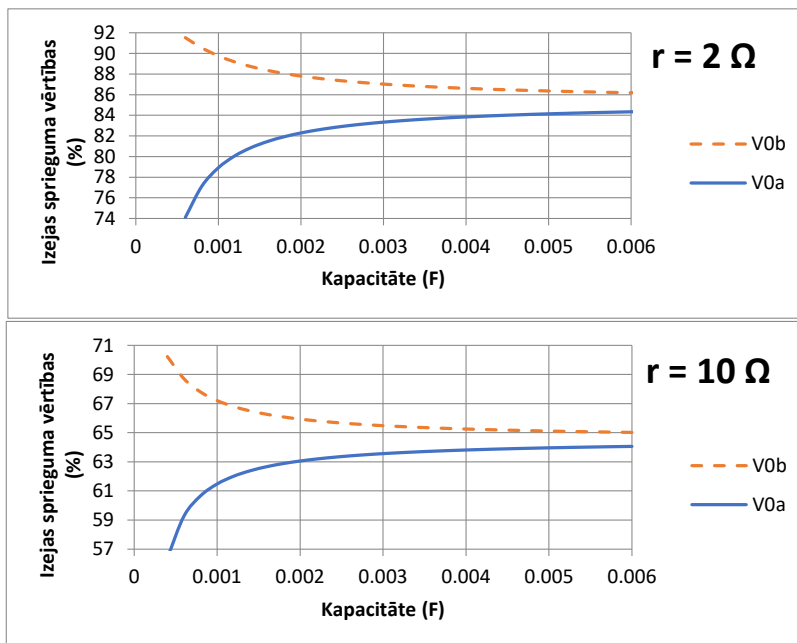
4.2. att. Darba stāvokļi shēmā: (a) — kad diodes ir atvērtas, kondensators sāk uzlādi no galīga sprieguma  $V0a$  ( $i_C > 0$  un  $i_R > 0$ ); (b) — kad diodes ir aizvērtas, kondensators ir sasniedzis līmeni  $V0b$  un izlādējas caur slodzi ( $i_C < 0$ ), līdz atkal sasniedz  $V0a$  [124]; (c) — grafisks attēlojums zīmīgajiem punktiem (autora attēls).

Ņemot vērā šo stāvokļu savstarpējo cikliskumu, darba [124] autors izvirzīja sakarības spriegumam uz slodzes kondensatora stāvokļu pārslēgšanās mirkļos (4.5) un (4.6), tiem nepieciešams atrast laika momentu  $t_1$  (kad diodes sāk vadīt, nulles punkts analīzei) un  $t_1 + t_{on}$  (moments, kad diodes beidz vadīt). Darbā [124] ir sniegts izvērst matemātiskais modelis doto laika un sprieguma mainīgo aprēķinam, no tā var secināt, ka ieejas signāla amplitūda  $A$  vienādi ietekmē  $V0a$  un  $V0b$  punktu mērogu un nefigurē pārslēgšanās momentu vai izlādes ātruma noteicošajos parametros.

$$V0a = A * \text{Sin}[\omega * t_1] \quad (4.5)$$

$$V0b = A * \text{Sin}[\omega(t_1 + t_{on})] \quad (4.6)$$

Izveidojot kodu ar darbā [124] dotajiem vienādojumiem matemātikas datorprogrammā, iespējams iegūt datus par to, kā mainīsies slodzes sprieguma vērtības atkarībā no kapacitātes vai zudumiem. Piemēra dēļ apskatīsim patvaļīgi izvēlētus ieejas parametrus: avota leņķiskā frekvence  $\omega = 100\pi$  (50 Hz), slodzes pretestība  $R = 50 \Omega$ , zudumu pretestība  $r = 2 \Omega$  un  $r = 10 \Omega$ . Kapacitāte mainīta diapazonā 0,6–6 mF. Ieejas sprieguma vērtība  $A$  parādās tikai galējās izteiksmēs un neko citu kā amplitūdu neietekmē, tamdēļ izvēlēta amplitūda  $A = 100$ , lai iegūtie rezultāti uzreiz atainotu slodzes spriegumu procentos no ieejas signāla amplitūdas. Rezultāti ar dažādažām zudumu pretestības vērtībām parādīti sekojošajos grafikos.



4.3. att. Taisngrieža izejas sprieguma augstākā ( $V0b$ ) un zemākā ( $V0a$ ) vērtība cikla laikā izteikta procentos no ieejas signāla amplitūdas pie dažādas zudumu pretestības  $r$ ;  $R = 50 \Omega$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ , izmantojot darba [124] modeli.

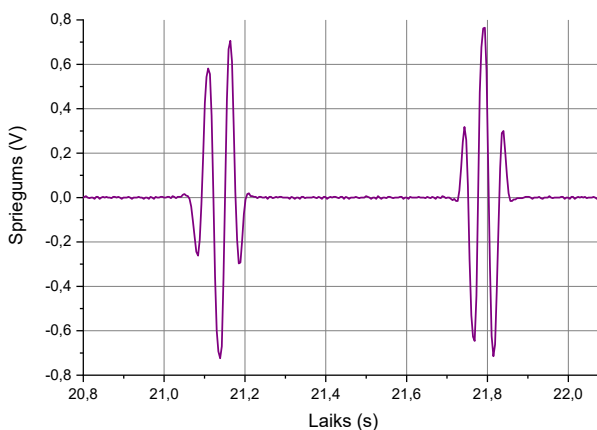
Kā parāda šis modelis, kondensatora izvēle, balstoties vien uz izejas spriegumu, vairs nav tik viennozīmīga kā iepriekš. 4.3. att. parāda slodzes sprieguma augstāko un zemāko vērtību barošanas avota impulsa laikā — pie katras izvēlētās kapacitātes un nemainīgiem konkrētajiem shēmas parametriem spriegums uz slodzes svārstīsies starp abām līknēm. Piemēram, ja izmantotā filtrējoša kondensatora kapacitāte ir 2 mF, tad spriegums uz slodzes gadījumā ar 2  $\Omega$  zudumiem svārstīsies no aptuveni 88 % līdz 82 %, bet shēmā ar 10  $\Omega$  zudumiem, svārstīsies jau starp 66 % un 63 % no ieejas signāla amplitūdas. Palielinot kapacitāti, sprieguma izsvārstīšanās paliek mazākas, kamēr piesātinās kādā konkrētā vērtībā pie būtiski augstākas kapacitātes, bet, atšķirībā no modeļa bez papildu zudumiem, gludāks izejas signāls nozīmē arī būtiski zemāku amplitūdu.

## 4.2. Īsa signāla analīze pilnā tilta slēgumam

### 4.2.1. Analītiskais modelis

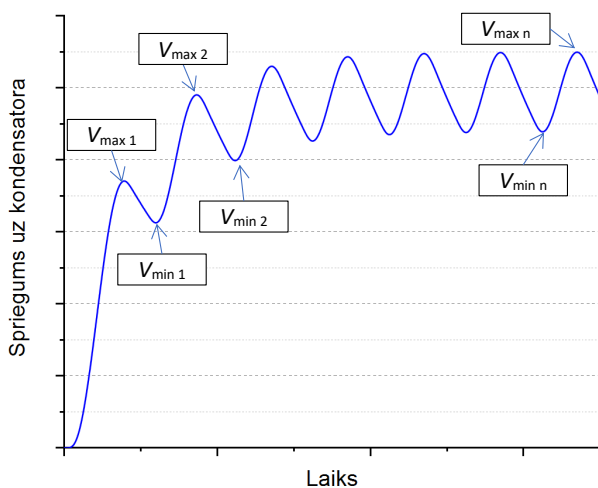
Ja apskata iepriekš raksturoto elektromagnētisko kustību enerģijas ievācēju kā signāla avotu ar vērā ņemamu iekšējo pretestību un zemu tukšgaitas spriegumu, saprotams, ka pēc taisngrieža censties iegūt gludāko izejas līdzspriegumu nevar būt absolūtais uzdevums, jo tas būtiski samazinās amplitūdu. Apskatot praktiski ģenerēto signālu nodaļā 2.2, acīmredzama kļūst vēl viena īpatnība — signāls parādās ar pārtraukumiem, kas ilgumā būtiski pārsniedz paša signāla

periodu (4.4. att.). Tamdēļ to nevar uzskatīt par nepārtrauktu un nemainīgu signālu, bet visi raksturotie grafiskie un analītiskie modeļi balstās tieši uz to, apskatot stabilu, stacionāru stāvokli. Turpretim konkrētajā gadījumā signāls labāk apskatāms kā īsas sinusoidālu signālu kopas, kurās, iespējams, stacionārs stāvoklis gludinošajā filtrā vēl nav iestājies, proti, ja signālā nebūtu pārtraukumu, kondensatora sprieguma svārstību diapazons starp impulsiem vēl turpinātu mainīties. Arī redzams, ka dotā kustību enerģijas ievācēja pirmie ģenerētie impulsi katrā kopā ir zemāki, praktiskos apstākļos tas paildzinās stacionārā stāvokļa sasniegšanu jau tā īsajā laika posmā.



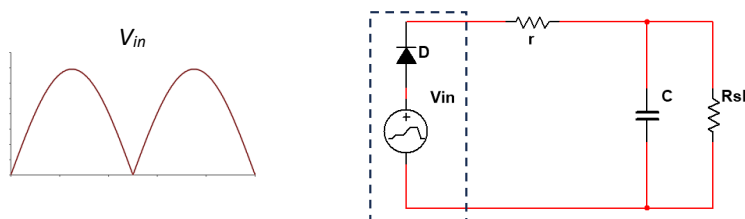
4.4. att. Kustību enerģijas ievācēja ģenerētā signāla paraugs.

Šādā situācijā taisngriešanas aina būs atšķirīga no iepriekš raksturotajām. Piemēra labad apskatīsim sinusoidāla sprieguma taisngriešanu ar tilta slēgumu, ņemot pirmos impulsus pēc ilga tukšuma. Iesākumā filtrējošais kondensators būs izlādējies pilnībā (4.5. att., sākuma punkts uz laika ass), pēc pirmā impulsa sāksies pārejas process, kas to uzlādēs līdz kādai sprieguma vērtībai  $V_{\max 1}$ . Nākamais barošanas avota impulss pilnā tilta taisngrieža gadījumā seko pēc laika perioda  $T/2$ , tas „pārtvers” spriegumu uz kondensatora momentā, kad augošais barošanas un atlikušais kondensatora spriegums būs vienādi, apstādinot izlādi un radot lokālo minimumu  $V_{\min 1}$ . Tālāk kondensators tiks uzlādēts līdz vērtībai  $V_{\max 2}$ , turklāt  $V_{\max 2} > V_{\max 1}$ , jo šoreiz uzlāde nesākās no nulles. Krītoties barošanas impulsam, kondensators atkal izlādēsies uz slodzi, kamēr to neapturēs nākamais barošanas impulss. Un tā tas turpināsies, līdz spriegums būs sasniedzis stabilu vērtību  $V_n$  ( $V_n \approx V_{n-1}$ ), tam nepieciešamais impulss skaits  $n$  atkarīgs no gludinošā filtra, ieejas signāla un pašas shēmas parametriem. Iepriekš apskatītie teorētiskie modeļi parēz, ka izejas spriegums svārstās starp diviem stacionāriem stāvokļiem: augstākais pīķis  $V_{\max n}$  taisngrieztā impulsa laikā un zemākais  $V_{\min n}$  starplaikā ( $V0b$  un  $V0a$ , atbilstoši autora [124] modelim). Toties, ja ieejas signāls ir īslaicīgs kā parāda 4.4. att., iespējams, ka nepieciešamie  $n$  impulsi stabilam stāvoklim netiks sasniegti, tamdēļ šādu modeļu izmantošana nav pamatota.



4.5. att. Sprieguma evolūcija uz filtrējošā kondensatora pēc pilnā tilta taisngrieža, ja laikā starp impulsiem tas neizlādējas līdz nullei. Ilustratīvs piemērs.

Lai noskaidrotu, kāda ir filtrējošā kondensatora ietekme uz izejas spriegumu īsa signāla gadījumā, jāraksturo spriegums pirmajiem impulsiem. Šim nolūkam taisngriešanas daļu aizstājam ar ideālu avotu (4.6. att.), kas izvada sinusoīdas signāla viena perioda moduli, tas atbilst ideālu diožu pilnā tilta slēguma taisngrieztam sinusa signālam. Tiek arī pieņemts, ka strāva no uzlādētā kondensatora nevar plūst atpakaļ uz avotu, to simboliski var attēlot ar ideālu diodi  $D$ . Visus ķēdes rezistīvos zudumus izsakām ar  $r$ , lai izejas spriegumu var vienkāršoti izteikt ar sprieguma dalītāja izteiksmi ar komplekso pretestību. Impedances izteiksme arī domāta stabilam stāvoklim, kurā kondensatora uzlāde regulāri iet cauri nulles punktam, tamdēļ tuvinājums var būt pietiekams tendences novērtējumam pirmajam impulsam, kurā uzlāde sākas no nulles, bet precizitāte kritīsies ar katru nākamo impulsu. Tā kā tiek aplūkota izejas sprieguma mijiedarbība ar pirmo impulsu pāri (4.5. att.,  $V_{\max 1}$  un  $V_{\min 1}$ ) un absolūtās amplitūdas vērtības nav svarīgas, šī pieeja tiks uzskatīta par pietiekamu.



4.6. att. Analizējamais shēmas modelis. Ieejas signāls ir sinusoīdas perioda modulis ( $V_{in}$ ),  $D$  — ideāla diode,  $r$  — rezistīvie zudumi shēmā,  $C$  — spriegumu gludinošais kondensators,  $R_{sl}$  — rezistīva slodze (patērētājs).

Apskatot 4.6. att., redzams, ka izejas spriegums tiek noteikts no kondensatora un slodzes pretestības paralēlslēguma ( $R_{sl} \parallel C$ ), kopējai pretestībai virknē pievienojas zudumi  $r$ . Tātad sprieguma dalītāja simboliskajai izteiksmei ar kompleksajām pretestībām jāizskatās atbilstoši



vienādojumam (4.7). Tā ļauj noteikt sprieguma augstāko vērtību kompleksā formā, kādu var sasniegt uz slodzes impulsa laikā (4.7. att.,  $V_{\max}$ ). Komplekso kondensatora pretestību aprēķina ar (4.8) palīdzību, apvienojot šīs izteiksmes un vienkāršojot, iegūstam vienādojumu (4.9). Kā jau minēts iepriekš, izteiksme domāta stacionāram stāvoklim, tamdēļ amplitūdas vērtības nav uzskatāmas par absolūti precīzām. Tā kā rezultātā nepieciešama reāla sprieguma vērtība, kompleksie skaitļi jāizsaka ar to absolūto vērtību  $Z$ , izmantojot sakarību (4.10), iegūstot gala izteiksmi augstākajai sprieguma vērtībai (4.12) uz filtrējošā kondensatora un, respektīvi, arī uz slodzes.

$$\frac{R_{sl} \| X_C}{R_{sl} \| X_C + r} \cdot V_{in}, \quad (4.7)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}, \quad (4.8)$$

$$\frac{\left[ \frac{\frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f \cdot C)i} \cdot R_{sl}}{\frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f \cdot C)i} + R_{sl}} \right]}{\left[ \frac{\frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f \cdot C)i} \cdot R_{sl}}{\frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f \cdot C)i} + R_{sl}} + r \right]} \cdot V_{in} = \frac{R_{sl}}{R_{sl} + r + 2 C f \pi R_{sl} r i} \cdot V_{in}, \quad (4.9)$$

$$|Z| = \sqrt{X_C^2 + R^2}, \quad (4.10)$$

$$V_{\max} = \frac{R_{sl} \cdot V_{in}}{\sqrt{(r + R_{sl})^2 + (C\omega r R_{sl})^2}}, \quad (4.11)$$

kur  $R_{sl}$  — slodzes pretestība,  $\Omega$ ;

$r$  — zudumu pretestība,  $\Omega$ ;

$X_C$  — kondensatora kompleksā pretestība,  $\Omega$ ;

$f$  — ieejas signāla frekvence, Hz;

$\omega$  — ieejas signāla cikliskā frekvence, rad/s;

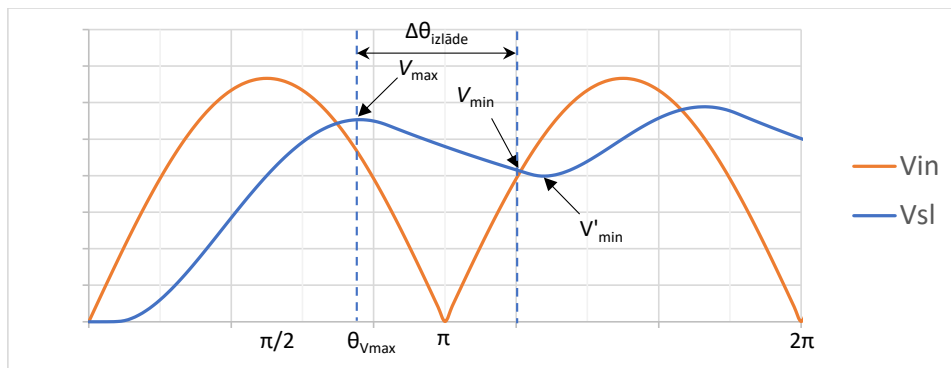
$V_{in}$  — ieejas signāla amplitūda, V;

$Z$  — ķēdes pilnā pretestība,  $\Omega$ ;

$V_{\max}$  — modelī pieņemtā augstākā kondensatora un slodzes sprieguma vērtība, V.

Lai saprastu, kā spriegums kritīsies laikā starp impulsiem pēc maksimālās vērtības sasniegšanas, (4.11) jāapvieno ar eksponenciālās dilšanas komponenti. Var lietot izmantoto funkcijā (4.2), bet tā izteiksme paredz, ka kritums sāksies momentā  $\pi/2$ , kas iespējams vienīgi sistēmās bez būtiskiem zudumiem  $r$ , tamdēļ sprieguma pīķim uz kondensatora būs aizture attiecībā pret ieejas signālu (4.7. att.). Lai noteiktu momentu, kad tiek sasniegts augstākais spriegums uz kondensatora ( $\partial V_{\max}$ ), var izmantot strāvas nobīdes leņķi  $\theta_{\text{strāva}}$  (4.12) attiecībā pret ieejas signālu. Kondensatoram sasniedzot augstāko spriegumu  $V_{\max}$ , to uzlādējošā strāva nokritīsies līdz nullei, un atšķirībā no ieejas signāla, kas šķērso nulli momentā  $\pi$ , strāvai tas būs nobīdīts par  $\theta_{\text{strāva}}$ . Jāpiebilst, ka realitātē eksponenciālā dilšana sāksies vēlāk un tālab pie

zemāka sprieguma nekā  $V_{\max}$ , jo pie paša sprieguma pīķa vērtības, kad notiek vien nelielas sprieguma izmaiņas, taisngrieža diodes var neaizvērties un avots turpinās atdot enerģiju ķēdē. Tas ir iespējams arī pie zemas slodzes pretestības vai mazas kapacitātes, kad spriegums uz kondensatora kritīsies pielīdzināmi vai ātrāk nekā barošanas avotā, paturot taisngrieža diodes atvērtas. Tālab dotais modelis sniegs tuvinājumu tendencei, bet ne vienmēr absolūtajām vērtībām.

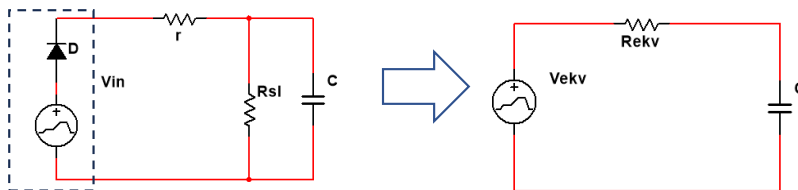


4.7. att. Analizējamā taisngrieztā sprieguma raksturīgākie punkti.  $V_{in}$  — ieejas signāls,  $V_{sl}$  — spriegums uz slodzes un kondensatora,  $V_{\max}$  un  $V_{\min}$  — modelī pieņemtais augstākais un zemākais spriegums pēc taisngrieža,  $V'_{\min}$  — reālais zemākais spriegums,  $\Delta\theta_{izlāde}$  — modelī pieņemtais kondensatora izlādes reģions,  $\theta_{V_{\max}}$  — augstākā sprieguma sasniegšanas moments.

$$\theta_{strāva} = -\text{ArcTan}\left(\frac{X_C}{R}\right), \quad (4.12)$$

kur  $\theta_{strāva}$  — kondensatora strāvas nobīdes leņķis attiecībā pret ieejas signālu, rad;  
 $R$  — pretestība ķēdē ar kondensatoru,  $\Omega$ .

Lai vienkāršotu nobīdes leņķa aprēķinu, aizvietojam abas pretestības ar vienu ekvivalento (4.8. att.). Tas tiek darīts ar nolūku iegūt ķēdi tikai ar virknētiem elementiem, tādējādi vienādojumā (4.12) būs jāievieto  $X_C$  atbilstoši (4.8) un  $R_{ekv}$ . Bez šādas vienkāršošanas no kopējās ķēdes pretestības, kas redzama (4.9) kreisās puses dalītājā, būtu jāizdala reālā un imaginārā daļa  $R$  un  $X_C$  lielumiem, kas bez papildu komplekso skaitļu aprēķiniem šajā gadījumā nav iespējams. Ekvivalentās shēmas iegūšanai izmantota Tevenina teorēma, apvienojot zudumu un slodzes pretestības un izveidojot ekvivalento avotu  $V_{ekv}$ . Ekvivalentais slēgums iegūts attiecībā pret kondensatoru, tālab dotais elements paliek neizmainīts. Ekvivalentā pretestība  $R_{ekv}$  aprēķināta ar (4.13). Ekvivalentā avota spriegumu dotajā gadījumā raksturo (4.14), bet tas neietekmē nobīdes leņķi, tālab netiks turpmāk lietots.



4.8. att. Ekvivalentā slēguma iegūšana.

$$R_{ekv} = \frac{r \cdot R_{sl}}{r + R_{sl}} \quad (4.13)$$

$$V_{ekv} = V_{in} \cdot \frac{R_{sl}}{r + R_{sl}} \quad (4.14)$$

Tagad ir viss nepieciešamais, lai varētu izveidot sprieguma dilšanas vienādojumu periodam starp impulsiem. Šim nolūkam sprieguma augstākajai vērtībai (4.11) tiek pievienots eksponenciālās dilšanas reizinātājs, kurā ieviešam aizturi augstākā sprieguma sasniegšanai kā pusperioda un nobīdes leņķa (4.12) starpību (4.7. att.,  $\theta_{Vmax}$ ). Tad  $V_{in}$  vienādojumā aizstājam ar 100, iegūstot izteiksmi proporcionālai sprieguma vērtībai procentos (4.15), kas atkarīga no ķēdes parametriem. Lai formulā tiktu vaļā no laika mainīgā, pielietojam sakarību (4.16).

$$\begin{aligned} V_{izlāde} &= V_{max} \cdot e^{-\frac{\omega t - \theta_{Vmax}}{\omega C R_{sl}}} = \\ &= \frac{V_{in} R_{sl}}{\sqrt{(r + R_{sl})^2 + (C\omega r R_{sl})^2}} \cdot e^{-\frac{\omega t - (\pi - \text{ArcTan}[\frac{1}{(\omega C R_{ekv})}])}{\omega C R_{sl}}} = \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$= \frac{100 R_{sl}}{\sqrt{(r + R_{sl})^2 + (C\omega r R_{sl})^2}} \cdot e^{-\frac{\omega t - \pi + \text{ArcTan}[\frac{r + R_{sl}}{\omega C r R_{sl}}]}{\omega C R_{sl}}}$$

$$\theta = \omega t \quad (4.16)$$

$$V_{min} = V_{izlāde} = V_{in} \text{ pie } \pi \leq \theta \leq 1,5\pi \quad (4.17)$$

kur  $V_{izlāde}$  — kondensatora spriegums izlādes procesā, V;

$\theta$  — signāla fāze, rad;

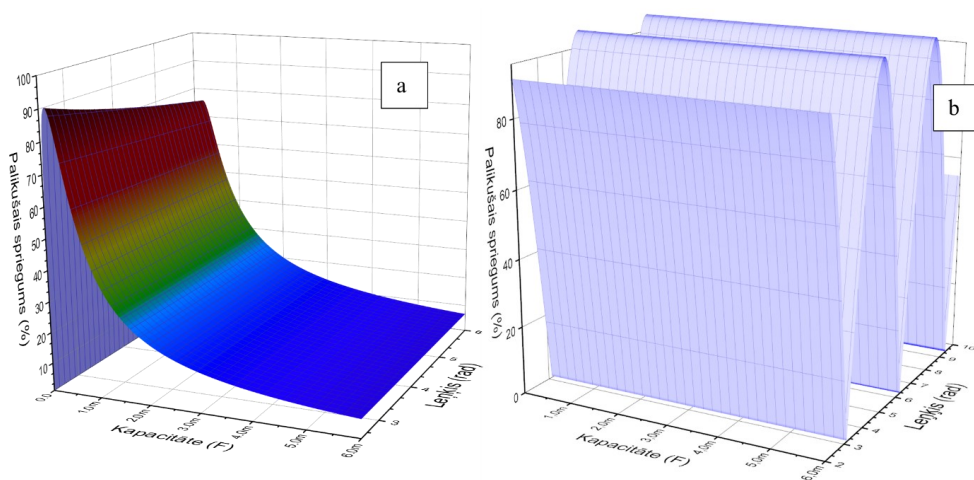
$V_{min}$  — modelī pieņemtā zemākā kondensatora un slodzes sprieguma vērtība, V.

Iegūtā izteiksme (4.15) parāda sprieguma dilšanu pēc pirmā impulsa augstākās vērtības sasniegšanas (4.7. att.,  $V_{max}$ ), tā beigsies momentā, kad nākamais ieejas impulss paliks vienāds ar atlikušo spriegumu pēc dilšanas (4.7. att.,  $V_{min}$ ). No tā izriet, ka, lai noskaidrotu sprieguma iekrituma gala momentu, jāatrod punkts, kurā dilšanas funkcijas vērtība sakrīt ar nākamā ieejas signāla fronti (4.17). Tiek pieņemts, ka spriegums šajā punktā sāks augt līdz ar ieejas impulsu. Taču sākotnēji zemās spriegumu starpības un zudumu dēļ avots nenodrošinās augstu strāvu, tamdēļ, atkarībā no ķēdes parametriem, spriegums sasniegs nedaudz zemāku vērtību (4.7. att.,  $V'_{min}$ ). Līdzīgi kā ar iepriekšējiem pieņēmumiem, šī apzinātā nepilnība, domājams, neieviesīs

būtiskas izmaiņas tendences, bet tikai absolūto vērtību novērtējumā. Turklāt daļēji to izkompensē pieņēmums, ka izlāde sākas tieši pīķa punktā, tātad ātrāk, sekojoši sasniedzot zemāku vērtību.

Funkcijā (4.15) signāla frekvenci  $\omega$  un slodzes pretestību  $R_{sl}$  varam uzskatīt par nemainīgiem, rezistīvos zudumus  $r$  arī, aizstājot tos ar enerģijas avota iekšējo pretestību, — parasti ķēdē šie ir zināmi lielumi. No mainīgajiem paliek tikai kapacitāte, kuras ietekmi cenšamies saprast, un leņķis  $\theta$ , kas nosaka momentu relatīvi pret ieejas signāla sākšanos — palikuši tikai divi mainīgie un rezultātā amplitūda, tātad funkcija ir attēlojama 3 dimensiju telpā. Lai atrastu pārklāšanās punktu funkcijām, lietosim grafisko risinājumu. Apskatot ieejas signālu kā  $|\text{Sin}(\omega t)|$  un pielietojot sakarību (4.16) laika mainīgā likvidēšanai, iegūstam izteiksmi  $|\text{Sin}(\theta)|$  ar vienu mainīgo  $\theta$  un rezultātā amplitūdu, tās vērtība ir nemainīga pie jebkuras kapacitātes, tamdēļ ir attēlojama tajā pašā koordinātu telpā līdz ar funkciju (4.15).

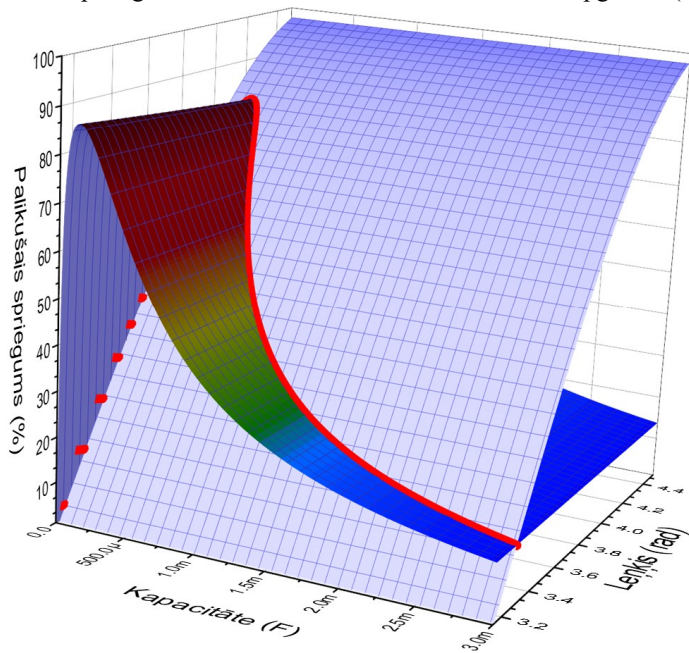
Kā piemēru paņemsim shēmas parametrus no iepriekš eksperimentāli pārbaudītā slēguma ar kustību enerģijas ievācēju, pilnā tilta taisngriezi un elektroenerģijas pārveidotāju *EH4295*. Protams, uzskatot, ka diodēs nav zudumu, pārējie shēmas parametri ir sekojoši: slodzes pretestība  $R_{sl} = 1 \text{ k}\Omega$  (*EH4295* aptuvena ieejas pretestība), ķēdes zudumu pretestība  $r = 19 \text{ }\Omega$  (kustību pārveidotāja iekšējā pretestība), frekvence  $f = 20 \text{ Hz}$  (vidējā frekvence impulsu kopā, 4.4. att.). Lai gan tilta slēgums frekvenci divkārtšo, impulsa platums no tā nemainās, un nākamā impulsa laiku ņemsim vērā grafiski, tamdēļ izteiksmēs izmantojam to pašu frekvenci kā avotam. Ar šādām vērtībām sprieguma dilšanas funkcijas (4.15) grafiks parādīts 4.9. att. (a), taisngrieztā signāla impulsi tajā pašā telpā parādīti 4.9. att. (b).



4.9. att. Vienādojuma (4.15) attēlojums atkarībā no kapacitātes un leņķa  $\theta$  (a) un taisngrieztā sprieguma impulsa attēlojums (b) 3D grafikā. Z ass ir procentos no signāla avota amplitūdas.

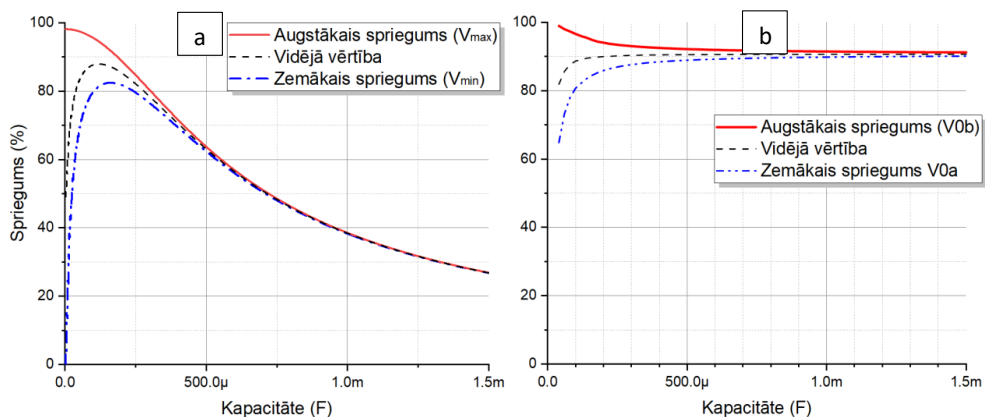
Atsevišķi grafiki neko nenozīmē, jo nepieciešamais sprieguma dilšanas galapunkts ir atrodams tur, kur dilšanas grafiks (4.9. att., a) pārklājas ar otrā impulsa augošo fronti (4.9. att., b), līdzīgi kā 2 dimensiju attēlojumā 4.7. att. ( $V_{\min}$ ). Tamdēļ ieejas sprieguma grafikā (4.9. att.,

b) nepieciešams izdalīt tikai otrā impulsa fronti (leņķis  $\pi \leq \theta \leq 1,5\pi$ ) un tad abus grafikus apvienot. Tā kā jau redzams, ka grafikam 4.9. att. (a) ir izteikta pīķa vērtība pie kapacitātes vērtībām zem 1 mF, pielāgosim asis, lai labāku novērtētu būtiskāko apgabalu (4.10. att.).



4.10. att. Dilstošā sprieguma un sekojošā taisngrieztā impulsa pārklāšanās (sarkanie punkti).

4.10. att. ar sarkano līniju parāda paliemošo spriegumu uz kondensatora starp pirmajiem 2 impulsiem atkarībā no kapacitātes. Jau šādi redzams, ka paliemošais spriegums parāda izteiktu augstāko vērtību tuvu 200  $\mu\text{F}$  kapacitātes vērtībai, bet uzskatāmībai izzīmēsim pārklāšanās punktu (4.10. att., sarkanie punkti) projekciju 2 dimensiju telpā, ignorējot leņķa asi. Tā kā pagaidām iegūts tikai zemākais spriegums starp pirmajiem impulsiem, papildus pievienojam augstāko, kas iegūstams ar izteiksmi (4.11). Rezultāts redzams 4.11. att. (a), augstākais un zemākais spriegums atbilst grafikā 4.7. att. redzamajiem  $V_{\max}$  un  $V_{\min}$  pie dažādām kapacitātēm, aprēķināta arī vidējā aritmētiskā vērtība starp šīm līknēm.



4.11. att. Slodzes augstākā un zemākā sprieguma atkarība no kapacitātes: pirmā taisngrieztā sinusoīdas perioda laikā ar izveidoto analītisko modeli (a) un stacionāram stāvoklim atbilstoši modelim [124]. Spriegums procentos no ieejas signāla amplitūdas.

Kā redzams, uz slodzes palielošais spriegums pie kapacitātes vērtības ap  $160 \mu\text{F}$  ir būtiski augstāks nekā pie citām kapacitātēm. Šis pārlicinoši atšķiras no stacionārā modeļa paredzētajiem rezultātiem, jo, piemēram, pielietojot iepriekš apskatītā [124] autora modeli (4.11. att., b), rezultāts ar tādiem pašiem shēmas parametriem paredz, ka vidējā vērtība starp augstāko un zemāko sprieguma vērtību tikai pieaug līdz ar kapacitāti. Arī izveidotais isā signāla modelis parāda, ka pie augstākas kapacitātes sprieguma svārstības starp impulsiem samazinās — augstākā un zemākā vērtība satuvinās —, bet pirms tam pastāv optimāla kapacitāte, kurā vidējā sprieguma vērtība ir būtiski augstāka par blakus esošām.

Izteiktā modelēto rezultātu atšķirība nebūt nenozīmē, ka kāds no modeļiem ir nepilnīgs — tie ir savstarpēji izslēdzoši. Kad shēmā parādās ieejas signāls un filtrējošais kondensators ir izlādējies, stājas spēkā grafika 4.11. att. (a) modelētā kapacitātes ietekme, impulsiem nebeidzoties, ar katru impulsu vidējais spriegums pieaug, līdz beidzot tas paliek atkarīgs no kapacitātes atbilstoši grafikam 4.11. att. (b). Konkrēts laiks, kas nepieciešams stacionāra stāvokļa sasniegšanai, atkarīgs no ķēdes parametriem un pieaug līdz ar kapacitātes vērtību. Lai gan novērtēt stabila stāvokļa sasniegšanas faktu var būt problemātiski, noteikt tā iestāšanās varbūtību konkrētam signālam ir salīdzinoši vienkārši. Palūkojoties uz apskatāmā ieejas signāla oscilogrammu (4.4. att.), var noteikt laiku starp secīgajām impulsu kopām un aprēķināt kapacitāti, kas šādā ilgumā nespēs izlādēties. To raksturo izteiksme (4.19), kuras pamatā ir pieņēmums, ka kondensatora izlādei nepieciešamais laiks ir piecas laika konstantes  $\tau = R_{sl} \cdot C$ .

$$C_{robež} = \frac{T}{5 R_{sl}}, \quad (4.18)$$

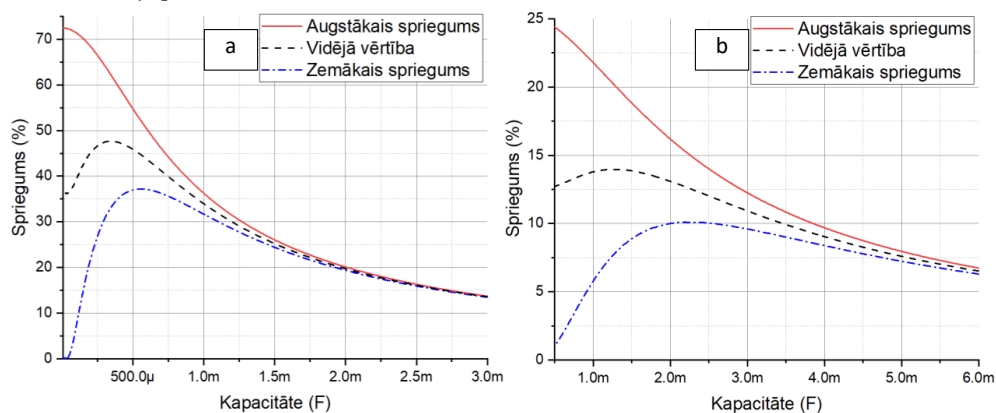
kur  $C_{robež}$  — filtrējošā kondensatora vērtība, līdz kurai izpildās modeļa pamatnosacījumi, F;

$R_{sl}$  — slodzes pretestība,  $\Omega$ ;

$T$  — laiks starp ieejas signāla impulsu kopām, s.

Dotās izteiksmes (4.19) nolūks ir atrast kondensatora robežvērtību, pie kuras līdz nākamajam ieejas signālam uz filtra vēl paliks spriegums, tātad uzlāde nesāksies no nulles, un impulsu kopas ietekmēs viena otru. Apskatītajā variantā ar  $R_{sl} = 1 \text{ k}\Omega$  un laiku starp impulsu kopām aptuveni 0,5 s, iegūstam  $C_{robež} = 100 \text{ }\mu\text{F}$ , sākot ar šo vērtību sekojošās impulsu kopas ietekmēs viens otru, un, analizējot šādu shēmu, nevaram būt droši par sākuma stāvokli katrai atsevišķajai impulsu kopai. 4.11. att. (a) parāda, ka pārtraukta signāla gadījumā optimāla vērtība kapacitātei augstākā vidējā sprieguma sasniegšanai ir ap  $100 \text{ }\mu\text{F}$ , bet pie šiem lielumiem spriegums starp impulsu kopām nespēs pilnībā sasniegt nulles stāvokli. Šāda situācija neatbilst arī iepriekš minēto autoru modeļiem, rezultātā doto slodzes un signāla avota kombināciju ilgstošam signālam nevar pilnvērtīgi raksturot nedz ar 4.11. att. (a), nedz arī 4.11. att. (b) parādītajām līknēm. Toties var pieņemt, ka sākotnēji tendence līdzināsies dotajā darbā raksturotajai (4.11. att., a), bet, laikam ejot, impulsu mijiedarbības dēļ tendence tuvināsies parādītajai 4.11. att. (b), proti, lielāka kapacitātes vērtība vienmērīgi stabilizēs sprieguma svārstības ar nelielu vai vispār bez izteiktas augstākās vērtības.

Lai noskaidrotu, vai modelis paredz līdzīgu tendenci citu parametru shēmām, tas pielietots atšķirīgām slodzes pretestībām —  $50 \text{ }\Omega$  un  $6,5 \text{ }\Omega$ , kas atbilstu citu iepriekš apskatīto pārveidotāju (*EH4205* un *LTC3108*) ieejas pretestībām —, rezultātā iegūstot sekojošos grafikus (4.12. att.). Var novērot, ka zemākā sprieguma pīķis pēc taisngriešanas arī pastāv, bet līdz ar mazākām slodzes pretestībām tas sastopams pie augstākas kapacitātes un paliek arvien mazāk izteikts. Sekojoši tas rada mazāk izteiktu vidējā sprieguma pīķi, kas pie  $6,5 \text{ }\Omega$  slodzes mainās mazāk nekā par 2 procentu punktiem kapacitāšu diapazonā līdz 2,5 mF, kamēr  $50 \text{ }\Omega$  slodzei izmaiņa ir virs 30 procentu punktiem. Aprēķinot robežas kapacitātes ne nulles stāvokļa sasniegšanai starp impulsiem, iegūstam attiecīgi 2 mF un 15,4 mF, kas ir virs paredzētajām zemākā sprieguma pīķu kapacitāšu vērtībām, tātad šo shēmas parametru konfigurācija pilnībā atbilst modeļa prasībām.



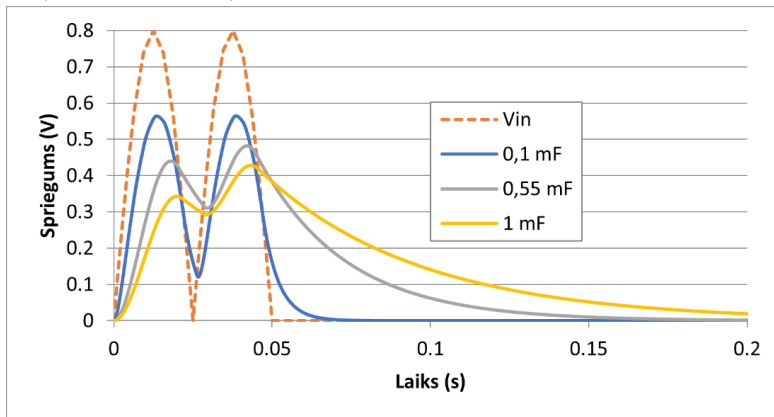
4.12. att. Augstākā ( $V_{max}$ ) un zemākā ( $V_{min}$ ) sprieguma atkarība no kapacitātes pirmā taisngrieztā sinusoīdas perioda laikā atbilstošo izveidotajam analītiskajam modelim pie dažādas rezistīvās slodzes:  $50 \text{ }\Omega$  (a) un  $6,5 \text{ }\Omega$  (b). Spriegums procentos no ieejas signāla amplitūdas.

## 4.2.2. Modeļa pārbaude datora simulācijas vidē

Analītiskais modelis vienkāršībai lieto vairākus tuvinājumus, tālab vērts apstiprināt, ka tie būtiski neizmaina parādītos rezultātus. Veicot salīdzinājumu uzreiz ar reāliem eksperimentāliem datiem, var nesaprast, kas tieši nosaka modelētās un reālās tendences atšķirību, jo realitātē papildus jāsaskaras ar dažādu ķēdes elementu neideāliem parametriem. Lai uzskatāmi noteiktu analītiskā modeļa uzticamību un izvairītos no iespējamām izmaiņām, ko ienes modelī neiekļauti parametri, to var salīdzināt ar elektronisko shēmu simulāciju uz *SPICE* bāzētu programmu vidē. Faktiski tas ir vienkāršota matemātiska modeļa salīdzinājums ar detalizētu matemātisko modeli, kuram var uzdot ņemt vērā visus vēlamos parametrus, lai pārbaudītu, vai pieņēmumi un tuvinājumi nav izjaukuši teorētiskā novērtējuma kvalitāti. Dotajā sadaļā tiks salīdzinātas modeļa paredzētās amplitūdas izmaiņas atkarībā no kapacitātes idealizētos apstākļos, tālāk tiks ieviesti nelineāri taisngriešanas elementi, beigās pārbaudīta papildus secīga ieejas impulsa ietekme.

### 4.2.2.1. Kapacitātes ietekmes novērtējums

Analītiskais modelis raksturo pirmos impulsus pēc taisngrieža, tamdēļ iesākumā jāapskata vienu sinusoidas periodu. Simulācijas shēma atbilst 4.6. att. parādītajai, kur  $r = 19 \Omega$ ,  $f = 20 \text{ Hz}$ ,  $R_{sl} = 50 \Omega$ , kas atbilst iepriekš apskatītajam pārveidotāja *EH4205* ieejas pretestības piemēram. Tā kā ieejas sprieguma amplitūda dotajā modelī neietekmē tendenci, tā ir izvēlēta 0,8 V sakrītības labad ar enerģijas ievācēja sprieguma paraugu (4.4. att.). Simulācijā tiek noteikta izejas sprieguma (uz  $R_{sl}$  un respektīvi  $C$ ) izmaiņa laikā, 4.13. att. parāda to pie trim dažādām kapacitātēm (0,1, 0,55 un 1 mF).

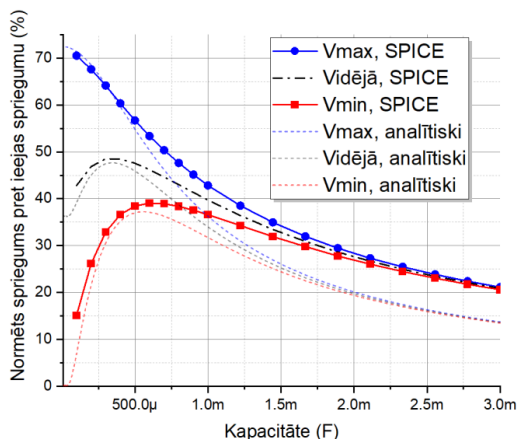


4.13. att. *SPICE* izejas sprieguma simulācija pie dažādām kapacitātes vērtībām, kur  $r = 19 \Omega$ ,  $f = 20 \text{ Hz}$ ,  $R_{sl} = 50 \Omega$ .

Jau palūkojoties uz 4.13. att. grafiku, var ievērot, ka izejas sprieguma iekritums starp impulsiem (ap 0,025 s) nepieaug līdz ar kapacitāti — kapacitātei 0,1 mF tas ir viszemākais, tālāk seko 1 mF un tikai tad 0,55 mF. Dotie simulācijas rezultāti tiktāl apstiprina analītiski paredzēto efektu, tā demonstrācija arī citām modelētajām slodzes vērtībām dota pielikumā 4.



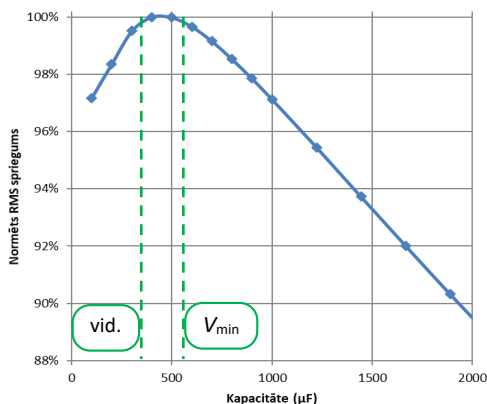
Lai pilnvērtīgi novērtētu tuvinātā modeļa un detalizētas simulācijas rezultātu sakrītību, no sprieguma līknēm nepieciešams izteikt skaitliskus rezultātus salīdzināšanai. Analītiskais modelis balstās uz pirmā taisngrieztā impulsa augstāko vērtību un tam sekojošo zemāko vērtību starp abiem impulsiem, tās var nolasīt no simulācijā iegūtajiem grafikiem sprieguma atkarībai no laika. Normējot rezultātus pret ieejas sprieguma amplitūdu kā analītiskajā modelī, tos var attēlot tādā pašā mērogā ērtākai salīdzināšanai (4.14. att.).



4.14. att. Sprieguma augstākās ( $V_{max}$ ), zemākās ( $V_{min}$ ) un vidējās vērtības starp pirmajiem impulsiem atkarība no kapacitātes, iegūts ar *SPICE* simulāciju un analītisko modeli, atbilstoši 4.12. att. (a).

4.14. att. redzams, ka simulāciju dati uzrāda lēnāku visu sprieguma vērtību samazināšanos atkarībā no kapacitātes, pie 3 mF sasniedzot aptuveni 21 % no ieejas sprieguma, kamēr analītiskais modelis sasniedz 14 %. Atšķirību var izskaidrot ar nodaļā 4.2.1 izdarītajiem pieņēmumiem, kas balstās uz kondensatora maiņstrāvas pretestības izteiksmi (4.8), kas domāta stabilam, periodiskam ieejas signālam. Zemākā sprieguma pīķa ( $V_{min}$ ) vērtība simulācijas rezultātos, 39 %, novērota pie 600  $\mu$ F, bet analītiskais modelis uzrādīja 37 % pie 560  $\mu$ F. No tā var secināt, ka analītiskais modelis ir pietiekami precīzs optimālās kapacitātes noteikšanai augstākā vidējā un ieplakas ( $V_{min}$ ) sprieguma sasniegšanai starp pirmajiem impulsiem, bet tas sniedz zemākas sprieguma relatīvās vērtības.

Pagaidām iegūtie dati pamato veikto pieņēmumu izvēli, bet augstākais spriegums starp pirmajiem impulsiem ne vienmēr nozīmē lielāku kopēju noderīgumu. Kondensators turpinās izlādēties arī pēc signāla pazušanas, tamdēļ praktiski jāņem vērā laiks arī pēc tā (4.13. att., pēc 0,5 s). Turpmākajai optimālās kapacitātes lietderības novērtēšanai jāizvēlas citi parametri, kas ņemtu vērā visu taisngrieztā signālu, un kuru aprēķinam nav nepieciešams manuāli nolasīt sprieguma grafika vērtības. Tā kā izejas signālam ir vairāki atšķirīgi pīķi un ieplakas, salīdzinājumam izvēlēts vidējās kvadrātiskās vērtības (*RMS*) lielums. Lai aprēķini būtu ticami, simulācijas veiktas ar nemainīgiem sistēmas parametriem un vienādu simulēto ilgumu, mainot tikai kapacitāti. Visu līkņu aprēķinu rezultāti šoreiz normēti pret augstāko vidējo kvadrātisko spriegumu, lai izslēgtu atkarību no ieejas sprieguma amplitūdas. Rezultāts attēlots kā atkarība no kapacitātes (4.15. att.).



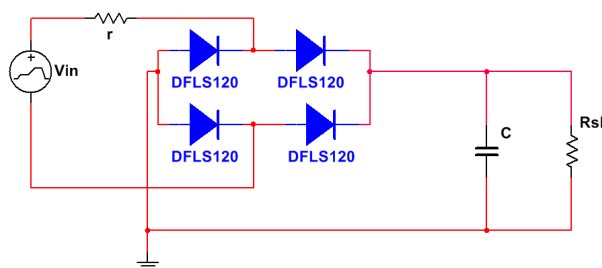
4.15. att. Vidējā kvadrātiskā (*RMS*) sprieguma atkarība no filtrējošā kondensatora kapacitātes, ņemot vērā sprieguma dilšanu pēc signāla, *SPICE* modeļu simulācija. Vertikālās pārtrauktās līnijas norāda analītiskā modeļa paredzēto kapacitāti zemākā ( $V_{\min}$ ) un vidējā (vid.) sprieguma pīķiem (4.12. att., a).

4.15. att. parāda, ka arī vidējā kvadrātiskā sprieguma vērtība *SPICE* modeļu simulācijā ir ar izteiktu augstāko vērtību, kuras kapacitāte skaitliski tuva analītiskās metodes paredzētajai optimālajai vērtībai vidējam spriegumam — simulācijai maksimums ir starp 400 un 500  $\mu\text{F}$ , jo normētā vērtība tām ir praktiski vienāda, bet analītiskā modelēšana augstāko vidējo paredzēja ap 350  $\mu\text{F}$ . Simulācija tika veikta ar 100  $\mu\text{F}$  kapacitātes izmaiņu soli, apstrādājamo datu apjoma dēļ augstāka izšķirtspēja netika izvēlēta, jo tendences sakritības nolūkam šādas nelielas izmaiņas nav būtiskas. Toties svarīga ir sprieguma atkarības atšķirība pēc optimālās vērtības sasniegšanas — simulācijā pie 2 mF kapacitātes vidējā kvadrātiskā vērtība ir samazinājusies par 10,5 % no augstākās (4.15. att.), bet analītiskā modeļa rezultātos vidējās vērtības kritums ir vairāk nekā puse (4.14. att., b: no 47 % līdz 20 %). Šis skaidrojams ar to, ka dotajā vidējās kvadrātiskās vērtības aprēķinā tiek ņemts vērā spriegums arī pēc abu impulsu beigām (4.13. att., pēc 0,5 s), un šis spriegums dilst lēnāk pie augstākām kapacitātes vērtībām, tādējādi paaugstinot vidējo kvadrātisko vērtību kopējā laika logā.

#### 4.2.2.2. Nelineāru taisngriešanas elementu ieviešana

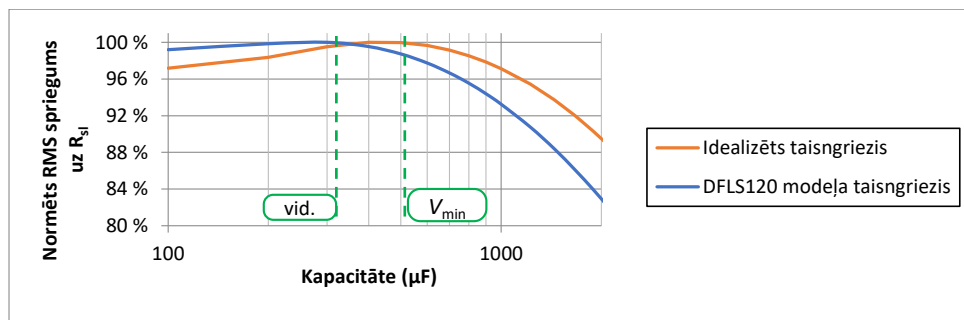
Tā kā tika pierādīts, ka izvēlēto tuvinājumu ieviestās neprecizitātes analītiskajā modelī pārsvarā rada nebūtisku absolūto vērtību nobīdi, kas neietekmē tendences novērtējumu, nav pamata turpināt salīdzināt divu idealizētu matemātisku aprēķinu metožu rezultātus. *SPICE* simulācijā iespējams ieviest vairāk parametru, kas pietuvinātu to reālistiskākam scenārijam, joprojām saglabājot atkārtojamību uzticamas salīdzināšanas nolūkam. Iespējams, būtiskākais analītiskā tuvinājuma pieņēmums bija ideāli slēdži diožu vietā, simulācijā tos var aizvietot ar nelineāru diožu modeli. Vairāki diskreto komponentu ražotāji šim nolūkam piedāvā jau gatavus *SPICE* modeļus lejupielādei, tādējādi var veikt simulāciju ar pēc iespējas realitātei tuvākiem eksistējošu komponentu parametriem. Tādā veidā tika iegūts jau pirmīt eksperimentos (nodaļa 3.2.2) izmantotās *DFLS120* Šotki pārejas diodes modelis [125], simulācijas vidē izveidots pilnā

tilta taisngrieža slēgums ar attiecīgajiem elementiem (4.16. att.). Barošanas avots ir programmējams, lai varētu mainīt  $V_{in}$  signāla parametrus — šajā gadījumā sinusoīdas periodu skaitu, kamēr amplitūda un frekvence saglabāta kā iepriekš (0,8 V, 20 Hz). Lai atbilstu iepriekšējam simulācijas eksperimentam, izmantots viens sinusoīdas periods ieejā.



4.16. att. Simulācijas modeļa shēma ar pilnā tilta taisngriezi ar *DFSL120* diodēm,  $r = 19 \Omega$ ,  $R_{sl} = 50 \Omega$ .

Ar šādu mazāk idealizētu shēmu iesākumā tika pārbaudīts viens sinusoīdas periods, proti, divi impulsi pēc taisngriešanas. Pēc tādas pašas apstrādes kā idealizētā simulācijā iegūta sprieguma vidējās kvadrātiskās vērtības atkarība no kapacitātes. Salīdzināšanas ērtībai vienā grafikā apvienots rezultāts no idealizētās un nelineāro taisngriešanas elementu simulācijas, attēlojot kapacitāti logaritmiskā mērogā (4.17. att.). Tā kā nav praktiskas nozīmes savstarpēji salīdzināt sprieguma vērtību ideālam un reālistiskam taisngriešanas modelim, vidējās kvadrātiskās vērtības ir normētas pret augstāko atsevišķi *DFSL120* un idealizēto rezultātu robežās.

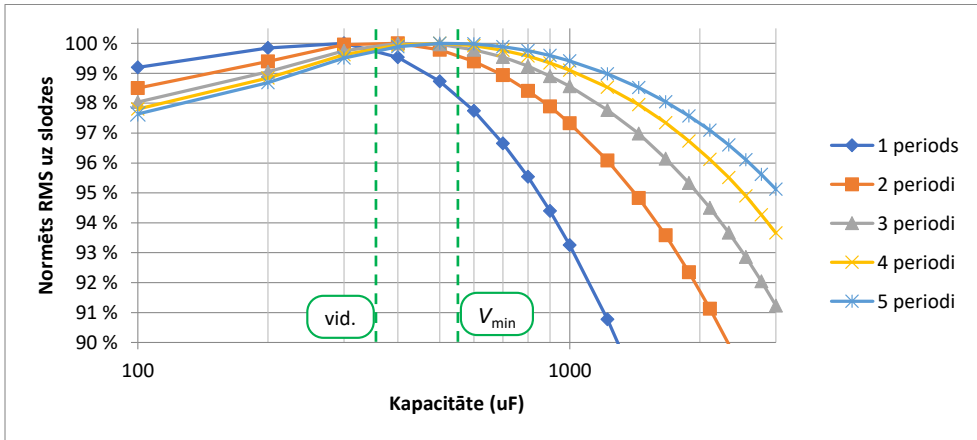


4.17. att. Slodzes vidējā kvadrātiskā (*RMS*) sprieguma atkarība no filtrējošā kondensatora kapacitātes, *SPICE* modeļu simulācija ar nelineāru un idealizētu taisngriešanu. Vertikālās pārtrauktās līnijas norāda analītiskā modeļa paredzēto kapacitāti zemākā ( $V_{min}$ ) un vidējā (vid.) sprieguma piķiem (4.12. att., a).

Arī simulācija ar nelineāru taisngriešanas elementu modeli uzrāda optimālas kapacitātes vērtības eksistenci, bet tā ir nobīdīta uz nedaudz mazāku kapacitātes vērtību papildu rezistīvo zudumu dēļ, ko shēmā ievieš reālistiskas diodes. Var arī novērot, ka, salīdzinājumā ar idealizētu modeli, sprieguma vērtības pirms pīķa sasniegšanas nav tik zemas, toties samazinās straujāk pēc tā (4.17. att., kapacitāte virs 300  $\mu\text{F}$ ).

### 4.2.2.3. Vairāku barošanas impulsu pārbaude

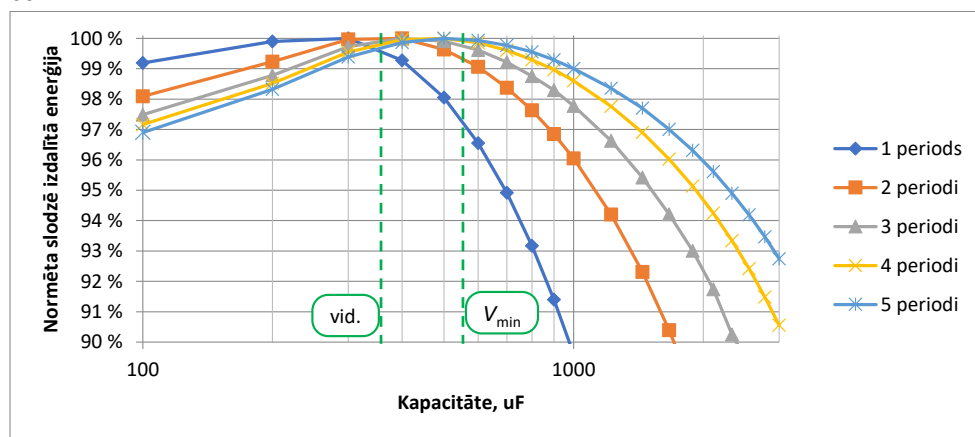
Tā kā modelis apskata tikai pirmos divus taisngrieztos impulsus (vienu sinusoidas periodu), skaidrs, ka ar katru nākamo tas kļūst arvien mazāk uzticams, tamdēļ jāpārbauda, cik stipri izmainīsies sprieguma atkarība no kapacitātes vairāku impulsu gadījumā, un cik ļoti tā attālināsies no modelētā rezultāta. Šim nolūkam var lietot jau izveidoto *SPICE* simulāciju modeli (4.16. att.), palielinot sinusoidas periodu skaitu ieejas  $V_{in}$  signālā. Izvēlēts fiksēts 3 sekunžu simulācijas ilgums neatkarīgi no periodu skaita. Tā kā vidējā kvadrātiskā sprieguma aprēķinā tiek ņemts vērā viss ilgums, īsāks ieejas signāls uzrādīs mazāku vērtību jebkurā gadījumā, tamdēļ vērtības tiek normētas iekš katra periodu skaita atsevišķi. Rezultāts redzams 4.18. att.. Tajā var novērot, ka, pieaugot ieejas signāla periodu skaitam, joprojām pastāv optimāla kapacitātes vērtība augstākā vidējā kvadrātiskā sprieguma sasniegšanai, bet šī vērtība vairs nav tik izteikta — ja divu sinusoidas periodu signāla gadījumā ar 2 mF kondensatoru uz slodzes būs vien 91,5 % no vidējā kvadrātiskā sprieguma vērtības salīdzinot ar optimālo kapacitāti, tad 5 periodu gadījumā tie būs 97,5 %. Arī kapacitātes vērtība, pie kuras tiek sasniegts optimālais spriegums uz slodzes, pieaug līdz ar periodu skaitu — vienam barošanas sprieguma periodam tie ir 300  $\mu\text{F}$ , pieciem tie ir 500  $\mu\text{F}$ . Toties var ievērot, ka šī vērtība līdz ar lielāku periodu skaitu nemainās lineāri, proti, 1–2 periodiem tā izmainījās no 300 līdz 400  $\mu\text{F}$ , bet 2–5 periodiem pieauga no 400  $\mu\text{F}$  līdz tikai 500  $\mu\text{F}$ . Kapacitātes pieaugumu var skaidrot ar stāvokļa stabilizēšanos pēc pirmā impulsa, jo, atbilstoši stacionārā stāvokļa modeļiem nodaļā 4.1, augstāka kapacitāte nodrošina augstāku vidējo sprieguma līmeni, bet tai vajadzīgs ilgāks laiks (vairāk impulsu) šī stāvokļa sasniegšanai. Izriet, ka tiek novērota pāreja no īsā signāla modelētās tendences uz stacionārā signāla tendenci (no 4.11. att. a uz b).



4.18. att. Slodzes sprieguma vidējās kvadrātiskās vērtības atkarība no kapacitātes pie dažāda sinusoidālā barošanas signāla periodu skaita. *SPICE* modeļu simulācija ar nelineāriem taisngriešanas elementiem. Vertikālās pārtrauktās līnijas norāda analītiskā modeļa paredzēto kapacitāti zemākā ( $V_{min}$ ) un vidējā (vid.) sprieguma pīķiem (4.12. att., a).

Pie salīdzināmajiem lielumiem var pievienot enerģiju, kas katrā parametru kombinācijā izdalītos uz slodzes, to var aprēķināt no sprieguma līknēm uz zināmas pretestības  $R_s$ . Vidējo

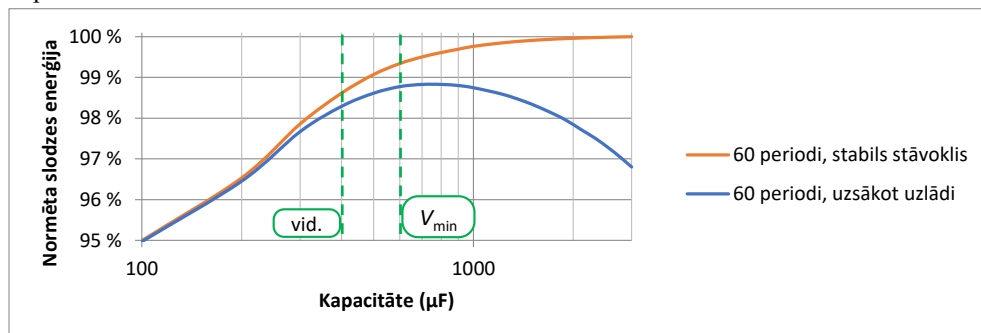
kvadrātisko vērtību enerģijas aprēķinam šajā gadījumā izmantot nevar, jo tā tika rēķināta laika logam, kurā signāls ir neperiodisks. Gluži kā iepriekš, vērtības ir normētas iekš katra periodu skaita atsevišķi nevis pret kopēji augstāko vērtību, rezultāts redzams 4.19. att.. Optimālās kapacitātes vērtība, bez šaubām, pastāv arī enerģijai un sakrīt ar vidējās kvadrātiskās vērtības optimālo punktu. Pīķu relatīvais augstums gan ir lielāks nekā iepriekšējā grafikā — piecu barošanas signāla periodu gadījumā, izmantojot 2 mF kondensatoru, paliks vien 96 % salīdzinājumā ar enerģiju pie optimālās kapacitātes, bet divu periodu gadījumā kritums būs līdz 88 %.



4.19. att. Slodzē izdalītās enerģijas atkarība no kapacitātes pie dažāda sinusoidālā barošanas signāla periodu skaita. SPICE modeļu simulācija ar nelineāriem taisngriešanas elementiem. Vertikālās pārtrauktās līnijas norāda analītiskā modeļa paredzēto kapacitāti zemākā ( $V_{\min}$ ) un vidējā (vid.) sprieguma pīķiem (4.12. att., a).

Kā parāda iepriekšējais grafiks, izvēloties neoptimālu kapacitāti, var neiegūt samērā lielu enerģijas daļu pāris impulsu gara signāla gadījumā, un zaudējums ir joprojām vērā ņemams arī ar 5 periodiem. Tā kā apskatītās skaitliskās vērtības ir normētas viena barošanas signāla garuma robežās, netiek iegūta pietiekami skaidra aina savstarpējam salīdzinājumam, tamdēļ vērts apskatīt vienādu impulsu skaitu ar un bez šiem zudumiem, ko izraisa pirmie impulsi. Šim nolūkam simulācijā barošanas avotam jāģenerē nepārtraukts signāls ar iepriekšējiem raksturlielumiem, bet aprēķiniem jāizdala atsevišķi sākuma laika periods, kurā kondensatora uzlāde sākas no nulles, un vēlāks, kurā uz slodzes jau ir iestājies stabils sprieguma stāvoklis. Kopēji simulētas sešas sekundes, no kurām pēdējās trīs atbilst stabilam stāvoklim bez sākotnējiem zudumiem, tādējādi tiek izmantots tas pats 3 s logs kā iepriekš. Līdz ar to, ka tiek apskatīti 60 periodi abos gadījumos, vērtības var normēt pret augstāko kopumā. Enerģijas aprēķinu rezultāti parādīti sekojošajā grafikā (4.20. att.). Augstākā vērtība ir lielākajai kapacitātei stabilā režīmā, kas likumsakarīgi atbilst [124] modelim, taču, ja signāls sācies ar izlādētu filtrējošo kondensatoru, ir izteikta optimālā vērtība arī pirmo 60 periodu garam signālam. Ja pieciem periodiem augstākais enerģijas punkts bija novērots pie 400  $\mu\text{F}$ , pirmajiem 60 periodiem optimālā kapacitāte sasniedz 700–800  $\mu\text{F}$  vērtību, kas ir par aptuveni 34 % augstāk nekā analītiski paredzētā  $V_{\min}$  pīķa vērtība. Tātad kapacitātes pieaugums nav lineārs,

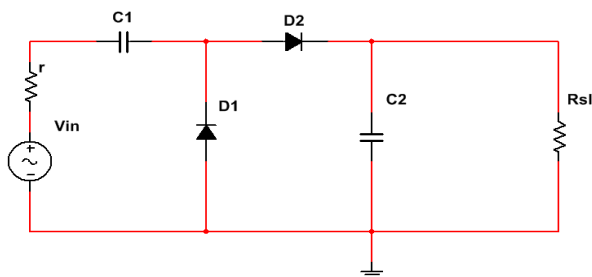
kas atbilst iepriekš novērotajai tendencei. Var secināt, ka nelielam ieeja signāla periodu skaitam (līdz 5, 4.19. att.) optimālās enerģijas nodrošināšanas kapacitāte atbilst analītiskā modeļa paredzētajam diapazonam starp augstāko vidējo un augstāko zemākā sprieguma vērtību — aptuveni 350–560  $\mu\text{F}$  (4.12. att.) —, tamdēļ modelis izmantojams arī ieejas signālam ar vairākiem periodiem. Toties, ja ieejas signāls var būt ilgstoši nepārtraukts (60 periodi, 4.20. att.), optimālā kapacitāte būs virs analītiski paredzētā zemākā sprieguma pīķa vērtības kapacitātes.



4.20. att. Slodzē izdalītās enerģijas atkarība no kapacitātes pie vienāda barošanas periodu skaita. *SPICE* modeļu simulācija ar nelineāriem taisngriešanas elementiem. Vertikālās pārtrauktās līnijas norāda analītiskā modeļa paredzēto kapacitāti zemākā ( $V_{\min}$ ) un vidējā (vid.) sprieguma pīķiem (4.12. att., a).

### 4.3. Īsa signāla analīze sprieguma reizinātāja slēgumam

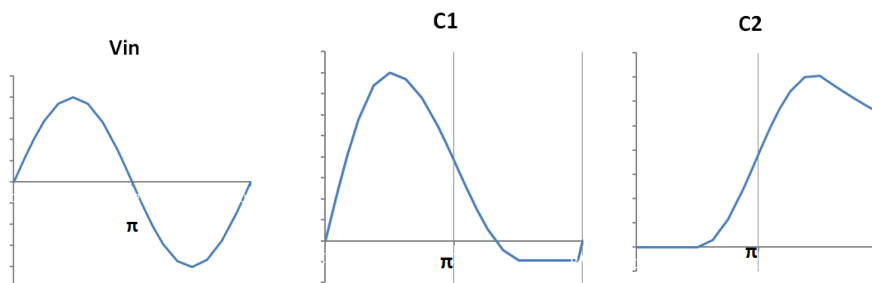
Apskatot analītisko modeli īsu signālu taisngriešanai, bija secināts, ka dažādu signālu un shēmas parametru kombinācijām iespējams optimāls filtrējošās kapacitātes lielums — tajā pēc taisngriešanas paliek visaugstākais vidējais kvadrātiskais spriegums un sekojoši augstākā uz slodzes izdalītā enerģija. Tā kā šāda punkta eksistence teorētiski noteikta pilnā tilta diožu taisngriežiem, vērts pārbaudīt, vai kas tāds iespējams arī sprieguma reizinātāja slēgumam. Reizinātāja ķēdes tiek lietotas maiņsprieguma amplitūdas daudzkārfšošanai, izveidojot izejā līdzspriegumu. Nodaļā 2 secināts, ka darbā apskatītajam kustību enerģijas ievācējam ģenerētā signāla īpatnību dēļ dotais princips nav piemērojams būtiskai sprieguma paaugstināšanai, bet, ja reizināšanas koeficients ir vismazākais, 2 (4.21. att.), shēma iegūst citu noderīgu īpašību — maiņsprieguma abu periodu taisngriešanu ar tikai divām diodēm. Tātad nelineāro elementu skaits samazinās uz pusi, salīdzinot ar pilnā tilta slēgumu, sekojoši arī zudumiem ir jākrītas. Turklāt viena pusperioda signālam jāatver tikai viena diode (4.21. att., *DI*), kad ar to tiks uzlādēts kondensators *CI*, sekojošajam pretējam pusperiodam kondensators *CI* būs virknē un palīdzēs atvērt otru diodi *D2*, paaugstinot tās vadītspēju. Izejā iegūtajam signālam būs lielākas svārstības, salīdzinot ar pilnā tilta slēgumu, bet, iespējams, kapacitātes optimizācija tās var pietiekami mazināt lietderīgai izmantošanai ar zemsprieguma pārveidotāju.



4.21. att. Sprieguma reizinātāja ar koeficientu 2 shēma.

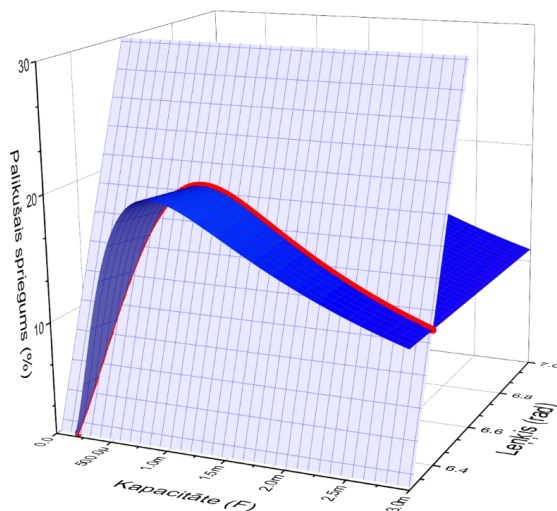
Lai gan diožu šādā slēgumā ir divreiz mazāk nekā pilnā tilta taisngriežī, kondensatoru te ir divreiz vairāk. To savstarpēji saistītā cikliskā darbība ir sarežģītāka nekā viena kondensatora uzlāde–izlāde pilnā tilta slēgumā, taču, apskatot katra kondensatora uzlādi un izlādi atsevišķi, var piemēklēt līdzīgus apstākļus kā modelī ar pilnā tilta taisngriezi. No sākuma aplūkosim kondensatoru  $C2$  un divus sinusoīdas periodus — pieņemot, ka avota  $V_{in}$  pirmais impulss ir negatīvs, šajā laikā uz  $C2$  sprieguma nav, visa strāva nonāk  $C1$ , otrā impulsa laikā  $C2$  tiek uzlādēts pirmo reizi, trešā impulsa laikā tas tikai izlādējas caur slodzi  $R_{sl}$ , bet ceturtais impulss to atkal uzlādēs. Ja apskatām  $C1$  tādā pašā situācijā — pirmais impulss to uzlādē no nulles stāvokļa, otrā impulsa laikā tas izlādējas cauri  $R_{sl}$  un  $C2$ , bet trešais impulss apstādina šo izlādi punktā, kurā atlikušais spriegums uz  $C1$  vienāds ar barošanas spriegumu, un atkal to uzlādē. Var ievērot, ka šāds vienkāršoti raksturots process līdzinās analītiskā modeļa pamata pieņēmumam par izlādi starp impulsiem, kur nākamā ieejošā signāla fronte „pārtver” spriegumu un atkal uzlādē kondensatoru (4.7. att.), tikai šoreiz tiek izlaists katrs otrais impulss. Lielāka pauze starp impulsiem var nozīmēt, ka dotajam slēgumam kapacitātes vērtības ietekme būs izteiktāka nekā pilnā tilta slēgumam, kur katrs impulss nonāca kondensatorā.

Protams, raksturotā situācija ir būtiski vienkāršota, jo patiesībā starp kondensatoriem ir krietni stiprāka mijiedarbība:  $C1$  sāks izlādēties līdz ar pirmā impulsa vērtības samazināšanos pēc pīķa, ja uz diodes  $D2$  tajā momentā būs pietiekami liela potenciālu starpība atvēršanai, nododot lādiņu uz  $C2$  un sekojoši arī  $R_{sl}$ , līdzīgi kā parāda 4.22. att.. Tātad arī iepriekš pieņemtā izlādes apstādīnāšana nenotiks precīzi ar barošanas impulsa fronti, bet tai būs papildu negatīva nobīde, kas saistīta ar  $C1$  uzlādi. Lai gan  $C1$  uzlādes sakarība pirmajā impulsā vēl ir raksturojama ar izteiksmi (4.11) kā pilnā tilta slēgumā,  $C2$  gadījums būs atšķirīgs, arī izlāde kondensatoram  $C1$  notiek ne tikai uz rezistīvās slodzes, bet arī  $C2$ .



4.22. att. Reizinātāja ieejas signāla un kondensatoru sprieguma mijiedarbība, ja tiek lietotas ideālas diodes.

Nenoliedzami, izteiktie pieņēmumi šāda slēguma gadījumā būtiski atšķiras no realitātes, tomēr vērts pārbaudīt, vai minimāla līdzība ar doto modeli palīdz noteikt augstākā paliekošā spriegumam starp impulsiem eksistenci un aptuvenu kapacitāti. Aprēķiniem var lietot to pašu funkciju (4.15) sprieguma dilšanas grafika iegūšanai trijās dimensijās, tikai šoreiz jāmeklē tā pārklāšanās nevis ar otro sinusoīdas moduļa impulsu, bet gan trešo — tāpat, sākot no  $2\pi$ , nevis  $\pi$  kā pilnā tilta slēgumā, jo katram kondensatoram tiek izlaists otrais impulss. Izmantojot tos pašus shēmas parametrus ( $r = 19 \Omega$ ,  $R_{sl} = 50 \Omega$ ,  $f = 20 \text{ Hz}$ ) un attēlojot dotās funkcijas vienā grafikā, iegūstam sekojošu dilšanas vienādojuma pārklāšanos ar sinusoīdas moduļa impulsu (4.23. att.).



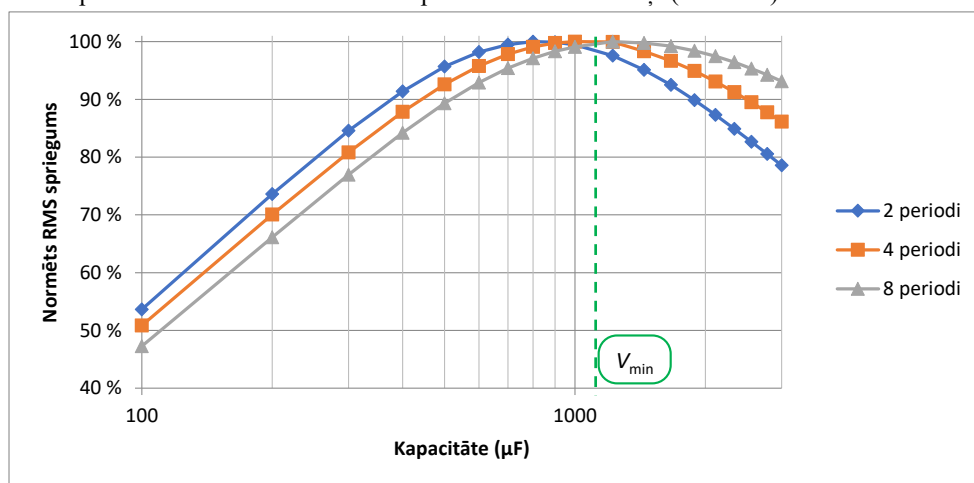
4.23. att. Sprieguma dilšanas (zila krāsa) un barošanas impulsa (gaiši violets) 3D funkciju pārklāšanās (sarkanie punkti) reizinātāja slēgumam.

Kā redzams, grafiku pārklāšanās parāda izteiktu augstāko punktu paliekošajam spriegumam, tas liek uzskatīt, ka pāris barošanas signāla periodu gadījumam arī reizināšanas slēgumā pastāv optimālas kapacitātes iespējamība. Atšķirībā no pārklāšanās grafika, kas tika



iegūts ar šiem pašiem signāla un slodzes parametriem pilnā tilta slēgumam, tagad paliekošajam spriegumam augstākais punkts ir pie aptuveni 1,1 mF, nevis pie 0,56 mF (4.12. att.). Pilnā tilta slēgumam papildus tika aprēķināts augstākais spriegums ar (4.11), bet, kā pirmīt tika saprasts, šis vienādojums tuvināti strādātu tikai pirmajam impulsam  $C1$  kondensatoram, tāpēc šoreiz netiks izmantots. Turklāt pilnā tilta slēguma simulācijas parādīja, ka, pieaugot signāla periodu skaitam, optimālās kapacitātes vērtība tiecas pieaugt, un nelielam periodu skaitam tuvojas zemākā sprieguma pīķa kapacitātei, un tā jau ir iegūta pārklāšanās grafikā (4.23. att.).

Tā kā izvirzītie pieņēmumi analītiskā modeļa izmantošanai šajā slēgumā ir būtiski atšķirīgi no reālajiem, arī to matemātisko ticamību vērts pārbaudīt ar *SPICE* modeļu simulāciju. Izmantojot 4.21. att. slēgumu, parametrus  $r = 19 \Omega$ ,  $R_{sl} = 50 \Omega$ ,  $f = 20 \text{ Hz}$  un ideālus taisngriešanas elementus, tika simulēts dažāds barošanas avota signāla periodu skaits, nosakot vidējo kvadrātisko sprieguma vērtību uz slodzes. Kapacitātes vērtības  $C1$  un  $C2$  tika mainītas vienkopus. Rezultāti normēti iekš katra periodu skaita atsevišķi (4.24. att.).



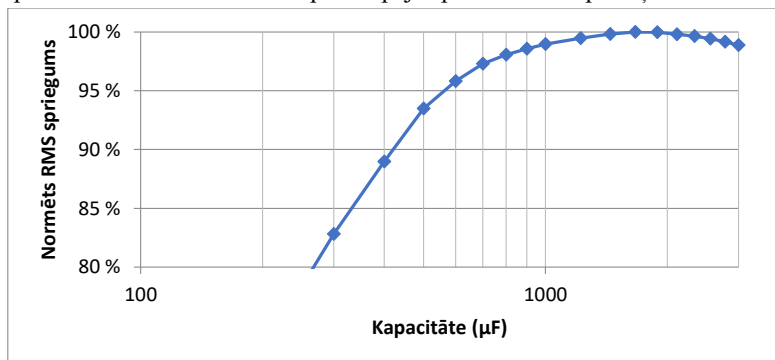
4.24. att. Slodzes sprieguma vidējās kvadrātiskās vērtības atkarība no  $C1$  un  $C2$  kapacitātes sprieguma divkāršotāja slēgumā. *SPICE* modeļu simulācija ar  $50 \Omega$  slodzi. Vertikālā pārtrauktā līnijas norāda analītiskā modeļa paredzēto kapacitāti zemākā ( $V_{\min}$ ) sprieguma pīķim (4.23. att.).

Kā parāda simulācijas rezultāts, optimālais punkts izejas sprieguma vidējai kvadrātiskai vērtībai eksistē gluži kā paredzēja analītiskā modelēšana. Taču, atšķirībā no pilnā tilta slēguma rezultātiem tādām pašām signālam un slodzei (4.18. att.), pīķis ir izteiktāks, un optimālās kapacitātes punkts nobīdās straujāk līdz ar periodu skaita palielināšanos — 2 periodiem tas ir pie aptuveni 0,8 mF, bet 8 periodiem virs 1,2 mF. Dotajam slēgumam pie 4 periodu gara signāla iegūtais vidējais kvadrātiskais spriegums uzrāda optimumu pie kapacitātes, kas tuva analītiski paredzētajai zemākā sprieguma optimālajai kapacitātei, tilta slēgumam tas notika līdzīgos apstākļos — pie 5 periodu gara signāla (4.19. att.). Līdzīgie rezultāti liecina, ka dotā analītiskā modeļa pieņēmumi ir tuvi nepieciešamajiem arī reizinātāja slēgumam, bet modelis ignorē savstarpējo kondensatoru mijiedarbību, tālab nav pilnīgs. Iespējams, ka shēmās ar līdzīgu

savstarpējo parametru attiecību arī dotā analītiskā metode sniegs tuvi ticamus rezultātus, bet citās tie var izrādīties aplami.

Lai gan detalizētu *SPICE* modeļu simulācijas izmantošana kapacitātes ietekmes noteikšanai ir laikietilpīgs process lielā datu apjoma apstrādes dēļ, tas ļauj apskatīt variantus, kurus analītiskais modelis neparedz. Šāds piemērs ir ne vien atšķirīgi slēgumi, bet arī liela slodzes pretestība, pie kuras secīgās impulsu kopas ietekmē viens otru — kā tas iepriekš nodaļā tika konstatēts 1 k $\Omega$  slodzei. Dotās konfigurācijas apskatīšanai ir praktiska nozīme, jo, kā noskaidrots nodaļā 3, pārveidotājiem nepieciešams pēc iespējas stabils signāls, bet reizinātājs nesniedz frekvences dubultošanu kā pilnā tilta slēgums, tātad taisngrieztajam signālam būs stiprāki iekritumi. Dotajā gadījumā augstākas ieejas pretestības pārveidotāja izmantošana nodrošinās lēnāku kondensatoru izlādi, respektīvi, samazinot sprieguma svārstības.

Izmantojot iespējas konfigurēt simulācijas modeļus plašās robežās, vērts uzreiz apskatīt pēc iespējas reālistiskāku situāciju, lai novērtētu eksperimentālo mērījumu nepieciešamību: lietot faktiski izmantoto diožu *SPICE* modeli un nepieciešamo signālu, kuru var nodublēt no iepriekš ierakstītiem mērījumiem, piemēram, kā 4.4. att., un to izmantot kā virtuālā avota izejas signālu. Turklāt vairs nav vērts pārbaudīt pavisam īsu laika posmu ar pāris signāla periodiem kā tas darīts iepriekš, noderīgāk simulēt ilgāku signāla eksistenci ar tam raksturīgiem tukšuma periodiem, kuros enerģijas ievācējs neģenerē. Šādā veidā iespējams noskaidrot, vai eksistē optimālas parametru vērtības realitātei pēc iespējas pietuvinātos apstākļos.



4.25. att. Normēts vidējais kvadrātiskais slodzes spriegums atkarībā no izmantotās kapacitātes  $C1$  un  $C2$  sprieguma divkāršotājā. *SPICE* modeļu simulācija ar 1 k $\Omega$  slodzi un reālistisku kustību enerģijas ievācēja signālu.

Apstrādājot simulācijas rezultātus, iegūts grafiks 4.25. att.. Tas parāda, ka eksistē optimālas kondensatoru kapacitātes vērtība arī slodzei ar samērā augstu vērtību, kuras dēļ kondensatori neizlādēsies pilnībā starp impulsu kopām. Simulācijā tika raksturotas 30 sekundes kopš barošanas signāla parādīšanās, tajā ietilpa 46 barošanas signālu kopas atbilstoši 4.4. att.. Šis ir liels impulsu skaits, kurš varētu būt pielīdzināms reālai kustību enerģijas ievācēja darbībai īslaicīgas soļošanas gadījumā. Rezultātā redzams, ka optimāla kapacitāte ir pie aptuveni 1.8 mF.

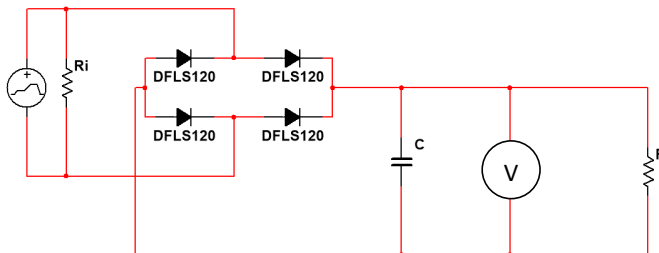
## 4.4. Kapacitātes ietekmes eksperimentālā pārbaude

Lai arī veikto simulāciju pamatā ir reālistisku elementu parametri taisngriezum, ideāla rezistīvā slodze nevar raksturot sagaidāmo impulsveida slodzi pārveidotājos. Tamdēļ nepieciešama eksperimentālā pārbaude ar dažādām kapacitāšu vērtībām, taču, tās mainot, ieejas signālam jābūt vienādam, tālab par maiņsprieguma avotu izvēlēts izmantot signālu ģeneratoru. Nenoliedzami, varētu lietot arī elektromagnētisko kustību enerģijas ievācēju mehāniskajā manipulatorā, bet neliela signāla izmaiņa teorētiski var pārvietot optimālo punktu vai padarīt to mazāk izteiktu, liekot rezultātu izkļiedi sajaukt ar praktisku efektu. Dotajā sadaļā tiks veikts eksperimentāls gludināšās kapacitātes ietekmes novērtējums ar zemsprieguma elektroenerģijas pārveidotājiem un nemainīgu ieejas signālu atbilstoši modelētajām un simulētajām sistēmām.

### 4.4.1. Tilta slēguma pārbaude

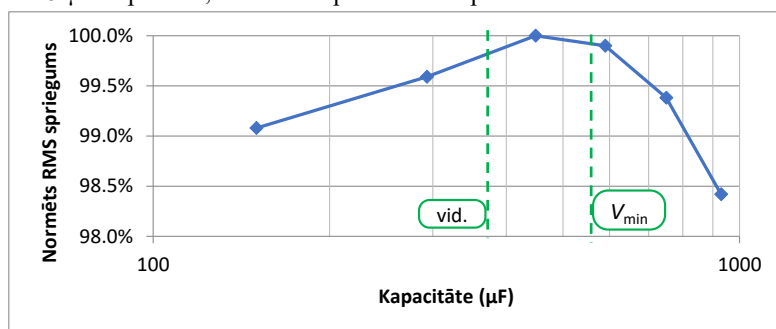
Pārbaudei izvirzīta  $50\ \Omega$  slodzes pretestība, kas atbilst iepriekš apskatītajam pārveidotāja *EH4205* ieejas pretestības piemēram. Lai gan analītiskais modelis paredz pīķa vērtību vidējam spriegumam arī mazākās pretestības pārveidotāja parametriem (4.12. att., b), pīķis ir plats un maz izteikts. Turklāt praktiskajos mērījumos novērotais vidējais spriegums jau bija neliels un tuvs ražotāja noteiktajam startēšanās līmenim (nodaļa 3.4). Darbošanās pie robežvērtībām var būtiski ietekmēt praktiskā guvuma novērtējumu, tālab zemākās pretestības pārveidotājs šajā sadaļā netiks pārbaudīts.

Izmantojot signāla ģeneratoru, kuram var uzdot signāla formu, iespējams atdarināt sagaidāmā enerģijas ievācēja signāla parametrus. Pamatojoties uz mērījumu paraugu (4.4. att.), ģeneratoram ievadīta atbilstošā signāla forma (kopa no diviem 20 Hz sinusoidas periodiem) ar tam raksturīgo pauzi starp impulsiem (530 ms). Atliek vien atveidot elektromagnētiskā enerģijas ievācēja iekšējo pretestību, kas iepriekšējos aprēķinos pieņemta kā  $19\ \Omega$ , bet signāla ģeneratoram tā ir  $50\ \Omega$ . Teorētiski, pieslēdzot paralēli ģeneratoram  $30\ \Omega$  (4.26. att.,  $R_i$ ), jāiegūst ekvivalentus  $18,75\ \Omega$  ģenerators izejā. Praktiski izmērīti  $18,1\ \Omega$ , kas, domājams, ir pietiekams tuvinājums. Tukšgaitas spriegums ieregulēts  $0,8\ \text{V}$  amplitūdā, lai atbilstu pirmīt lietotajam mērījumu paraugam (4.4. att.). Shēmā lietotas tā paša modeļa Šotki diodes (*DFLS120*) kā pirmīt.



4.26. att. Eksperimentālā shēma kapacitātes ietekmes uz taisngrieztu spriegumu pārbaudei.  $R_i$  — ģenerators iekšējās pretestības salāgošanas rezistors,  $C$  — maināmā kapacitāte,  $R$  — slodzes pretestība.

Lai izslēgtu iespējamās mainīgos, iesākumā pārbaudīts, vai optimālas kapacitātes vērtība pastāv tīri pasīvai slodzei. Šādā veidā var pārliecināties, ka teorijai ir praktiska izpausme, un mērījumu metode ir atbilstoša. Izmantota elektriskā shēma 4.26. att., slodzes  $R$  pretestība  $47,5 \Omega$ , kas ir pietiekami tuvu pirmīt analītiskajā modelī un simulācijā aplūkotojiem  $50 \Omega$ . Vidējās kvadrātiskās vērtības aprēķinam izmantotas pirmās desmit impulsu kopas. Kā redzams sekojošajā grafikā (4.27. att.), optimālā kapacitāte pastāv arī praktiskos mērījumos, un tās vērtība ir ļoti tuva analītiskā modeļa un simulācijas paredzētajām vērtībām (4.15. att.) — analītiskais modelis augstāko vidējo vērtību uzrādīja pie  $350 \mu\text{F}$ , bet pīķi zemākajam sprieguma pie aptuveni  $680 \mu\text{F}$ , savukārt mērījumos augstākais vidējais kvadrātiskais spriegums bija noteikts ar  $449 \mu\text{F}$  kapacitāti, kas ir tuvu paredzētā diapazona vidum.



4.27. att. Slodzes sprieguma vidējās kvadrātiskās vērtības atkarība no kapacitātes tilta slēgumā, mērījumi ar rezistoru. Vertikālās pārtrauktās līnijas norāda analītiskā modeļa paredzēto kapacitāti zemākā ( $V_{\min}$ ) un vidējā (vid.) sprieguma pīķiem (4.12. att., a).

Tālāk var veikt mērījumus ar elektroenerģijas pārveidotāju kā slodzi, lai pārbaudītu, vai dotajam efektam ir vērtīga ņemama nozīmē arī dotās aktīvās slodzes gadījumā. Šim nolūkam rezistīvā slodze (4.26. att.,  $R$ ) aizstāta ar zemsprieguma pārveidotāju  $EH4205$ , pie kura tālāk pieslēgts uzlādes kontroles bloks  $EH300$  un uzkrājošais kondensators. Lai pārveidotājs katrā mērījumā izjustu vidēji to pašu izejas slodzi neatkarīgi no uzlādes laika, elektroenerģijas uzkrāšanas kondensators tā izejā ikreiz jāuzlādē līdz vienādam spriegumam. Tamdēļ papildus taisngrieztajam tiek mērīts arī uzkrājošā kondensatora spriegums. Turpmākajā mērījumu datu apstrādē tiks lietots laiks starp barošanas signāla parādīšanos — pirmā impulsa fronti — un momentu, kad uzkrājošā kondensatora spriegums sasniedz nepieciešamo.

Mērījumu rezultātā iegūtās taisngrieztā sprieguma vidējās kvadrātiskās vērtības atkarība no filtrējošā kondensatora kapacitātes parādīta 4.28. att., līdzās attēlota arī vidējā izejas jauda, kas noteikta atbilstoši (4.19), izmantojot zemsprieguma pārveidotāja izejas kondensatora uzlādes laiku līdz  $1,5 \text{ V}$  (vērtība izvēlēta brīvi) un uzkrāto elektroenerģiju atbilstoši (3.2). Kā redzams 4.28. att., gan vidējam kvadrātiskajam spriegumam pēc taisngrieža, gan arī vidējai izejas jaudai ir optimālas kapacitātes vērtības, bet izejas jaudai augstākā vērtība ir pie zemākas kapacitātes. To var paskaidrot ar paša pārveidotāja parametriem, kas doti nodaļā 3.1 — dotajā eksperimentā pie optimālās kapacitātes pārveidotāja izejas sprieguma vidējā kvadrātiskā vērtība bija ap  $95 \text{ mV}$ , bet pie šāda izejas sprieguma tam ir izteikti stāva efektivitātes atkarība no izejas sprieguma (3.4. att.), tamdēļ pie nedaudz zemākas kapacitātes, kur sprieguma vidējā vērtība vēl

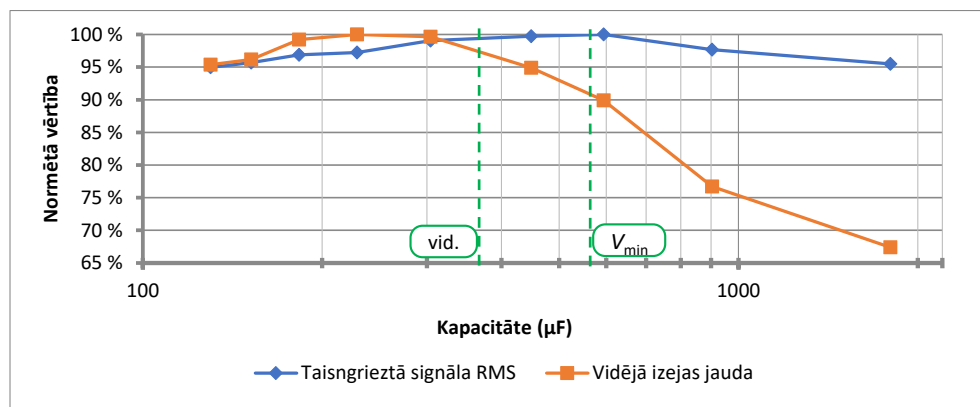
nav stipri zemāka (samazinājums zem 3 %), bet pīķi ir augstāki, pārveidotājs strādāja efektīvāk un guva lielāku izejas jaudu. Turpretim vidējā kvadrātiskā sprieguma vērtība optimālo punktu uzrāda tuvu pie 600  $\mu\text{F}$ , kas atbilst analītiskā modeļa paredzētajam diapazonam. Grafikā var novērot, ka vidējā izejas jauda kritas straujāk pie zemākām kapacitātes vērtībām, tātad pa kreisi no sava pīķa, nekā augstākām, to var paskaidrot ar stiprāku sprieguma iekritumu taisngrieztajos impulsos. Neskatoties uz to, ka slodze dotajā eksperimentā ir aktīva un atkarīga no ieejas sprieguma svārstībām, rezultējošā optimālā kapacitātes vērtība taisngrieztajam spriegumam joprojām atbilst modelim. Toties stāvā ieejas parametru raksturliktne un darbība tuvu startēšanās līmenim ietekmē pārveidotāja darbību.

$$P_{\text{vid}} = \frac{E}{t}, \quad (4.19)$$

kur  $P_{\text{vid}}$  — vidējā jauda, W;

$E$  — uzkrātā elektroenerģija, J;

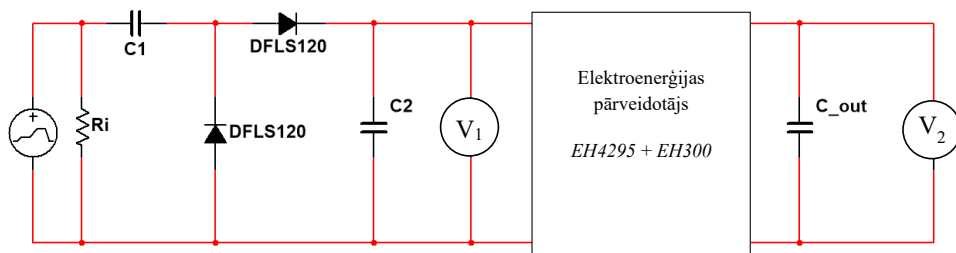
$t$  — laiks, kurā uzkrāta enerģija, s.



4.28. att. Taisngrieztā sprieguma vidējās kvadrātiskās vērtības un *EH4205* izejas vidējās jaudas atkarība no taisngrieža tilta filtrējošās kapacitātes. Vertikālās pārtrauktās līnijas norāda analītiskā modeļa paredzēto kapacitāti zemākā ( $V_{\text{min}}$ ) un vidējā (vid.) sprieguma pīķiem (4.12. att., a).

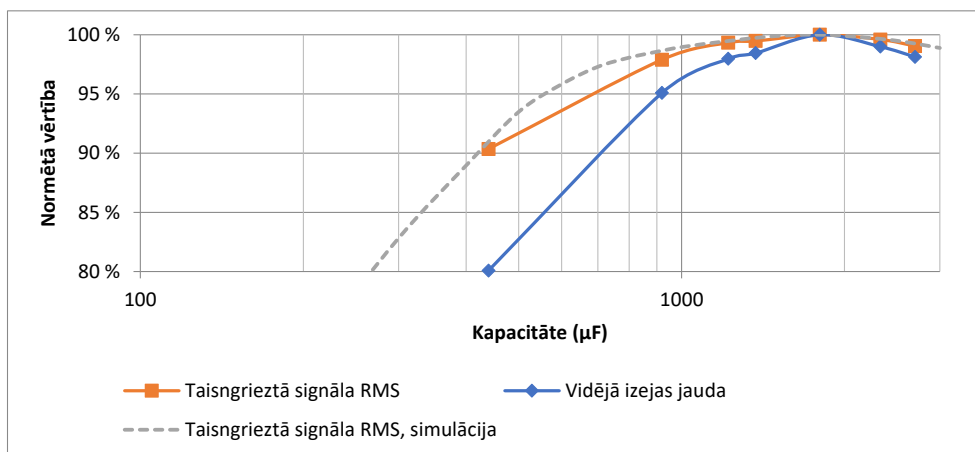
#### 4.4.2. Reizinātāja slēguma pārbaude

Praktiski apstiprinot optimālās kapacitātes lietderību pilnā tilta taisngriezim, vērts pārbaudīt sprieguma divkāršotāju. Pirmīt piedāvātais analītiskais modelis tam netika paredzēts, tamdēļ pārbaudei izvirzīts simulētais rezultāts ar reālistisku signālu un augstas pretestības slodzi (4.25. att.), pie kuras barošanas signāla pārtraukuma laikā kondensators neizlādējas līdz nullei. Šim nolūkam ieejas signāls paliek tas pats kā pirmīt, izmainot vien diožu slēgumu un nomainot elektroenerģijas pārveidotāja moduli atbilstoši 4.29. att.. Starp piegājieniem tiek izlādēti visi kondensatori.



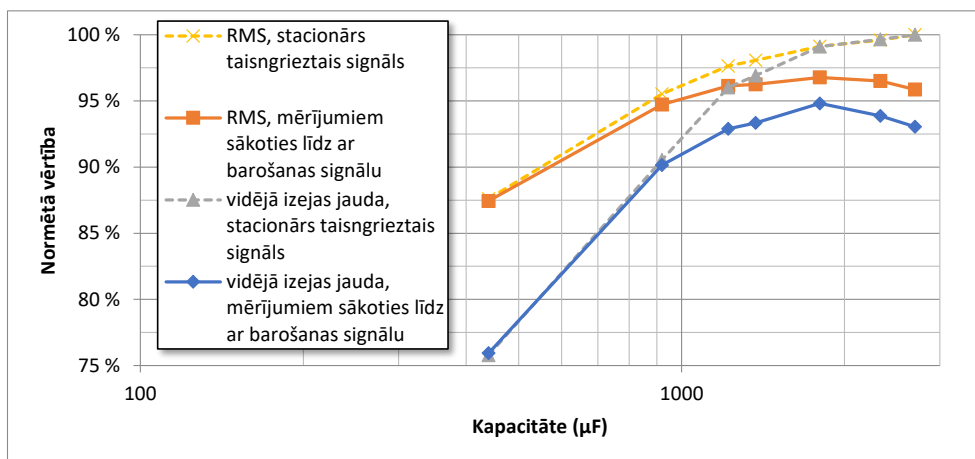
4.29. att. Reizinātāja slēgums eksperimentālai pārbaudei ar augstākās pretestības elektroenerģijas pārveidošanas moduli. Mainītas abas ( $C1$  un  $C2$ ) kapacitātes, mērītas sprieguma oscilogrammas pēc taisngriešanas ( $V_1$ ) un izejā ( $V_2$ ).

Mērījumu dati apstrādāti kā pilnā tilta slēguma eksperimentā, rezultāti ar normētajām vērtībām izejas kondensatora uzlādei līdz 1,5 V parādīti 4.30. att., līdz ar tiem sniegti iepriekš *SPICE* simulācijas vidē iegūtie rezultāti vidējai kvadrātiskajai vērtībai no 4.25. att. Līdzīgi kā ar pilnā tilta slēgumu, arī reizināšanas shēma uzrāda optimālas kapacitātes dabu, bet šajā gadījumā vidējās izejas jaudas optimālais punkts sakrīt ar vidējā kvadrātiskā sprieguma optimālo kapacitāti. To var paskaidrot ar dotā elektroenerģijas pārveidotāja efektivitātes atkarību no ieejas sprieguma (nodaļa 3.1) — optimālajā režīmā taisngrieztais spriegums svārstījās ap 470 mV, ap šo vērtību pārveidotājam *EH4295* ir būtiski stabilāka efektivitātes atkarība no ieejas sprieguma nekā pirmīt apskatītā *EH4205* gadījumā (3.4. att.), tas arī paskaidro mazākas izejas jaudas procentuālās izmaiņas, salīdzinot ar 4.28. att.. Līdzīgi ir ar ieejas pretestību, kam pie dotā ieejas sprieguma ir lēzenāka savstarpējā atkarība (3.3. att.), tamdēļ eksperimentāli iegūtā līkne taisngrieztā sprieguma *RMS* vērtībai teju sakrīt ar simulācijas datiem. Var novērot, ka līdzīgi kā 4.28. att., vidējā izejas jauda krītas straujāk pie mazākas kapacitātes par savu optimālo, piemēram, *RMS* vērtībai samazinoties par 0,5 % pie mazākas kapacitātes, vidējā jauda krītas par aptuveni 1,6 %, bet, *RMS* samazinoties par 0,4 % pie augstākas kapacitātes, jauda krītas tikai par 1 %. Lai gan vērtības ir ļoti tuvas, doto mērījumu tendence liecina, ka stiprāks sprieguma iekritums pārveidotāju ieejā ir nevēlams, kas apstiprina trešajā nodaļā veiktos novērojumus un pirmo sadaļā 3.5 izvirzīto priekšnosacījumu.



4.30. att. Taisngrieztā sprieguma vidējās kvadrātiskās vērtības un *EH4295* izejas vidējās jaudas atkarība no sprieguma reizinātāja kapacitātēm. Simulācijas dati no 4.25. att.

Mērījumu rezultāti pierādīja, ka arī gadījumos, kad augstās slodzes pretestības dēļ taisngrieztais signāls tieksies ieņemt ne nulles sprieguma stāvokli atkārtotajiem impulsiem, eksistē sākotnējo pārejas procesu radītais optimālās kapacitātes nosacījums. Papildus vērts veikt salīdzinājumu bez pirmo impulsu ietekmes, proti, nosacītā stacionārā stāvoklī. Atšķirībā no iepriekšējiem mērījumiem, kur barošanas signāls no kustību enerģijas ievācēja sāk sprieguma divkāršotāja kondensatoru uzlādi no nulles, nākamajā eksperimentā barošanas signāls jau pastāv noteiktu laiku. Šim nolūkam ieejas signāls ir aktīvs 15 s, pieņemot, ka pa šo laiku spriegums uz kondensatoriem paspējis stabilizēties, tālāk tikai izejas uzkrājošais kondensators (4.29. att.,  $C_{out}$ ) tiek izlādēts, lai sāktu mērījumus. Tā kā uzlāde tiek veikta līdz tam pašam spriegumam un nekas cits, neskaitot sākuma laika momentu, netiek mainīts, šos rezultātus iespējams salīdzināt ar pirmīt iegūtajiem mērījumu rezultātiem. Normēt vērtības var pret iegūtajām stacionārajā režīmā, tādējādi novērtējot optimālās kapacitātes izvēles izdevīgumu (4.31. att.).



4.31. att. Sprieguma divkāršotāja mērījumi atkarībā no kondensatoru kapacitātes, salīdzinājums starp stāvokli, kurā barošanas signāls iepriekš bija nulle, un stacionāru, kurā barošanas signāls eksistē pirms mērījumu sākšanās.

Kā parāda 4.31. att. grafiks, ja mērījumā neņem vērā barošanas avota pirmos impulsus (stacionārs taisngrieztais signāls), atkarība no kapacitātes uzrāda stabila signāla stāvokļa raksturu — vidējā kvadrātiskā vērtība pieaug līdz ar kapacitāti un parāda piesātinājuma dabu, tai seko arī zemsprieguma pārveidotāja vidējās izejas jaudas tendence. Attēlā redzamais signāla raksturs sakrīt ar iepriekš simulēto rezultātu salīdzinājumu pilnā tilta taisngriezum (4.20. att.), kurā tika novērota tāda pati sakarība, apskatot taisngriezto signālu no barošanas impulsu paša sākuma un vēlāka laika momenta. Grafiks 4.31. att. parāda, ka ilgstoša, stacionāra signāla gadījumā optimizētās kapacitātes izmantošana šajā kapacitāšu diapazonā neievieš būtiskus zudumus. Piemēram, sprieguma divkāršotāja shēmā izvēloties 1,8 mF nevis 2,7 mF vērtības, ar ilgstoši nemainīgu ieejas signālu iegūsim vien par 0,9 % zemāku izejas jaudas vērtību, toties īsa vai pārtraukta ieejas signāla gadījumā vidējā jauda būs par 1,9 % augstāka. Ja apskatām taisngrieztā sprieguma vidējo kvadrātisko vērtību tādā pašā situācijā, tad stabilam signālam zaudējam ap 0,9 %, bet īsam iegūstam par 1 % augstāku vērtību nekā pie augstākās kapacitātes. Lai gan sprieguma vidējās kvadrātiskās vērtības zaudējums un ieguvums ir teju vienāds, vidējai izejas jaudai relatīvā atšķirība ir gandrīz divtik liela par labu optimālajai vērtībai. Grafiks arī parāda, ka zemākai kapacitātei ir vājāka ietekme uz signāla formu, tāpēc stacionāra un pārtraukta signāla gadījumā rezultāti savstarpēji ir ļoti tuvi pie vērtībām zem 1000 µF.

## 4.5. Kopsavilkums

Šīs nodaļas mērķis bija novērtēt gludinošā filtra kapacitātes ietekmi taisngrieža slēgumā. Balstoties uz iepriekšējās nodaļas rezultātiem, kas parādīja ieejas signāla ietekmi uz zema līdzsprieguma pārveidotājiem, meklēts veids nodrošināt mazākās taisngrieztā signāla svārstības pēc iespējas augstākā vidējā amplitūdā.

Literatūrā pieejamās kondensatora ietekmes analīzes metodes apskata laikā nepārtraukta un stabila signāla gadījumus, kas neatbilst dotā kustību enerģijas ievācēja ģenerācijas dabai,



tamdēļ izveidots analītiskais modelis kapacitātes ietekmes novērtējumam pirmajiem impulsiem pilnā tilta slēgumā. Tā galvenās izteiksmes ir (4.11), (4.15) – (4.18). Modelis paredz, ka atkarībā no signāla frekvences, zudumu un slodzes parametriem pastāv kapacitātes vērtība, pie kuras sprieguma ieplaka starp impulsiem būs visaugstākā. Atkarībā no shēmas parametriem, augstākā ieplaka nodrošina augstāko taisngrieztā signāla vidējo vērtību. Rezultāti pārbaudīti datorsimulāciju vidē ar nelineāriem taisngriešanas elementiem un dažāda garuma signālu, uzrādot kopēji labu tuvinājumu. Novērots, ka nelineāro taisngriešanas elementu ieviestie papildus zudumi ķēdē pazemina optimālās kapacitātes vērtību, savukārt vairāki secīgi taisngrieztie impulsi to palielina. Ja paredzamais barošanas impulsu skaits ir neliels (2–5 periodi), tad optimālā kapacitāte ir starp analītiski iegūtā vidējā un  $V_{\min}$  sprieguma pīķa kapacitātēm. Rezultāti pierāda, ka izveidotais analītiskais modelis ir izmantojams taisngrieža gludinošās kapacitātes optimālo vērtību diapazona paredzēšanai, aizstājot laika un resursu ietilpīgu datorsimulāciju. Tas tika pielietots arī sprieguma divkāršotāja slēgumam, datorsimulācija uzrādīja sluktāku modeļa tuvinājumu nekā tilta slēgumam, bet optimālās kapacitātes eksistence pārtrauktam ieejas signālam apstiprina dotā efekta pastāvēšanu dažādās ķēdēs, kurās kondensators tiek periodiski uzlādēts no nulles ar impulsu kopām.

Veikta eksperimentālā pārbaude ar pārtrauktas sinusoīdas signāla avotu, kura parametri ir tuvināti iepriekšējā nodaļā izmantotajam elektromagnētiskajam kustību enerģijas ievācējam, kā arī ar atbilstošām diodēm tilta slēgumā un elektroenerģijas pārveidotāju kā iepriekšējos eksperimentos. Rezultāti apstiprina modelētās optimālās kapacitātes eksistenci paredzētajā diapazonā, uzrādot augstāko vidējo kvadrātisko spriegumu pēc taisngrieža. Apskatītā zemsprieguma pārveidotāja izejas jaudas augstākā vērtība novērota pie zemākas kapacitātes vērtības nekā taisngrieža optimālā augstākajam vidējam spriegumam, kas saskan ar iepriekšējā nodaļā raksturoto būtisko efektivitātes atkarību no ieejas sprieguma.

Eksperimentāli pārbaudīts arī sprieguma reizinātāja slēgums, kuram optimālās kapacitātes vērtība atrasta ar datorsimulācijas palīdzību. Mērījumi veikti ilgstošam barošanas signālam un tādām, kas ir tikko sācies. Skaitliski salīdzinot abus stāvokļus, parādīts, ka augstāka, nepiemērota kapacitāte īsa signāla gadījumā rada stiprāku vidējā kvadrātiskā sprieguma kritumu, nekā radītu optimālā kapacitāte ilgstoša signāla gadījumā. Tamdēļ tās izmantošana ir pamatota arī ķēdēs, kurās ieejas signāla impulsu kopas ne vienmēr ir pāris impulsu īsas.

Praktiski novērots, ka, izvēloties nepiemērotu gludinošo kapacitāti, pilnā tilta slēgums zaudē līdz 5 %, bet sprieguma divkāršotāja slēgums līdz 10 % no taisngrieztā sprieguma vidējās kvadrātiskās vērtības, kas attiecīgi ietekmē pieslēgtā zemsprieguma pārveidotāja darbību. Lai pārveidotājs gūtu augstāko labumu pie paredzētās kapacitātes, tā ieejas pretestības un efektivitātes atkarībai no ieejas sprieguma sagaidāmajā diapazonā jābūt ar pēc iespējas mazāku stāvumu, kas apstiprina iepriekšējā nodaļā izvirzītos priekšnosacījumus. Kopumā rezultāti pierāda, ka taisngriešanas posma veiktspēju var uzlabot ar kapacitātes vērtības izvēli un tai iespējama optimāla vērtība, kas balstīta uz ieejas signāla, avota un slodzes parametriem.

## 5. MAZJAUDAS BAROŠANAS AVOTA UN NO ĀRĒJIEM AVOTIEM NEATKARĪGAS DATU MĒRĪŠANAS SISTĒMAS IZVEIDE

Šajā nodaļā tiks praktiski apvienoti iepriekšējo nodaļu pētījumu rezultāti, lai pilnveidotu un novērtētu iegūtā mazjaudas barošanas avota veiktspēju. Tai skaitā tiks pārbaudīta hibrīdā ievācēja izveide, uzlabojot atsevišķus darbības parametrus, kas nav bijis paveicams ar dotā elektromagnētiskā ievācēja individuāliem uzlabojumiem. Savukārt praktiskās lietojamības novērtēšanai tiks apskatīta patērētāja izstrāde, kas funkciju nodrošināšanai vadās pēc pieejamās elektroenerģijas.

### 5.1. Enerģijas ievākšanas snieguma uzlabojumi

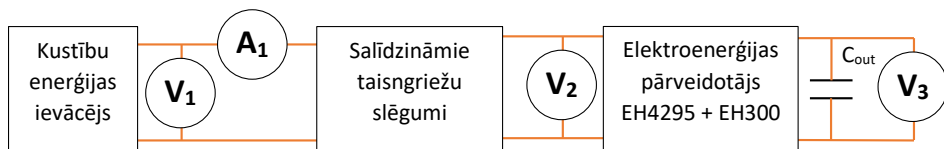
#### 5.1.1. Dažādi taisngriežu slēgumi un kapacitātes optimizācija

Iepriekšējā nodaļā tika pierādīts, ka iespējams uzlabot taisngriešanas posma sniegumu ar tā gludinošā filtra kondensatora kapacitātes pielāgošanu. Papildus tika izteikts minējums, ka tilta slēguma aizvietošana ar sprieguma divkāršotāja slēgumu samazinātu zudumus uz taisngriešanas elementiem. Tomēr tam izejā būs augstākas sprieguma pulsācijas, jo atšķirībā no pilnā tilta slēguma, divkāršotāja izejas kondensatoru uzlādē katrs otrais ieejas signāla pusperiods. Sprieguma iekritumus tiecas samazināt kapacitātes optimizācija, bet papildus tam jāizvēlas zemsprieguma pārveidotājs, kam ir pēc iespējas mazāka parametru atkarība no ieejas sprieguma. Nepieciešams arī novērtēt, vai šie uzlabojumi sniedz pienesumu ar realitātē ģenerēta signāla nestabilitāti. Tālab šajā apakšnodaļā tiks apzināts ieguvumus no minēto taisngriešanas posma uzlabojumu pielietošanas praktiskos apstākļos, salīdzinot pilnā tilta un sprieguma divkāršotāja taisngriezi. Tiks noteikta cilvēka kustību enerģijas ievācēja radīto signāla nepastāvību ietekme uz kapacitātes optimizācijas sniegumu.

##### 5.1.1.1. Mērīšanas metode un datu apstrāde

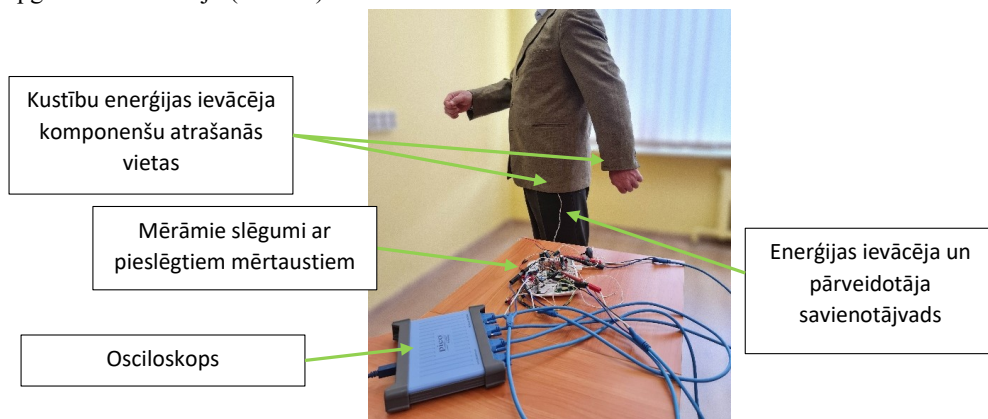
Lai saprastu, kāds ieguvums ir no dažādiem taisngriešanas slēgumiem un parametriem, tie jāpārbauda ar nemainīgu avotu — kustību enerģijas ievācēju (nodaļa 2) — un slodzi, kas šajā gadījumā ir zemsprieguma pārveidotājs ar izejas kondensatoru elektroenerģijas uzkrāšanai. Vadoties pēc izvirzītajām prasībām izmantot pārveidotāju, kura ieejas pretestība un efektivitāte ir vismazāk atkarīga no ieejas sprieguma, izvēlēts *EH4295* (nodaļa 3.1). Starp apskatītajiem komerciāli pieejamajiem zemsprieguma pārveidotājiem tam ir salīdzinoši augstākā pretestība, kas tiek sasniegta pie tā paša ieejas sprieguma, pie kura pārveidotājs uzrāda augstāko efektivitāti, kas arī atbilst pirmīt noskaidrotajiem priekšnosacījumiem (nodaļa 3). Kopumā tiks pārbaudītas četras taisngrieža shēmas: sprieguma reizinātāja slēgums ar trim kapacitātēm, kas atbilst iepriekš pārbaudītā diapazona galapunktiem un optimālajai vērtībai (0,4 mF, 1,8 mF un 2,7 mF, nodaļa 4.4.2), un tilta slēgums ar kondensatoru kā sākotnējos mērījumos ar doto elektroenerģijas pārveidotāju (1 mF, nodaļa 3.2.2). Eksperimentālais slēgums parādīts

sekojošajā attēlā (5.1. att.), papildus izejas spriegumam (spriegums uz uzkrājošā kondensatora  $V_3$ ) tiek mērīts spriegums pēc izvēlētā taisngrieža ( $V_2$ ), bet ieejā līdztekus spriegumam mērīta arī strāva ( $A_1$ ). Izejas kondensatora ( $C_{out}$ ) vērtība ir nemainīga visiem mērījumiem un sakrīt ar iepriekšējās nodaļās izmantoto — 1 mF. Visi kondensatori starp piegājieniem tiek izlādēti.



5.1. att. Spriegumu un strāvas mērīšanas punkti taisngriežu slēgumu un parametru salīdzināšanai.

Iepriekšējo nodaļu eksperimentos novērots, ka reālos apstākļos dotajam kustību enerģijas ievācējam ir samērā liela ģenerācijas izkliede, tamdēļ mērījumi jāatkārto vairākkārtīgi, lai iegūtu uzticamas vidējās vērtības. Ja taisngrieža slēguma ietekme reālos ģenerācijas apstākļos būs samērā neliela, teiksim, pāris procentu robežās, tā būs pamanāma vien kopējā statistikā, nevis individuālos piegājienos. Tamdēļ izvēlēts izslēgt soļošanu no dotā eksperimenta procedūras, jo ilgstošā mērījumu norisē tā var būt stipri nogurdinoša, potenciāli radot būtisku atšķirību starp pirmajiem un pēdējiem mērījumiem. Eksperimentam atstātas tikai rokas kustības, atdarinot tādas, kas būtu soļošanas laikā, bet subjekts stāv uz vietas. Taisngrieža slēgums, elektroenerģijas pārveidotājs un mērīšanas iekārtas atrodas atstātus — šādā veidā uz žaketi ved tikai divu dzīslu vads, turklāt tā var ērtāk veikt slēgumu maiņu un mazāk ietekmēt apģērbu un valkātāju (5.2. att.).

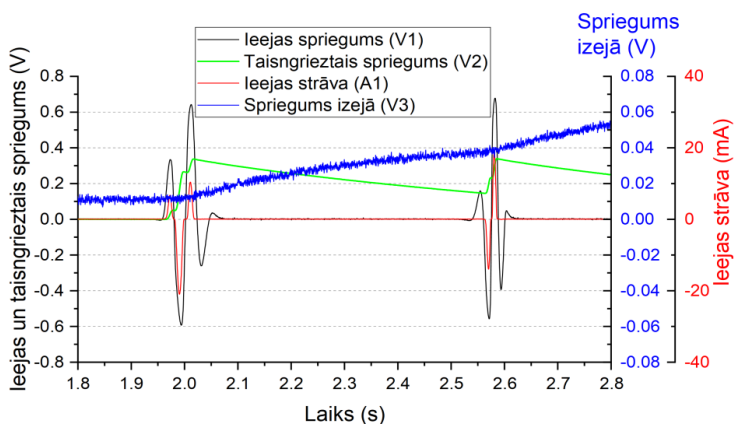


5.2. att. Eksperimenta konstrukcija, cilvēkam atdarinot soļošanas laikā raksturīgās roku kustības.

Eksperimenta objektīvai norisei valkātājs atdarina soļošanas roku kustības, tomēr neredz reāllaika sprieguma un strāvas mērījumus. Šis tiek darīts ar nolūku, lai valkātājs koncentrējas tikai uz nemainīgu roku kustību ritmu, jo tā nav ierasta stāvēšanas laikā, nevis cenšas ietekmēt elektrisko sniegumu. Mērījumu sērijā veikti desmit piegājieni ar to pašu taisngrieža shēmu, tam seko piecu minūšu atpūtas periods, tad tiek turpināts ar nākamo taisngriezi.

Lai eksperimenta parametri būtu vienlīdzīgi, izejas spriegums (5.1. att.,  $V_3$ ) jāizvēlas nemainīgs katrā mērījumā, lai elektroenerģijas pārveidotājam mainītos tikai viens parametrs — ieejas spriegums ( $V_1$ ). Šī mērķa sasniegšanai individuālie mērījumi notiek līdz izejas spriegums ( $V_3$ ) sasniedz 2,6 V, tad dati tiek saglabāti, un valkātais var atpūsties aptuveni minūti. Precīzs laiks, kurā tiek iegūta fiksēta sprieguma  $V_3$  vērtība, tiks aprēķināts pēcāpstrādē. Sprieguma vērtība ir izvēlēta patvaļīgi, lai kā atskaites punktu varētu lietot 2,55 V, kas nozīmē aptuveni divas reizes augstāku kondensatorā uzkrāto enerģiju nekā pie daudzu komerciāli pieejamo mikrokontrolleru mazākā darba sprieguma 1,8 V.

Iegūto mērījumu apstrādei nepieciešams izlemt, pēc kādām vadlīnijām tiks izvēlēta datu kopa katrā eksperimentā. Balstoties uz izejā uzkrāto enerģiju kā atskaites punktu, katrā eksperimentā apstrādājamās datu kopas sākuma un beigu momentu var noteikt pēc izejas kondensatora sprieguma. Tamdēļ novērtētas izmaiņas izejas sprieguma vērtībās līdz ar kustību sākšanos, tur konstatēts, ka izejas kondensatora sprieguma vērtība pirms pirmajiem enerģijas ievācēja impulsiem svārstās ap 10 mV, bet pēc pirmā impulsa parādīšanās sāk strauji pieaugt. Šī tendence raksturīga visiem mērījumiem neatkarīgi no slēguma (5.3. att.). Jāpiebilst, ka pirmie impulsi bieži vien ir ar mazāku amplitūdu vai nedaudz atšķirīgu formu, bet tā pat sākuma spriegums visos mērījumos sāk pieaugt un pārsniedz 20 mV vien pēc pirmā pilnā ieejas impulsa, tamdēļ dotais līmenis ir izvēlēts kā sākuma atskaites punkts.



5.3. att. Nomērītās sprieguma un strāvas līknes līdz ar pirmo enerģijas ievācēja impulsu tilta slēgumam ar 1 mF.

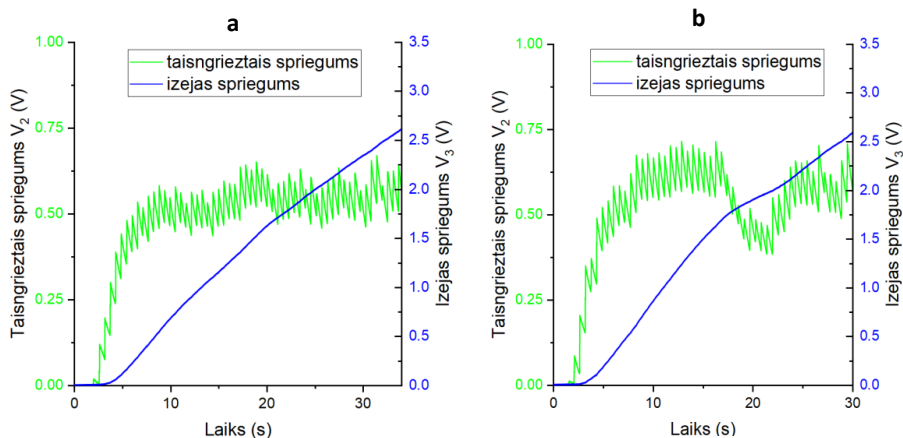
Katra piegājiena mērījumos izdalīta datu kopa starp diviem laika momentiem, kad spriegums uz izejas kondensatora (5.1. att. un 5.3. att.,  $V_3$ ) sasniedz 0,02 V un 2,55 V, tā turpmāk tiek skaitliski analizēta individuāliem mērījumiem atsevišķi. Katras iegūtās datu kopas ilgums atbilst uzlādes laikam pie nemainīgas uzkrātās enerģijas. Izmantojot sprieguma un strāvas mērījumus, tiek noteikta momentānā jauda ieejā, tālāk ieejas enerģija kā jaudas integrālis laikā atbilstoši (3.1), bet izejas enerģiju iegūst no sprieguma uz zināmās kapacitātes (5.1. att.,  $V_3$  uz  $C_{ou}$ ) atbilstoši (3.2). Taisngrieztais spriegums tiek lietots vidējās kvadrātiskās vērtības aprēķinam. Zinot enerģiju izejā  $E$  un laiku  $t$ , kurā tā iegūta, var noteikt vidējo jaudu (4.19), ieejas vidējā jauda nosakāma arī kā vidējā vērtība momentānās jaudas vērtībām.

Attiecība starp izejas un ieejas enerģiju ir sistēmas kopējā elektriskā efektivitāte saskaņā ar (3.4). Apkopojot visu piegājieni datus, noteikta vidējā vērtība sprieguma, laika, jaudas un efektivitātes lielumiem un to izkliede mērījumu sērijās kā standartnovirze (5.1), kur  $x$  ir katra parametra individuālās vērtības,  $\bar{x}$  vidējā vērtība, bet  $n$  ir piegājieni skaits.

$$\text{standartnovirze} = \sqrt{\frac{\Sigma(x - \bar{x})^2}{n}} \quad (5.1)$$

### 5.1.1.2. Rezultātu analīze

Apkopojot datus, mērījumiem konstatēta būtiska izkliede, kas rada vairāku vērtību pārklāšanos (Pielikums 5). Lielākā relatīvās standartnovirzes vērtība bija uzlādes laika mērījumiem tilta slēgumam — 11,7 % (5.1. tab.). Izkliedes avotu novērtēšanai izvēlēti vizuāli atšķirīgākie taisngrieztie signāli no augstākās kapacitātes eksperimenta (5.4. att.). Salīdzinot dotos grafikus, jāņem vērā, ka tie ir divi piegājieni, kuros subjekts cenšas veikt tās pašas roku kustības vienādos apstākļos bez atgriezeniskās saites par tām. Pirmajā grafikā (5.4. att., a) taisngrieztais signāls ir zemāks, bet stabilāks, kas rezultējas ar vienmērīgāku, bet lēnāku izejas sprieguma pieaugumu nekā otrajā grafikā, kur ieejas signāls ir bijis ar augstāku, bet nestabilu, mainīgu amplitūdu (5.4. att., b). Tātad iekš dažiem piegājieniem ir būtiskas izmaiņas ģenerācijā, līdzīgi kā tas bija novērots nodaļā 3.3 eksperimentos ar cilvēka kustībām soļošanas laikā. Pēc dotajiem grafikiem var novērtēt izkliedes avota raksturu — pārsvarā tās ir zemas frekvences svārstības, bet stipri atšķirīgi augstas frekvences pīķi, tātad atsevišķu rokas vēzienu radītie impulsi, ir reti. Tā kā cilvēka poza eksperimenta gaitā nemainījās, apģērba deformācijai jāsakrīt ar roku kustībām, tātad jābūt īsai, respektīvi, atspoguļojoties kā individuālām ģenerēto pīķu atšķirībām, bet tās nav būtiskas. Var secināt, ka galvenais ģenerētā signāla svārstību iemesls ir rokas pozīcija kustību laikā, piemēram, atšķirīga pleca augstuma vai muguras izliekuma dēļ elektromagnētiskā ģenerators komponentes (5.2. att.) izmaina savu relatīvo pozīciju.



5.4. att. Taisngrieztā ( $V_2$ ) un izejas sprieguma ( $V_3$ ) atkarība no laika mērījumos ar 2.7 mF kapacitātes reizinātāja slēgumu.

Sakarā ar būtisko atšķirību ģenerētajā signālā, iesākumā tiks salīdzinātas visu piegājienu rezultātu vidējās vērtības, tālāk atsevišķi visvairāk un vismazāk mainīgo ģenerācijas piegājienu rezultāti. Šādā veidā var novērtēt ģenerācijas stabilitātes ietekmi uz izvēlētajiem taisngriežu slēgumiem, kā arī kopējo sniegumu apstākļos, kad mijas dažādas stabilitātes piegājieni. Uzticamu atskaites vērtību iegūšanai papildus veikti mērījumi ar mehānisko manipulatoru, izmantota tā pati žakete un tas pats magnētu komplekts, kas ir piedurknē, kā arī tie paši taisngriežu slēgumi, lai atkārtotu katras komponentes ietekmi uz eksperimentu gaitu. Mērījumu datu apstrāde atbilst pirmīt raksturotajiem, rezultātā iegūta būtiski zemāka izkliede nekā cilvēka kustību eksperimentā, nepārsniedzot 2 % (5.1. tab., visi dati pielikumā 5). Protams, ir novērojamas absolūto vērtību atšķirības, tās skaidrojamas ar nemainīgo manipulatora kustību pāri visām enerģijas ievācēja spolītēm fiksētā attālumā, jo apgērbs atrodas uz plakanas virsmas.

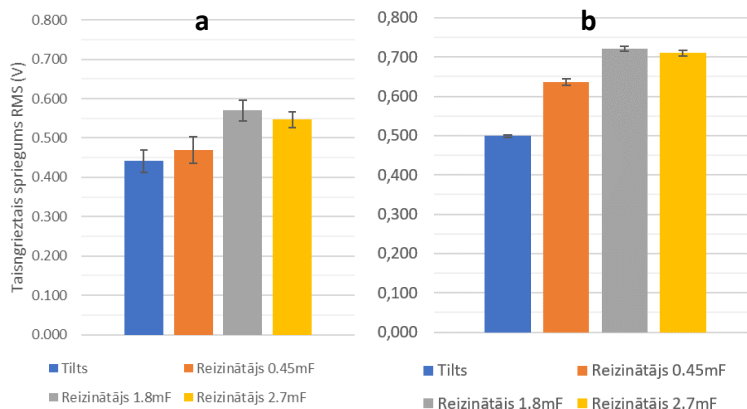
5.1. tabula

Augstākās relatīvās izkļedes mērījumu sērija ar rokas kustībā salīdzinājumā ar manipulatora kustībām tilta slēgumam.

	Mērījumi ar rokas kustībām		Mērījumi ar mehānisko manipulatoru	
	Vērtība	Izkliede	Vērtība	Izkliede
Taisngrieztais $RMS$ (V)	0,441	6,4 %	0,499	0,4 %
Uzlādes laiks līdz 2.55 V (s)	41,4	11,7 %	31,8	0,7 %
Vidējā ieejas jauda ( $\mu W$ )	388,8	9,9 %	455,3	1,0 %
Vidējā izejas jauda ( $\mu W$ )	73,5	11,7 %	93,9	0,7 %
Lietderības koef. $\eta_0$ (%)	18,8	3,3 %	20,0	0,7 %

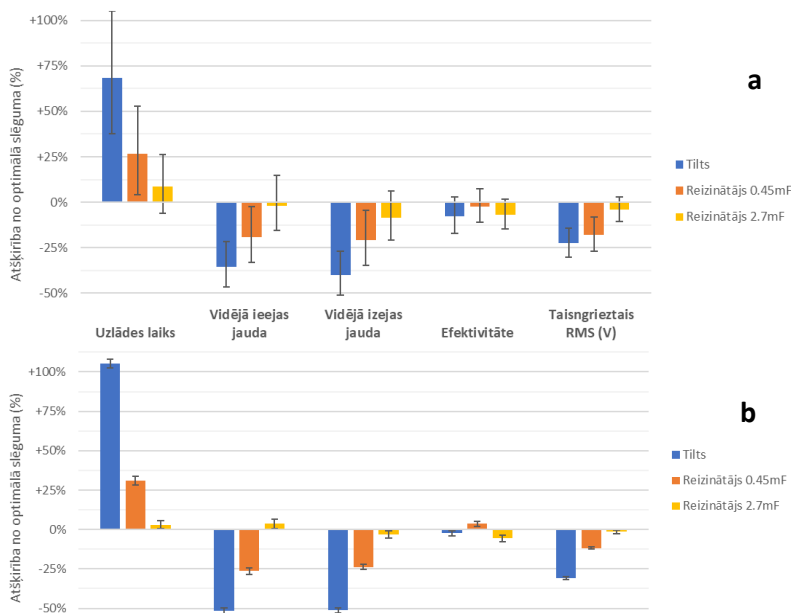
Taisngriešanas slēgumu salīdzinājums pirmīt veiktās analīzes ietvaros balstījās uz vidējās kvadrātiskās vērtības atšķirībām (nodaļa 4.4), tamdēļ šis parametrs slēgumiem tiek salīdzināts kā pirmais (5.5. att., a). Vidējā kvadrātiskā sprieguma pēc taisngrieža (5.1. att.,  $V_2$ ) vērtību

kļūdu diapazoni pārklājas tilta slēgumam un reizinātājam ar 0,45 mF kapacitāti, un reizinātājam ar 1,8 mF un 2,7 mF. Lielākā izkliede ir 7,2 % reizinātājam ar 0,45 mF. Tilta slēgumam vidējā kvadrātiskā vērtība ir viszemākā, bet augstākā ir sprieguma reizinātāja slēgumam pie 1,8 mF kapacitātes — pie augstākas un zemākas kapacitātes sprieguma vērtība samazinās, turklāt 2,7 mF gadījumā samazinājums ir mazāks nekā 0,47 mF gadījumā, kas atbilst pirmīt paredzētajai sprieguma atkarībai no ieejas kondensatora kapacitātes (4.25. att.). Vidējās vērtības atbilst dotajai likumsakarībai gan mērījumos ar cilvēka kustībām, gan manipulatoru (5.5. att., a un b).



5.5. att. Taisngrieztā sprieguma  $V/2$  vidējās kvadrātiskās vērtības ( $RMS$ ) visiem slēgumiem eksperimentam ar cilvēka kustībām (a) un mehānisko manipulatoru (b).

Salīdzināšanas nolūkam turpmākie rezultāti tiks normēti pret atbilstošajiem rezultātiem reizinātāja slēgumam ar iepriekš apstiprināto optimālo 1,8 mF kapacitāti, izkliede izteikta kā procentu punkti, pieskaitot arī optimizētā slēguma parametra izkliedi (5.6. att., a). Tādējādi atainotā kopējā izkliede ietver gan zemāko rezultātu optimālā slēguma mēģinājumā, gan augstāko citiem slēgumiem, un otrādi. Šī iemesla dēļ vairākiem lielumiem kopējā izkliede ir ļoti liela un galējās vērtības pat izmaina zīmi, ja pirmīt kļūdu diapazons pārklājas ar optimālā slēguma vērtībām, piemēram, kā tas bija vidējai kvadrātiskajai sprieguma vērtībai reizinātāja slēgumam ar 2,7 mF (5.5. att., a). Tamdēļ salīdzināšanas nolūkam pievienoti atbilstošie dati no manipulatora mērījumiem (5.6. att., b). Tā kā ieejas enerģija noteikta pirms taisngriežiem, lietojot  $V_I$  un  $A_I$  mērījumus, noteiktā vidējā ieejas jauda ir elektroniskajai sistēmai kopumā, bet par izeju uzskatīts gala uzkrājošais kondensators (5.1. att.,  $V_3$  uz  $C_{out}$ ).



5.6. att. Vidējie mērījumu rezultāti slēgumiem, dati normēti pret optimālo slēgumu, salīdzinājums eksperimentam ar roku (a) un mehānisko manipulatoru (b). Uzrādīta kopējā izkliede, kas iekļauj optimālā slēguma izkliedi.

Piegājieni vidējo vērtību tendence rokas mērījumiem ir tuva mehāniskā manipulatora kustību rezultātiem (5.6. att.). Lielumi, kuru kopējā izkliede roku kustības grafikā ieiet pretējās zīmes diapazonā par vismaz septiņiem procentu punktiem, ir ar šo pašu pretējo zīmi mērījumos ar manipulatoru (vidējā ieejas jauda reizinātājam ar 2,7 mF un efektivitāte reizinātājam ar 0,45 mF). Toties lielumi, kuru izkliede ir uz pretējo zīmi ar mazāku procentu punktu skaitu, piemēram, uzlādes laiks un vidējā izejas jauda reizinātājam ar 2,7 mF, mehāniskā manipulatora rezultātos ir ļoti tuvu nulles punktam, respektīvi optimālā slēguma rezultātam. Tas parāda, cik ļoti dabisko apstākļu eksperimenta mainīgo rezultātu raksturs ietekmē iespējas novērtēt enerģijas ievācēju sniegumu.

Tādā pašā veidā kā vidējās vērtības tiks apskatīti atsevišķi visvairāk un vismazāk stabilās ģenerācijas piegājieni. Kā varēja novērot mērījumu grafikos (5.4. att.), stipri mainīgs taisngrieztais signāls rada nevienmērības izejas kondensatora uzlādes līknē, tātad, jo šī līkne tuvāka ideālai kondensatora uzlādes raksturlīknei, jo nemainīgāki avota parametri. Kondensatora uzlādi ķēdē ar nemainīgiem parametriem raksturo vienādojums (5.2). Lai gan kapacitāte ir zināma, citi ķēdes parametri mainās atkarībā no eksperimenta, tamdēļ vienkāršībai spriegumu var raksturot ar (5.3). Teorētiski, piemēklējot koeficientus  $A$  un  $B$  katrai kondensatora uzlādes līknei tā, lai iegūtās funkcijas atšķirība no reālajiem mērījumiem ir minimāla, un salīdzinot šo atšķirību savstarpēji starp mērījumiem, mērījums ar mazāko atšķirību būs vistuvākais ideālajai uzlādes līknei, respektīvi, ar stabilāko ieejas signālu.



$$U_C(t) = U_{in} \left( 1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right), \quad (5.2)$$

$$U_C(t) = A \left( 1 - e^{-\frac{t}{B}} \right), \quad (5.3)$$

kur  $U_C$  — spriegums uz kondensatora konkrētā laika momentā, V;

$U_{in}$  — barošanas avota tukšgaitas spriegums, V;

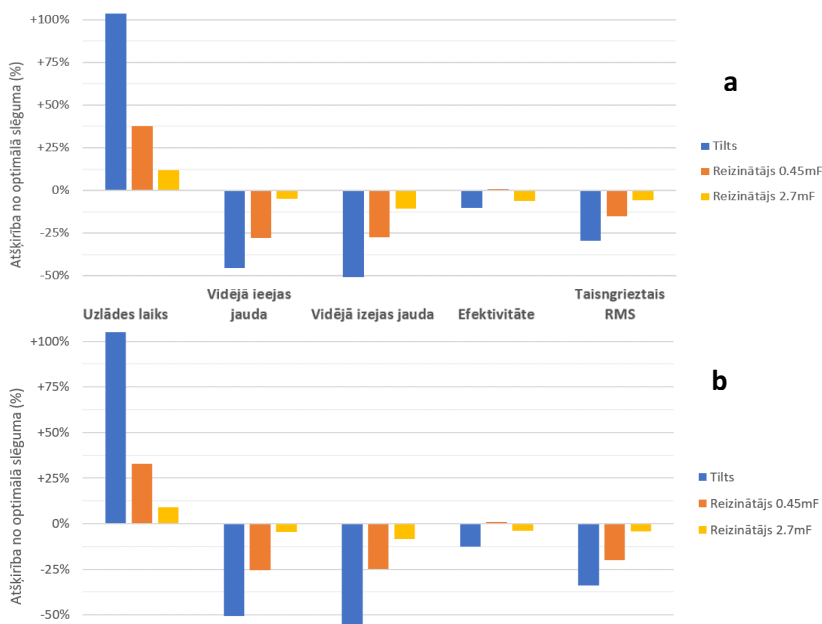
$R$  — ķēdes pretestība,  $\Omega$ ;

$C$  — kondensatora kapacitāte, F;

$t$  — laiks, s;

$A, B$  — nezināmi koeficienti, kas abi lielāki par nulli.

Tā kā ar doto metodi nav mērķis atrast skaitliski precīzus koeficientus, kas tiktu turpmāk izmantoti datu tuvinājumam, pielietotās aproksimācijas metodei un parametriem nav noteicošā nozīme, toties tiem ir jābūt nemainīgiem. Visas sprieguma līknes tiek attiecīgi sagatavotas, jo vienādojums (5.2) paredz, ka uzlāde sākas laika momentā  $t = 0$ , tamdēļ tiek lietots pirmīt izdalītais uzlādes sākuma punkts katrā piegājienu. Precīzāko tuvinājumu ideālai līknei nosaka, aprēķinot determinācijas koeficientu  $R^2$ , kur augstāka vērtība nozīmē mazāku atšķirību starp reālajiem un idealizētajiem datiem atbilstoši (5.3). Piemēram, iepriekš apskatītajā grafikā 5.4. att. stabilākā ieejas signāla izejas kondensatora uzlādes līknei atbilst  $R^2 = 0,99952$  (a), bet mazāk stabilajai  $R^2 = 0,99649$  (b). Tālāk šī metode piemērota visām mērījumu sērijām, un katrā izdalīts piegājiens ar augstākās un zemākās sakritības tuvinājumu, atlasīto individuālo piegājienu relatīvās vērtības attēlotas 5.7. att..



5.7. att. Individuāli stabilākā (a) un nestabilākā (b) ieejas signāla mērījumu rezultāti, dati normēti pret optimālo slēgumu cilvēka kustību eksperimentā.

Kā redzams grafikā 5.7. att., gan stabilākie piegājieni katrā mērījumu sērijā (a), gan nestabilākie (b) uzrāda savstarpēji ļoti tuvas relatīvās vērtības, turklāt tās pārsvarā ir tuvākas kontrolēto apstākļu mērījumu rezultātiem (5.6. att., b) nekā piegājienu vidējās vērtības (5.6. att., a). Tas liecina, ka apskatītā taisngriešanas slēgumu kapacitātes optimizācija sniedz līdzvērtīgu ieguvumu gan stabila, gan arī mainīga ieejas signāla gadījumā. Tādējādi reizinātāja slēguma ar 1,8 mF kondensatoriem izmantošana praktiskiem nolūkiem ir pamatota, jo neatkarīgi no kustību stabilitātes tiek nodrošināts augstākais vidēji kvadrātiskais taisngrieztais spriegums un sekojoši iegūta augstākā izejas jauda.

### **5.1.2. Enerģijas ievācēju apvienošana**

Kā parādīja apakšnodaļa 3.3 un apstiprināja 5.1.1.2, praktisko mērījumu rezultātu izkliedi dotajam kustību enerģijas ievācējam jāpieņem kā esošu, jo tā atkarīga no cilvēka kustību parametriem. Lai gan mainīgo kustību rezultāti ne vienmēr uzrāda zemāku sniegumu, izkliede var apgrūtināt šāda enerģijas ievācēja izmantošanu kā vienīgo barošanas avotu, jo rada nenoteiktību par paredzamo izejas jaudas līmeni. Piemēram, ja būtu nepieciešams nobarot sensorus konkrētas aktivitātes uzraudzīšanai, tad enerģijas ievācēju jāizvēlas ar pietiekami lielu ģenerējamās jaudas rezervi, lai arī sliktākajā ģenerēšanas reizē sistēma spētu funkcionēt un paveikt nepieciešamos uzdevumus laikā. Lai arī šis risinājums ir pašsaprotams un pamatots barošanas avotu izvēlē, lielā atšķirība starp iespējami zemāko, vidējo un augstāko sniegumu apgrūtina uzdevumu. Turklāt enerģijas ievācēju tehniskie risinājumi ne vienmēr ļauj tiem būtiski paaugstināt jaudu, saglabājot tās pašas izvietošanas iespējas pieaugošā apjoma vai masas dēļ. Tādos gadījumos var noderēt vairāku atsevišķu un neatkarīgi strādājošu ievācēju izmantošana, līdzīgi kā tas tika raksturots nodaļā 1.2.2, saglabājot atbilstošu formu un izmērus katram enerģijas avotam individuāli. Dotajā apakšnodaļā cilvēka kustību enerģijas ievācējam tiks izvēlēts papildus ievācējs apvienošanai ar mērķi samazināt ģenerācijas nepastāvību un paaugstināt ģenerācijas apjomu. Tiks veikti reālistisku apstākļu mērījumi un novērtēta abu ievācēju veikspēja atsevišķā un kopējā režīmā, apzinot to savstarpējo ietekmi un piesešumu.

#### **5.1.2.1. Avotu izvēle un apvienošanas slēgums**

Apvienojot vairākus avotus, to īpašības jāpieņem vajadzīgajam mērķim — šoreiz primāri tiek meklēts risinājums nevienmērīgai ģenerācijai ar lielu izkliedi individuālos atkārtojumos. Papildus jāauties uz tādu pašu enerģijas avotu dotā mērķa sasniegšanai nav saprātīgi, proti, ja papildu enerģijas ievākšana arī balstās uz roku kustībām, tā saskarsies ar tām pašām problēmām un, visticamāk, nelīdzsvaros jau esošo procesu. Tamdēļ avotiem enerģijas savākšanai vērts būt atšķirīgiem, lai pēc iespējas retāk pārklātos individuālie momenti ar nevienmērīgu un pārtrauktu enerģijas plūsmu, tikai tad iztrūkstošas vai vājas ģenerācijas posmi tiktu aizpildīti. Tālab, lai savstarpējā aizvietojamība un papildināšana būtu vērā ņemama, enerģijas avotu izejas jaudai jābūt salīdzināmai.

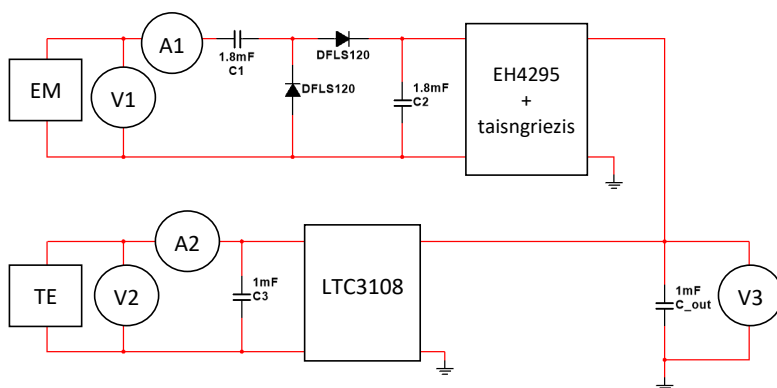
Pēc iepriekš raksturotā var secināt, ka izvēlēties cilvēka ekstremitāšu kustības kā papildu enerģijas avotu stabilitātes nolūkiem, domājams, nav izdevīgi. No citiem sevi pierādījušiem enerģijas savākšanas principiem piemērots liekas termoelektriskais ģenerators, kas siltuma

plūsmu no ķermeņa uz apkārtējo vidi pārveido elektroenerģijā. Ievācējs nav ticis apskatīts promocijas darba ietvaros, bet atsevišķās publikācijās ar autora līdzdalību [24], [28]. Tas uzrāda salīdzinoši stabilu darbību, jo temperatūras izmaiņas parasti nav tik straujas, un vieglu cilvēka aktivitāšu laikā ar atbilstošu elektroenerģijas pārveidotāju spējīgs uzlādēt 1 mF kondensatoru līdz 2 V līmenim 2,5 minūšu laikā [28], kas ir tuvs rezultāts iepriekš nodaļā 3.3. novērotajām 2 minūtēm ar cilvēka kustībām. Piedevām ģenerācija būtiski pieaug kustību laikā, bet neapstājas līdz ar tām, tas varētu dot iespēju aizpildīt ne tikai nestabilus, bet pat īsus kustību iztrūkuma periodus. Lai gan momentānā un vidējā jauda dotajam ievācējam ir mazāka nekā apskatītajam elektromagnētiskajam ģeneratoram, stabilāka un ilgstošāka darbība var sniegt vēlamus rezultātus. Tas ir izvietojams uz ķermeņa virsmas, izvēlēts apakšstilbs, lai neietekmētu kustības, un tas tiktu papildus pakļauts dzesējošai gaisa plūsmai soļošanas laikā (5.8. att.).



5.8. att. Termoelektriskā enerģijas ievācēja izvietojums ap apakšstilbu.

Abus enerģijas ievācējus ar saviem elektroenerģijas pārveidotājiem var uzskatīt par noslēgtām sistēmām un apvienot to izejas paralēli (5.9. att.,  $C_{out}$ ). Kaut gan tā tiek lietots vairāk komponentu, dotajā situācijā šis būtu lietderīgākais apvienošanas variants (nodaļa 1.1), jo ievācēju izejas spriegums ir atšķirīgs un zems, bet pārveidotāji to līdzsvaros, potenciāli padarot uzlādi vienlaicīgu. Tādā veidā arī nenotiek iekļaušanās jau esošās, optimizētās sistēmās, un abi ģeneratori var sniegt ieguldījumu uzkrātajā enerģijā, kamēr vien to pārveidotāji spējīgi sniegt augstāku izejas spriegumu par uzkrājošā kondensatora spriegumu. Toties gadījumos, kad kāda no ievācēja shēmām sniedz mazāku spriegumu vai nestrādā vispār, atlikušā ievācēja darbība netiks iespaidota, jo abu elektroenerģijas pārveidotāju izejās ir taisngrieži, kas ierobežo pretēju strāvas plūsmu. Izejā lietots tādas pašas 1 mF kapacitātes kondensators kā visos eksperimentos pirmīt, ar tādu tika novērtēts arī termoelektriskais enerģijas ievācējs [28], šādā veidā izpildās iepriekš izteiktā prasība, ka, strādājot individuāli, abi ievācēji saprātīgā laikā būtu spējīgi sniegt pietiekami augstu enerģiju un spriegumu mazjaudas elektronikas barošanai.



5.9. att. Elektromagnētiskā (EM) un termoelektriskā (TE) enerģijas ievācēja apvienošanas shēma ar sprieguma un strāvas mērīšanas punktiem.

Novērtējot iepriekš iegūtos rezultātus par analizēto pārveidotāju darbību (nodaļa 3.4), tika secināts, ka pārveidotājam *EH4295* sekojošajam enerģijas uzkrāšanas blokam *EH300* pieaug patēriņš pie izejas sprieguma virs 3 V (3.2. att., b), kas praktiskās sistēmās sniegs papildu zudumus no uzkrātās elektroenerģijas. Tas var būt īpaši traucējoši dotajā sistēmā, jo pieslēgtais termoelektriskais enerģijas ievācējs teorētiski sniegs iespēju uzlādēt izejas kondensatoru līdz augstākam līmenim, līdz ar ko pieaugs nelietderīgais patēriņš. Atsakoties no izejas kondensatora sprieguma ierobežošanas un uzraudzības funkcijas, kā secināts nodaļā 3.4., bloka darbību var veikt tikai taisngriezis, kas neradīs novēroto strāvas patēriņu pie augstāka izejas sprieguma. Tas neietekmē pirmīt veikto sprieguma reizinātāja kapacitāšu optimizāciju, jo galvenais sloģojošais faktors pārbaudītajā sprieguma diapazonā bija kondensatora uzlāde, kas saglabājas neizmainīta. Tālab dotajiem eksperimentiem *EH300* bloks aizstāts tikai ar taisngriezi.

### 5.1.2.2. Reālistisku apstākļu mērīšanas metode

Lai pilnvērtīgi novērtētu dažādo enerģijas ievācēju darbību, tiem jāfunkcionē sev paredzētajos apstākļos. Abiem ievācējiem darbības apstākļus nosaka cilvēks, tamdēļ izolētas kustības kā iepriekšējos mērījumos ar soļošanai atbilstošu roku kustību imitāciju nav iespējamas — mērījumiem ir jāietver vide un apstākļi gan enerģijas ievācējiem atsevišķi, gan kopā, pretējā gadījumā nebūs iespējams ticami salīdzināt to veiktspēju un ieguldījumu. Tā kā soļošanas kustības ir faktiski kopējas abiem ievācējiem, to atkārtojamības nodrošināšanai izmantots elektriskais skrejceļiņš ar fiksējamu ātrumu. Tādā veidā notiek apstākļu kontrole, jo pārvietošanās ātrums un telpas temperatūra ir nemainīga, taču netiek ieviesta lieka idealizācija, kas traucētu rezultātu pielietošanai praksē. Enerģijas ievācējiem atrodoties uz valkātāja, to sprieguma un strāvas (5.9. att., *V1*, *A1*, *V2* un *A2*) reāllaika mērījumu nodrošināšanai elektroenerģijas pārveidotāji izvietoti ārpus apģērba, tādējādi valkātājam ir pieslēgti tikai divi vadi, bet visa mērīšanas aparatūra var būt atstāta (5.10. att.). Šādā veidā var veikt ērtu slēguma

maiņu (savienot vai atvienot ievācējus), neiejaucoties apgērbta struktūrā, un mērījumu nolūkiem nav nepieciešamības rūpēties par shēmu kompaktnumu.



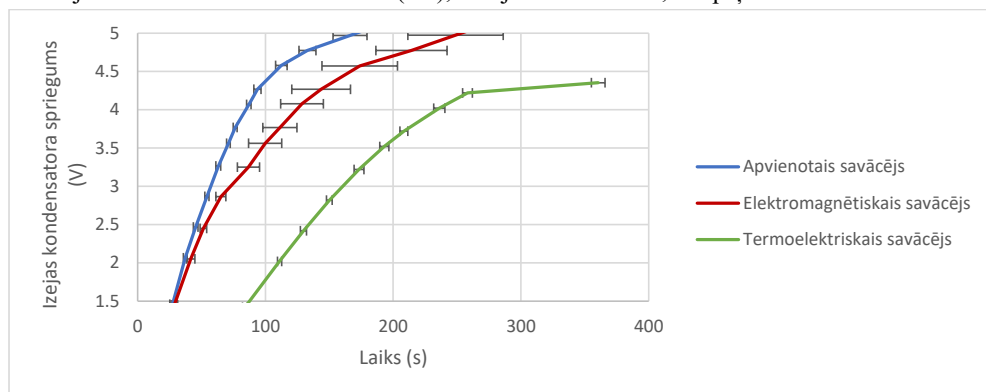
5.10. att. Dažādo enerģijas ievācēju kopējie mērījumi uz elektriskā skrejceļa ar fiksētu ātrumu.

Mērījumiem izvēlēts valkātājam ērts, raits ātrums 4,5 km/h. Iesākumā mērījumi veikti ievācējiem atsevišķi, lai novērtētu to pamata veiktspēju konkrētajos apstākļos, tikai trešajā mērījumu sērijā abu ievācēju izejas savienotas. Starp mērījumiem izejas kondensators tiek turēts īsslēgts, lai parūpētos par tā pilnīgu izlādi, kā arī nodrošinātos pret iespējamu tā pārāgru uzlādi no termoelektriskā ievācēja. Mērījumi sākti ar elektromagnētisko kustību enerģijas ievācēju, lai termoelektriskais paspētu pilnībā nostabilizēt savu temperatūru, tādējādi novēršot sākotnējo jaudas ieguvumu no krasas izmaiņas uzvilkšanas laikā [28]. Mērījumi veikti līdz izejas spriegums uz kondensatora sasniedz 5 V vai arī nostabilizējas zem tā, novērtējums veikts vizuāli, precīzas vērtības tiks iegūtas datu pēcapstrādē. Eksperiments atkārtots piecas reizes pēc kārtas ar pāris minūšu atpūtu, lai ņemtu vērā statistisko izkliedi. Atkārtojumu skaits ir samazināts salīdzinot ar iepriekšējiem mērījumiem, jo šāda veida kustības ir dabiskākas un pierastākas nekā soļošanas imitācija, turklāt arī rada lielāku nogurumu, kas ilgstošos eksperimentos varētu ieviest grūti paredzamas izmaiņas.

### 5.1.2.3. Ieguvuma novērtējums

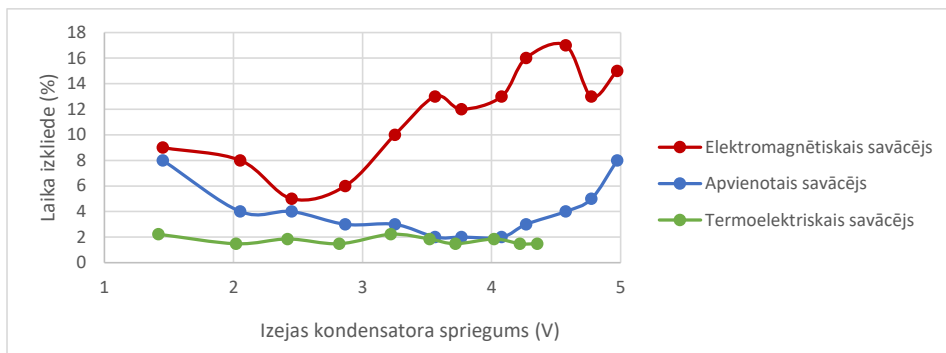
Mērīti abu enerģijas ievācēju izejas parametri (5.9. att.,  $V1$ ,  $A1$ ,  $V2$  un  $A2$ ), kā arī kopējais izejas spriegums ( $V3$ ). No sprieguma un strāvas iegūta momentānā jauda un pārveidotāju ieejas enerģija atbilstoši (3.1), no izejas kondensatora mērījumiem iegūta uzkrātā elektroenerģija (3.2). Izvēloties uzlādi līdz fiksētam izejas sprieguma līmenim, tātad noteiktai uzkrātajai enerģijai, savstarpējai slēgumu salīdzināšanai var lietot uzlādes laiku, jo tas būs proporcionāls vidējai izejas jaudai atbilstoši (4.19). Izejas sprieguma pieaugšanas sākuma un nepieciešamā

beigu momenta noteikšanai lietota jau iepriekš raksturotā metode (nodaļa 5.1.1.1). Laiks dažāda izejas sprieguma sasniegšanai parādīts sekojošajā grafikā (5.11. att.) līdz ar standartnovirzi laika mērījumu rezultātos, atbilstoši izteiksmei (5.1). Var novērot, ka, termoelektriskajam un elektromagnētiskajam pārveidotājam strādājot apvienotajā slēgumā, tie patērē mazāk laika tā paša sprieguma sasniegšanai nekā atsevišķie slēgumi. Šis ir pašsaprotams rezultāts, jo tam pašam uzkrājošajam elementam tiek pievadītas divas enerģijas plūsmas vienlaicīgi. Termoelektriskais ievācējs atsevišķi dotajos apstākļos uzrādīja izejas sprieguma piesātināšanos sākot ar 4.2 V, tamdēļ, visticamāk, pēc šī sprieguma var novērot palēninātu uzlādi arī apvienotajam ievācējam. Vidējā uzlādes jauda līdz tam ir  $97 \mu\text{W}$  apvienotajam slēgumam,  $63 \mu\text{W}$  elektromagnētiskajam un  $34 \mu\text{W}$  termoelektriskajam ievācējam. Efektivitāte apvienoto ievācēju sistēmai novērtēta atbilstoši (3.4), vidēji uzrādot 17 %, bet pīķī sasniedzot 21 %.



5.11. att. Uzkrājošā kondensatora uzlādes sprieguma ( $V$ ) atkarība no laika.

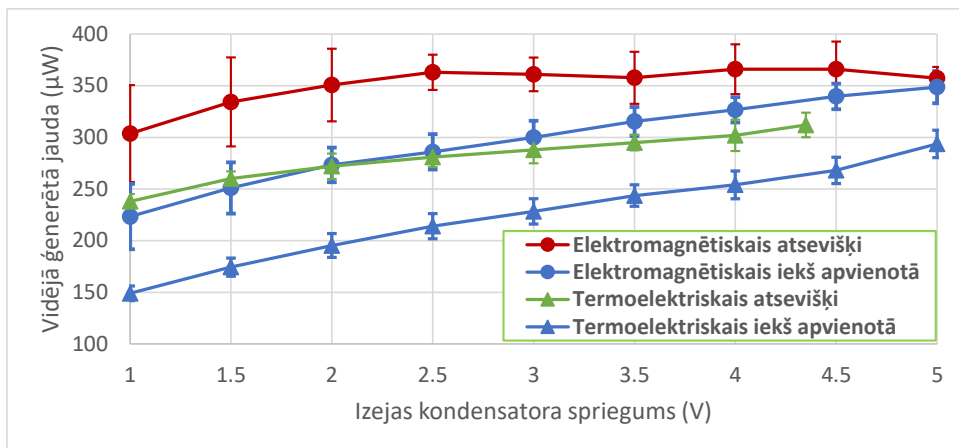
Nomērītais laiks ar elektromagnētisko kustību enerģijas ievācēju atsevišķi būtiski neatšķiras no ievācēju apvienotā varianta līdz pat 2,5 V izejā, ievācēju apvienojumam vidējais laiks ir mazāks, bet faktiski rezultāti ir izkliedes robežās. Pie augstāka izejas sprieguma apvienotais enerģijas ievācējs uzrāda acīmredzami mazākas laika vērtības, tātad augstāku izejas jaudu, bet kustību enerģijas ievācēja laika izkliede sagaidāmi pieaug. Viens no galvenajiem avotu apvienošanas iemesliem bija izejas jaudas stabilitātes paaugstināšana, tamdēļ uzlādes laika mērījumu izkliedi būs uzskatāmāk apskatīt atsevišķi, apvienojot rezultātus pēc izejas sprieguma (5.12. att.). Elektromagnētiskajam ievācējam izkliede ir augstākā visā izejas spriegumu diapazonā, kaut gan iesākumā tā pat samazinās, tad pēc aptuveni 2,5 V sasniegšanas izejā būtiski pieaug. Iespējams, ka tas saistīts ar cilvēka kustību dabu, proti, sākot kustēties, vajadzīgs kāds laiks, lai stāja un koordinācija sasniegtu ērtu un stabilu stāvokli, pielāgojoties skrejceļa noteiktajam ātrumam, bet līdz ar ietilgstošām kustībām parādās arvien vairāk nobīžu no normas, domājams, pieaugoša noguruma vai sākotnējās koncentrācijas samazināšanās dēļ. Izkliedes izmaiņas nav vienmērīgas, novērotās atsevišķās svārstības, domājams, var rasties salīdzinoši zemā mērījumu skaita dēļ.



5.12. att. Fiksētas izejas enerģijas uzlādes laika mērījumu izkliede atkarībā no uzkrājošā kondensatora sprieguma ( $V_3$ ).

Termoelektriskajam enerģijas ievācējam izkliede mērījumos ir viszemākā un svārstās ap vienu vērtību plašā izejas sprieguma diapazonā. Turpretim apvienotais ievācējs sākotnējās izkļedes ziņā tuvāks elektromagnētiskajam ievācējam, bet tālāk līdz pat 4 V izejā šī vērtība krītas, tad sāk strauji pieaugt. Visticamāk, tas parāda, ka soļošanas sākuma periodā lielāks ieguldījums uzkrātajā enerģijas daudzumā ir no kustību enerģijas ievācēja, jo uz termoelektriskā enerģijas ievācēja vēl nav izveidojusies pietiekama temperatūru starpība. Dotais termoelektriskais ievācējs konkrētajos apstākļos nebija spējīgs uzlādēt kondensatoru virs 4.3 V, tamdēļ pie augstāka izejas sprieguma apvienotajā slēgumā tā ieguldījums izejas jaudā (5.11. att.) un stabilitātē (5.12. att.) ir minimāls. Lielākoties apvienotais ievācējs uzrāda vērā ņemami stabilāku uzlādes laiku nekā elektromagnētiskais enerģijas ievācējs atsevišķi, padarot sistēmu uzticamāku.

Analizējot iepriekšējos grafikus (5.11. att. un 5.12. att.), secināts, ka soļošanas iesākumā jebšu pie zemāka izejošā kondensatora sprieguma kustību enerģijas ievācējs dominē. Apvienotajam ievācējam 2.5 V izejā sasniegšanas laiks teju neatšķiras no elektromagnētiskā enerģijas ievācēja uzrādītā laika (5.11. att.), bet mērījumu izkliede uzrāda līdzīgu krītošu tendenci (5.12. att.). Var izteikt minējumu, ka kustību sākumā vai arī pie zema nepieciešamā izejas sprieguma doto enerģijas ievācēju apvienošana nav lietderīga, jo funkcionē galvenokārt viens, līdzīgi kā tika secināts no datiem vairākos publicētajos hibrīdajos risinājumos (nodaļa 1.2.2). Minējuma pārbaudei jānovērtē katra atsevišķā enerģijas ievācēja ieguldījums. Grafikā 5.13. att. attēlota vidējā jauda, ko sniedza katrs enerģijas ievācējs gan darbojoties individuāli, gan apvienotā sistēmā, atbilstoši ieejas sprieguma un strāvas mērījumiem (5.9. att.,  $V_1$ ,  $A_1$ ,  $V_2$  un  $A_2$ ). Abiem ievācējiem vidējā ģenerētā jauda eksperimenta gaitā pieaug, tas ir vidējās vērtības aprēķina dēļ, kas ietver arī sākotnēji zemāko jaudu.



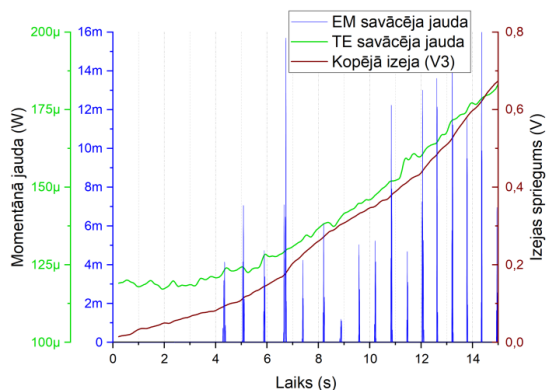
5.13. att. Vidējā jauda no enerģijas ievācējiem atkarībā no uzkrājošā kondensatora sprieguma ( $V_3$ ).

Iepriekšējais grafiks (5.13. att.) parāda, ka abi ievācēji, darbojoties atsevišķi, tiek mazāk noslogoti, nekā darbojoties kopējā slēgumā. Tas liek domāt, ka apvienotajā slēgumā tiem ir ģenerācijas rezerve, kas tiks izmantota augstākas izejas slodzes gadījumā. Toties, kamēr slodze ir neliela, dotā rezerve kalpo abu jaudas plūsmu balansēšanai, par ko norāda ne vien kopējās vidējās izejas jaudas (uzlādes laika, 5.11. att.), bet arī ieejas jaudas izkliedes samazināšanās elektromagnētiskajam enerģijas ievācējam, salīdzinot apvienoto un atsevišķo slēgumu (5.13. att.). Lai gan termoelektriskā ievācēja ģenerētā jauda apvienotajā slēgumā nekrītas pēc sava individuāli augstākā izejas sprieguma pārsniegšanas, kopējā izejas jauda, vadoties pēc uzlādes laika grafika (5.11. att.), uzrādīja strauju kritumu pēc aptuveni 4,3 V, tātad šajos apstākļos zemsprieguma pārveidotāja efektivitāte būtiski krītas, un sprieguma paaugstināšana būtībā notiek uz elektromagnētiskā ievācēja rēķina. Atbilstoši nodaļā 3.5 izvirzītajiem priekšnosacījumiem, abi izvēlētie pārveidotāji atsevišķi šajos pašos apstākļos neuzrāda pārveidošanas efektivitātes kritumu būtiski pirms augstākā sprieguma sasniegšanas, toties apvienotajam avotam šāds efekts piemīt.

Minējums par doto enerģijas ievācēju apvienošanas nelietderīgumu mazam izejas spriegumam nav apstiprinājies — lai gan eksperimenta sākumā termoelektriskais ievācējs ģenerēja mazāku vidējo jaudu nekā elektromagnētiskais, tas joprojām veido ap 40 % no kopējās ieejas jaudas. Neatbildēts paliek jautājums, kamdēļ zema sprieguma sasniegšanai apvienotais ievācējs ir tikai nedaudz, kļūdas robežās, ātrāks par elektromagnētisko vienu pašu (5.11. att.). Notiekošā novērtēšanai jāaplūko mērījumu piegājieni atsevišķi, tipisks piemērs ar abu ievācēju ieejas jaudu parādīts 5.14. att.. Var ievērot, ka izejas spriegums sāk pieaugt vēl pirms parādās elektromagnētiskā ievācēja impulsi, tātad pirms roku kustībām. Pāris sekunžu laikā ar elektroenerģiju no termoelektriskā ievācēja miera stāvoklī pietiek vismaz 0,1 V iegūšanai uz izejas kondensatora, bet līdz ar kustību sākšanos sāk pieaugt arī termoelektriskā ievācēja jauda. Izriet, ka apvienotajā slēgumā tā paša izejas sprieguma iegūšanai soļošana notiek īsāku laiku. No šī var secināt, ka pirmīt novērotā uzlādes laika sakritība zemiem spriegumiem (5.11. att.)

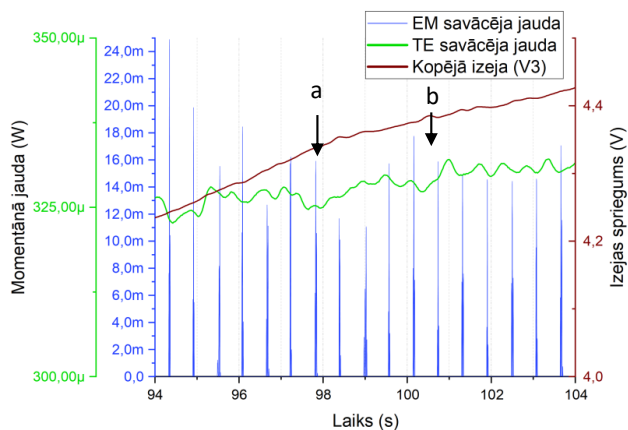


nenozīmē kustību ilguma sakritību, bet gan termoelektriskā ievācēja spēju darboties atsevišķi un izkompensēt iztrūkstošos kustības posmus.



5.14. att. Elektromagnētiskā (EM) un termoelektriskā (TE) ievācēja momentānā jauda apvienotajā slēgumā, kā arī izejas spriegums kustību sākumā.

Redzams, ka arī miera stāvokļa laikā ģenerētā jauda spējīga uzlādēt izejas kondensatoru, tātad izejas kondensatora īsslēgšana līdz eksperimenta sākumam bijusi pamatota. 5.14. att. arī parāda, kā divas jaudas plūsmas sadarbojas. Pēc pirmā lielā kustību enerģijas ievācēja jaudas pīķa seko būtiski mazāki (7–11 s), izskatās, ka šajā laika diapazonā termoelektriskā ievācēja momentānajai jaudai ir mazāk svārstību, bet pēc tam tās atgriežas līdz ar augstiem elektromagnētiskā ievācēja impulsiem. Iespējams, novērotās termoelektriskā ievācēja jaudas svārstības atkarīgas no elektromagnētiskā ievācēja jaudas pīķiem, minējuma apstiprinājumam jāaplūko abu jaudu stāvoklis pēc ilgākas darbības, kad momentānā jauda mazāk svārstās (5.15. att.). Var novērot līdzīgu ainu — termoelektriskā ievācēja jaudai samazinās svārstības un tā sāk pieaugt pēc elektromagnētiskā ievācēja jaudas pīķu samazināšanās (5.15. att., *a–b*). Turpretim, kustībām nostabilizējoties, arī termoelektriskā ievācēja jauda stabilizējas, svārstoties ap vienu vērtību (5.15. att., pēc *b*). Grafikā labi redzams, kā abu momentāno jaudu svārstības savstarpēji mijiedarbojas — pavājinoties kustību enerģijas ievācēja jaudai, tā palielinās termoelektriskajam ievācējam. Protams, šī atgriezeniskā saite rodas pateicoties kopējam izejas spriegumam ( $V_3$ ), var ievērot, ka līdz ar kustību enerģijas pīķu samazināšanos (5.15. att., *a*) tam samazinās pieauguma ātrums, tamdēļ otrs sprieguma pārveidotājs var vairāk noslogot termoelektrisko ievācēju. Šādā veidā notiek mainīgās kustību dabas radīto elektroenerģijas plūsmas izmaiņu stabilizācija.



5.15. att. Elektromagnētiskā (EM) un termoelektriskā (TE) ievācēja momentānā jauda apvienotajā slēgumā, a — EM ievācēja jaudas pīķu samazināšanās izraisīta TE jaudas pieaugšana, b — abu jaudu stabilizācija.

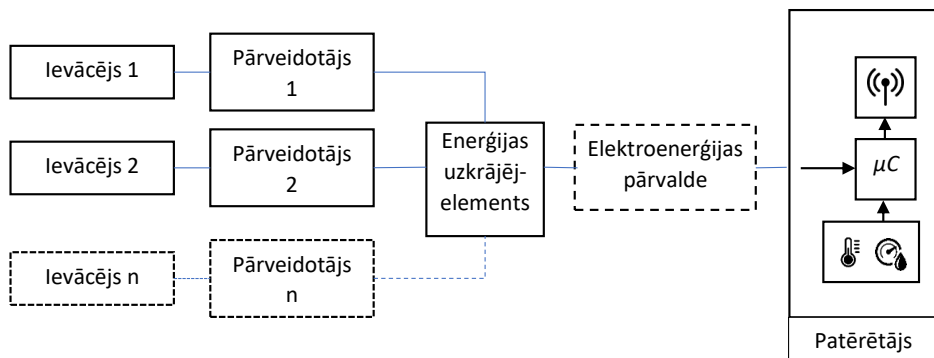
## 5.2. Zema patēriņa datu mērīšanas un nosūtīšanas sistēma

Iepriekšējās apakšnodaļās tika pārbaudīta reizinātāja slēguma ar optimizētu kapacitāti izmantošana reālistiski mainīgos ģenerācijas apstākļos, apstiprinot tā uzlaboto sniegumu, kā arī apvienoti atšķirīgi enerģijas ievācēji stabilākas un augstākas izejas jaudas nodrošināšanai, iegūstot kompleksu mazjaudas barošanas avotu. Lai gan iegūtā enerģija un spriegums teorētiski atbilst mikrokontrolleru darbībai (nodaļa 1.4), patērētājam būs jāsaskaras ar mazu un nepastāvīgu avota jaudu, tātad izdevīgāk ir uzkrāt elektroenerģiju un izmantot to pakāpeniski. Lai praktiski pārbaudītu no enerģijas ievācējiem veidotu barošanas avotu un novērtētu patērētāju iespējas šādos darba apstākļos, no plašpatēriņa komponentēm izveidotam mazjaudas patērētājam tiks izstrādāts atbilstošs adaptīvs algoritms, kas ļautu tam dotajos ģenerācijas apstākļos veikt datu ievākšanai piemērotu funkcionalitāti — vides parametru uzraudzību. Šajā sadaļā tiks raksturots patērētājs, novērtēts tā atsevišķu funkciju patēriņš un dotie dati pielietoti adaptīvā algoritma izveidei.

### 5.2.1. Slēguma un komponentu izvēle

Autonomai parametru mērīšanas sistēmai nepieciešams loģisko darbību kontroles bloks, sensori un iegūto datu tālākas nodošanas daļa. Tā kā enerģijas ievācēju gadījumā pieejamās elektroenerģijas apjoms ir laikā mainīgs, sistēmas loģisko bloku darbināšanu labāk piesaistīt jau uzkrātajai enerģijai, šo elektroenerģijas pārvaldes uzdevumu var uzticēt atsevišķām komponentēm, kā piedāvājuši dažādi autori (nodaļa 1.4), bet līdz ar loģiskās kontroles funkcijām šos pamatzdevumus var veikt mikrokontrolleris, ja to ļauj ģenerējamā jauda. Doto pieeju ir vērts pārbaudīt, jo tas ļauj samazināt komponentu skaitu un teorētiski paver plašākas konfigurācijas iespējas, jo darba spriegumu neierobežo fiksēti līmeņi, piemēram, kā tas būtu ar

apskatītajiem pārveidotājiem nodaļā 3.1. Lai gan mūsdienu mikrokontrolleri sevī var iekļaut arī sensorus, mērīšanas elementiem jābūt atsevišķiem, lai tos nepieciešamības gadījumā var izvietot tālāk no citiem shēmas elementiem, aizvietot vai papildināt. Tālkāi datu nodošanai ērti lietot bezvadu nosūtīšanu, jo šajā gadījumā informācija var tikt nogādāta attālinātai datu apstrādei bez lietotāja iejaukšanās. Raksturotās sistēmas blokshēma ir parādīta sekojošajā attēlā līdz ar pirmīt pārbaudīto vairāku ievācēju saslēgšanas variantu (5.16. att.). Tā dod plašas iespējas pielāgot sistēmu dažādiem enerģijas avotiem un veicamajiem uzdevumiem, kas ir izdevīgi pārbaudes nolūkam, turklāt atsevišķo elementu struktūra ļauj tos piemeklēt pēc nepieciešamības un iespējām.



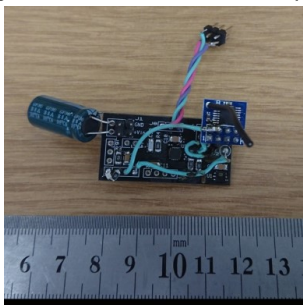
5.16. att. Autonomas dažādu parametru mērīšanas sistēmas principiālā blokshēma: vairāku enerģijas ievācēju apvienošana notiek pēc elektroenerģijas pārveidošanas (sprieguma līmeņu salāgošanas), tiek lietots kopējs uzkrāšanas elements, elektroenerģijas pārvaldi var veikt vai nu atsevišķs bloks, vai arī mikrokontrolleris patērētājā ( $\mu C$ ). Ar rausītu līniju izzīmēti tie bloki, kas pētījuma ietvaros netika realizēti.

Izvēlētajā slēgumā patērētājs sastāv no trim galvenajām daļām: mikrokontrolleris, sensori un datu nosūtīšanas modulis (5.16. att.). Centrālā daļa — mikrokontrolleris — nodrošina sistēmas dažādo sastāvdaļu vadību atkarībā no veicamā uzdevuma un pieejamās enerģijas, tamdēļ tam ir svarīga gan tehniskā iespēja sazināties ar citiem moduļiem, gan izmērīt pieejamo elektroenerģiju. Tā kā barošanu faktiski nodrošina fiksētas kapacitātes kondensators, tā sprieguma vērtība ļaus novērtēt momentāni pieejamo enerģiju. Izvēlēts *ATTiny1616* mikrokontrolleris [126], tam ir pietiekami plašs darba sprieguma diapazons (1,8–5,5 V), nepieciešamās perifērijas komunikācijai ar citiem moduļiem (*SPI*, *I2C*) un analogciparu pārveidotājs barošanas sprieguma mērījumiem (*ACP*), kas spēj darboties neatkarīgi no galvenā loģisko operāciju kodola un tādējādi samazināt elektroenerģijas patēriņu. Sensoru daļā ērtāk izmantot ciparu mērīšanas risinājumus, jo tie pārsvarā ir ražotāja kalibrēti un konfigurējami dažādām darba prasībām, piemēram, mērīšanas ātrumam un izšķirtspējai, tādējādi atvieglojot izstrādes procesu un ļaujot pielāgoties atšķirīgiem apstākļiem. Parametru mērīšanai izvēlēta *HTU-21D* mikroshēma [127], tā mēri temperatūru un relatīvo mitrumu. Komunikācija ar mērīšanas mikroshēmu notiek ar *I2C* protokolu, tās darba spriegums 1,5 līdz 3,6 V. Bezvadu saziņai izvēlēta *LT8920* mikroshēma [128], tās barošanai nepieciešami 1,9 līdz 3,6 V, saziņai ar to var lietot *I2C* un *SPI*. *LT8920* satur visus bezvadu nosūtīšanas un uztveršanas

nepieciešamos blokus, lai ar minimālu ārējo komponentu daudzumu varētu nodrošināt saziņu 2,4 GHz diapazonā, tādējādi taupot izstrādes laiku un atvieglojot sistēmas pārbaudi. Doto komponentu izvēle galvenokārt balstīta uz to pieejamību un iespēju vienkāršāk integrēt sistēmā, konfigurēt un pielāgot eksperimentu vajadzībām. Lai gan tās nav maza patēriņa līderes, visām šīm komponentēm ir zema patēriņa miega režīms, minimālais barošanas spriegums zem 2 V, lai varētu izmantot pēc iespējas plašāku daļu no ģenerējamā diapazona, un vajadzības gadījumā elektroenerģijas patēriņu var kontrolēt ar dažādām parametru konfigurācijām, kas eksperimentālajam novērtējumam ir nozīmīgāk nekā tikai zems patēriņš.

Konkrētā modeļa mikrokontrollera izvēle tika papildus balstīta uz tā portu maksimālo strāvas vērtību, lai iespēju robežās iztīktu bez papildu slēdžu elementiem. Ieejas un izejas porta summārā pieļaujamā strāva ir līdz 100 mA, nepārsniedzot maksimālos 40 mA uz viena izvada un 200 mA no barošanas kopumā. Tās ir samērā augstas vērtības, jo, balstoties uz datu lapām, lielākā patērējamā strāva no ārējiem blokiem ir 24 mA raidītājam nosūtīšanas laikā. Bezvadu saziņa pēc ražotāju datiem ir visvairāk elektriskās jaudas patērējošais process, tamdēļ ierobežotas enerģijas sistēmā tai jācenšas patērēt pēc iespējas mazāk laika, izvēloties kompromisu starp nosūtīšanas ātrumu, jaudu un biežumu. Kontrolējot šos faktorus, domājams, barošanu var atļauties nodrošināt tieši caur mikrokontrollera izejām, neuztraucoties par tā pārlietu silšanu.

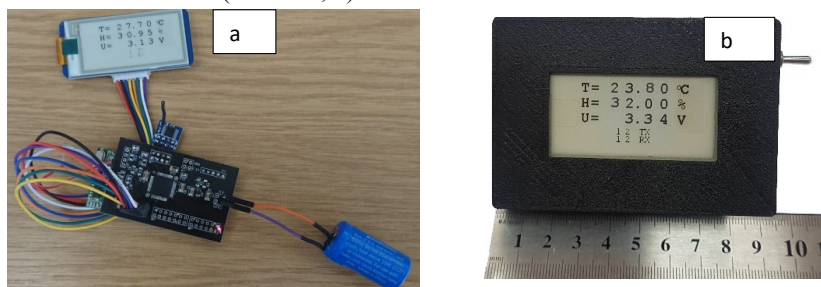
Darba moduļu izmēru samazināšana eksperimentālajam prototipam parasti nav nozīmīga, dažreiz arī apgrūtina radušos kļūdu atrašanu un novēršanu, tamdēļ tas nebija pašmērķis. Pateicoties doto komponentu virsmas montāžas korpusu izvēlei, visas patērētāja bloka detaļas var izvietot uz salīdzinoši mazas iespiedplates (5.17. att.). Ar doto izmēru joprojām saglabājas iespēja nepieciešamības gadījumā veikt nebūtiskas izmaiņas prototipa shēmā.



5.17. att. Temperatūras un relatīvā mitruma mērīšanas un bezvadu nosūtīšanas sistēmas prototips ar mikrokontrolleri.

Tā kā paredzēts izmantot bezvadu datu nosūtīšanu, izveidota neatkarīga uztveršanas iekārta (5.18. att.). Tās galvenais uzdevums ir reģistrēt un atainot uztvertos datus, lai varētu attālināti novērtēt autonomās sistēmas darbu. Neskatoties uz sākotnēji vienkāršo uzdevumu, prototips veidots ar iespējām dažādi papildināt un mainīt funkcionalitāti nākotnē, tamdēļ tā galvenā sastāvdaļa — mikrokontrolleris — izvēlēts ar pietiekami plašu perifēriju klāstu, lai varētu nodrošināt daudzējādas tālākās datu attēlošanas, uzkrāšanas vai nodošanas iespējas, kā arī mikrokontrolleri nepieciešamības gadījumā būtu iespējams pielāgot zema patēriņa funkcionēšanai. Šim nolūkam izvēlēts PIC24FJ128 mikrokontrolleris [129], kuram

ievadizvades portu skaits ir pietiekami liels, lai pēc nepieciešamo funkciju nodrošināšanas paliktu neizmantoti porti papildu iespēju nodrošināšanai, piemēram, tālākai informācijas nodošanai. Enerģijas taupīšanai ienākušie dati tiek atainoti uz *e-ink* grafiskā displeja, pateicoties tam nav nepieciešams patērēt enerģiju attēla uzturēšanai, bet tikai displeja kontrolera sākotnējai inicializēšanai un attēla nomaiņai, kas līdz ar retu nosūtīšanu ir taupīgākais risinājums. Dati tiek uztverti ar *LT8920* mikroshēmas palīdzību gluži kā nosūtīšanas blokā, barošanu nodrošina viena uzlādējama litija jonu akumulatora šūna. Atainotie dati ietver temperatūras, relatīvā mitruma un barošanas sprieguma vērtības, kā arī saņemto ziņu skaitītāju. Raidītājs arī veic sūtījumu uzskaiti, tamdēļ, salīdzinot saņemto un nosūtīto ziņu skaitu, var novērtēt sakaru kvalitāti (5.18. att., b).



5.18. att. Konfigurējams prototips uztveršanas iekārtai ar *e-ink* grafisko displeju: galvenā plate ar bateriju un displeju (a), viss ievietots korpusā ar slēdzi (b).

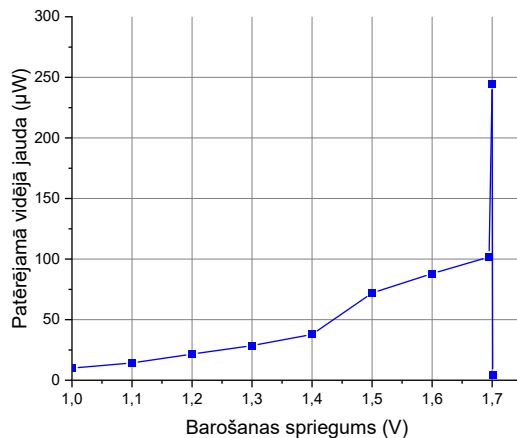
### 5.2.2. Atsevišķu funkciju patēriņa novērtējums

Darbības algoritma izveidē jāņem vērā, ka barošanas avots var būt nepastāvīgs un sniegt ierobežotu jaudu, tamdēļ pirms uzdevumu veikšanas jāuzrauga momentāni pieejamā enerģija. Lai novērtētu, vai izvēlētās komponentes ir spējīgas funkcionēt ar pieejamo elektroenerģiju, un izveidotu algoritmu, kas ņemtu vērā konkrētās prasības, jāveic praktisks patēriņa novērtējums.

Patēriņa mērīšanas nolūkam izveidots vienkāršs algoritms, kas spēj veikt visas sistēmas pamatfunkcijas atsevišķi. Pirmais, kam jānokonfigurē savi iekšējie bloki, ir pats mikrokontroleris. Inicializācijas laikā tam tiek uzdots takts ātrums, izslēgti neizmantotie un nokonfigurēti nepieciešamie perifērijas moduļi, bet neizmantotie izvadi iestatīti par augstas pretestības ieejām, lai samazinātu strāvas noplūdes. Turpmāk mikrokontroleris tiek pārslēgts miega režīmā, kurā darbojas arī zema jaudas patēriņa taimeris, kas pamodina mikrokontrolleri ar noteiktu frekvenci, lai iedarbinātu tā ACP barošanas sprieguma mērījumus. Barošana ārējiem blokiem sākotnēji ir atslēgta.

Iesākumā jānovērtē, vai ar pieejamo elektroenerģiju mikrokontroleris būs spējīgs ieslēgties. Šim nolūkam patērētāja shēma pieslēgta pie regulējama sprieguma avota, un uzņemtas ieejas sprieguma un strāvas oscilogrammas jaudas aprēķinam. Spriegums pakāpeniski pieaudzēts līdz shēmas inicializācijai, vidējā jauda parādīta sekojošajā grafikā (5.19. att.). Var novērot, ka jaudas patēriņš sāk strauji pieaugt pēc 1,4 V, bet pēc inicializācijas tas nokrīt līdz nepilnu 4  $\mu$ W vērtībai. Būtiskais patēriņš pirms mikrokontrolera konfigurācijas ir raksturīgs efekts loģiskajām shēmām zem startēšanās sprieguma līmeņa, kā bija minēts

(nodaļa 1.4), šādos gadījumos izdevīgi izmantot ārēju zema patēriņa sprieguma uzraudzības shēmu, kas pieslēgts mikrokontrollerim barošanu ārpus šī nenoteiktības apgabala. Tomēr vērts pārbaudīt, vai ar enerģijas ievācēju sistēmu var pārvarēt doto jaudas sliekšni.



5.19. att. Vidējais jaudas patēriņš shēmai līdz mikrokontrollera inicializācijai (pīķis pie 1,7 V) un pēc tās.

Balstoties uz iepriekš iegūto informāciju par ievācēju darbību, dotais elektromagnētiskais kustību enerģijas ievācējs atsevišķi pie stabila stāvokļa ģenerēja ap 360 μW (5.13. att.). Pieņemot, ka tiks sasniegta augstākā uzrādītā efektivitāte 21 %, tas varētu nodrošināt 76 μW izejā, kas ir tuvu tam, ko prasa patērētājs pie 1,5 V sprieguma. Var secināt, ka normālos darba apstākļos viens ievācējs atsevišķi nespēs pārvarēt pirms startēšanās patēriņa vērtības un inicializēt shēmu. Toties abu ievācēju kopējā ģenerētā jauda pie 2 V izejas sprieguma varētu būt robežās no 470 līdz 620 μW, pieņemot, ka apvienotajā slēgumā tie var sasniegt individuālo sniegumu. Ar tādu pašu efektivitāti izejas jauda būs līdz 130 μW, kas teorētiski ļaus patērētājam sasniegt teju 1,7 V, bet tālāk sekojošajai inicializācijai ar to nepietiks.

Jāatzīmē, ka mikrokontrolleris stabili startējas pie 1,7 V, kas ir zemāk nekā ražotāja norādītie 1,8 V [126]. Tas ir pamatojami, jo ražotājs norāda spriegumu, pie kura visi mikrokontrollera elementi strādā noteikto pielaižu diapazonā, piemēram, konkrēta taimeru frekvence un balstsprieguma vērtība. Līdzīgi ir ar barošanas sprieguma samazinājumu pēc inicializācijas — mikrokontrolleris neatslēdzas, bet saglabā brīvpiekļuves atmiņu un turpina veikt savus uzdevumus (regulāri ACP mērījumi) pie sprieguma pat zem 1,5 V. Nenoliedzami, darbs tik tālu no ražotāja norādītajām sprieguma vērtībām nav uzticams un līmeņi var atšķirties pat starp dažādiem tā paša modeļa elementiem, toties tas dod iespēju pārvarēt inicializācijai nepieciešamo jaudas pīķi ar kondensatorā uzkrāto enerģiju, jo neliels un īslaicīgs sprieguma kritums neizdzēsīs sākotnējo konfigurāciju. Tā kā vienīgais mikrokontrollera uzdevums pie tik zema sprieguma būtu uzraudzīt barošanas spriegumu, iespējamās nelielās nobīdes laikā takts frekvences izmaiņu dēļ nav būtiskas, bet kļūdainas sprieguma mērījumu vērtības gan var radīt problēmas. Tamdēļ pēc sākotnējās inicializācijas vērts ieturēt nelielu pauzi līdz pirmajam ACP mērījumam, tādējādi ļaujot darba spriegumam stabilizēties.

Lai novērtētu, kāds patēriņš ir galvenajām operācijām normālas darbības laikā, algoritms tika papildināts ar barošanas pieslēgšanu raidītājam un tā inicializāciju, pēc tam pārslēgšanu miega režīmā, ar pāris sekunžu pauzi tiek veikti sensori mērījumu un datu nosūtīšana. Izvēlētajai sensoru mikroshēmai atšķirībā no raidītāja nav nepieciešama inicializācija vajadzīgo funkciju izpildei, jo tās ir aktīvas pēc noklusējuma, tamdēļ pēc barošanas nostabilizēšanās tā var veikt temperatūras un relatīvā mitruma mērījumus, pēc kā to var atslēgt no barošanas pilnībā. Šāda ārējo bloku atslēgšana dod iespēju ietaupīt patēriņu dīkstāves laikā, rēķinoties ar augstāku patēriņu ieslēgšanas momentos. Patēriņš visām funkcijām, atskaitot mikrokontrolera inicializāciju, noteikts pie 3,4 V barošanas sprieguma, rezultāti apkopoti tabulā 5.2. Spriegums mērījumiem izvēlēts ar domu, ka tam ir jābūt tuvu maksimālajam, tādējādi sniedzot patēriņa vērtības virs vidējām, kas radīs drošības pielaižu turpmākiem aprēķiniem. Patēriņa aprēķins iekļauj visu laiku, kas mikrokontrollerim nepieciešams doto operāciju nodrošināšanai.

5.2. tabula

Patērētāja operācijām nepieciešamā elektroenerģija, izpildes ilgums, jauda un pīķa strāva. Mērījumi veikti pie 3,4 V, ja iekavās nav norādīts cits spriegums.

Operācija	Enerģijas patēriņš ( $\mu\text{J}$ )	Ilgums (ms)	Vidējā jauda (mW)	Strāvas maksimālā vērtība (mA)
Mikrokontrolera inicializācija (pie 1.7 V)	266	1070	0,25	1,1
Sprieguma mērījums	2,2	0,40	5,5	2,2
Raidītāja inicializācija	1120	240	4,7	26
Datu nosūtīšana	142	20,2	7,0	22
Sensoru mērījumi	470	72,1	6,5	26
Mērījumi un datu nosūtīšana kopā	611	96,2	6,4	26
Sistēma miega režīmā	-	-	0,014	0,0041

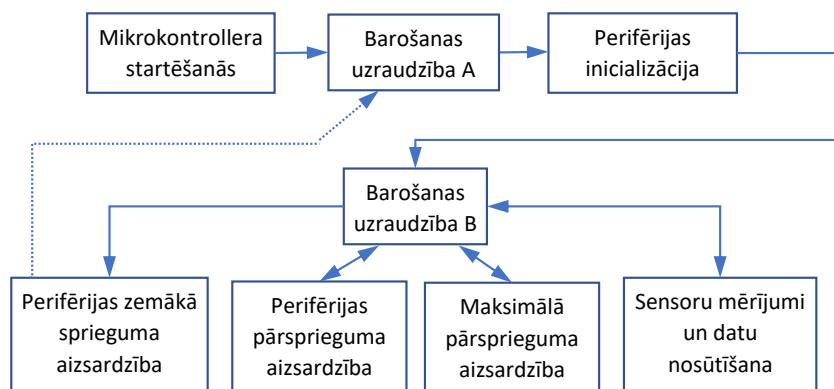
Strāvas maksimālā vērtība tiek apskatīta ar mērķi novērtēt, vai netiek pārslogotas mikrokontrolera izejas. Kā redzams, visas vērtības ir zem maksimālajiem 40 mA. Maksimumi pārsvarā ir pīķu veidā, tas saistīts ar bloku patēriņu pamošanās vai kapacitāšu uzlādi startēšanās laikā. Apvienojot sensoru mērījumu un datu nosūtīšanas operācijas, starp tām tiek ieturēta pauze, lai abām ārējām mikroshēmām barošana nebūtu jānodrošina vienlaicīgi, tādējādi samazinot slodzi uz mikrokontrolera izejām un sekojoši vidējo patēriņu.

### 5.2.3. Darbības algoritms ierobežotai elektroenerģijai

Mazas ģenerētās jaudas gadījumā patērētājam galvenokārt jāpaļaujas uz iekrāto enerģiju, tālab jācenšas izmantot pēc iespējas plašāks pārveidotāju izejas sprieguma diapazons. Funkciju patēriņa mērījumi parādīja, ka visaugstāko elektroenerģiju patērē dotā raidītāja inicializācija, tā ir teju divtik augstāka nekā viens sensoru mērījumu un datu nosūtīšanas cikls. Tālab izdevīgāk iztikt bez atkārtotas inicializācijas, lai atkārtoti iekrātā elektroenerģija ātrāk tiktu izmantota mērījumu nodrošināšanai. Barošanas sprieguma mērījumi uzrādīja vismazāko enerģijas

patēriņu, kā arī sistēmai miega režīmā ir vismazākā vidējā patērētā jauda. Šis dod iespēju nelietot papildu spriegumu regulējošās komponentes, izvēloties šo uzdevumu veikt mikrokontrollerim, tamdēļ tam ir jāuzrauga barošanas spriegums divās stadijās: pirmkārt, nosakot, kad var ieslēgt ārējos blokus, otrkārt, kad ir droši veikt regulārās funkcijas, bet kad nepieciešams atslēgt ārējos blokus.

Algoritms sākas tā pat kā iepriekšējos patēriņa mērījumos — ar mikrokontrollera inicializāciju un sekojošu pāriešanu miega režīmā. Tālāk seko neliela pauze, lai barošanas spriegums paspētu stabilizēties pēc ieslēgšanās krituma, izvēlētas 8 sekundes. Turpmāk notiek regulāra barošanas sprieguma mērīšana ar analogciparu pārveidotāju, lai nolemtu, kad veicamas nākamās darbības. Analogciparu pārveidotāja aktivēšanās biežums barošanas sprieguma uzraudzībai atstāts fiksēts, bet teorētiski to arī varētu mainīt atkarībā no pieejamās elektroenerģijas. Perifērijām (ārējie sensoru un bezvadu sakaru moduļi) barošana sākumā netiek pieslēgta, lai paātrinātu elektroenerģijas uzkrāšanu un sagaidītu drošu startēšanās līmeni. Algoritma struktūra parādīta blokshēmas veidā sekojošajā attēlā (5.20. att.).



5.20. att. Algoritma galveno funkciju blokshēma.

Nākamā darbība, kurai jānotiek tikai ar konkrēta sprieguma līmeņa sasniegšanu, ir bezvadu sakaru mikroshēmas startēšana un inicializācija, šis ir visvairāk enerģijas patērējošais uzdevums (5.2. tab.). Pieņemot sliktāko variantu, kurā enerģijas plūsma no ievācējiem šajā momentā var būt apstājusies, dotajai operācijai jānotiek tikai tad, kad pēc tās paliekošais barošanas spriegums joprojām ir pietiekams visu bloku darbībai, bet atlikusī enerģija ir ar pietiekamu rezervi, lai sistēma varētu uzreiz veikt mērījumus un datu nosūtīšanu. To var raksturot ar sakarību (5.4), algoritma blokshēmā (5.20. att.) tā sasniegšanu reģistrēs “Barošanas uzraudzīšana A”. Pirmīt jānoskaidro zemākais barošanas spriegums, pie kura vēl drīkst veikt mērījumus un datu nosūtīšanu, lai atlikusī enerģija būtu pietiekama sistēmas uzturēšanai zema patēriņa režīmā, gaidot enerģijas plūsmas atjaunošanos bez nepieciešamības veikt atkārtotu inicializāciju. Šis spriegums atbilst uzkrātajai enerģijai  $E_{stop}$ , ko var izteikt ar (5.6).

$$E_{start} = E_{stop} + E_{inic} + (E_{oper} + P_{vid\ gaidīšana} \cdot t_{starp\ oper}) \cdot n, \quad (5.4)$$

$$P_{vid\ gaidīšana} = P_{miegs} + E_{U\ mēr} \cdot f_{biežums}, \quad (5.5)$$



$$E_{stop} = E_{min} + E_{oper} + P_{vid\ gaidīšana} \cdot t_{gaidīšana}, \quad (5.6)$$

kur  $E_{start}$  — uzkrātā elektroenerģija, pie kuras var veikt perifērijas inicializāciju, J;  
 $E_{stop}$  — enerģija, pie kuras jāpārtrauc sensoru mērījumi un datu nosūtīšana, J;  
 $E_{inic}$  — nepieciešamā enerģija perifērijas inicializācijai, J;  
 $E_{oper}$  — nepieciešamā enerģija veicamajām operācijām, J;  
 $P_{vid\ gaidīšana}$  — vidējā jauda gaidīšanas režīmā, W;  
 $t_{starp\ oper}$  — laiks starp operācijām gaidīšanas režīmā, s;  
 $n$  — operāciju skaits;  
 $P_{miegs}$  — jauda miega režīmā, W;  
 $E_{U\ mēr}$  — nepieciešamā enerģija barošanas sprieguma mērījumiem, J;  
 $f_{biežums}$  — barošanas sprieguma mērījumu frekvence, Hz;  
 $E_{min}$  — zemākā enerģija perifērijas funkcionēšanai, J;  
 $t_{gaidīšana}$  — laiks kopš pēdējā sensoru mērījuma un datu nosūtīšanas līdz perifērijas atslēgšanai, s.

Tā kā sensoru un raidītāja zemākais darba spriegums ir 1,9 V, dotajam kondensatoram atbilstošie 1,8 mJ ir atskaites punkts  $E_{min}$ , pie tā jāpieskaita vēlamās operācijas ( $E_{oper}$ ) un gaidīšanas režīmā patērēto enerģiju atbilstoši (5.6). Veicamās operācijas ir mērījumu veikšana un tūlītēja datu nosūtīšana, tātad  $E_{oper}$  atbilst 0,61 mJ (5.2. tab.), atliek vien izraudzīties tam sekojošo gaidīšanas laiku ( $t_{gaidīšana}$ ) un sprieguma mērījumu biežumu ( $f_{biežums}$ ), jo tas nosaka vidējo jaudas patēriņu gaidīšanas režīmā ( $P_{vid\ gaidīšana}$ ). Vadoties pēc iepriekšējiem eksperimentiem, barošanas spriegums nenoslogotā kondensatorā sākotnēji var pieaugt samērā strauji (par aptuveni voltu 25 s (5.11. att.)), mērījums ilgst mazāk par 0,5 ms, tamdēļ to var veikt samērā bieži, izvēlēta reize sekundē. Izraudzītais gaidīšanas laiks pēc pēdējā sūtījuma ir 60 s, rezultātā  $E_{stop} = 3,38$  mJ, kas atbilst 2,6 V — zemākais spriegums, pie kura sistēma veiks mērījumu un datu nosūtīšanas operācijas. Algoritma blokshēmā (5.20. att.) tā sasniegšanu reģistrēs “Barošanas uzraudzīšana B”, lai apturētu “Sensoru mērījumus un datu nosūtīšanu”.

Kad zināma zemākā operāciju enerģija, iespējams noskaidrot enerģiju  $E_{start}$  (5.4), pie kuras var startēt un konfigurēt raidītāju ( $E_{inic}$ ), lai turpmāk sāktos regulāra mērīšana un datu nosūtīšana. Atkal pieņemot sliktāko variantu — enerģijas ievācēji pārstāj funkcionēt līdz ar  $E_{start}$  sasniegšanu —, jāizraugās vēlamo operāciju ciklu skaitu  $n$  un laiku starp tiem. Eksperimenta nolūkam izvēloties 15 s starp sensoru mērījumiem, ar vismaz vienu mērīšanas un nosūtīšanas ciklu pēc inicializācijas iegūst 5,36 mJ, tātad aptuveni 3,3 V. Nenoliedzami, iegūtās vērtības neņem vērā uzkrājošā kondensatora pašizlādi un noplūdes atpakaļ uz elektroenerģijas pārveidotājiem, bet, barošanas spriegumam samazinoties darba laikā, kritīsies arī patērējamā jauda visām operācijām, kas neilgā laika posmā varētu kompensēt ignorētos zudumus.

Nominālā darba sprieguma diapazons visām komponentēm pārklājas joslā 1,9–3,6 V, zemākā absolūti maksimālā sprieguma vērtība ir 3,7 V, bet enerģijas ievācēju sistēma var sniegt augstāku vērtību. Tamdēļ ar regulāriem analogciparu pārveidotāja mērījumiem tiek iegūta barošanas sprieguma vērtība (5.20. att., “Barošanas uzraudzīšana B”) un salīdzināta ar atļauto diapazonu ārējām komponentēm. Varētu likties, ka ar šo uzraudzības funkciju tiktu iegūti, iespējams, pat lielāki zudumi mikrokontrollerī nekā būtu, piemēram, no zema sprieguma

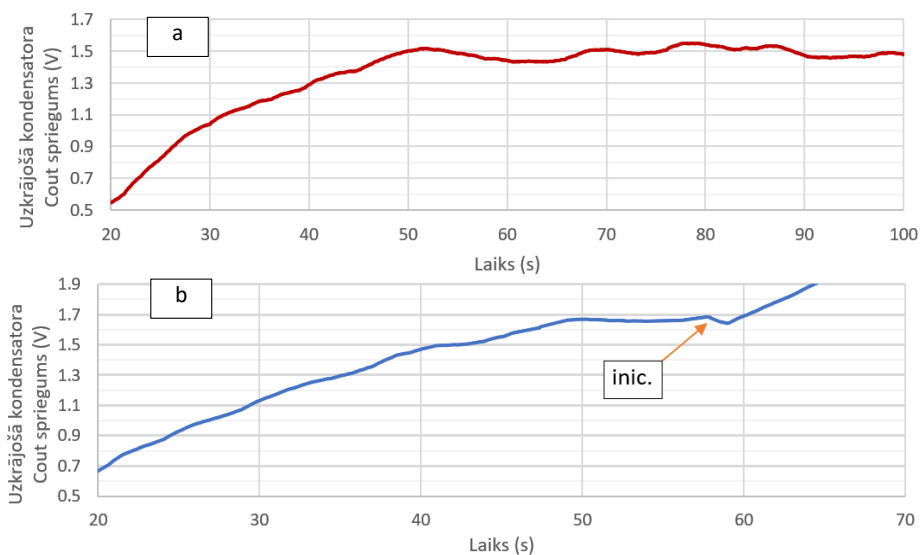
krituma lineārā regulatora, bet šajā gadījumā izvēle ir pamatota ar jau esošo funkciju izmantošanu vairākiem mērķiem — ierobežotas enerģijas izmantošana tā pat ir jāplāno, tāpēc jāveic regulāri mērījumi. Turklāt ar šādas uzraudzīšanas un kontroles eksistenci nepieciešamības gadījumā papildus paveras iespējas mainīt sistēmas uzvedību atbilstoši dažādām eksperimentālām prasībām bez iejaukšanās shēmas uzbūvē. Patērētāja un tā algoritma izstrādē arī jāņem vērā izejas sprieguma vērtību, pēc kuras sāk kristies efektivitāte, kā tas bija novērots gan pirmīt 3. nodaļā, gan arī izveidotajā hibrīdajā ievācējā nodaļā 5.1.2.3 (5.11. att., izejas sprieguma pieaugums palēninās pēc aptuveni 4,3 V). Tā kā dotais spriegums ir būtiski virs mērīšanas un saziņas mikroshēmu maksimālā sprieguma, dotajā gadījumā tas netiks apskatīts.

Tabulā 5.2. redzams, ka no visām regulārajām darbībām mērīšanas un datu nosūtīšanas operācija patērē visvairāk elektroenerģijas. To var izmantot drošības nolūkiem — gadījumos, kad barošanas spriegums sasniedz ražotāja norādīto augstāko darba spriegumu 3,6 V, tiek veiktas dotās operācijas (5.20. att., “Perifērijas pārsprieguma aizsardzība”). Ar 0,61 mJ enerģijas patēriņu var nodrošināt sprieguma samazināšanos līdz teju 3,4 V, pieņemot, ka enerģijas ievācēji dotajā momentā nefunkcionēs. Protams, jāpieņem sliktākais scenārijs — šajā gadījumā tas ir abu ievācēju funkcionēšana —, tamdēļ ieviesta papildu drošības funkcija pie 3,7 V sasniegšanas, kas cikliski izlādēs barošanas kondensatoru caur rezistoru un gaismas diodi, tādējādi eksperimenta gaitā signalizējot par bīstamo situāciju (5.20. att., “Maksimālā pārsprieguma aizsardzība”). Gadījumā, ja tiks sasniegts zemākais ārējo komponentu darba spriegums 1,9 V, barošana tām tiks atslēgta (5.20. att., “Perifērijas zemākā sprieguma aizsardzība”), lai ar mazāku patēriņu mikrokontroleris varētu ilgāk funkcionēt un gaidīt nepieciešamo perifērijas startēšanās sprieguma līmeni (“Barošanas uzraudzīšana A”).

### 5.3. Sistēmas eksperimentālā pārbaude un rezultāti

Dotajā sadaļā tiks veikts izveidotās barošanas avota un patērētāja sistēmas kopējās darbības novērtējums, mērījumi tiks veikti, cilvēkam soļojot uz skrejceļa trenāžiera ar fiksētu 4,5 km/h ātrumu atbilstoši iepriekš raksturotajiem eksperimenta apstākļiem (nodaļa 5.1.2.2), tādējādi nodrošinot reālistiskas un salīdzināmas atskaites vērtības. Cilvēka kustībās tiks ieturētas pauzes, lai pārbaudītu algoritma darbību un pietuvinātu testa apstākļus ikdienā iespējamajiem. Pirms tam tiks novērtēta patērētāja iestartēšanās ar doto ievācēju sistēmu. Patērētājs pieslēgts pie izejas kondensatora (5.9. att.,  $C_{out}$ ) atbilstoši pirmīt sniegtajai blokshēmai (5.16. att.).

Iesākumā jāpārbauda iepriekšējie minējumi par jaudas pietiekamību patērētāja ieslēgšanai. Šim nolūkam veikti mērījumi ar pieslēgtu patērētāju un elektromagnētisko kustību enerģijas ievācēju atsevišķi, tad ar abiem ievācējiem kopā. Mērījumi ar termoelektrisko enerģijas ievācēju atsevišķi netika veikti, jo tas uzrādīja zemākas jaudas vērtības nekā elektromagnētiskais (5.13. att.). Izejas sprieguma mērījumi parādīti sekojošajā attēlā (5.21. att.).



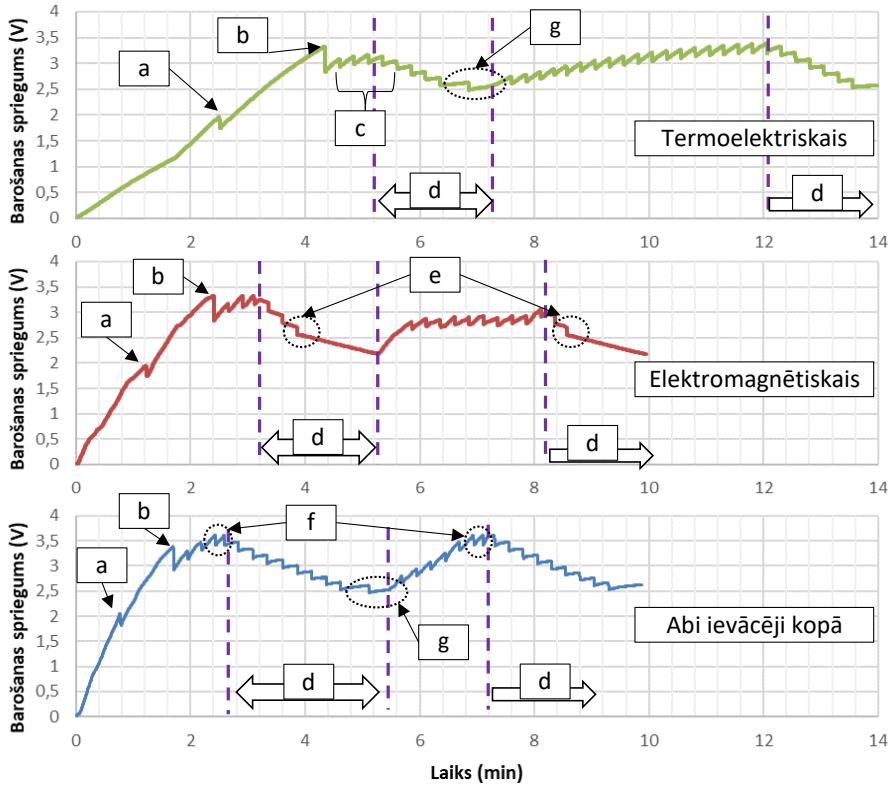
5.21. att. Izejas kondensatora  $C_{out}$  spriegums laikā ar pieslēgtu slodzi (mēršanas un nosūtīšanas sistēma), pieslēgts tikai kustību enerģijas ievācējs (a) un abi ievācēji kopā (b), tajā gadījumā redzams sprieguma kritums no inicializācijas (inic.).

Kā redzams, eksperimentā ar tikai vienu enerģijas ievācēju izejas spriegums piesātinās pie aptuveni 1,5 V, tātad patērētāja uzņemtā enerģija atbilst ģenerētajai, protams, ņemot vērā pārveidošanas zudumus. Šajā posmā vidējā ieejas jauda no kustību enerģijas ievācēja ir 350  $\mu\text{W}$ , kas atbilst pirmīt nomērītajai vērtībai (5.13. att.) un apstiprina minējumu par problēmām pārvarēt doto spriegumu (nodaļa 5.2.2). Savukārt divu ievācēju kopējā slēgumā spriegums ar nelielu izvārstīšanos pieaug līdz aptuveni 1,65 V, kur pēc vairākām sekundēm sasniedz inicializēšanās spriegumu, pēc kā izstrādātais patērētājs iestartējas (5.21. att., inic.), samazinot patēriņu un ļaujot uzkrātajai elektroenerģijai pieaugt straujāk. Vidējā jauda no elektromagnētiskā un termoelektriskā ievācēja šajā posmā attiecīgi ir 330  $\mu\text{W}$  un 240  $\mu\text{W}$ , tātad kopā 570  $\mu\text{W}$ . Pieņemot efektivitāti ap 21 %, rezultējošā izejas jauda atbilst aptuveni 120  $\mu\text{W}$ , sprieguma kritums inicializācijas laikā atbilst vidēji 110  $\mu\text{W}$  no kondensatora, tātad summāri iegūstot tuvas vērtības nepieciešamajai inicializācijas jaudai (5.19. att.). Enerģijas ievācēju vidējā jauda kopējā slēgumā pierāda, ka apvienošana neierobežo to jaudas atdevi, jo augsta patēriņa gadījumā uzrādītā jauda ir tuvu individuālajam sniegunam (5.13. att.). Izvēlēta 8 sekunžu aizture pēc inicializācijas (nodaļa 5.2.3) dotajā ģenerācijas režīmā ir pietiekama, lai doto kustību apstākļos spriegums pieaugtu virs 1,9 V un ACP mērījumi sāktos ražotāja norādītajā darba sprieguma diapazonā.

Abu enerģijas ievācēju apvienotā izejas sprieguma grafikā (5.21. att., b) var novērot, ka parādās kustību enerģijas ievācējam raksturīgās nevienmērības, lai gan mazākā apmērā nekā atsevišķas darbības laikā (5.21. att., a). Tas skaidrojams ar to, ka dotajā slēgumā abi ievācēji tiek noslogoti tuvāk savām ģenerācijas robežām, tamdēļ samazinās to spēja izkompensēt vienam otru, turklāt kustības ilgst īsu laiku, un termoelektriskais ievācējs neizjūt pietiekamu

temperatūru starpību augstākai ģenerācijai. Iegūtie rezultāti tiktāl apstiprina iepriekš iegūtās ģenerētās jaudas un patēriņa vērtības, kā arī praktiski parāda, ka ar doto startēšanās patēriņu tikai viens funkcionējošs ievācējs, visticamāk, nespēs ieslēgt datu mērīšanas un nosūtīšanas sistēmu. Konkrētajā situācijā var noderēt papildu ārēja spriegumu uzraudzības shēma (5.16. att., “Enerģijas pārvalde”), kas pieslēgtu barošanu tikai pie augstāka kondensatora sprieguma, tātad esošas elektroenerģijas rezerves. Realizācijas piemēri apskatīti teorētiski nodaļā 1.4. Šāds risinājums ir noderīgs arī abu ievācēju pilnvērtīgas darbības gadījumā, jo tiktu apiets augstā patēriņa diapazons pirms mikrokontrolera startēšanās, tādējādi jāsamazinās laikam no aktivitātes sākuma līdz sistēmas startēšanai. Faktiski varētu lietot arī *EH300* derīgā barošanas sprieguma funkciju (nodaļa 3.1), bet tā nav konfigurējama un atslēdz barošanu pie 1,9 V, tātad tiek zaudēts laiks, kuru mikrokontroleris vēl varētu gaidīt bez nepieciešamības inicializēties. Tostarp papildu sprieguma uzraudzības shēma nenoņem nepieciešamību veikt sprieguma regulāru uzraudzīšanu.

Lai pilnvērtīgi novērtētu patērētāja funkcionēšanu neatkarīgi no tā, kurš enerģijas ievācējs ir aktīvs, veikti mērījumi ar katru no tiem atsevišķi un kopā, tādā veidā var pārbaudīt arī darbību pie dažādas ģenerētās jaudas. Šim nolūkam augstā patēriņa posms pirms sistēmas startēšanās tika apiets manuāli, pieslēdzot barošanu patērētājam tikai pie 1,9 V sasniegšanas. Veikti tāda paša fiksēta ātruma soļošanas piegājieni uz elektriskā skrejceļa, iesākumā tiek soļots līdz izejas spriegums nostabilizējas pēc raidītāja inicializācijas, tad tiek ieturēta soļošana pauze līdz spriegums nostabilizējas atkal, pēc kā soļošana tiek atsākta. Izņēmums bija ar elektromagnētisko kustību enerģijas ievācēju kā vienīgo avotu, kur soļošana pēc pauzes tika atsākta, lai apturētu izlādi pirms perifērijas izslēgšanās līmenim. Sprieguma atkarība no laika parādīta sekojošajos grafikos (5.22. att.). Regulārie sprieguma kritumi atbilst energoietilpīgu operāciju veikšanai, jo nepietiekamas ģenerācijas dēļ tiek daļēji patērēta uzkrātā elektroenerģija.



5.22. att. Uzkrājošā kondensatora sprieguma atkarība no laika mērījumos ar enerģijas ievācējiem atsevišķi un kopā. Raksturīgākie grafiku punkti: mikrokontrollera inicializācija (a), raidītāja inicializācija (b), sensoru mērījumi un datu nosūtīšana (c, analogiski visos grafikos), posmi bez kustībām (d), pēdējais mērījums pirms krituma zem  $E_{stop}$  līmeņa (e), ārējo bloku pārsprieguma aizsardzība (f), retākas operācijas atbilstoši zemi pieejamajai enerģijai (g).

Grafikos redzami gandrīz visi algoritma blokshēmas posmi (5.20. att.), atskaitot maksimālā pārsprieguma aizsardzību un perifērijas zemākā sprieguma sasniegšanu. Visi trīs mērītie stāvokļi demonstrē izveidotā patērētāja darbību atšķirīgos ģenerēšanas apstākļos: strādājot tikai vienam no enerģijas ievācējiem, vai arī pilnvērtīgi abiem kopā. Pateicoties enerģijas uzraudzīšanas algoritmam, shēma var funkcionēt ar dažādu ģenerēto jaudu, protams, pārvarot startēšanās augsto patēriņu, piemēram, ievācējiem strādājot kopā vai ar ārējas mikroskāmas palīdzību. Datu uztveršanas iekārta atradās 3 m attālumā sakaru kvalitātes novērtēšanai, saņemto un nosūtīto ziņu skaits sakrīt, tātad visa informācija veiksmīgi nogādāta.

Termoelektriskajam ievācējam raksturīgā pakāpeniskā ģenerētās jaudas izmaiņa nodrošina būtiski lēnāku uzkrājošā kondensatora izlādi pēc kustību beigšanās un tādējādi ilgāku patērētāja darbību. Var novērot, kā pauzes laikā (5.22. att., d) ilgums starp pēdējiem sensoru mērīšanas un datu nosūtīšanas posmiem pieaug. Tas notiek no  $E_{stop}$  enerģijai atbilstošā sprieguma sasniegšanas, kā rezultātā operācijas tiek iepauzētas, bet termoelektriskais enerģijas ievācējs turpina ģenerēt un  $E_{stop}$  līmenis tiek pārsniegts — operācijas atsākas. Tāda pati aina novērojama

abu ievācēju apvienotajā slēgumā, bet elektromagnētiskais kustību enerģijas ievācējs individuāli piedzīvo turpmāku barošanas sprieguma kritumu, tamdēļ cikliskās operācijas neatsākas (5.22. att., e). Atbilstoši iepriekšējiem aprēķiniem, sistēmai pēc tā jānodrošina barošana perifērijai vismaz minūti, kas tiek realizēts. Pa 70 s spriegums nokrīt līdz 2,1 V, tātad pastāv būtiska atšķirība starp aprēķiniem izmantoto patēriņu un to pie zemāka sprieguma. Lai gan tas ir ļoti drošībai, patēriņa novērtējums pie plaša sprieguma diapazona sniegtu iespējas samazināt pielaides un veikt vairāk operāciju. Apvienotais enerģijas ievācēju slēgums uzrāda gan mazāk sprieguma svārstību uzlādes laikā, gan turpinātu ģenerāciju pēc kustību apstāšanās, turklāt kopējās darbības jauda tam ļāva sasniegt spriegumu, pie kura sākās perifērijas pārsprieguma aizsardzība (5.22. att., f). Tā redzama grafikā kā biežāki sensoru mērīšanas un nosūtīšanas cikli, var novērot, ka šādā veidā spriegums tiek uzturēts drošā līmenī, turklāt enerģija tiek izlietota praktiskam nolūkam. Pateicoties pārākajai uzkrātajai elektroenerģijai un termoelektriskā ievācēja pakāpeniskajai darbībai, apvienotais slēgums nodrošināja visilgāko patērētāja darbību kustību paužu laikā. Faktiski pēc sākotnējā sprieguma piesātinājuma patērētājs ir spējīgs funkcionēt vēl vismaz tik pat ilgu laiku bez cilvēka kustībām, ierobežojot sprieguma krišanu ar retākām operācijām. Kvantitatīvi novērtēti parametri doti sekojošajā tabulā (5.3. tab.).

5.3. tabula

Kvantitatīvs novērtējums patērētāja darbībai.

	TE enerģijas ievācējs	EM kustību enerģijas ievācējs	Abi ievācēji kopā
Laiks līdz patērētāja inicializācijai	150 s	78 s	50 s
Laiks līdz pirmajam sūtījumam	261 s	147 s	102 s
Relatīvais ilgums bez kustībām, salīdzinot ar sākotnējo kustību ilgumu līdz sprieguma piesātinājumam	38 %	63 %	105 %
Nosūtīto ziņu skaits pēc sākotnējo kustību beigām	6	3	9

Algoritmā bija izvēlēts īslaicīgi pārtraukt mērījumu veikšanu un datu nosūtīšanu, kad sasniegts zemāks spriegums, bet neatslēgt barošanu raidītājam, lai izvairītos no atkārtotas inicializācijas, pretēji tam, kā to dara vairākums teorētiski apskatīto sistēmu nodaļā 1.4. Grafiki (5.22. att.) apstiprina izvēlētas pieejas pamatotību, jo termoelektriskais ievācējs atsevišķi un kopējā slēgumā spēj kādu laiku uzturēt gaidīšanas režīmu, tādējādi, atsākot kustības pēc īslaicīgas pauzes, nepieciešams uzkrāt elektroenerģiju tikai mērījumu ciklam, nevis divtik energoietilpīgai inicializācijai. Savukārt elektromagnētiskā ievācēja gadījumā kondensators gaidīšanas laikā zaudēja enerģiju, kas tuva raidītāja inicializācijai, un pietuvojās perifērijas izslēgšanas sprieguma līmenim. Tomēr, kamēr vien tie nav pārsniegti, regulāro mērījumu atsākšanai nepieciešama mazāka enerģija un tātad arī īsāks laiks.

## 5.4. Kopsavilkums

Šī nodaļa veltīta mazjaudas barošanas avota izveidei no enerģijas ievācējiem un pārbaudei, balstoties iepriekšējās nodaļās gūtajos rezultātos un atziņās. Praktiski novērtētas un apstiprinātas iespējas atbilstoša patērētāja izveidē no ārējiem avotiem pilnīgi neatkarīgas sistēmas radīšanai.

Balstoties iepriekšējos secinājumos, izvēlēts piemērotākais no pārbaudītajiem zemsprieguma pārveidotājiem, lai reālistiskos kustību enerģijas ievācēja ģenerācijas apstākļos salīdzinātu sprieguma divkārtotāja taisngriezi ar un bez kapacitātes optimizācijas ar pirmīt lietoto tilta taisngriezi. Neskatoties uz reālo apstākļu radīto lielo rezultātu izkliedi, vidējās vērtības uzrādīja augstāko taisngrieztā sprieguma vidējo vērtību sprieguma divkārtotāja slēgumam ar optimizēto kapacitāti, kas rezultējās ar augstāko pārveidotāja izejas jaudu.

Lai novērtētu ģenerācijas izkliedes ietekmi, eksperimentālajos piegājienu izdalīti tie, kas sniedza matemātiski stabilākos un vismazāk stabilos enerģijas uzkrāšanas rezultātus. Savstarpēji salīdzinot abas piegājienu kopas, iegūta sakrītoša tendence un ļoti tuvi relatīvie rezultāti. Tie uzrāda augstāku sakrītību ar idealizēto apstākļu eksperimentiem nekā vidējās vērtības, kas norāda uz vienlīdzīgu gludinošā filtra kapacitātes ietekmi gan uz vairāk, gan mazāk pastāvīgiem signāliem. Tas apstiprina, ka novērotajā efektā amplitūdai nav noteicošā ietekme, pierādot kapacitātes optimizācijas izmantošanas pamatotību praktiski mainīgas ģenerācijas gadījumā. Salīdzinot darbību vienādos apstākļos, sprieguma divkārtotājs ar optimizēto kapacitāti uzrāda par aptuveni 30 procent punktiem augstāku taisngrieztā sprieguma vidējo kvadrātisko vērtību nekā pirmīt lietotais tilta slēgums, kas zemsprieguma pārveidotājam rezultējās ar par 45 % augstāku ieejas jaudu un, pateicoties efektivitātes pieaugumam, divtik lielāku izejas jaudu.

Augstākas stabilitātes iegūšanai kustību enerģijas ievācējs apvienots ar līdzvērtīgos darba apstākļos salīdzināmas vidējās jaudas termoelektrisko enerģijas ievācēju vienā sistēmā, kur abi caur saviem zemsprieguma pārveidotājiem uzlādē kopēju elektroenerģijas uzkrāšanas kondensatoru. Soļošanas eksperimentos pierādīts, ka tādā veidā kopējā ģenerācija ir ne vien ar augstāku enerģijas plūsmu, bet arī ar mazāku vidējo rezultātu izkliedi nekā no kustību enerģijas ievācēja atsevišķi — attiecīgi 3 % un 16 %. Parādīta abu ievācēju momentānās jaudas balansējošā mijiedarbība, kas notiek, pateicoties to paralēlajai slogošanai caur kopējo uzkrāšanas elementu. Tam ir nepieciešami avoti ar salīdzināmu jaudu, kuru darbības pārtraukumi nepārkļājas, un attiecīgi sprieguma pārveidotāji izejas spriegumu salāgošanai. Toties jāņem vērā, ka atsevišķu avotu augstākais izejas spriegums var atšķirties, tālab to ieguldījums var nebūt aktuāls visā diapazonā, potenciāli ietekmējot patērētāja darbību. Kopumā var secināt, ka, lai gan piedāvātā apvienošanas metode izmanto vairāk komponentu nekā ievācēju apvienošana tieši vai caur taisngriezi, tā ļauj atšķirīgiem avotiem nodrošināt konstruktīvu elektrisko mijiedarbību praktiskas darbības apstākļos.

Patērētājs veidots no konfigurējamām plašpatēriņa komponentēm ar plašu darba sprieguma diapazonu, iekļaujot pēc iespējas zemāku minimālo vērtību. Sprieguma un elektroenerģijas uzraudzības funkciju izvēlēts veikt centrālajam mikrokontrollerim, tam pieslēgta ārēja temperatūras un relatīvā gaisa mitruma mērīšanas mikroshēma un bezvadu saziņas

mikroshēma. Izstrādātais algoritms paredz, ka darbības norit atbilstoši sistēmas funkciju patēriņam un pieejamajai elektroenerģijai, tādējādi operāciju izpilde tiek lietota sistēmas patēriņa kontrolei. Šādā veidā paredzēts nodrošināt barošanas sprieguma uzturēšanu nepieciešamajā diapazonā, lai funkcionalitāte netiktu traucēta mainīgas ģenerēšanas gadījumā, kā arī būtu retāk nepieciešama atkārtota inicializācija. Patērētāja sakaru un sensoru mērījumu novērtēšanai izveidota portatīva bezvadu uztveršanas un datu atainošanas iekārta.

Patērētāja funkcionēšana ar enerģijas ievācējiem kā avotu pārbaudīta eksperimentāli, cilvēkam soļojot. Pierādīts, ka mikrokontrolera inicializācijai iespējams daļēji izmantot iekrāto elektroenerģiju, uzreiz ieejot zema patēriņa režīmā un ļaujoties uz konfigurācijas un atmiņas noturību pie īslaicīgi zemāka sprieguma. Tas dod iespēju startēties ar ģenerēto jaudu, kas ir vien nedaudz virs nepieciešamās vērtības sākotnējā patēriņa kompensācijai pirms inicializācijas, bet drošākai un vispusīgākai darbībai vēlams atsevišķs sprieguma uzraudzības bloks. Vadoties pēc pieejamās elektroenerģijas un operāciju patēriņa, izveidotais algoritms dod iespēju gan drošai darbībai pie pārtrauktas vai vājas ģenerācijas, gan lietderīgai sprieguma ierobežošanai pie stipras ģenerācijas. Ar tādu vadību var pilnvērtīgāk izmantot termoelektriskā enerģijas ievācēja sniegto lēno ģenerācijas izmaiņu, ļaujot sistēmai ilgāk funkcionēt pēc kustības izbeigšanas un ātrāk atsākt darbību pēc kustību atsākšanās, izvairoties no atkārtotas inicializācijas. Lai gan patēriņa novērtējums, kas veikts pie augstāka sprieguma, sniedz drošības pielaides zemāka barošanas sprieguma gadījumā, precīzākai algoritma darbībai nepieciešams novērtēt patēriņu pie dažāda barošanas sprieguma, kas teorētiski ļautu veikt vairāk operāciju drošā diapazonā.

Eksperimentāli tika apstiprināta darbaspēja izveidotajam elektroenerģijas avotam no cilvēka enerģijas ievācējiem — 10 minūtes, no kurām vairāk nekā puse ir bez kustībām, nodrošinot nepārtrauktu barošanu elektroniskajai sistēmai cilvēka un apkārtnes parametru novērošanai, un kopējai izveidei lietojot vien plašpatēriņa komponentes. Bez slodzes vidējā uzlādes jauda uzrāda  $97 \pm 3 \mu\text{W}$  līdz 4,3 V izejā pie soļošanas ar 4,5 km/h, kas pie dotā ātruma pārsniedz ne mazums publicēto hibrīdo ievācēju sniegumu (Pielikums 2), turklāt tika veikts novērtējums un veikti attiecīgie uzlabojumi ģenerācijas stabilitātei. Patērētājs, salīdzinot ar daudziem citos pētījumos izmantotajiem, veidots atbilstoši potenciālai sensormezgla funkcionalitātei, turklāt novērtēts tā patēriņš un galveno raksturlielumu pārbaude veikta sakrītošos ievācēju darba apstākļos, dodot salīdzināmas atskaites vērtības.



## NOBEIGUMS

Promocijas darbā izpētīta elektroenerģijas iegūšana no cilvēka kustībām, pamatā izmantojot elektromagnētiskās indukcijas mehānismu. Praktiskā lietojamība novērtēta ar konkrētajam nolūkam veidotu elektroenerģiju uzraugošu vides parametru mērīšanas sistēmu. Iegūtie rezultāti pamato lietderību gan pielietotajiem enerģijas ievākšanas uzlabojumiem, gan izstrādātajam patērētāja algoritmam, jo eksperimentāli tika apstiprināta darbaspēja izveidotajam elektroenerģijas avotam no cilvēka enerģijas ievācējiem, 10 minūšu periodā ar kustībām un ilgstošām pauzēm nodrošinot barošanu elektroniskajai sistēmai sensoru mērījumiem un datu nosūtīšanai. Gan ievācēji un to elektroenerģijas pārveidotāji, gan patērētājs veidots, lietojot vien plašpatēriņa komponentes. Iegūtās ģeneratora–patērētāja sistēmas sastāvdaļas ir atsevišķi raksturotas un, balstoties rezultātos, savstarpēji piemērotas augstākam kopējam sniegumam. Sistēma pielāgota un pārbaudīta reālistiskos apstākļos, raksturojot ģenerācijas stabilitāti. Pētījums sniedz izvērstu ieskatu praktiskajos aspektos, kas saistīti ar cilvēka kustību enerģijas iegūšanu barošanas avota izveidei, izmantojot elektromagnētiskās indukcijas principu. Turklāt iegūtie rezultāti ir salīdzināmi vai pat pārsniedz esošos publicētos risinājumus, tālab darba mērķis tiek uzskatīts par sasniegtu.

### Galvenie rezultāti:

1. Ņemot vērā plakanas spoles elektromagnētiskās indukcijas principa īpašības, raksturots un pilnveidots apgērbā integrējams kustību enerģijas ievācējs bez mehāniskās rezonanses nepieciešamības, kas ar Šotki pārejas diožu tilta taisngriezi nodrošina līdz 68 % elektrisko efektivitāti uz rezistīvas slodzes.
2. Piemeklēts zemsprieguma pārveidotājs, kas ar izvēlēto elektromagnētisko kustību enerģijas ievācēju reālos soļošanas apstākļos nodrošina 1 mF kondensatora uzlādi līdz 2,8 V pa 350 s, uzkrājot 3,8 mJ enerģijas.
3. Veikts eksperimentāls novērtējums, lai noteiktu priekšnosacījumus pašrezonanses zema līdzsprieguma pārveidotāju darbam ar pārtraukta un mainīga maiņsprieguma avotu; rezultāti izmantojami gan piemērotāko parametru izvēlei, gan uzlabojumu nepieciešamības novērtējumam.
4. Pārtraukta signāla taisngriešanai ar pilnā tilta slēgumu izveidots matemātiskais modelis gludinošās filtra kapacitātes ietekmes novērtējumam uz iegūtā sprieguma relatīvajām vērtībām un stabilitāti, ļaujot paredzēt optimālās kapacitātes eksistenci un tās vērtību atkarībā no ģeneratora un slodzes parametriem bez resursietilpīgas datorsimulācijas.
5. Pārtrauktam maiņsprieguma signālam eksperimentāli pierādīta taisngriežu filtrējošās kapacitātes ietekme uz iegūto vidējo kvadrātisko vērtību atšķirīgiem taisngriežu slēgumiem, uzrādot izteiktu pīķa dabu un atkarībā no slēguma pie nepiemērotas kapacitātes samazinot vidējo kvadrātisko vērtību par 10 %.
6. Kustību enerģijas ievācēja taisngriešanas posms pielāgots avota un izvēlēta zemsprieguma pārveidotāja kombinācijai, tā pienesums apstiprināts pie reālistisku ģenerācijas izmaiņu ietekmes, uzrādot divkārtšu izejas jaudas pieaugumu, salīdzinot ar iepriekš darbā izmantoto pilnā tilta taisngriezi.

7. Augstākas elektroenerģijas plūsmas stabilitātes nodrošināšanai kustību enerģijas ievācējs apvienots ar līdzīgos darba apstākļos pielīdzināmas izejas jaudas siltuma plūsmas pārveidotāju elektroenerģijā, eksperimentāli novērtēta avotu mijiedarbība un katra ieguldījums kopējā sniegunā.
8. Iegūtā elektroenerģiju ģenerējoša sistēma pārbaudīta reālistiskos kustību apstākļos un uzrāda pārāku jaudas apjomu — 97  $\mu$ W pret 63  $\mu$ W kustību ievācējam atsevišķi — un uzlabotu atkārtojamību un stabilitāti — izkliede 3 % pret 16 %. Sniegums, ņemot vērā konkrēto struktūru, ģenerācijas apstākļus un principus, ir pielīdzināms vai pārāks nekā citu autoru publicētajos risinājumos.
9. Eksperimentāli pierādīta no plašpatēriņa komponentēm veidotas sensoru sistēmas darbība ar izveidoto elektroenerģijas avotu, izmantojot adaptīvu algoritmu, kas regulē patēriņu ar funkciju izpildes kontroli un nodrošina barošanas sprieguma uzturēšanu nepieciešamajā diapazonā. Cilvēkam soļojot, sistēma mēra temperatūru, relatīvo gaisa mitrumu un nodrošina bezvadu datu nosūtīšanu, turklāt neilgas kustību pauzes neietekmē sistēmas nepārtrauktu darbību.

Promocijas darba **galvenie secinājumi:**

1. Neinerciāls elektromagnētiskais cilvēka kustību enerģijas ievācējs ģenerē īsas, secīgas impulsu kopas, kas ierobežo reizinātāju slēgumu izmantošanu sprieguma paaugstināšanai, toties, lietojot zema līdzsprieguma pārveidotājus, divu pakāpju reizinātājs kā taisngriešanas posms ir lietderīgāks nekā pilnā tilta slēgums.
2. Taisngriešanas posmu neliela impulsu skaita kopām var optimizēt, jo atkarībā no signāla frekvences un ķēdes parametriem eksistē filtrējošās kapacitātes vērtība, pie kuras tiek sasniegta augstākā taisngrieztā sprieguma vidējā kvadrātiskā vērtība.
3. Kustību enerģijas ievācēja mainīgā ģenerācija nenozīmīgi ietekmē taisngriežu kapacitātes optimizāciju, toties aprūtinā zemsprieguma pārveidotāja parametru piemeklēšanu, tiem pēc iespējas jāizvēlas laidenu ieejas pretestības un efektivitātes atkarību no ieejas sprieguma sagaidāmajā diapazonā.
4. Lai nodrošinātu dažādu enerģijas ievācēju jaudu summēšanos un balansēšanos, jāizmanto individuāli pielāgoti sprieguma pārveidotāji un to izejas jāslēdz paralēli uz kopēja elektroenerģijas uzkrāšanas elementa, uz kura katrs atsevišķi var nodrošināt savu vidējo uzlādes jaudu un augstāku nekā patērētājam nepieciešamo spriegumu.
5. Algoritms, kas veidots mazjaudas patērētāja un enerģijas ievācēja kombinācijai, veicot funkcijas atbilstoši to patēriņam un pieejamajai elektroenerģijai attiecīgajā spriegumā, nodrošina barošanas spriegumu uzturēšanu nepieciešamajā diapazonā un ļauj izmantot komponentes ar zemāku energoefektivitāti.
6. Ievācēju salīdzināšanai nav pieņemtu standartu, tas sarežģī enerģijas ievācēja–patērētāja sistēmu novērtēšanu un izvēli praktiskiem nolūkiem, tāpēc darbā izraudzītās pārbaudes metodes pēta atsevišķus izstrādes posmus tiem paredzētajos darba apstākļos, bet rezultātu novērtējumam izraudzīts posmu saderības kritērijs.

## IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] S. Sudevalayam un P. Kulkarni, "Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications", *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, sēj. 13, nr. 3, lpp. 443–461, Third 2011, doi: 10.1109/SURV.2011.060710.00094.
- [2] Y. Kuang un M. Zhu, "Characterisation of a knee-joint energy harvester powering a wireless communication sensing node", *Smart Mater. Struct.*, sēj. 25, nr. 5, lpp. 055013, apr. 2016, doi: 10.1088/0964-1726/25/5/055013.
- [3] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, un M. Palaniswami, "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions", *Future Gener. Comput. Syst.*, sēj. 29, nr. 7, lpp. 1645–1660, sept. 2013, doi: 10.1016/j.future.2013.01.010.
- [4] L. D. Xu, W. He, un S. Li, "Internet of Things in Industries: A Survey", *IEEE Trans. Ind. Inform.*, sēj. 10, nr. 4, lpp. 2233–2243, nov. 2014, doi: 10.1109/TII.2014.2300753.
- [5] Y.-K. Chen, "Challenges and opportunities of internet of things", no *17th Asia and South Pacific Design Automation Conference*, Sydney, Australia: IEEE, janv. 2012, lpp. 383–388. doi: 10.1109/ASPDAC.2012.6164978.
- [6] H. Jayakumar, K. Lee, W. S. Lee, A. Raha, Y. Kim, un V. Raghunathan, "Powering the internet of things", no *Proceedings of the 2014 international symposium on Low power electronics and design*, La Jolla California USA: ACM, aug. 2014, lpp. 375–380. doi: 10.1145/2627369.2631644.
- [7] C.-W. Yau, T. T.-O. Kwok, C.-U. Lei, un Y.-K. Kwok, "Energy Harvesting in Internet of Things", no *Internet of Everything*, B. Di Martino, K.-C. Li, L. T. Yang, un A. Esposito, Red., no *Internet of Things.*, Singapore: Springer Singapore, 2018, lpp. 35–79. doi: 10.1007/978-981-10-5861-5\_3.
- [8] M. A. Webb, C. Christiansen, L. J. Hanchett, un S. Sullivan, "Electric door release powered by an energy harvester", EP2378041A2, 2011. gada 19. oktobrī Skatīts: 2021. gada 1. martā. [Tiešsaiste]. Pieejams: <https://patents.google.com/patent/EP2378041A2/en>
- [9] G. Cechmanek, "Small Scale Energy Harvesting For Use With An Electronic Door Strike", Master of Applied Science, University of Waterloo, Ontario, 2016.
- [10] Boyi Xu, Li Da Xu, Hongming Cai, Cheng Xie, Jingyuan Hu, un Fenglin Bu, "Ubiquitous Data Accessing Method in IoT-Based Information System for Emergency Medical Services", *IEEE Trans. Ind. Inform.*, sēj. 10, nr. 2, lpp. 1578–1586, mai. 2014, doi: 10.1109/TII.2014.2306382.
- [11] H. Yu un Q. Yue, "Indoor Light Energy Harvesting System for Energy-aware Wireless Sensor Node", *Energy Procedia*, sēj. 16, lpp. 1027–1032, 2012, doi: 10.1016/j.egypro.2012.01.164.
- [12] D. Musiani, K. Lin, un T. S. Rosing, "Active Sensing Platform for Wireless Structural Health Monitoring", no *2007 6th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, Cambridge, MA, USA: IEEE, apr. 2007, lpp. 390–399. doi: 10.1109/IPSNS.2007.4379699.
- [13] A. Kansal, J. Hsu, S. Zahedi, un M. B. Srivastava, "Power management in energy harvesting sensor networks", *ACM Trans. Embed. Comput. Syst.*, sēj. 6, nr. 4, lpp. 32, sept. 2007, doi: 10.1145/1274858.1274870.
- [14] V. Leonov, "Thermoelectric Energy Harvesting of Human Body Heat for Wearable Sensors", *IEEE Sens. J.*, sēj. 13, nr. 6, lpp. 2284–2291, jūn. 2013, doi: 10.1109/JSEN.2013.2252526.
- [15] X. Kang, S. Jia, Z. Lin, H. Zhang, L. Wang, un X. Zhou, "Flexible wearable hybrid nanogenerator to harvest solar energy and human kinetic energy", *Nano Energy*, sēj. 103, lpp. 107808, dec. 2022, doi: 10.1016/j.nanoen.2022.107808.

- [16] Q. Li, M. Shepertycky, un J. Martin, "Lower-limb driven energy harvesting backpack: Design, performance and energetics", no *2015 34th Chinese Control Conference (CCC)*, jūl. 2015, lpp. 7821–7826. doi: 10.1109/ChiCC.2015.7260882.
- [17] J. Lin, H. Liu, T. Chen, Z. Yang, un L. Sun, "A rotational wearable energy harvester for human motion", no *2017 IEEE 17th International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO)*, Pittsburgh, PA, USA, jūl. 2017, lpp. 22–25. doi: 10.1109/NANO.2017.8117409.
- [18] A. Šutka u.c., "The role of intermolecular forces in contact electrification on polymer surfaces and triboelectric nanogenerators", *Energy Environ. Sci.*, sēj. 12, nr. 8, lpp. 2417–2421, 2019, doi: 10.1039/C9EE01078E.
- [19] A. Šutka u.c., "Triboelectric nanogenerator based on immersion precipitation derived highly porous ethyl cellulose", *J. Electrostat.*, sēj. 92, lpp. 1–5, apr. 2018, doi: 10.1016/j.elstat.2018.01.003.
- [20] A. Šutka u.c., "Inversely polarised ferroelectric polymer contact electrodes for triboelectric-like generators from identical materials", *Energy Environ. Sci.*, sēj. 11, nr. 6, lpp. 1437–1443, jūn. 2018, doi: 10.1039/C8EE00550H.
- [21] A. Šutka u.c., "Ethyl Cellulose and Polydimethylsiloxane Based Triboelectric Nanogenerators", no *The 8th International Symposium on Surface Science ISSS-8: Conference Proceedings*, Tsukuba, Japāna, okt. 2017, lpp. 82.
- [22] I. Gorņevs un J. Blūms, "Investigation of Electromagnetic Harvester with Flat Structure and Low Voltage Rectifier", no *10th International Conference of Young Scientists on Energy Issues (CYSENI 2013): Conference Proceedings*, Lithuania, Kaunas, mai. 2013, lpp. 206–213.
- [23] J. Blums, G. Terlecka, I. Gorņevs, un A. Vilumsone, "Flat inductors for human motion energy harvesting", U. Schmid, J. L. Sánchez de Rojas Aldavero, un M. Leester-Schaedel, Red., mai. 2013, lpp. 87631L. doi: 10.1117/12.2016995.
- [24] J. Blums, I. Gorņevs, G. Terlecka, V. Jurkāns, un A. Vilumsone, "Wearable Human Motion and Heat Energy Harvesting System with Power Management", no *Energy Harvesting*, R. Manyala, Red., London, UK: InTech, 2018, lpp. 21. – 40. doi: 10.5772/intechopen.74417.
- [25] I. Gorņevs, J. Blūms, un V. Jurkāns, "Performance Analysis of Low Voltage Converters for Completely Integrable Wearable Human Motion Energy Harvester", no *2018 16th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC)*, Tallinn, Estonia: IEEE Computer Society, okt. 2018, lpp. 1–4. doi: 10.1109/BEC.2018.8600954.
- [26] I. Gorņevs un J. Blūms, "Enhancing the Performance of Human Motion Energy Harvesting through Optimal Smoothing Capacity in the Rectifier", *Sustainability*, sēj. 15, nr. 18, lpp. 13564, sept. 2023, doi: 10.3390/su151813564.
- [27] I. Gorņevs, V. Jurkāns, un J. Blūms, "Development of Wearable Multiple Source Energy-Harvesting System for Smart Clothing", *IEEE Access*, sēj. 11, lpp. 100284–100294, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3313559.
- [28] V. Jurkāns, J. Blums, un I. Gorņevs, "Harvesting Electrical Power from Body Heat Using Low Voltage Step-up Converters with Thermoelectric Generators", no *2018 16th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC)*, Tallinn, Estonia: IEEE, okt. 2018, lpp. 1–4. doi: 10.1109/BEC.2018.8600958.
- [29] S. Khalid, I. Raouf, A. Khan, N. Kim, un H. S. Kim, "A Review of Human-Powered Energy Harvesting for Smart Electronics: Recent Progress and Challenges", *Int. J. Precis. Eng. Manuf.-Green Technol.*, sēj. 6, nr. 4, lpp. 821–851, aug. 2019, doi: 10.1007/s40684-019-00144-y.

- [30] J. Luo *u.c.*, "Direct-Current Triboelectric Nanogenerator Realized by Air Breakdown Induced Ionized Air Channel", *Adv. Energy Mater.*, sēj. 8, nr. 27, lpp. 1800889, sept. 2018, doi: 10.1002/aenm.201800889.
- [31] J. Dong *u.c.*, "A high voltage direct current droplet-based electricity generator inspired by thunderbolts", *Nano Energy*, sēj. 90, lpp. 106567, dec. 2021, doi: 10.1016/j.nanoen.2021.106567.
- [32] M. Larkin un Y. Tadesse, "HM-EH-RT: hybrid multimodal energy harvesting from rotational and translational motions", *Int. J. Smart Nano Mater.*, sēj. 4, nr. 4, lpp. 257–285, dec. 2013, doi: 10.1080/19475411.2014.902870.
- [33] B. Yang, C. Lee, W. L. Kee, un S.-P. Lim, "Hybrid energy harvester based on piezoelectric and electromagnetic mechanisms", *J. MicroNanolithography MEMS MOEMS*, sēj. 9, nr. 2, lpp. 023002, apr. 2010, doi: 10.1117/1.3373516.
- [34] M. F. A. Rahman, S. L. Kok, N. M. Ali, R. A. Hamzah, un K. A. A. Aziz, "Hybrid vibration energy harvester based on piezoelectric and electromagnetic transduction mechanism", no *2013 IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CEAT)*, nov. 2013, lpp. 243–247. doi: 10.1109/CEAT.2013.6775634.
- [35] T. Sterken, P. Fiorini, K. Baert, G. Borghs, un R. Puers, "Novel design and fabrication of a MEMS electrostatic vibration scavenger", nov. 2004.
- [36] T. Sterken, P. Fiorini, G. Altena, C. Van Hoof, un R. Puers, "Harvesting Energy from Vibrations by a Micromachined Electret Generator", jül. 2007, lpp. 129–132. doi: 10.1109/SENSOR.2007.4300088.
- [37] M.-Y. Choi *u.c.*, "Mechanically Powered Transparent Flexible Charge-Generating Nanodevices with Piezoelectric ZnO Nanorods", *Adv. Mater.*, sēj. 21, nr. 21, lpp. 2185–2189, 2009, doi: <https://doi.org/10.1002/adma.200803605>.
- [38] Y. Mao, P. Zhao, G. McConohy, H. Yang, Y. Tong, un X. Wang, "Sponge-Like Piezoelectric Polymer Films for Scalable and Integrable Nanogenerators and Self-Powered Electronic Systems", *Adv. Energy Mater.*, sēj. 4, nr. 7, lpp. 1301624, 2014, doi: <https://doi.org/10.1002/aenm.201301624>.
- [39] J. Chen *u.c.*, "Transparent triboelectric generators based on glass and polydimethylsiloxane", *Nano Energy*, sēj. 30, lpp. 235–241, dec. 2016, doi: 10.1016/j.nanoen.2016.10.005.
- [40] W. Tang *u.c.*, "Liquid-Metal Electrode for High-Performance Triboelectric Nanogenerator at an Instantaneous Energy Conversion Efficiency of 70.6%", *Adv. Funct. Mater.*, sēj. 25, nr. 24, lpp. 3718–3725, 2015, doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.201501331>.
- [41] A. Khaligh, P. Zeng, un C. Zheng, "Kinetic Energy Harvesting Using Piezoelectric and Electromagnetic Technologies—State of the Art", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, sēj. 57, nr. 3, lpp. 850–860, mar. 2010, doi: 10.1109/TIE.2009.2024652.
- [42] M. R. Awal, M. Jusoh, M. R. Kamarudin, T. Sabapathy, H. A. Rahim, un M. F. A. Malek, "Power harvesting using dual transformations of piezoelectricity and magnetism: A review", no *2015 IEEE Student Conference on Research and Development (SCOReD)*, dec. 2015, lpp. 527–532. doi: 10.1109/SCORED.2015.7449392.
- [43] M. Salauddin un J. Y. Park, "A low frequency vibration driven, miniaturized and hybridized electromagnetic and triboelectric energy harvester using dual Halbach array", no *2017 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS)*, jün. 2017, lpp. 1832–1835. doi: 10.1109/TRANSDUCERS.2017.7994426.
- [44] D. Kwon, H. Ko, un J. Kim, "Piezoelectric and electromagnetic hybrid energy harvester using two cantilevers for frequency up-conversion", no *2017 IEEE 30th International*

- Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, janv. 2017, lpp. 49–52. doi: 10.1109/MEMSYS.2017.7863336.
- [45] N. S. Shenck un J. A. Paradiso, "Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics", *IEEE Micro*, sēj. 21, nr. 3, lpp. 30–42, mai. 2001, doi: 10.1109/40.928763.
- [46] J. Kymissis, C. Kendall, J. Paradiso, un N. Gershenfeld, "Parasitic power harvesting in shoes", no *Digest of Papers. Second International Symposium on Wearable Computers (Cat. No. 98EX215)*, okt. 1998, lpp. 132–139. doi: 10.1109/ISWC.1998.729539.
- [47] A. D. Kuo, "Harvesting Energy by Improving the Economy of Human Walking", *Science*, sēj. 309, nr. 5741, lpp. 1686–1687, sept. 2005, doi: 10.1126/science.1118058.
- [48] L. C. Rome, L. Flynn, E. M. Goldman, un T. D. Yoo, "Generating Electricity While Walking with Loads", *Science*, sēj. 309, nr. 5741, lpp. 1725–1728, sept. 2005, doi: 10.1126/science.1111063.
- [49] M. Pozzi, M. Aung, M. Zhu, R. Jones, un J. Goulermas, "The pizzicato knee-joint energy harvester: characterization with biomechanical data and effect of backpack load. Smart Mater Struct 21(6):075023. DOI 10.1088/0964-1726/21/7/075023", *Smart Mater. Struct. - SMART MATER STRUCT*, sēj. 21, jül. 2012, doi: 10.1088/0964-1726/21/7/075023.
- [50] J. M. Donelan, Q. Li, V. Naing, J. A. Hoffer, D. J. Weber, un A. D. Kuo, "Biomechanical Energy Harvesting: Generating Electricity During Walking with Minimal User Effort", *Science*, sēj. 319, nr. 5864, lpp. 807–810, febr. 2008, doi: 10.1126/science.1149860.
- [51] Q. Li, V. Naing, un J. M. Donelan, "Development of a biomechanical energy harvester", *J. NeuroEngineering Rehabil.*, sēj. 6, lpp. 22, jün. 2009, doi: 10.1186/1743-0003-6-22.
- [52] L. Xie un M. Cai, "Increased energy harvesting and reduced accelerative load for backpacks via frequency tuning", *Mech. Syst. Signal Process.*, sēj. 58–59, lpp. 399–415, jün. 2015, doi: 10.1016/j.ymsp.2015.01.012.
- [53] M. Sheperdycky, J.-T. Zhang, Y.-F. Liu, un Q. Li, "Development of an energy harvesting backpack and performance evaluation", *IEEE Int. Conf. Rehabil. Robot. Proc.*, sēj. 2013, lpp. 6650409, jün. 2013, doi: 10.1109/ICORR.2013.6650409.
- [54] J. Wang un J. Liang, "Energy Harvesting from Horizontal and Vertical Backpack Movements During Walking", no *2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, Auckland, New Zealand, jül. 2018, lpp. 798–803. doi: 10.1109/AIM.2018.8452373.
- [55] Q. Zhang, Y. Wang, un E. S. Kim, "Power generation from human body motion through magnet and coil arrays with magnetic spring", *J. Appl. Phys.*, sēj. 115, nr. 6, lpp. 064908, febr. 2014, doi: 10.1063/1.4865792.
- [56] Y. Wang, Q. Zhang, L. Zhao, un E. S. Kim, "Non-resonant, broad-band vibration-energy harvester based on self-assembled liquid bearing", no *2015 Transducers - 2015 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS)*, jün. 2015, lpp. 614–617. doi: 10.1109/TRANSDUCERS.2015.7180998.
- [57] D. Spreemann, B. Folkmer, D. Mintenbeck, un Y. Manoli, "Novel non-resonant vibration transducer for energy harvesting", no *PowerMEMS 2005*, Takeda Hall, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, nov. 2005, lpp. 4.
- [58] K. Ylli, D. Hoffmann, A. Willmann, B. Folkmer, un Y. Manoli, "Investigation of Pendulum Structures for Rotational Energy Harvesting from Human Motion", *J. Phys.*, lpp. 6, 2015.

- [59] Z. Yang, E. Halvorsen, un T. Dong, "Power generation from conductive droplet sliding on electret film", *Appl. Phys. Lett.*, sēj. 100, lpp. 213905, mai. 2012, doi: 10.1063/1.4720517.
- [60] Z. Yang, E. Halvorsen, un T. Dong, "Electrostatic Energy Harvester Employing Conductive Droplet and Thin-Film Electret", *Microelectromechanical Syst. J. Of*, sēj. 23, lpp. 315–323, apr. 2014, doi: 10.1109/JMEMS.2013.2273933.
- [61] X. H. Dong un X. D. Huang, "A Non-Resonant Type Electromagnetic Energy Harvester for Scavenging Vibration Energy", no *2018 IEEE SENSORS*, okt. 2018, lpp. 1–3. doi: 10.1109/ICSENS.2018.8589610.
- [62] M. Iqbal, F. U. Khan, M. Mehdi, Q. Cheok, E. Abas, un M. M. Nauman, "Power harvesting footwear based on piezo-electromagnetic hybrid generator for sustainable wearable microelectronics", *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, sēj. 34, nr. 5, lpp. 329–338, jūl. 2022, doi: 10.1016/j.jksues.2020.11.003.
- [63] Z. Li *u.c.*, "Instantaneous peak 2.1 W-level hybrid energy harvesting from human motions for self-charging battery-powered electronics", *Nano Energy*, sēj. 81, lpp. 105629, mar. 2021, doi: 10.1016/j.nanoen.2020.105629.
- [64] R. Hamid un M. R. Yuca, "A wearable energy harvester unit using piezoelectric–electromagnetic hybrid technique", *Sens. Actuators Phys.*, sēj. 257, lpp. 198–207, apr. 2017, doi: 10.1016/j.sna.2017.02.026.
- [65] T. Quan, X. Wang, Z. L. Wang, un Y. Yang, "Hybridized Electromagnetic–Trielectrostatic Nanogenerator for a Self-Powered Electronic Watch", *ACS Nano*, sēj. 9, nr. 12, lpp. 12301–12310, dec. 2015, doi: 10.1021/acsnano.5b05598.
- [66] P. Maharjan, R. M. Toyabur, un J. Y. Park, "A human locomotion inspired hybrid nanogenerator for wrist-wearable electronic device and sensor applications", *Nano Energy*, sēj. 46, lpp. 383–395, apr. 2018, doi: 10.1016/j.nanoen.2018.02.033.
- [67] P. Maharjan, H. Cho, M. S. Rasel, Md. Salauddin, un J. Y. Park, "A fully enclosed, 3D printed, hybridized nanogenerator with flexible flux concentrator for harvesting diverse human biomechanical energy", *Nano Energy*, sēj. 53, lpp. 213–224, nov. 2018, doi: 10.1016/j.nanoen.2018.08.034.
- [68] C. Wang, S.-K. Lai, J.-M. Wang, J.-J. Feng, un Y.-Q. Ni, "An ultra-low-frequency, broadband and multi-stable tri-hybrid energy harvester for enabling the next-generation sustainable power", *Appl. Energy*, sēj. 291, lpp. 116825, jūn. 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116825.
- [69] W.-G. Kim, D. Kim, H. M. Lee, un Y.-K. Choi, "Wearable fabric-based hybrid energy harvester from body motion and body heat", *Nano Energy*, sēj. 100, lpp. 107485, sept. 2022, doi: 10.1016/j.nanoen.2022.107485.
- [70] S. Scorcioni, A. Bertacchini, L. Larcher, A. Ricciardi, D. Dondi, un P. Pavan, "RF to DC CMOS rectifier with high efficiency over a wide input power range for RFID applications", no *2012 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest*, jūn. 2012, lpp. 1–3. doi: 10.1109/MWSYM.2012.6259760.
- [71] P. Choetchai un A. Thanachayanont, "A Self-starting AC-to-DC Step-up Converter for Energy Harvesting Applications", *Procedia Comput. Sci.*, sēj. 86, lpp. 144–147, 2016, doi: 10.1016/j.procs.2016.05.036.
- [72] K. Eguchi, D. Nakashima, T. Ishibashi, un I. Oota, "A multi-input single-output Dickson-type AC/DC converter for vibration energy harvesting", *Energy Rep.*, sēj. 7, lpp. 78–83, nov. 2021, doi: 10.1016/j.egy.2021.08.070.
- [73] S. Bradai, G. Bouattour, S. Naifar, un O. Kanoun, "Electromagnetic Energy Harvester for Battery-Free IoT Solutions", no *2020 IEEE 6th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, New Orleans, LA, USA: IEEE, jūn. 2020, lpp. 1–5. doi: 10.1109/WF-IoT48130.2020.9221051.

- [74] S. Cheng, R. Sathe, R. D. Natarajan, un D. P. Arnold, "A Voltage-Multiplying Self-Powered AC/DC Converter with 0.35-V Minimum Input Voltage for Energy Harvesting Applications", *IEEE Trans. Power Electron.*, sēj. 26, nr. 9, lpp. 2542–2549, sept. 2011, doi: 10.1109/TPEL.2011.2109969.
- [75] J. Yuan, H. Peng, H. Sun, un H. Xiao, "A Single-Stage Dual-Mode AC-DC Converter for Vibration Energy Harvesting with Uninterrupted Output", no *2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Vancouver, BC, Canada: IEEE, okt. 2021, lpp. 5862–5866. doi: 10.1109/ECCE47101.2021.9595495.
- [76] H. Xiao, H. Peng, X. Liu, un H. Sun, "Fully Self-Powered Inductor-Less Electromagnetic Vibration Energy Harvesting System Using Auxiliary Coils for Hysteresis Current MPPT Control", *IEEE Trans. Power Electron.*, sēj. 37, nr. 11, lpp. 13192–13204, nov. 2022, doi: 10.1109/TPEL.2022.3182155.
- [77] E. J. Carlson, K. Strunz, un B. P. Otis, "A 20 mV Input Boost Converter With Efficient Digital Control for Thermoelectric Energy Harvesting", *IEEE J. Solid-State Circuits*, sēj. 45, nr. 4, lpp. 741–750, apr. 2010, doi: 10.1109/JSSC.2010.2042251.
- [78] I. Doms, P. Merken, R. Mertens, un C. Hoof, "Integrated capacitive power-management circuit for thermal harvesters with output power 10 to 1000 $\mu$ W", *2009 IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. - Dig. Tech. Pap.*, 2009, doi: 10.1109/ISSCC.2009.4977427.
- [79] Y. K. Ramadass un A. P. Chandrakasan, "A Battery-Less Thermoelectric Energy Harvesting Interface Circuit With 35 mV Startup Voltage", *IEEE J. Solid-State Circuits*, sēj. 46, nr. 1, lpp. 333–341, janv. 2011, doi: 10.1109/JSSC.2010.2074090.
- [80] J. M. Damaschke, "Design of a low-input-voltage converter for thermoelectric generator", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, sēj. 33, nr. 5, lpp. 1203–1207, sept. 1997, doi: 10.1109/28.633797.
- [81] S. Ben-yaakov un I. Fridman, "SPICE compatible model of self-oscillating converter", janv. 2004, doi: 10.1109/EEEEI.2004.1361161.
- [82] M. Pollak, L. Mateu, un P. Spies, "STEP-UP DC-DC-CONVERTER WITH COUPLED INDUCTORS FOR LOW INPUT VOLTAGES", janv. 2008.
- [83] N. Degrenne *u.c.*, "Self-Starting DC:DC Boost Converter for Low-Power and Low-Voltage Microbial Electric Generators", okt. 2011, lpp. 889–896. doi: 10.1109/ECCE.2011.6063865.
- [84] "LTC3108 datasheet". Skatīts: 2018. gada 28. februārī. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3108fc.pdf>
- [85] C. Gupta, H. Agarwal, Y. K. Lin, A. Ito, C. Hu, un Y. S. Chauhan, "Analysis and modeling of zero-threshold voltage native devices with industry standard BSIM6 model", *Jpn. J. Appl. Phys.*, sēj. 56, nr. 4S, lpp. 04CD09, mar. 2017, doi: 10.7567/JJAP.56.04CD09.
- [86] J. Im *u.c.*, "A 40mV transformer-reuse self-startup boost converter with MPPT control for thermoelectric energy harvesting", no *2012 IEEE International Solid-State Circuits Conference*, febr. 2012, lpp. 104–106. doi: 10.1109/ISSCC.2012.6176895.
- [87] Y. Teh un P. K. T. Mok, "Design of Transformer-Based Boost Converter for High Internal Resistance Energy Harvesting Sources With 21 mV Self-Startup Voltage and 74% Power Efficiency", *IEEE J. Solid-State Circuits*, sēj. 49, nr. 11, lpp. 2694–2704, nov. 2014, doi: 10.1109/JSSC.2014.2354645.
- [88] F. Assaderaghi, D. Sinitsky, S. A. Parke, J. Bokor, P. K. Ko, un Chenming Hu, "Dynamic threshold-voltage MOSFET (DTMOS) for ultra-low voltage VLSI", *IEEE Trans. Electron Devices*, sēj. 44, nr. 3, lpp. 414–422, mar. 1997, doi: 10.1109/16.556151.



- [89] S. Bose, T. Anand, un M. L. Johnston, "Integrated Cold Start of a Boost Converter at 57 mV Using Cross-Coupled Complementary Charge Pumps and Ultra-Low-Voltage Ring Oscillator", *IEEE J. Solid-State Circuits*, sēj. 54, nr. 10, lpp. 2867–2878, okt. 2019, doi: 10.1109/JSSC.2019.2930911.
- [90] R. Matsuzuka, T. Terada, K. Matsumoto, M. Kitamura, un T. Hirose, "A 42 mV startup ring oscillator using gain-enhanced self-bias inverters for extremely low voltage energy harvesting", *Jpn. J. Appl. Phys.*, sēj. 59, nr. SG, lpp. SGGL01, febr. 2020, doi: 10.7567/1347-4065/ab65d4.
- [91] M. Nishi *u.c.*, "A 34-mV Startup Ring Oscillator Using Stacked Body Bias Inverters for Extremely Low-Voltage Thermoelectric Energy Harvesting", no *2020 18th IEEE International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS)*, jūn. 2020, lpp. 38–41. doi: 10.1109/NEWCAS49341.2020.9159838.
- [92] H. O. Tabrizi, H. M. P. C. Jayaweera, un A. Muhtaroglu, "Fully Integrated Autonomous Interface With Maximum Power Point Tracking for Energy Harvesting TEGs With High Power Capacity", *IEEE Trans. Power Electron.*, sēj. 35, nr. 5, lpp. 4905–4914, mai. 2020, doi: 10.1109/TPEL.2019.2945913.
- [93] W. P. M. R. Pathirana, H. M. P. C. Jayaweera, un A. Muhtaroglu, "Low input voltage and high step-up integrated regulator for thermoelectric energy harvesting", no *5th International Conference on Energy Aware Computing Systems Applications*, mar. 2015, lpp. 1–4. doi: 10.1109/ICEAC.2015.7352199.
- [94] K. Le, L. Pham-Nguyen, un S. Lee, "An ultra-low-voltage-startup circuit for thermal energy harvesting application", no *2017 7th International Conference on Integrated Circuits, Design, and Verification (ICDV)*, okt. 2017, lpp. 28–32. doi: 10.1109/ICDV.2017.8188631.
- [95] H. M. P. C. Jayaweera, H. O. Tabrizi, un A. Muhtaroglu, "Fully integrated ultra-low voltage DC-DC converter with voltage quadrupling LC tank oscillator for energy harvesting applications", no *2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, nov. 2017, lpp. 269–273.
- [96] P. Weng, H. Tang, P. Ku, un L. Lu, "50 mV-Input Batteryless Boost Converter for Thermal Energy Harvesting", *IEEE J. Solid-State Circuits*, sēj. 48, nr. 4, lpp. 1031–1041, apr. 2013, doi: 10.1109/JSSC.2013.2237998.
- [97] C. Huang *u.c.*, "Batteryless 275mV startup single-cell photovoltaic energy harvesting system for alleviating shading effect", no *2013 IEEE Asian Solid-State Circuits Conference (A-SSCC)*, nov. 2013, lpp. 265–268. doi: 10.1109/ASSCC.2013.6691033.
- [98] U. Radhakrishna *u.c.*, "A low-power integrated power converter for an electromagnetic vibration energy harvester with 150 mV-AC cold startup, frequency tuning, and 50 Hz AC-to-DC conversion", no *2018 IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC)*, San Diego, CA: IEEE, apr. 2018, lpp. 1–4. doi: 10.1109/CICC.2018.8357079.
- [99] N. V. Desai, Y. Ramadass, un A. P. Chandrakasan, "A bipolar  $\pm 40$  mV self-starting boost converter with transformer reuse for thermoelectric energy harvesting", no *Proceedings of the 2014 international symposium on Low power electronics and design*, La Jolla California USA: ACM, aug. 2014, lpp. 221–226. doi: 10.1145/2627369.2627609.
- [100] "LTC3109 datasheet", LTC3109 datasheet and product info | Analog Devices. Skatīts: 2018. gada 2. janvārī. [Tiešsaiste]. Pieejams: <https://www.analog.com/en/products/ltc3109.html>
- [101] I. Tsekoura, G. Rebel, P. Glosekotter, un M. Berekovic, "An evaluation of energy efficient microcontrollers", no *2014 9th International Symposium on Reconfigurable and Communication-Centric Systems-on-Chip (ReCoSoC)*, Piscataway, NJ: IEEE, mai. 2014, lpp. 1–5. doi: 10.1109/ReCoSoC.2014.6861368.

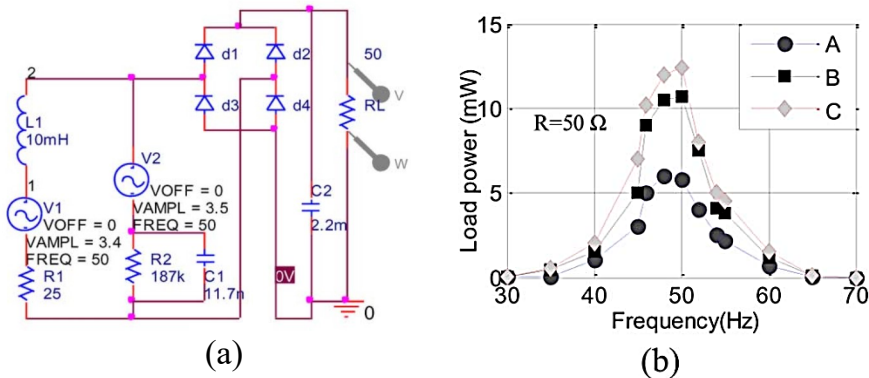
- [102] "MSP430G2553 data sheet, product information and support | TI.com". Skatīts: 2018. gada 22. martā. [Tiešsaiste]. Pieejams: <https://www.ti.com/product/MSP430G2553>
- [103] "PIC16F18877 - 8-bit Microcontrollers". Skatīts: 2021. gada 8. februārī. [Tiešsaiste]. Pieejams: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC16F18877>
- [104] S. Mohsen, A. Zekry, K. Youssef, un M. Abouelatta, "A Self-powered Wearable Wireless Sensor System Powered by a Hybrid Energy Harvester for Healthcare Applications", *Wirel. Pers. Commun.*, sēj. 116, nr. 4, lpp. 3143–3164, febr. 2021, doi: 10.1007/s11277-020-07840-y.
- [105] R. Torah, P. Glynne-Jones, M. Tudor, T. O'textquotesingleDonnell, S. Roy, un S. Beeby, "Self-powered autonomous wireless sensor node using vibration energy harvesting", *Meas. Sci. Technol.*, sēj. 19, nr. 12, lpp. 125202, okt. 2008, doi: 10.1088/0957-0233/19/12/125202.
- [106] M. MINAMI, T. MORITO, H. Morikawa, un T. Aoyama, "Solar Biscuit: A Battery-less Wireless Sensor Network System for Environmental Monitoring Applications", *INSS*, janv. 2005.
- [107] V. Marsic, M. Zhu, un S. Williams, "Wireless Sensor Communication System with Low Power Consumption for Integration with Energy Harvesting Technology", *Telfor J.*, sēj. 4, nr. 2, lpp. 6, 2012.
- [108] M. Ferrari, F. Cerini, un V. Ferrari, "Autonomous sensor module powered by impact-enhanced energy harvester from broadband low-frequency vibrations", no 2013 *Transducers Eurosensors XXVII: The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS EUROSENSORS XXVII)*, jūn. 2013, lpp. 2249–2252. doi: 10.1109/Transducers.2013.6627252.
- [109] Y. Song u.c., "Wireless battery-free wearable sweat sensor powered by human motion", *Sci. Adv.*, sēj. 6, nr. 40, sept. 2020, doi: 10.1126/sciadv.aay9842.
- [110] T. Ruan, Z. J. Chew, un M. Zhu, "Energy-Aware Approaches for Energy Harvesting Powered Wireless Sensor Nodes", *IEEE Sens. J.*, sēj. 17, nr. 7, lpp. 2165–2173, apr. 2017, doi: 10.1109/JSEN.2017.2665680.
- [111] "LTC2935 - Ultra-Low Power Supervisor with Power-Fail Output, Selectable Thresholds". Skatīts: 2019. gada 1. septembrī. [Tiešsaiste]. Pieejams: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/2935fa.pdf>
- [112] G. Terļecka, "Cilvēka kustību enerģijas pārveidotāja integrēšana apģērbā", Rīgas Tehniskā universitāte, 2019.
- [113] G. Terļecka, A. Viļumsone, J. Blūms, un I. Gorņevs, "The Structure of the Electromechanical Converter and Its Integration in Apparel", *Materiālzinātne Tekst. Un Apģērbu Teh.*, sēj. 6, lpp. 123–129, 2011.
- [114] A. Hussein, B. Mouawad, un A. Castellazzi, "Dynamic performance analysis of a 3.3 kV SiC MOSFET half-bridge module with parallel chips and body-diode freewheeling", no 2018 *IEEE 30th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)*, Chicago, IL: IEEE, mai. 2018, lpp. 463–466. doi: 10.1109/ISPSD.2018.8393703.
- [115] "EH4205 datasheet". Skatīts: 2020. gada 1. maijā. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://aldinc.com/pdf/EH4205.pdf>
- [116] "EH4295 datasheet". Skatīts: 2020. gada 1. maijā. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://aldinc.com/pdf/EH4295.pdf>
- [117] "EH300 datasheet". Skatīts: 2020. gada 1. maijā. [Tiešsaiste]. Pieejams: <https://www.aldinc.com/pdf/EH300.pdf>
- [118] Susie Felber, "What country is the most active? — Nokia Health". Skatīts: 2018. gada 1. maijā. [Tiešsaiste]. Pieejams: <https://blog.health.nokia.com/blog/2014/09/05/which-is-the-most-active-country/>

- [119] O. H. Schade, "Analysis of Rectifier Operation", *Proc. IRE*, sēj. 31, nr. 7, lpp. 341–361, jūl. 1943, doi: 10.1109/JRPROC.1943.231350.
- [120] J. G. Kassakian, M. F. Schlecht, un G. C. Verghese, *Principles of power electronics*. no Addison-Wesley series in electrical engineering. Reading, Mass: Addison-Wesley, 1991. [Tiešsaiste]. Pieejams: <https://www.scribd.com/doc/117145640/Principles-of-Power-Electronics>
- [121] M. Copello, "Voltage Smoothing with a Capacitor", *Undergrad. J. Math. Model. One Two*, sēj. 5, nr. 2, mai. 2013, doi: 10.5038/2326-3652.5.2.2.
- [122] W. Shepherd un L. Zhang, *Power Converter Circuits*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2004.
- [123] K. C. Wu, *Power rectifiers, inverters, and converters: accelerated steady-state approaches with closed-form solutions*. Morrisville, North Carolina, United States: Lulu Press, Inc., 2008.
- [124] K. Wu, "Analyzing Full-Wave Rectifiers With Capacitor Filters", *Power Electron.*, sēj. 36, nr. 1, lpp. 16–19, janv. 2010.
- [125] "DFLS120L - Schottky (.5A and Above)", Diodes Incorporated. Skatīts: 2020. gada 27. maijā. [Tiešsaiste]. Pieejams: <https://www.diodes.com/products/discrete/diodes-and-rectifiers/rectifiers/schottky-5a-and-above/>
- [126] "ATTINY1616 | Microchip Technology". Skatīts: 2018. gada 25. aprīlī. [Tiešsaiste]. Pieejams: <https://www.microchip.com/en-us/product/ATTINY1616>
- [127] "Digital High Accuracy RH/T Sensor HTU21D", TE Connectivity. Skatīts: 2018. gada 21. maijā. [Tiešsaiste]. Pieejams: <https://www.te.com/usa-en/product-CAT-HSC0004.html>
- [128] "Long Range 2.4GHz Radio Transceiver LT8920", LT8920 Datasheet V1.1. Skatīts: 2018. gada 24. maijā. [Tiešsaiste]. Pieejams: <https://www.deviationtx.com/media/kunena/attachments/7714/LT8920datasheetEngversion201701191.pdf>
- [129] "PIC24FJ128GB106 | Microchip Technology". Skatīts: 2022. gada 15. augustā. [Tiešsaiste]. Pieejams: <https://www.microchip.com/en-us/product/PIC24FJ128GB106>
- [130] N. M. Ali, A. A. Mustapha, un K. S. Leong, "Investigation of hybrid energy harvesting circuits using piezoelectric and electromagnetic mechanisms", no *2013 IEEE Student Conference on Research and Development*, dec. 2013, lpp. 564–568. doi: 10.1109/SCoReD.2013.7002655.
- [131] Y. Sang, X. Huang, H. Liu, un P. Jin, "A Vibration-Based Hybrid Energy Harvester for Wireless Sensor Systems", *IEEE Trans. Magn.*, sēj. 48, nr. 11, lpp. 4495–4498, nov. 2012, doi: 10.1109/TMAG.2012.2201452.
- [132] M. Ferrari, V. Ferrari, M. Guizzetti, un D. Marioli, "Investigation on Electrical Output Combination Options in a Piezoelectric Multifrequency Converter Array for Energy Harvesting in Autonomous Sensors", no *2010 First International Conference on Sensor Device Technologies and Applications*, jūl. 2010, lpp. 258–263. doi: 10.1109/SENSORDEVICES.2010.56.
- [133] M. Ferrari, V. Ferrari, M. Guizzetti, D. Marioli, un A. Taroni, "Piezoelectric multifrequency energy converter for power harvesting in autonomous microsystems", *Sens. Actuators Phys.*, sēj. 142, nr. 1, lpp. 329–335, mar. 2008, doi: 10.1016/j.sna.2007.07.004.

## **PIELIKUMI**

## Enerģijas ievācēju apvienošana

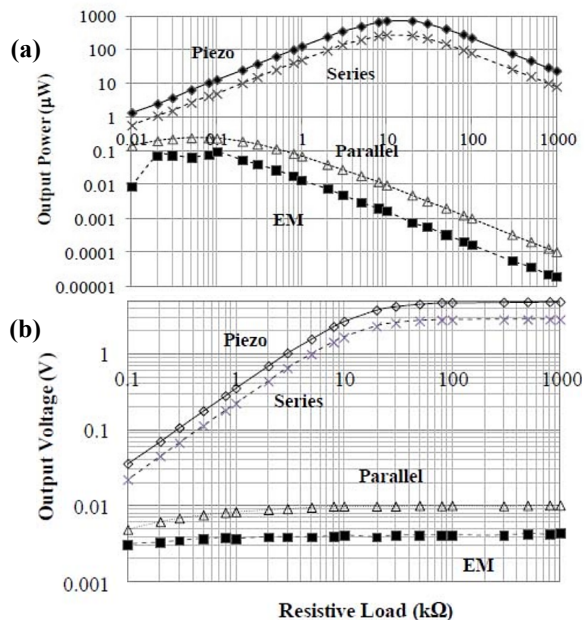
Samērā plaši apskatītas hibridā ievācēja uzbūves pamatā ir magnēts, kas kustības laikā ne tikai rada mainīgu magnētisko lauku spolēm, bet arī mehāniski iedarbojas uz pjezoelektrisko materiālu. Piemērs ir struktūra, kur spole ir fiksēta, bet magnēts piestiprināts kronšteinam un kustas caur spoli [130]. Pie kronšteina virsmām tiek piestiprināti pjezoelektriskie elementi. Izveidojas inerciāla sistēma, kurā elektromagnētiskais un pjezoelektriskais pārveidotājs ir mehāniski sajūgti. Abi ievācēji ģenerē maiņstrāvu, turklāt šādas mehāniskās sajūgšanas dēļ signāls būs vienā fāzē, bet ar atšķirīgu formu. Pētījuma [131] autori piedāvā saslēgt abus ievācējus paralēli, tad kopējo signālu taisngriezt (P1.1. att., a). Šāds slēgums atvieglo kopējo pārveidotāja shēmas izveidi un pie 0,4 g paātrinājuma ( $1 g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ) sniedz 81 % ģenerētās jaudas pieaugumu, ja salīdzina ar elektromagnētisko kustību enerģijas pārveidotāju vienu pašu (P1.1. att., b).



P1.1. att. a — simulācijas shēma paralēli saslēgtam elektromagnētiskajam un pjezoelektriskajam ievācējam; b — jauda uz slodzes dažādos slēgumos: A — atsevišķs elektromagnētiskais, B — eksperimentālais hibridais, C — simulētais hibridais pārveidotājs [131].

Lai gan jaudas ieguvums salīdzinājumā ar elektromagnētisko ģeneratoru vienu pašu ir būtisks, darba [131] autori neparāda atsevišķo sniegumu pjezoelektriskajam ģeneratoram. Tieša saslēgšana paralēli var radīt ģenerētā lādiņa noplūšanu elektromagnētiskā ievācēja spolēs, ja tam dotajā momentā būs zemāks izejas spriegums. Dažādu enerģijas ievācēju savstarpējais elektriskais slēgums tika izpētīts darbā [130], kurā pjezoelektriskais un elektromagnētiskais ievācējs izveidoti iepriekš minētajā mehāniskajā struktūrā. Autoru mērķis bija salīdzināt abu pārveidotāju virknes un paralēlo slēgumu, tāpēc tika nomērītas sekojošās slēgumu konfigurācijas: atsevišķi ģeneratori ar taisngriežiem, ģeneratori paralēli ar kopēju taisngriezi, un ģeneratori virknē ar kopēju taisngriezi. Visām konfigurācijām izejā ir kondensators un slodze. Mērījumi tika veikti ar ārēju svārstību avotu pie 76,2 Hz un 0,03 g paātrinājuma. Izmantota rezistīva slodze diapazonā no 10  $\Omega$  līdz 1 M $\Omega$ , jauda aprēķināta, izmantojot

taisngrieztā sprieguma vidējā kvadrātiskā sprieguma vērtību uz slodzes. Jaudas un sprieguma vērtības redzamas nākamajā attēlā.



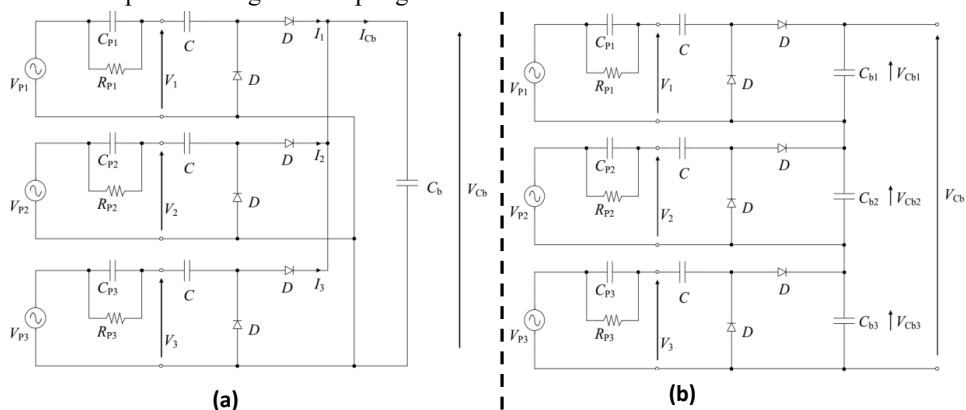
P1.2. att. Dažādo slēgumu konfigurāciju rezultāti logaritmiskā mērogā: (a) izejas jauda un (b) spriegums kā funkcija no slodzes pretestības. *Piezo* — pjezoelektriskais atsevišķi, *EM* — elektromagnētiskais atsevišķi, *Series* — abi virknē, *Parallel* — abi paralēli [130].

Tā kā eksperimentā lietotais paātrinājums, sekojoši arī ātrums, ir zems, elektromagnētiskais pārveidotājs nespēj sniegt augstu spriegumu individuālā slēgumā. Augstākās jaudas punkti abiem pārveidotājiem atšķiras par vairākām kārtām, arī salāgotās slodzes pretestības šķir 2 kārtas — pjezoelektriskajam pie 20 kΩ ģenerētā jauda tuvu 1 mW un elektromagnētiskajam pie 40 Ω ap 0,1 µW. Saslēdzot abus ievācējus kopā, var domāt, ka tiks iegūts summāri labāks rezultāts, bet izmērītais sniegums ir pa vidu starp individuālajiem. Var redzēt, ka paralēlā slēguma gadījumā pjezoelektriskais ievācējs tiek stipri slogots ar elektromagnētisko, tamdēļ rezultāts ir tikai nedaudz virs elektromagnētiskā ievācēja atsevišķā slēguma rezultātiem. Virknes slēguma gadījumā, visticamāk, salīdzinoši mazais elektromagnētiskā ievācēja sniegums nespēj izkompensēt zudumus no tā virknes pretestības un induktivitātes, kas var bloķēt straujo sprieguma fronti no pjezoelektriskā ievācēja, tālab kopējais sniegums atkal ir zemāks nekā pjezoelektriskajam individuāli.

Pētījuma [130] autori secina, ka labākam sniegumam dotie enerģijas ievācēji ir jāizolē. To izejas spriegumi ir jāvirza uz atsevišķiem taisngriešanas elementiem un tālāk atsevišķiem sprieguma pārveidotājiem pēc nepieciešamības, lai tikai tad apvienotu kopējā enerģijas uzkrāšanas elementā. Savstarpēji izolētu mehānisko enerģijas pārveidotāju slēgumu salīdzināšanai pievērsās arī pētījuma [132] autori, tikai viņu apskatītā problēma bija dažādu rezonanses frekvenču pjezoelektrisko ievācēju apvienošana. Pētījumā tiek apskatīts, kā

izdevīgāk saslēgt enerģijas ievācējus pēc taisngriešanas posma. Trīs atsvari tika piestiprināti dažādu garumu kronšteiniem, uz kuriem izvietoti pjezoelektriskie elementi, visi pievienoti vienotam balstam. Teorētiskais apvienošanas izdevīgums ir plašāka izmantojamo mehānisko frekvenču josla, jo, kā jau rezonanses tipa ģeneratoriem raksturīgi, ārpus tās izejas spriegums strauji krītas.

Tā kā izejas signāli nebūs vienā fāzē, atšķirsies arī to frekvence, ievācēju tiešs slēgums var radīt destruktīvu izejas signālu pārklāšanos. Tamdēļ [132] autori piedāvā katru pārveidotāju pieslēgt savam sprieguma reizinātājam, kas teorētiski izejā nodrošinās līdzspriegumu ar divkārtšņu ieejas signāla amplitūdu. Tālāk šīs izejas var savienot virknē vai paralēli (P1.3. att.), uzskatot tos par neatkarīgiem līdzsprieguma avotiem.



P1.3. att. Pjezoelektrisko ievācēju slēgums ar individuāliem sprieguma divkārtotājiem: (a) paralēls un (b) virknes.  $V_P$ ,  $C_P$  un  $R_P$  ir pjezoelektriskā ģeneratora ekvivalentā shēma zemām mehāniskajām frekvencēm [132].

Galvenā priekšrocība saslēgšanai paralēli ir tā, ka izejas kondensators tiek lādēts no visiem atsevišķajiem avotiem vienlaicīgi. Tas, kā norāda [132] autori, palielina jaudu, respektīvi, samazina izejas kondensatora  $C_b$  uzlādes laiku. Bet šādam slēgumam parādās trūkums, ja izejas amplitūdas atsevišķajiem pārveidotājiem būtiski atšķiras, — izejas kondensatoru lādēs tikai viens no ievācējiem, atkarībā no individuāli pieejamā izejas sprieguma. Tātad ievācējs, kas dotajā momentā ģenerē visaugstāko spriegumu, būs dominējošs, kamēr pārējie nesniegs būtisku ieguldījumu uzkrātajai enerģijai, bet izejas spriegums  $V_{Cb}$  tieksies uz visaugstāko kāda pārveidotāja spriegumu (dotajā gadījumā divkārtotu individuāla ievācēja spriegumu, neskaitot sprieguma kritumu diodēs) [133]. Kamēr noplūdes diodēs ir mazas salīdzinājumā ar ieguvumu, var uzskatīt, vairāki ģeneratori konkrētā laika momentā vienkārši ir neaktīvi, bet, ja noplūdes strāva ir vērā ņemama, katrs „nestrādājošais” ievācējs ir jāņem vērā kā zudumu avots.

Uzskaitot virknes slēguma īpašības, skaidrs, ka tajā summējas individuālais ievācēju spriegums, nevis strāva kā paralēlajā slēgumā. Tamdēļ izejas spriegums tiecas uz visu ievācēju divkārtšņu amplitūdas summu, kas var būt izdevīgi zemu izejas spriegumu ģenerējošiem ievācējiem. Pēc eksperimentālajiem rezultātiem [132] autori secina, ka augstāka sprieguma iegūšanai virknes slēgums ir izdevīgāks gadījumos, kad tiek ģenerēti tuva sprieguma signāli.

Tātad, ja dotajos apstākļos kāds no ievācējiem sniedz būtiski mazāku vērtību, tā nesniegs būtisku ieguldījumu kopējā spriegumā, toties kopējā kapacitāte krītas atbilstoši kondensatoru virknes slēguma sakarībai (P1.2), līdz ar ko samazinās iekrājamā enerģija.

Vēl viena negatīva īpašība parādās gadījumos, kad izejas kondensatori būs nevienmērīgi uzlādēti vai arī to kapacitāte būs atšķirīga, un slodze ir ar sliekšņa sprieguma dabu, proti, elektroenerģija tiek patērēta tikai noteiktā izejas sprieguma diapazonā [132]. Tas var būt impulsveida pārveidotājs vai arī slodze, kas tiek pieslēgta un atslēgta konkrētā darba sprieguma diapazonā. Piemēram, uzkrājot elektroenerģiju kondensatoros līdz noteiktam līmenim, pieslēdzot patērētāju uzdevumu veikšanai, tad atslēdzot pie noteiktas vērtības, kas neatbilst pilnīgai kondensatoru izlādei. Šādos gadījumos uz katra kondensatora palikušo spriegumu raksturo vienādojums (P1.1) [132]. Tas parāda katra virknē slēgtā kondensatora spriegumu, var secināt, ka pilnīgi vienādi uzlādētu tādu pašu kapacitāšu kondensatoru paliekošais spriegums ir  $V_{TL}/N$ , kur  $V_{TL}$  ir kopējā sprieguma zemākā vērtība, bet  $N$  — kondensatoru skaits. Šis ir ideālais scenārijs, kad enerģija no visiem kondensatoriem tiek vienmērīgi nodota uz slodzi.

$$V_{C_{bi}}(t_{TL}) = V_{C_{bi}}(t_{HL}) - \frac{C_{eq}}{C_{bi}}(V_{TH} - V_{TL}), \quad (P1.1)$$

kur

$$C_{eq} = \left( \sum_{i=1}^N \frac{1}{C_{bi}} \right)^{-1} \quad (P1.2)$$

Turpretim gadījumos, kad kondensatoru kapacitātes vai to sākotnējais spriegums izlādes sākuma laika momentā  $t_{TH}$  atšķiras, atlikušais spriegums izlādes beigās ( $t_{TL}$ ) var būt negatīvs, kā parāda vienādojums (P1.1) [132]. Tam iemesls ir nevienmērīga lādiņa sadalīšanās pa kondensatoriem izlādes laikā. Šādā gadījumā var rasties situācija, kad pēc atkārtotiem uzlādes un izlādes cikliem kopējais spriegums vairs nevar sasniegt nepieciešamo līmeni, tādējādi patērētājs nespēs funkcionēt. Jāatzīmē, ka dotajā elektroniskajā shēmā (P1.3. att., b) diožu pāris paralēli katram izejas kondensatoram novērš būtisku negatīva sprieguma pieaugšanu. Šis ir īpaši svarīgi salīdzinoši neproduktīviem ievācējiem.



## 2. pielikums

Sekojošajā tabulā apkopti dažādi publicētie hibrīdie kustību enerģijas ievācēji ar cilvēka kustību testiem, kur rezultātā uzkrāta elektroenerģija. Vidējā uzlādes jauda ir autora aprēķināta no izejas kondensatora uzlādes laika un enerģijas, ko iegūst no augstākā sasniegtā sprieguma un kapacitātes. Pie patērētāja norādīts, vai ievācēji var uzturēt tā ilgstošu darbību, vai arī barošana notiek no uzkrātās elektroenerģijas. Beigās doti promocijas darbā iegūtās un raksturotās sistēmas dati (5. nodaļa).

	Ievācēji	Uzbūve, mazākā dimensija	Uzlādes pārbaudes apstākļi	Vidējā uzlādes jauda	Izejas kond. kapacitāte	Sprieguma pārveidošanas mehānisms	Pārbaudītā patērētāja veids	Patērētāja pārbaudes apstākļi	Piezīmes	Gads, darbs
1	EM + Pjezo	Bloks pie plaukšanas locītavas, 34 mm	Iešana ar 4–6 km/h	0.21 $\mu$ W pie 0.75 V	220 $\mu$ F	Sprieguma reizinātājs (EM) un LTC3588 (pjezo)	—	—	Iesākumā pārbaudīts ar nepaskaidrotu kustību avotu, 6 $\mu$ F kapacitāti un dažādām slodzēm, uzrādot vidējo jaudu ap 45 $\mu$ W pie 300 $\Omega$ , izejā 3.3 V	2017, [64]
2	EM + TENG	Bloks pie plaukšanas locītavas, 30 mm	Rokas vāzieni	6 $\mu$ W pie 2 V	100 $\mu$ F	2 tilti	Paštaisīts ciparnīcas rokas pulkstenis, var uzturēt	Nenoteikti rokas vāzieni	Pārbaudīti dažādi kustību veidi, bet to parametri nav doti	2015, [65]
3	EM + Piro	Apģērba elements, 0.4 mm	Skriešana nenotiekto apstākļos ar 1 kW/m <sup>2</sup> apgaismojumu	1.5 $\mu$ W pie 2 V	100 $\mu$ F	Tilts	Komerציāls galda higrometrs un termometrs, nevar uzturēt	Tie paši	Avoti apvienoti paralēli pirms tilta. Tukšgaitas spriegums piroelektriķim 4–9 V, EM 1.5 mV, tālab tieša apvienošana nešķiet objektīva.	2022, [15]

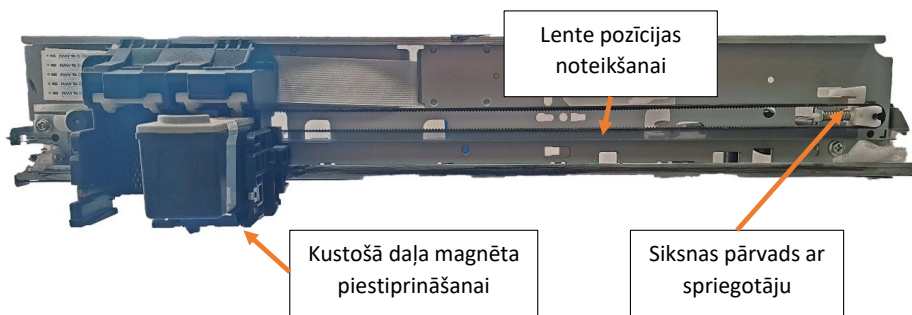
4	EM + Pjezo	Cilindrs korpē, 32 mm	Iešana uz el. skrejceļa	0.52 $\mu$ W pie 2.5 V	100 $\mu$ F	Tilts	—	—	Ar meh. rezonanses iespēju. Teikts, ka pjezo un EM signāli sakrīt fāzē, tāpēc tie ir savienoti pirms tilta, nav sacīts, kā.	2022, [62]
5	EM + TENG	Aproce, 13 mm	Iešana uz el. skrejceļa ar 3.6–5.4 km/h	47 $\mu$ W pie 4.5 V	470 $\mu$ F	Sprieguma reizinātājs (EM) un tilts (TENG)	Komerציāls sirds ritma sensors, nevar uzturēt	Skriešana 10 min kondensatora (0.1 F) uzlādei	TENG spriegums pēc 10k iedarbēm krīt no 19 V līdz 17 V. Var derēt dažādām kustībām. Kontrolleris sensoram barots atsevišķi.	2018, [66]
6	EM + TENG	Aproce, 12 mm	“Ātra iešana” nekontrolētos apstākļos	66 $\mu$ W pie 5.3 V	470 $\mu$ F	Sprieguma reizinātājs (EM) un tilts (TENG)	Komerציāls ciparu temp. sensors TMP102, var uzturēt	“Lēna iešana”	TENG spriegums pēc 10k iedarbēm krīt no 24 V uz 22.5 V. Nav teikts, kā tiek barota sensora kontrole un ko tas veic.	2018, [67]
7	EM + Pjezo	Bloks pie potītes, 25 mm	Skriešana uz el. skrejceļa ar 12.5 km/h	7600 $\mu$ W pie 6 V	2200 $\mu$ F	2 tilti	Komerציāla GPS akumulatora (Li-ion) uzlāde, var uzturēt	Skriešana brīvos apstākļos ar vidēji 12.5 km/h	Darbojas no trieciena radītām magnēta svārstībām, avotiem panākta tuva iekšējā pretestība. Piķa jaudas (2.1 W) aprēķinam lieto <i>peak-to-peak</i> spriegumu.	2021, [63]

8	EM + Pjezo + TENG	Bloks, 17 mm	Iešana uz el. skrejceļa ar 5 km/h	871 $\mu$ W pie 14 V (pie delnas) 2090 $\mu$ W pie 22 V (pie pofītes)	560 $\mu$ F	3 tilti	Komerčiāli galda higrometri, var uzturēt	Iešana uz el. skrejceļa, ievācējs uz rokas	Pārbaudīts pie dažādām bloka izvietojuma vietām. Visu avotu iekšējās pretestības atšķiras par pāris kārtām.	2021, [68]
9	TENG + Peltje	Apģērba elements, > 2 mm (precīzs biezums nav dots)	Sišana ar plaukstu dzesētā telpā	74 $\mu$ W pie 3 V	3300 $\mu$ F	LTC3108 (Peltjē) un LTC3588 (TENG)	USB izeja telefona lādēšanai, bez kvantitatīva novērtējuma	Tie paši	Eksperimentālie apstākļi kondensatora uzlādei izvēlēti kā visstiprāk ģenerējošie, nevis plānotie darba apstākļi. Aptuveni novērtēts, ka 75 % enerģijas nāk no siltuma plūsmas.	2022, [69]
10	EM + Peltjē	Apģērba elementi, 3 mm, un vairāku elementu aksesuārs, 10 mm	Iešana uz treniņiera iekšējās, 4.5 km/h	97 ± 3 $\mu$ W pie 4.3 V	1000 $\mu$ F	Optimizēts taisngriezis ar EH4295 (EM) un LTC3108 (Peltjē)	Paštaisīts temperatūras un gaisa mitruma mērītājs ar datu bezvadu nosūtīšanu, var uzturēt	Tie paši	Patērētāja funkcionalitāte apstiprināta ar kustību pauzēm, kuru ilgums pielīdzināms soļošanas laikam	Šis darbs

### **Mehāniskā manipulatora izveide kontrolējamu un atkārtojamo kustību nodrošināšanai**

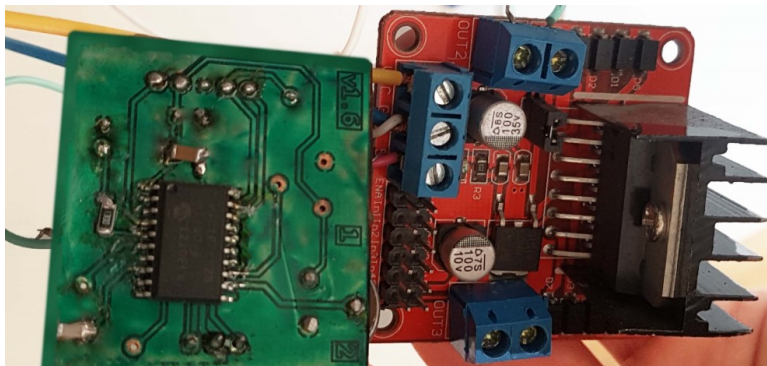
Tā kā novērota būtiska izkliede rezultātos, uzticamai dažādu konfigurāciju un parametru salīdzināšanai turpmākos eksperimentos nepieciešami kontrolēti apstākļi kustību enerģijas ievācējam. Dotajā gadījumā tas ir nemainīgs kustību ātrums un trajektorija, konstants attālums no spolēm līdz magnētam. Apskatītais elektromagnētiskais kustību enerģijas ievācējs izmanto rokas relatīvo pārvietojumu pret jostasvietu, atdarināt visu ekstremitātes kustību ir neefektīvi, jo lietderīgais diapazons ir tikai paša enerģijas ievācēja izmērs, ko šķērso magnēts. Elektromagnētiskais ģenerators sastāv no trim virknē slēgtiem plakanu spoļu masīviem, kur katras spoles diametrs ir līdz 2.5 cm, tātad nepieciešamais ceļa garums ir vismaz 7.5 cm. Magnēts, kas atrodas piedurknes galā, kustas pa riņķa līniju, kuras centrs ir plecs, bet, ņemot vērā pieauguša cilvēka rokas garumu, aptuveni 7.5 cm garš sektors var tikt pielīdzināts taisnai līnijai. Tā kā iekārta neimitēs visu rokas kustību, tās fiziskie izmēri būs mazāki, tamdēļ būs nepieciešams ieviest pauzi līdz ar kustības virziena maiņu, jo pretējā gadījumā iekārta liks magnētam pārāk bieži šķērsot spoles. Šim nolūkam iekārtā nepieciešama pozīcijas noteikšanas un laika atskaites sistēma.

Apkopojot prasības, var secināt, ka dotā uzdevuma realizācijai nepieciešama lineāra vadītāja, pa kuru pārvietot magnētu, ar vismaz gala pozīcijas sensoriem, pēc kuriem noteikt ceļā pavadīto laiku un virziena maiņas nepieciešamību. Šīm prasībām labi atbilst tintes drukas iekārtu galviņu vadītājas mehānisms (P3.1. att.), tam ir līdzstrāvas motors, siksnas pārvads un optiska sistēma pārvietojuma noteikšanai un pārvietojuma garums ap 30 cm. Šāda motora ātrums ir ērti vadāms ar impulsu platuma modulētu signālu, bet siksnas piedziņa ar nelielu pārnēsumu nodrošina lielu ātrumu, kustības virziena maiņai var lietot, piemēram, H-tilta (angļu val. — *H-bridge*) slēgumu. Pārvietojuma noteikšanai tiek lietota caurspīdīga lente ar secīgiem tumšiem reģioniem, tā ir piestiprināta vadītājam, bet uz kustīgās detaļas ir gaismas sensori. Zinot attālumu starp necaurspīdīgajiem reģioniem, iespējams noteikt pārvietošanās ātrumu visā kustības garumā. Izmantojot šādu jau gatavu mehānisko un optisko sistēmu, var būtiski paātrināt nepieciešamās iekārtas izstrādes laiku.



P3.1. att. Drukas iekārtas galviņu pārvietošanas vadītāja un optiskā sistēma.

Dotās mehāniskās sistēmas vadīšanai nepieciešams mikrokontroleris, kas uzraudzīs pozīciju, ātrumu un virzienu, izvēlēts *PIC16F1828* pieejamības un pietiekami plašā perifēriju klāsta dēļ. Motora vadībai un virziena maiņai izvēlēta H-tilta mikroshēma *L298N*, kas ļauj vienkāršot vadību no mikrokontrolera, jo ietver sevī nepieciešamos slēdžus un to vadības elementus un var vadīt motoru ar spriegumu zem 46 V. Prototips sastāv no loģiskā bloka ar mikrokontroleri un jaudas bloka, kur atrodas H-tilta mikroshēma un barošanas sprieguma lineārā regulācija (P3.2. att.).



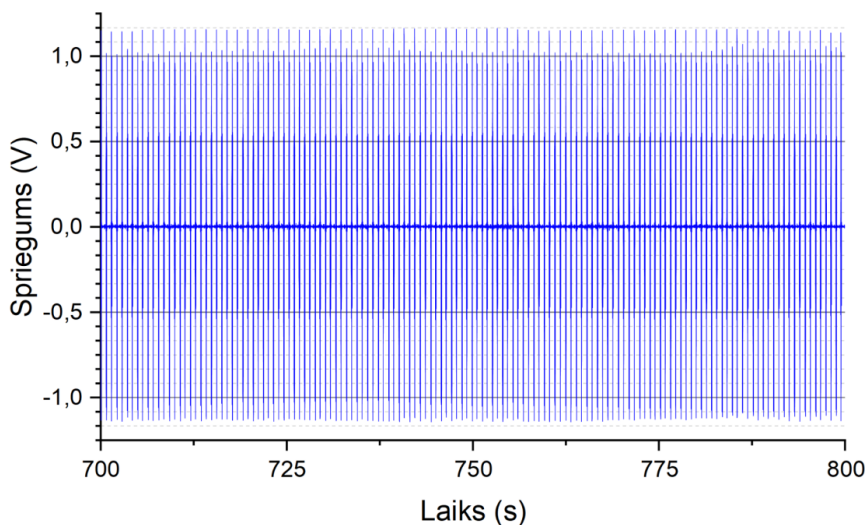
P3.2. att. Motora vadības prototips, vadības daļa (zaļā) un jaudas daļa (sarkanā).

Vadības algoritmam jāietver gan ātruma kontrole, gan gala pozīcijas noteikšana. Ātruma regulāciju var nodrošināt ar motora barošanas impulsu platuma modulāciju. Iegūstot atgriezenisko saiti no optiskā sensora, var izlemt, vai ātrumam jāpieaug, jāsamazinās, vai arī ir sasniegta gala pozīcija un jāmaina kustības virziens. Dotajā gadījumā var lietot mikrokontrolera tveršanas (angļu val. — *capture*) perifēriju, kas neatkarīgi no galvenā loģiskā kodola skaitīs ārēja signāla izmaiņas (secīgos tumšos un gaišos reģionus no lentes P3.1. att) un pēc noteikta to skaita sniegs ilgumu, tas ļauj noteikt gan noieto ceļu, gan tā laiku. Tā kā strauja ātruma maiņa kustības sākumā vai beigās rada stipras mehāniskās svārstības un papildus uzliek slodzi gan uz visu mehānisko sistēmu, gan motoru vadošajiem slēdžiem, jāievieš paātrinājuma un palēninājuma kontrole. Šis, protams, samazina lietderīgi izmantojamo vadītāja garumu, bet

tās kopējais pārvietojums ir 29 cm, tamdēļ, uztaisot šos posmus īsus, nepieciešamā funkcionalitāte necietīs.

Rezultātā galvenais algoritms ir sekojošs: pieslēdzot barošanu, impulsu platums tiek palielināts līdz kustības ātrums atbilst iestatītajam, tad impulsu platums tiek pielāgots ātruma uzturēšanai 5 % robežās, bet, pārvietojumam sasniedzot 2.5 cm līdz beigām, impulsu platums tiek samazināts laidenai bremsēšanai. Ceļa beigās motors tiek nobloķēts, savstarpēji savienojot tā izvadus ar H-tiltu, tiek ieturēta ieprogrammējama pauze, tad atsākas kustība jau pretējā virzienā. Papildus ieviesta detaļu bojājuma aizsardzība, kas atslēdz barošanu, ja pie maksimāla impulsu platuma, tādā lielākās pievadītās jaudas, netiek uztverta kustība vismaz sekundi. Visi galvenie parametri tiek pielāgoti empīriski, lai nodrošinātu stabilu darbību.

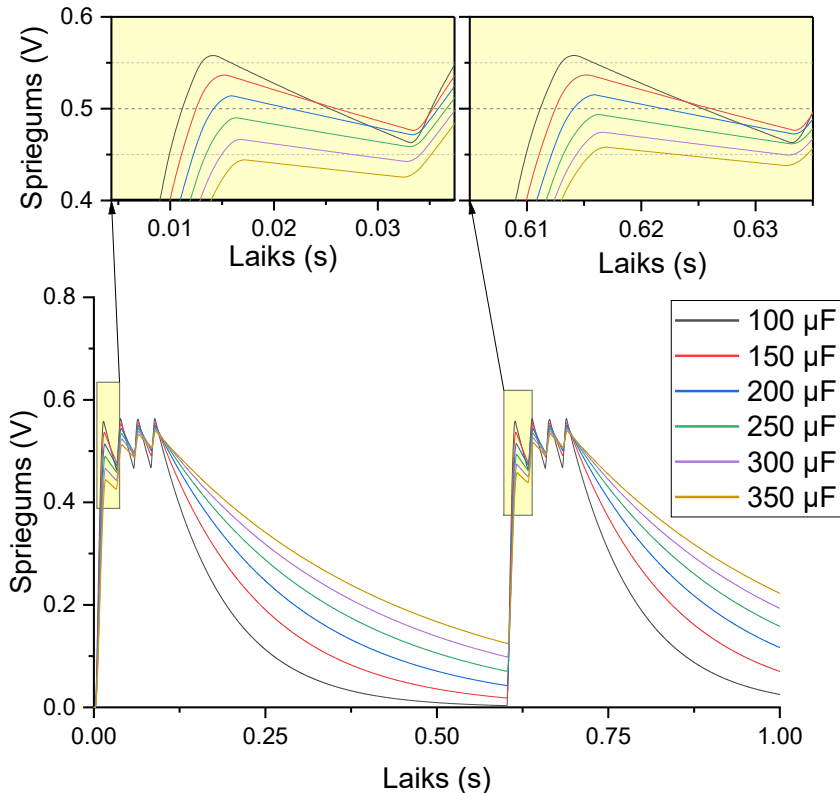
Veikta ilgstošu kustību pārbaude (10 minūtes), pārvietojot magnētu ar ātrumu 1 m/s virs enerģijas ievācēja un izmantojot tā signālu kā mehāniskā manipulatora darbību atspoguļojošu parametru. Pārbaudē novērots, ka pat ar elektrisko motora bloķēšanu apstāšanās ne vienmēr notiek tajā pašā punktā, kas ar laiku noved pie visas trajektorijas pārvietošanās. Šī iemesla dēļ izmainās laiks starp impulsiem atkarībā no virziena, jo enerģijas ievācējs vairs neatrodas trajektorijas centrā. Ar laiku arī pieaug motoram nepieciešamā jauda, to var izskaidrot ar mehāniskās sistēmas nepiemērotību tik ilgstošām kustībām, kas, ņemot vērā tās oriģinālo pielietojumu, ir saprotams. Tamdēļ algoritmā papildus ieviests lieki noietā ceļa skaitītājs, kas ļauj atgriezt manipulatoru patiesajā kustību sākuma pozīcijā. Rezultātā arī ilgstošās kustības pozīcija veiksmīgi stabilizējas, par ko liecina pastāvīgas amplitūdas un perioda ģenerētais signāls (P3.3. att).



P3.3. att. Noskaņota mehāniskā manipulatora ilgstošs mērījums ar elektromagnētisko kustību enerģijas ievācēju, tukšgaitas spriegums vēlinā posmā.

### Kapacitātes ietekme uz pirmajiem impulsiem pēc taisngriešanas

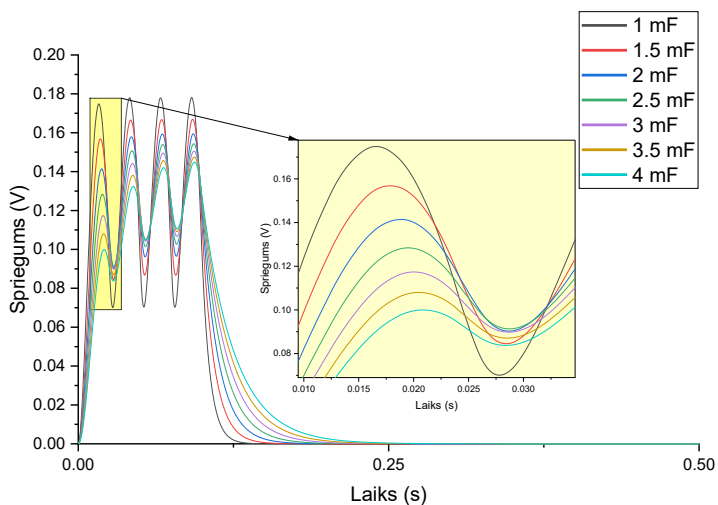
Nodaļā 4.2.1 apskatītā  $1\text{ k}\Omega$  slodzes pretestības modeļa simulācija ar četriem sinusoīdas pusperiodiem dota sekojošajā attēlā (P4.1. att.). Var novērot, ka līdz ar kapacitātes pieaugumu pirmā impulsa augstākā vērtība tikai krītas, toties ieplaka starp pirmajiem impulsiem uzrāda augstāko vērtību pie  $150\ \mu\text{F}$ , tā ir mazāka pie citām kapacitātes vērtībām. Dotais rezultāts atbilst matemātiskajam modelim (4.11. att., a). Papildus var novērot, ka kapacitātēm virs  $100\ \mu\text{F}$  spriegums starp impulsu kopām nepaspēj izlādēties līdz nullei, tālab augstākas kapacitātes signāli otrās impulsu kopas laikā satuvinās arvien vairāk. Tas apstiprina apakšnodaļā 4.2.1 izteikto minējumu, ka šāda impulsu kopu mijiedarbība neatbilst matemātiskajam modelim un laika gaitā var rezultēties ar mazāk izteiktu, pie atšķirīgas kapacitātes vai pat izpaliekošu optimālo gludinošā filtra vērtību.



P4.1. att. Izejas sprieguma simulācija (*SPICE*) pie dažādām gludinošā filtra kapacitātes vērtībām, kur  $r = 19\ \Omega$ ,  $f = 20\ \text{Hz}$ ,  $R_{sl} = 1000\ \Omega$ ; pirmo impulsu no abām kopām ir izcelts.

Zemākajai no modelētājām slodzes pretestībām  $6.5\ \Omega$ , kas aptuveni atbilst pārbaudītā sprieguma pārveidotāja *LTC3108* ieejas pretestībai, starp pirmajiem impulsiem var novērot

augstāko iekrituma spriegumu pie 2.5 mF (P4.2. att.), kas ir tuva atbilstība matemātiskajam modelim (4.12. att., b).



P4.2. att. Izejas sprieguma simulācija (*SPICE*) pie dažādām gludinošā filtra kapacitātes vērtībām, kur  $r = 19 \Omega$ ,  $f = 20 \text{ Hz}$ ,  $R_{sl} = 6.5 \Omega$ ; pirmo impulsu ir izcelts.



### Taisngriežu slēgumu salīdzinājums

Turpmākajās tabulās parādīti dati no mērījumiem tilta slēguma un sprieguma divkāršotāja slēguma ar dažādām kapacitātēm salīdzinājumam (nodaļa 5.1.1). Mērījumi veikti ar cilvēka rokas kustībām gan sāniem, stāvot uz vietas, kā arī ar automatizēto kustību avotu (Pielikums 3), kas ticis pielāgots konkrētā cilvēka roku kustību galvenajiem parametriem sološanas laikā. Tiek apskatīti dati līdz 2,55 V sasniegšanai uz izejas kondensatora, tātad fiksētai uzkrātajai enerģijai.

P5.1. tabula

Dati mērījumiem ar rokas kustībām.

	Tilts 1 mF		Reizinātājs 0,45 mF		Reizinātājs 1,8 mF		Reizinātājs 2,7 mF	
	Vērtība	Izkliede	Vērtība	Izkliede	Vērtība	Izkliede	Vērtība	Izkliede
Uzlādes laiks (s)	41,35	11,7 %	31,05	10,8 %	24,54	8,1 %	26,69	6,5 %
Ieejas enerģija (mJ)	15,9	3,5 %	15,0	1,8 %	14,7	6,3 %	15,7	1,2 %
Vidējā ieejas jaua ( $\mu$ W)	388,8	9,9 %	486,8	9,4 %	601,2	9,3 %	590,2	6,0 %
Vidējā izejas jaua ( $\mu$ W)	73,5	11,7 %	97,3	10,8 %	122,5	8,1 %	112,3	6,5 %
Lietderības koef. $\eta_0$ (%)	18,8	3,3 %	20,0	1,8 %	20,4	7,5 %	19,0	1,2 %
Taisngriežtais <i>RMS</i> (V)	0,441	6,4 %	0,468	7,2 %	0,570	4,1 %	0,547	3,1 %

P5.2. tabula

Dati mērījumiem ar automatizētu kustību avotu

	Tilts 1 mF		Reizinātājs 0,45 mF		Reizinātājs 1,8 mF		Reizinātājs 2,7 mF	
	Vērtība	Izkliede	Vērtība	Izkliede	Vērtība	Izkliede	Vērtība	Izkliede
Uzlādes laiks (s)	31,79	0,7 %	20,30	1,3 %	15,48	0,9 %	15,95	1,6 %
Ieejas enerģija (mJ)	14,5	0,6 %	14,0	0,4 %	14,5	1,6 %	15,4	1,1 %
Vidējā ieejas jaua ( $\mu$ W)	455,3	1,0 %	691,4	1,3 %	939,5	1,3 %	973,6	1,6 %
Vidējā izejas jaua ( $\mu$ W)	93,9	0,7 %	147,1	1,3 %	192,8	0,9 %	186,8	1,6 %
Lietderības koef. $\eta_0$ (%)	20,0	0,7 %	21,3	0,4 %	20,5	1,1 %	19,4	1,2 %
Taisngriežtais <i>RMS</i> (V)	0,499	0,4 %	0,636	0,5 %	0,721	0,4 %	0,710	0,8 %



**Ilgvars Gorņevs** dzimis 1988. gadā Rīgā. Rīgas Tehniskās universitātes (RTU) Elektronikas un telekomunikāciju fakultātē ieguvis inženierzinātņu bakalaura (2010) un maģistra grādu (2012) elektronikā. No 2014. līdz 2016. gadam strādājis RTU par laborantu, vēlāk – par zinātnisko asistentu. Kopš 2017. gada ir RTU Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultātes Tehniskās fizikas institūta pētnieks. Zinātniskās intereses saistītas ar elektriskajiem mērījumiem, datu analīzi un vizualizāciju, procesu automatizāciju, kā arī dažādu sistēmu dizainu un optimizāciju.