

Artūrs Brēķis

AR TERMOAKUSTISKO DZINĒJU DARBINĀMS MAGNETOHIDRODINAMISKAIS ĢENERATORS

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultāte
Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts

Artūrs Brēķis

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

AR TERMOAKUSTISKO DZINĒJU DARBINĀMS MAGNETOHIDRODINAMISKAIS ĢENERATORS

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji:

LU Fizikas institūta vadošais pētnieks
Dr. phys. AGRIS GAILĪTIS,

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

RTU Izdevniecība
Rīga 2023

Brēķis, A. Ar termoakustisko dzinēju darbināms magnetohidrodinamiskais ģenerators. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2023. 53 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-14” 2022. gada 20. septembra lēmumu, protokols Nr. 04030-9.12.2/9.

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



<https://doi.org/10.7250/9789934228919>
ISBN 978-9934-22-891-9 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2023. gada 19. aprīlī plkst. 10 Rīgas Tehniskās universitātes Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 212. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Emeritētais profesors *Dr. habil. sc. ing.* Jānis Dirba,
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors *Dr. phys.* Andris Jakovičs,
Latvijas Universitāte, Latvija

Profesors *Dr. phys.* Valdis Bojarevičs,
Grīnvičas Universitāte, Lielbritānija

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.

Artūrs Brēķis (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 98 attēli, četras tabulas, divi pielikumi, kopā 143 lappuses, ieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 97 nosaukumi.

SATURS

IEVADS.....	5
PASAULĒ EKSISTĒJOŠIE ALTERNATĪVIE RISINĀJUMI	12
1. TAČ DZINĒJA APVIENOJUMS AR MHD ĢENERATORU	13
1.1. Darbības princips un vispārējs apskats.....	13
1.2. Termoakustiskais dzinējs	15
1.3. Maiņstrāvas magnetohidrodinamiskais ģenerators	18
2. EKVIVALENTĀ ELEKTRISKĀ AIZVIETOŠANAS SHĒMA MHD ĢENERATORA ANALĪZEI.....	21
2.1. Transformatora ekvivalentās shēmas pieejas formulējums.....	21
2.2. MHD ģenerators aprēķins, ievērojot enkura reakcijas lauka ietekmi	28
2.3. Kompleksā mainīgā funkciju izmantošana strāvu izplūšanas aprēķinam šķidrā metālā	30
3. MHD ĢENERATORA ANALĪZE, IZMANTOJOT SPRIEGUMU VIENĀDOJUMUS.....	33
3.1. Magnetohidrodinamikas vienādojumu sistēma	33
3.2. Aprēķinu rezultāti un to interpretācija.....	35
4. EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI	38
4.1. Termoakustiskās iekārtas atsevišķie eksperimenti	38
4.2. MHD ģenerators Na eksperimenti uz izstrādātā kompresorstenda	39
4.3. Šķidra metāla virsmu stabilizējošo pludiņu modeļeksperimenti ar ūdeni	40
4.4. Eksperiments, sajūdzot kopā MHD ģeneratoru ar termoakustisko dzinēju	42
4.5. Paņēmiens elektriskās mašīnas šķidra metāla brīvās virsmas elektromagnētiskai stabilizācijai	44
GALVENIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI.....	48
IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS.....	51

IEVADS

Aktualitāte

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

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

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

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

Pētījuma objekts, mērķi un uzdevumi

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

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

Lai sasniegtu šo mērķi, ir definēti vairāki darba uzdevumi, kas atbilst darba struktūrai.

Teorētiskās daļas darba uzdevumi

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

Eksperimentālās daļas darba uzdevumi

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

Zinātniskā novitāte

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

Praktiskā nozīme

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

Aizstāvāmās tēzes

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

Izmantotā programmatūra un metodes

MHD ģenerators magnētiskā lauka skaitliskie aprēķini veidoti ar programmu “*Quickfield*”. Aprēķina automatizācija ar atgriezenisko saiti ir veikta ar “*ActiveField*” tehnoloģiju, izmantojot VBA programmēšanas valodu, “*Excel Macros*” vidē.

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

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

Darbā biežāk lietotie apzīmējumi un saīsinājumi

MHD – magnetohidrodinamiskais (ģenerators)

TAc – termoakustiskais (dzinējs)

LUFI – Latvijas Universitātes Fizikas institūts

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

Autora personīgais ieguldījums

Autors bija atbildīgs par termoakustiskā dzinēja un MHD ģenerators prototipa izstrādi. Koordinēja tā izgatavošanu, montāžu, piedalījās iekārtas salikšanā, kā arī izgatavošanas laikā cieši sadarbojās ar iekārtas konstruktoriem no Francijas, pastāvīgi konsultējoties saistībā ar iekārtas izbūvi, lai prototips tiktu izstrādāts atbilstoši projektētāju rasējumiem. Līdz ar to autors neuzrāda par saviem franču konstruktoru biroja “*SERAS*” izstrādātos “*SpaceTRIPS*” iekārtas izgatavošanas rasējumus. Tomēr iekārtas izstrādes gaitā autors bija spiests vairākkārt ieviest arī savus jaunievedumus, jaunus mezglus un izmaiņas sākotnējā dizainā. Kā vienu no spilgtām ilustrācijām teiktajam var norādīt reālā termoakustiskā kontūra topoloģijas izveidi. I.1. attēlā parādīta rasējumos projektētā iekārta ar kompakti saliektām skaņas caurulēm, kā arī autora reāli izgatavotā kontūra stilizēta T veida ģeometrija ar nolūku vienkāršot un atvieglot izgatavošanu un mērsistēmas organizēšanu.

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

Promocijas darbā aprakstītais autora paveiktais darbs ir tikai daļa no liela mēroga starptautiska zinātniskā projekta “*SpaceTRIPS*”. Kā jebkurā tehnoloģiskā projektā,

prototipēšana parasti ir iteratīvs process, ar katru nākamo iterāciju uzlabojot iepriekšējo. Tādēļ jau darba sākotnējā stadijā netika definēts mērķis uzreiz izgatavot nevainojami strādājošu iekārtu, atbilstošu 1.1. apakšnodaļā aprakstītajiem labvēlīgākajiem darba apstākļiem. Darba gaitā autors ir konstatējis iekārtas trūkumus, kas būtu jānovērš, projektējot līdzīgas konstrukcijas. Līdz ar to var teikt, ka projekts un promocijas darbs veltīts tam, lai tālākā nākotnē būtu iespējams realizēt konkurētspējīgu elektrisko mašīnu, kas šajā stadijā (promocijas darba pabeigšanas brīdī) tāda nebūt vēl nav. No tā izriet, ka reālistiskais plāns, kam autors darba izstrādes gaitā sekoja, bija nelielā apmērā eksperimentāli izpētīt un pārbaudīt iekārtas pirmreizējā prototipa darbību, apgūt iekārtas un tās projektēšanas īpatnības, kā arī saprast, kādi uzlabojumi varētu būt veicami turpmākajos eksperimentos vai arī nākamā prototipa tapšanas gaitā.

Darba aprobācija konferencēs

Promocijas darba rezultāti prezentēti vietējās un starptautiskās konferencēs.

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

Generator”, *VIII International Scientific Colloquium of Modelling for Materials Processing*, Latvijas Universitāte, Rīga, 2017. gada 21.–22. septembrī.

9. **Brēķis, A.**, Freibergs, J., Gailītis, A. “Termoakustiskā MHD ģenerators jaunāko eksperimentu rezultāti”, *LU 75. Zinātniskā konference*, Latvijas Universitātes Fizikas Institūts, Rīga, 2017. gada 3. februārī.
10. **Brēķis, A.**, Gailītis, A. Freibergs, J. “Testing of MHD Generator Prototype for Space Applications”, *17th MHD days 2016 conference*, Maksa Planka Saules Sistēmu Izpētes Institūts, Getingene, Vācija, 2016. gada 30. novembrī–2. decembrī.
11. **Brēķis, A.**, Gailītis, A. Freibergs, J. “Thermoacoustic MHD Generator Prototyping and Experiments”, *10th PAMIR International Conference of Fundamental and Applied MHD*, Kaljāri Universitāte, Kaljāri, Itālija, 2016. gada 20.–26. jūnijā.
12. **Brēķis, A.**, Gailītis, A. Freibergs, J. “Termoakustiskā MHD ģenerators prototipa izstrāde un testēšana”, *LU 74. Zinātniskā konference*, Latvijas Universitāte, Rīga, Latvija, 2016. gada 1. februārī.
13. **Brēķis, A.**, Gailītis, A. Freibergs, J. “Termoakustiskā MHD ģenerators prototipa izstrāde un testēšana”, *RTU 57. Studentu Zinātniskā un Tehniskā konference*, Rīgas Tehniskā universitāte, Rīga, 2016. gada 14. aprīlī.
14. Freibergs, J., **Brēķis, A.** “Space TRIPS facility – prototyping and experiments”, *AIDAA 2015 Conference on Aeronautics and Astronautics / Aerospace & defence meetings Torino*, Turīnas Politehniskais institūts, Turīna, Itālija, 2015. gada 17.–19. novembrī.

Autora publikācijas

Promocijas darba galvenie rezultāti publicēti astoņās pilna teksta zinātniskajās publikācijās, no kurām piecas indeksētas *SCOPUS* un *Web of Science*.

1. **Brēķis, A.**, Alemany, A., Alemany, O., Montisci, O. Space Thermoacoustic Radioisotopic Power System, SpaceTRIPS: The Magnetohydrodynamic Generator. *Sustainability*, 2021, Vol. 13, No. 23. *Open access*, Pieejams: doi: 10.3390/su132313498, <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/23/13498/html>, **SCOPUS**.

2. Gailītis, A., **Brēķis, A.** Equivalent Circuit Approach for Acoustic MHD Generator. *Magnetohydrodynamics*, 2020, Vol. 56, No. 1, 3.–13. lpp. ISSN 0024-998X. e-ISSN 1574-0579. Pieejams: doi:10.22364/mhd.56.1.1, SCOPUS.
3. **Brēķis, A.**, Alemany, A., Freibergs, J. Initial Experimental Tests on Space TRIPS Facility of Thermoacoustic-to-MHD Energy Converter. *Magnetohydrodynamics*, 2020, Vol. 56, No. 2/3, 255.–267.lpp. ISSN 0024-998X. e-ISSN 1574-0579. Pieejams: doi:10.22364/mhd.56.2-3.17, SCOPUS.
4. **Brēķis, A.**, Alemany, A., Freibergs, J. Analysis of Magnetohydrodynamic Generator Driven by Thermoacoustic Engine for Deep Space Applications. No: *2020 IEEE 61st Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2020): Proceedings*, Latvija, Rīga, 5.–7. novembris, 2020. IEEE, 1.–7. lpp. ISBN 9781728195100. Pieejams: doi:10.1109/RTUCON51174.2020.9316584, SCOPUS.
5. **Brēķis, A.**, Freibergs, J., Alemany, A. Space Thermo Acoustic Radio-Isotopic Power System: Space TRIPS. *Magnetohydrodynamics*, 2019, Vol. 55, No. 1, 5.–14. lpp. ISSN 0024-998X. e-ISSN 1574-0579. Pieejams: doi:10.22364/mhd.55.1-2.1, SCOPUS.
6. **Brēķis, A.**, Freibergs, J., Alemany, A., Francois, M., Roy, E., Zeminiani, E., Eckert, S. Experimental Investigation of Sound Parameters in SpaceTRIPS Facility of Thermoacoustic-to-MHD Energy Converter. No: *11th PAMIR International Conference on Fundamental and Applied MHD: Proceedings*, Francija, Reimsa, 1.–5. jūlijs, 2019. Reimsas Šampanas-Ardenes Universitāte, 191.–195. lpp.
7. **Brēķis, A.**, Freibergs, J., Gailītis, A., Alemany, A. New Experimental Results from Testing “Space Trips” Facility of Thermoacoustic System Coupled with Magnetohydrodynamic Generator. No: *Proceedings of the VIII International Scientific Colloquium “Modelling for Materials Processing”*, Latvija, Rīga, 21.–22. septembris, 2017. Latvijas Universitāte, 107.–112. lpp. ISBN 9934182602. Pieejams: doi:10.22364/mmp2017.16.
8. **Brēķis, A.**, Freibergs, J., Gailītis, A., Alemany, A., Roy, E., Jeantet, P., Poli, G., Zeminiani, E., Maurice, F., Gerbeth, G., Eckert, S. Thermoacoustic MHD Generator Prototyping and Experiments. No: *10th PAMIR International Conference Fundamental and Applied MHD: Proceedings*, Itālija, Kaljāri, 20.–24. jūnijs, 2016. Kaljāri Universitāte, 606.–610. lpp. ISBN 978-88-90551-93-2.

PASAULĒ ZINĀMIE ALTERNATĪVIE RISINĀJUMI

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

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

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

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

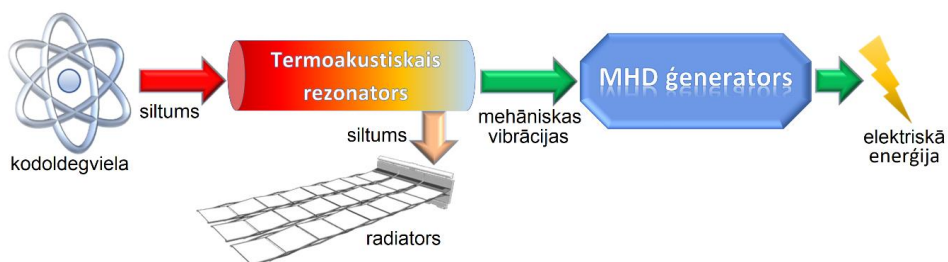
Attiecībā uz elektroenerģijas ģenerācijas posmu ir vērts apsvērt elektriskā ģeneratora izveidi ar šķīdri metāla darba ķermeni, tādējādi atsakoties no jebkādām cietām, mehāniski dilstošām detaļām [20]–[23]. Ir zināmi daudzi un dažādi risinājumi magnetohidrodinamiskajām elektrostacijām, kur sakarsēta plazma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

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

1. TAc DZINĒJA APVIENOJUMS AR MHD ĢENERATORU

1.1. Darbības princips un vispārējs apskats

Autora pētītā MHD ģeneratora un termoakustiskā dzinēja apvienotā sistēmai nav minēto trūkumu, tāpēc tāda veida iekārtas nākotnē būs sevišķi noderīgas lidojumos, piemēram, Jupitera orbītā un aiz tās. Ņemot vērā to, ka mūsdienu ekstremāli tālas misijas galvenokārt organizē ASV, tad līdz ar šī projekta izstrādi Eiropas zinātne ar Eiropas Kosmosa aģentūras (ESA) atbalstu tiecas pēc tehnoloģiskās neatkarības šāda tipa misijās. Izgatavotās iekārtas darbības principu raksturojoša secīga enerģijas pārveidošanās ķēde redzama 1.1. attēlā. Tajā redzams, ka primārais enerģijas avots ir radioaktīvais izotops, kura saražotais siltums tiek novadīts uz specifisku skaņas ģeneratoru. Tā radītā skaņa savukārt tiek aizvadīta uz jaunas konstrukcijas magnetohidrodinamisko ģeneratoru, saražojot elektroenerģiju.



1.1. att. Izgatavotās iekārtas darbības princips.

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

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

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

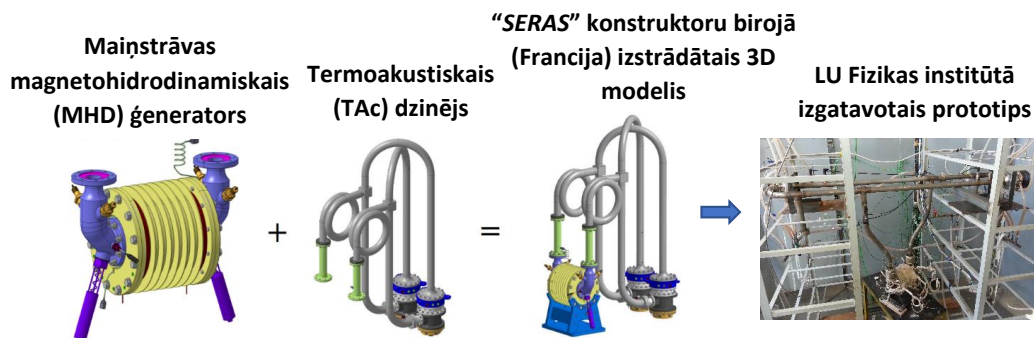
Tehnoloģija ir ieinteresējusi ASV privātuzņēmumu “*Deep Space Industries*”, kā arī Eiropas Kosmosa aģentūru, kuru pārstāvjiem autors vairākkārt prezentējis darbā paveikto.

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

Termoakustiskais dzinējs pārveido siltumenerģiju mehāniskajā enerģijā – skaņas stāvviļņi, tādējādi ģenerējot spiediena svārstības [27]. Šo mehānisko enerģiju MHD ģenerators pārveido elektriskajā enerģijā, izmantojot elektromagnētiskās indukcijas parādību [28], [29]. Tas tiek panākts šķidram, elektrovadošam metālam, konkrēti, nātrijam [Na] aptuveni 100 °C temperatūrā, spiediena oscilāciju ietekmē kustoties magnētiskajā laukā, periodiski mainot šķidruma kustības virzienu uz pretējo. Izkausēta Na kā elektriskās mašīnas darba ķermeņa izvēle ir pamatojama ar to, ka tam ir no visiem metāliem augstākā īpatnējā elektrovadītspēja šķidrā agregātstāvoklī: $\sigma_{Na} = 10,36 \cdot 10^6 \frac{S}{m}$. Augstā īpatnējā elektrovadītspēja dod iespēju novērot maksimāli spēcīgu magnetohidrodinamisko mijiedarbību, pārējiem apstākļiem, piemēram, magnētiskā lauka indukcijai paliekot nemainīgai. Vienlaikus nātrija blīvums pie tā kušanas temperatūras 97,8 °C ir zems un veido $\rho_{Na} = 928 \frac{kg}{m^3}$ [30]. Tas savukārt dod iespēju iegūt iespējami labvēlīgākus apstākļus mašīnas darbam no šķidruma inerces viedokļa. Tas šajā gadījumā ir būtiski, jo jau pats piedāvātās tehnoloģijas darbības princips balstās spiediena svārstību iegūšanā un izmantošanā maiņvirziena tipa šķidruma plūsmas radīšanai elektriskajā mašīnā [31]. Iekārtai ir vairākas priekšrocības.

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

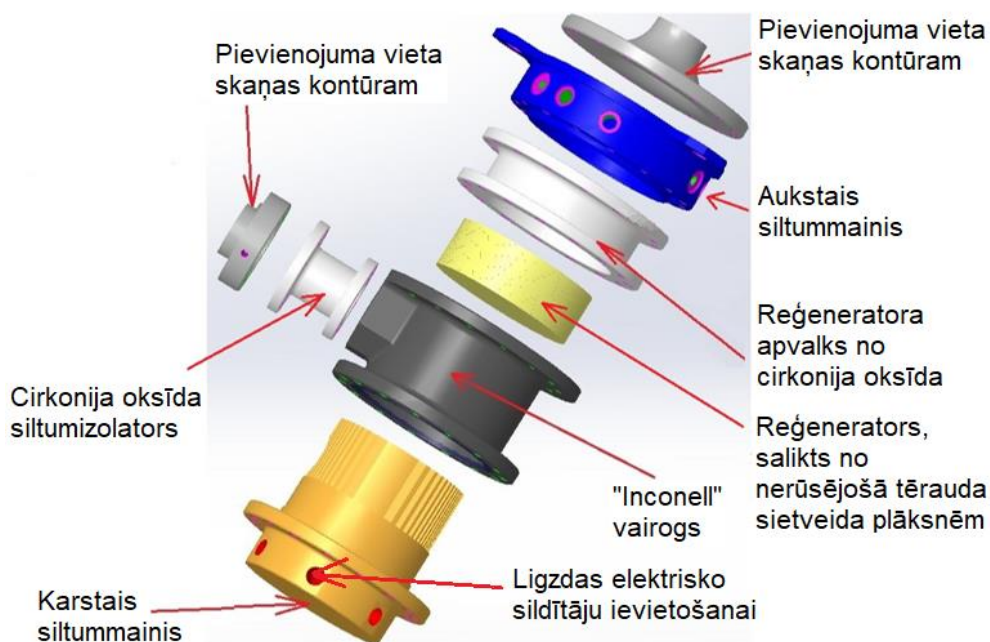
1.2. attēlā redzams iekārtas telpisks modelis gan kopsalikumā, gan atsevišķi izdalot abas mašīnas. Iekārta ir projektēta un rasējumi ir izstrādāti Francijā, Grenoblē, “SERAS-CNRS” laboratorijas konstruktoru birojā. Savukārt prototips ir izgatavots Latvijas Universitātes Fizikas institūta Magnētiskās hidromehānikas laboratorijā. Prototipa izgatavošanas laikā atbilstoši nepieciešamībai konstrukcija un tās atsevišķi mezgli tika autora optimizēti un uzlaboti, taču darbības princips un koncepts tika saglabāts nemainīgs.



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

1.2. Termoakustiskais dzinējs

Termoakustiskais efekts ir termodinamisks process, kas ļauj pārveidot siltumenerģiju skaņas enerģijā, izmantojot izvēlētās darba gāzes temperatūras, blīvuma un spiediena izmaiņas, kā arī to savstarpējo mijiedarbību [32]. Šajā sistēmā par primāro dzinēju tiek uzskatīts termoakustiskais dzinējs, kas darbojas kā skaņas ģenerators. Tā shēma un sastāvdaļas redzamas 1.3. attēlā.



1.3. att. Termoakustiskā dzinēja shēma un tā sastāvdaļas.

Termoakustiskā dzinēja galvenā sastāvdaļa ir specifisks siltummainis ar lielu siltumatdeves virsmas laukumu. Termoakustiskajā literatūrā [33] atkarībā no dzinēja modifikācijas tas tiek saukts par reģeneratoru vai steku. No apkārtējās vides reģenerators ir izolēts ar cirkonija oksīda gredzenveida izolatoru. Tas ir novietots starp diviem siltummaiņiem – auksto un karsto –, sasildītu līdz 800 °C temperatūrai. Aukstajā siltummainī tiek uzturēta ap 20 °C temperatūra. No “Inconell” tērauda markas izgatavotais karstais siltummainis tiek sildīts ar elektriskajiem sildītājiem no nihroma un kantāla stieplēm uztītu specifisku spolīšu formā, kur spolītes šajā gadījumā imitē radioaktīvos sildītājus. Šis siltummainis tiek noseģts ar apvalku jeb vairogu, kas izgatavots no tā paša “Inconell” materiāla markas, pie kura caur papildu keramikas siltumizolatoru pievieno skaņas kontūru.

Zemo temperatūru savukārt iegūst, izmantojot auksto siltummaini. Tā ir sarežģīta detaļa ar specifisku labirintu tās iekšienē, caur kuru laboratorijas apstākļos plūst istabas temperatūras ūdens, kas apskalo 1700 mazas caurulītes ar diametru 1,7 mm, caur kurām plūst dzesējamā gāze, šajā gadījumā – argons. Reālā kosmosa lietojumā Itālijas kosmosa tehnoloģiju izstrādātāja “Thales Alenia Space” zinātnieki paredzējuši aukstā siltummaiņa dzesēšanu nodrošināt siltumstarojuma veidā, tādējādi nodrošinot aukstā gala temperatūru 150 °C, proti, nodrošinot, lai šī temperatūra vienlaikus ir arī augstāka par Na kušanas temperatūru, kā tas ir aprakstīts [34], [35]. Savukārt franču kodolenerģētikas uzņēmuma “AREVA” inženieri kosmosa prototipā kā karstā siltummaiņa sildelementus paredzējuši lietot radioaktīvā amerikāņu moduļus ar tādu pašu temperatūru, kāda bija laboratorijas eksperimentā – jau minētajiem 800 °C.

Vispārīgi TAc dzinēja konstrukcija var tikt izveidota gan galīga garuma caurulē, radot skaņas stāvvilni, gan noslēgtā cilpā, radot skrejvilni. Šajā iekārtā ir realizēts otrais variants, taču virknē ar vēl otru tādu pašu TAc dzinēju, kas rada konstrukciju, kurā abi toroīdā ieslēgtie TAc dzinēji darbojas kā ierosinātā skrejviļņa pastiprinātāji [36]. Savukārt TAc dzinēja tā sauktajās transformatorcaurulēs minētais skrejvilnis tiek transformēts par stāvvilni.

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

1.1. tabula

TAc dzinēja raksturīgie nominālie parametri

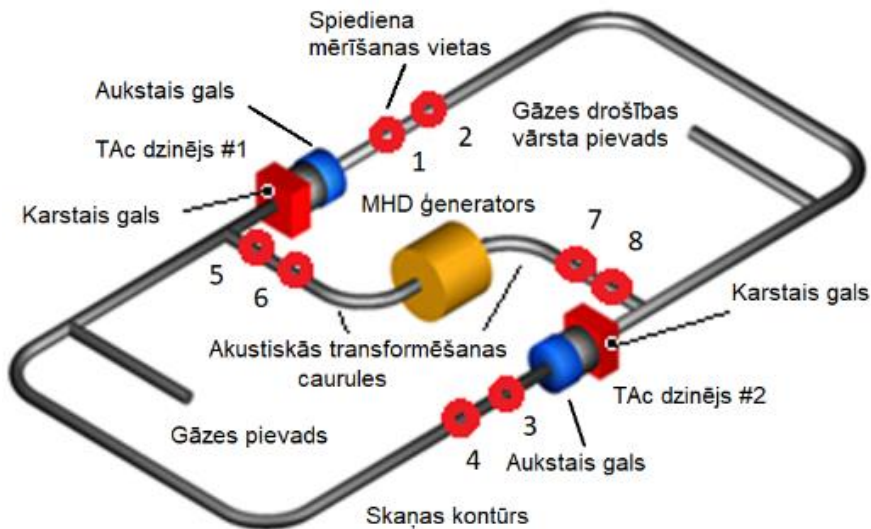
Darba gāze	Virsspiediens	Sagaidāmā oscilāciju amplitūda	Kopējā pievadāmā siltumjauda TAc iekārtai	Sagaidāmā akustiskā izejas jauda	Sagaidāmais Karno lietderības koeficients	Temperatūra karstajā siltummainī	Temperatūra aukstajā siltummainī
Argons	40 bar	+/- 6 bar	1000 W	350 W	66 %	800 °C	20 °C

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

- skaņas viļņa izplatīšanās telpas – cauruļu, kā arī siltummaiņu un reģeneratora ģeometrijas;
- vielas, šeit – inertās darba gāzes, fizikālajām īpašībām, kur vilnis izplatās;
- temperatūras gradienta reģeneratorā jeb, īsāk sakot, temperatūru starpības uz tā galiem;
- izmantotās darba gāzes virsspiediena (spiediens virs normāla atmosfēras spiediena).

Pie zināma pievadītā gāzes virsspiediena stāvoklī, kad temperatūru starpība uz reģeneratora galiem pārsniedz kādu kritisko vērtību, spontāni tiek ģenerēts spiediena vilnis, kas izplatās caurulē ar skaņas ātrumu. Tas rezultējas kā virsspiediena sinusoidālu svārstību rašanās. Tas arī izskaidro minētā skrejviļņa ierosināšanos. Promocijas darbā šāda kritiskā ierosmes līkne ir eksperimentāli uzņemta.

Šis novērojums salāgojas ar faktu, ka skaņa pēc definīcijas ir gāzes spiediena oscilācijas, kas izplatās vidē kā akustisks vilnis. Šādā režīmā cauruļu kontūrā norit akustiskās enerģijas plūsma no viena TAc dzinēja uz otru. Daļa jaudas savukārt nozarojas uz izvadiem, kuros ir pievienots MHD ģenerators. Minēto izvadu T veida formas nozarojumu vietās (1.4. att., akustisko transformatorcauruļu pievienojuma vietas skaņas kontūram) gāzes kustības ātrums ir maksimāls, taču spiediena oscilācijas ir minimālas. Savukārt, izmērot spiedienu pie paša MHD ģenerators, aina ir pretēja – oscilācijas ir maksimālās, bet ātrums ir tuvs nullei. Šī īpatnība būtu izskaidrojama ar rezonanses parādību dzinējā – uzspiesto svārstību sakrišanu fāzē ar brīvajām svārstībām. Tomēr šajā gadījumā ir tikai brīvās svārstības, ārēja svārstību avota nav, jo viens TAc dzinējs pastiprina otru. Rezonanses režīms ir iegūstams, atbilstoši pielāgojot mašīnas ģeometriju – cauruļu garumus, šķērsriezumu u. c. [37]. Šeit varētu rasties pretruna ar brīvo svārstību definīciju, proti, ka tām ir vienmēr jābūt rimstošām. Tomēr šajā gadījumā svārstības tiek nepārtraukti mākslīgi uzturētas ar abu TAc dzinēju palīdzību.



1.4. att. "SpaceTRIPS" kontūra shēma.

Iespējama arī konstrukcija ar vienu TAc dzinēju, tomēr šādam variantam ir vairāki trūkumi, piemēram, nepieciešamība pēc ārēja akustiska startera, kā arī šāds variants ir jutīgāks pat pret nelielām ģeometriskām izmaiņām akustiskajā topoloģijā, citiem vārdiem, attiecībā uz MHD ģeneratoru [10], [11], [33].

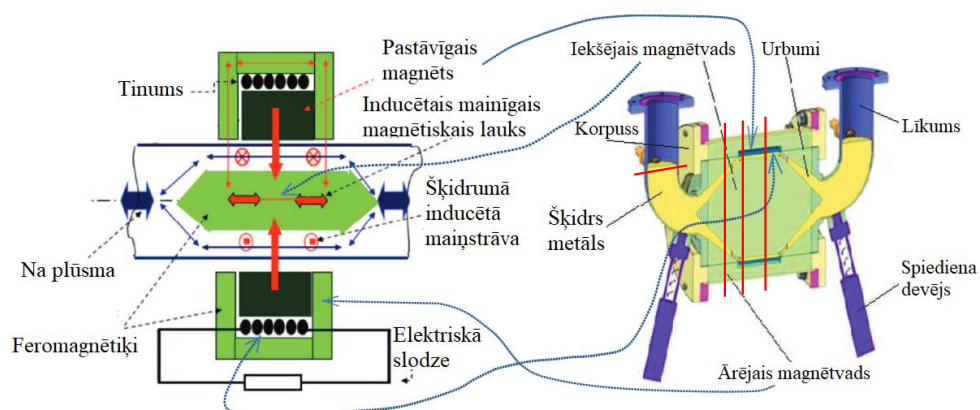
1.3. Maiņstrāvas magnetohidrodinamiskais ģenerators

No TAc dzinēja nākošā skaņa liek izkausētam nātrijam MHD ģeneratora gredzenveida kanālā svārstīties aksiālā virzienā. Uz elektriskās mašīnas centrālo asi vērstā, radiālā virzienā magnetizēti samārija-kobalta ($\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, ar koercitīvo spēku $H_c = 817 \text{ kA/m}$) pastāvīgie magnēti rada aktīvajā daļā – gredzenveida nātrija kanālā – pastāvīgu magnētisko lauku, kas kustīgajā šķidrā metālā inducē noslēgtu azimutālu maiņstrāvu. Šīs maiņstrāvas radītais pulsējošais magnētiskais lauks pēc superpozīcijas principa summējas ar pastāvīgo magnētu radīto magnētisko lauku un inducē elektriskās mašīnas tinumā laikā mainīgu EDS. Līdz ar to, tinumam pieslēdzot slodzi, tajā sāk plūst sinusoidāla maiņstrāva. No teiktā izriet, ka nepieciešamais nosacījums strāvas ģenerācijai ir šķidrās, elektrovadošās vides kustība attiecībā pret magnētisko lauku, jo ir saprotams, ka nekustīgais magnēts pats par sevi tinumā neko neinducēs. Elektriskās mašīnas spoļē ir uztiāti 400 vijumi un ir izmantots standarta emaljēts viendzīslas vara vads 0,6 mm diametrā.

Tāpat nātrija strāvas ģenerācijas process ietver trīs ortogonālus vektorus:

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

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



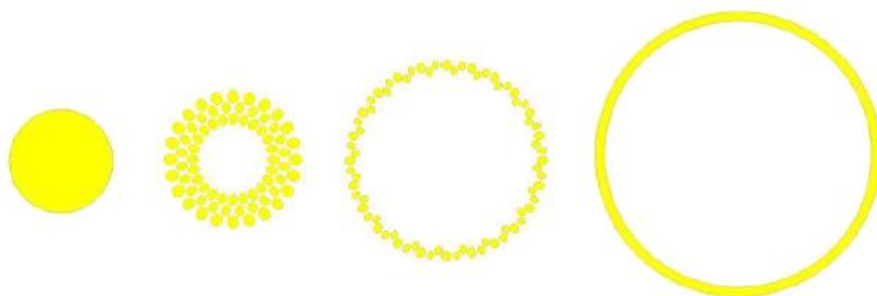
1.5. att. MHD ģeneratora modeļa aksiāls griezumam ar paskaidrojumiem.

MHD ģenerators raksturīgie nominālie parametri

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

Mašīnas magnētiskās ķēdes ārējā daļa ir izveidota no radiāli šīhtētiem tradicionāla elektrotehniskā tērauda markas *M400-50A* skārdiem, iekšējā daļa – no augstvērtīga feromagnētiska materiāla – somaloja. Šis zviedru uzņēmuma “*Höganäs*” ražotais magnētiski mīksts materiāls ir dielektriķis, veidots no epoksīda sveķiem, sapresētiem un sakausētiem ar smalkām dzelzs skaidām, noklātām ar nanopārklājumu. Lietotais materiāls nodrošina ļoti zemus magnētiskos zudumus no inducētajām virpuļstrāvām. LU Fizikas institūtā arī eksperimentāli konstatēts, ka tas nereaģē ar nātriju. Tas ir būtiski, jo šis konstruktīvais elements mašīnas darbības laikā atrodas tiešā saskarē ar šķidru metālu.

Elektriskās mašīnas konstrukcija mašīnas aktīvajā daļā ir aksiāli simetriska, un tās “*CNRS*” konstruktoru izstrādātā 3D modeļa aksiālgriezums redzams 1.5. attēlā. Šeit ir jāatzīmē, ka ģenerators magnētiskā sistēma nav veidota no viena gredzenveidīga, monolīta, radiāli magnetizēta pastāvīgā magnēta. Tā ir veidota no 16 vienādiem, pa aploci izvietotiem, sekcioniem, savstarpēji elektriski izolētiem, sektorveidīgiem magnētiem, kas cits citam cieši blakus gredzenveidā piekļaujas klāt. Bez tehnoloģiskām priekšrocībām ērtākas un vienkāršākas izgatavošanas dēļ tam ir nozīme arī no elektromagnētiskā viedokļa. Tādējādi iespējams samazināt pastāvīgo magnētu materiālā inducētās azimutālās virpuļstrāvas rezultējošā mainīgā magnētiskā lauka dēļ. Iemesls šīm virpuļstrāvām magnētu materiāla samērā augstā īpatnējā elektrovadītspēja. Šķidru metālu no ārpuses satur kopā 0,2 mm plāna, metināta “*Grade2*” markas titāna čaula. Tā atdala nātriju no pastāvīgā magnēta. 1.1. un 1.2. tabulās norādītie lielumi ir ģenerators konstruēšanas un sākotnējās projektēšanas stadijā par ģenerators nominālajiem parametriem iekārtas projektētāju izvēlētie un pieņemtie ieejas dati [34]. Zinot, piemēram, Na pārvietojumu un frekvenci, iespējams izteikt šķidrums kustības ātrumu un otrādi. Na kanāla galus noslēdz malējie atloki no titāna, kas izgatavoti, izmantojot 3D printēšanas tehnoloģiju metāla izstrādājumiem.



1.6. att. Nātrija plūsmas šķērsriezuma maiņa elektriskās mašīnas vairākos secīgos griezumos atbilstoši 1.4. attēlam.

Kā redzams, ģeneratorā ir nepieciešama pāreja no gredzenveida šķidruma kanāla uz cilindrisku ar nemainīgu summāro šķērsriezuma laukumu. Lai šādu pāreju iegūtu, no atsevišķiem diskiem salīmētajā somaloja serdē tika veikti 72 dažāda diametra specifiskas konfigurācijas azimutāli vairākazimutu urbumi. 1.6. attēlā redzama secīga pāreja no gredzenveida kanāla magnētiskā lauka zonā uz apaļu šķērsriezumu līkajā pagriezienā, kas veido šķidra metāla brīvo virsmu. Šajā attēlā ir parādīts, kā šķērsriezums dinamiski mainās atbilstoši 1.5. attēlam (labajā pusē) iezīmētajām sarkanajām līnijām, virzoties no labās puses uz kreiso.

Na gredzenveida kanālu abos galos daļēji noslēdz keramiski izolatori, kas redzami 2.2. attēlā (ar sarkanu). Tie ir iestrādāti, lai vismaz daļēji novērstu MHD mašīnām raksturīgos nevēlamos gala efektus, kas izpaužas kā parazitisku, šuntējošu virpuļstrāvu inducēšanās kanāla galos [38]–[41]. Šādas parazitiskas strāvas veidojas, jo magnētiskais lauks vairs nav konstants. Magnētu galos tas ievērojami krītas, samazinoties gandrīz līdz nullei. Par gala efektiem elektrisko mašīnu un MHD literatūrā tradicionāli sauc parādības, kas ir saistāmas ar induktoru, spoļu, MHD sūkņu u. c. elektromagnētisku iekārtu galīgajiem garumiem. Tas nereti rada elektromagnētiskā lauka nehomogenitāti apskatāmo iekārtu galos un citviet.

Arī pētāmā MHD ģeneratora gadījumā minētās šuntējošās strāvas nelabvēlīgi ietekmē elektriskās mašīnas darbību. Šīs strāvas atspoguļojas aizvietošanas shēmā kā aktīvā pretestība R_0 . Minētais jautājums sīkāk apskatīts darba 2. nodaļā par elektriskās mašīnas teorētisko izpēti.

Apskatot 1.2. tabulā redzamos MHD ģeneratora parametrus, varētu spriest, ka magnētiskais Reinoldsa skaitlis (R_m) ir mazs, pateicoties iekārtas mazajiem izmēriem. Šeit gan jāatzīmē, ka šādā, klasiskā nostādņē tiktu apskatīti tikai lokāli procesi, saistīti ar vienu pašu šķidruma plūsmu kanālā. Tomēr, sākot interesēties par to, kāds varētu būt R_m skaitlis visam ģeneratoram kopumā, un atceroties to, ka elektromagnētiskās enerģijas pārveidošanās process ļoti būtiskā mērā noris, arī pateicoties MHD ģeneratora feromagnētiskajām daļām, R_m skaitļa vērtība var būt samērojama ar vieninieku. Tādā gadījumā tas liecina par to, ka inducētais magnētiskais lauks jau jūtami ietekmē pielikto magnētisko lauku. Tāpat ir nozīme tam, kā R_m skaitlī tiek izvēlēts raksturīgais izmērs.

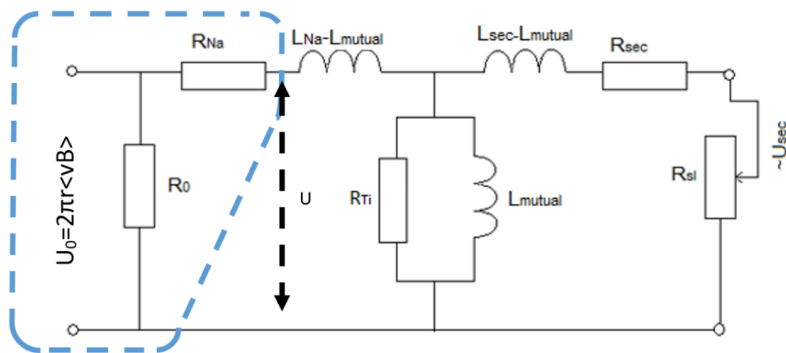
Veicot magnētiskā lauka skaitlisku modelēšanu, vizuāli šī inducētā lauka ietekme ir nepārprotami saskatāma, salīdzinot sākotnējā pieliktā un rezultējošā lauka modeļus (2.7. att.), kas tiks parādīti darba 2. nodaļā. Kvantitatīvs enkura reakcijas ietekmes novērtējums ir attēlots 2.6. attēlā. Tajā ir redzams, ka inducētā magnētiskā lauka ietekme ir jūtama un izmērāma attiecībā uz elektriskās mašīnas enerģētiskajiem parametriem. Šajā attēlā, salīdzinot, piemēram, maksimālo lietderības koeficientu gadījumam bez sekundārā lauka un ar pieliktu 200 W nominālo slodzi, redzams, ka sekundārais magnētiskais lauks pasliktina mašīnas lietderības koeficientu par 2 %. Šāds samazinājums, kā redzams, ir relatīvi neliels. Tomēr, salīdzinot gadījumus pie lielākām slodzes pretestībām, kritums jau ir lielāks, turklāt, ievērojami palielinoties noslodzei, samazinājums jau kļūst būtisks. Ņemot vērā iepriekšminēto, rezultējošā magnētiskā lauka deformācija lielākā vai mazākā mērā notiek arī tad, ja $R_m < 1$.

2. EKVIVALENTĀ ELEKTRISKĀ AIZVIETOŠANAS SHĒMA MHD ĢENERATORA ANALĪZEI

2.1. Transformatora ekvivalentās shēmas pieejas formulējums

Pētāmais maiņstrāvas MHD ģenerators var tikt apskatīts kā sastāvšs no divām elektriskajām mašīnām.

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



2.1. att. MHD ģenerators elektriskā aizvietošanas shēma.

Par kondukcijas tipa MHD sūkņiem un plūsmas mērītājiem sauc šķidra metāla iekārtas, kurās MHD mijiedarbība notiek, pateicoties pieliktam magnētiskajam laukam un šķidram metālam ārēji pievadītai strāvai konduktīvā ceļā [28]. Tas nozīmē strāvas pievadu izmantošanu, kas tieša elektriskā kontakta rezultātā nonāk saskarē ar šķidru metālu vai kanālu, kas parasti arī ir no elektrovadoša materiāla. Pretēji tam, indukcijas tipa MHD iekārtās strāvas šķidrajā metālā tiek ierosinātas, pateicoties elektromagnētiskajai indukcijai [40], [41]. Neskatoties uz to, ka šajā promocijas darbā tiek izmantota kondukcijas tipa MHD mašīnu teorija, reāli pētāmā elektriskā mašīna ir induktīva tipa enerģijas pārveidotājs, jo strāva konduktīvā ceļā pievadīta netiek.

Ņemot to vērā, ir iespējams analizēt MHD ģenerators darbību, izmantojot transformatora T veida ekvivalento aizvietošanas shēmu. Papildus tam shēmā ir attēlota MHD mašīnām raksturīgos gala efektus raksturojošā šuntējošā aktīvā pretestība R_0 . Savukārt, pateicoties somaloja īpašībām, magnētiskie zudumi ir mazi un attēlotajā shēmā netiek ņemti vērā.

Piedāvātajā MHD ģenerators aprēķina metodē pieņem, ka Na lokālais kustības ātrums pa visu kanāla tilpumu ir konstants. Izstrādātā MHD ģenerators aprēķina metode ietver elektriskās mašīnas analīzi, kurai ir divi soļi. Vispirms zināšanas par MHD ģenerators ģeometriju un tā

magnētisko lauku tiek pārvērstas par parasto elektrisko mašīnu teorijā plaši izmantoto ekvivalento aizvietošanas shēmu (2.1. att.). Savukārt tālāk aizvietošanas shēmas zaru strāvu un spriegumu secīgs aprēķins no kreisās uz labo pusi (vai otrādi) nodrošina visus nepieciešamos elektriskās mašīnas parametrus.

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

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

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

Papildus tam tika risināti divi atsevišķi elektriskās strāvas sadalījumi šķidrajā metālā, plakanparalēlā režīmā.

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

Ar reakcijas strāvu matemātiski jāsaprot tādu strāvu, ko izraisa nulles strāvas robežnosacījumi uz keramisko izolatoru virsmas. Izolatora virsmai perpendikulārā strāva tiek uzdots vienāda ar nulli, un tas savukārt nozīmē to, ka, ja kādā izolatora punktā ieiet konkrēts skaits strāvas līniju, tad tikpat daudz no izolatora ir jāiziet ārā. Protams, fiziski izolatorā nekāda strāva neieplūst, un tas ir jāsaprot kā matemātisks spriedums. Tāpēc, neskatoties uz to, ka princips šeit ir līdzīgs, ieviesto reakcijas strāvu nav jāizskata kā nobīdes strāvu, kam ir būtiska nozīme tikai augstfrekvences gadījumos. Tātad reakcijas strāvu ir jāsaprot kā kompensējošu strāvu, ko izsauc atbilstošie robežnosacījumi uz izolatoriem un kas ar pretēju zīmi kompensē locekli $vB(z)$. Detalizētāk šie jautājumi ir apskatīti nodaļā par konformajiem attēlojumiem, kur ir demonstrēts potenciāla un izplūdušās strāvas sadalījuma analītisks aprēķins.

Kondukcijas tipa MHD enerģijas pārveidotāju teorijā jautājumi, kas ir saistīti ar šāda tipa izolatoriem, ir plaši pētīti un atspoguļoti fundamentālajā literatūrā [28], [29]. Piemēram, ir zināms, ka strāvas izplūšanas aina ir būtiski atšķirīga gadījumā, ja magnētiskais lauks ir ierobežots līdz ar strāvas pievadiem (2.2. att. (b)), vai arī tad, ja lauks ir iznests ievērojami tālu no elektrodu zonas (2.2. att. (a)). Ietekme ir arī tam, cik strauji magnētiskais lauks krīt pētāmā apgabala galos (jau apskatītie tā sauktie “gala efekti”). Kā redzams, 2.2. attēlā (b) redzamais inducētās strāvas virpulis rezultējas strāvās, kas plūst pret pamatstrāvu zonā, kas ir ārpus magnētiskā lauka. Tādējādi vadošās vides apgabali pirms un pēc ieiešanas magnētiskā lauka zonā kalpo kā paralēli jeb šuntējoši elektriskās ķēdes zari transformatora aizvietošanas shēmā. Līdz ar to tas rezultātā samazina elektriskās mašīnas lietderības koeficientu. Vienlaikus ir

zināms paņēmieni, kā ar šo parādību cīnīties, ievietojot elektriski nevadoša materiāla izolējošu starpsienu magnētiskā lauka ieejas un izejas zonās. Tādējādi 2.2. attēlā (b) redzamais noslēgtās strāvas virpulis var tikt sadalīts divos mazākos. Palielinot izolatoru skaitu, šis dalījums tiek palielināts proporcionāli vēl vairāk. Šis gala efektu samazināšanas paņēmieni, atbilstoši pielāgots, ir lietots arī pētāmajā elektriskajā mašīnā. 2. un 3. magnētiskā lauka modelis tika lietots arī tāpēc, lai, izmantojot “*Quickfield*”, aprēķinātu aizvietošanas shēmas induktivitātes.

Tiek pieņemts, pirmkārt, ka visi apskatāmie vektori ir ortogonāli (piemēram, v un B 2.2. vienādojumā ir perpendikulāri cits citam). Otrkārt, tiek lietota tikai viena, dominējošā vektora komponente. Tādā gadījumā vektoru apzīmējumi vairs nav vajadzīgi, un tie tiek atmesti. Tad strāvu ģenerējošās daļas aprakstam, kas atbilst kondukcijas tipa MHD ģeneratora daļai, var tikt izmantota inducētās strāvas blīvuma izteiksme, uzrakstīta veidā, kādā ir ņemti vērā elektrisko lauku atbilstošie virzieni [37]:

$$j(x) = \sigma[vB(z) - E_v(x) - E_U(x)]. \quad (2.1)$$

Ņemot vērā iepriekš minēto saistībā ar vektoru apzīmējumiem, piemēram, 2.1. formulā, magnētisko lauku faktiski uzskata par vienādu ar $B = \{B_r(z); 0; 0\}$, kas nozīmē radiālās komponentes atkarību no z koordinātes. Ātrums tādā gadījumā attiecīgi būtu pierakstāms šādi: $v = \{0; 0; v_z = \text{const}\}$. Vidējot 2.2. vienādojumu pa azimutu un rādiusu, var iegūt šādu viendimensionālu izteiksmi, kurā z nozīmē lieluma atkarību no telpas koordinātas vienīgi aksiālā virzienā:

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

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

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

kas ir keramikas izolatoru reakcija uz loekli $vB(z)$. Šī pretdarbība rezultējas kā elektriskā lauka rašanās, un tas ir izskaidrojams ar to, ka uz izolatora virsmas uzkrājas lādiņi, kas neļauj strāvai plūst caur šo vietu. $vB(z)$ un $E_v(z)$ locekļi ir proporcionāli šķidrums plūsmas ātrumam un lineāri atkarīgi no magnētiskā lauka telpiskā sadalījuma. $E_U(z)$ savukārt ir atkarīgs no elektriskās slodzes un rodas magnētiskās plūsmas izmaiņas rezultātā. $E_U(z)$ ir būtisks, jo ir nepieciešams, lai aprēķinātu transformatora ekvivalentās aizvietošanas shēmas ieejas spriegumu.

2.1. un 2.2. vienādojuma elektriskā lauka locekļi (otrais un trešais saskaitāmais) ir rakstīti ar mīnusa zīmi, jo tie darbojas pretī loceklim $vB(z)$. Reizinātājs $b(z)$ veidojas formālas Grīna funkcijas $g(z, z_1)$ izmantošanā integrāli. Grīna funkcijas jēga šeit ir tāda, ka tā parāda svaru, ar kādu magnētiskais lauks kādā punktā “ z_1 ” rada elektrisko lauku citā punktā “ z ” atbilstoši 2.2. vienādojumam. Skaitliskā aprēķinā ar galīgo elementu metodi var aprēķināt uzreiz visu integrāli (2.2. vienādojums). Tomēr minēto Grīna funkciju iespējams atsevišķi iegūt, arī izmantojot kompleksā mainīgā funkciju un konformo attēlojumu pieeju [42].

Kā zināms, jauda ir vienāda ar

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

kur F – spēks, v – nātrija plūsmas ātrums, savukārt elektromagnētiskā elementārspēka blīvums df elementārtilpumā dV var tikt uzrakstīts šādi:

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

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

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

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

$$\begin{aligned} P_{Na} &= \sigma v^2 \iiint (B(z)^2 - B(z)b(x)) dV - \sigma v \iiint (B(z)E_U(x)) dV = \\ &= 2\pi r h \sigma v^2 \int (B(z)^2 - B(z)b(z)) dz - 2\pi r h \sigma v \int E_U(z) B(z) dz. \end{aligned} \quad (2.7)$$

No aizvietošanas shēmas strāvu caur nātrija elektrisko pretestību var uzrakstīt kā

$$I_{Na} = \frac{U_0 - U}{R_{Na}}. \quad (2.8)$$

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

$$P_{Na.ekv} = \frac{U_0^2}{R_0} + (U_0 - U)I_{Na} + UI_{Na} = U_0^2 \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_{Na}} \right) - \frac{U_0 U}{R_{Na}}. \quad (2.9)$$

Tādā veidā 2.7. un 2.9. izteiksmēm jābūt vienādām.

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

1. Nātrija pretestība

$$R_{Na} = \frac{2\pi r}{\sigma h l_{active}} \quad (2.10)$$

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

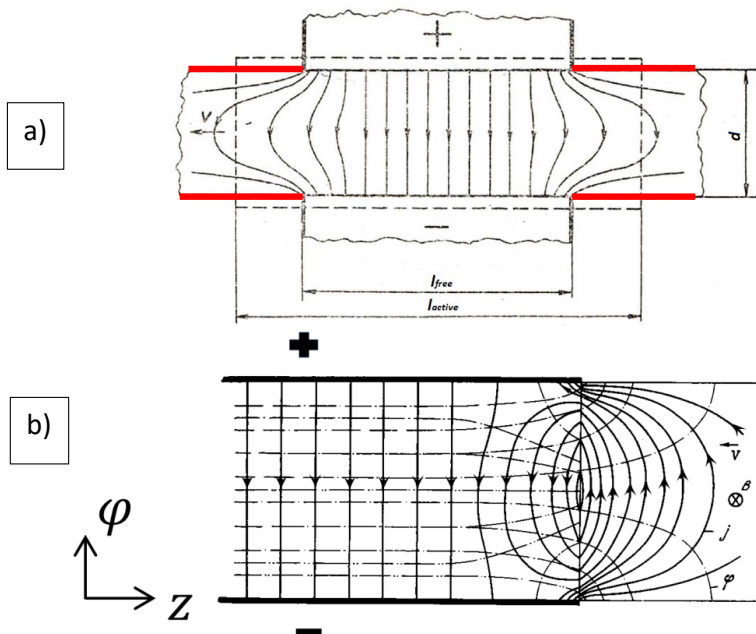
$$\Omega = 2\pi r h l_{active}. \quad (2.11)$$

Neskatoties uz to, ka Na kanāls ir noslēgts un strāva, plūstot pa šo gredzenu, noslēdzas pati uz sevi, Na gredzenam tomēr ir galīga elektriskā pretestība. Šī pretestība tiek aprēķināta kā kanāla garuma attiecība pret Na īpatnējo elektrovadītspēju un kanāla šķērsgriezuma laukumu, kur h – ir kanāla augstums, l – aksiālais garums. Tomēr MHD mašīnas gadījumā strāva ir izplūdusi, līdz ar to elektriskā potenciāla un strāvas blīvuma sadalījums nav vienmērīgs pa vadītāja šķērsgriezumu. Tāpēc strāvas līnijas ir izliektas, kā redzams 2.2. attēlā. Tas izraisa to, ka strāvas faktiski izmantotais šķērsgriezums $l_{active}h$ pārsniedz spraugas brīvo laukumu $l_{free}h$, līdz ar to pretestība nedaudz samazinās. 2.2. attēls aizgūts no kondukcijas tipa MHD sūkņu teorijai veltītās monogrāfijas [28], tomēr papildināts ar pētāmajā MHD ģeneratorā iestrādātajiem

izolatoriem (sarkanā krāsā). LU Fizikas institūtā J. Birzvalka vadībā savulaik veiktie pētījumi [28] ir pierādījuši, ka kondukcijas tipa MHD mašīnām

$$l_{\text{active}} = l_{\text{free}} + 2 \cdot 0,22d, \quad (2.12)$$

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



2.2. att. a) Nātrijā inducētā EDS veidotās strāvas profils, apskatot strāvas līkuma ieplūšanu vienā apakškanālā (attālums “ d ”) [28]; ar sarkanu – iestrādāti nevadoši keramiskie izolatori atbilstoši 2.4. attēlam; magnētiskais lauks iznests tālu ārpus elektrodu zonas; b) inducētās strāvas profils gadījumā, kad magnētiskais lauks ir ierobežots līdz ar elektrodu galiem.

Lai izskaidrotu 2.2. attēlā redzamās shēmas sakaru ar pētāmo ģeneratoru, jāiedomājas Na gredzenveida kanāls ar vairākiem apakškanāliem, un viens taisnstūrveida apakškanāls ir attēlots minētajā zīmējumā. Tomēr šeit ir vērts atzīmēt, ka reāli izgatavotā iekārta ir sarežģītāka par 2.2. attēlā redzamo. Reāli izveidotie apakškanāli izolatoros ir nevis taisnstūrveida, bet apaļu, aksiāli nesimetrisku (taču simetrisku attiecībā pret azimutu) urbumu formā.

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

$$N(z) = E_U(z) \frac{2\pi r}{U}. \quad (2.13)$$

Pielīdzinot 2.7. un 2.9. vienādojumu labo pušu pēdējos locekļus, pēc pārveidojumiem iegūst izteiksmi, ko var uzrakstīt šādā veidā:

$$\begin{aligned}
 U_0 &= \sigma v R_{\text{Na}} \iiint \left[\left(\frac{E_U(x)}{U} \right) B(z) \right] dV = \\
 &= \frac{1}{2\pi r} 2\pi r h \sigma v R_{\text{Na}} \int \frac{E_U(z)}{U} B(z) dz = 2\pi r v \langle B \rangle,
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

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

$$\langle B \rangle = \frac{1}{l_{\text{active}}} \int N(z) B(z) dz, \tag{2.15}$$

kur $N(z)$ – svara funkcija. Jāatzīmē, ka šeit integrēšana ir veikta pa visu aprēķina apgabalu. Šajā gadījumā tas nozīmē – līdz izolatoru galam, kur vienlaikus arī magnētiskais lauks nokrītas līdz nullei.

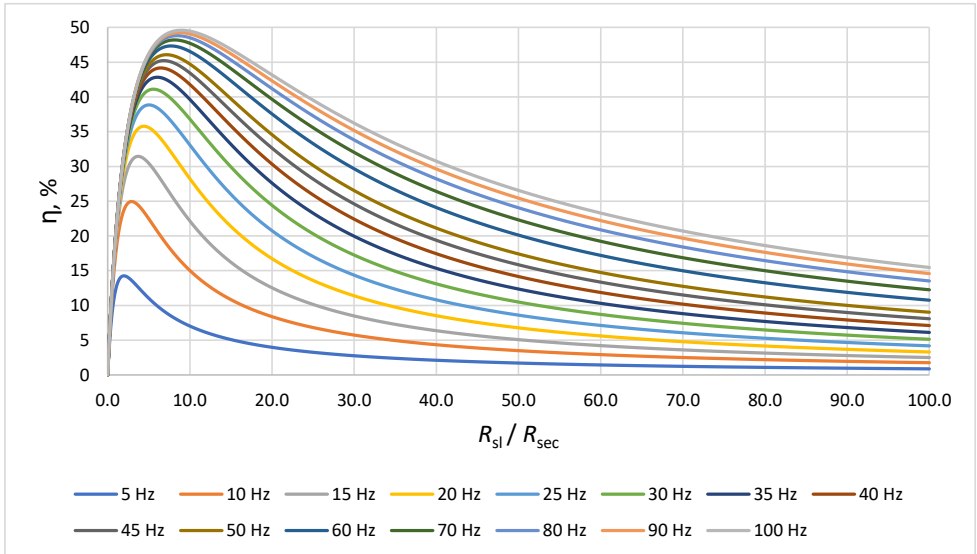
3. R_0 aprēķinam tiek pielīdzināti 2.7. un 2.9. vienādojuma pirmie locekļi, kā rezultātā iegūst šādu izteiksmi:

$$\frac{1}{R_0} = \sigma \left(\frac{\iiint ([B(z) - b(x)] B(z)) dV}{(2\pi r \langle B \rangle)^2} \right) - \frac{1}{R_{\text{Na}}}. \tag{2.16}$$

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

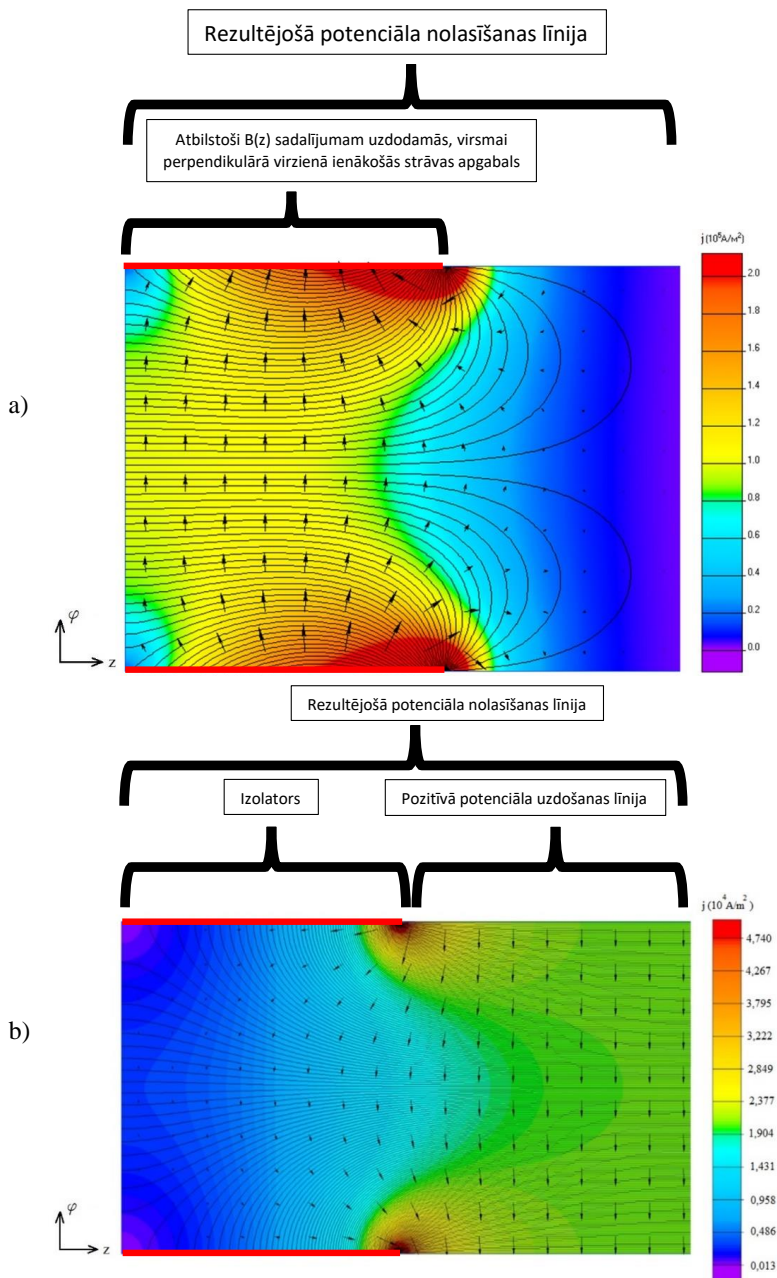
$$\frac{1}{R_0} = \left(\frac{\int ([B(z) - b(z)] B(z)) dz}{l_{\text{active}} \langle B \rangle^2} - 1 \right) \frac{1}{R_{\text{Na}}}. \tag{2.17}$$

Balstoties piedāvātajā MHD ģeneratora aprēķina metodē, iespējams iegūt teorētiski sagaidāmās elektriskās mašīnas raksturlieknes. Viena no raksturliekņu saimēm, proti, iegūtais MHD ģeneratora lietderības koeficients atkarībā no frekvences un slodzes, ir redzams 2.3. attēlā.



2.3. att. MHD ģeneratora aprēķinātā teorētiskā lietderības koeficienta atkarība no slodzes.

Šādi rezultāti iegūstami ar mašīnas elektrisko un magnētisko lauku matemātisko modelēšanu atbilstoši aprakstītajiem vienādojumiem. 2.4. attēlā redzami strāvas un potenciāla sadalījumi pamatstrāvai un reakcijas strāvai viena apakškanāla galos.



2.4. att. MHD ģenerators šķidrā metālā izplūdušās strāvas modelis vienā apakškanālā, tā kreisajā pusē: a) skaitliski iegūtā "Quickfield" reakcijas strāva; b) atbilstošā pamatstrāva; ar sarkanu parādītas keramisko izolatoru vietas atbilstoši 2.2. attēlam (a).

2.2. MHD ģenerators aprēķins, ievērojot enkura reakcijas lauka ietekmi

Iepriekš izklāstītais ir spēkā zemas jaudas režīmā, kad šķidrā metālā un spolē inducēto strāvu magnētiskie lauki jūtami neietekmē pastāvīgo magnētu radīto magnētisko lauku. Lielāku jaudu gadījumā šis lauks tiek ievērojami ietekmēts un var pasliktināt mašīnas darbību. Šī parādība klasisko elektrisko mašīnu teorijā, kā zināms, tiek dēvēta par enkura reakciju. Darba gaitā ir izstrādāta pieeja, kā var ņemt vērā šīs parādības ietekmi uz MHD ģenerators darbību.

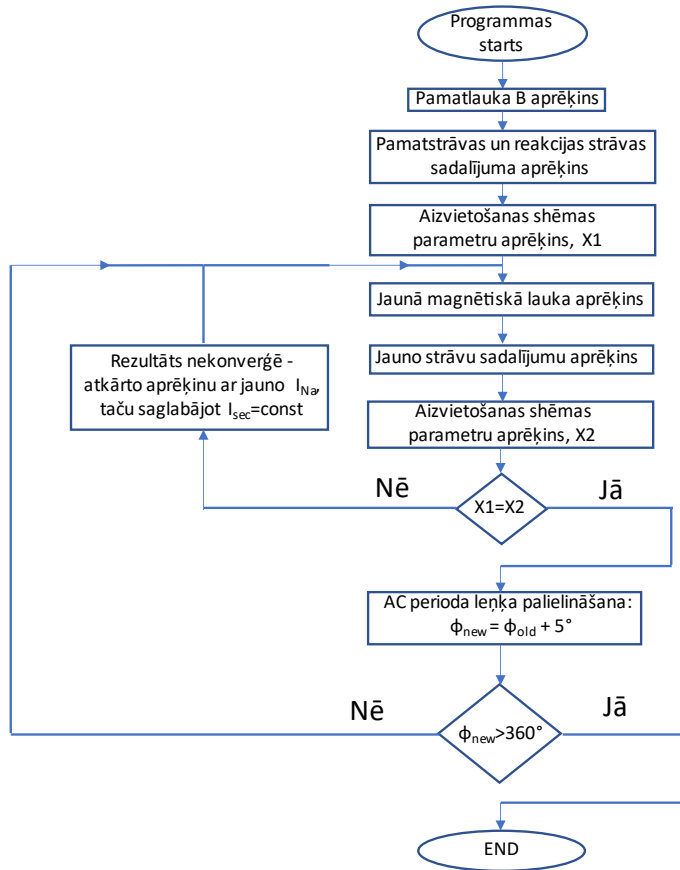
Magnetohidrodinamikā pētāmās parādības aprakstam visbiežāk lieto magnētisko Reinoldsa skaitli (R_m), izmantojot vienu no tā primitīvākajām interpretācijām, kas nosaka to, ka inducētā magnētiskā lauka attiecība pret pielikto lauku ir proporcionāla R_m . Kā jau teikts, magnētiskais Reinoldsa skaitlis ir mazs, pateicoties iekārtas mazajiem izmēriem. Kā būs redzams, tas rada to, ka nominālā 200 W režīmā enkura reakcijas ietekme ir neliela. Tomēr, kā rāda šajā nodaļā iegūtie rezultāti, enkura reakcija tik un tā ieņem savu stabilu vietu MHD ģenerators kopējā enerģētiskajā bilancē.

Liela jaudas režīma jauninājums attiecībā pret mazjaudas ir tāds, ka aizvietošanas shēmas šuntējošās pretestības R_0 vērtībai ir atkarība no laika. Aprēķins tiek sākts kā mazjaudas režīmā, proti, no pastāvīgo magnētu radītā pamatlauka. Tālāk pēc vajadzīgās patērētāja elektriskās pretestības iestatīšanas “Excel” vidē VBA valodā izstrādātais programmas kods veic shēmas aprēķinu no kreisās puses (ieejas sprieguma – U_0) uz labo, līdz apstājas pie slodzes strāvas un sprieguma krituma uz slodzes pretestību. Kad ir atrastas visas vajadzīgās strāvas, tās tiek ievietotas nākamajā “Quickfield” skaitliskajā simulācijā, izmantojot “Active Field” tehnoloģiju [43], [44] (2.5. att.), kā rezultātā tiek atrasts jaunais lauka sadalījums. Jaunatrstā magnētiskā lauka sadalījuma dati savukārt jau atkal ieiet aizvietošanas shēmas ieejā, un tā turpinās, līdz tiek aprēķināts viss maiņstrāvas periods. Līdz ar to konkrētais $R_0(t)$ sadalījums ir atrasts. Tālāk, integrējot pa visu maiņstrāvas periodu, iegūst mašīnas lietderības koeficienta samazināšanās dinamikas attēlojumu pie dažādām attīstāmajām jaudām.

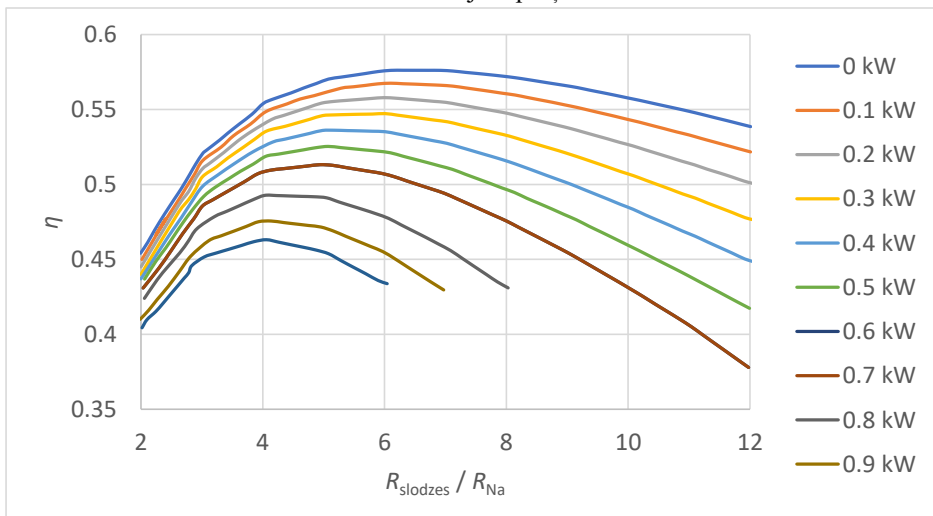
Izstrādātās programmas principiālais algoritms enkura reakcijas ietekmes aprēķinam redzams 2.6. attēlā. Aprēķinātā enkura reakcijas ietekme uz MHD ģenerators lietderības koeficientu pie 50 Hz – 2.7. attēlā. Salīdzinot redzamās līknes, var novērot, ka, palielinoties slodzei, līknes maksimums novirzās uz mazākas slodzes pretestības pusi. Tas var tikt izskaidrots ar induktīvā rakstura strāvu īpatsvara palielināšanos ekvivalentajā aizvietošanas shēmā, proti, vidējā – magnetizēšanās zara – strāvas pieaugumu. 2.8. attēlā redzams salīdzinājums enkura reakcijas neietekmētam elektriskās mašīnas magnētiskajam laukam, ņemot vērā enkura reakciju.



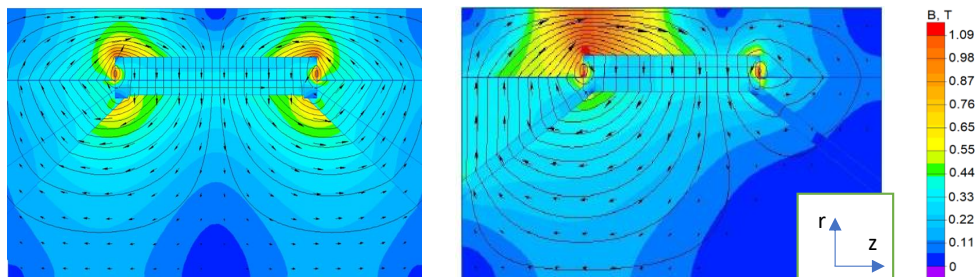
2.5. att. “Excel” un “Quickfield” savstarpējās sasaistes shēma.



2.6. att. Enkura reakcijas aprēķina blokshēma.



2.7. att. Rezultējošā aprēķinātā sekundārā magnētiskā lauka ietekme uz mašīnas lietderības koeficientu ģenerētās lietderīgās jaudas režīmā, kā arī neņemot vērā inducētās strāvas.



2.8. att. a) MHD ģenerators referencē lauka jeb pastāvīgo magnētu radītās galvenās magnētiskās plūsmas indukcijas vektora sadalījums 2D modelī, aksiālā šķēlumā; b) enkura reakcijas ietekmēts MHD ģenerators magnētiskais lauks.

2.3. Kompleksā mainīgā funkciju izmantošana strāvu izplūšanas aprēķinam šķidrā metālā

Elektriskā potenciāla sadalījumu, kā arī strāvas izplūšanu šķidrā metālā ir iespējams analītiski aprēķināt, izmantojot konformo attēlojumu pieeju. Šis paņēmieni nozīmē vienas kompleksās plaknes $z = x + iy$ konformu attēlojumu citā kompleksā plaknē $Z = X + iY$. Šāda attēlojuma jēga ir tāda, ka Laplasa vienādojuma atrisinājums, ko var viegli atrast vienā ģeometrijā, tiek attēlots citādākā – konkrēti interesējošajā ģeometriskajā apgabalā.

Uzdevuma nostādni var formulēt šādi. Vispārējā gadījumā elektriskā potenciāla sadalījumu apraksta Puasona vienādojums

$$\Delta\varphi = \operatorname{div}(\mathbf{v} \times \mathbf{B}). \quad (2.18)$$

Tomēr pētāmajā konfigurācijā ne “ B ”, ne “ v ”, nav atkarīgi no azimutālā leņķa. Atbilstošie vektori ir vērsti tā, lai $\operatorname{div}(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ būtu nulle. Tas rada to, ka Puasona vienādojuma vietā var tikt izmantots jau minētais Laplasa vienādojums, kuram labajā pusē ir 0.

Piedāvātās pieejas izmantošanai ir vairāki ierobežojumi. Pirmkārt, tā ir izmantojama plakanparalēla uzdevuma gadījumā. Pētāmā elektriskā mašīna tās centrālajā, aktīvajā daļā ir aksiāli simetriskas ģeometrijas, tāpēc tas nozīmē, ka ir nepieciešams veikt pāreju no cilindriskās koordinātu sistēmas uz Dekarta koordinātām. Šāda pāreja var tikt veikta pietiekami korekti, jo izpildās nosacījums, ka Na kanāla vidusrādiusam ir jābūt ievērojami lielākam par kanāla augstumu. Otrkārt, lai veiktu šādu pāreju, nepieciešams veikt gredzenveida kanāla pārgriešanu vienā vietā un pēc tam iztaisnošanu jeb izliekšanu. Šāda ģeometriskā transformācija tiek veikta, saglabājot to pašu elektrisko lauku sadalījumu, līdz ar to aksiāli simetriska uzdevuma vietā tiek risināts plakans uzdevums. Saistībā ar teikto aprēķinam tiek veikti šādi pieņēmumi:

- 1) elektriskais potenciāls pa kanāla augstumu ir nemainīgs;
- 2) cilindriskā Na kanāla vietā tiek apskatīts viens tā apakškanāls;
- 3) apskata tikai vienu pusi simetriskajam apakškanālam.

No strāvas blīvuma izteiksmes izrietošais izmantotais robežnosacījums ir uzrakstāms šādi:

$$vB(z) = E_v(x). \quad (2.19)$$

Tas nozīmē, ka uz izolatora virsmas normāles virzienā, tātad – perpendikulāri, ienākošās strāvas ir vienādas ar nulli. No robežnosacījumiem izriet, ka vienas plaknes attēlošana otrā notiek, izņemot bezgalīgi garu masīvu ar taisniem griezumiem jeb šķēlumiem. Šie pārtraukumi arī atbilst Na kanālā ievietotajiem nevadošajiem izolatoriem.

Lielākās grūtības šādai pieejai ir atrast funkcionālās sakarības, kas sasaista abas kompleksās plaknes. Šāda analītiska funkcija, derīga Na reakcijas strāvas attēlojumam, tika atrasta kā:

$$\Phi_{reakc}(z) = \frac{1}{\pi} \{ \ln[\sin(\pi[(x + iy) + a])] - \ln[\sin(\pi[(x + iy) - a])] \}, \quad (2.20)$$

kur a – attālums starp diviem blakus esošiem lādiņiem konformajā attēlā (2.9. att., augšā), tātad – starp malējo lādiņu un 2.9. attēlā redzamo zaļā taisnstūra vertikālo malu. Šāds potenciāls tiek radīts, pateicoties bezgalīgi garam masīvam ar lineāriem lauka līniju avotiem un noplūdēm atbilstoši 2.9. attēla augšējai bildei. Ja kādam $\Phi_{reakc}(z)$ potenciālam x ass ir lauka līnija, tādā gadījumā potenciālam $\Phi_{reakc}(z(Z))$, visas Z plaknes griezumi ir daļa no tās pašas lauka līnijas, līdz ar to izpildās atbilstošie robežnosacījumi.

Tādā gadījumā 2.3. vienādojumam ir derīga šāda Grīna funkcija:

$$g(x, x_1) = \frac{2}{\pi} \ln \left| \frac{\sin(\arccos(e^{-\pi x}) + \arccos(e^{-\pi x_1}))}{\sin(\arccos(e^{-\pi x}) - \arccos(e^{-\pi x_1}))} \right|. \quad (2.21)$$

Aprēķinu gaitā iegūtie zīmējumi redzami 2.9. attēlā. Praksē konformā attēlošana nozīmē to, ka plakne tiek it kā “salocīta” pa kādas konkrētas locījuma vietas līniju. Augšējā horizontālā zaļā locījuma līnija 2.9. attēlā augšā atbilst zilajai viduslīnijai 2.9. attēla apakšā. Šī zilā līnija ir Na apakškanālus atdalošais izolators. Izklāstītais locījums veikts, salokot zaļo līniju tā, ka abi līnijas galapunkti saiet kopā, tādējādi attēlojot augšējā zīmējuma pusplakni apakšējā attēlā. Jāsaprot, ka šis zīmējums reprezentē strāvas sadalījumu pirms integrēšanas, izmantojot Grīna funkciju. Tas nozīmē to, ka 2.9. attēla apakšā redzamas tikai no viena punkta izejošās un ienākošās strāvas līnijas.

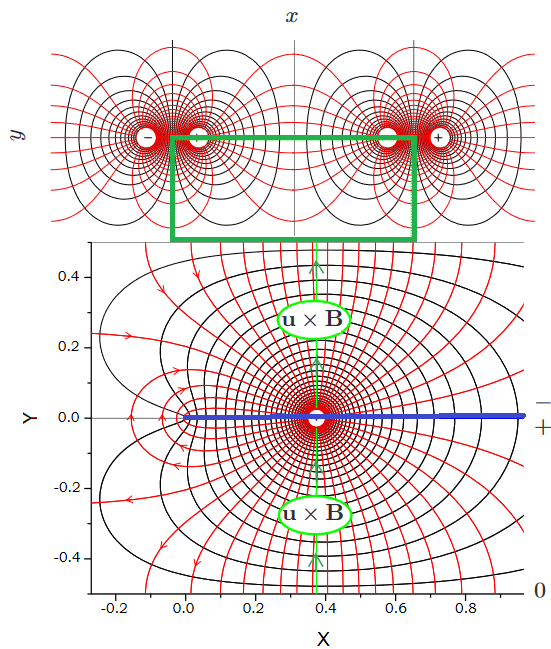
Šajā (2.9) attēlā var redzēt, kā attīstās loceklis $\mathbf{v} \times \mathbf{B}(z)$, kas inducējas konkrētā punktā

$$x = \frac{-\ln|\cos \pi a|}{\pi} = 0,37381. \quad (2.22)$$

Pamatstrāvas attēlojumam vienas kompleksās plaknes saistību ar otru var attēlot ar šādu funkciju:

$$\Phi_{pam}(Z) = 1 - \frac{2\arccos e^{-\pi Z}}{\pi} = N(z), \quad (2.23)$$

kur $N(z)$ – jau iepriekš skaitliskās modelēšanas sadaļā ieviestā svara funkcija. Šāds iedalījums svara un Grīna funkcijās ļauj atsevišķi izdalīt un noteikt divus atsevišķus svarus. Viens no tiem ir tāds, ar kādu 2.9. attēla apakšējā zīmējuma daļā redzamā strāvas līnija apliecas ap izolatoru. Savukārt otrs nosaka, cik liela daļa līniju aiziet uz tuvākajiem kaimiņizolatoriem.



2.9. att. MHD ģenerators šķidrajā metālā izplūdušās strāvas modelis vienā apakškanālā:
 1) ar konformo attēlojumu metodi iegūtā pret pamatstrāvu vērsta inducētā reakcijas strāva
 (apakšā); 2) tās inversais attēls (augšā).

3. MHD ĢENERATORA ANALĪZE, IZMANTOJOT SPRIEGUMU VIENĀDOJUMUS

3.1. Magnetohidrodinamikas vienādojumu sistēma

Šajā nodaļā tiek piedāvāta alternatīva pieeja transformatora aizvietošanas shēmai. Tā balstās analītiskos vienādojumu izvedumos strāvām, Na ātrumam un citiem lielumiem [45]. Meklējamās funkcijas iegūtas, izmantojot MHD vienādojumu sistēmas vienādojumus integrālā formā viendimensionālā tuvinājumā, proti, bez skaitliskās modelēšanas. Kā parādīts, izstrādātā metode dod adekvātus rezultātus, kas ir salīdzināmi un labi sakrīt ar aizvietošanas shēmas pieeju iegūto, kā arī ar eksperimentu rezultātiem [46]. Tomēr, pirms sākt piedāvātās metodes izklāstu, autoraprāt, ir lietderīgi diferenciālā formā uzrakstīt vispārīgo magnetohidrodinamikas vienādojumu sistēmu, kurā pieeja ir bāzēta [47]–[49].

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = 0,$$

kur t – laiks;

ρ – šķidra metāla blīvums;

\mathbf{v} – šķidrums ātrums;

p – spiediens;

η – šķidrums dinamiskā viskozitāte;

\mathbf{g} – brīvās krišanas paātrinājums.

Redzams, ka Navjē-Stoksa vienādojums ietver ārējo spēku locekli. Šajā gadījumā tas ir elektromagnētiskā spēka blīvums, un apskatāmajos MHD procesos nereti tieši šim saskaitāmajam ir vislielākā nozīme.

Piedāvātajā MHD ģeneratora aprēķina metodē tiek lietots tā sauktais elektrodinamiskais jeb cieta ķermeņa tuvinājums, kas nosaka to, ka šķidrums tilpums tiek uzskatīts par kustīgu cietu

ķermeņi. Proti, tiek pieņemts, ka šķidrums lokālais ātrums visos tilpuma punktos ir vienāds [50].

Modelis ir bāzēts Ampēra teorēmas lietošanā. Tas nosaka, ka Na strāvas radītais magnētiskais lauks ir nātrijā plūstošo, inducēto strāvu radīts (3.1. att.). 3.1. attēlā var redzēt, ka kopsummā trīs dažādas elektriskās strāvas šķērso apgabalu, kas ir ierobežots ar magnētiskās plūsmas līniju: elektriskā strāva nātrijā I_1 ; inducētā zudumu strāva vadošajā titāna sienīnā I_w ; inducētā sekundārā strāva ģeneratora spolē I_2 un slodzē. Uzrakstot pilnās strāvas likumu, kurā par integrēšanas kontūru ņemta iepriekšminētā plūsmas līnija, iegūst

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

Izmantojot magnētiskās plūsmas nepārtrauktības principu

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

tad, apvienojot 3.8. un 3.9. vienādojumu, iegūst

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

Turpmākais lielums tiks apzīmēts ar L'_0 un nosaukts par ekvivalento garumu

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

Tad magnētiskā plūsma var tikt izteikta kā

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

Var uzrakstīt spriegumu vienādojumus trīs atsevišķām elektriskām ķēdēm: strāvai šķidrā nātrijā; strāvai spolē; parazītiskai strāvai elektriskās mašīnas konstruktīvajā elementā – šuntējošā titāna sienīnā/čaulā.

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

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

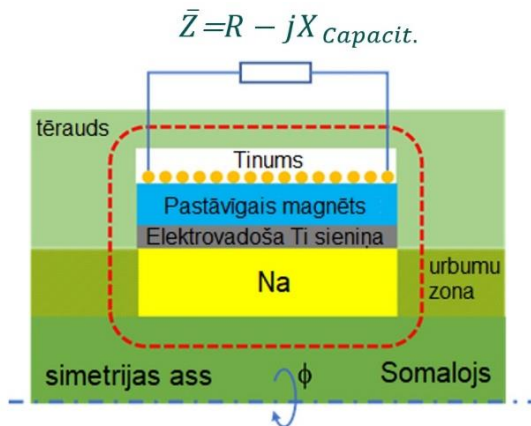
Atvasinot 3.13. izteiksmi, tiek iegūts

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

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

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

Ņemot vērā darba pamattekstā tālāk sīkāk skaidrotos atbilstošos pārveidojumus un matemātiskās manipulācijas, šīs izteiksmes ir apvienojamas ar šķidrums kustības vienādojumu integrālā formā.

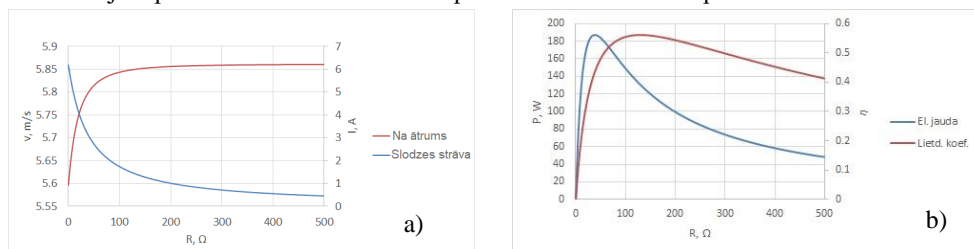


3.1. att. Elektriskās mašīnas pētāmā magnētiskā ķēde.

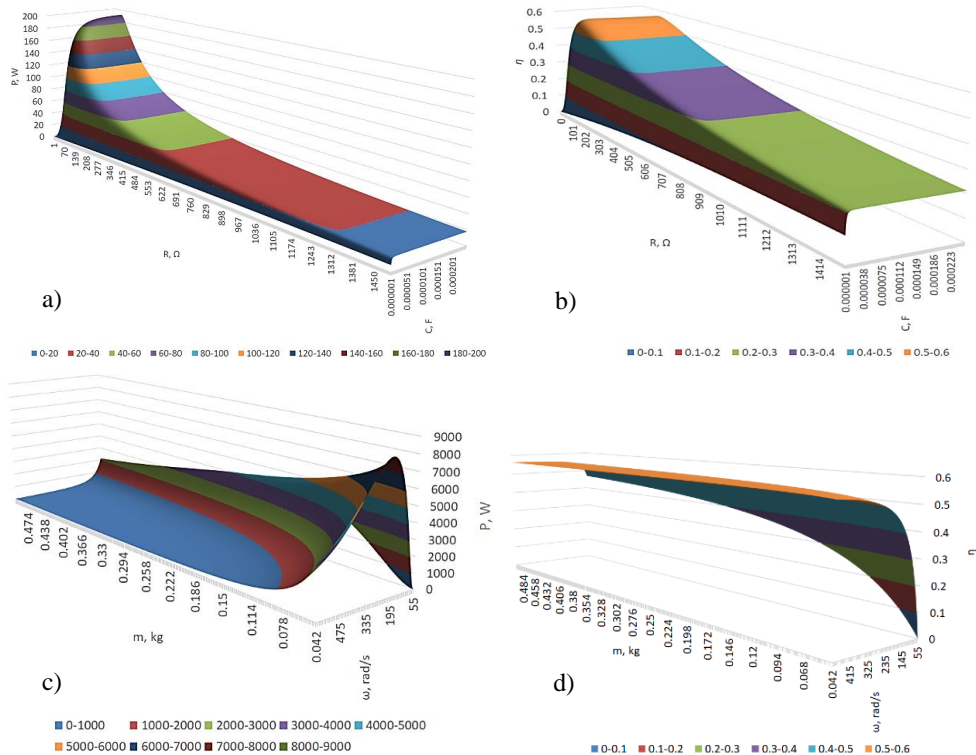
3.2. Aprēķinu rezultāti un to interpretācija

Izmantojot piedāvāto pieeju, iegūtas slodzes strāvas, Na ātruma un citas izteiksmes, kas var tikt izmantotas MHD ģenerators enerģētisko parametru un citu raksturlielņu aprēķinam.

Piemēram, 3.2. attēlā redzamas ātruma un slodzes strāvas izmaiņas atkarībā no slodzes pretestības pie pievadītā spiediena diferences $\Delta P = 6$ bar. No līknēm var redzēt, ka sākotnēji, slodzes pretestībai sākot pieaugt no nulles, vienlaikus ir novērojams straujš Na ātruma pieaugums. Elektriskajai pretestībai turpinot paaugstināties virs aptuveni 200Ω , ātrums nostabilizējas un paliek nemainīgs. Savukārt strāvai aina ir pretēja un, piemēram, $\Delta P = 6$ bar gadījumā, sākot no maksimālās vērtības $I = 5,85$ A, paaugstinot pretestību, strāva sākotnēji strauji samazinās, pēc tā asimptotiski tuvojas nullei. No tā izriet, ka pie lielām slodzes elektriskajām pretestībām iekārtas darbību pamatā nosaka inerces spēki.



3.2. att. MHD ģenerators Na ātruma un slodzes strāvas (a), kā arī elektriskās jaudas un lietderības koeficienta (b) atkarības no slodzes elektriskās pretestības.



3.3. att. MHD ģenerators attīstītās lietderīgās elektriskās jaudas (a) un lietderības koeficienta (b) atkarība no slodzes pretestības un kondensatora kapacitātes; attiecīgi tie paši lielumi (c) un (d) atkarībā no šķidra metāla masas un spiediena svārstību leņķiskās frekvences.

3.2. attēlā (b) redzamas aprēķinātās elektriskās jaudas un lietderības koeficienta atkarības no pretestības pie frekvences un masas, kas atbilst reāli izgatavotajam prototipam. Kā redzams, maksimālā jauda šajā gadījumā pie $\omega = 314 \text{ rad/s}$ un $m = 0,464 \text{ kg}$ ir sasniegta pie pretestības 40Ω . Apskatot lietderības koeficienta līkni, šis maksimums, salīdzinot ar jaudu, ir nobīdīts un sasniedz pretestību 100Ω . Tas nozīmē, ka, izvēloties MHD ģenerators optimālo darba režīmu, ir jāmeklē kompromiss starp maksimālo jaudu un maksimālo mašīnas efektivitāti jeb lietderības koeficientu. Jāatzīmē, ka 3.2. attēlā redzamās līknes ir iegūtas tikai MHD ģeneratoram. Tas nozīmē, ka elektriskās mašīnas lietderības koeficients tiek nodalīts atsevišķi no TAc dzinēja lietderības koeficienta.

Jāatceras, ka elektriskās mašīnas jaudas koeficients vienmēr ir $\cos \varphi < 1$. Fāžu nobīdes leņķis starp slodzes strāvu un spriegumu ietekmē no MHD ģenerators noņemamās iespējami maksimālās aktīvās jaudas apmēru. Pieslēdzot slodzei pietiekami lielas kapacitātes kondensatoru, iespējams šo jaudu maksimizēt. Tiecoties pēc maksimālā lietderības koeficienta, nepieciešamā kapacitātes vērtība, protams, ir cita. Tas arī ir redzams 3.3. attēlā (a) un (b).

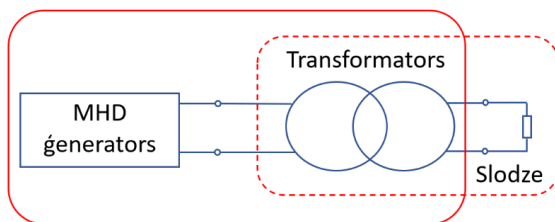
3.3. attēlā (c) un (d) redzama attiecīgi jaudas un lietderības koeficienta atkarība no Na masas un leņķiskās frekvences. Kā redzams, attīstāmā jauda samazinās, palielinoties masai, jo

šķidrums inerce ierobežo kustības ātrumu pie jebkuras frekvences. No otras puses, masai turpinot palielināties, mašīna arvien vairāk paliek inerces spēku vadīta, kas rada fāzu nobīdes leņķi starp Na strāvu un ātrumu tuvu $\pi/2$. Sekas ir tādas, ka ģeneratoram pievadītā mehāniskā jauda paliek neapmierinoši zema. Kā redzams 3.3. attēlā (d), lietderības koeficients tiecas uz konstantu vērtību neatkarīgi no nātrija masas un pie pietiekami lielas frekvences. Šie rezultāti var tikt izskaidroti ar to, ka modelis neņem vērā virsmas efektu jeb skinefektu, kas kļiedē nātrija strāvu pie augstām frekvencēm.

Jautājumi, kas saistīti ar ģeneratora darbības elektromagnētisko stabilitāti, promocijas darbā nav pētīti. Tomēr ir pamats uzskatīt, ka stabils mašīnas darbs tiek nodrošināts, pateicoties trīs savstarpējā līdzsvarā esošu locekļu pārdalei: pieliktajam spiedienam uz ģeneratora galiem; elektromagnētiskajiem spēkiem; inerces spēkiem. Tas nozīmē, ka, piemēram, gadījumā, ja spiediens pēkšņi tiek samazināts, strāva un Na ātrums, automātiski nostabilizējošies, nostāsies jaunā līdzsvara stāvoklī. Šis jaunais stāvoklis ir atkarīgs no Na masas, kas savukārt nosaka sistēmas inerci, kā jau minēts iepriekš. Tas ir vēl viens iemesls, kāpēc Na masas iespējama samazināšana ir būtiska.

Attiecībā uz turbulences iespējamo ietekmi jāatzīmē, ka šajā nodaļā piedāvātās metodes aprobācija ir veikta lamināras plūsmas apstākļos un ar turbulenci saistīti jautājumi nav apskatīti. Tomēr atsevišķi svarīgi apsvērumi var tikt veikti. Pirmkārt, pārejas robeža no lamināra uz turbulentu režīmu pieaug, palielinoties pieliktajam magnētiskajam laukam. Otrkārt, nātrija plūsma nav stacionāra, kā arī inducētais sekundārais magnētiskais lauks ir pulsējošs, kā tas ir šajā gadījumā. Tie abi ir šķidrums plūsmas nestabilitātes iespējamie faktori. Eksperimentāli var būt sagaidāms, ka atsevišķas turbulentes struktūras veidojas tikai svārstību perioda maksimumā, kad ātrums ir maksimāls. Šis jautājums ir turpmāk jāpēta detalizētāk, daži aspekti ir eksperimentāli demonstrēti darba 4. nodaļā.

Darbā parādīts, ka abas piedāvātās aprēķina metodes ir adekvāti salīdzināmas, dod vienlīdz ticamus rezultātus, kā arī vienlīdz detalizēti apraksta elektriskās mašīnas enerģētiskos un fundamentālos parametrus. Salīdzinot abas aprēķinu metodes, induktivitāte un Na ātrums ir lielumi, kuru lietojums atšķiras abās pieejās. Ja transformatora ekvivalentās ķēdes formulējumā ātrums tiešā veidā parādās tikai shēmas ieejā, tad šajā nodaļā apskatītajā metodē ar to tiek operēts ievērojami plašāk. Iespējams veikt salīdzinājumu arī citādā veidā. 3.4. attēlā redzams pētāmās sistēmas koncepts, ar nepārtrauktu sarkanu līniju atdalot šajā nodaļā piedāvāto Maksvela vienādojumu aprēķina pieeju. Savukārt ar raustītu sarkanu līniju parādīta ekvivalentās transformatorshēmas pieeja.



3.4. att. Ekvivalentās transformatorshēmas metodes un Maksvela vienādojumu pieejas salīdzinājums.

4. EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI

4.1. Termoakustiskās iekārtas atsevišķie eksperimenti

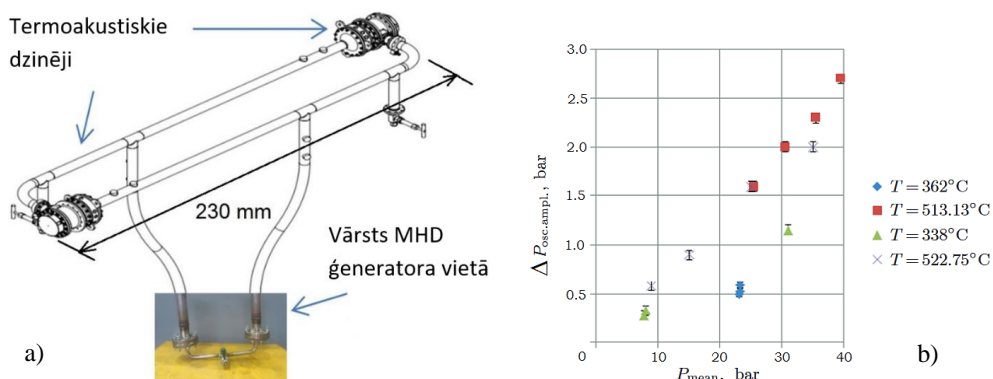
Lai iespējami labāk izprastu “*SpaceTRIPS*” iekārtas darbību un tās nianšes, darbojoties dažādos režīmos, tika veikta apjomīga eksperimentu sērija. Uzbūvētā termoakustiskā iekārta un MHD ģenerators tika testēti divējādi.

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

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

Jau 1. nodaļā varēja ievērot, ka 1.2. attēlā redzamais (3. zīmējums kreisajā pusē) Francijas konstruktoru piedāvātais termoakustiskā dzinēja izpildījums ar sarežģītā konfigurācijā saliektām skaņas caurulēm atšķiras no 1.2. attēlā redzamās izgatavotā prototipa fotogrāfijas. Atšķirība ir tajā, ka 4.1. attēlā (a) akustiskā kontūra shēmas ir šķietami izstieptas. Iemesls šādai ģeometrijas izmaiņai ir tāds, ka tā iespējams vienkāršot izgatavošanu, drošāk noblīvēt savienojumus un labāk pielāgot kontūru un mērīšanas shēmu laboratorijas apstākļiem un eksperimentu sesijai. Līdz ar to arī reāli izgatavotā iekārta ir izveidota stilizētā T veidā. Vienlaikus akustiskā kontūra ģeometrija ir saglabājusies tāda pati, līdz ar to pilnībā saglabājot dzinēja akustisko performanci, kā arī neizmainot tā darba režīmu.

4.1. attēla (b) grafikā attēlota termoakustiskā dzinēja attīstīto spiediena svārstību amplitūda pie dažādām konstantām temperatūru diferencēm uz reģeneratora atkarībā no virsspiediena. Tas ir eksperimentālo rezultātu kopsavilkums no dažādiem testiem, dzinējam attīstot nostabilizētu, stacionāru režīmu [35]. Parādītie mēģinājumi veikti situācijā, kad akustiskās slodzes vārsts ir pilnīgi aizvērts.



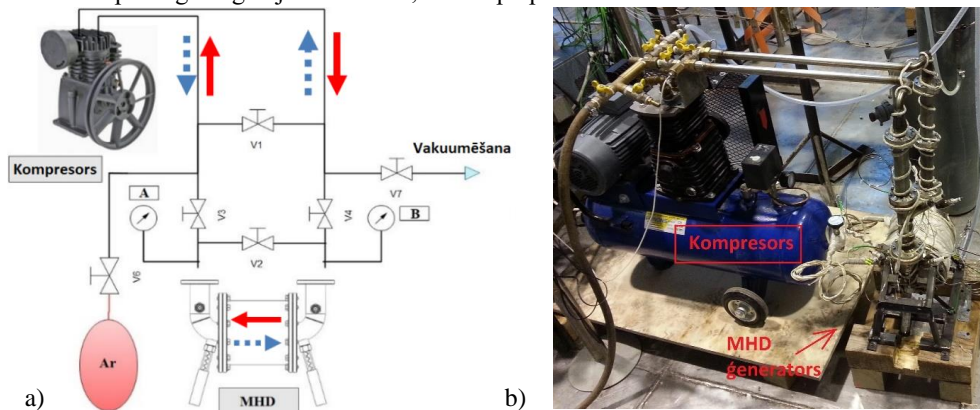
4.1. att. a) Izstrādātais laboratorijas prototips TAc iekārtas individuālajiem, atsevišķajiem testiem, MHD ģeneratoru aizvietojot ar regulējamu akustisku slodzi mehāniska vārsta veidā; b) TAc dzinēja attīstīto spiediena svārstību amplitūda atkarībā no pievadītā virsspiediena.

Šajā gadījumā fāžu nobīdes leņķis starp spiedienu un skaņas ātrumu ir tuvu 90° , jo lietderīgā mehāniskā jauda netika attīstīta. Redzams, ka pie nominālā 40 bāru virsspiediena maksimālā sasniegtā spiediena svārstību amplitūda ir 2,7 bāri, kas tika attīstīti pie $T = 513^\circ\text{C}$. Šāds rezultāts ir apmierinošs, jo termoakustisko dzinēju tipiski attīstāmās spiediena svārstības parasti veido ap 5–10 % no virsspiediena. Šādas vērtības nodrošina pietiekami augstu skaņas jaudas pārvadi uz reģioniem ar lielu akustisko impedanci, kāda šajā gadījumā būtu MHD ģenerators šķidrums virsmas zonā. Šie jautājumi ir plaši aprakstīti termoakustiskajā literatūrā [51].

4.2. MHD ģenerators Na eksperimenti uz izstrādātā kompresorstenda

MHD ģenerators testēšanai neatkarīgi no termoakustiskā dzinēja tika izstrādāts un izgatavots speciāls laboratorijas stends (4.2. att.). Tas ir bāzēts uz atbilstoši pārbusvēta 2 cilindru 2,2 kW gaisa kompresora, kas modelē TAc dzinēja darbību. Šim nolūkam ir ticis piemeklēts tāds kompresors, lai tā virzuļu savstarpējā fāžu nobīde kustības laikā būtu 180° . Tas nozīmē, ka cilindri darbojas pretējās fāzēs un stāvoklī, kad viens virzulis ir, piemēram, augšējā pozīcijā, otrs tajā pašā brīdī ir zemākajā. Kompresors tika modificēts tā, ka ir noņemts tā filtrs, kā arī likvidēti visi kompresora cilindriem oriģināli pienākošie gāzes plūsmas vienvirziena vārsti, atstājot cilindrus atklātus. Tālāk kompresoram ir pieslēgta manuāli regulējama grozāmu vārstu sistēma (4.2. att. (a), V1–V7) kas ļauj regulēt izejā iegūstamo spiedienu diferenci. Kā parādīts šajā attēlā, šai vārstu sistēmas izejai ir pieslēgts MHD ģenerators. Rezultātā, kompresoram darbojoties, alternējošā spiedienu starpība tiek pievadīta ģenerators pagriezieniem un attiecīgi šķidrums brīvajai virsmai, liekot nātrijam svārstīties. 4.2. attēlā (a) redzamās sarkanās bultiņas norāda spiediena virzienu cikla pirmā pusperioda laikā, savukārt zilās raustītās bultas norāda virzienu nākamajā pusperiodā. Kompresora motora rotācijas frekvence tika regulēta ar frekvenču pārveidotāju 15–55 Hz robežās.

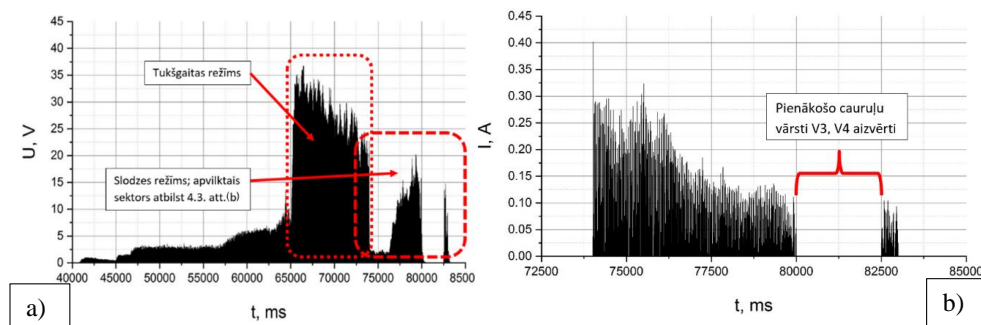
Kompresora eksperimentā ģenerētais spriegums atkarībā no laika redzams 4.3. attēlā (a), tajā pašā laika skalā attēlotā ģenerators spoles un slodzes strāva – 4.3. attēlā (b). Strāva šeit attēlota laika fragmentā, kas 4.3. attēlā (a) norādīts kā slodzes režīms. Ģenerators spoles izvadiem pieslēgts regulējams reostats, kas kalpo par slodzi.



4.2. att. Izstrādātais kompresora stends MHD ģenerators neatkarīgajiem testiem:

a) uzbūves shēma; b) eksperimentālā stenda foto.

Šajos grafikos redzams, ka lielākais inducētais spriegums tukšgaitā sasniedza 37 V amplitūdu. Slodzes režīmā ar augstāko iespējamo reostata pretestību tika iegūti 20 V un 0,125 A, kas atbilst 160 Ω pretestībai. Pretēji tam, pie zemākās ieregulētās pretestības tika iegūti 2,5 V un 0,4 A, kas dod 6,25 Ω . Kā redzams, attīstītie spriegumi un strāvas ir relatīvi mazas, kas var tikt izskaidrots ar zemu kompresora pievadīto spiediena oscilāciju līmeni tā ierobežotās jaudas dēļ, kā arī iespējamās gāzes noplūdes caur blīvējumiem, tostarp cilindru gredzeniem, dēļ.



4.3. att. a) Elektriskās mašīnas spolē inducētais spriegums atkarībā no laika kompresora + MHD ģeneratora eksperimentā ar Na; b) tā paša eksperimenta laikā MHD ģeneratora spolē un slodzes reostatā plūstošā strāva.

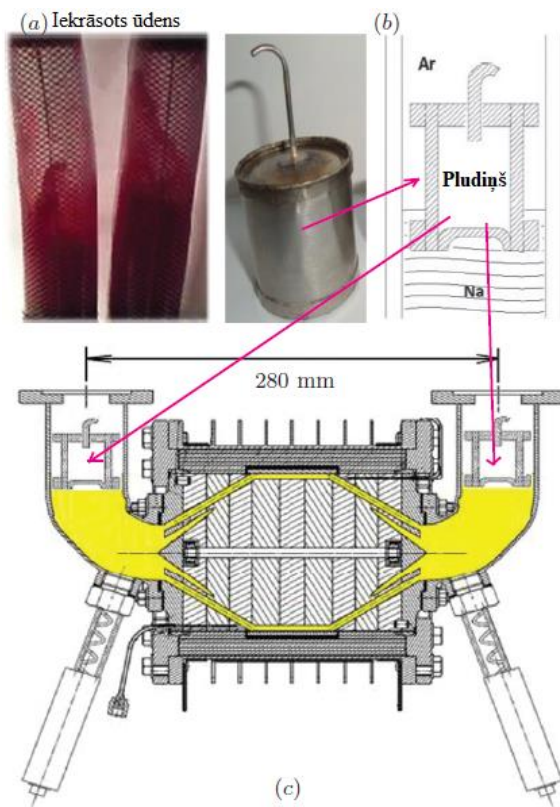
4.3. Šķidrā metāla virsmu stabilizējošo pludiņu modeļeksperimenti ar ūdeni

Pirms eksperimentēt ar nātriju, kompresora sistēma tika testēta ar ūdeni. MHD ģeneratora vietā tika izmantota saliekta caurspīdīga U veida caurule (4.4. att. (a)). Šāda eksperimenta pamatojums ir Na un ūdens līdzīgās fizikālās īpašības, tādas kā blīvums un viskozitāte, kas tādējādi ļauj modelēt šķidrā metāla kustību. Eksperimenta mērķis bija vizuāli novērtēt Na brīvās virsmas nestabilitāti un periodiskumu, kā arī svārstību regularitāti. Minētie aspekti ir būtiski stabilai elektriskās izejas jaudas ģenerācijai reālā eksperimentā ar šķidro metālu. Tāpat kā Na eksperimentā, arī testā ar ūdeni šķidruma tilpums bija 0,5 L, pielietā šķidruma virsma nosacīti iezīmēta 4.4. att. (b) un (c).

Eksperiments parādīja, ka kompresora spiediena oscilāciju izraisītās šķidruma virsmas svārstības ir nestabilas, rezultējoties neregulārās haotiskās šļakatās (4.4. att. (a)). Ūdens virsmai pievadītā reģistrētā spiediena svārstības bija tādas pašas, kā tika novērots kompresora-MHD ģeneratora Na eksperimentā.

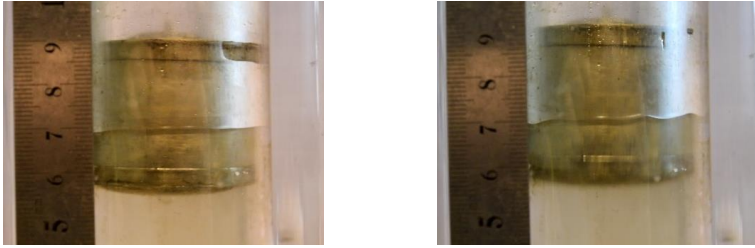
Lai varētu turpināt tālākos plānotos testus, kā pagaidu risinājums piedāvāti un no 316 L markas nerūsējošā tērauda izgatavoti dobi cilindriski pludiņi (4.4. att. (b) un (c)). Tie tika novietoti tieši uz šķidruma virsmas (4.4. att. (c)). Pretējā gadījumā bez jebkādas mākslīgi izveidotas stabilizācijas būtu pamats gaidīt ievērojamu inducētā sprieguma un līdz ar to ģenerētās jaudas samazinājumu mašīnas izejā. Tas tika novērots arī eksperimentāli atsevišķā MHD ģeneratora testā ar nātriju bez pludiņiem.

Vairāki pludiņu ūdens eksperimentā uzņemtie videokadri redzami 4.5. attēlā.



4.4. att. a) Eksperimenta rezultāti uz kompresora stenda ar iekrāsotu ūdeni; b) izgatavotie Na brīvo virsmu stabilizējošie pludiņi; c) pludiņu novietojums MHD ģeneratorā.

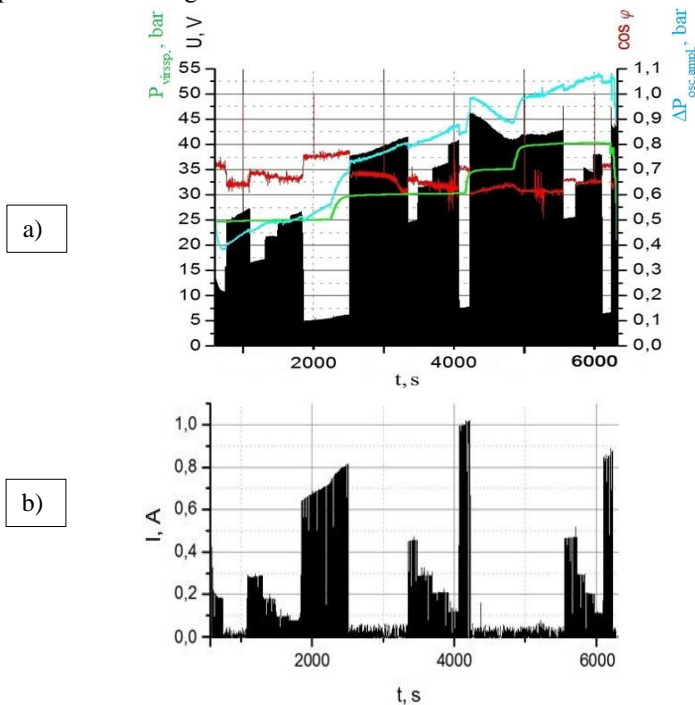
Lai izmērītu pludiņa pārvietojumu pilna gājienu laikā, blakus caurulei tika novietots lineāls. 4.5. attēla kreisajā pusē redzams gadījums, kad šķidrums nekustas. Savukārt 4.5. attēlā labajā pusē – gadījums, kad pludiņš svārstības laikā ir maksimāli attālinājies no līdzsvara stāvokļa pie frekvences 45 Hz. Šāda pati frekvence tika ieregulēta arī 4.2. un 4.3. attēlā redzamajā Na eksperimentā. Kā redzams 4.5. attēlā, pludiņa gājiens ir aptuveni 2 mm. No šiem kadriem var novērtēt virsmas stabilizācijas efektu. Tie parāda, ka šķidruma virsma joprojām nav absolūti gluda, kā tas būtu vēlams, lai varētu norisināties paredzama, kontrolējama un novērtējama nātrija masas pārnese. Tomēr, neskatoties uz to, uz šķidruma virsmas plānā slānī novērojamie viļņi telpā starp pludiņa virsmu un cauruli ir ievērojami mazāki un mazāk haotiski nekā testā ar iekrāsotu ūdeni.



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

4.4. Eksperiments, sajūdzot kopā MHD ģeneratoru ar termoakustisko dzinēju

Pēc abu mašīnu atsevišķajiem testiem MHD ģenerators tika pieslēgts TAc dzinējam, un eksperiments tika aizvadīts, iekārtas apvienojot. Izejas sprieguma un strāvas oscilogrammu līknes sinusoīdu pozitīvajiem pusperiodiem redzamas 4.6. attēlā (a) un (b) melnā krāsā, līdzīgi kā 4.3. attēlā. Papildus tam, 4.6. attēlā (a) tajā pašā laika skalā ar dažādām krāsām ir parādītas arī citas eksperimenta laikā reģistrētās līknes.

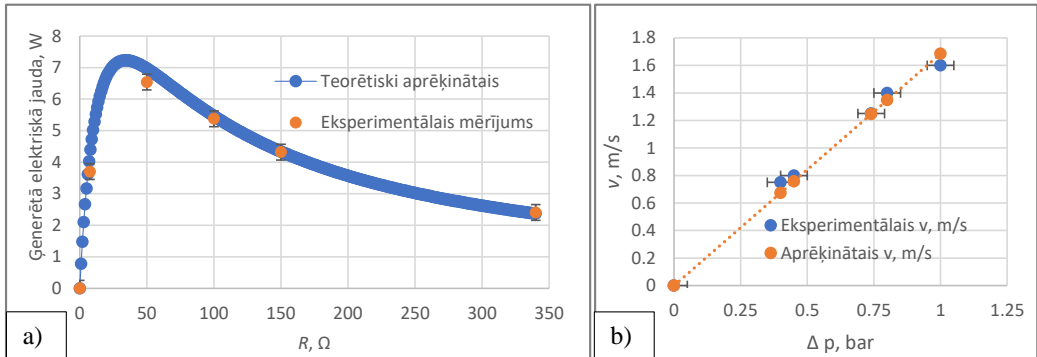


4.6. att. a) Reģistrētais spriegums uz slodzes, spiediens un akustiskās jaudas koeficients MHD + TAc eksperimentā; b) atbilstoši reģistrētā slodzes strāva.

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

3. Zilā līkne – spiediena oscilāciju amplitūda.

Regulējot slodzes reostata pretestību, strāvai un spriegumam ir novērojama precīza un arī sagaidāma antikorelācija, līdzīgi kā tas bija novērojams kompresora testā, kas redzams 4.14. un 4.13. attēlā (a). Tas nozīmē, ka, palielinoties elektriskajai pretestībai un samazinoties strāvai, atbilstošajā laika momentā palielinās spriegums. Eksperimentāli attīstītās elektriskās jaudas, kā secināms no 4.6. attēla, ir samērā zemas, salīdzinot ar ģenerators nominālajiem parametriem. Tomēr, šajā gadījumā ir jāņem vērā pievadīto spiediena svārstību līmenis. Salīdzinot eksperimentāli iegūtos datus ar teorētiski aprēķinātajiem pie tā paša attīstītā TAc spiediena,



4.7. att. a) Eksperimentāli attīstītā elektriskā jauda TAc + MHD testā un tās salīdzinājums ar teorētiski aprēķināto, izmantojot promocijas darbā izstrādāto metodi; b) eksperimentāli iegūtā ātruma un spiediena salīdzinājums ar teorētiski aprēķināto.

ir iegūta laba rezultātu sakritība. Šāds salīdzinājums ir demonstrēts 4.7. attēlā (a). Šī analītiski aprēķinātā līkne ir iegūta, izmantojot darba 3. nodaļā piedāvāto izstrādāto MHD ģenerators aprēķina metodi.

Caurplūde tika mērīta, izmantojot MHD tehnikā plaši pazīstamā kondukcijas tipa elektromagnētiskā plūsmas mērītāja metodi. Šim nolūkam tika speciāli izstrādāts un izgatavots mērīparāts ar kontaktelektrodiem un pastāvīgajiem magnētiem [37]. Izmantojot caurplūdes mērījumus un zinot konkrētās interesējošās vietas caurules šķēsgriezuma laukumu, var aprēķināt vidējo vērtību Na ātrumam. 4.7. att. (b) redzams salīdzinājums eksperimentāli iegūtajam Na ātrumam un spiedienam $v = f(\Delta p)$ ar aprēķināto, izmantojot MHD vienādojumu sistēmas pieeju. Redzams, ka arī šeit iegūtā lineārā sakarība ir ar labu sakritību. Līknes lineārais raksturs var tikt izskaidrots tā, ka spiediens un ātrums ir savstarpēji saistīti ar lineāru sakarību, kur proporcionalitātes koeficients ir kompleksa akustiskā impedance. Tas nozīmē, ka šī impedance raksturo fāzes nobīdi starp spiedienu un ātrumu. Sistēmas optimālai darbībai šai fāzes nobīdei ir jābūt iespējami mazai. Darbā veiktie teorētiskie pētījumi ir parādījuši, ka pie konstantas slodzes un frekvences ātruma atkarība no akustiskās jaudas koeficienta ir lineāra līknes sākuma daļā, proti, pie maziem ātrumiem, līdz aptuveni 5 m/s.

Kā redzams no 4.6. attēlā, detalizēti elektriskās strāvas un sprieguma mērījumi tika veikti pie trīs dažādiem virsspiedieniem: 25 bar, 30 bar un 40 bar. Negaidīts var likties fakts, ka lielākā

reģistrētā slodzes strāva 1 A pie 8 V sprieguma krituma uz slodzes pretestības ir novērojama pie 30 bar virsspiediena, nevis 40 bar. Izskaidrojumu tam var rast tajā, ka abu TAc dzinēju karsto siltummaiņu atbilstošās temperatūras bija atšķirīgas un tika novērots gandrīz 100 °C liels termiskais disbalanss, kas var ietekmēt saražotās izejas jaudas līmeni ģeneratorā. Ar termisko disbalansu šeit tiek saprasta atšķirība attiecīgo abu temperatūru mērošo termopāru rādījumos katra TAc dzinēja karstākajā punktā karstajā siltummainī. Iemesls šādai nesimetrijai ir meklējams tajā, ka abos siltummaiņos implementētie pašgatavotie elektriskie sildītāji nav iestrādāti pilnīgi vienādi. Tas arī veido zemu kopējā TAc + MHD lietderības koeficientu, kas līdz ar to sasniedz 1,6 %.

Kopējā pievadītā elektriskā jauda TAc dzinēja sildītājiem šajā eksperimentā veidoja $250 + 250 = 500$ W. Maksimālā caurplūdes amplitūda eksperimentā sasniedza 0,55 L/s, savukārt svārstību frekvence – 58 Hz. Novērots, ka eksperimentāli iegūtais akustiskais jaudas koeficients atsevišķos režīmos ir pat augstāks par teorētiski prognozēto.

4.5. Paņēmiens elektriskās mašīnas šķidrā metāla brīvās virsmas elektromagnētiskai stabilizācijai

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

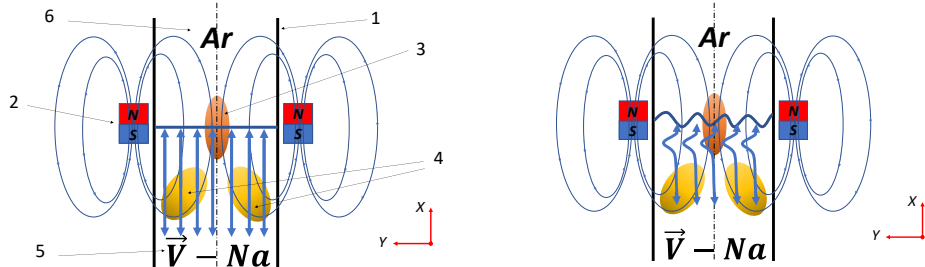
Turpmākajā izklāstā ir piedāvāta oriģināla autora metode virsmas nestabilitātes problēmu risināt, izmantojot bezkontakta paņēmienu. Piedāvātā metode balstās pieliktā ārējā magnētiskā lauka izmantošanā. Pieliktā lauka līnijas tiek orientētas paralēli maiņvirziena šķidruma plūsmas virziena vektoram, kā redzams 4.8. attēla shēmā. Ar cipariem norādīto pozīciju atšifrējums ir šāds:

- 1) šķidruma caurule;
- 2) magnētiskā lauka avots;
- 3) sektors, kurā magnētiskās plūsmas līnijas ir paralēlas šķidruma plūsmas līnijām;
- 4) apgabali, kuros šķidruma plūsma šķērso magnētiskā lauka līnijas arī veicot taisnvirziena kustību;
- 5) stabilizējamais elektrovadošais šķidrums;
- 6) virs šķidruma brīvās virsmas esošā gāze.

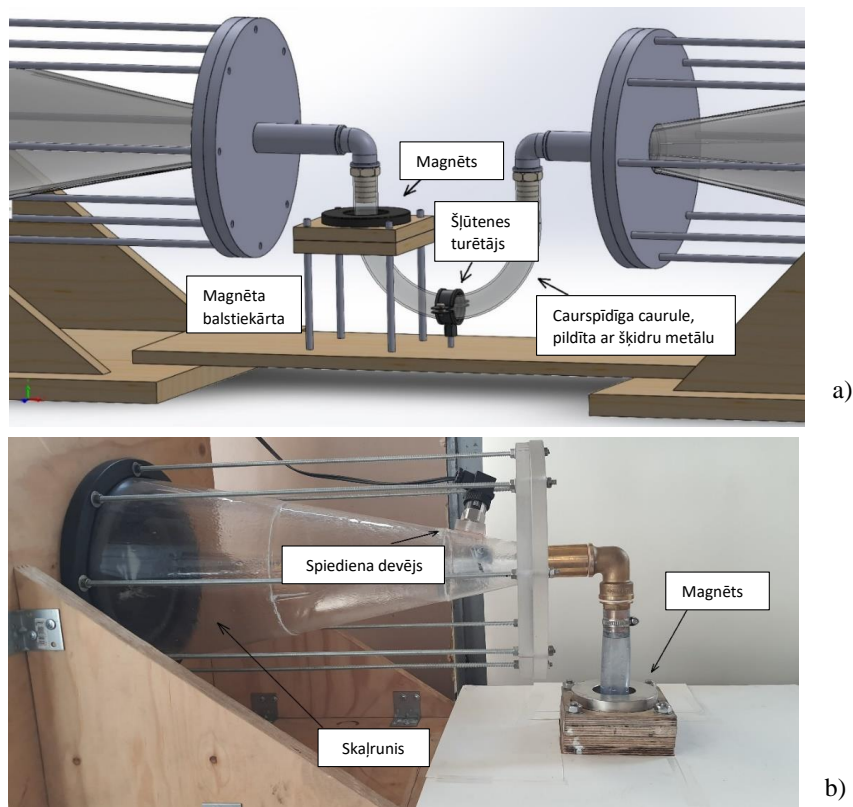
Šajā gadījumā piedāvātais darbības princips var tikt izskaidrots šādi. Tiklīdz kāds no šķidruma slāņiem nestabilitātes attīstības gaitā centīsies novērsties no taisnvirziena šķidruma plūsmas (4.8. att., kreisajā pusē – idealizēts gadījums) trajektorijas telpas virzienos uz augšu vai

uz leju, tā tūlīt radīsies no “X” atšķirīgas ātruma komponentes (4.8. att., labajā pusē). Šīs ātruma komponentes nekavējoties šķērsos magnētiskās plūsmas līnijas, kas savukārt inducēs elektriskās strāvas šķidrajā metālā brīvās virsmas reģionā. Magnētiskais lauks mijiedarbībā ar inducētajām strāvām centīsies nostādīt no savas trajektorijas aizgājušās šķidruma plūsmas līnijas atpakaļ savā sākotnējā vietā. Tas rezultētos šķidruma virsmu stabilizējošā efektā.

Pamatojums šādai hipotēzei ir jaunākajā MHD literatūrā atrodamā informācija par iespējam stabilizēt taisnvirziena nemainīgas orientācijas elektrovadoša šķidruma plūsmas ar pieliktu magnētisko lauku, vērstu tajā pat virzienā, kurā plūst šķidrums [52], [53]. Tomēr būtiska



4.8. att. Principshēma piedāvātajai ģenerators šķidruma virsmas stabilizācijas metodei.



4.9. att. a) Izstrādātā skaļruņu stenda 3D modeļa kopskats un palielinājums ar paskaidrojumiem; b) puse no izgatavotā skaļruņu stenda kopā ar testsekciju.

atšķirība ir tajā, ka minētajā literatūrā apskatītās plūsmas nav oscilējošas un līdz ar to ir ar nemainīgu virzienu. Šī iemesla dēļ patlaban faktiski nav zinātniskās literatūras par atbilstošās pētāmās plūsmas stabilizāciju. Tas ir arī saprotams, jo maiņvirziena oscilējošo elektrovadošu šķidrums plūsmu lietojumu līdz šim ir bijis ļoti maz.

Attiecībā uz pašu nestabilitāti, hidrodinamikas literatūrā šāda tipa radniecīgu efektu jau izsenis dēvē par Faradeja nestabilitāti [54]. Šī parādība ir novērojama, kad uz šķidrums tilpumu ar atklātu augšējo brīvo virsmu iedarbojas vertikālas vibrācijas [55]. Kad kustības paātrinājums pārsniedz noteiktu kritisku vērtību (Faradeja sliekšni), šķidrums plakanā hidrostatiskā virsmā kļūst nestabila un sāk viļņoties [56], [57]. Šo tā saukto Faradeja viļņu rašanās un veidošanās mehānisms ir relatīvi plaši izpētīts, piemēram, ir zināms, ka inducēto viļņu frekvence ir puse no pieliktās vibrāciju frekvences [58]. Tomēr daudzi ar to saistītie aspekti joprojām nav skaidri. To var attiecināt arī uz šķidrās elektrovadošās vides brīvās virsmas mijiedarbību ar magnētisko lauku.

Lai eksperimentāli pierādītu piedāvātās stabilizācijas metodes darbību, tika izgatavots atsevišķs testu stends (4.9. att.). Tas sastāv no diviem viens otram pretī novietotiem zemfrekvenču skaļruņiem “*Helix Q 10 W*” ar ilgstoši pieļaujamo nominālo jaudu 500 W. Skaļruņi pieslēgti sinusoidālu signālu ģeneratoram “*M&R Systems WG-820*”, izmantojot 1 kW D klases audiopastiprinātāju “*Behringer NX1000*”. Elektriski tie ir saslēgti tā, ka, padodot sinusoidālu signālu, to membrānas kustas pretfāzē, jeb tā sauktā “*push-pull*” režīmā, līdzīgi kā iepriekšējās apakšnodaļās aprakstītais kompresora stends. Arī šajā gadījumā eksperimenta mērķis ir modelēt termoakustiskā dzinēja darbību. Katram skaļrunim ir piestiprināts no organiskā stikla izgatavots caurspīdīgs konuss ar pāreju uz mazāku diametru. No konusa tālāk aiziet 90° pagrieziens, pie kā, līdzīgi kā kompresora eksperimentā, ir pieslēgta U veida caurspīdīga gumijas caurule, piepildīta ar šķidro metālu – InGaSn (indija-gallija-alvas) eitektisko sakausējumu. Skaļruņu membrānām vibrējot, šķidrums var tikt svārstīts. InGaSn tiek izmantots, lai modelētu nātrija kustību. Konkrētā izvēle pamatojas ar InGaSn eitektikas zemo kušanas temperatūru, spēju palikt šķidram istabas temperatūrā, zemāku agresivitāti un vienkāršāku manipulēšanu ar metālu. Vienlaikus ir ņemts vērā, ka InGaSn blīvums ir ievērojami lielāks par Na blīvumu. Skaļruņu ierobežotās jaudas dēļ to spēja veikt gāzes un šķidrums pārvietošanu ir ierobežota, tāpēc ir iespējami minimizēti izmantojamā šķidrums daudzums, un tika izmantoti ap 70 mL InGaSn. Vienā līmenī ar šķidrums virsmu ir novietots aksiāli magnetizēts NdFeB gredzenveida pastāvīgais magnēts, kā redzams 4.9. attēlā, kas rada magnētisko lauku atbilstoši 4.8. attēlā redzamajai shēmai.

Eksperimenti tika veikti, ar videokameru filmējot brīvo virsmu tās kustības laikā dažādos leņķos. 4.10. attēlā redzams, ka prognozētais sagaidāmais elektromagnētiskās stabilizācijas efekts ir novērots. Ir skaidri saskatāms šļakatu intensitātes samazinājums un novērojama uzlecošo šķidrums šļakatu augstuma samazināšanās. Vienlaikus jāatzīmē, ka virsmas viļņošanās ir novērojama joprojām – tā pilnībā nav slāpēta. Tam ir iespējami vairāki iemesli. Lai nodrošinātu pietiekami spēcīgu magnetohidrodinamisko mijiedarbību, jābūt spēcīgam magnētiskajam laukam un/vai šķidrums elektrovadītspējai. InGaSn elektrovadītspēja, salīdzinot ar Na, ir vairākas reizes zemāka. No otras puses, izmantotais NdFeB pastāvīgais magnēts spējīgs nodrošināt tikai samērā vāju magnētisko lauku. Tas tika izmērīts, un aksiālā

lauka komponente centrā veidoja 0,26 T, savukārt pie magnēta iekšējās sieniņas magnēta vidū – 0,505 T. Kā redzams, papildus tam arī magnētiskā lauka sadalījums ir nehomogēns. Arī tas varētu negatīvi ietekmēt elektromagnētiskās stabilizācijas efektu, salīdzinot ar potenciāli homogēnu lauku.

Vienlaikus jāatzīmē, ka piedāvātajai stabilizācijas metodei jau 4.8. attēlā redzamajai shēmā ir saskatāms acīmredzams trūkums, kas ir saistāms ar magnēta galīgajiem izmēriem. Magnētiskā lauka konfigurācija aksiāli magnetizētam pastāvīgajam magnētam raksturojas ar to, ka izteikta lauka vertikālā komponente ir magnēta vidū, proti, šķidrums brīvās virsmas apgabalā. Zem šī apgabala (šķidrums iekšienē) magnētiskās plūsmas līnijas noliecas un noslēdzas. Principskāmas 4. pozīcijā ir iezīmēti skaidri saskatāmie sektori, kuros šķidrums plūsmas šķēls magnētiskā lauka līnijas jebkurā gadījumā. Tas nepārprotami izraisīs papildu hidrauliskās pretestības pieaugumu šajos apgabalos inducēto strāvu dēļ, kas neizbēgami rezultēsies hidrauliskajos zudumos. Šo hidraulisko zudumu kvantitatīvu novērtēšanu būtu nepieciešams veikt turpmākajos pētījumos.



4.10. att. InGaSn brīvās virsmas elektromagnētiskās stabilizācijas eksperiments pie 20 Hz: a) ar pieliktu magnētisko lauku – augšējā attēlā; b) bez magnētiskā lauka – apakšējā attēlā.

GALVENIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI

Par darba 1. nodaļu

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

Par darba 2. nodaļu

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

Par darba 3. nodaļu

7. Izstrādāta arī citādāka MHD ģenerators aprēķina metode, kas atšķirībā no darba 2. nodaļā aprakstītās transformatora ekvivalentās shēmas metodes un izmanto Maksvela vienādojumus integrālā formā, proti, uzrakstītus kā spriegumu vienādojumus.
8. Parādīts, ka abas piedāvātās metodes darbojas līdzvērtīgi. Norādītas abu metožu principiālās atšķirības, kas iekļauj MHD ģenerators induktivitāti un šķidrā metāla ātrumu, proti, kā ar minētajiem lielumiem katrā metodē tiek operēts.
9. Izmantojot izstrādātās metodes, izanalizētas iespējas paaugstināt MHD ģenerators enerģētiskos parametrus – lietderības koeficientu un attīstāmo jaudu, pieslēdzot slodzei kondensatoru. Secināts, ka attiecīgos specifiskos darba režīmos tos iespējams paaugstināt.
10. Pamatota nepieciešamība maksimāli samazināt elektriskās mašīnas šķidrā metāla masu. Tas ir pierādīts ar ievērojamu nātrija inerces nozīmi MHD ģenerators darbības laikā. Šis pamatojums parādīts ar abām izstrādātajām aprēķina metodēm, proti, gan darba 2., gan 3. nodaļā.

Par darba 4. nodaļu

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

23. Veikts modelējošs metodes vizualizācijas eksperiments ar InGaSn eitektiku. Pierādīts un parādīts, ka ar elektromagnētiskā lauka palīdzību pēc autora izstrādātās shēmas iespējams samazināt MHD ģenerators darbības laikā radītās šļakatas un zināmā mērā stabilizēt šķidra metāla brīvo virsmu.

IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] “What Powers a Spacecraft?,” 2019. <https://spaceplace.nasa.gov/what-powers-a-spacecraft/en/>.
- [2] “Basics of Space Flight - Inverse square law.” <https://solarsystem.nasa.gov/basics/chapter6-1/>.
- [3] N. T. Redd, “NASA’s Juno Mission to Jupiter to Be Farthest Solar-Powered Trip,” 2011. <https://www.space.com/12541-juno-jupiter-mission-solar-panels-power.html>.
- [4] F. Moring, “Space Nuclear Power,” *Aviat. Week Sp. Technol. (New York)*, vol. 160, no. 22, pp. 537–553, Jan. 2003, doi: 10.1016/B0-12-227410-5/00715-8.
- [5] G. L. Bennett, “Introduction to Space Nuclear Power and Propulsion,” *Encycl. Nucl. Energy*, pp. 155–167, Jan. 2021, doi: 10.1016/B978-0-12-819725-7.00133-1.
- [6] J. Sharp, “Thermoelectric Energy Conversion Devices,” *Ref. Modul. Mater. Sci. Mater. Eng.*, Jan. 2016, doi: 10.1016/B978-0-12-803581-8.01093-6.
- [7] G. Benvenuto and F. de Monte, “Analysis of free-piston Stirling engine linear alternator systems,” *J. Propuls. power*, vol. 11, no. 5, 1995.
- [8] D. Zudell, “Stirling Converter Sets 14-Year Continuous Operation Milestone,” 2020. <https://www.nasa.gov/feature/glenn/2020/stirling-converter-sets-14-year-continuous-operation-milestone>.
- [9] C.-H. Cheng and H.-S. Yang, “Stirling Engine Technology and Its Application on Solar Power Generation,” in *Innovative Design, Analysis and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering*, 2014, pp. 3–9.
- [10] S. Backhaus and G.W. Swift, “2. A thermoacoustic-Stirling heat engine: Detailed study.pdf,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 107, no. 6, pp. 3148–3166, 2000.
- [11] S. Backhaus and G. Swift, “New Varieties of Thermoacoustic Engines,” *Ninth Int. Congr. Sound Vib.*, pp. 1–8, 2002, [Online]. Available: <http://www.lanl.gov/thermoacoustics/Pubs/ICSV9.pdf>.
- [12] M. Veselý and T. Vít, “Difference between working gases in thermoacoustic engine,” 2014, doi: 10.1051/C.
- [13] K. Wang *et al.*, “Experimental Study on a 500 W Traveling-wave Thermoacoustic Electric Generator,” *Energy Procedia*, 2014.
- [14] H. Kang, P. Cheng, Z. Yu, and H. Zheng, “A two-stage traveling-wave thermoacoustic electric generator with loudspeakers as alternators,” *Appl. Energy*, vol. 137, pp. 9–17, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.09.090.
- [15] A. Al-Kayiem and Z. Yu, “Design of a Traveling Wave Thermoacoustic Engine Driven Cooler with Hybrid Configuration,” *World Congr. Eng.*, vol. II, pp. 1–6, 2014, doi: 2078-0958.
- [16] E. A. Zinoviev, G. V. Vorotnikov, A. I. Dovgyallo, and S. O. Nekrasova, “Boundaries of thermoacoustic instability in the thermoacoustic engine with cryogenic cooling,” *J. Int. Acad. Refrig.*, vol. 19, no. 4, 2020, doi: 10.17586/1606-4313-2020-19-4-20-26.
- [17] I. Girgin and M. Türker, “THERMOACOUSTIC SYSTEMS AS AN ALTERNATIVE TO CONVENTIONAL COOLERS,” *MSU Barbar. Nav. Sci. Eng. Inst.*, vol. 8, pp. 14–32, Apr. 2011.
- [18] D. McKelvey, S. Ballaster, and S. Garrett, “Shipboard electronics thermoacoustic cooler,” Naval Postgraduate School Monterey, California, 1995.
- [19] S. L. Garrett, J. A. Adeff, and T. J. Hofler, “Thermoacoustic refrigerator for space applications,” *J. Thermophys. Heat Transf.*, vol. 7, no. 4, pp. 595–599, 1993, doi: 10.2514/3.466.
- [20] V. S. Slavin, G. C. Bakos, T. A. Milovidova, and K. A. Finnikov, “Space power

- installation based on solar radiation collector and MHD generator,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, 2006, doi: 10.1109/TEC.2005.860401.
- [21] D. W. Price *et al.*, “Pamir-3U Magnetohydrodynamic generator results,” 1995.
- [22] D. W. Swallow *et al.*, “Results from the Pamir-3U pulsed portable MHD power system program,” 1996.
- [23] Y. Wang, X. Duan, P. Yan, H. Xue, and Q. Li, “A pulsed magnetohydrodynamic generator for electric launcher,” 2005, doi: 10.1109/TMAG.2004.838972.
- [24] L. Hu, H. Kobayashi, and Y. Okuno, “Performance of a Liquid Metal MHD Power Generation System for Various External Forces,” Jul. 2014, doi: 10.2514/6.2014-3558.
- [25] A. Geri, G. M. Veca, and A. Salvini, “Performance evaluation of MHD generators: Applications,” *IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. Rec. IEMDC*, pp. 10–12, 1997, doi: 10.1109/iemdc.1997.604139.
- [26] Jyoti Gupta, Manish Kumar Singla, and Parag Nijhawan, “Magnetohydrodynamic system – a need for a sustainable power generation source,” *Magnetohydrodynamics*, vol. 57, no. 2, pp. 251–272, 2021, doi: 10.22364/mhd.57.2.9.
- [27] N. Rott, “Thermoacoustics,” in *Advances in Applied Mechanics*, Vol. 20., C.-S. Yih, Ed. Michigan: Elsevier, 1980, pp. 135–174.
- [28] Ю. Бирзвалк, *Основы теории и расчёта кондукционных МГД-насосов постоянного тока*. Рига: Зинатне, 1968.
- [29] И. М. Толмач and Е. И. Янговский, *Магнетогидродинамические генераторы*. Москва: Наука, 1972.
- [30] Ситтиг, *Наприй, его производство, свойства и применение*. Москва: Госатомиздат, 1961.
- [31] C. H. Hansen, “Fundamentals of acoustics,” 1951.
- [32] A. T. A. M. De Waele, “Basic operation of cryocoolers and related thermal machines,” *J. Low Temp. Phys.*, vol. 164, no. 5–6, pp. 179–236, 2011, doi: 10.1007/s10909-011-0373-x.
- [33] Gregory W. Swift, *Thermoacoustics A Unifying Perspective for Some Engines and Refrigerators, Second Edition*. 2018.
- [34] M.-X. Francois *et al.*, “The SpaceTRIPS project: Space thermoacoustic radioisotopic power system,” in *Proceedings of 23rd Conference of the Italian Association of Aeronautics and Astronautics AIDAA2015*, 2015, pp. 17–19.
- [35] A. Brēķis, J. E. Freibergs, and A. Alemany, “Space thermo acoustic radio-isotopic power system: Space trips,” *Magnetohydrodynamics*, vol. 55, no. 1–2, pp. 5–14, 2019, doi: 10.22364/mhd.55.1-2.1.
- [36] G. Benvenuto and G. Bisio, “Thermoacoustic systems, Stirling engines and pulse-tube refrigerators: analogies and differences in the light of generalized thermodynamics,” in *Proceedings of the 24th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, 1989, pp. 2413–2418 vol.5, doi: 10.1109/IECEC.1989.74812.
- [37] A. Brēķis, “Termoakustiskā maiņstrāvas magnetohidrodinamiskā ģeneratora teorētiskā un eksperimentālā izpēte, Maģistra darbs,” RTU, 2017.
- [38] О. А. Лиелаусис, *Гидродинамика жидкометаллических МГД-устройств*. Рига: Зинатне, 1967.
- [39] А. В. Тананаев, *Гидравлика МГД машин*. Москва: Атомиздат, 1970.
- [40] Я. Я. Лиелпетер, *Жидкометаллические индукционные МГД-машины*. Рига: Зинатне, 1969.
- [41] А. И. Вольдек, *Индукционные магнетогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом*. 1970.
- [42] A. Gailītis and A. Brēķis, “Equivalent circuit approach for acoustic mhd generator,” *Magnetohydrodynamics*, vol. 56, no. 1, pp. 3–13, 2020, doi: 10.22364/mhd.56.1.1.

- [43] T. A. Ltd., “Quickfield ‘Active Field’ tehnoloģijas apraksts.”
<https://active.quickfield.com/HTML/Welcome.htm>.
- [44] L. Lavrinoviča, “Promocijas darbs: Bezkontakta sinhrono dzinēju izstrāde un optimizācija izmantošanai mazjaudas elektroiekārtās,” 2014.
- [45] A. Breķis, A. Alemany, O. Alemany, and A. Montisci, “Space Thermoacoustic Radioisotopic Power System, SpaceTRIPS: The Magnetohydrodynamic Generator,” *Sustainability*, vol. 13, no. 23, 2021, doi: 10.3390/su132313498.
- [46] A. Brēķis, A. Alemany, and J. Freibergs, “Analysis of magnetohydrodynamic generator driven by thermoacoustic engine for deep Space applications,” Nov. 2020, doi: 10.1109/RTUCON51174.2020.9316584.
- [47] М. Кирко И, *Жидкий металл в электромагнитном поле (электронная книга)*. Москва, Ленинград: Энергия, 1964.
- [48] И. М. Кирко *et al.*, *Прикладная магнитная гидродинамика - учебное пособие по теоретическому курсу*. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2007.
- [49] Л. А. Верте, *Магнитная гидродинамика в металлургии*. Москва: “Металлургия,” 1975.
- [50] A. Alemany, A. Krauze, and M. Al Radi, “Thermo acoustic – MHD electrical generator,” *Energy Procedia*, vol. 6, pp. 92–100, 2011, doi: 10.1016/j.egypro.2011.05.011.
- [51] M. A. G. Timmer, K. de Blok, and T. H. van der Meer, “Review on the conversion of thermoacoustic power into electricity,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 143, no. 2, pp. 841–857, Feb. 2018, doi: 10.1121/1.5023395.
- [52] P. Vieweg, Y. Kolesnikov, and C. Karcher, “EXPERIMENTAL STUDY OF A LIQUID METAL FILM FLOW IN A STREAMWISE MAGNETIC FIELD,” in *Proceedings of the 10th international conference “Electromagnetic Processing of Materials 2021,”* 2021, pp. 150–154.
- [53] Y. Kolesnikov, D. Krasnov, and T. Boeck, “Evolution of a round jet in a duct in the presence of a uniform axial magnetic field,” *Magnetohydrodynamics*, vol. 53, no. 1, pp. 119–127, 2017, doi: 10.22364/mhd.53.1.13.
- [54] M. Faraday, “On a Peculiar Class of Acoustical Figures; and on Certain Forms Assumed by Groups of Particles upon Vibrating Elastic Surfaces,” *Philos. Trans. R. Soc. London*, vol. 121, pp. 299–340, Jan. 1831, [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/107936>.
- [55] X. Zhao, J. Tang, and J. Liu, “Electrically switchable surface waves and bouncing droplets excited on a liquid metal bath,” *Phys. Rev. Fluids*, vol. 3, no. 12, pp. 1–14, 2018, doi: 10.1103/PhysRevFluids.3.124804.
- [56] Л. Ландау and Е. Лифшиц, *Теоретическая физика, Том I, Механика*. Москва: Наука, 1988.
- [57] Е. М. Лифшиц and Л. П. Питаевский, *Теоретическая физика, Том X, Физическая Кинетика*. Москва: Наука, 1979.
- [58] H. W. Müller, H. Wittmer, C. Wagner, J. Albers, and K. Knorr, “Analytic stability theory for faraday waves and the observation of the harmonic surface response,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 78, no. 12, pp. 2357–2360, 1997, doi: 10.1103/PhysRevLett.78.2357.



Artūrs Brēķis dzimis 1992. gadā Rīgā. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvis bakalaura grādu enerģētikā (2014), elektroinženiera kvalifikāciju (2016; ar izcilību), kā arī profesionālo maģistra grādu elektrotehnoloģiju datorvadībā (2017). Vairākkārtējs "Latvenergo" un Latvijas Elektroenerģētiķu un energobūvnieku asociācijas (LEEA) studiju darbu konkursu laureāts, 2017. gadā iekļauts RTU Zelta fondā. Kopš 2015. gada strādā Latvijas Universitātes Fizikas institūtā (LU FI), sākotnēji par zinātnisko asistentu, kopš 2017. gada – LU FI Magnētiskās hidromehānikas laboratorijas pētnieks. 2016. gadā stažējies Sardīnijas Energopētniecības laboratorijā "*Sardegna Ricerche*", Itālijā. Paralēli zinātniskajam darbam Latvijas Universitātē kopš 2021. gada veic pedagoģisko darbu RTU Elektrisko mašīnu un aparātu katedrā, docējot elektrodinamikas pamatus. Zinātniskās intereses saistītas ar kosmosa tehnoloģijām, magnetohidrodinamiku, šķidriem metāliem un termoakustiku.