

LATVIJAS UNIVERSITĀTES FIZIKAS UN
MATEMĀTIKAS FAKULTĀTES FIZIKAS NODAĻA

TERMOAKUSTISKAIS MHD
GENERATORS

BAKALaura DARBS

Autore: Līga Magone

Stud. apl.: Im06012

Darba vadītājs: Dr. Phys. Agris Gailītis

RĪGA, 2014

ANOTĀCIJA

Bakalaura darbs ir teorētisks pamatojums Termoakustiskā kondukcijas MHD ģenerators izveidei. Izpildot FP7 projektu LU Fizikas institūts piedalās Termoakustiskā kondukcijas MHD ģenerators izveidē, kas paredzēts elektrības apgādei kosmosos objektos. Bakalaura darbā plānots šādu ģenerators darbības apraksts un viņa darba līkņu aprēķins, izmantojot Fizikas institūtā uzkrāto kondukcijas ģenerators aprēķinu pieredzi.

Iekārtā par darba šķidrumu kalpo šķidrums nātrijs, kas plūst MHD ģenerators kanālā starp ģenerators serdi un sekundāro tinumu 1. variantā un starp ģenerators serdi un magnetiem 2. variantā. Galvenās aprēķinu līknes, kas tika iztīrātas šajā darbā ir MHD ģenerators efektivitāte atkarībā no slodzes pie dažādām darbības frekvencēm. Kā darba aprēķinu pamatelements tiek izmantota ekvivalentās shēmas slēguma metode.

Atslēgas vārdi – MHD, Termoakustiskais ģenerators, termo-akustika, magnētiskais lauks, nātrijs.

ABSTRACT

Bachelor thesis is a theoretical justification in Thermo-acoustic MHD generator development. While executing project FP7 IPUL participates in Thermo-acoustic MHD generator development, it is intended as electricity generator in cosmic objects.

Bachelor thesis scheduled to work the generator's description and his curve is calculated using IPUL accumulated experience of conduction generator calculations.

As working fluid in machinery serves liquid sodium flowing in MHD generator channel between the generator core and secondary coil in 1. version and between generator core and the magnets in 2. version. The main basis of the curve, which was discussed in this work are MHD generator efficiency depending on the load at different operating frequencies. As a key element for the calculation of the work is used equivalent circuit method.

Keywords – MHD, Thermoacoustic generator, thermo-acoustics, magnetic field, sodium.

APZĪMĒJUMU SARAKSTS

Na – nātrijs (metāls)

Ar - argons (cēlgāze)

He – hēlijs (cēlgāze)

Am – amerīcijs (radioaktīvs transurāna elements)

MHD – Magneto-hidro-dinamika

DC – Līdzstrāvas režīms

AC – maiņstrāvas režīms

IPUL - The Institute of Physics of University of Latvia

SATURS

ANOTĀCIJA	2
ABSTRACT.....	3
APZĪMĒJUMU SARAKSTS	4
SATURS.....	5
IEVADS	6
1. IEKĀRTAS APRAKSTS	7
1.1 Termoakustiskais ģenerators.....	7
1.2 MHD ģenerators.....	9
1.2.1 MHD ģenerators uzbūve.....	9
1.2.2. Uzdevuma formulējums.....	10
1.2.3. Ekvivalentās shēmas slēguma formulējums	12
2. APRĒĶINS	16
DARBA REZULTĀTU ANALĪZE	19
SECINĀJUMI.....	29
PATEICĪBAS	30
IZMANTOTĀ LITERATŪRA	31

IEVADS

Akustiskais MHD ģenerators (att. 1.1.) ir daļa no Termoakustiskā Radio-Izotopiskā elektroapgādes projekta (SPACETRIPS) pielietojumiem kosmosā. Radio-Izotopiskais avots ražo siltumu. Termoakustiskais ģenerators doto siltumu pārvērš skaņā. Un pēc tam MHD ģenerators skaņu pārveido elektrībā. Gadu desmitiem LU Fizikas Institūts ir izstrādājis kondukcijas MHD ģeneratorus DC režīmā. Tagad šī pieredze [1] tiek pielāgota, lai izveidotu ģeneratorus AC režīmā.

Darba mērķis un uzdevumi

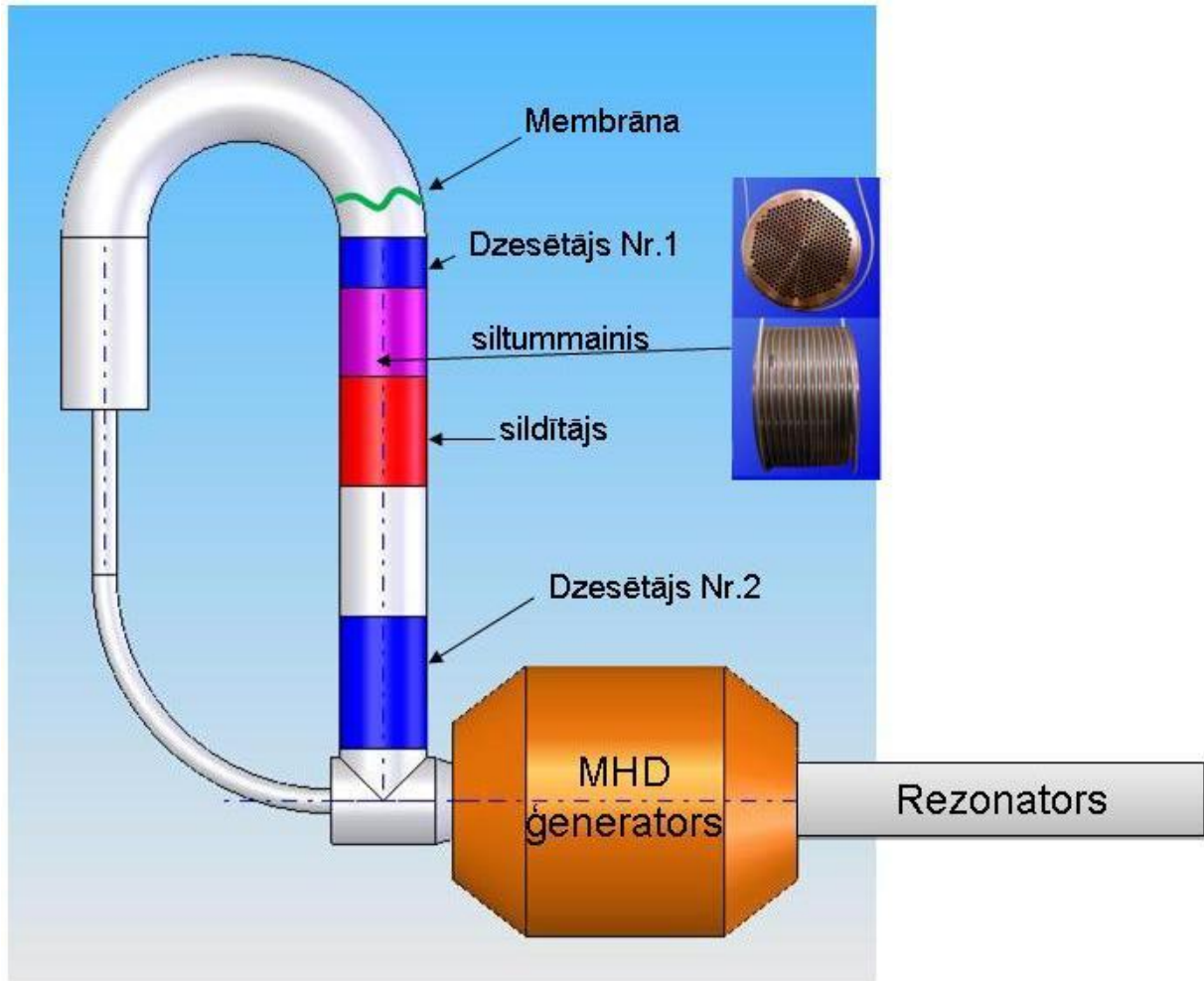
Bakalaura darbā plānots Termoakustiskā ģenerators darbības apraksts un viņa darba līkņu aprēķins, izmantojot Fizikas institūtā uzkrāto kondukcijas ģenerators aprēķinu pieredzi.

Darba uzdevums ir salīdzināt divus MHD ģenerators (skat. att. 1.1.) variantus (skat. att. 1.3.). Pirmajā gadījumā sekundārais tinums izvietots starp nātriju un magnētiem, toties otrajā gadījumā tas ir divos uz sāniem izbīdītos sekundāros tinumos, ar tādu pašu pilno šķērsriezumu. Sekundārās spoles sadalījuma un pārvietojuma mērķis ir palielināt magnētisko lauku Na spraugā.

Darba izstrādes vieta

Bakalaura darbs izstrādāts Latvijas Universitātes Fizikas Institūtā FP7 projekta ietvaros.

1. IEKĀRTAS APRAKSTS



Attēls 1.1. Shematisks eksperimentālās iekārtas attēlojums [8].

1.1 Termoakustiskais ģenerators

Termoakustisko ģeneratoru veido att. Nr. 1.1. kreisā puse, kuru aizpilda inerta gāze (projektā cēlgāzes Ar vai He) ap 40 bāru spiedienā. Caurules taisnajā posmā izvietota labirintu sistēma:

- Dzesētājs Nr.1 ar temperatūru T_{\min} (projektā 300°K)
- Siltummainis
- Sildītājs ar temperatūru T_{\max} , kuru silda ārējs siltuma avots (kosmosa apstākļos radioaktīvais Am , 1200°K).
- Bufera tilpums (aizpildīts tikai ar gāzi)
- Dzesētājs Nr. 2 ar temperatūru T_{\min}

Lai ģenerators lietderību paceltu starp sildītāju un dzesētāju Nr. 1 ierīkots siltummainis [9], sastāvošs no termiski izolētiem vara sietiem, kuri kalpo par siltuma starp-akumulatoriem. Temperatūras starpība $T_{\max}-T_{\min}$ starp tiem sadalīta tik daudz pakāpienos cik sietu labirintā. Gāzei plūstot uz vienu pusi tās temperatūra pieaug nelieliem soļiem paņemot siltumu no sietiem pa porcijām, atpakaļ ejot soli pa solim tādejādi atkal atdodot. Rezultātā siltuma maiņa iznāk tuva atgriezeniskai.

Kamēr nekā nekustas vissiltākais Ar stāv sildītājā un bufera tilpuma augšdaļā. Temperatūru attiecībai T_{\max}/T_{\min} pārsniedzot kritisko robežu sākas periodiska gāzes kustība abos virzienos. Izklāsta vienkāršošanai vispirms apskatām ideālu variantu, kad tievās caurules nav, T_{\max} tikai mazliet pārsniedz T_{\min} , līkās caurules garums vienāds ar rezonatora garumu un abi tie ievērojami pārsniedz labirinta un ģenerators kopgarumu. Šādos apstākļos periodiskā gāzes kustība caur Termoakustisko ģeneratoru veido skaņas stāvvilni ar ātruma maksimumu labirintā un spiediena maksimumiem ārējos galos.

Pusperiodā, kad tilpums U plūst uz leju, tas sildītājā sasilst un nonācis bufera augšmalā ir izplēties attiecībā T_{\max}/T_{\min} . Vienlaicīgi tas izspiež no bufera lejas apmēram tādu pašu tilpumu auksta Ar uz MHD ģeneratoru. Tilpumu U iespiežot buferī skaņa padara darbu pU , kur p - spiediens. Tilpumam $U \cdot (T_{\max}/T_{\min})$ atstājot buferi skaņa atgūst lielāku darbu $pU \cdot (T_{\max}/T_{\min})$. Pārpalikumu patērē ģenerators. Ģeneratorā atstātā jauda samazina gāzes spiedienu un veidojas Karno cilpa – gāze uz leju plūst pie augstāka spiediena, uz augšu pie zemāka spiediena.

Temperatūra zemāka gan bufera lejasdaļā, gan augšdaļā kur atdzisusi gāze atņem sildītājam siltumu un pazeminātā spiedienā atgriežas līkajā caurulē.

Nākošam pusperiodam sākoties spiediens pieaug. Pieaug arī temperatūra un līkajā caurulē tā lielāka par T_{\min} . Pirms ieiet siltummainī tilpums U atdod siltumu dzesētājam Nr. 1.

Ar to pašu gāze atgriezusies sākuma stāvoklī gan padarījusi darbu MHD ģeneratorā, gan aiznesusi siltumu no sildītāja uz dzesētāju Nr.1.

T_{\max} ievērojami pārsniedzot T_{\min} stāvvilnis iznāk ļoti nesimetrisks – labajā pusē cirkulē pat četrreiz vairāk gāzes kā kreisajā. Nav izdevīgi turēt līko cauruli 1/4 viļņa garumā. Tā vietā pie ieejas MHD ģeneratorā daļu pienākošās gāzes atvada tievā caurulē (skat. att. 1.1. kreisā puse). Tā satīta spirālē tik gara, lai skaņas vilnis nonāktu pie membrānas tieši tajā brīdī, kad jāsākas jaunai kustībai uz leju.

Termoakustiskais ģenerators pārveido siltuma enerģiju mehāniskā līdzīgi 19.gs. izgudrotai Stirlinga mašīnai [4]. Modificēts Stirlinga mašīnas apgrieztais variants pazīstams kā Gifford-McMahon [6] process plaši lietots He sašķidrināšanai [5]. Termoakustiskie saldētāji tiek lietoti saldējuma tirgotājiem un populāri studentu eksperimentiem [3].

Mūsu darba temats ir pats MHD ģenerators. Tāpēc zemāk Termoakustisko ģeneratoru uzskatām par jaudīgu skaņas avotu, kas MHD ģeneratoram piegādā periodisku Ar plūsmu ar nepieciešamo spiedienu un caurteci.

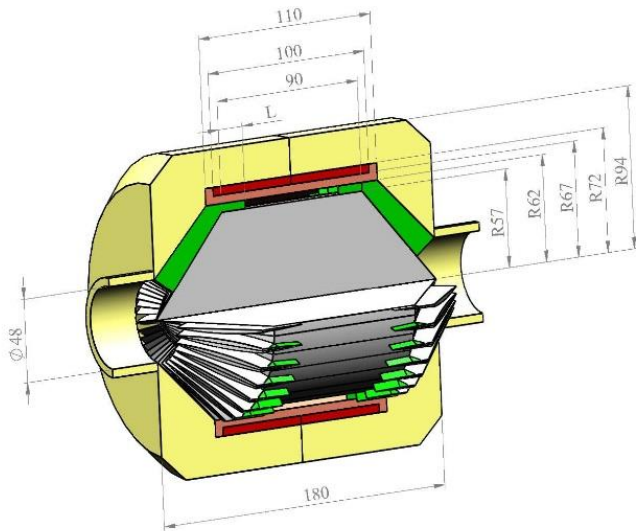
1.2 MHD ģenerators

1.2.1 MHD ģeneratora uzbūve

MHD ģeneratoru paredzēts veidot no feromagnētiska izolatora (laminēts tērauds vai SOMALOY) ar att. Nr. 1.2. dotajiem izmēriem. Par darba šķidrums kalpo šķidrums Na, iepildīts caurejošā kanālā. Kanāla vidū tā šķērsriezums ir gredzenveida sprauga (augstums - h , rādiuss - r), kuru abos galos sadala izolatora ķīļi. Gredzenveida spraugu apņem sekundārā spole un radiāli magnetizēts gredzenveida magnēts.

Koniskās ieejas/izejas kanāla daļas ir azimutāli sadalītas vienādās $n=32$ daļās - izolētos apakš-kanālos. Atdalošās sienas ir veidotas no feromagnētiskiem izolatoriem, kamēr mazie pagarinājumi kanālā ir nemagnētiski izolatori. Caurplūstošā apakš-kanāla vienas iedaļas platums $d=2\pi r/n$.

Skaņa no Termoakustiskā ģenerators liek nātrijam caurejošā kanālā oscilēt aksiālā virzienā ar ātrumu u un radiālā DC laukā B veidot azimutālu slēgtu AC strāvas ķēdi. AC magnētiskā lauka struktūra pieskaitās patstāvīgā magnēta laukam un inducē spriegumu $V = 2\pi r E_V$ gan sekundārā spolē, gan caurejošā nātrija kanālā.



Attēls 1.2. MHD ģenerators (MHD ģenerators parametri: ārējais garums 180 mm, ārējais diametrs R94x2=188 mm),

R57—R62 caurejošais nātrija kanāls (pa ģenerators rādiusu attiecīgi no 57 līdz 62 milimetriem),

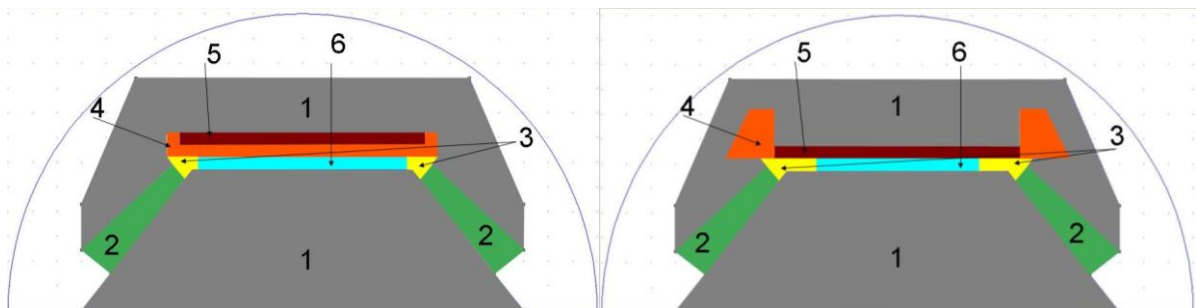
R62—R67 x 110 sekundārā spole,

R67—R72 x 100 patstāvīgs magnēts,

L — nemagnētisks izolators.

1.2.2. Uzdevuma formulējums

Darbā izskatīti divi varianti (FEMM4.2 programmas ģeometrisks izskaidrojums skat. att. 1.3.). Pirmajā variantā spoles tinums ir zem magnētiem, bet otrajā variantā tas sadalīts divos un novietots sānis. Otrajā variantā atšķiroties spoles novietojuma veidam strāvas plūsmas šķērsriezuma laukums nemainās.

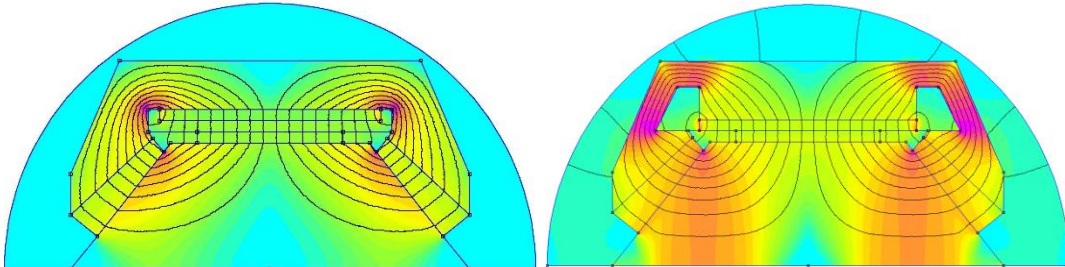


1. variants

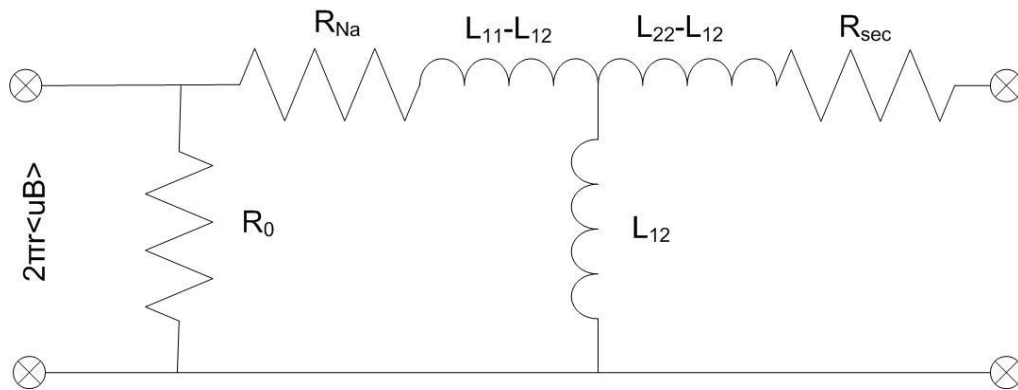
2. variants

Attēls 1.3. Ievaddati FEMM4.2 programmai: 1 - dzelzs, 2 - 30% laminēts dzelzs, 3 – izolatori, 4 – sekundārā spole, 5 – patstāvīgs magnēts, 6 – šķidrās nātrija aktīvais apgabals.

Magnētiskais Reynoldska skaitlis ir mazs pateicoties iekārtas mazajiem izmēriem. Tas ļauj mums kombinēt brīvi pieejamo simulācijas kodu FEMM4.2 ar ekvivalentā slēguma pieeju, sekojošā veidā:



Attēls 1.4. Magnētiskā lauka sadalījums attiecīgi 1. variantam un 2. variantam.



Attēls 1.5. Ekvivalentā shēma. Aprēķinot pašindukcijas dators kā nātriju tā sekundāro tīnumu uzskata par vienu vijumu, kā tas pierasts elektrotehnikasursos.

Tabula Nr. 1.1. Ekvivalentās shēmas parametri.

	1. variants	2. variants
R_{sec}, Ω	7.96E-05	8.69E-05
R_{Na}, Ω	8.47E-05	8.47E-05
R_0, Ω	1.70E-02	1.31E-02
L_{11}, H	4.06E-06	1.62E-06
L_{22}, H	4.01E-06	1.08E-06
L_{12}, H	3.95E-06	8.87E-07

1. Definējot problēmas ģeometriju ar FEMM4.2 programmai (skat. att. Nr. 1.3.), ieejas/izejas reģioni tiek apzīmēti kā radiāli laminēts feromagnētisks materiāls ar samazinātu piepildījuma faktoru (30%).
2. Darbojoties aksiāl-simetriskā līdzstrāvas režīmā FEMM4.2 aprēķina gan magnētiskā lauka sadalījumu (skat. att. Nr. 1.4.), gan viena vijuma pašindukcijas L_{11} aktīvajā kanāla daļā, sekundārai spolei - L_{22} un savstarpējā induktivitāte L_{12} .
3. Visas pārējās MHD ģenerators īpašības iegūst lietojot FEMM4.2 izvadu kā ievadi vienkāršā FORTRAN programmā pamatojoties uz AC ekvivalentās shēmas (skat. att. Nr. 1.5.) pieeju.

1.2.3. Ekvivalentās shēmas slēguma formulējums

Akustiskais MHD ģenerators sastāv no divām elektriskam mašīnām: kondukcijas MHD ģenerators Na plūsmas enerģijas pārveidošanai elektriskā strāvā un no transformatora, kas pārveido strāvu patērētājam piemērotā spriegumā. Ģenerators analīzei pielietojam elektrotehnikā plaši lietoto ekvivalento shēmu pieeju, kurā telpiski sarežģītu agregātu aizstāj ar līdzīgi darbojošos vienkāršu elementu (pretestību, pašindukciju, kondensatoru, u.c.) saslēgumu.

Transformatora daļa ekvivalentā shēma (skat. att. Nr. 1.5.) sastāv no trīs induktivitātēm, savienotām tā, lai no pieslēgumu puses izturētos kā reāls transformators: mērot no kreisās puses savienojums uzrāda L_{11} , no labās puses uzrāda L_{22} . Ja strāva ir pielikta no vienas puses, otra puse uzrāda L_{12} vērtību.

Ģenerējošās daļas apraksts ir daudz garāks [1]. Mēs pieņemam, ka spraugai $h \ll r$, tāpēc magnētiskā lauka apskatam lieto tikai radiālo komponenti un elektriskai strāvai - azimutālo komponenti. Azimutālo strāvu nātrijā

$$j = \sigma [uB(x) - E_u(x) - E_v(x)] \quad (1)$$

rada nātrija aksiālā kustība u radiālā magnētiskā laukā $B(x)$. Tai pretojas elektriskais lauks, kuru dalām divās sastāvdaļās: $E_u(x) = ub(x)$ kas proporcionāla u , jo ir izolatora reakcija uz $uB(x)$ un $E_v(x)$, kas proporcionāla transformatora ieejas spriegumam V . Savukārt $b(x)$

punktā x ir atkarīgs no B ne tikai šajā, bet arī visos pārējos punktos. Atkarībai jābūt lineārai, tāpēc vienīgā iespēja ir

$$b(x) = \int B(x_1)g_3(x, x_1)d^3x_1 \quad (2)$$

ar formālu 3D Grīna funkciju $g_3(x, x_1)$. Te jāintegrē tikai pa izolatoru ierobežoto kanāla tilpumu, jo kanāla brīvajā daļā nekas netraucē strāvai $\sigma u B(x)$ plūst un šie punkti $E_u(x)$ lielumu neietekmē.

Spēks ar kādu strāva j iedarbojas uz nātriju ir vienāds ar $j \times B$. Nātrijā pilnā ģenerācijas jauda

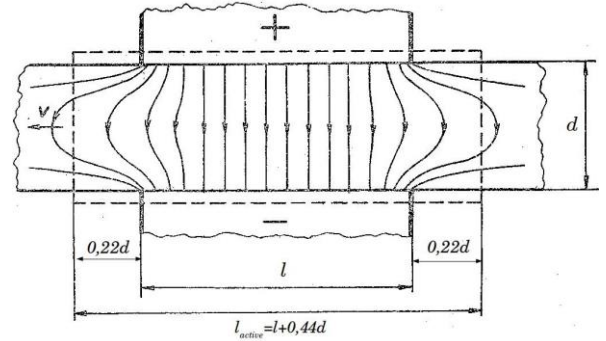
$$Q = \sigma u^2 \int B(x)[B(x) - b(x)] d^3x - \sigma u \int B(x)E_V(x) d^3x \quad (3)$$

Ekvivalentā ķēdes (att. Nr. 1.5.) ģenerācijas daļu veido trīs lielumi R_{Na} , V_0 un R_0 kurus nosakām no sekojošiem apsvērumiem:

1. Nātrija pretestība inducētai strāvai - R_{Na} . Pretestība tiek aprēķināta, kā veiktā ceļa attiecība pret kanāla šķērsriezuma laukumu.

Bet šajā gadījumā elektriskās strāvas līnijas ir izliektas, tādejādi strāvas faktiski izmantotais šķērsriezums $l_{active} \cdot h$ pārsniedz brīvo sprauslas šķērsriezumu: $l_{free} \cdot h$ un pretestība nedaudz samazinās. Uzdevumu risinot matemātiski izrādās $l_{active} = l_{free} + 2 \cdot 0.22d$, kur $0.22 \approx \ln(2)/\pi$, skat. [1]. Rezultātā

$$R_{Na} = \frac{2\pi r}{\sigma \cdot h \cdot l_{active}}$$



Attēls 1.6. Ārējā sprieguma veidotās strāvas.

att. ņemts no [1].

2. Ekvivalentai ķēdei strāva nātrijā $I_{Na} = (V_0 - V)/R_{Na}$. Jaudas ģenerācija ķēdei atbilstoši,

$$Q_{ķēdei} = \frac{V_0}{R_0} + I_{Na}(V_0 - V) + I_{Na}V = V_0^2 \left(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_{Na}} \right) - \frac{V_0 V}{R_{Na}}, \quad (4)$$

kam vajadzētu atbilst Q .

Pieņemot, ka $E_V(x) = \frac{V}{2\pi r}$ eksistē tikai telpā $\Omega = 2\pi r \cdot h \cdot l_{active}$, un salīdzinot Q un $Q_{ķēdei}$ pēdējos locekļus:

$$V_0 = \sigma u R_{Na} \int B(x) \left(\frac{E_V(x)}{V} \right) d^3x = 2\pi r u \langle B \rangle_\Omega \quad (5)$$

kur $\langle B \rangle_\Omega$ apzīmē B vidējo vērtību apgabalā Ω .

3. Priekš R_0 mēs salīdzinām Q un $Q_{kēdei}$ pirmos locekļus

$$\frac{1}{R_0} = \sigma R_{Na} \left(\frac{\int_{pilnais} [B(x) - b(x)] B(x) d^3x}{\langle B \rangle_\Omega^2 \cdot l_{active}} - 1 \right) \quad (6)$$

Te integrējam pa visu kanālu. Azimutāla integrācija noved pie 1D formulām

$$b(z) = \int_{apakškanālam} B(z_1) g(z, z_1) dz_1$$

$$\frac{1}{R_0} = \sigma R_{Na} \left(\frac{\int_{pilnais} [B(z) - b(z)] B(z) d^3z}{\langle B \rangle_\Omega^2 \cdot l_{active}} - 1 \right) \quad (7)$$

Datora aprēķiniem mēs izmantojam divas aproksimācijas:

$$g(z, z_1) \approx 4G(|z - z_1|)/d^2 \quad (8)$$

$$\int_{pilnais} [B(z) - b(z)] B(z) dz \approx$$

$$\approx \int_{free} B^2(z) dz + \int_{apakškanālam} [B(x) - b(z)] B(z) dz + 0.085 \cdot d(B_R + B_L) \quad (9)$$

Korekcijas locekļi $0.085 \approx \frac{\ln(2)}{\pi} - 0.5 \sum \frac{1}{[\pi(k-0.5)]^3}$; kur B_R, B_L - lauka vērtības pa labi un kreisi uz izolatora galiem.

Šāda korekcija vajadzīga, jo aproksimējot Grīna funkciju esam bojājuši tās izturēšanos tuvu izolatora galiem, kā arī pazaudējuši $\int_{free} B(z)b(z) dz$, kura vērtību arī nosaka lauks izolatoru galu rajonā. Vispārējā gadījumā korekciju izrēķināt ir grūti. Mēs koeficientu 0.085 izvēlamies tādu, lai homogēnā laukā pilnais integrālis būtu nulle. Pilnīgi homogēnā laukā strāvas līnijas ir tieši tādas pašas kā att. 1.6. tāpēc $R_0 = \infty$. Šādi rīkojoties ievērota gan lauka izturēšanās tālu no izolatora galiem, gan B vērtība uz pašiem galiem. Paliek neliela kļūda, ko rada lauka nevienmērība nelielā (0.22d) apgabalā galu tuvumā.

Grīna funkcijas $G(z)$ veidošanai izmantojam Laplasa vienādojuma atrisinājumu

$$f(x, z) = \sum_{k=1}^{\infty} e^{[-\pi|z|(k-0.5)]} \cos(\pi x(k-0.5)), \quad (10)$$

kuru integrējam pa x :

$$G(z) = \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{e^{[-\pi|z|(k-0.5)]}}{(k-0.5)} = \frac{1}{2} \int f(x, z) dx \quad (11)$$

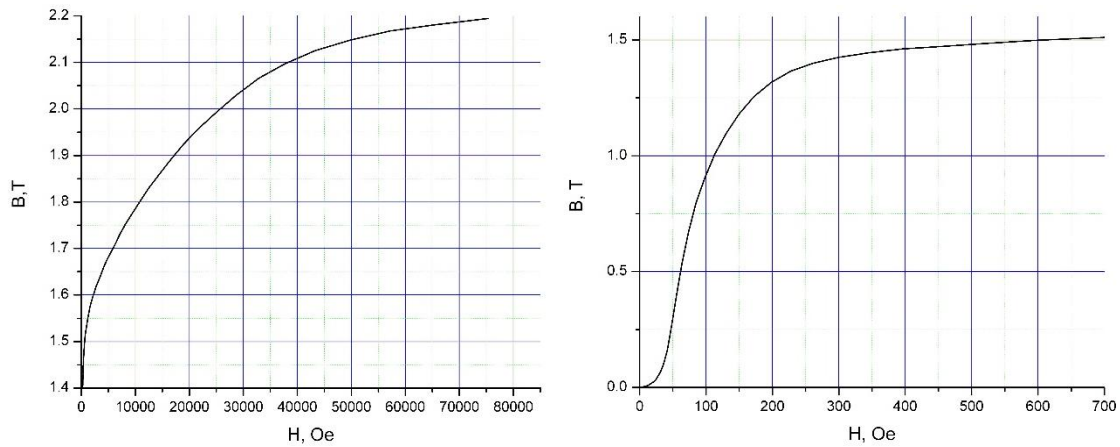
Katrs $f(x, z)$ loceklis atsevišķi apmierina Laplasa vienādojumu visur atskaitot laužumu uz līnijas $z = 0$. Visas summas gludumu $\left. \frac{\partial f(x, z)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0$, kā arī pareizu $G(z)$ normēšanu nosaka tāpatība

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(k-0.5)x}{(k-0.5)} = \frac{\pi}{2} \quad (12)$$

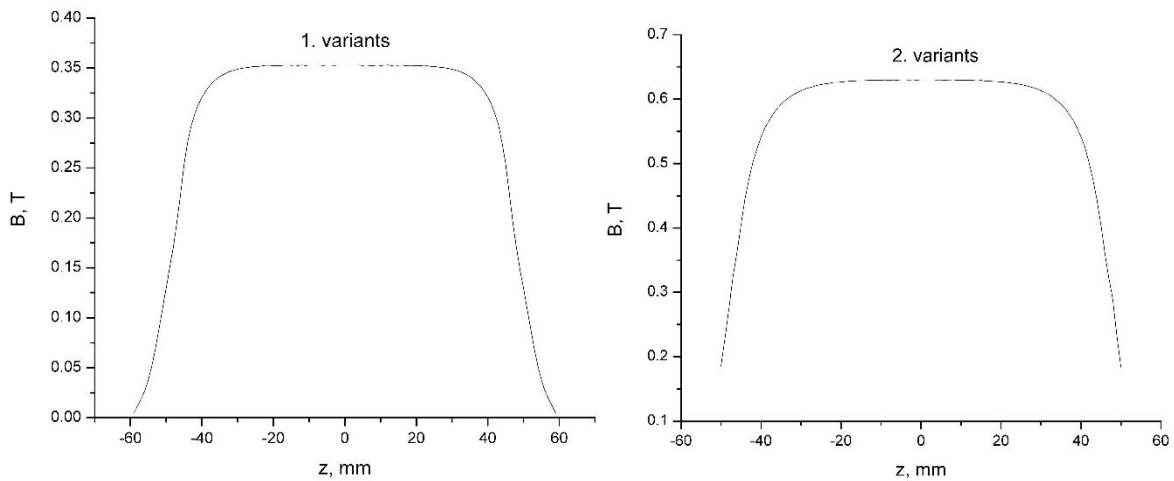
visiem $0 < x < \pi$ [2].

2. APRĒĶINS

Uzdevuma mērķis ir salīdzināt divus ģenerators variantus (skat. att. 1.3.), kur sekundārais tinums sadalīts divos – labējā un kreisajā (skat. att. 1.3. 2. variantu). Šī sadalījuma mērķis ir palielināt magnētisko lauku nātrija spraugā. Akustiskās impedances (norāda skaņas spiediena un caurteces samēru) reaktīvā daļa eksperimentos ir ar pārāk lielu vērtību un tāpēc otrs mērķis ir pārbaudīt vai akustisko $\cos\phi$ vērtību (kas atkarīgs no akustiskās impedances) var uzlabot, un kā tas izpaužas vairāk vai mazāk spēcīgi 1. un 2. variantā.

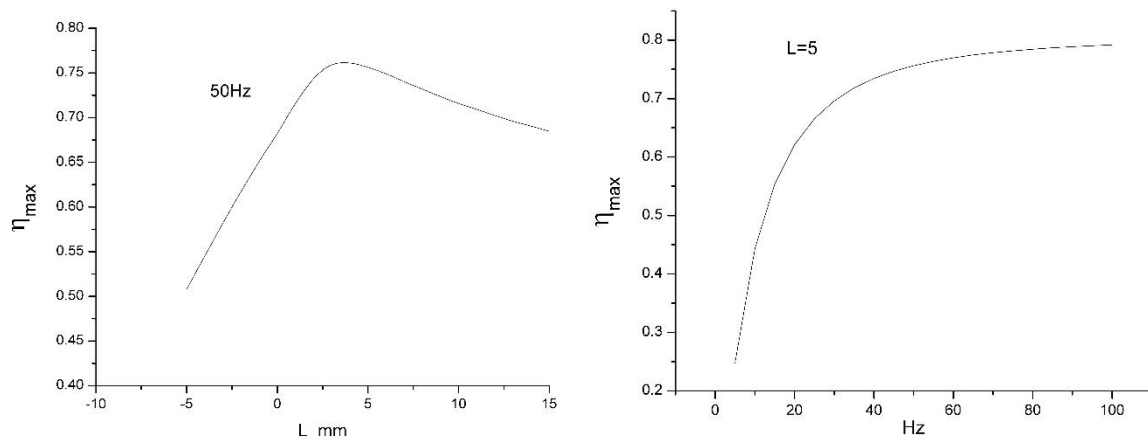


Attēls 2.1. Abu variantu aprēķinam lieto tērauda magnetizācijas līkni.



Attēls 2.2. FEMM.4.2 aprēķinātais magnētiskais lauks Na kanālā.

Ir magnētiskās caurlaidības līknes (skat. att. 2.1.), kuras ir dotas līdz FEMM.4.2. programmai. Šīs līknes tiek izmantotas, lai tālāk aprēķinātu magnētiskā lauka sadalījumu nātrijā. Salīdzinot abus variantus (magnētiskā lauka maksimumus att. 2.2.) ir novērojams, ka 2. variants ir par 70% efektīvāks, tātad magnētiskā kvadrāts 2. variantā ir gandrīz trīs reizes spēcīgāks. Diemžēl pašindukcijas ir mainījušās, spoļu pārvietošanās rezultātā 2. variantā, (skat. tabulu Nr. 1.1.) un it sevišķi savstarpējā indukcija ir ievērojami samazinājusies. Līdz ar to visās turpmākajās 2. varianta līknēs, lietderīgās darbības frekvences ir ievērojami pieaugušas. Aprēķinātais frekvenču diapazons 1. variantam ir no 5 līdz 100 Hz ar soli 5 Hz, bet 2. variantam – 20..1000 Hz ar soli 20 Hz.



Attēls 2.3. 1. varianta. Lietderības koeficienta maksimums atkarībā no izolatora garuma un skaņas frekvences.

Ar tabulas 1.1. ieejas skaitļiem tiek aprēķinātas turpmākās līknes. Visa informācija no ekvivalentā shēmas ir sakoncentrēta tikai no 3 lielumiem R_{Na} , R_o un L_{12} . Sekundārā pretestības lielums R_{sec} ir atkarīgs no izmantotā vara daudzuma spolē, bet tai ir maza nozīme (nav noteicošas izmaiņas efektivitātē), jo tā ir stipri mazāka par R_{Na} .

Att. 2.3. līknes maksimuma ($L=3.81$ mm) tuvumā optimālākais izolatora garums ir $L=5$ mm, kas tiek lietots tālākos aprēķinos. Lietderības koeficients pie mazas frekvences ir zems tādēļ, ka L_{12} ir zems un caur to plūst liela reaktīvā strāva. Frekvenci palielinot kompleksā pretestība aug. Un strāva vairs lieki neplūst, bet aiziet pie patērētāja. Frekvenci vēl palielinot – lielas strāvas vairs neplūst, bet pieaugs reaktīvā pretestība spolēm L_{11} - L_{12} un L_{22} - L_{12} (att.

1.5.), kas beigu beigās efektivitāti samazina. Tādēļ līknei jābūt ar maksimumu attēlā 2.3, tas nav sasniegts, jo lielākas frekvences ir neērtas akustiskās impedances dēļ.

DARBA REZULTĀTU ANALĪZE

Turpmākie attēli tiek analizēti pa pāriem, jo atkarības ir vienādas katram pārim, bet atšķiras varianti. Vispirms katrā pārī apskatam 1. variantu un tad 2. variantu.

Lietderības koeficienta atkarībā no slodzes un frekvences (att. 2.4 un 2.5.) tiek sasniegts maksimums, pie noteiktas slodzes pretestības R_{load} , ja slodzes pretestība ir par mazu, tad jauda krīt R_{Na} , un lietderības koeficients ir mazs. Samazinot pretestību strāva vairs nesamazinās – nepieaug, bet zudumi paliek. Toties, ja slodzes pretestība R_{load} ir par lielu, spriegums sasniedz piesātinājumu – patērētāja strāva krītas, jauda atkal krīt. No tā arī rodas maksimumi uz līknēm (att. 2.4 un 2.5.). Attiecībai $R_{load} / R_{Na}=13$ pie optimālās frekvences 50 Hz ir maksimums, bet pie mazākām frekvencēm (mazākas jaudas pēc) maksimums tiek sasniegts pie zemākas R_{load} / R_{Na} attiecības, piem., pie 5 Hz atbilstoši $R_{load} / R_{Na}=3$. R_{load} relatīvi viegli var izvēlēties. Pie zemākām attiecības R_{load} / R_{Na} vērtībām no vienas līknes uz otru, tiek sasniegti maksimumi, bet lietderības koeficienta maksimums ir pie zemākas vērtības un līknes dilšana noris straujāk.

Reaktīvā strāva plūst caur L_{11} pašindukciju un aktīvā daļa caur patērētāju. Plūsmas ātrumu nosaka spriegums. Aktīvo daļu pašindukcija neiespaido.

Attēlos 2.6. un 2.7. attēlota nātrija caurtece litri sekundē pie 1 vata saražotās jaudas atkarībā no slodzes. Šādu mērvienību var lietot, ja jauda nav pārmērīgi liela (skat. zemāk). Ja 1 W vietā ģenerators atdotu 100 W jaudas, tad litri sekundē desmitkārsšotos. Līknes te vairāk saplūdušas kā att. 2.4. un 2.5., jo reaktīvo strāvu iespajds ir mazāks. Attēlā 2.6. ar aci labi atšķiramas ir līknes pie 5, 10 15 Hz, tālāk līknes jau saplūst. Caurteces optimums 0.4 pie mazākas attiecības R_{load} / R_{Na} kā att. 2.4, 2.5. pie tām pašām frekvencēm.

Attēlos 2.8 un 2.9. attēlota nātrija un spoles summārā strāva (balansa strāva) gadījumā, kad ģenerators saražo vienu vatu (1W) enerģijas, ko atdod patērētājam. Tik daudz būs ampēru, ja patērētājam atdos 1 vatu jaudas, ja patērētājam atdotu 100 vatu jaudas, tad līkne pārvietotos vertikāli uz augšu 10 reizes.

Balansa strāva izriet no transformatora darbības principiem. Primārā tinumā plūstošā strāva magnetizē transformatorā serdi un inducē sekundāro strāvu sekundārā tinumā. Primārā

un sekundārā tinuma strāvas virzieni ir pretēji, kas savstarpēji kompensējas, serdi magnetizē primārā un sekundārā tinuma strāvu summa. Un šeit (skat. 1.2.3. nodaļu) arī ir izdarīts tas pats - primārā un sekundārā tinuma strāva ir saskaitīta kopā tādejādi magnetizējot MHD ģenerators serdi. Vienlaicīgi tas izmaina magnētiskā lauka sadalījumu nātrija spraugā. Parādība elektromašīnu teorijā labi zināma [1], tiek saukta par enkura reakciju un ierobežo mašīnu efektivitāti.

Att. 2.2. izmainās magnētiskais lauka sadalījums, kur tas lielu daļu ir horizontāls, bet tā strāva kuru tas inducē izsauc to, ka vienā pusperiodā kreisais gals būs augstāk un labais gals būs zemāk – pēc pusperioda tas ir simetriski uz otru pusi. Tas izriet no formulām (6) raugoties izolatora iekšpusē. Brīvajā telpā nointegrē $B(x)^2$, tiklīdz kā magnētiskais lauka sadalījums sašķiebjas, to izdalām ar $\langle B \rangle_{\Omega}^2$ un līdz ar to lielums kļūs lielāks un visa iekava izvedumā (6) pieaugs. Un rezultātā R_0 samazināsies – R_0 būs atkarīga no laika un periodiski svārstīsies. Bet, ja R_0 samazināsies, ģenerators efektivitāte samazināsies.

Efektīvās ķēdes ietvaros ģenerators jaudas piesātinājumu iespējams novērtēt. Šajā bakalaura darbā, tas nav novērtēts, bet tiks turpināts darbs pie šī jautājuma.

Akustiskai impedānci ir izrēķināti divi gadījumi: elektromagnētiskās darbības impedānci (att. 2.10 un 2.11.), bet otrajā gadījumā ievērojot iepildītā nātrija inerci (att. 2.14. un 2.15.). Mērvienības uz vertikālās ass ir bārs izdalīts ar litri sekundē. Mūsu aprēķinu ietvaros aktīvā impedānci (melnā līkne) nemainās. Inerces izmaina tikai reaktīvo daļu, kas attēlos 2.10, 2.11 un 2.14, 2.15. salīdzinot ir redzams. Att. 2.14. pie 20 Hz kompensē elektromagnētisko locekli, hercus paceļot inerces locekli savu lomu palielina. Frekvencei augot reaktīvā daļa pāriet uz negatīvu zīmi. Līknes īsu daļu ir ieliekta un pēc tam ir gandrīz horizontālas - paceļot slodzes pretestību, zudumi paliek. Inerces un bez inerces gadījumiem ordinārās ass mērogs atšķiras 4 reizes.

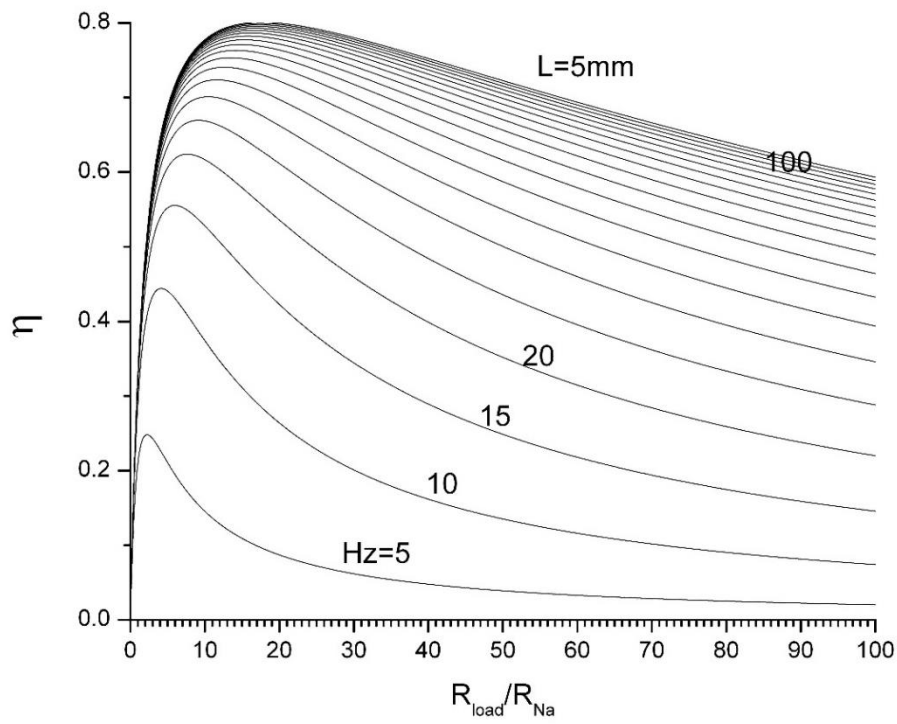
Rūpniecisko elektrības patērētāju raksturošanai elektrības tīkli lieto jēdzienu $\cos\phi$ – attiecību starp saņemto aktīvo jaudu un pilno jaudu. Līdzīgu lielumu var lietot arī Termoakustiskā MHD ģenerators akustikas raksturošanai. Šie lielumi tāpat ir izrēķināti četros attēlos: divos variantos un katrā iekļaujot nātrija inerci un bez inerces.

Ja frekvence ļoti maza, tad $\cos\phi = 1$, tas variantā 1. bez inerces krītas līdz 25 Hz un pēc tam ceļas uz augšu līdz 100 Hz. Pie derīga lietderības koeficienta, frekvences ir par augstām, $\cos\phi$ lietderība nemainās abos variantos un gadījumos. Aktīvā daļa ir lielāka par reaktīvo daļu. Kad pie $R_{load}/R_{Na} = 13$, tad pie 50 Hz akustiskais $\cos\phi$ ir apmēram 0.77. Pie 100 Hz $\cos\phi$ sasniedz 0.9, kas jau ir labs efektivitātes rādītājs. Taču, ja ņem vērā paša nātrija inerci, tad reaktīvā daļa – sarkanā līkne ir ar zemākām vērtībām un aktīvā daļa – melnā līkne ir ar lielākām vērtībām (att. 2.14. un 2.15.). Rezultātā pilnais $\cos\Phi$ (att. 2.16 un 2.17.) iznāk neapmierinošs un jāpiemeklē rezonators, lai to kompensētu. Līdzīgi kā to dara ar kondensatoriem elektrības tīklos.

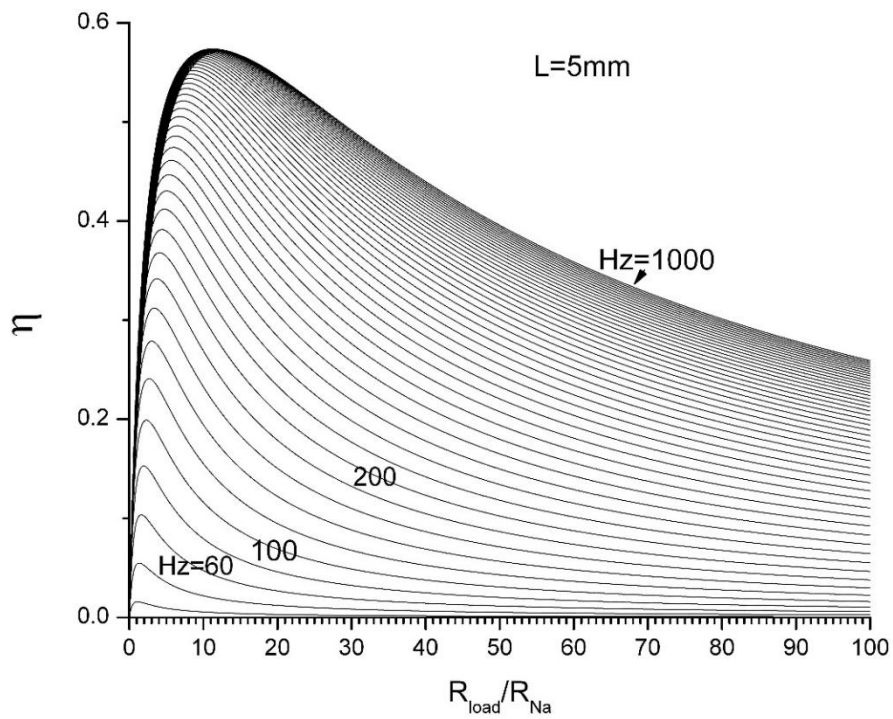
Attēlos 2.12. un 2.13 bez inerces $\cos\phi$ ir daudz maz apmierinošs, jo pie 50 Hz ir sasniegts vēlamijs optimums apm. 0.7, bet lietderības koeficients ir stipri nepietiekošs. Lai lietderības koeficientu palielinātu, būtu jāpaceļ frekvence, bet tad $\cos\phi$ nokrītas.

Bet **ierēķinot inerci** 1. variantā (att. 2.16.), optimuma daļas ir pie 5 un 15 Hz – atkarības ir horizontālākas. Apm. pie 15 Hz inerce ievērojami uzlabo $\cos\Phi$. Pie 10 Hz $\cos\Phi$ mazliet nokrītas, šķērsojot 5 Hz līkni. Tālāk pie 15 Hz līkne uzlec uz augšu un tad neatgriezeniski attēlotās līknes ‘nāk lejā’ pie zemākām $\cos\Phi$ vērtībām frekvencei palielinoties (līdz frekvences maksimālai vērtībai), jo inerces pēc $\cos\Phi$ labums pasliktinās. Otrajā variantā šis efekts ir vēl izteiktāks (att. 2.17.). Ap 60 un 80 Hz $\cos\Phi$ ir stipri labs un pēc tam krītas, bet lietderības koeficients η tāpat atkal ir mazs.

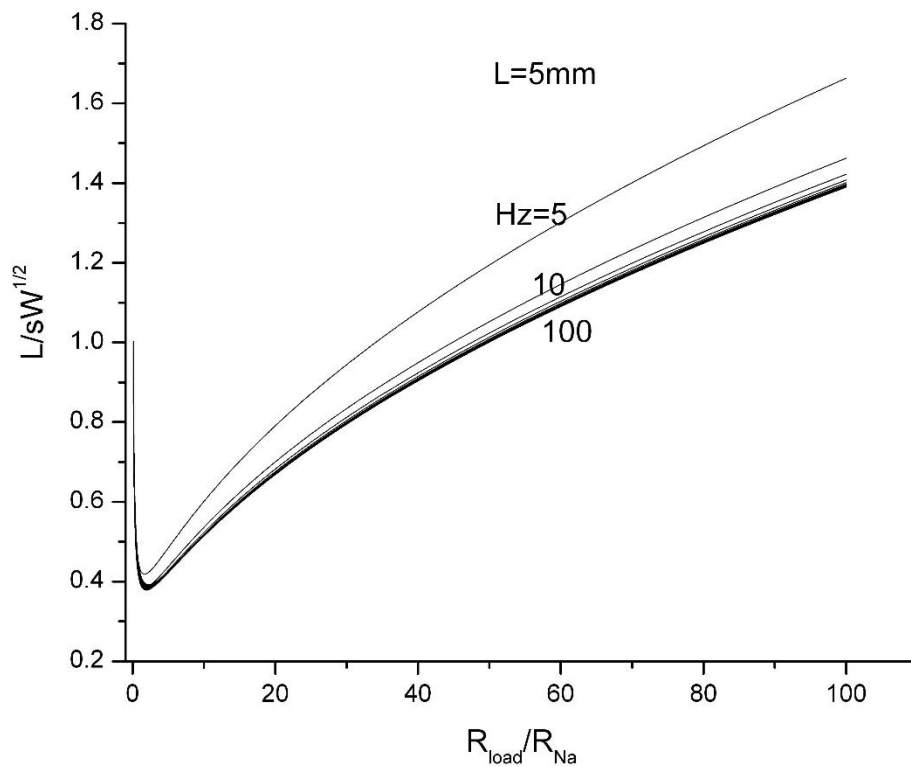
Nātrija inerces efekts abiem variantiem ir izteiktāks pie augstākām frekvencēm.



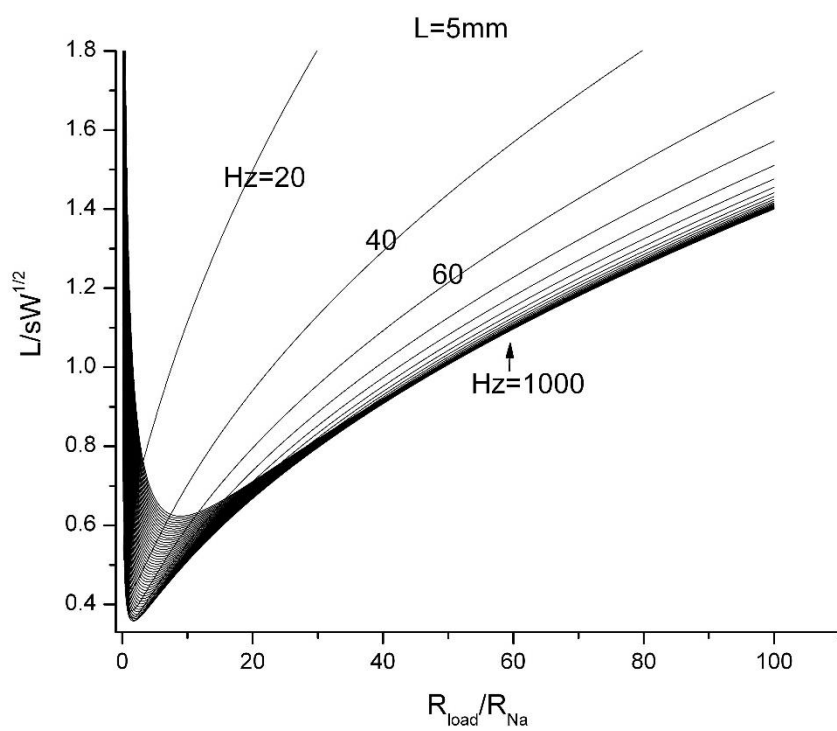
Attēls 2.4. 1. varianta efektivitāte atkarībā no slodzes un frekvences.



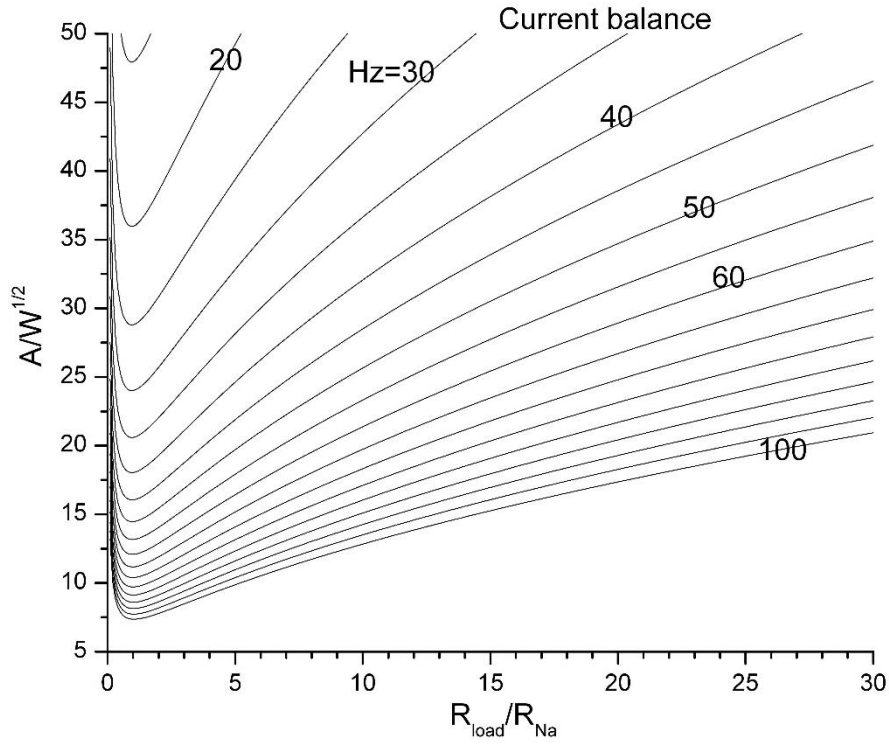
Attēls 2.5. 2. varianta efektivitāte atkarībā no slodzes un frekvences.



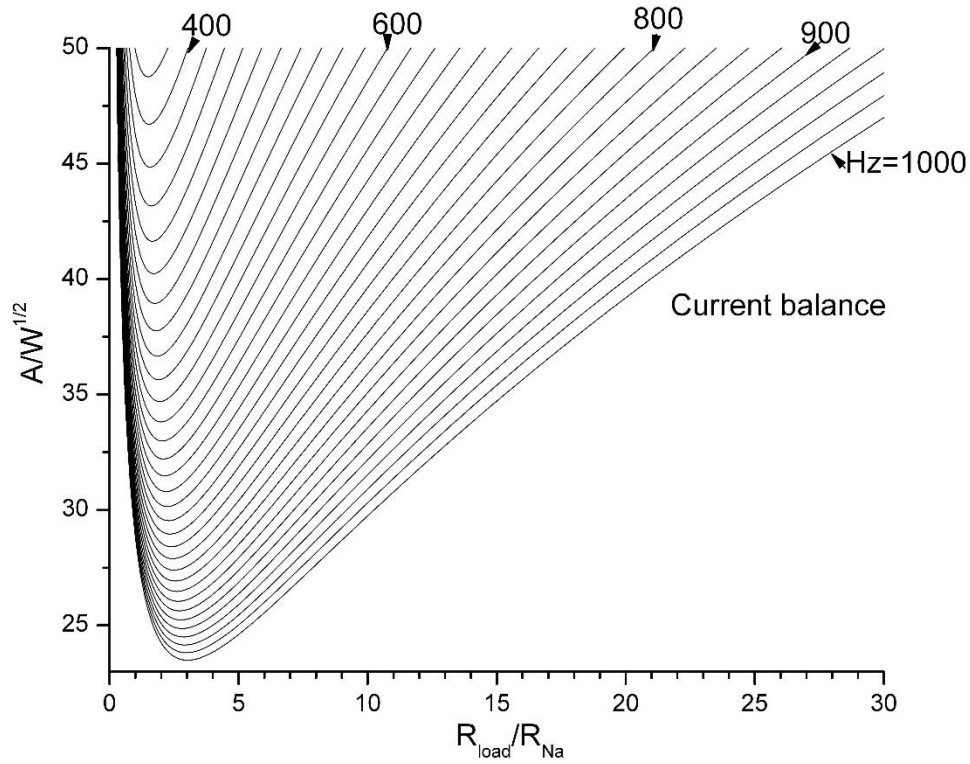
Attēls 2.6. 1. variants. Na caurtece atdodot patērētājam 1W jaudas.



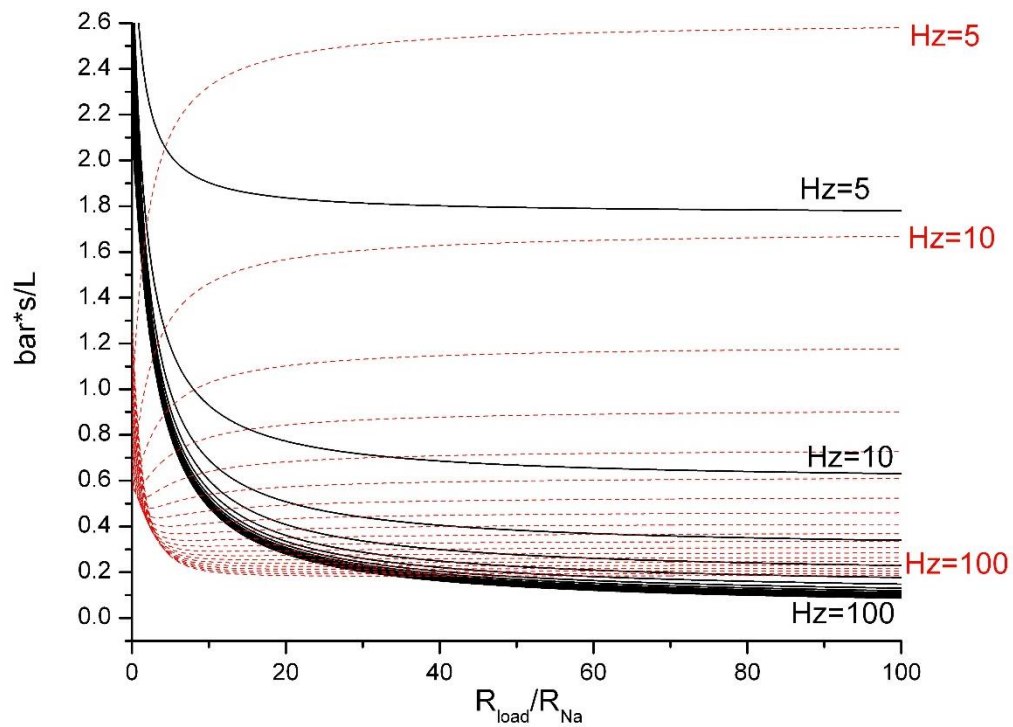
Attēls 2.7. 2. variants. Na caurtece atdodot patērētājam 1W jaudas.



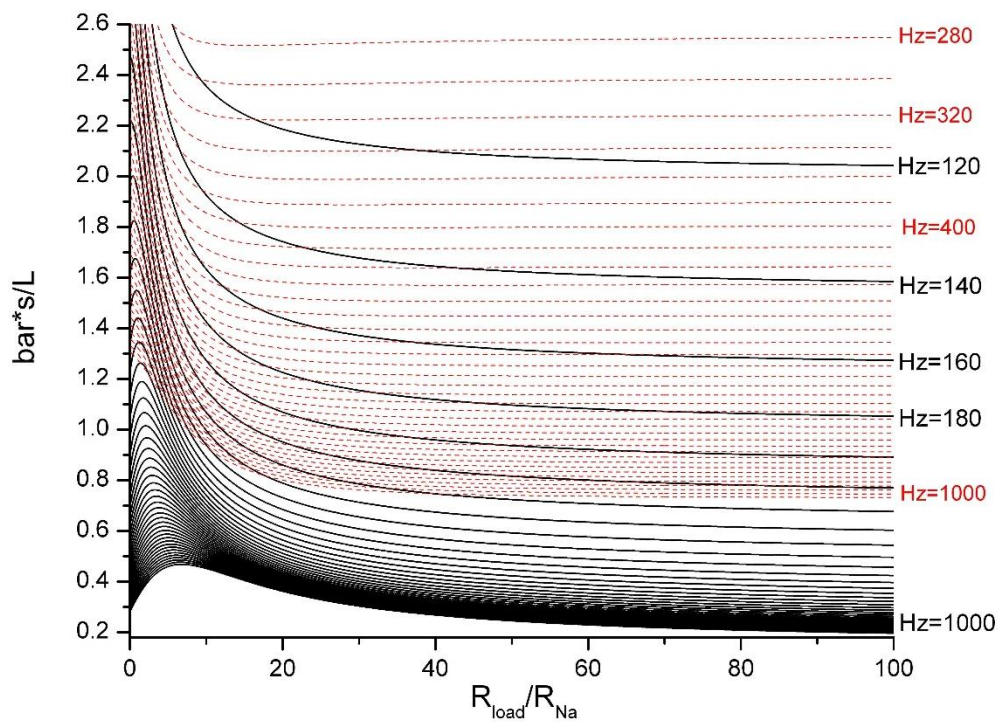
Attēls 2.8. 1. variants. Summārā strāva atkarībā no slodzes un frekvences.



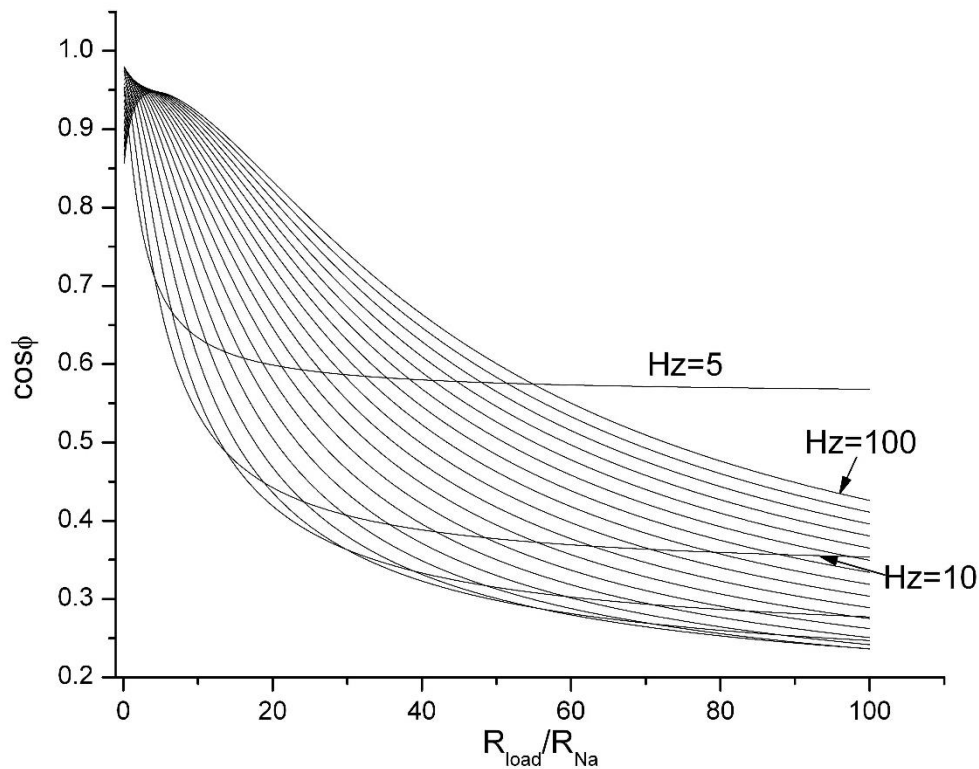
Attēls 2.9. 2. variants. Summārā strāva atkarībā no slodzes un frekvences



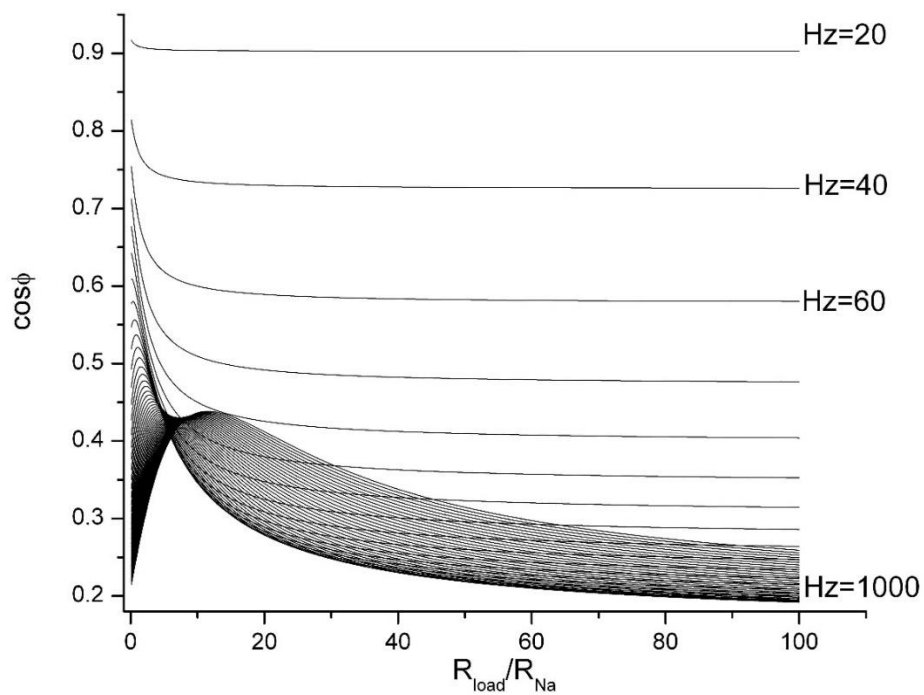
Attēls 2.10. 1. variants. Akustiskā impedance bez Na inerces. Aktīvā daļa– melnā līkne ($\cos(\omega t)$), reaktīva – sarkanā ($\sin(\omega t)$).



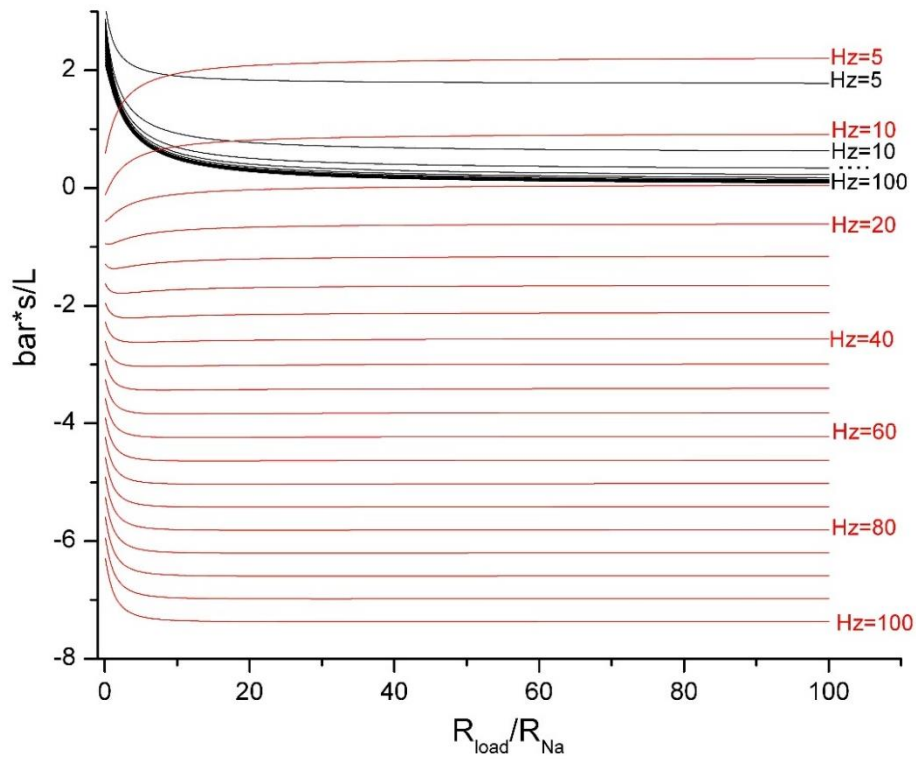
Attēls 2.11. 2. variants. Bez inerces.



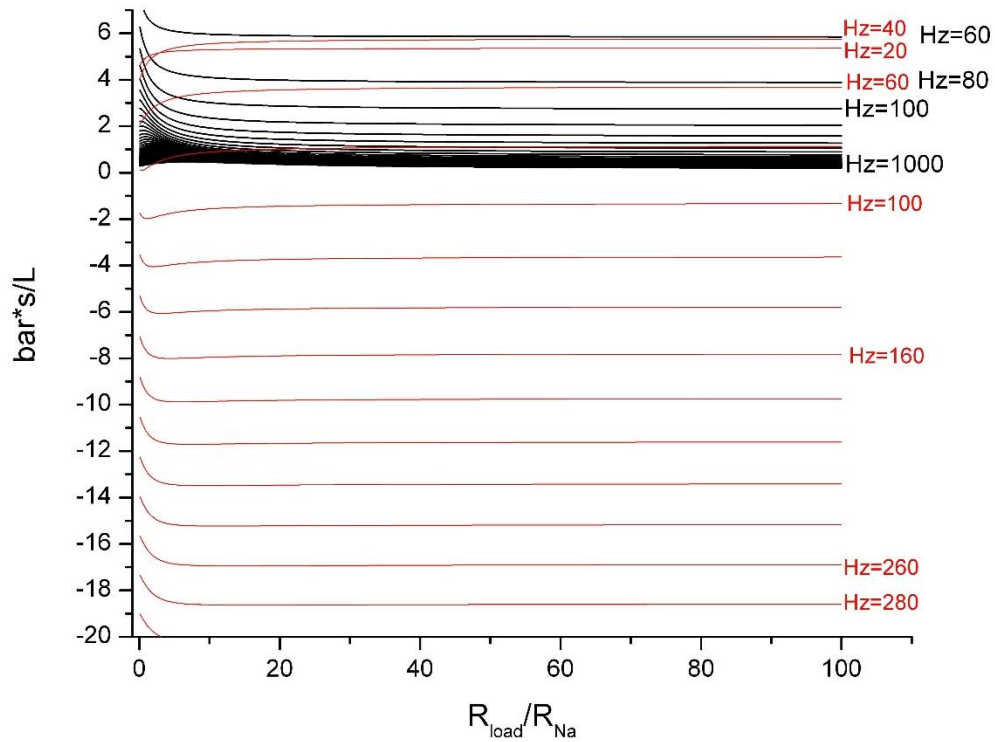
Attēls 2.12. 1. variants. Bez inerces. Akustiskais $\cos \phi$ atkarībā no slodzes un frekvences.



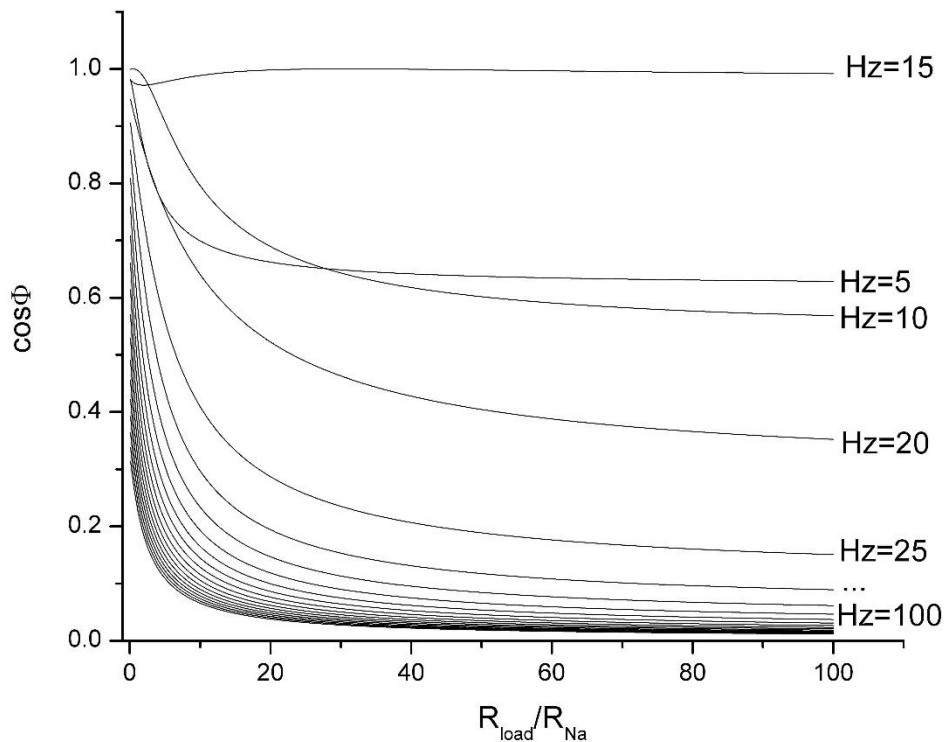
Attēls 2.13. 2. variants. Bez inerces. Akustiskais $\cos \phi$ atkarībā no slodzes un frekvences



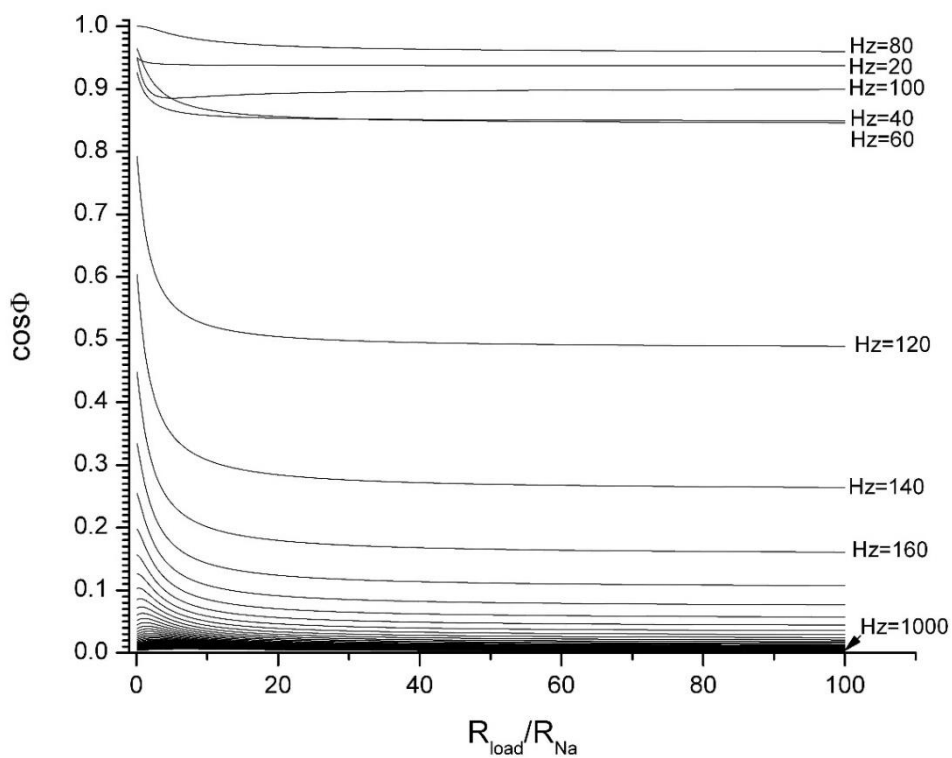
Attēls 2.14. 1. variants. Ar inerci akustiskā impedance. Aktīvā daļa – melnā līkne ($\cos(\omega t)$), reaktīva – sarkanā ($\sin(\omega t)$).



Attēls 2.15. 2. variants. Ar inerci.



Attēls 2.16. 1. variants. Ar inerci. Pilnā akustiskā $\cos\Phi$ atkarība no slodzes un frekvences.



Attēls 2.17. 2. variants. Ar N_a inerci. Pilnā akustiskā $\cos\Phi$ atkarība no slodzes un frekvences.

SECINĀJUMI

Bakalaura darba izvirzītie mērķi ir sasniegti. Ir veikts Termoakustiskā ģenerators darbības apraksts un viņa darba līkņu aprēķins.

Lietderīgāks tomēr ir 1. variants, jo ir pieņemams lietderības koeficients. 2. variantam optimālās frekvences ir pa augstām un tad lietderības koeficients ir nepieņemami zems.

Šāda ierīce principā darboties var, bet nātrija inerces pēc reaktīvā daļa akustiskais $\cos\varphi$ ir neapmierinoši zems. Piemeklējot rezonatoru $\cos\varphi$ var labot, taču tādā gadījumā jāsaprot rezonatora frekvence ar akustiskā ģenerators darbības frekvenci un tas visu uzdevumu sarežģī.

Ekvivalentā shēma ir ātrs un noderīgs veids, lai analizētu ģenerators dažādās īpašības. Šajā darbā apspriests tikai ideāls ģenerators gadījums. Viskozitāte un zudumi konstruktīvajos materiālos u.c. netika ņemti vērā. Viegli ir iekļaut lielāko daļu no tiem loģiskā slēguma ķēdē un pārstartēt kodu.

Strāvas, kas plūstot magnetizē MHD ģenerators serdi izmainot magnētiskā lauka telpisko sadalījumu - pasliktina ģenerators lietderības koeficientu. Šī problēma turpmākā darbā ir jāpēta sīkāk un ekvivalentās ķēdes ietvaros to ir iespējams izdarīt.

PATEICĪBAS

Pirmkārt vislielāko pateicību es izsaku savam bakalaura darba vadītājam Dr. Agrim Gailītim, kas man deva iespēju akadēmiski pilnveidoties un strādāt LU Fizikas institūtā Teorētiskās fizikas laboratorijā. Paldies Agrim par palīdzību un pamācošajiem padomiem šī bakalaura darba izveidē.

Vēlos pateikties arī savam kolēģim no LU Fizikas Institūta pētniekam Raimondam Nikoluškinam par atļauju ielikt MHD ģenerators attēlu (att. 1.2.). Paldies arī citiem darba kolēģiem par atbalstu.

Vēlos pateikties arī savai ģimenei un citiem saviem mīļajiem cilvēkiem par morālu atbalstu un sapratni bakalaura darba izveides laikā.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

- [1] **Ю.А Бирзвалк.** Основы теории и расчета кондукционных МГД-насосов постоянного тока. Zinātne. Rīga. 1968
- [2] **Gradshteyn and Ryzhik's.** *Table of Integrals, Series and Products.* Alan Jeffrey (ed.) Fifth edition (January 1994) 1,204 pages ISBN number: 0-12-294755-X
- [3] **Jonathan Newman, Bob Cariste, Alejandro Queiruga, Isaac Davis, Ben Plotnick, Michael Gordon and Sidney San Martín.** *Thermoacoustic Refrigeration.* GSET Research Journal 2006.
- [4] **Wikipedia, the free encyclopedia interneta vietne.** *Stirling engine.* URL http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine
- [5] **Hyperphysics interneta vietne.** *Liquid Helium.* URL <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/lhel.html>
- [6] **Wikipedia, the free encyclopedia interneta vietne.** *Cryocooler.* URL <http://en.wikipedia.org/wiki/Cryocooler>
- [7] **Daniel A. Russell, Pontus Weibull.** *Tabletop thermoacoustic refrigerator for demonstrations.* Apparatus and Demonstration Notes. Pages 1231.-1233. Am. J. Phys., Vol. 70, No. 12, December 2002.
- [8] **A. Bétrancourt, A. Krauze.** *SPACETRIPS design of the thermoacoustic system.* Proceedings of the International Conference „HEKYOM 2013”. May 14th, 2013 Orsay, France.
- [9] **Wikipedia, the free encyclopedia interneta vietne.** *Heat exchanger.* URL http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_exchanger

Bakalaura darbs “Termoakustiskais MHD ģenerators” izstrādāts LU Fizikas un matemātikas fakultātē.

Ar savu parakstu apliecinu, ka pētījums veikts patstāvīgi, izmantojot tikai tajā norādītie informācijas avoti un iesniegtā darba elektroniskā kopija atbilst izdrukai.

Autore: Līga Magone _____

/paraksts/

Rekomendēju darbu aizstāvēšanai

Vadītājs: Dr. Phys. Agris Gailītis _____

/paraksts/

Recenzents: Dr. Phys. Sandris Lācis _____

/paraksts/

Darbs iesniegts Fizikas nodaļā.

Izglītības metodiķe Dzintra Holsta _____ . ____ . ____ . 2014.

/paraksts/

Darbs aizstāvēts bakalaura gala pārbaudījuma komisijas sēdē

____ . ____ . 2014. protokols Nr. _____, vērtējums _____

Komisijas sekretārs(-e): _____

/vārds , uzvārds/

/paraksts/