



RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Ilgvars Gorņevs

CILVĒKA ENERĢIJAS IEVĀCĒJS KĀ PRAKTISKI IZMANTOJAMS BAROŠANAS AVOTS ELEKTRONISKĀM IERĪCĒM

Promocijas darba kopsavilkums



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 darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji

profesors *Dr. phys.*

JURIS BLŪMS

profesors *Dr. sc. ing.*

DMITRIJS PIKUĻINS

RTU Izdevniecība

Rīga 2024

Gorņevs, I. Cilvēka enerģijas ievācējs kā praktiski izmantojams barošanas avots elektroniskām ierīcēm. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2024. 39 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.

Vāka attēla autors Ilgvars Gorņevs

<https://doi.org/10.7250/9789934370588>

ISBN 978-9934-37-058-8 (pdf)

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.

SAĪSINĀJUMI

EDS – elektrodzinējspēks;

MOP – metāla-oksīda-pusvadītāja (lauktranzistori);

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

EM – elektromagnētisks;

TE – termoelektrisks.

SATURS

Saīsinājumi	4
Ievads.....	6
1. Enerģijas ievākšanas un izmantošanas iespējas	12
2. Elektromagnētiskais kustību enerģijas ievācējs	14
3. Pašrezonanses pārveidotāju darbības analīze un efektivitātes novērtēšana ar elektromagnētisko enerģijas ievācēju kā avotu	18
4. Taisngriešanas posma optimizācija ar gludinošā filtra kapacitāti	22
5. Mazjaudas barošanas avota un no ārējiem avotiem neatkarīgas datu mērīšanas sistēmas izveide.....	26
Nobeigums.....	32
Izmantotās literatūras saraksts.....	35

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 nebūtu jūtamas un netraucētu 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 paildzina 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 izpaušmēm 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 lietojums 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 enerģijas 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.

Mērķa sasniegšanai noteikti šādi **pamatuzdevumi**:

1. Apkopot un novērtēt publicētos kustību enerģijas ievākšanas, pārveidošanas un izmantošanas risinājumus, nosakot to priekšrocības un trūkumus.
2. Raksturot neinerģiāla 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., Terļeckā, 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 “Enerģētiski neatkarīga elektroniskā sistēma un paņēmiens cilvēka un/vai vides parametru noteikšanai un komunikācijai” (LV15580B, 20.12.2021), Juris Blūms, Ilgvars Gorņevs, Vilnis Jurkāns, Gaļina Terļeckā.

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 ģeneratoru 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 divkāšotāja 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

Nodaļā apskatītas publicētās iespējas iegūt elektroenerģiju no neviļus notiekošajām kustībām – enerģijas ievākšanu – un pārveidot to līdz izmantojamam spriegumam, kā arī novērtētas iespējas praktiski izmantot nelielu elektroenerģijas daudzumu. Starp mehāniskās enerģijas ievākšanas principiem ar izstrādes vienkāršību un potenciālo daudzveidību var izcelt elektromagnētisko principu, kas arī izvēlēts tālākajam pētījumam. Tam ģenerēšanai nav vajadzīga sākotnēja uzlāde, kā tas ir elektrostatiskajiem ievācējiem [29], [30], un īpaši materiāli, kā tas ir pjezoelektriskajiem [31], [32] un triboelektriskajiem ievācējiem [33], [34]. Lai gan triboelektriskais ģenerācijas princips patlaban 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]–[20].

Ir publicēti dažādu konstrukciju enerģijas ievācēji ar elektromagnētisko principu cilvēka kustībām, augstākam sniegunam tie apvienoti hibrīdajos slēgumos ar citu principu ievācējiem [35]–[37]. 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], [36]–[38], pārbaude ar brīvām kustībām ir visai izplatīta [15], [39]–[42], bet rezultātu atkarotamība un izkliede tiek minēta ļoti reti [43]. Nenoliedzami, brīvas kustības būs tās, ar kurām rezultātā saskarsies enerģijas ievācēji, taču 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 [40], [44].

Ģenerētā sprieguma pārveidošanu uzkrāšanas nolūkā pārsvarā realizē ar diožu tilta taisngriezi vai sprieguma daudzkārstotāju, 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 [40], komerciāliem galda higrometriem [15], [38], ciparu temperatūras sensora mikroshēmai [41], cilvēka pulsa sensoram [37] un litija akumulatora uzlādei GPS iekārtā [36]. 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 nepieciešamā daudzuma uzkrāšanas ilguma, jo publikācijās bieži tiek sniegta piķa vērtības jaudai, turklāt arī tās mēdz tikt pārspīlētas, piemēram, rēķinot maiņsprieguma vērtībām starp maksimumiem (angļu val. – *peak-to-peak voltage*) [17], [36]. Vidējā izejas jauda, ko uzrāda, piemēram, hibrīdie enerģijas ievācēji, cilvēkam staigājot, ir prezentēta plašā diapazonā – zem mikrovata [44], [45], pāris mikrovati [15], [40], vairāki desmiti mikrovatu [37], [41] un pat pāris milivatu [38].

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 [36], [39], [44]–[46]. 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 tām nebūs jāiekļaujas ierobežotos rezonanses nosacījumos, kas ar cilvēka kustību nepastāvīgo dabu var būt sarežģīti.

Nodaļā apskatīts elektromagnētiskais kustību enerģijas ievācējs, kurā lietotas plakanas spirālveida spoles un plakans magnēts (2.1. a–c att.). Enerģijas ievācēja raksturošanai piedāvāts vienkāršots matemātiskais modelis (2.1. vienādojums), kas pieņem, ka homogēns magnētiskais lauks pārklāj visu ģeneratoru. Tas parāda viena tinuma apaļas spoles iegūtās elektroenerģijas atkarību no tās rādiusa, izmantotā vadītāja elektriskajām īpašībām, magnēta indukcijas un kustības ātruma. Pieņemts, ka slodze ir salāgota, proti, tās pretestība vienāda ar paša ģenerators iekšējo pretestību.

$$E = 0,665 \cdot \frac{B^2 r^2 v S_{\text{šķērs}}}{\pi \rho}, \quad (2.1)$$

kur E – enerģija, kas izdalās uz slodzes, J;

B – magnētiskā lauka indukcija, T;

r – spoles rādiuss, m;

v – magnēta kustības ātrums, m/s;

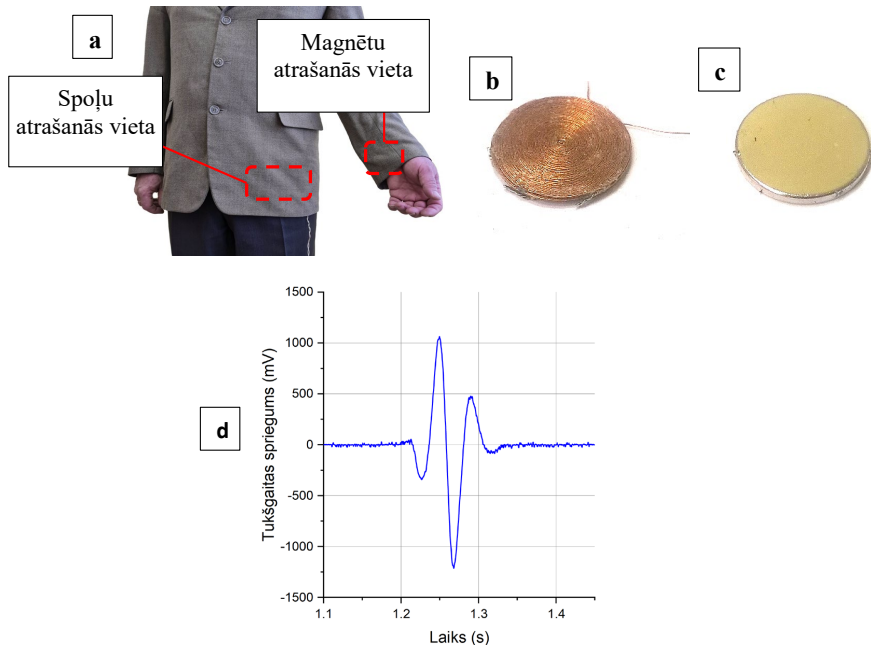
$S_{\text{šķērs}}$ – spoles vadītāja šķērsriezuma laukums, m²;

ρ – vadītāja materiāla īpatnējā pretestība, $\Omega \cdot m$.

2.1. vienādojums raksturo teorētiski iegūstamo enerģiju no enerģijas ievācēja konkrēto parametru kopuma. Modelis ir vienkāršots, tāpēc tas nav domāts kvantitatīvi precīzām vērtībām, bet gan sakarību novērtējumam. No tā var secināt, ka augstākas enerģijas iegūšanai primāri jāpalielina spoles rādiuss un magnētiskā lauka indukcija, jo enerģija ir atkarīga no šo parametru vērtību kvadrātiem. Tā kā magnētiskajam laukam ir jānosedz viss induktora izmērs, spoles izmērus un līdz ar to enerģijas daudzumu ierobežo magnēta laukums, tāpēc izriet, ka visizdevīgāk lietot magnēta izmēriem atbilstošu spoli. Augstāka sprieguma iegūšanai būtu nepieciešams izmantot vairākus vijumus, bet līdz ar to vada šķērsriezuma laukums $S_{\text{šķērs}}$ samazināsies, tātad – iegūstamā enerģija kritīsies. Lai pieaugtu vijumu skaits ar nemainīgu $S_{\text{šķērs}}$, vadītāja platumam jāsamazinās, bet dziļumam jāpieaug, toties tas rada sarežģījumus spoļu izveidē nestandarta vada formas dēļ. Šīs problēmas risinājumam var izvēlēties mazāk vijumu, tātad – resnāku vadu, bet vairākas spoles izvietot citu virs citas, saslēdzot tās virknē. Rezultātā magnētiskā lauka šķērsoto vada šķērsriezuma laukums pieaugs, bet virknes slēgums

nodrošinās spoļu slāņu summāro spriegumu. Paralēlais slēgums nebūtu izdevīgs tamdēļ, ka, esot citai virs citas, dilstošā magnētiskā lauka dēļ pat fiziski vienādas spoles ģenerētu atšķirīgu spriegumu, un tā rezultātā tās tiktu savstarpēji slogotas. Praktiskos apstākļos izmēru ierobežo pieejamā vieta, savukārt spoļu slāņu skaitu – magnētiskā lauka indukcija.

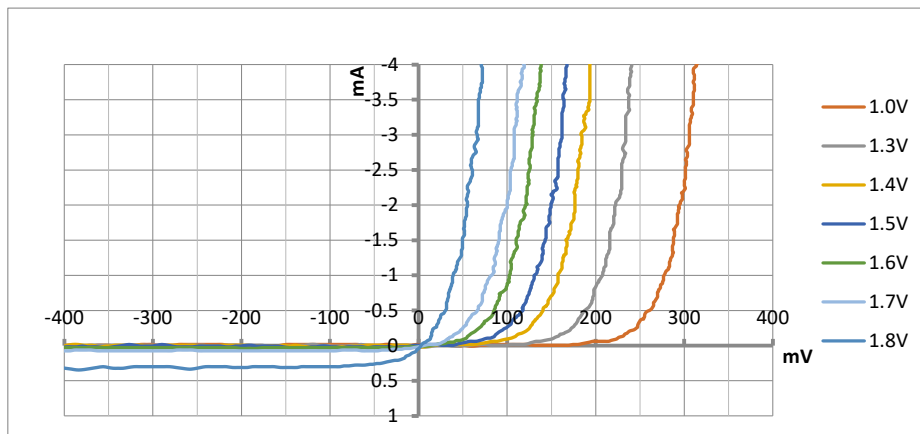
Lai novērtētu šī enerģijas ievācēja potenciālu turpmākai izmantošanai, tā prototips ar spolēm apģērba sānos un magnētiem piedurknē (2.1. a–c att.) pārbaudīts praktiski, soļojot ar fiksētu ātrumu. Vairākslāņu spoles savstarpēji saslēgtas tā, lai to ģenerētie impulsi pārklātos summētos. Atkarībā no pieejamās vietas, šī ievācēja sniegumu var uzlabot, lietojot vairākus magnētus virknē ar pretēji vērstu polaritāti, tādējādi iegūstot līdz 1,2 V amplitūdu. Ģenerācija notiek secīgu impulsu kopu veidā, kas atkārtojas ar vismaz 500 ms periodu, katra parasti ietver divus asimetriskus sinusoīdas periodus (2.1. d att.). Ievācējam jānodrošina abu sastāvdaļu atbilstošs izvietojums apģērbā, lai kustības laikā tie pēc iespējas simetriskāk šķērso viens otru, tātad sniegums papildus ir atkarīgs no valkātāja stājas un gaitas.



2.1. att. Elektromagnētiskā kustību enerģijas ievācēja prototips vīriešu žaketē (a), atsevišķi viena daudzslāņu spole (b) un magnēts (c) ar 20 mm diametru, kā arī soļošanas eksperimentā iegūtā tukšgaitas sprieguma paraugs no rokas kustības vienā virzienā (d).

Iegūtā sprieguma amplitūdas lielākās vērtības ir teorētiski pietiekamas diožu taisngriežim, bet potenciāli augstākas efektivitātes dēļ piedāvāta metode zema maiņsprieguma taisngriešanai ar MOP lauktranzistoru, kuram pievadīts konstants aizvara spriegums tuvu atvēršanās sliekšņa līmenim. Novērtētas voltampēru raksturlīknes vairākiem MOP lauktranzistoriem pie dažāda aizvara sprieguma, novērots, ka tās atbilst diožu raksturlīknēm, bet tiešā un sprostvirziena

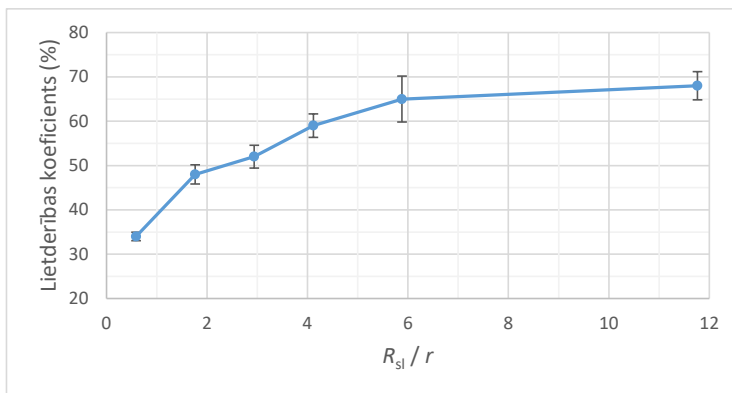
strāvu nosaka pievadītais aizvara spriegums (2.2. att.). Tādējādi iegūstams iestatāms taisngriešanas elements.



2.2. att. Voltampēru raksturlīknes IRF7832 MOP lauktranzistoram atkarībā no aizvara sprieguma.

Lai apzinātu šāda elementa izmantošanas ieguvumus un zudumus, salīdzināšanai ar Šotki diodi izvēlēts lauktranzistors ar iestatītu desmitkārtīgi augstāku noplūdes strāvu un trīs reizes lielāku tiešā virziena strāvu nekā konkrētai diodei. Savstarpēji salīdzinot minēto elementu pusperioda taisngriežus ar 220 mV amplitūdas ieejas signālu no elektromagnētiskā kustību enerģijas ievācēja un ņemot vērā noplūdes zudumus sprostvirzienā, 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 šī metode praktiskām shēmām, domājams, ir nelietderīga, kā arī ir nepieciešama padziļināta izpēte voltampēru raksturlīknes atkarībai no citiem parametriem, piemēram, temperatūras.

Eksperiments 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, lai iegūtu abus signāla pusperiodus un samazinātu sprostvirziena noplūdes. Mērījumi veikti ar rezistīvu slodzi no 10 Ω līdz 200 Ω . Efektivitāte sagaidāmi pieaug līdz ar slodzes vērtību, bet sāk piesātināties virs aptuveni sešas reizes augstākas slodzes vērtības nekā avota iekšējā pretestība, sasniedzot 68 % pie pretestību attiecības 11,8 (2.3. att.).



2.3. att. Elektromagnētiskā kustību enerģijas ievācēja taisngriešanas efektivitāte ar Šotki diožu (*DFLS120L*) pilnā tilta slēgumu atkarībā no slodzes (R_{sl}) un avota iekšējās pretestības (r) attiecības.

Var secināt, ka izveidotā kustību enerģijas ievācēja prototipa parametri ir pietiekami efektīvai plašpatēriņa diskrētu taisngriešanas elementu izmantošanai, bet arī labākā uzrādītā snieguma gadījumā – 169 mV uz 200 Ω slodzes – izejā nebūs pietiekami augsts spriegums elektronisko ierīču barošanai. Konkrētajam ievācējam raksturīgais pārtrauktas ģenerācijas raksturs traucē sprieguma reizinātāja izmantošanai, jo pauze starp impulsu kopām (2.1. d att.) 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 apskatītais elektromagnētiskais kustību enerģijas ievācējs ar taisngriezi 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.

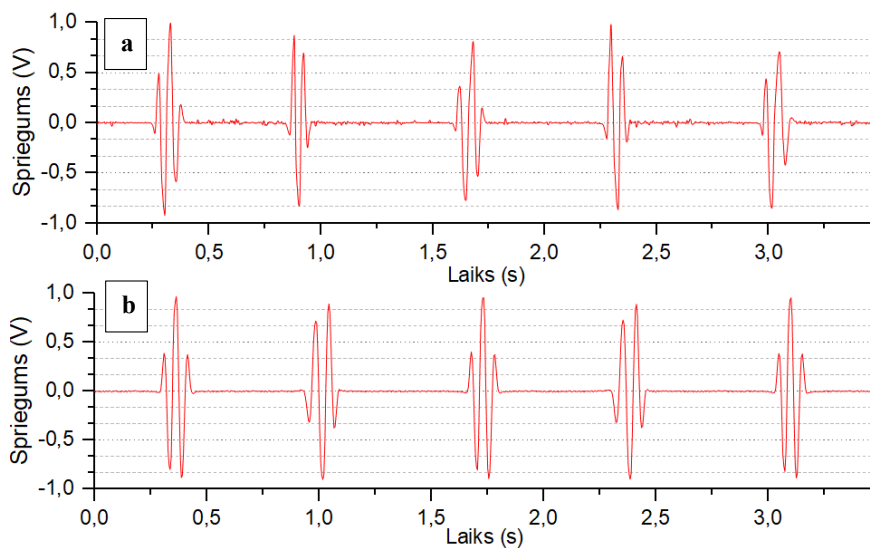
Apskatot esošos elektroenerģijas pārveidotāju variantus zema sprieguma avotiem pirmajā nodaļā, izvēlēts slēgums ar transformatoru un tranzistoru ieejā, kas tam bez ārējiem barošanas avotiem ļauj pašrezonansē cikliski atslēgt un pieslēgt ieejas signālu, iegūstot augstu sprieguma paaugstināšanas koeficientu. Šajā principā balstās dažādi komerciāli pārveidotāju risinājumi, kas potenciāli atvieglo enerģijas ievācēju sistēmu izstrādi un pielāgošanu. Tomēr tie ir domāti līdzspriegumam, kas šajā 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* (3.1. tab.), pētot to izmantošanas lietderību elektromagnētiskā enerģijas ievācēja gadījumā. Izvēle balstījās uz īpaši zemu, bet atšķirīgu startēšanās spriegumu, plašā diapazonā atšķirīgu ieejas pretestību, iespējām iegūt 5 V izejas spriegumu un, protams, praktisko pieejamību. Salīdzināšanas mērķis ir nevis konkrēto modeļu pārbaude, bet gan noteiktā pārveidošanas principa lietojamības novērtējums konkrētajā darbības režīmā, kas atšķiras no ražotāja paredzētā, atkarībā no pārveidotāja ieejas parametriem. Tādējādi var noteikt iespējas un izvirzīt priekšnosacījumus šī pārveidošanas principa lietošanai neinerģiskam elektromagnētiskajam cilvēka kustību enerģijas ievācējam, kā arī citu ievācēju gadījumos, kam raksturīga pārtraukta un mainīga ģenerācija.

3.1. tabula

Zemsprieguma elektroenerģijas pārveidotāju galvenie raksturlielumi atbilstoši ražotāju datiem [47]–[49].

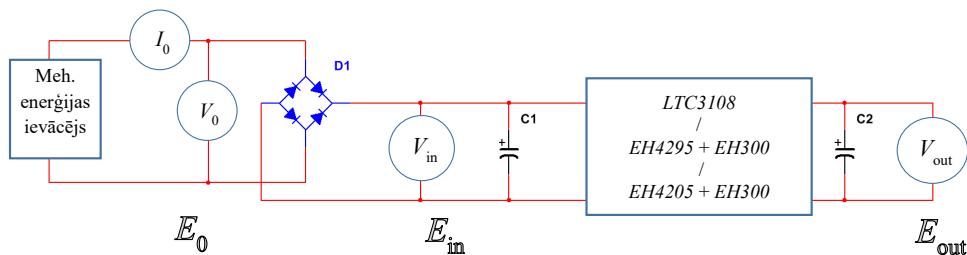
	Startēšanās spriegums	Ieejas pretestības diapazons	Lietderības koef. diapazons
<i>LTC3108</i>	20 mV	2,5–6,5 Ω	5–40 %
<i>EH4295</i>	60 mV	700–1100 Ω	30–55 %
<i>EH4205</i>	75 mV	50–90 Ω	29–55 %

Ekspierimenta realizācijai kontrolētos apstākļos izveidots mehānisko kustību avots, lai elektromagnētiskajam enerģijas ievācējam varētu nodrošināt nemainīgu ģenerāciju. Tā ātrums un periods pielāgoti konkrēta cilvēka roku kustību parametriem, lai kontrolēto apstākļu mērījumu rezultāti būtu salīdzināmi ar reālo apstākļu rezultātiem (3.1. att.). Iegūtās impulsu kopas ir 150 ms ilgas un atkārtojas ar vidēji 660 ms periodu.



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

Dažādo pārveidotāju darbības raksturošanai ir izveidots elektriskais slēgums, kas sastāv no žaketē iestrādāta kustību enerģijas ievācēja, taisngriešanas elementiem ar filtrējošo kondensatoru, maināmas zemsprieguma pārveidotāju daļas un izejas kondensatora (3.2. att.). Tiek mērīta ievācēja izejas strāva un spriegums, kā arī spriegums pēc taisngrieža un pārveidotāja izejā. Elektriskajai shēmai izvēlēts iepriekšējā nodaļā pārbaudītais pilnā tilta taisngriezis. Visiem zemsprieguma pārveidotājiem ieejā izvēlēts 1 mF filtrējošais kondensators (C1), arī elektroenerģijas uzkrāšanas elements ir 1 mF (C2) kondensators.



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

Kustību enerģijas ievācēja darbības pārbaude notika kontrolētos apstākļos, izmantojot automatizētu mehānisko manipulatoru, un reālos soļošanas eksperimentos, kuros cilvēks ar žaketi 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.

Gan kontrolētu apstākļu eksperimentos, kur ieejas signāla amplitūda un periods nemainās laikā, gan reālos mērījumos, kur parādās nekontrolējamas ģenerētā enerģijas daudzuma izmaiņas, šis zemsprieguma pārveidošanas princips bija spējīgs nodrošināt sprieguma paaugstināšanu un elektroenerģijas uzkrāšanu kondensatorā. Mērījumi uzrādīja sakrītošu ieejas enerģijas, izejas sprieguma un efektivitātes tendenci. Iegūtie dati ļauj secināt, ka apskatītais pārveidotāju princips ir sekmīgi izmantojams ar pārtrauktu un mainīgu ieejas signālu. Skaitliski rezultāti apkopoti 3.2. tabulā līdz ar laiku, kurā tie sasniegti. Teorētiski novērtētas izmantošanas iespējas uzkrātajai elektroenerģijai pie atbilstošā sprieguma. Aprēķināts, ka ar cilvēka kustībām praktiski iegūto labāko sniegumu (2,8 V, 3,8 mJ) būtu pietiekami zema patēriņa mikrokontrolera barošanai, tam veicot dažādas intensīvas operācijas. Tātad šai sistēmai ir iespējams kļūt par praktiski lietojamu elektrobarošanas avotu.

3.2. tabula

Kontrolēto un reālo apstākļu iegūtā sprieguma un kopējā lietderības koeficienta salīdzinājums

Parametrs	Pārveidot. modelis	Mehāniskais manipulators		Cilvēks	
		Vērtība	Laiks	Vērtība	Laiks
Lielākais izejas spriegums V_{out} (enerģija E_{out})	<i>EH4295</i>	4,97 V (11,7 mJ) (pie $\eta_0 = 17,4 \%$)	282 s	2,83 V (3,8 mJ) (pie $\eta_0 = 11,1 \%$)	350 s
	<i>EH4205</i>	4,66 V (10,4 mJ) (pie $\eta_0 = 6,6 \%$)	350 s	2,50 V (2,9 mJ) (pie $\eta_0 = 4,7 \%$)	350 s
	<i>LTC3108</i>	2,27 V (2,3 mJ) (pie $\eta_0 = 1,3 \%$)	350 s	1,02 V (0,5 mJ) (pie $\eta_0 = 0,6 \%$)	350 s
Lielākā kopējā sistēmas efektivitāte η_0	<i>EH4295</i>	22,7 % (pie $V_{out} = 4,56 \text{ V}$)	184 s	13,2 % (pie $V_{out} = 2,37 \text{ V}$)	156 s
	<i>EH4205</i>	9,7 % (pie $V_{out} = 2,37 \text{ V}$)	68 s	5,8 % (pie $V_{out} = 1,56 \text{ V}$)	110 s
	<i>LTC3108</i>	1,3 % (pie $V_{out} = 2,27 \text{ V}$)	350 s	0,6 % (pie $V_{out} = 1,02 \text{ V}$)	350 s

Novērotās rezultātu atšķirības pie dažādā ieejas signāla un pārveidotāju ieejas parametriem ļāva novērtēt to ietekmi uz kopējo sistēmas darbību. Tālab, lietojot elektromagnētisko cilvēka kustību enerģijas ievācēju kā avotu šī principa zemsprieguma pārveidotājiem, jāņem vērā vairāki priekšnosacījumi. Ne visus no tiem iespējams novērtēt ar pārveidotāju ražotāju sniegtajiem datiem, tālab nepieciešams salīdzinājums sagaidāmajos darbības apstākļos:

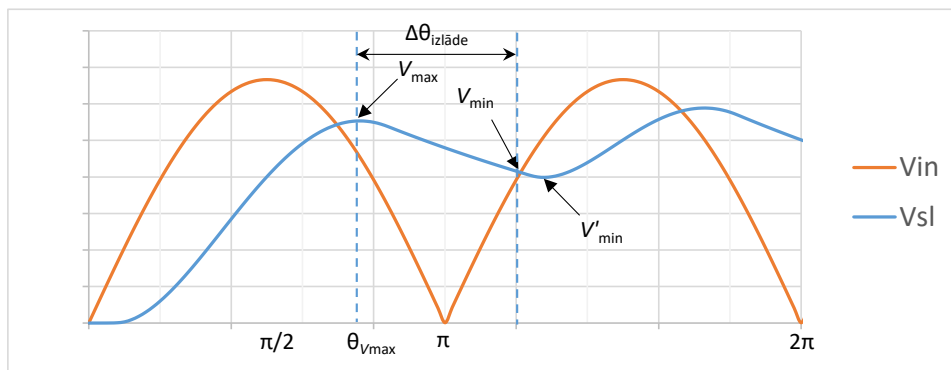
- nepieciešams taisngriešanas posms, kam izejā jānodrošina pēc iespējas mazāks sprieguma iekritums ģenerēto impulsu laikā, bet, impulsu kopai ilgstot ap 150 ms vai vairāk, ģenerācijas paužu aizpildīšana ir otršķirīga;
- jāpievērš uzmanība pārveidotāju ieejas pretestības un efektivitātes atkarībai no ieejas sprieguma – avots ar taisngriezi tiks slogots atbilstoši tai, un spriegums tieksies uz augstākās ieejas pretestības reģionu, kas var būt mazāk efektīvs kādai no sistēmas daļām;

- pasīvās taisngriešanas zudumu samazināšanai pārveidotāja ieejas pretestībai jābūt augstākai par avota iekšējo pretestību. Balstoties izmantotā diožu tilta efektivitātes mērījumos 2. nodaļā, ieteicama divas līdz sešas reizes augstāka slodzes pretestība par ievācēja iekšējo pretestību; vēl augstāka vērtība ieviesīs salīdzinoši nebūtisku tilta efektivitātes pieaugumu, toties samazinās pārveidotāja ieejas jaudu;
- tā vietā, lai primāri vadītos pēc pārveidotāju augstākās lietderības datiem, enerģijas ievācējiem, kuriem raksturīgs stipri mainīgs ģenerētais spriegums, jānosaka sagaidāmais sprieguma diapazons pēc taisngriešanas un jāpiemeklē pārveidotājs ar stabilāku lietderību tajā;
- pārveidotāju efektivitāte mainās līdz ar izejas uzkrājošā elementa spriegumu, tālab jānovērtē, vai tā būtiski nekrītas pirms nepieciešamā sprieguma vērtības; tādā gadījumā jāpaaugstina pārveidotāja ieejas sprieguma līmenis vai arī jāizvēlas patērētājs ar atbilstoši zemāku darba spriegumu.

4. TAISNGRIEŠANAS POSMA OPTIMIZĀCIJA AR GLUDINOŠĀ FILTRA KAPACITĀTI

Kā parādīja iepriekšējās nodaļās raksturotie mērījumi, būtiskus enerģijas zudumus sprieguma pārveidošanā ievieša taisngriešanas posms. Viens risinājuma variants būtu izmantot zemāka sprieguma krituma taisngriešanas elementus vai arī aktīvo taisngriešanu, bet tas nesamazina sprieguma iekritumus, kas, kā tika novērots, ietekmē apskatītā pārveidošanas principa efektivitāti. Tāpēc jācenšas iegūt ne vien augstāku, bet arī stabilāku signālu pārveidotāju ieejā. To nodrošina filtrējošais jeb gludinošais kondensators pēc taisngrieža, bet arī tas pašsaprotami iespaido zudumus taisngriezī, kā novērots, salīdzinot rezultātus, kas doti 2. un 3. nodaļā, tādām pašām tilta slēgumam ar tīri rezistīvu slodzi ir augstāka efektivitāte nekā pielīdzināmas pretestības pārveidotājam ar filtrējošo kondensatoru. Tālab šīs nodaļas mērķis ir apzināt gludinošā filtra kapacitātes ietekmi uz taisngrieža slēguma sniegumu, izmantojot analītisku modeli un eksperimentālu pārbaudi.

Literatūrā pieejamās kondensatora ietekmes analīzes metodes apskata laikā nepārtraukta un stabila signāla gadījumus, kas neatbilst konkrētā kustību enerģijas ievācēja ģenerācijas dabai, – ģenerētie impulsi ir atsevišķu kopu veidā (3.1. att.). Tamdēļ tika izveidots analītisks modelis kapacitātes ietekmes novērtējumam pilnā tilta slēgumā, tas domāts paredzēt V_{\max} un V_{\min} vērtības taisngrieztajam signālam starp pirmajiem diviem impulsiem (4.1. att.). Lai vienkāršotu modeli, tā mērķis ir noteikt konkrēto sprieguma vērtību atkarību no ķēdes un signāla parametriem, nevis precīzas absolūtās vērtības. Tālab netiek ņemts vērā tas, ka filtrējošais kondensators turpina saņemt enerģiju no avota arī nedaudz pēc V_{\max} sasniegšanas, kas ir iespējams sākotnēji zemās slodzes un avota sprieguma starpības dēļ, kad diodes turpinātu vadīt strāvu. Līdzīgi ir ar zemāko spriegumu V_{\min} , kas iespējams sasniegt vēl mazāku vērtību V'_{\min} . Izlāde sākas un beidzas nedaudz vēlāk, tāpēc, apskatot relatīvās vērtības, šie efekti daļēji kompensē viens otru. Modeli raksturo 4.1.–4.4. sakarības.



4.1. 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, $\Delta\theta_{\text{izlāde}}$ – modelī pieņemtais kondensatora izlādes reģions, $\theta_{V_{\text{max}}}$ – augstākā sprieguma sasniegšanas moments.

$$V_{\max} = \frac{V_{\text{in}} \cdot R_{\text{sl}}}{\sqrt{(r + R_{\text{sl}})^2 + (2\pi f C r R_{\text{sl}})^2}}, \quad (4.1)$$

$$V_{\text{izlāde}} = \frac{V_{\text{in}} \cdot R_{\text{sl}}}{\sqrt{(r + R_{\text{sl}})^2 + (2\pi f C r R_{\text{sl}})^2}} \cdot e^{-\frac{\theta - \pi + \text{ArcTan}\left[\frac{r + R_{\text{sl}}}{2\pi f C r R_{\text{sl}}}\right]}{2\pi f C R_{\text{sl}}}}, \quad (4.2)$$

$$V_{\min} = V_{\text{izlāde}} = V_{\text{in}} \quad \text{pie } \pi \leq \theta \leq 1,5\pi \quad (4.3)$$

$$C_{\text{robež}} = \frac{T}{5 R_{\text{sl}}}, \quad (4.4)$$

kur R_{sl} – slodzes pretestība, Ω ;

r – ķēdes kopējo zudumu pretestība, Ω ;

C – filtrējošā kondensatora kapacitāte, F;

f – ieejas signāla frekvence, Hz;

V_{in} – ieejas signāla amplitūda, V;

V_{\max} – modelī pieņemtā augstākā kondensatora un slodzes sprieguma vērtība, V;

$V_{\text{izlāde}}$ – kondensatora spriegums izlādes procesā, V;

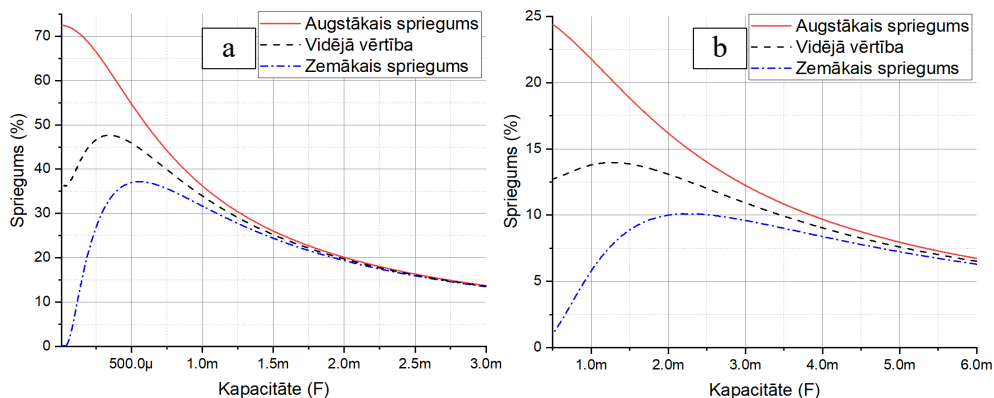
θ – signāla fāze, rad;

V_{\min} – modelī pieņemtā zemākā kondensatora un slodzes sprieguma vērtība, V;

$C_{\text{robež}}$ – filtrējošā kondensatora vērtība, līdz kurai izpildās modeļa pamatnosacījumi, F;

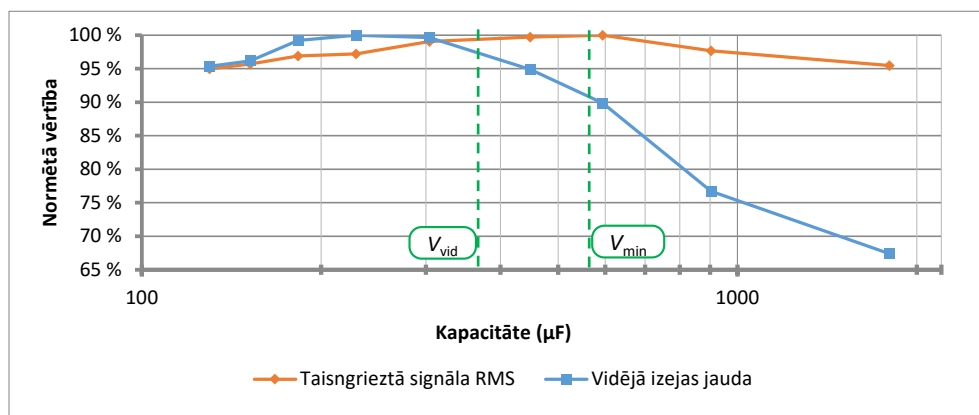
T – laiks starp ieejas signāla impulsu kopām, s.

Modelis atrisināms ar grafisko metodi un paredz, ka atkarībā no signāla frekvences f , zudumu r un slodzes R_{sl} parametriem pastāv kapacitātes vērtība, pie kuras sprieguma iepakla starp impulsiem būs visaugstākā (4.2. att.). Atkarībā no shēmas parametriem augstākā iepakla nodrošina lielāko taisngrieztā signāla vidējo vērtību. Rezultāti pārbaudīti datorsimulāciju vidē ar nelineāriem taisngriešanas elementiem un dažāda garuma signālu, taisngrieztā sprieguma vidējai kvadrātiskajai (RMS) vērtībai atbilstoši uzrādot augstāko vērtību. Novērots, ka nelineāro taisngriešanas elementu ieviestie papildu zudumi ķēdē pazemina optimālo 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 iegūto vidējā un V_{\min} sprieguma pīķa kapacitātēm. Garākām signāla impulsu kopām kapacitātes vērtība ir virs analītiski paredzētās, bet tā nepieaug lineāri, piemēram, 60 ieejas signāla periodu garai kopai kapacitāte ir par aptuveni 34 % augstāka nekā analītiski paredzētā V_{\min} pīķa vērtība. Rezultāti pierāda, ka izveidotais analītiskais modelis ir izmantojams taisngrieža gludinošās kapacitātes optimālo vērtību diapazona paredzēšanai, aizstājot laika un resursu ietilpīgu datorsimulāciju. Tas tika lietots arī sprieguma divkārtotāja slēgumam, kam, salīdzinot ar tilta slēgumu, datorsimulācija uzrādīja sagaidāmi mazāku optimālās kapacitātes vērtības atbilstību modelī paredzētajai, bet optimālās kapacitātes eksistence pārtrauktam ieejas signālam apstiprina šī efekta pastāvēšanu dažādās ķēdēs, kurās kondensators tiek periodiski uzlādēts no nulles ar impulsu kopām.



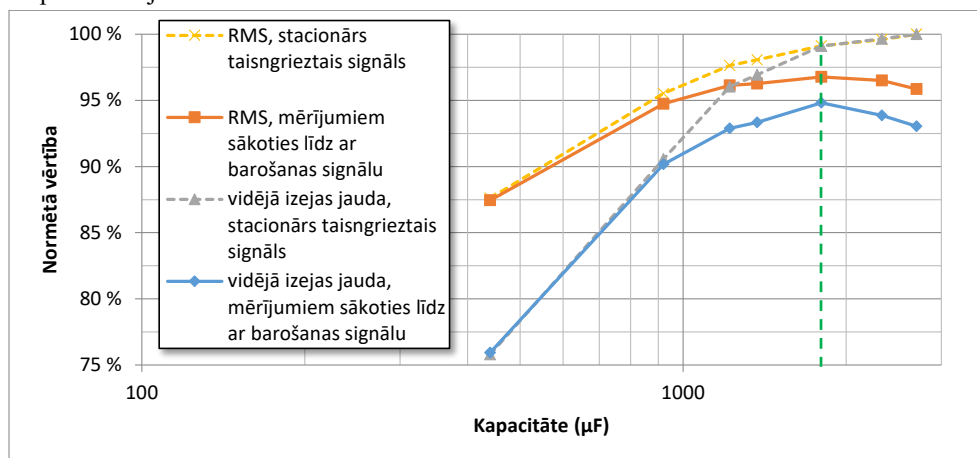
4.2. att. Piedāvātā analītiskā modeļa rezultāti. Augstākā (V_{max}) un zemākā (V_{min}) sprieguma atkarība no kapacitātes pirmā taisngrieztā sinusoīdas perioda laikā, izmantojot apskatītā elektromagnētiskā enerģijas ievācēja parametrus (2. nodaļa) un dažādu slodzi – 50Ω (a) un $6,5 \Omega$ (b). Spriegums izteikts procentos no ieejas amplitūdas.

Veikta eksperimentālā pārbaude ar pārtrauktas sinusoīdas signāla avotu, kura parametri ir tuvi iepriekš izmantotajam elektromagnētiskajam kustību enerģijas ievācējam, kā arī ar atbilstošām diodēm tilta slēgumā un elektroenerģijas pārveidotāju kā iepriekšējos eksperimentos (3. nodaļa). Rezultāti apstiprina modelētās optimālās kapacitātes eksistenci paredzētajā diapazonā, uzrādot augstāko vidējo kvadrātisko spriegumu pēc taisngrieža (4.3. att.). Apskatītā zemsprieguma pārveidotāja izejas jaudai augstākā vērtība ir pie zemākas kapacitātes vērtības nekā optimālā augstākajam vidējam spriegumam, tas saskan ar promocijas darba 3. nodaļā raksturoto konkrētā pārveidotāja modeļa straujo efektivitātes atkarību no ieejas sprieguma, kas ļauj gūt augstāku labumu no sprieguma pīķiem, pirms RMS vērtība ir būtiski samazinājusies (kritums zem 3 %). Savukārt pie vēl mazākas kapacitātes jauda sāk strauji kristies.



4.3. att. Eksperimentālie dati taisngrieztā sprieguma vidējās kvadrātiskās vērtības un *EH4205* izejas vidējās jaudas atkarībai no taisngrieža tilta filtrējošās kapacitātes. Vertikālās pārtrauktās līnijas norāda analītiskā modeļa paredzēto kapacitāti zemākā (V_{min}) un vidējā (V_{vid}) sprieguma pīķiem (4.2. a att.).

Eksperimentāli pārbaudīts arī sprieguma reizinātāja slēgums, kam optimālās kapacitātes vērtība atrasta ar datorsimulācijas palīdzību. Izvēlētas divas reizinātāja pakāpes, jo enerģijas ievēcējs ģenerē divus sinusoidāla signāla periodus no vienas kustības (2.1. d att.), kas ir mazāk efektīvi augstākam pakāpju skaitam. Mērījumi veikti ilgstoši esošam barošanas signālam un tādām, kas ir tikko sācies (4.4. att.), abi salīdzināmie signāli ir vienāda garuma. Skaitliski līdzstatot abus stāvokļus, parādīts, ka augstāka, nepiemērota kapacitāte īsa signāla gadījumā rada stiprāku vidējā kvadrātiskā sprieguma kritumu, nekā radītu paredzētā optimālā kapacitāte ilgstoša signāla gadījumā. Šis efekts ir izteiktāks vidējai izejas jaudai – izmantojot 1,8 mF kapacitāti, ar ilgstoši nemainīgu ieejas signālu iegūstama par 0,9 % zemāka izejas jaudas vērtība nekā pie 2,7 mF, toties īsa vai pārtraukta ieejas signāla gadījumā vidējā jauda ir par 1,9 % augstāka. Tātad ilgstoša signāla gadījumā tiek zaudēts mazāk, nekā tiktu iegūts īsam signālam. Tamdēļ optimizētās kapacitātes izmantošana ir pamatota arī ķēdēs, kurās ieejas signāla impulsu kopas ne vienmēr ir pāris impulsu īsas. Mērījumos novērots, ka pārveidotāju vidējā izejas jauda krītas straujāk pie zemākas kapacitātes, kas ir skaidrojams ar lielāku sprieguma ieplaku ietekmi uz pārveidotāju darbību.



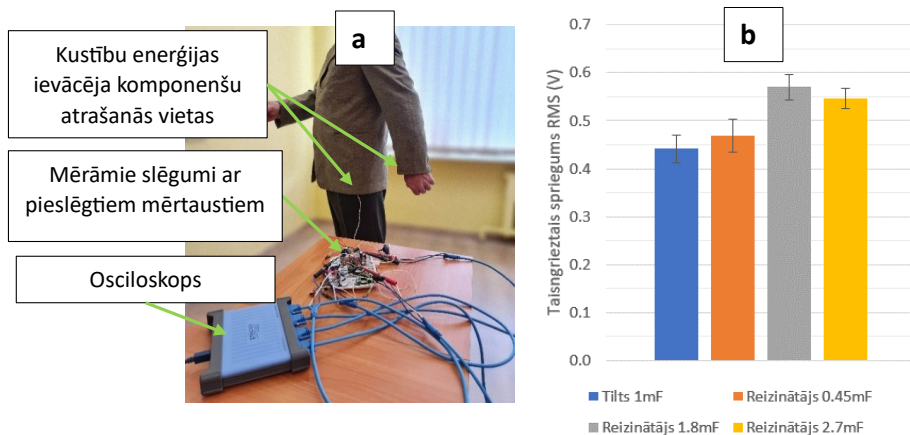
4.4. att. Sprieguma divkāršotāja mērījumi atkarībā no kondensatoru kapacitātes, salīdzinājums starp stāvokli, kurā barošanas signāls iepriekš bija nulle, un stacionāru, kurā barošanas signāls eksistē pirms mērījumu sākšanās. Vertikālā pārtrauktā līnija parāda datorsimulācijā paredzēto kapacitāti augstākā *RMS* sprieguma iegūšanai.

Kontrolētos apstākļos 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, samazinot vidējo izejas jaudu par vismaz 20 %. Lai taisngrieztā ieejas sprieguma augstākā *RMS* vērtība palielinātu pārveidotāja lietderību atbilstoši ražotāju noteiktajai līdzsprieguma sazarībai, tā ieejas pretestības un efektivitātes atkarībai no ieejas sprieguma sagaidāmajā diapazonā jābūt ar pēc iespējas mazāku stāvumu. Kopumā rezultāti apstiprina iepriekšējā nodaļā definētos priekšnosacījumus un pierāda, ka taisngriešanas posma veiktspēju var uzlabot ar kapacitātes vērtības izvēli un tai iespējama optimāla vērtība, kas balstīta ieejas signālā, avota un slodzes parametros.

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

Šī nodaļa veltīta mazjaudas barošanas avota izveidei no enerģijas ievācējiem un pārbaudei, balstoties iepriekšējās nodaļās gūtajos rezultātos un atziņās. 2. nodaļā raksturotajam elektromagnētiskajam kustību enerģijas ievācējam 3. nodaļā noskaidroti zemsprieguma pārveidotāju izvēles priekšnosacījumi un pierādīts, ka var iegūt patērētājiem teorētiski pietiekamu elektroenerģiju atbilstošā spriegumā, 4. nodaļā izpētīti taisngriešanas posma filtrācijas uzlabojumi, savukārt šajā nodaļā tie tiek apvienoti, lai nonāktu līdz elektroenerģijas avota praktiskai novērtēšanai. Tālāk tiks novērtēta elektroenerģijas plūsmas nestabilitātes samazināšana ar cilvēka enerģijas ievācēju apvienošanu, apskatīta atbilstoša patērētāja izstrāde un veikti testi idealizētos, taču realistiskos apstākļos.

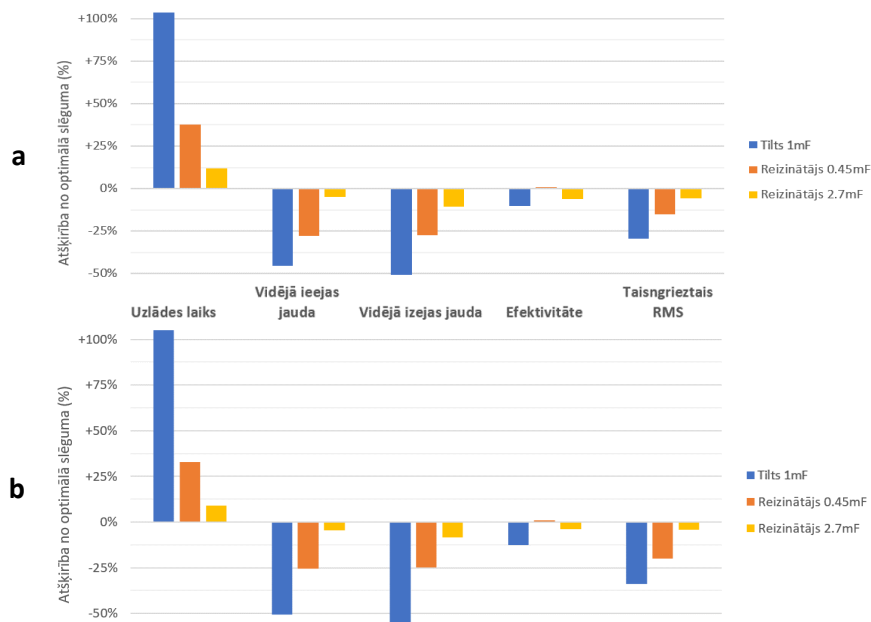
Balstoties iepriekšējos secinājumos, izvēlēts piemērotākais no pārbaudītajiem zemsprieguma pārveidotājiem, lai realistiskos kustību enerģijas ievācēja ģenerācijas apstākļos salīdzinātu sprieguma divkāršotāja taisngriezi ar un bez kapacitātes optimizācijas ar iepriekš lietoto tilta taisngriezi (5.1. att.). Neskatoties uz reālo apstākļu radīto lielo rezultātu izkliedi, vidējās vērtības uzrāda augstāko taisngriezta sprieguma vidējo vērtību sprieguma divkāršotāja slēgumam ar optimizēto kapacitāti.



5.1. att. a – eksperimenta konstrukcija, cilvēkam atdarinot soļošanas laikā raksturīgās roku kustības; b – taisngriezta sprieguma vidējās kvadrātiskās vērtības (*RMS*) visiem slēgumiem.

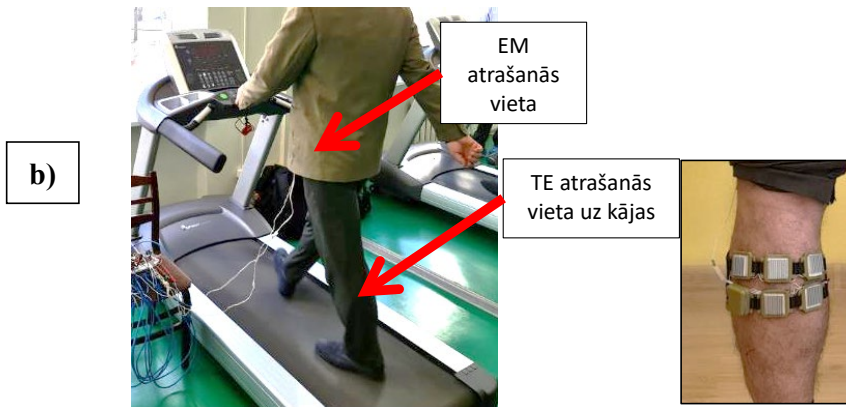
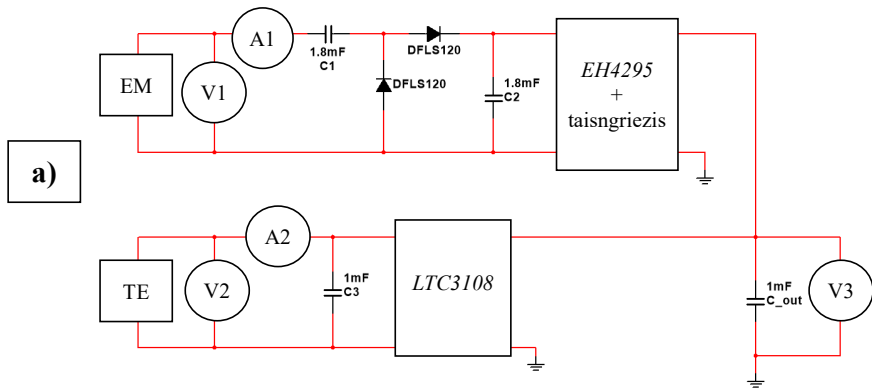
Lai novērtētu ģenerācijas izkliedes ietekmi, slēgumiem izvēlēti tie eksperimentālie piegājieni, kas sniedza matemātiski stabilākos un vismazāk stabilos enerģijas uzkrāšanas rezultātus. Savstarpēji salīdzinot abas piegājienu kopas, iegūta sakrītoša tendence un ļoti tuvi relatīvie rezultāti (5.2. att.). Tie uzrāda augstāku sakrītību ar idealizēto apstākļu eksperimentiem nekā vidējās vērtības, kas liecina par vienlīdzīgu gludinošā filtra kapacitātes ietekmi gan uz vairāk, gan mazāk pastāvīgiem signāliem. Tas apstiprina, ka amplitūdai nav noteicošās nozīmes kapacitātes ietekmē, pierādot kapacitātes optimizācijas izmantošanas pamatotību praktiski

mainīgas ģenerācijas gadījumā. Salīdzinot darbību vienādos apstākļos, sprieguma divkāršotājs ar optimizēto kapacitāti uzrāda par aptuveni 30 procentpunktiem augstāku taisngrieztā sprieguma vidējo kvadrātisko vērtību nekā iepriekš lietotais tilta slēgums, kas zemsprieguma pārveidotājam rezultējas ar par 45 % augstāku vidējo ieejas jaudu un, pateicoties efektivitātes pieaugumam, divtik lielāku vidējo izejas jaudu.



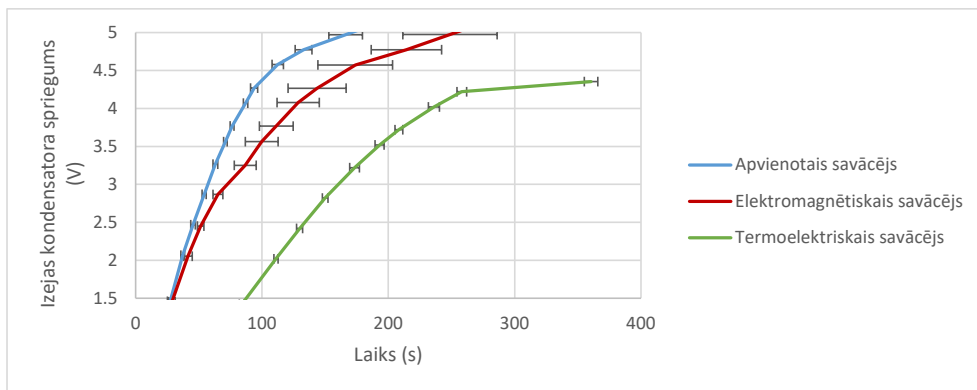
5.2. att. Individuāli stabilākā (a) un nestabilākā (b) ieejas signāla mērījumu rezultāti, dati normēti pret optimālo slēgumu cilvēka kustību eksperimentā.

Reālu apstākļu mērījumos novērota būtiska rezultātu izkliede, kas var ietekmēt cilvēka enerģijas ievācēja kā barošanas avota uzticamību. To nevar izlabot nedz ar konkrētā ievācēja, nedz sprieguma pārveidotāja efektivitātes uzlabojumiem, tālab papildus izraudzīts atšķirīgs enerģijas ievācējs apvienošanai, kura ģenerācijas pārtraukumi laikā nepārklājas ar apskatīto kustību enerģijas ievācēju. 1. nodaļā apkopotajās publikācijās apvienošana parasti tiek veikta augstākas jaudas iegūšanai, taču šajā pētījumā vadošais nolūks ir enerģijas plūsmas stabilitāte, tamdēļ lietots termoelektriskais ievācējs, kas salīdzinoši lēnās temperatūras izmaiņas dēļ nepārstāj ģenerēt līdz ar kustību izbeigšanu. Abu enerģijas ievācēju izejas spriegums tiek salāgots ar atsevišķiem pārveidotājiem, lai tie varētu lādēt kopēju izejas kondensatoru (5.3. a att.), tādā veidā šī sistēma ietver divus individuāli optimizētus avotus, kas spēj darboties gan kopā, papildinot viens otru, gan atsevišķi. Termoelektriskais ievācējs izvietots uz apakšstilba (5.3. b att.), lai tas neietekmētu cilvēka kustības, būtu pakļauts lielākai gaisa plūsmai un tā kontaktvirsmas ar ādu būtu stabila. Ievācējs nav apskatīts promocijas darba ietvaros, bet atsevišķās publikācijās ar autora līdzdalību [24], [28].



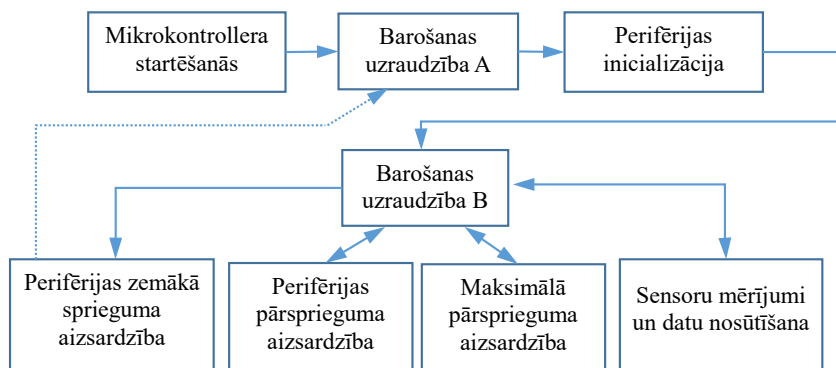
5.3. att. Elektromagnētiskā (EM) un termoelektriskā (TE) enerģijas ievācēja apvienošanas shēma ar sprieguma un strāvas mērīšanas punktiem to veiktspējas raksturošanai (a), abu ievācēju izvietojums kontrolēto apstākļu mērījumos (b).

Soļošanas eksperimentos (5.3. b att.) iekštelpās ar fiksētu ātrumu pierādīts, ka tādā veidā kopējā ģenerācija ir ne vien ar augstāku jaudu, bet arī ar mazāku vidējo izkliedi nekā no kustību enerģijas ievācēja atsevišķi (5.4. att.) – attiecīgi 3 % un 16 %. Šis efekts skaidrojams ar ievācēju momentānās jaudas balansējošo mijiedarbību, kas notiek, pateicoties to paralēlajai sloģošanai caur kopējo uzkrāšanas elementu. Tam ir nepieciešami avoti, kuriem ir pielīdzināma jauda un darbības pārtraukumi nepārklājas, kā arī attiecīgi sprieguma pārveidotāji atšķirīgo izejas spriegumu salāgošanai. Toties jāņem vērā, ka atsevišķu avotu augstākais izejas spriegums var atšķirties, tālab to ieguldījums var nebūt aktuāls visā diapazonā, kas var būt nozīmīgi patērētāja darbībai, kā tas redzams 5.4. attēlā, kur termoelektriskais ievācējs nespēj pārsniegt 4,3 V. Kopumā var secināt, ka, lai gan konkrētā apvienošanas metode izmanto vairāk komponentu nekā ievācēju apvienošana tieši vai caur taisngriezi, tā ļauj atšķirīgiem avotiem nodrošināt konstruktīvu mijiedarbību praktiskas ģenerācijas apstākļos. Turklāt šī pieeja ļauj atsevišķos ievācējus individuāli optimizēt, potenciāli uzlabojot sniegumu.



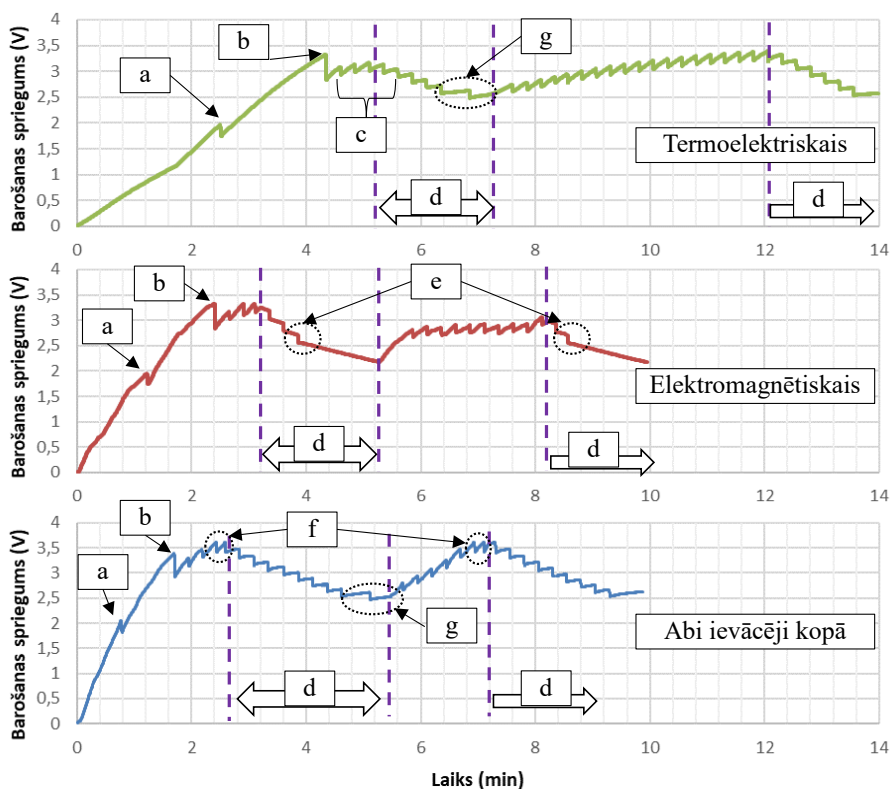
5.4. att. Uzkrājošā kondensatora (1 mF) uzlādes sprieguma atkarība no laika.

Ievācēju sistēmas praktiskās lietojamības novērtēšanai apskatīta patērētāja izstrāde, kas funkciju nodrošināšanai vadās pēc nepieciešamās elektroenerģijas, kas eksperimentāli noteikta galvenajām operācijām, un izejas kondensatorā pieejamās elektroenerģijas. Tas 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 attiecīgajā spriegumā (5.5. att.). Barošana ārējām komponentēm tiek pieslēgta vien tad (5.5. att., barošanas uzraudzība A), kad uzkrāta pietiekama elektroenerģija to inicializācijai, noteiktu mērījumu veikšanai un datu nosūtīšanai, kā arī ir rezerve sistēmas uzturēšanai gaidīšanas režīmā. Tālāk rutīnas operācijas tiek veiktas atbilstoši pieejamajai elektroenerģijai (barošanas uzraudzība B), tādējādi to izpilde kalpo sistēmas patēriņa kontrolei, palīdzot uzturēt barošanas spriegumu nepieciešamajā diapazonā. Šādā veidā sistēmas funkcionalitāte netiktu traucēta arī mainīgas ģenerēšanas gadījumā, kā arī atkārtota inicializācija būtu nepieciešama retāk. Patērētāja sakaru un sensoru mērījumu novērtēšanai izveidota bezvadu uztveršanas un atainošanas iekārta.



5.5. att. Algoritma galveno funkciju blokskhēma.

Patērētāja funkcionēšana ar enerģijas ievācējiem kā avotu pārbaudīta eksperimentāli, cilvēkam soļojot ar fiksētu ātrumu iekštelpās. 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 jaudas patēriņa kompensācijai pirms energoietilpīgās 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, samazinot operāciju veikšanas frekvenci (5.6. e un g att.), gan lietderīgai sprieguma ierobežošanai pie stipras ģenerācijas, veicot vairāk operāciju (5.6. f att.). Attiecīgā algoritma lietošana ļauj izmantot komponentes ar zemāku energoefektivitāti un limitētas ģenerācijas ievācējus, ļaujoties uz uzkrāto elektroenerģiju un plašāku darba sprieguma diapazonu. To apstiprina eksperimentālie mērījumi, kuros visas regulārās operācijas tiek realizētas arī ar vienu no abiem enerģijas ievācējiem (5.6. att.). Algoritms tādējādi ļauj pilnvērtīgāk izmantot termoelektriskā enerģijas ievācēja sniegto lēno ģenerācijas izmaiņu, ļaujot sistēmai ilgāk funkcionēt pēc kustības izbeigšanās un ātrāk atsākt darbību pēc kustību atsākšanās, izvairoties no atkārtotas inicializācijas.



5.6. att. Uzkrājošā kondensatora sprieguma atkarība no laika mērījumos ar enerģijas ievācējiem atsevišķi un kopā. Raksturīgākie grafiku punkti: mikrokontrolera inicializācija (a), raidītāja inicializācija (b), sensoru mērījumi un datu nosūtīšana (c, analogiski visos

grafikos), posmi bez kustībām (d), pēdējais mērījums pirms operāciju pauzes, jo ir kritums zem izvēlētajā enerģijas atlikuma līmeņa (e), ārējo bloku pārsprieguma aizsardzība ar biežām operācijām (f), retākas operācijas atbilstoši zema pieejamajai enerģijai (g).

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 (5.1. tab.). 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 konkrētā ātruma pārsniedz lielu daļu publicēto hibrīdo cilvēka enerģijas ievācēju sniegumu (plašāks salīdzinājums – promocijas darba 2. pielikumā), turklāt tam tika veikts novērtējums un uzlabojumi ģenerācijas stabilitātei. Patērētājs, salīdzinot ar daudziem izmantotajiem citos pētījumos, veidots atbilstoši potenciālajai funkcionalitātei, turklāt ir novērtēts patēriņš, un pārbaude veikta sakrītošos ievācēju darba apstākļos, dodot salīdzināmas atskaites vērtības.

5.1. tabula

Kvantitatīvs novērtējums patērētāja darbībai ar katru ievācēju atsevišķi un kopā.

	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

NOBEIGUMS

Promocijas darbā izpētīta elektroenerģijas iegūšana no neviļus notiekošām cilvēka kustībām, pamatā izmantojot elektromagnētiskās indukcijas principu. Tas galvenokārt izvēlēts, jo neprasa īpašas izveidošanas metodes vai materiālus, tālab ir vienkārši pielāgojams dažādiem darba apstākļiem. Ir raksturota konkrētas konstrukcijas ievācēja darbība, noskaidroti priekšnosacījumi sprieguma paaugstināšanai līdz izmantojamam līmenim, piedāvājot metodi tā taisngriešanas posma optimizācijai. Beigās praktiski apvienoti iepriekšējo nodaļu rezultāti, lai pilnveidotu un novērtētu iegūtā mazjaudas barošanas avota veiktspēju. Tai skaitā tika 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 mainīgās pieejamās elektroenerģijas apstākļiem.

Iegūtie rezultāti pamato gan piedāvāto uzlabojumu lietderību, gan izstrādāto patērētāja algoritmu, 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 barošanas sistēmas sastāvdaļas ir atsevišķi raksturotas un, balstoties rezultātos, savstarpēji piemērotas augstākam kopējam sniegunam. 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 ģenerators 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 izvēlētā zemsprieguma pārveidotāja kombinācijai, tā pienesums apstiprināts pie reālistisku ģenerācijas izmaiņu ietekmes, uzrādot divkāršu 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 sniegumā.
8. Iegūtā elektroenerģiju ģenerējoša sistēma pārbaudīta reālistiskos kustību apstākļos un uzrāda pārāku jaudas apjomu – 97 μ W pret 63 μ W kustību ievācējam atsevišķi – un uzlabotu atkārtotamību 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 apgrūtina 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 sarežģīt 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 Communications Surveys Tutorials*, 13. sēj., nr. 3, 443.–461. lpp., 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.*, 25. sēj., nr. 5, 055013. lpp., 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 Generation Computer Systems*, 29. sēj., nr. 7, 1645.–1660. lpp., 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. Inf.*, 10. sēj., nr. 4, 2233.–2243. lpp., 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, 383.–388. lpp. 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, 375.–380. lpp. 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, 35.–79. lpp. 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. Inf.*, 10. sēj., nr. 2, 1578.–1586. lpp., 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*, 16. sēj., 1027.–1032. lpp., 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, 390.–399. lpp. doi: 10.1109/IPSN.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.*, 6. sēj., nr. 4, 32. lpp., sept. 2007, doi: 10.1145/1274858.1274870.
- [14] V. Leonov, “Thermoelectric Energy Harvesting of Human Body Heat for Wearable Sensors”, *IEEE Sensors J.*, 13. sēj., nr. 6, 2284.–2291. lpp., 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*, 103. sēj., 107808. lpp., dec. 2022, doi: 10.1016/j.nanoen.2022.107808.
- [16] Q. Li, M. Shepetycky, un J. Martin, “Lower-limb driven energy harvesting backpack: Design, performance and energetics”, no *2015 34th Chinese Control Conference (CCC)*, jūl. 2015, 7821.–7826. lpp. 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, 22.–25. lpp. 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.*, 12. sēj., nr. 8, 2417.–2421. lpp., 2019, doi: 10.1039/C9EE01078E.
- [19] A. Šutka u. c., “Triboelectric nanogenerator based on immersion precipitation derived highly porous ethyl cellulose”, *Journal of Electrostatics*, 92. sēj., 1.–5. lpp., 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.*, 11. sēj., nr. 6, 1437.–1443. lpp., 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, 82. lpp.
- [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, 206.–213. lpp.
- [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, 87631L. lpp. doi: 10.1117/12.2016995.

- [24] J. Blums, I. Gorņevs, G. Terlecka, V. Jurkans, un A. Vilumsone, “Wearable Human Motion and Heat Energy Harvesting System with Power Management”, no *Energy Harvesting*, R. Manyala, Red., London, UK: InTech, 2018. 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, 1.–4. lpp. 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*, 15. sēj., nr. 18, 13564. lpp., 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*, 11. sēj., 100284.–100294. lpp., 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3313559.
- [28] V. Jurkans, 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, 1.–4. lpp. doi: 10.1109/BEC.2018.8600958.
- [29] T. Sterken, P. Fiorini, K. Baert, G. Borghs, un R. Puers, “Novel design and fabrication of a MEMS electrostatic vibration scavenger”, nov. 2004.
- [30] T. Sterken, P. Fiorini, G. Altena, C. Van Hoof, un R. Puers, “Harvesting Energy from Vibrations by a Micromachined Electret Generator”, jūl. 2007, 129.–132. lpp. doi: 10.1109/SENSOR.2007.4300088.
- [31] M.-Y. Choi *u. c.*, “Mechanically Powered Transparent Flexible Charge-Generating Nanodevices with Piezoelectric ZnO Nanorods”, *Advanced Materials*, 21. sēj., nr. 21, 2185.–2189. lpp., 2009, doi: <https://doi.org/10.1002/adma.200803605>.
- [32] Y. Mao, P. Zhao, G. McConohy, H. Yang, Y. Tong, un X. Wang, “Sponge-Like Piezoelectric Polymer Films for Scalable and Integratable Nanogenerators and Self-Powered Electronic Systems”, *Advanced Energy Materials*, 4. sēj., nr. 7, 1301624. lpp., 2014, doi: <https://doi.org/10.1002/aenm.201301624>.
- [33] J. Chen *u. c.*, “Transparent triboelectric generators based on glass and polydimethylsiloxane”, *Nano Energy*, 30. sēj., 235.–241. lpp., dec. 2016, doi: 10.1016/j.nanoen.2016.10.005.
- [34] W. Tang *u. c.*, “Liquid-Metal Electrode for High-Performance Triboelectric Nanogenerator at an Instantaneous Energy Conversion Efficiency of 70.6%”, *Advanced Functional Materials*, 25. sēj., nr. 24, 3718.–3725. lpp., 2015, doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.201501331>.

- [35] 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, 243.–247. lpp. doi: 10.1109/CEAT.2013.6775634.
- [36] Z. Li *u. c.*, “Instantaneous peak 2.1 W-level hybrid energy harvesting from human motions for self-charging battery-powered electronics”, *Nano Energy*, 81. sēj., 105629. lpp., mar. 2021, doi: 10.1016/j.nanoen.2020.105629.
- [37] 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*, 46. sēj., 383.–395. lpp., apr. 2018, doi: 10.1016/j.nanoen.2018.02.033.
- [38] 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”, *Applied Energy*, 291. sēj., 116825. lpp., jūn. 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116825.
- [39] X. H. Dong un X. D. Huang, “A Non-Resonant Type Electromagnetic Energy Harvester for Scavenging Vibration Energy”, no *2018 IEEE SENSORS*, okt. 2018, 1.–3. lpp., doi: 10.1109/ICSENS.2018.8589610.
- [40] T. Quan, X. Wang, Z. L. Wang, un Y. Yang, “Hybridized Electromagnetic–Trielectrostatic Nanogenerator for a Self-Powered Electronic Watch”, *ACS Nano*, 9. sēj., nr. 12, 12301.–12310. lpp., dec. 2015, doi: 10.1021/acsnano.5b05598.
- [41] 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*, 53. sēj., 213.–224. lpp., nov. 2018, doi: 10.1016/j.nanoen.2018.08.034.
- [42] 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*, 100. sēj., 107485. lpp., sept. 2022, doi: 10.1016/j.nanoen.2022.107485.
- [43] 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, jūl. 2018, 798.–803. lpp., doi: 10.1109/AIM.2018.8452373.
- [44] R. Hamid un M. R. Yuca, “A wearable energy harvester unit using piezoelectric–electromagnetic hybrid technique”, *Sensors and Actuators A: Physical*, 257. sēj., 198.–207. lpp., apr. 2017, doi: 10.1016/j.sna.2017.02.026.
- [45] 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”, *Journal of King Saud*

- University – Engineering Sciences*, 34. sēj., nr. 5, 329.–338. lpp., jūl. 2022,
doi: 10.1016/j.jksues.2020.11.003.
- [46] S. Bai *u. c.*, “Electromagnetic-triboelectric energy harvester based on vibration-to-rotation conversion for human motion energy exploitation”, *Applied Energy*, 329. sēj., 120292. lpp., janv. 2023,
doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120292.
- [47] “LTC3108 datasheet”. Skatīts: 2018. gada 28. februārī. [Tiešsaiste].
Pieejams: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3108fc.pdf>.
- [48] “EH4295 datasheet”. Skatīts: 2020. gada 1. maijā. [Tiešsaiste]. Pieejams:
<http://aldinc.com/pdf/EH4295.pdf>.
- [49] “EH4205 datasheet”. Skatīts: 2020. gada 1. maijā. [Tiešsaiste]. Pieejams:
<http://aldinc.com/pdf/EH4205.pdf>.



Ilvars 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.