

KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS
JŪRŲ TECHNIKOS FAKULTETAS
ELEKTROTECHNIKOS KATEDRA

TVIRTINU.....

Katedros vedėja: prof. dr. E. Guseinoviėnė

2014-.....-.....

ELEKTRONIKOS IR ELEKTROS INŽINERIJOS MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ
PROGRAMOS „PRAMONĖS ELEKTROS ĮRANGA IR AUTOMATIKA“

(Studijų kodas 612H60002)

BAIGIAMASIS DARBAS

**TIESIAEIGIO ŠVYTUOJAMOJO
SINCHRONINIO ŽADINAMOJO ELEKTROS
VARIKLIO KONSTRUKCIJOS PARAMETRŲ
ĮTAKA VARIKLIO RODIKLIAMS**

Recenzentas: prof. dr. Eleonora Guseinoviėnė

2014-.....-.....

Vadovas: dr. Audrius Senulis

2014-.....-.....

Recenzentas: lekt. dr. Valdas Jankūnas

2014-.....-.....

Rengė: TMPE – 12 Justinas Gerbenis

2014-.....-.....

KLAIPĖDA, 2014

BAKALAURO IR MAGISTRO BAIGIAMŲJŲ DARBŲ LYDRAŠČIO FORMA

Pildo bakalauro/magistro baigiamojo darbo autorius

.....
(bakalauro/magistro baigiamojo darbo autoriaus vardas, pavardė)

.....
(bakalauro/magistro baigiamojo darbo pavadinimas lietuvių kalba)

Patvirtinu, kad bakalauro/magistro baigiamasis darbas parašytas savarankiškai, nepažeidžiant kitiems asmenims priklausančių autorių teisių, visas baigiamasis bakalauro/magistro darbas ar jo dalis nebuvo panaudotas Klaipėdos universitete ir kitose aukštosiose mokyklose.

.....
(bakalauro/ magistro baigiamojo darbo autoriaus ir parašas)

Sutinku, kad bakalauro/magistro baigiamasis darbas būtų naudojamas neatlygintinai 5 m. Klaipėdos universiteto studijų procese.

.....
(bakalauro/ magistro baigiamojo darbo autoriaus ir parašas)

Pildo bakalauro/magistro baigiamojo darbo vadovas

Bakalauro/magistro baigiamąjį darbą ginti.....

(įrašyti – leidžiu arba neleidžiu)

.....
(data)

.....
(bakalauro/magistro baigiamojo darbo vadovo vardas, pavardė ir parašas)

Pildo katedros, kuriojančios studijų programą, administratorius (sekretorius)

Baigimasis darbas įregistruotas katedroje

(data)

.....
(katedros sekretorės vardas, pavardė ir parašas)

Pildo katedros, kuriojančios studijų programą, vedėjas

Bakalauro/magistro baigiamąjį darbą ginti.....

(įrašyti – leidžiu arba neleidžiu)

.....
(data)

.....
(katedros vedėjos vardas, pavardė ir parašas)

Recenzentu(-ais) skiriu.....

.....
(įrašyti recenzento(ų) vardą, pavardę)

.....
(data)

.....
(katedros vedėjos vardas, pavardė ir parašas)

SANTRAUKA LIETUVIŲ KALBA

Gerbenis J. Tiesiaeigio švytuojamojo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametų įtaka variklio rodikliams. Pramonės elektros įrangos ir automatikos programos magistro baigiamasis darbas.

Dažnai įvairiems tiesiaeigiems švytuojamojo judesio mechanizmams varyti naudojamos tradicinės sukiosios elektros mašinos. Ištobulintos konstrukcijos ir perdavų mechanizmai, geri energetiniai rodikliai ir išvystytos valdymo sistemos lemia platų šių elektros mašinų panaudojimą pramonėje ir buityje. Tačiau tiesiaeigiems švytuojamojo judesio mechanizmams varyti ekonomiškai naudoti specialiuosius – švytuojamojo judesio elektros variklius. Švytuojamosios elektros mašinos vis dažniau naudojamos stūmoklinių kompresorių, įvairių skysčių pompų, pjūklų, elektrinių vožtuvų ir kt. mechanizmų pavarose, dėl geresnio galios ir masės santykio, nenaudotino reduktoriaus, geresnių pavaros energetinių parametų, lyginant su įprastinėmis elektros mašinomis. Šiuo metu plačiausiai nagrinėjamos, ypač užsienio mokslininkų, yra žadinamosios švytuojamosios sinchroninės elektros mašinos, žadinimui naudojant NdFeB magnetus. Šios elektros mašinos, lyginant su nežadinamosiomis, pasižymi mažesniais matmenimis, aukštesniu naudingumo ir galios koeficientu, tačiau yra brangesnės dėl nuolatinių magnetų panaudojimo. Aktualu ištirti tiesiaeigio švytuojamojo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametų įtaką variklio rodikliams. Parenkant įvairias magnetines medžiagas, keičiant oro tarpą nustatyti, kaip keičiasi variklio rodikliai.

Darbe nagrinėtas tiesiaeigis švytuojamojo judesio sinchroninis žadinamasis elektros variklis. Išorinis magnetolaidis yra „C-core“ tipo, kuriame patalpinta vienfazė kintamos srovės apvija. Geresnės konstrukcijos sukūrimui judžiojoje dalyje panaudotas nuolatinių magnetų išdėstymas pagal Halbacho schemą. Modeliavimas atliktas baigtinių elementų metodu dviem etapais. Pirmame etape buvo keičiamos magnetolaidžio ir magnetų medžiagos. Baigtinių elementų metodu apskaičiuota, kad didžiausia elektromagnetinė jėga gaunama, kai statorius pagamintas iš suslėgtų geležies miltelių „powdered iron“, o Halbacho schema sudaryta iš neodiminių nuolatinių magnetų (NdFeB32). Antrajame etape keičiamas oro tarpas. Atlikus skaičiavimus baigtinių elementų metodu nustatyta, kad variklio sukuriama elektromagnetinė jėga didėja mažėjant oro tarpui.

Pagrindiniai žodžiai: tiesiaeigės švytuojamosios elektros mašinos, sinchroninės švytuojamosios elektros mašinos, švytuojamosios elektros mašinos su nuolatinių magnetais, baigtinių elementų metodas, magnetinės medžiagos, magnetai.

SANTRAUKA ANGLŲ KALBA

Gerbenis J. Influence of Design Parameters of Linear Oscillating Synchronous Excited Electrical Motor to Motor Indicators. Final master thesis of program of Industrial Electrical Equipment and Automatics.

Frequently the traditional rotating electrical machines are used to drive various linear oscillating mechanisms. The well developed design and gear mechanisms, good energy factors and well developed control system has influenced the wide popularity and usage of such rotating machines in industry and home appliance. But the usage of oscillating electrical motors is more effective for driving the linear oscillating mechanisms. The oscillating electrical machines are more frequently used in piston compressors, pumps of various fluids, saws, electrical valves and other mechanisms. This increase of use is caused by better power/mass ratio, gearless drive possibility, better total efficiency of the drive comparing with the traditional electrical machines. Nowadays the most investigated areas especially by foreign scientists are analysis and design of excited oscillating synchronous electrical machines with NdFeB magnet excitation system. The excited machines in comparison to non-excited ones has smaller dimensions, higher efficiency and power factor, but are more expensive due to the usage of magnets. It is relevant to investigate the influence of design parameters of linear oscillating synchronous excited electrical motor to motor indicators. There was an investigation based on variation of magnetic materials and analyzing the influence of the changes to motor indicators.

In this final master thesis the linear oscillating synchronous excited electric motor was investigated. The outer magnetic core of the motor is "C-core" type with the single phase AC winding. For better design of the motor the magnets distributed by Halbach array were used in moving part of the motor. The modeling of the motors magnetic circuit was done by using the finite element method in two stages. In the first stage the magnetic material of the core and magnets were changed. In the second stage the air gap was varied. During the modeling the change of the motor parameters (indicators) was established.

Main keywords: linear oscillating electrical machines, synchronous oscillating electrical machines, oscillating electrical machines with magnets, finite element method, magnetic materials, magnets.

KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS
JŪRŲ TECHNIKOS FAKULTETAS
ELEKTROTECHNIKOS KATEDRA

TVIRTINU.....

2014.....

Katedros vedėja prof. dr. E. Guseinovicė

MAGISTRANTO BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS

Studentui **Justinui Gerbeniui, TMPE-12.**

Darbo tema: Tiesiaeigio švytuojamojo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametrų įtaka variklio rodikliams.

Užbaigto darbo atidavimo terminas: 2014 m. gegužės mėn.d.

Duomenys: dažnis – 50 Hz, našumas – 100 l/min; suspaudimo slėgis – iki 6 atm; variklis žadinamas nuolatiniais magnetais; variklio-kompresoriaus konstrukcija – stūmoklinis dvipusis, dvimasis, bespyruoklis, pulsuojamosios srovės, darbo padėtis – horizontali, optimalus darbo režimas – mechaninis rezonansas.

Turinys:

1. Darbo tikslas
Tiesiaeigio švytuojamojo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametrų įtakos nustatymas variklio rodikliams.
2. Tyrimo metodai: Mokslinių šaltinių analizė, analitiniai skaičiavimai, modeliavimas.
3. Uždaviniai:
 - Atlikti mechanizmo, technologinio proceso ir konstrukcijų apžvalgą;
 - Nustatyti konstrukcijos parametrų įtaką variklio rodikliams;
 - Atlikti konstrukcijos modeliavimą ir sudaryti mechanines jėgas, magnetinės ir elektrinės grandinės parametrų charakteristikas;
 - Pateikti rekomendacijas konstrukcijos patobulinimo galimybėms.
4. Išvados
5. Literatūra
6. Priedai

Užduoties gavimo data: 2014-02-05

Vadovas: lekt. dr. Audrius Senulis

(vardas, pavardė, parašas)

Užduotį gavau: Justinas Gerbenis.....

(vardas, pavardė, parašas)

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1	Pagrindiniai švytuojamųjų mašinų tipai	7
1.2	Nikelio lydinius charakterizuojančios magnetinės ir fizikinės savybės	16
1.3	Presuotų geležies miltelių lydinius charakterizuojančios magnetinės ir fizikinės savybės	19
1.4	Samario–kobalto magnetus charakterizuojančios magnetinės savybės	22
1.5	Samario–kobalto magnetus charakterizuojančios fizikinės savybės	24
1.6	Neodiminius aglomeruotus magnetus charakterizuojančios magnetinės savybės	25
1.7	Neodiminius aglomeruotus magnetus charakterizuojančios fizikinės savybės	26
1.8	Neodiminius surištuosius magnetus charakterizuojančios magnetinės savybės	27
1.9	Neodiminius surištuosius magnetus charakterizuojančios fizikinės savybės	27
2.1	Mechaninės įrenginio sistemos parametrų skaičiavimo rezultatai	39
2.2	Variklio parametrų vertės	41

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav.	A. Čertoko tiesiaieigė elektrinė mašina	8
1.2 pav.	Tiesiaieigė švytuojanti pavara su nuolatiniais magnetais	9
1.3 pav.	Švytuojamojo sudėtingo judesio variklio konstrukcijos eskizas	10
1.4 pav.	Švytuojamojo sudėtingo judesio variklio skersinis pjūvis judžiajai daliai esant kairiojoje (a) arba dešiniojoje (b) padėtyje	11
1.5 pav.	Švytuojamojo tiesiaieigio judesio elektros variklio kompresoriaus konstrukcijos eskizas	12
1.6 pav.	Mažos eigos, vienfazio variklio su nuolatiniais magnetais konstrukcinė schema	13
1.7 pav.	Švytuojamojo tiesiaieigio judesio elektros variklio kompresoriaus konstrukcijos eskizas	14
1.8 pav.	Principinė švytuojamojo tiesiaieigio judesio elektros variklio schema	14
1.9 pav.	Histerizės kilpa: a) silikono: 97 % Fe ir 3% Si, b) supermendur: 49% Fe, 49% Co ir 2%	17
1.10 pav.	Histerizės kilpa: a) supermalloy: 78 % Ni, 17% Fe ir 5% Mo, b) permaloy 80: 17% Fe, 79% Ni ir 4% Mo	18
1.11 pav.	Histerizės kilpa: a) molypermalloy MPP b) didelio magnetinio srauto miltelių šerdis	20
1.12 pav.	Histerizės kilpa: a) sendust b) geležies milteliai	20
1.13 pav.	Samario–kobalto (Sm–Co) magnetai	22
1.14 pav.	Neodiminiai agluomeruoti (Nd-Fe-B) magnetai	25
1.15 pav.	Neodiminiai surištieji (Nd–Fe–B) magnetai	26
1.16 pav.	a) Halbacho schema, kai N=8; b) Halbacho schema ištirta baigtinių elementų metodu	29
1.17 pav.	a) Halbacho schema ištirta baigtinių elementų metodu, kai N=4; b) Halbacho schemas stipriosios ir silpnosios pusės magnetinis laukas	29
1.18 pav.	SMC medžiagos schematinis vaizdavimas	30
1.19 pav.	SMC palyginimas su tradicinėmis medžiagomis	31

1.20 pav.	Trijų dimensijų srauto pernešimo galimybė pavaizduota paprastai geometriškai, ir sudėtingesne struktūra	31
1.21 pav.	Miltelių metalurgijos procesas	32
1.22 pav.	BDC variklio: a) statoriaus magnetolaidis iš SMC medžiagos, b) statorius su apvijomis	32
1.23 pav.	Palyginamas seno ir naujo dizaino elektros variklis naudojamas alyvos pompos pavaroje	33
1.24 pav.	Twinbird įmonės gaminama Stirlingo šiluminė mašina	33
1.25 pav.	Twinbird įmonės gaminama Stirlingo šiluminė mašina: a) Stirlingo šiluminė mašina b) principinė švytuojamojo tiesiaieigio judesio elektros variklio schema	34
1.26 pav.	Švytuojamasis tiesiaieigio judesio elektros variklis: a) surinktas iš elektrotechninio plieno lakštų (1300 detalių), b) SMC medžiagos (5 detalės)	34
2.1 pav.	Mechaninės sistemos parametrų skaičiavimo algoritmas	36
2.2 pav.	Variklio konstrukcija ir parametrai	39
2.3 pav.	Variklio brėžinys: a) magnetolaidžio brėžinys su matmenimis, b) judžiosios dalies brėžinys su matmenimis	40
2.4 pav.	Elektros variklio – kompresoriaus pjūvis	41
2.5 pav.	Tiesiaieigio švytuojamojo judesio elektros variklio: a) konstrukcija ir parametrai, b) oro tarpo ekvivalentinė magnetinė grandinė	42
2.6 pav.	Variklio oro tarpo ekvivalentinė magnetinė grandinė	43
2.7 pav.	Modeliavimo rezultatai: a) FEMM ašinis modelis su integravimo linija oro tarpe, b) FEMM ašinis modelis su magnetinio lauko linijomis, c) Magnetinio srauto tankio B stipris skirtingose magnetinės grandinės dalyse	45
2.8 pav.	Magnetinio srauto pasiskirstymas oro tarpe	46
2.9 pav.	Magnetinės indukcijos pasiskirstymas oro tarpe	46
2.10 pav.	Magnetinio lauko stiprio pasiskirstymas oro tarpe	47
2.11 pav.	Elektros variklio magnetinė grandinė	47

2.11 pav.	Elektros variklio magnetinė grandinė	47
2.12 pav.	Ekvivalentinė elektrinė grandinė	48
2.12 pav.	Tiesiaeigio švytuojamąjį judesio elektros variklio–kompresoriaus ekvivalentinė elektrinė grandinė	48
3.1 pav.	FEMM ašinis modelis su: a) parinktomis medžiagomis, b) tinkleliu; c) integravimo linija oro tarpe ir magnetinio lauko linijomis	49
3.2 pav.	65 permalloy įmagnetinimo kreivė (a), powdered iron įmagnetinimo kreivė (b)	50
3.3 pav.	Magnetinio lauko linijų pasiskirstymas judžioje dalyje ir statoriaus magnetolaidyje esant judžiai dalei centrinėje ir kraštinėse padėtyse	51
3.4 pav.	Surištojo magnetinio lauko srauto priklausomybė nuo poslinkio ir medžiagų tipo	52
3.5 pav.	Induktyvumo priklausomybė nuo poslinkio ir medžiagų tipo	52
3.6 pav.	Elektromagnetinės jėgos priklausomybė nuo poslinkio ir medžiagų tipo	53
3.7 pav.	Magnetinės indukcijos pasiskirstymas oro tarpe	54
3.8 pav.	Magnetinio lauko stiprio pasiskirstymas oro tarpe	54
3.9 pav.	FEMM skaičiavimo rezultatai prie skirtingų oro tarpų	55
3.10 pav.	Surištojo magnetinio lauko srauto priklausomybė nuo oro tarp	56
3.11 pav.	Induktyvumo priklausomybė nuo oro tarpo	56
3.12 pav.	Elektromagnetinės jėgos priklausomybė nuo oro tarpo o	57
3.13 pav.	FEMM ašinis modelis su integravimo linija oro tarpe ir magnetinio lauko linijomis judžiai daliai esant centrinėje ir kraštinėse padėtyse	58
3.14 pav.	Magnetinės indukcijos pasiskirstymas oro tarpe, kai oro tarpas yra 2 mm	58
3.15 pav.	Magnetinio lauko stiprio pasiskirstymas oro tarpe, kai oro tarpas yra 2 mm	68
3.16 pav.	Maksimali indukcijos vertė prie skirtingų oro tarpų	59
3.17 pav.	Vidutinė indukcijos vertė prie skirtingų oro tarpų	59
3.18 pav.	Efektinė indukcijos vertė prie skirtingų oro tarpų	60
3.19 pav.	Maksimali magnetinio lauko stiprio vertė prie skirtingų oro tarpų	60

3.20 pav.	Vidutinė magnetinio lauko stiprio vertė prie skirtingų oro tarpų	60
3.21 pav.	Efektinė magnetinio lauko stiprio vertė prie skirtingų oro tarpų	61

TURINYS

ĮVADAS	3
1. ŠVYTUOJAMŪJŲ ELEKTROS PAVARŲ TYRIMAI IR KONSTRUKCIJOS	6
1.1. Švytuojamųjų sinchroninių elektros variklių su nuolatiniais magnetais apžvalga.....	8
1.2. Medžiagų apžvalga.....	15
1.2.1 Magnetolaidžio medžiagos.....	15
1.2.2 Magnetai ir jų savybės.....	21
1.3. Halbacho schema.....	28
1.4. Minkštamagnetinės kompozitinės medžiagos (SMC).....	30
2. MATEMATINIS APRAŠYMAS	35
2.1. Variklio konstrukcinių parametrų parinkimas.....	36
2.2. Variklio konstrukcija ir parametrai.....	39
2.3. Ekvivalentinės magnetinės ir elektrinės grandinės sudarymas.....	42
3. MAGNETINĖS IR ELEKTRINĖS GRANDINĖS MODELIAVIMO REZULTATŲ ANALIZĖ	49
3.1. Pirmasis modeliavimo etapas.....	50
3.2. Antrasis modeliavimo etapas.....	55
IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS	62
LITERATŪRA	65
PRIEDAI	74

IVADAS

Elektros mašinų raidoje buvo kuriamos įvairių konstrukcijų mašinos. Tarp pirmųjų elektros mašinų prototipų galime rasti daug švytuojamųjų mašinų, tačiau jos nepaplito ir nebuvo tyrinėjamos nuosekliai. Šiuo metu pasaulyje vyrauja dvi pagrindinės elektros mašinų kūrimo, projektavimo ir gamybos kryptys:

1) Tradicinės sukiosios elektros mašinos. Dažnai įvairiems tiesiaeigiems švytuojamojo judesio mechanizmams varyti naudojamos tradicinės sukiosios elektros mašinos. Išstobulintos konstrukcijos ir perdavų mechanizmai, geri energetiniai rodikliai ir išvystytos valdymo sistemos lemia platų šių elektros mašinų panaudojimą pramonėje ir buityje [74].

2) Specialiosios elektros mašinos. Specialiosios elektros mašinos dažniausiai yra projektuojamos ir gaminamos kaip integruotas įtaisas kartu su varomu mechanizmu. Taigi, jos yra skirtos konkrečiam varomam įrenginiui. Švytuojamosios elektros mašinos yra viena specialiųjų elektros mašinų rūšis, pasižyminti mechaninio judesio ypatybėmis – judesio periodiškumu, t.y. mašinos judžiosios dalies švytavimu. Nors tokios švytuojamosios elektros mašinos atsirado pačioje elektromechanikos vystymosi pradžioje, tačiau šiandien jos yra beveik nepastebimos gausioje specialiųjų elektros mašinų įvairovėje [89].

Švytuojamieji varikliai, paprastai, naudotini tais atvejais, kai varomo įrenginio elementas taip pat švytuoja. Todėl švytuojamojo variklio pavara gali būti vadinama trumpiau - švytuojamąja pavara. Šie varikliai plačiai pritaikomi:

- stūmokliniuose kompresoriuose [1, 12, 26, 27, 30, 31, 49, 50, 52, 65, 83, 84, 89, 91, 93, 96, 98], tai vienas žinomiausių šių įtaisų pritaikymo pavyzdžių. Švytuojamo variklio varomo stūmoklinio kompresoriaus kūrimas domino daugumą švytuojamųjų variklių tyrinėtojų, tai nustatyta remiantis mokslinės literatūros gausa šia tematika tiek Lietuvos, tiek ir užsienio mokslininkų publikacijose. Dažniausia yra nagrinėjami vienpusiai kompresoriai, kurių stūmoklio poslinkis stabilizuojamas panaudojant įvairaus tipo spyruokles, kurios yra papildoma nenaudinga reaktyvioji apkrova ir gedimo šaltinis. Retesniu atveju yra nagrinėjami dvipusiai kompresoriai.

- dirbtinėse širdyse [20, 21]
- elektrinių vožtuvų pavarose ir automobilio amortizatoriuose [63, 85]
- smūginiams gręžimo įrenginiams [87, 99]
- bendrose sistemose su Stirlingo šilumine mašina [24, 46] – tai dažniausiai šaldymo sistemos arba sistemos, kuriuos atlieka darbą varydamos švytuojamojo judesio generatorių [74]
- tiesiaeigio arba tiesiaeigio švytuojamojo judesio vykdikliuose [3, 14, 15, 32 – 36, 41, 44, 45, 51, 53, 57, 60, 61, 67, 70, 71, 73, 86, 97]

Tiesiaeigio švytuojamojo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametrų įtaka variklio rodikliams

- vibro įrenginiuose [49], tai vibro konvejeriai, sietai, separatoriai, varginimo įrenginiai
- įvairių skysčių pompų, elektrinio plaktuko, siaurapjūklis, barzdaskutės, elektrinės plaukų kirpimo mašinėlės pavarose [49] ir kt.

Švytuojamosios elektros mašinos skirstomos į sinchronines ir asinchronines. Preliminariai galima konstatuoti, kad plačiausiai yra naudojamos švytuojamosios sinchroninės mašinos, t.y. tokios mašinos, kurių judžiosios dalies švytavimo dažnis yra susijęs su mašinos elektros grandinių įtampų dažniu[49].

Temos aktualumas

Dažnai tiesiaeigiams švytuojamojo judesio mechanizmams panaudojami tradiciniai elektros varikliai, tačiau projektuojant tiesiaeigius švytuojamojo judesio mechanizmus tikslinga naudoti švytuojamųjų mašinų elektros variklius. Tuomet mechanizmo judžioji dalis yra sutapdinama su švytuojamojo elektros variklio judžiąją dalimi. Taip išvengiama judesio keitiklio, kartu sumažinant įrenginio tūrį, masę, energijos nuostolius. Taigi, taikomas tiesioginės pavaros principas. Darbe tiriamas tiesiaeigis švytuojamojo judesio sinchroninis žadinamasis elektros variklis, kuris gali būti naudojamas dvipusio bespyruoklio stūmoklinio kompresoriaus pavaroje arba įvairių skysčių (vanduo, kuras, tepalai) pompų pavarose. Aktualu ištirti tiesiaeigio švytuojamojo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametrų įtaką variklio rodikliams. Parenkant įvairias magnetines medžiagas, keičiant oro tarpą nustatyti, kaip keičiasi variklio rodikliai.

Tiesiaeigio švytuojamojo judesio sinchroninio žadinamojo elektros variklio pagrindinės problemos:

- Variklio ir apkrovos parametrų derinimas – pagrindinė švytuojamosios pavaros problema. Čia omenyje turimas mechaninės sistemos (įskaitant tiek apkrovos, tiek paties variklio mechaninius parametrus) ir švytuojamojo variklio elektromagnetinės sistemos suderinamumas. Uždavinių komplikuoja abiejų sistemų netiesiškumas.

- Kita svarbi bendroji švytuojamosios pavaros problema – pavaros valdymas. Švytuojamojo variklio naudojimo pavaroje tikslas – viso įrenginio supaprastinimas tiesioginės pavaros principu (be mechaninio judesio keitiklio). Be to, pavara gali būti supaprastinama taikant paprasčiausią švytuojamojo variklio maitinimo elektros energija schemą, t. y. švytuojamąjį sinchroninį variklį tiesiogiai jungiant prie kintamosios įtampos. Be abejo, tokia maitinimo schema riboja pavaros valdymo galimybes, nes nenumatomas dažninis valdymas. Švytavimo dažnis griežtai siejamas su maitinimo įtampos dažniu ir gali būti taikomi tik švytavimo amplitudės valdymo būdai.

Pažymėtina, kad pirmiausia reikia išsiaiškinti, ar švytuojamasis variklis gali tinkamai veikti nevaldomoje švytuojamojoje pavaroje, ar būtinas tam tikras valdymas. Žinoma, ne visada

TMPE – 12, Justinas Gerbenis

Tiesiaeigio švytuojamojo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametų įtaka variklio rodikliams įmanoma, kad pavara būtų nevaldoma (išskyrus variklio įjungimą ir išjungimą), ypač jei apkrovos sąlygos keičiasi. Tai yra, variklio ir apkrovos parametrai ne visada gali būti suderinti visoje besikeičiančios apkrovos srityje. Būtina atkreipti dėmesį, kad bet koks valdymas negali padidinti paties variklio naudingumo koeficiento, jeigu jis žemas, net kai apkrova yra optimali [49].

- Švytuojamojo variklio optimizavimas.
- Švytavimų centro stabilizavimas.

Darbo objektas: tiesiaeigio švytuojamojo judesio sinchroninis žadinamasis elektros variklis.

Darbo tikslas: Tiesiaeigio švytuojamojo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametų įtakos nustatymas variklio rodikliams.

Uždaviniai:

1. Atlikti mechanizmo, technologinio proceso ir konstrukcijų apžvalgą;
2. Nustatyti konstrukcijos parametų įtaką variklio rodikliams;
3. Atlikti konstrukcijos modeliavimą ir sudaryti mechanines jėgas, magnetinės ir elektrinės grandinės parametų charakteristikas;
4. Pateikti rekomendacijas konstrukcijos patobulinimo galimybėms.

Baigiamajame darbe tikslo ir uždavinių bus siekiama taip:

1. Išanalizavus įvairius informacijos šaltinius ir pasirinkus tinkamiausius;
2. Pasirinkus techniškai pagrįstą konstrukciją;
3. Pasirinkus geriausių charakteristikų medžiagas;
4. Naudojantis virtualiais modeliavimo programiniais paketais.

Tyrimo metodai: Mokslinių šaltinių analizė, analitiniai skaičiavimai, modeliavimas.

Darbe nagrinėjamas tiesiaeigis švytuojamojo judesio sinchroninis žadinamasis (nuolatiniais magnetais) elektros variklis. Išorinis magnetolaidis yra „C-core“ tipo, kuriame patalpinta vienfazė kintamos srovės apvija. Optimalios konstrukcijos sukūrimui judžiojoje dalyje panaudojamas nuolatinių magnetų išdėstymas pagal Halbacho schemą.

Modeliavimas baigtinių elementų metodu buvo atliktas dviem etapais. Pirmame etape buvo keičiamos magnetolaidžio ir magnetų medžiagos. Išanalizavus gautus rezultatus pasirinktas medžiagų derinys, su kuriuo gauta didžiausia elektromagnetinė jėga ir atliekamas antras modeliavimo etapas. Atliekant antrojo etapo modeliavimą buvo keičiamas oro tarpas ir stebima kaip keičiasi variklio rodikliai.

1. ŠVYTUOJAMŲJŲ ELEKTROS PAVARŲ TYRIMAI IR KONSTRUKCIJOS

Skirstant švytuojamąsias elektros mašinas į sinchronines ir asinchronines, dažniausiai beprasmiška kalbėti apie magnetinio lauko judėjimo greitį. Apie švytuojamosios mašinos sinchronizmą ar asinchronizmą galime spręsti pagal tai, kaip judžiosios dalies švytavimo dažnis yra susijęs su elektros grandinių įtampų dažniais.

Jeigu švytavimo dažnis yra griežtai susijęs (lygus ar kartotinis) su apvijų įtampos dažniais (ar dažnių skirtumu), tai turime švytuojamąją sinchroninę mašiną. Jeigu švytavimo dažnis nėra griežtai susijęs su apvijų įtampos dažniais (pavyzdžiui, priklauso nuo apkrovos), turime švytuojamąją asinchroninę mašiną [49].

Švytuojamąją asinchroninę mašiną gauname tuomet, kai viena iš dviejų magnetovarų yra pasyvi, t. y. kai šią magnetovara sukurianti apvija yra uždara ir joje nėra išorinių elektrovaros šaltinių. Šios apvijos srovę (kartu ir magnetovara) sukuria tiktai pačioje apvijoje indukuota elektrovara. Be to, tarpusavio magnetinis laidis turi priklausyti nuo judžiosios dalies koordinatės. Šiomis sąlygomis pasyvioje apvijoje indukuojama elektrovara, kurios dažnis priklauso nuo elektros srovės pirmoje apvijoje dažnio, taip pat nuo judžiosios dalies švytavimo dažnio, taigi, nėra griežtai susietas su pirmosios apvijos įtampos dažniu. Kintamasis tarpusavio magnetinis laidis (magnetomechaninis keitiklis) gali sukurti švytavimo dažnio kintamąją jėgą ir taip gali būti išvystoma mechaninė galia. Taigi, galime gauti asinchroninę mašinos veiką švytavimo dažniui priklausant nuo konkrečių apkrovos sąlygų [49].

Lietuvoje švytuojamųjų asinchroninių mašinų ir jų sistemų tyrimus vykdo Vilniaus Gedimino technikos universiteto (VGTU) mokslininkai – prof. A. J. Poška, prof. A. Smilgevičius, prof. R. Rinkevičienė, doc. E. Matkevičius, B. Karaliūnas ir kiti. Vilniaus Gedimino technikos universiteto mokslininkai atliko įrenginių magnetinių grandinių, elektromagnetinės jėgos skaičiavimus, pateikė valdymo būdus, plačiai išnagrinėjo tiesiaieigių asinchroninių variklių ir jų sistemų modeliavimą [41 – 44, 57, 59, 60, 66 – 71, 73, 78].

Visos vienos magnetovaros švytuojamosios elektros mašinos gali būti tik sinchroninės. Be to, magnetovara turi būti periodiškai kintanti. Ji gali būti suformuojama apvijoje, prijungtoje prie kintamosios įtampos tinklo arba keitiklio, sukuriiančio dvipusius įtampos impulsus. Tuo atveju gauname švytuojamąją sinchroninę reaktyviają elektros mašiną. Taikomas ir kitas būdas periodinei magnetovarai formuoti – apvija maitinama kintamąja įtampa per nevaldomą ar valdomą diodą, sukuriant vienkrypčius srovės impulsus. Kadangi tokios mašinos neturėjo bendro pavadinimo, tai švytuojamųjų mašinų tyrimo pradžioje jos buvo pavadintos pulsuojamąsios srovės mašinomis [49].

Nežadinamųjų elektros mašinų tyrimai retai aptinkami užsienio mokslininkų darbuose. Šių mašinų tyrimai yra plačiau atspindėti Lietuvos mokslininkų darbuose [6 – 9, 26, 38 – 40, 49, 80, 88].

Dviejų magnetovarų švytuojamosios mašinos taip pat yra sinchroninės, kai apvijos prijungtos prie išorinių įtampos šaltinių, taip pat kai viena magnetovara suformuojama nuolatiniais magnetais. Taigi, jei viena magnetovara pastovi (nuolatinės srovės žadinimo apvija ar nuolatinis magnetas), turime paprastą švytuojamosios sinchroninės mašinos atvejį. Jei abi apvijos prijungtos prie skirtingo dažnio įtampų, turime dvipusio maitinimo švytuojamąją sinchroninę mašiną [49].

Apibendrinant švytuojamųjų elektros mašinų tipai surašyti 1.1 lentelėje.

1.1 lentelė Pagrindiniai švytuojamųjų mašinų tipai [49]

Magnetovarų kiekis	Magnetovarų pobūdis		Mašinos tipas
	Pirmoji	Antroji	
Viena	Kintamoji	—	Sinchroninė reaktyvioji
	Pulsuojamoji	—	Sinchroninė pulsuojamosios srovės
Dvi	Kintamoji	Nuolatinė	Sinchroninė žadinamoji
	Kintamoji	Kintamoji (kito dažnio)	Sinchroninė dvipusio maitinimo
	Kintamoji	Kintamoji pasyvioje grandinėje	Asinchroninė

Lietuvoje, Klaipėdos universitete, jau daugiau kaip 50 metų yra vykdomi tyrimai specialiujų elektros mašinų – švytuojamojo judesio elektros mašinų srityje. Buvęs ilgametis Klaipėdos universiteto Elektrotechnikos katedros profesorius S. Kudarauskas yra išleidęs monografiją [49], kurioje autorius išsamiai nagrinėja įvairius klausimus, susijusius su švytuojamojo judesio elektros mašinų teorija, veikimu, panaudojimu. Taip pat kiti esami ir buvę Klaipėdos universiteto Elektrotechnikos katedros mokslininkai – prof. dr. E. Guseinoviėnė [5 – 9, 38 – 40, 88], dr. A. Senulis [74, 75, 77, 78], dr. V. Cirtautas [38, 88], dr. A. Brazaitis [5 – 9], dr. J. Šatas [11], doc. dr. L. Simanyniėnė [6, 80], doc. dr. J. Vaupšas [19], dr. V. Jankūnas [9, 37 – 40], dr. L. Urmonienė [40, 88] ir kt. [4, 9, 19, 72]. KU mokslininkų darbuose plačiai išnagrinėti žadinamieji ir nežadinamieji švytuojamojo judesio elektros varikliai. Švytuojamųjų variklių darbas pjūklo, stūmoklinio kompresoriaus, dažų purkštovo ir kitų mechanizmų pavarose. Darbuose nagrinėti pereinamieji vyskmai, valdymo galimybės, oro tarpo magnetinio lauko analizė, induktyvumų nustatymas

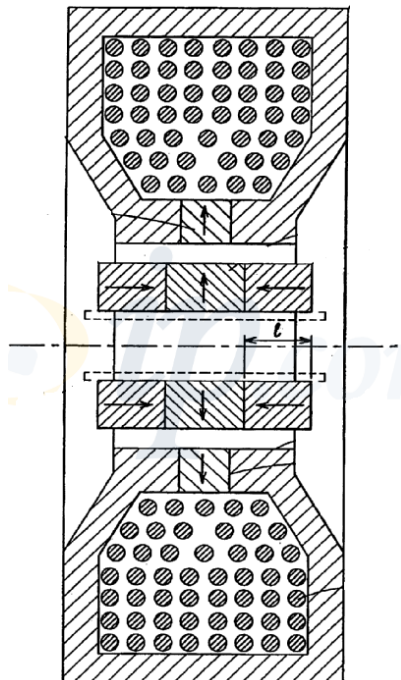
TMPE – 12, Justinas Gerbenis

Tiesiaeigio švytuojamojo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametrų įtaka variklio rodikliams panaudojant ekvivalentinių magnetinių grandinių skaičiavimo metodus, nuostolių skaičiavimas magnetinėje grandinėje [5 – 9, 19, 25, 38 – 40, 48, 49, 80, 88].

Užsienio mokslininkų darbai sutelkti ties švytuojamojo judesio sinchroninių žadinamųjų elektros mašinų tyrimais. Šių švytuojamųjų elektros mašinų populiarumą užsienyje lemia mašinų didesnis naudingumo koeficientas, geresni energetiniai rodikliai, geresnis galios ir masės santykis lyginant su nežadinamosiomis elektros mašinomis. Užsienio mokslininkų darbuose palčiai išnagrinėti matematiniai modeliai, analizuojant įtaisų judžiosios dalies švytavimų poslinkio amplitudės valdymą ir jų konstrukcijos ypatumus [76].

1.1. Švytuojamųjų sinchroninių elektros variklių su nuolatiniais magnetais apžvalga

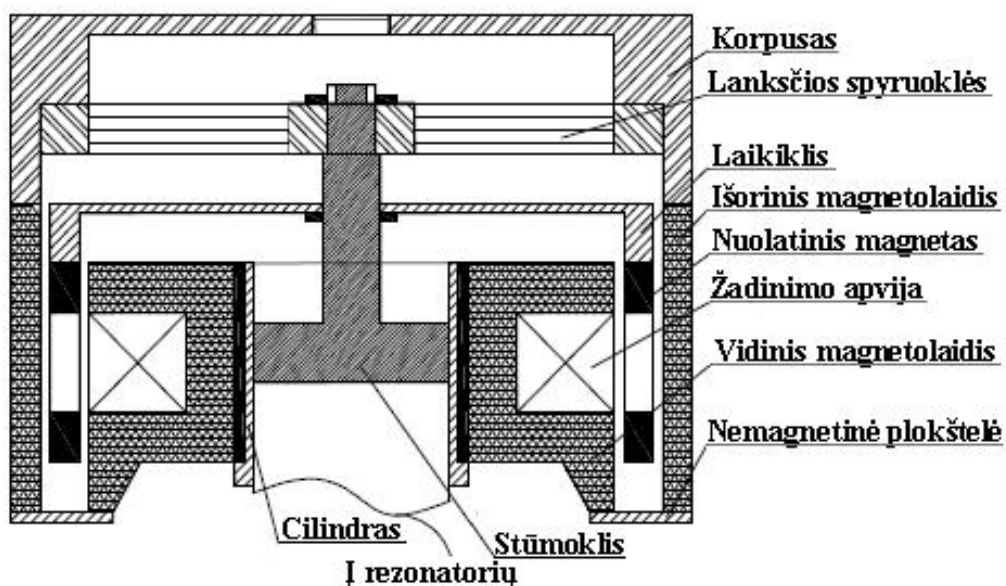
A. Čertokas pristatė tiesiaeigę elektrinę mašiną (1.1 pav.) su trimis žiediniais magnetais judančiais išilgai šerdies. Visi magnetai buvo skirtingai įmagnetinti – dviejų magnetų šiaurinis polius buvo nukreiptas lygiagrečiai ašies, kuria magnetai judėjo. Kitas magnetas turėjo šiaurinį polių nukreipta statmenai ašies. Šis magnetų išdėstymas suteikia koncentruotą magnetinį srautą, kuris padidina sukuriamą jėgą ir tuo pačiu mažina nukrypstančius magnetinius laukus. Tačiau dėl to sudėtingėja gamyba, didėja magnetų tūris. Dėl šių priežasčių pavaros kaina ir masė didėja [16].



1.1 pav. A. Čertoko tiesiaeigė elektrinė mašina [16]

Z. Chunping, G. Fangzhong, Z. Xiaoqing pristatė tiesiaeigę pavarą su nuolatiniais magnetais (1.2 pav.). Judžiosios dalies pakaba sudaryta iš lanksčios spyruoklės. Judančią dalį

Tiesiaieigio švytuojamojo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametrų įtaka variklio rodikliams sudaro du nuolatiniai magnetai ir laikiklis, pritvirtintas prie stūmoklio išilgai judančio tarp vidinio ir išorinio magnetolaidžio. Ritė yra įtvirtinta į „U“ formos magnetolaidį, kuris priklijuotas prie cilindro. Išorinis magnetolaidis yra pavaros korpuso dalis, kuri prijungta prie vidinio magnetolaidžio neįmagnetinta žiedine plienine plokštele. Panaudoti du nuolatiniai magnetai yra tuščiaviduriai žiedo formos, kurių šiaurinis polių nukreiptas statmenai judžiosios dalies judėjimo ašiai. Magnetolaidis sudaro sąlyginai mažas magnetinės varžas magnetiniam srautui [3]. Ritė sukuria kintantį magnetinį lauką, kuris priverčia judžiąją dalį švytuoti ir stūmokliu suslėgti orą tuo pat dažniu. Nuolatiniai magnetai pagaminti iš Nd–Fe–B ir yra sujungti iš kelių dalių. Ši struktūra pagerina magnetinės grandinės charakteristikas ir sumažina apvalios formos sukeliamas mechanines problemas. Lanksčioji spyruoklė turi kelis pranašumus. Pirma – ji yra simetriška lyginant su spiraline spyruokle ir sumažina išcentrinės jėgos įtaką. Antra lanksčioji spyruoklė turi didelį standumą. Trečia ji yra kompaktiška ir paprasta, o tai sumažina matmenis. Stūmoklis ir cilindras gali būti suderinti vienašiai neįmagnetintos plieninės žiedinės plokštelės dėka. Šis metodas efektyviai apsaugo stūmoklį ir cilindrą nuo susidūrimų ir pagerina pavaros darbą. Stūmoklio poslinkio amplitudė yra 5 mm [17].

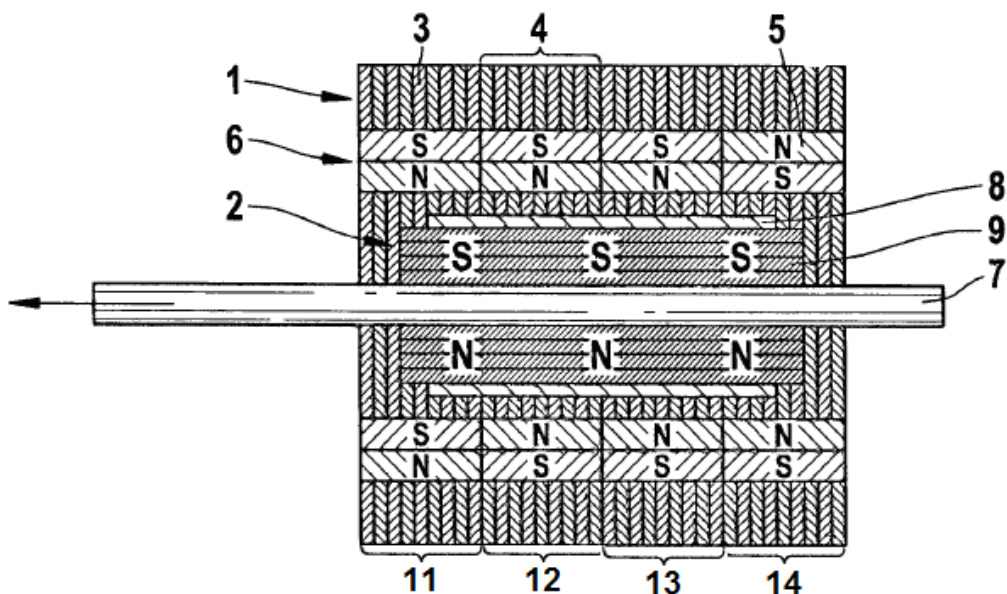


1.2 pav. Tiesiaieigė švytuojanti pavana su nuolatiniais magnetais [17]

Visuose moksliniuose darbuose yra tiriama tik pati variklis, tačiau šių įrenginių kūrimas turi prasidėti nuo mechanizmo. Taigi variklio ir apkrovos parametrų derinimas – pagrindinė švytuojamosios pavaros problema, t.y. mechaninės sistemos (įskaitant tiek apkrovos, tiek paties variklio mechaninius parametrus) ir švytuojamojo variklio elektromagnetinės sistemos suderinamumas. Uždavinį komplikuoja abiejų sistemų netiesiškumas. Taip pat svarbi ir pavaros

Tiesiaieigio švytuojamojo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametrų įtaka variklio rodikliams valdymo problema, nes keičiantis apkrovos parametrams, būtina keisti ir judžiosios dalies dažnį, ypač kai keičiasi apkrovos reaktyvioji apkrovos dedamoji – ekvivalentinis oro spyruoklės standumas [49].

Bernhard Kraus, Hansjorg Reick, Uwe Schober, Alexander Schroter 2005 metais užpatentavo švytuojamąjį sudėtingo judesio elektros variklį (1.3 pav.). Elektros variklis yra vadinamas sudėtingo judesio, kai vienu metu atlieka tiesiaieigį ir sukamąjį judesį.



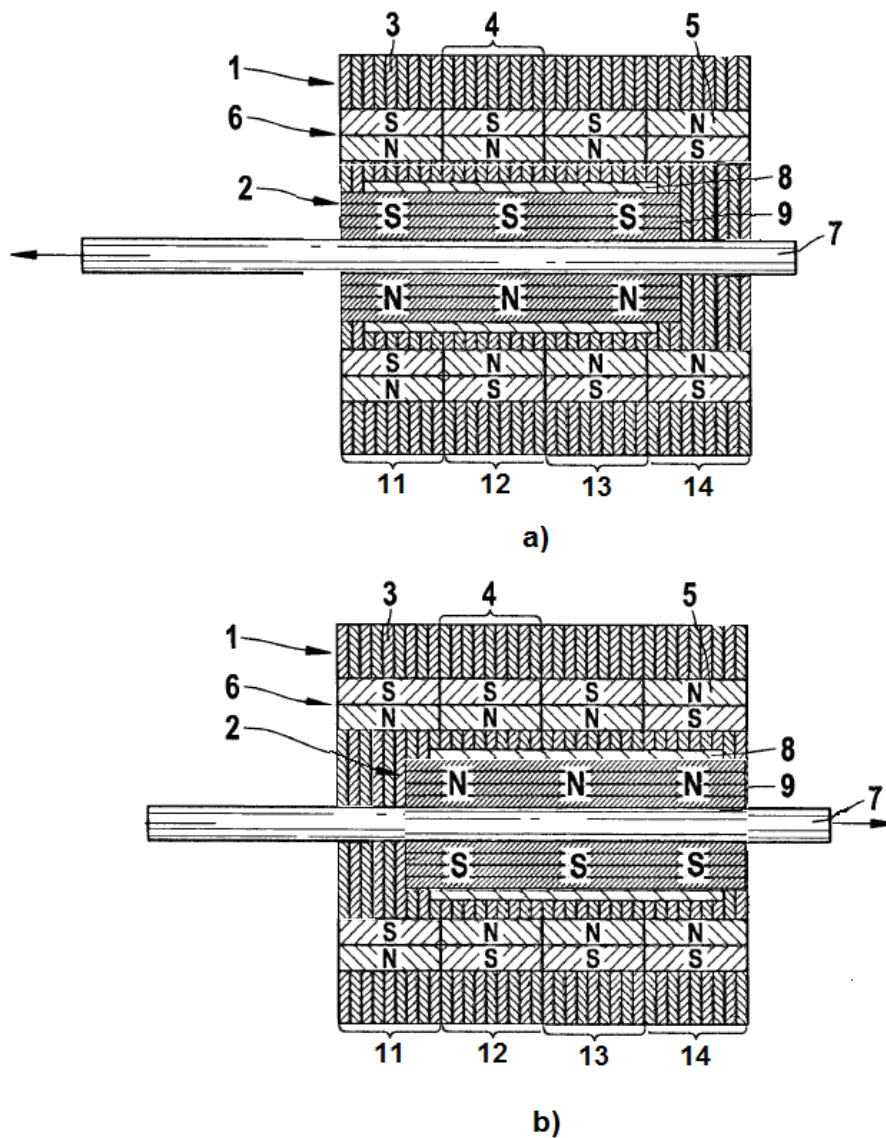
1.3 pav. Švytuojamojo sudėtingo judesio variklio konstrukcijos eskizas [47]

Švytuojamojo sudėtingo judesio variklis pavaizduotas 1 paveiksle. Nagrinėjamas variklis turi statorių (1) ir judžiąją dalį (2). Judžioji dalis (2) statoriaus (1) atžvilgiu atlieka tiesiaieigį ir sukamąjį judesį. Statorius (1) yra sudarytas iš keturių segmentų (4). Segmentai surinkti iš atskirų elektrotechninio plieno lakštų (3). Keturi nuolatiniai magnetai (5) yra tvirtinami segmente (4) ir taip statoriuje (1) yra sudaromos keturios nuolatinių magnetų eilės (6). Nuolatinių magnetų (5) išdėstymo tvarka statoriuje (1) pavaizduota ketvirtame paveiksle. Judžioji dalis (2) turi magnetolaidį (8), kuris yra užmaunamas ant veleno (7). Magnetolaidis surinktas iš atskirų elektrotechninio plieno lakštų. Apvija (9) tvirtinama ant judžiosios dalies magnetolaidžio (8).

Nagrinėjamas elektros variklis yra sudėtingos konstrukcijos. Priklausomai nuo nuolatinių magnetų poliarumo segmentuose galima gauti tiesiaieigį, sukamąjį arba sudėtingą švytuojamąjį judesį. Tokios konstrukcijos elektros variklis turi labai plačias panaudojimo galimybes. Patente nagrinėjamas švytuojamojo sudėtingo judesio elektros variklis yra naudojamas elektriniame dantų šepetėlyje, barzdaskutėje, kai kuriuose smūginuose įrenginiuose.

Tiesiaeigio švytuojamojo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametrų įtaka variklio rodikliams

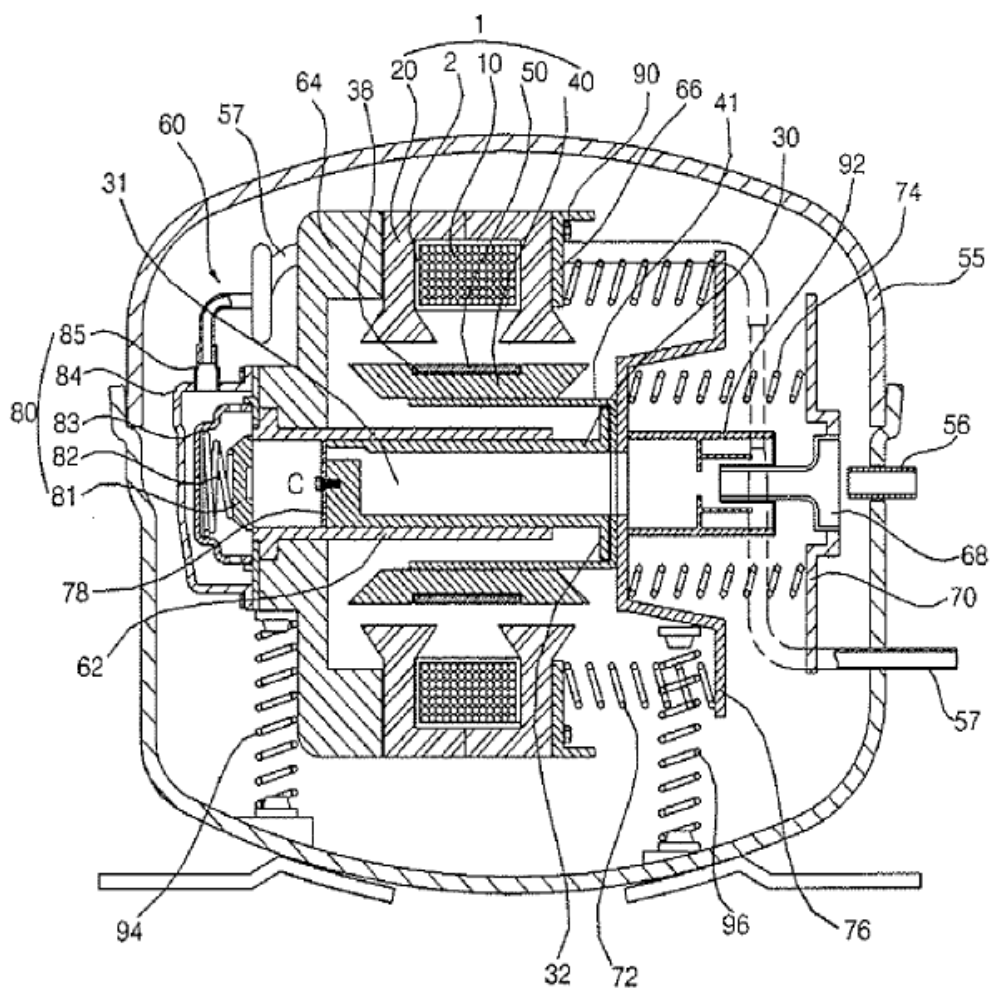
Švytuojamojo sudėtingo judesio elektros variklio judžiojoje dalyje yra naudojami slankiojantis kontaktai, skirti kintamąją elektros srovę perduoti apvijai. Slankiojantys kontaktai sumažina variklio patikimumą. Siekiant padidinti variklio patikimumą, reiktu apviją tvirtinti statoriuje, o segmentus su nuolatiniais magnetais tvirtinti judžiojoje dalyje.



1.4 pav. Švytuojamojo sudėtingo judesio variklio skersinis pjūvis judžiajai daliai esant kairiojoje (a) arba dešiniojoje (b) padėtyje [47]

Kyeong Bae Park, Eon Pyo Hong 2007 metais užpatentavo Švytuojamojo tiesiaeigio judesio elektros variklį-kompresorių 1.5 paveikslas. Nagrinėjamas variklis-kompresorius (60) sujungtas su korpusu (55) amortizacinėmis spyruoklėmis (94, 96). Variklis-kompresorius (60) sudarytas iš judančios ir nejudančios dalies. Nejudančioji ir judančioji dalis tarpusavyje tvirtinamos kompensacinėmis spyruoklėmis (72, 74). Nejudančią dalį sudaro statorius (20), kurio viduje

Tiesiaiegio švytuojamojo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametrų įtaka variklio rodikliams tvirtinama vienfazė apvija (10). Statorius (20) tvirtinamas tarp cilindro bloko (64) ir išorinio dangtelio (66) tvirtinimo varžtais (90). Prie cilindro bloko (64) taip pat tvirtinamas cilindras (62) ir išleidimo vožtuvas (80). Išleidimo vožtuvas (80) sujungtas su išleidimo vamzdžiu (57). Judančioji dalis yra sudaryta iš judančios dalies korpuso (41) prie kurio tvirtinamas stūmoklis (30), judžiosios dalies magnetolaidis (40) ir spyruoklių atrama (76). Judžiosios dalies magnetolaidžio griovelyje (38) tvirtinamas nuolatinis magnetas (50). Stūmoklis (30) sujungtas su įsiurbimo vožtuvu (78). Duslintuvas (92) tvirtinamas prie spyruoklių atramos (76). Prie galinio dangtelio (70) tvirtinama įsiurbimo anga (68) [62].



1.5 pav. Švytuojamojo tiesiaiegio judesio elektros variklio kompresoriaus konstrukcijos eskizas [62]

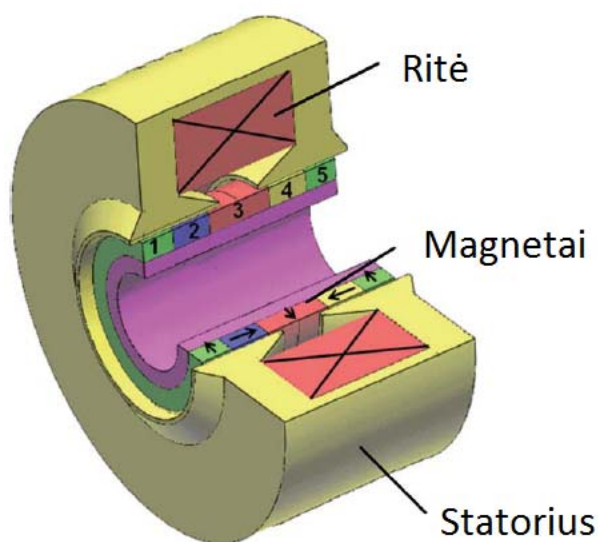
Esminis švytuojamojo tiesiaiegio variklio–kompresoriaus privalumas – konstrukcijos paprastumas lyginant su įprastinio elektros variklio varomu kompresoriumi. Šis privalumas radikaliai sumažina gamybos kainą.

Tiesiaeigio švytuojamojo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametrų įtaka variklio rodikliams

Eliminavus mechaninio judesio keitiklį padidėja švytuojamojo tiesiaeigio variklio-kompresoriaus naudingumo koeficientas ir sumažėja mechaniniai nuostoliai. Įprastinio variklio agregato judesio keitiklyje neišvengiamai yra daug trinties porų, o tiesioginės pavaros agregate su švytuojamuoju varikliu lieka tik viena trinties pora, todėl susidaro žymiai mažesni mechaniniai nuostoliai.

Nagrinėjamame variklyje-kompresoriuje yra naudojamos mechaninės spyruoklės, skirtos kompensuoti judžiosios dalies inertiškumui. Mechaninės spyruoklės sumažina agregato patikimumą. Siekiant padidinti agregato patikimumą, reiktu naudoti dvipusės veikos kompresorių. Tokia konstrukcija būdu patikimesnė, nes nebereiktu naudoti mechaninių spyruoklių, tačiau tada iškyla mechaninių parametrų derinimo problemos.

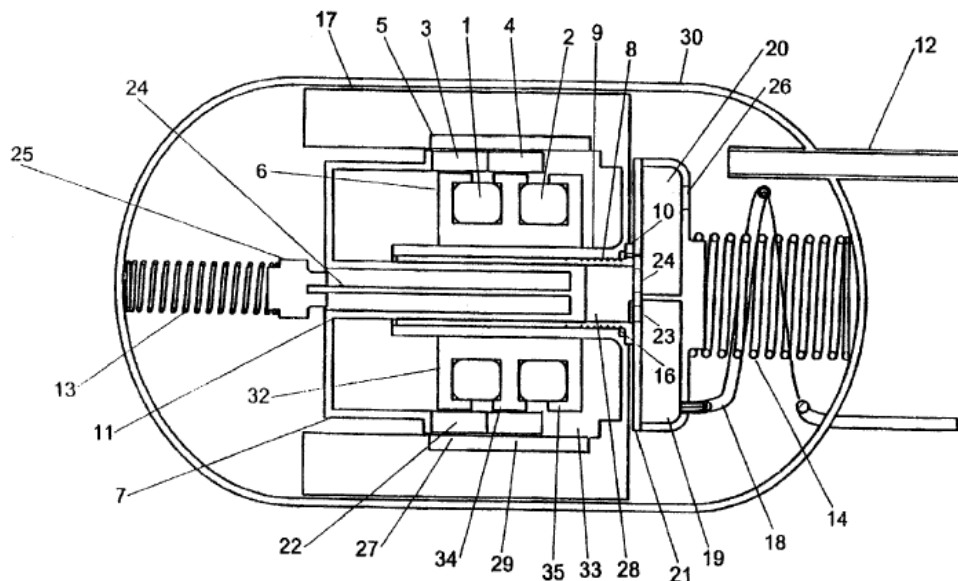
J. Wang, D. Howe ir Z. Lin pristatė mažos eigos, vienfazį variklį su nuolatiniais magnetais (1.6 pav.), kuris buvo pritaikytas slankiojančiam garų kompresoriui varyti [89, 90, 92 – 96].



1.6 pav. Mažos eigos, vienfazio variklio su nuolatiniais magnetais konstrukcinė schema [95]

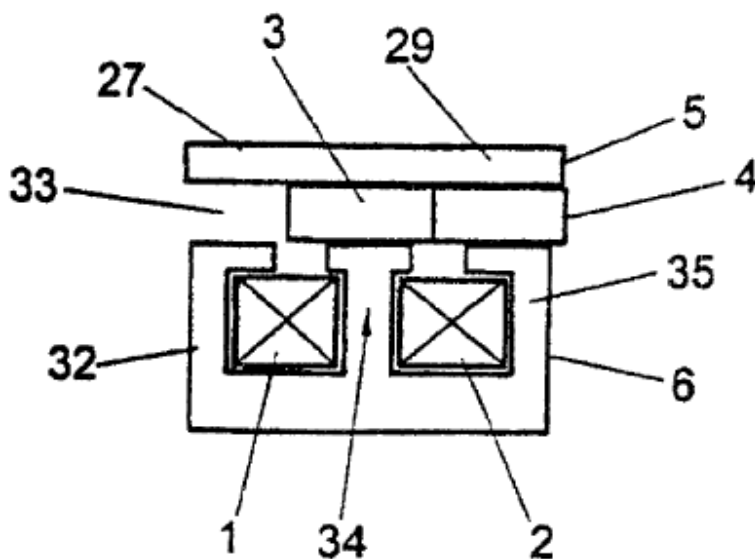
Judžiojoje dalyje panaudota dvipolė Halbacho magnetų grandinė, išdėstyta radialiai. Statoriuje panaudota vienfazė apvija ir šerdis iš minkštamagnetinės kompozitinės medžiagos (SMC – soft magnetic composite). Tokia ritė lengva pagaminti ir ji turi didelį užpildymo koeficientą. Įtaiso oro tarpe susidaro bendras magnetinis laukas, kurį sukuria Halbacho įmagnetinta magnetų grandinė ir vienfazė statoriaus apvija. Dėl sąveikos tarp nuolatinio magnetinio lauko ir statoriaus srovės susidaro judžiąją dalį veikianti jėga.

Gerald David, Linear Motor. (Patento Nr.: CA 2 475 936 A1), 2000 metais užpatentavo švytuojamojo tiesiaeigio judesio elektros variklį-kompresorių 1.7 paveikslas.



1.7 pav. Švytuojamojo tiesiaiegio judesio elektros variklio kompresoriaus konstrukcijos eskizas

[22]



1.8 pav. Principinė švytuojamojo tiesiaiegio judesio elektros variklio schema [22]

Principinėje švytuojamojo tiesiaiegio judesio elektros variklio schemoje pavaizduotas tiesiaiegis švytuojamojo judesio elektros variklis, kurio statorius sudarytas iš „E-core“ tipo magnetolaidžio turinčio centrinį (34) ir du kraštinius (32, 35) polius. Statoriuje yra tvirtinamos dvi vienfazės apvijos (1, 2). Statorių ir judžiąją dalį skiria oro tarpas (33). Judžioji dalis sudaryta iš nuolatinių magnetų (3, 4) ir vidinio magnetolaidžio (5).

1.2. Medžiagų apžvalga

Magnetinė medžiaga yra svarbiausia magnetinio komponento projektavimo dalis. Magnetinių medžiagų inžinierius vartoja tris žodžius atliekant normalaus projektavimo suderinamumo tyrimus: kaina, dydis ir efektyvumas. Magnetinių medžiagų inžinieriai šiais laikais kuria magnetinius komponentus, kurie veikia nuo dažnių, žemesnių už girdimąjį garsą, iki megahercinių dažnių. Dažniausiai projektuojant siekiama didžiausio efektyvumo ir mažiausios parazitinės talpos ir indukcijos nutekėjimo. Šiomis dienomis, magnetinės medžiagos, su kuriomis dirba inžinieriai, yra silicio ir plieno lydiniai, nikelio ir geležies lydiniai (permalloy), kobalto ir geležies lydiniai (permendur), amorfiniai metalų lydiniai ir feritai. Šios medžiagos taip pat turi savo atmainas, pavyzdžiui, moli-permalloy miltelių, sendust miltelių ir geležies miltelių šerdys. Projektuotojų uždavinys - ieškoti kompromiso ieškant optimalių savybių jo konstrukcijai iš šių medžiagų grupės. Tos optimalios savybės yra prisotinimo indukcija B_s , magnetinė skvarba μ , magnetinė varža R_m (šerdis nuostoliai), liekamasis įmagnetinimas B_r , koercityvinė jėga H_c [18].

1.2.1 Magnetolaidžio medžiagos

Magnetinės medžiagos padarė revoliuciją mūsų gyvenimuose. Šios medžiagos naudojamos elektronikos, kompiuterių ir telekomunikacijų industrijose. Per pastaruosius dešimtmečius buvo naudojami įvairūs magnetinių medžiagų tipai, įskaitant gryną geležį ir jos lydinius, tokius kaip Fe–Ni, Fe–Ni–P, Fe–Nd–B, Fe–Si, minkštuosius bei kietuosius feritus, tokius kaip Ni–Zn, Mn–Zn ir Ba feritus. Skirtingi šių medžiagų gamybos, savybių, priedų poveikio magnetinėms savybėms ir taikymų aspektai buvo aptarti daugelio tyrėjų, įskaitant autorius, kurie tyrė poveikius priedų, tokių kaip V_2O_5 ir MoO_3 , Mn–Zn feritams žemos galios lempoms ir aukšto dažnio taikymams. Naujos medžiagos, įskaitant amorfinės medžiagas, amorfinius laidus, nanokristalines medžiagas ir šiandienos SMC, yra naujausios medžiagos magnetinių medžiagų istorijoje [18].

- **Elektrotechninis plienas.** Silicio ir plieno lydiniai yra vieni pirmųjų lydinių, naudojamų transformatoriuose ir induktoriuose. Per pastaruosius metus šie lydiniai buvo žymiai patobulinti ir tikriausiai yra plačiausiai naudojama magnetinė medžiaga. Pradžioje vienas iš plieno naudojimo minusų buvo toks, kad senstant medžiagai, didėdavo nuostoliai. Pridėjus silicio privalumai buvo dvipusiai: silicis padidino elektrinę varžą, taip sumažindamas sūkurinių srovių nuostolius, ir pagerino medžiagos stabilumą senstant.

Silicio ir plieno lydiniai pasižymi aukštu prisotinto srauto tankiu, geru laidumu esant aukštam srauto tankiui ir gan nedideliais nuostoliais girdimiesiems dažniams. Vienas iš silicio ir

TMPE – 12, Justinas Gerbenis

Tiesiaieigio švytuojamojo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametrų įtaka variklio rodikliams
plieno svarbiausių patobulinimų buvo atliktas proceso, vadinamu „cold-rolled, grain-oriented, AISI type M6“, metu. Šis M6 grūdėtos struktūros plienas pasižymi išskirtinai mažais nuostoliais ir aukštu laidumu. Jis taikomas ten, kur reikalinga aukšta kokybė ir minimalūs nuostoliai [18].

- **Nikelio lydiniai.** Didelio laidumo metaliniai lydiniai susideda iš nikelio ir geležies. Nors Hopkinsonas tyrė nikelio ir geležies lydinius jau 1889 metais, Ni-Fe lydinių svarba buvo suprasta tik apie 1913 metus, Elmen'ui pradėjus tirti jų savybes silpnuose magnetiniuose laukuose ir rezultatus po apdorojimo karščiu. Elmen'as pavadino savo Ni-Fe lydinius „Permalloys“ ir jo pirmas patentas buvo pateiktas 1916 m. Praėjus šiek tiek laiko, Jensen'as pradėjo nepriklausomą tyrimą, kurio rezultatas – 78-Permalloy, kuris tapo naudingesnis galios reikalaujančiose elektros mašinose [23].

Kaip pirma teigė Jensen'as, Ni-Fe lydinius pavyko patobulinti grūdinant juos aukštoje temperatūroje, vandenilio dujose. Kitas patobulinimas buvo pasiektas panaudojus grūdėtos struktūros medžiagas ir jas grūdinant. Šį darbą atliko Kellsall'as ir Bozorth'as. Naudojant šiuos du metodus buvo gauta nauja medžiaga, pavadinta Supermalloy. Ji pasižymi aukštesniu laidumu, mažesne priverstine jėga ir beveik tokiu pačiu srauto tankiu kaip 78-Permalloy. Turbūt pats svarbiausias iš šių faktorių yra magnetinis grūdinimas, kuris ne tik padidina laidumą, bet taip pat pasižymi kvadratiška histerizės kilpa, svarbia aukšto dažnio galios keitimo įrenginiuose [18].

Tam, kad būtų pasiekta didelė varža ir kartu mažesni šerdies nuostoliai aukšto dažnio taikymuose, buvo pasirinkti du metodai:

- metalo lydinių formos keitimas;
- magnetinių oksidų kūrimas.

Rezultatas – plonų juostų ir miltelių lydinių gamyba 1920 metais, ir plonų juostelių gamyba 1950 metais. Plonų juostelių gamybą paskatino jų reikalingumas aviaciniame kosminiame taikyme, galios keitimo elektronikoje nuo 1960 metų iki šių dienų [23].

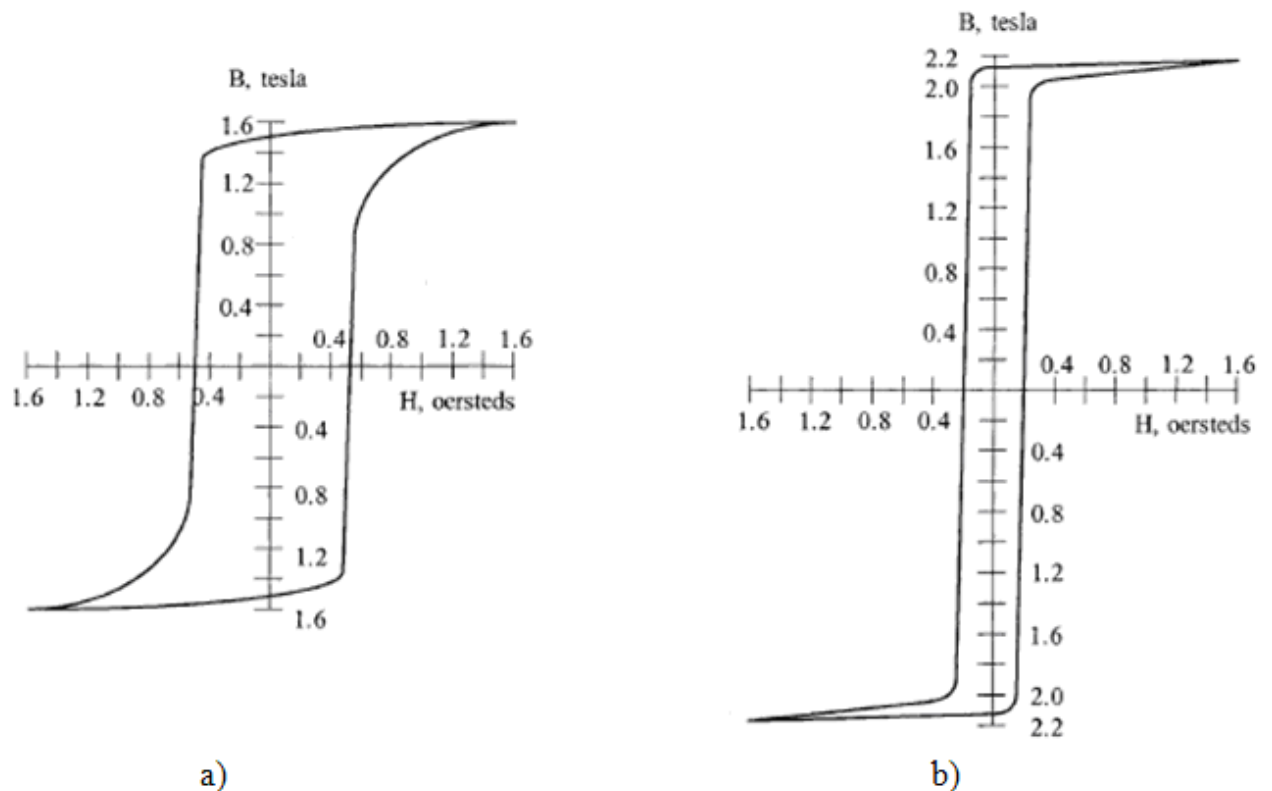
Ni-Fe lydiniai gaminami 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm, 0,125 mm storio. Medžiaga pasižymi apskrita arba kvadratiška histerizės kilpa. Geležies lydinių savybės kai kurioms iš populiariausių medžiagų pateiktos lentelėje 1.2 lentelėje [18].

1.2 lentelė. Nikelio lydinius charakterizuojančios magnetinės ir fizikinės savybės [18]

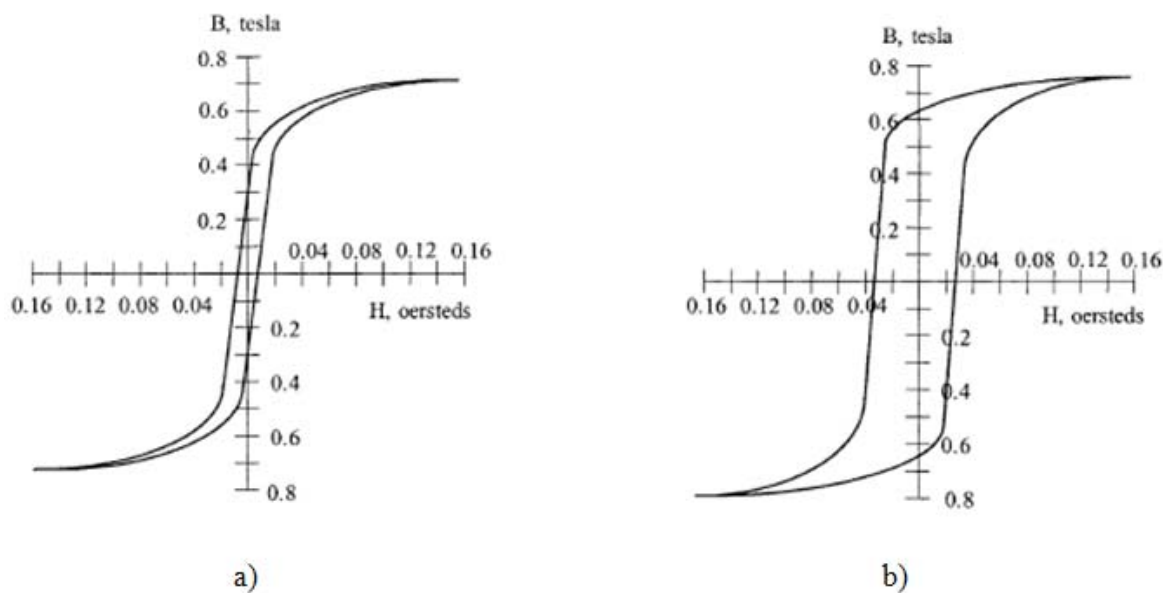
Medžiagos pavadinimas	Struktūra	Magnetinė pradinė skvarba	Liktinis įmagnetėjimas	Kiuri temp.	Koercinė jėga	Tankis
		-	T	°C	A/m	kg/m ³

Silicon	3% Si 97% Fe	1,5	1,5 – 1,8	750	31,84 – 47,76	7630
Supermendur	49% Co 49% Fe 2%V	0,8	1,9 – 2,2	940	11,94 – 27,86	8150
Permalloy	79% Ni 17%Fe 4% Mo	12 – 100	0,66 – 0,82	460	1,59 – 3,18	8730
Supermalloy	78% Ni 17%Fe 5% Mo	10 – 50	0,65 – 0,82	460	0,24 – 0,64	8760

Taip pat 1.9 ir 1.10 paveiksluose pateiktos kiekvienos medžiagos histerizės kilpos.



1.9 pav. Histerizės kilpa: a) silikono: 97 % Fe ir 3% Si, b) supermendur: 49% Fe, 49% Co ir 2% V



1.10 pav. Histerizės kilpa: a) supermalloy: 78 % Ni, 17% Fe ir 5% Mo, b) permaloy 80: 17% Fe, 79% Ni ir 4% Mo [18]

- **Šerdis iš presuotų geležies miltelių.** Suslėgtų geležies miltelių, kaip magnetinės medžiagos induktyvioms ritėms, gamybą paskatino Belo telefonų laboratorijos inžinierių pastangos rasti tinkamą medžiagą varinių laidų šerdims. Geležies miltelių panaudojimą pasiūlė Heaviside'as 1887 metais ir Dolezalek'as 1900 metais [18].

Pirmuosius komerciškai tinkamus geležies miltelių junginius pristatė „Buckner Speed“ įmonė Jungtinėse Amerikos Valstijose. Patento Nr. 1274952, pateiktas 1918. „Buckner Speed“ ir G.W. Elman paplatino straipsnį A.I.E.E. Transactions pavadinimu „Suslėgtų geležies miltelių magnetinės savybės“ 1921 metais. Šis straipsnis apibūdina magnetinę medžiagą, kuri yra tinkama žemo induktyvumo ričių ir transformatorių šerdžių gamyboje, tokiuose, kokie naudojami telefonų sistemose. Šios geležies miltelių šerdys pagamintos iš „80 Mesh Electrolytic Iron Powder“. Medžiaga buvo užgrūdinta, tada izoliuota oksiduojant pavienių dalelių paviršių. Šiuo būdu išgauta labai plona ir tvirta geležies miltelių dalelių izoliacija. Ji nesuiro, kai branduoliai buvo suslėgti. Šelakas buvo panaudotas tolimesnei izoliacijai ir miltelių dalelėms surišti. Taip toroidines geležies miltelių šerdis gamino „Western Electric Company“ įmonė maždaug iki 1929. Šiandienos geležies miltelių šerdys iš esmės gaminamos tuo pačiu būdu, dažniausiai naudojant grynos geležies miltelius ir egzotiškesnius izoliatorius ir surišimo medžiagą. Paruošti milteliai suslegiami ypač dideliu slėgiu tam, kad būtų gauta vientisa šerdis. Šio proceso metu gaunama magnetinė struktūra su tolygiai pasiskirsčiusiais oro tarpais. Geležies milteliams būdingas didelis prisotinto srauto tankis, kartu su pasiskirsčiusiu oro tarpu gaunama magnetinės struktūros šerdis, kuri pasižymi pradiniu laidumu mažesniu už 100 ir didelėmis energijos kaupimo galimybėmis [18].

Nuolatinė srovė nesukuria šerdies nuostolių, bet kintama ar pulsacijų srovė sukuria šiuos nuostolius. Geležies miltelių medžiaga pasižymi didesniais šerdies nuostoliai nei kai kurios kitos, brangesnės šerdies medžiagos. Didžioji dalis nuolatine srove paremtų induktorių turi santykinai mažą pulsacijų srovių procentą, todėl šerdies nuostoliai minimalūs. Tačiau šerdies nuostoliai kartais gali tapti ribojančiu faktoriumi taikymuose su santykinai dideliu pulsacijų srovių procentu esant labai aukštiems dažniams. Geležies milteliai nerekomenduojami naudoti induktoriuose su trūkia srove arba transformatoriuose su dideliais kintamosios srovės svyravimais [18].

Mažai kainuojančios geležies miltelių šerdys šiomis dienomis įprastai naudojamos aukšto ir žemo dažnio galios keitikliuose, diferencialiniam režimui, kitiems srovės induktoriams. Įprastiniai geležies miltelių šerdies naudojimo nuostoliai įprastai yra magnetinio komponento matmenys ir efektyvumas.

Galios magnetiniai įrenginiai turi keturis standartus:

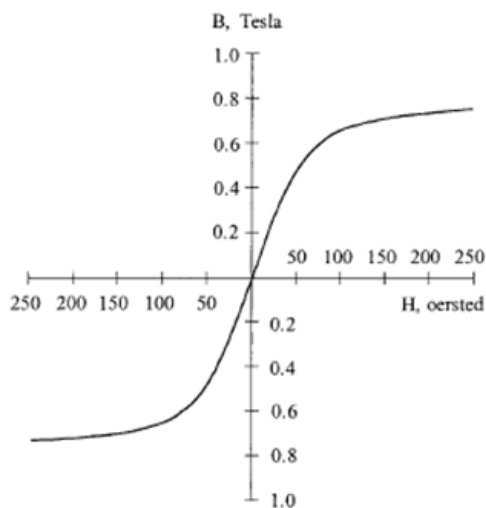
- molypermalloy (MPP) miltelių šerdys su šeima kreivių;
- didelio srauto (HF) miltelių šerdys su šeima kreivių;
- sendust miltelių šerdys su šeima kreivių;
- geležies miltelių šerdys su šeima kreivių.

Presuotų geležies miltelių šerdys pasižymi įvairiu laidumu. Tai inžinieriui suteikia platų projekto optimizavimo sprendimų spektrą. Presuotų geležies miltelių savybės populiariausioms medžiagoms pateiktos lentelėje 1.3 lentelėje. Taip pat 1.11 ir 1.12 paveiksluose pateiktos medžiagų histerizės kilpos [18].

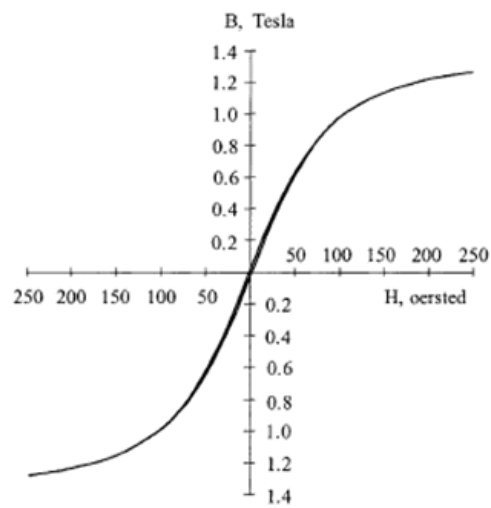
1.3 lentelė. Presuotų geležies miltelių lydinius charakterizuojančios magnetinės ir fizikinės savybės [18]

Medžiagos pavadinimas	Struktūra	Pradinė magnetinė skvarba	Liktinis įmagnetėjimas	Kiuri temp.	Koercinė jėga	Tankis	Svorio faktorius
		-	T	°C	A/m	kg/m ³	-
MPP	80% Ni 20% Fe	14 – 550	0,7	450	23,88	8500	8,5
didelio magnetinio srauto miltelių šerdis	50% Ni 50% Fe	14 – 160	1,5	360	79,6	8000	8

Sendust	85% Fe 9%Si 6% Al	26 – 125	1	740	39,8	6150	6,15
geležies milteliai	100% Fe	4 – 100	0,5 – 1,4	770	398 – 716,4	3300 – 7200	3,3 – 7,2

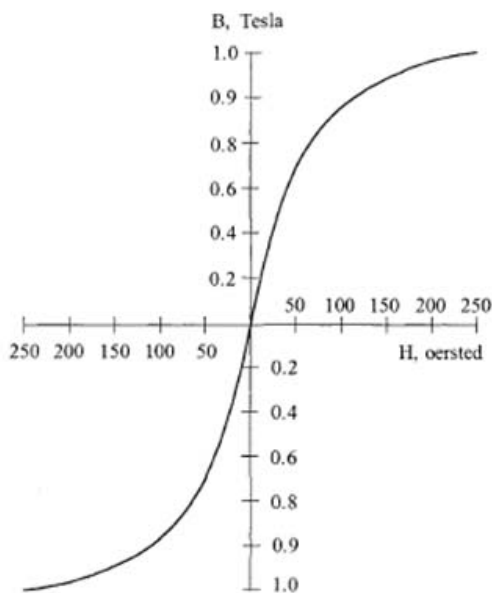


a)

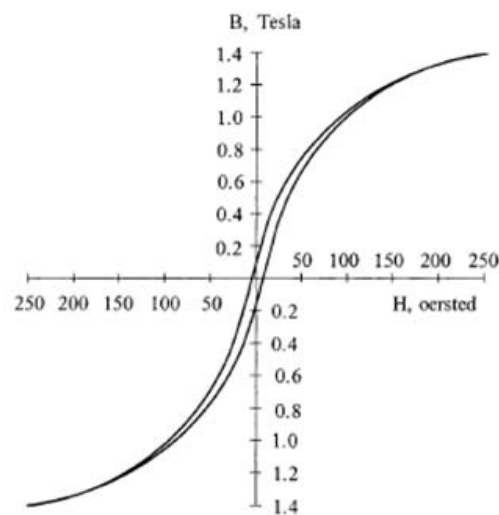


b)

1.11 pav. Histerizės kilpa: a) molypermalloy MPP b) didelio magnetinio srauto miltelių šerdis [18]



a)



b)

1.12 pav. Histerizės kilpa: a) sendust b) geležies milteliai [18]

Idėja panaudoti geležies – dervos mišinius SMC taikymuose nėra nauja. Ji atsirado daugiau nei prieš 100 metų, bet geležies – dervos mišiniai buvo retai naudojami, nes jų savybės, gamybos technologija ir realūs šių medžiagų taikymai nebuvo pakankamai išsivystę. Tačiau šie apribojimai buvo peržengti pradėjus gaminti patobulintas grynąsias medžiagas ir pritaikius naujas formavimo technologijas. Šie mišiniai vis labiau pritaikomi elektriniuose varikliuose, pakeisdami sluoksnines laminuotas medžiagas. Šios medžiagos gaminamos dėl jų konkurencingų magnetinių savybių (gero santykinio laidumo ir magnetinio įsotinimo), bet jų elektrinė varža didelė. Izoliuoti geležies milteliai turi kelis pranašumus palyginus su tradiciniu plieniu kai kuriuose taikymuose, pavyzdžiui, izotropinė SMC prigimtis kartu su unikaliomis formavimo galimybės atveria kelią 3D modeliavimo sprendimams. Per pastaruosius metus dalelių dydžio poveikis, dalelių sudėtis (Fe–Ni, Fe–Ni–Co, Fe–Si) suspaudimo parametrai (šiltasis suspaudimas, slėgis), dervos ir drėgnasis cheminis metodai izoliacijos sluoksnio aplink daleles gamybai buvo išvystyti [79].

1.2.2 Magnetai ir jų savybės

Magnetai – kūnai, galintys pritraukti geležį ir kai kuriuos kitus metalus. Taip vadinami kūnai per ilgą laiką neišsimagnetinantys. Medžiagos turinčios tokių savybių vadinamos feromagnetikais: Fe, Ni, Co, Cr ir t.t. Šiose medžiagose, dėl elektronų sąveikos, susidaro skirtingai įmagnetintos sritys. Magnetiniame lauke jų įmagnetinimai supanašėja ir visa medžiaga tampa nuolatinis magnetu. Medžiagos gebėjimą įsimagnetinti nusako magnetinė skvarba μ – tai skaičius, rodantis kiek kartų jėga, kuria magnetinis laukas veikia magnetinę rodyklę arba laidininką, kuriuo teka srovė, toje medžiagoje yra didesnė negu vakuume. Feromagnetinės medžiagos daug kartų padidina srovės magnetinio lauko jėgą, todėl naudojama gaminant elektromagnetus, elektros variklius, generatorius, transformatorius [55].

Samario–kobalto (Sm–Co) magnetai

Samario–kobalto (Sm–Co) magnetai (1.13 pav.) buvo pirmaisiais šiuolaikiniais retųjų žemių elemento-metalo tipo (Re–M) magnetais, kurie buvo pradėti gaminti masinėje gamyboje. Jie gaminami miltelių metalurgijos metodais, paprastai – kaip anizotropiniai magnetai. Dabartiniu metu šie magnetai yra gaminami dviejų tarpmetalinių junginių SmCo_5 (ir plastmasių S18, S20) arba $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ (ir plastmasių S22, S24, S26, S28, S30) pagrindu, nes $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ tipo magnetams yra būdingos didesnės likutinio įmagnetėjimo B_r vertės ir kiek didesnis temperatūrinis stabilumas.



1.13 pav. Samario–kobalto (Sm–Co) magnetai [56]

Magnetų Sm–Co energijos tankis $(BH)_{\max}$ yra daugiau nei penkis kart didesnis negu feritinių arba alnico magnetų energijos tankis, o koercinės jėgos H_c vertės – daugiau nei du kartus didesnės negu feritiniams magnetams būdingos vertės. Dėl staigiai didėjančio polinkio oksiduotis virš 250°C temperatūros, didžiausia darbo temperatūra T_{\max} yra ženkliai žemesnė nei Kiuri T_c temperatūra. Tai yra pagrindinė šių magnetų taikymo sričių apribojimo priežastis.

Samario-kobalto magnetų privalumai – didelis magnetinių parametrų temperatūrinis stabilumas (artimą alnico tipo magnetams), didelės energijos tankio $(BH)_{\max}$, koercinės jėgos H_c bei likutinio įmagnetėjimo B_r vertės. Leistinių temperatūrų diapazone SmCo magnetai turi labai didelį atsparumą korozijai, o aukštų koercinės jėgos H_c verčių dėka, gali dirbti stiprių išmagnetinančių laukų aplinkoje [56].

Samario-kobalto magnetai yra taikomi mažuose elektros varikliuose ir generatoriuose, matavimo ir kontrolės prietaisuose, įvairių tipų keitikliuose ir jutikliuose bei daugelyje įrenginių reikalaujančių stabilaus magnetinio lauko besikeičiančiose temperatūrose ($-60 \div -250^{\circ}\text{C}$). Didelio magnetinės energijos tankio ir didelės koercinės jėgos Sm–Co magnetų taikymas leidžia miniatiūrizuoti įrengimus, kurie iki šiol buvo gaminami taikant feritinius ir alnico magnetus [56].

1.4 lentelė. Samario-kobalto magnetus charakterizuojančios magnetinės savybės [56]

Medžiagos simbolis	Liktinis įmagnetėjimas (Br)		Koercinė jėga (bHc)		Koercinė jėga (jHc)		Energijos tankis (BH)max	
	[mT]	[kGs]	[kA/m]	[kOe]	[kA/m]	[kOe]	[kJ/m ³]	[MGsOe]
S16	0,81–0,85	8,1–8,5	620–660	7,8–8,3	1194–1830	15–23	110–127	14–16
S18	0,85–0,90	8,5–9,0	660–700	8,3–8,8	1194–1830	15–23	127–143	16–18

S20	0,90– 0,94	9,0 – 9,4	680 – 725	8,5 – 9,1	1194 – 1830	15 – 23	150 – 167	19 – 21
S22	0,92– 0,96	9,2 – 9,6	710 – 750	8,9 – 9,4	1194 – 1830	15 – 23	160 – 175	20 – 22
S24	0,96 – 1,0	9,6 – 10,0	730 – 770	9,2 – 9,7	1194 – 1830	15 – 23	175 – 190	22 – 24
S24GH	0,95 – 1,02	9,5 – 10,2	700 – 750	8,7 – 9,4	min.1990	min.25	175 – 191	22 – 24
S26GH	1,02 – 1,05	10,2 – 10,5	750 – 780	9,4 – 9,8	min.1990	min.25	191 – 207	24 – 26
S28GH	1,03 – 1,08	10,3 – 10,8	756 – 796	9,5 – 10,0	min.1990	min.25	207 – 220	26 – 28
S30GH	1,08 – 1,10	10,8 – 11,0	788 – 835	9,9 – 10,5	min.1990	min.25	220 – 240	28 – 30
S24G*	0,95 – 1,02	9,5 – 10,2	700 – 750	8,7 – 9,4	min.1433	min.18	175 – 191	22 – 24
S26G*	1,02 – 1,05	10,2 – 10,5	750 – 780	9,4 – 9,8	min.1433	min.18	191 – 207	24 – 26
S28G*	1,03 – 1,08	10,3 – 10,8	756 – 796	9,5 – 10,0	min.1433	min.18	207 – 220	26 – 28
S30G	1,08 – 1,10	10,8 – 11,0	788 – 835	9,9 – 10,5	min.1433	min.18	220 – 240	28 – 30
S26M	1,02 – 1,05	10,2 – 10,5	750 – 780	9,4 – 9,8	955-1273	12 - 16	191 – 207	24 – 26
S28M	1,03 – 1,08	10,3 – 10,8	756 – 796	9,5 – 10,0	955-1273	12 - 16	207 – 220	26 – 28
S30M	1,08 – 1,10	10,8 – 11,0	788 – 835	9,9 – 10,5	955-1273	12 - 16	220 – 240	28 – 30
S28L	1,02 – 1,08	10,2 –1 0,8	413 – 176	5,2 – 9,0	438-796	5,5 -10	207 – 220	26 – 28
S30L*	1,08 – 1,15	10,8 – 11,5	413 – 716	5,2 – 9,0	438-796	5,5 -10	220 – 240	28 – 30

1.5 lentelė. Samario-kobalto magnetus charakterizuojančios fizikinės savybės [56]

Medžiagos simbolis	Liktinio įmagnetėjimo temperatūrinis koeficientas TK (Br)	Koercinės jėgos temperatūrinis koeficientas TK (jHc)	Tankis	Kietumas pagal Vikersą	Rezistyvumas	Kiuri temp.	Maks. darbo temp.
	[%/°C]	[%/°C]	[g/cm ³]	[Hv]	[Ohm cm]	[°C]	[°C]
S16, S18, S20, S22, S24	- 0,05	- 0,3	8,0 – 8,2	450–500	5-6 x 10 ⁻⁵	700 – 750	250
S24GH, S26GH, S28GH, S30GH	-0,05	-0,3	8,3 – 8,5	550–600	8-9 x 10 ⁻⁵	min. 800	350
S24G, S26G, S28G, S30G	-0,05	-0,3	8,3 – 8,5	550–600	8-9 x 10 ⁻⁵	min. 800	300
S26M, S28M, S30M	-0,05	-0,3	8,3 – 8,5	550–600	8-9 x 10 ⁻⁵	min. 800	300
S28L, S30L	- 0,03	- 0,2	8,3 – 8,5	500–600	8-9 x 10 ⁻⁵	min. 800	250

Neodiminiai aglomeruoti (Nd-Fe-B) magnetai

Neodiminiai aglomeruoti (Nd-Fe-B) magnetai (1.14 pav.) pelnė didžiausią pasisekimą rinkoje šiuolaikinių retųjų žemių elemento-metalo (Re-M) tipo magnetų grupėje. Puikias magnetinės šio magneto savybes pavyko užtikrinti 1984 metais atrasto Nd₂Fe₁₄B junginio dėka. Jis gaminamas miltelių metalurgijos metodais, tai – presavimo magnetiniame lauke arba plastinio apdirbimo aukštoje temperatūroje. Jiems gauti reikalingi dideli energijos tankiai (BH)_{max} (mažd. 400 kJ/m³). Šie magnetai turi taip pat dideles liktinio įmagnetėjimo B_r indukcijos vertes, panašias kaip alnico magnetai, tačiau jų komercinės jėgos H_c yra keliasdešimt kartų didesnės, kas leidžia dirbti stiprių išmagnetinimo laukų aplinkoje. Tačiau palyginti su samario-kobalto magnetais, jie turi mažesnę darbo temperatūrų diapazoną, o jų magnetinės savybės labiau priklauso nuo temperatūros. Kadangi esantis juose neodimis turi didelį polinkį oksiduotis, magnetai yra dengiami plonais antikoroziniais sluoksniais. Dažniausiai taikomi sluoksniai: Ni, Zn, Ni-Zn arba Ni-Cu-Ni. Gali taip pat būti dengiami sidabro, aukso, aukso-nikelio sluoksniais, o taip pat gali būti taikomas fosfatavimas arba epoksidinimas [56].



1.14 pav. Neodiminiai aglomeruoti (Nd–Fe–B) magnetai [56]

Svarbiausi neodiminio aglomeruoto magneto privalumai yra šie: labai dideli maksimalūs energijos tankiai $(BH)_{max}$, labai didelės koercinės jėgos H_c vertės bei didelės likutinio įmagnetėjimo B_r vertės. Šie magnetai naudojami, kur yra reikalaujama didelė miniatiūrizacija. Pagrindiniai aglomeruotų Nd–Fe–B magnetų taikymo sritys, tai – elektros varikliai, generatoriai, elektroniniai įrenginiai (garsikalbiai, mikrofonai, aliarmai ir pan.), mechaniniai žaislai, separatoriai, servovarikliai, laikikliai ir daugelis kitų įrenginių, kuriuose yra reikalaujamas stiprus magnetinis laukas nelabai aukštų temperatūrų diapazone [56].

1.6 lentelė. Neodiminius aglomeruotus magnetus charakterizuojančios magnetinės savybės [56]

Medžiagos simbolis	Liktinis įmagnetėjimas (Br)	Koercinė jėga (bHc)	Koercinė jėga (jHc)	Energijos tankis (BH) max.		Max. temp. darbo
				[kJ/m ³]	[MGsOe]	
[NdFeB]	[kGs]	[kA/m]	[kA/m]	[kJ/m ³]	[MGsOe]	[°C]
N27	10,2 – 11,0	764	955	199 – 223	25 – 28	80
N30	10,8 – 11,5	796	955	223 – 247	28 – 31	80
N40	12,5 – 12,8	923	955	302 – 326	38 – 41	80
N50	14,0 – 14,5	836	876	366 – 390	47 – 51	80
N27M	10,2 – 11,0	764	1114	199 – 223	25 – 28	100
N27H	10,2 – 11,0	764	1353	199 – 223	25 – 28	120
N27SH	10,2 – 11,0	764	1592	199 – 223	25 – 28	150
N28UH	10,2 – 10,8	764	1990	207 – 231	26 – 29	180
N28EH	10,4 – 10,9	780	2388	207 – 231	26 – 29	200

1.7 lentelė. Neodiminius aglomeruotus magnetus charakterizuojančios fizikinės savybės [56]

Liktinio įmagnetėjimo temperatūrinis koeficientas TK (Br)	Koercinės jėgos (jHc) temperatūrinis koeficientas TK (jHc)	Tankis (d)	Kietumas pagal Vikersą (HV)	Rezistyvumas(r)	Kiuri temperatūra (Tc)
[%/°C]	[%/°C]	[g/cm ³]	[kG/mm ²]	[μOhm cm]	[°C]
-0,10 ÷ -0,12	- 0,6	7,4 – 7,6	600	144	310 – 340

Neodiminiai surištieji (Nd–Fe–B) magnetai

Neodiminiai surištieji (Nd–Fe–B) magnetai (1.15 pav.), panašiai kaip aglomeruoti neodiminiai magnetai pelnė didelį pasisekimą rinkoje. Gamybiniame procese, magnetiniai milteliai pagaminti Nd₂Fe₁₄B junginio pagrindu yra sulituojami panaudojant plastmasines medžiagas. Rišamosios plastmasės tipas parenkamas priklausomai nuo numatyto magnetų formavimo metodo. Aukšto slėgio formavimui (presavimui) yra taikomos chemiškai kietinamos plastmasės, pvz. epoksidinė derva, o injekciniam formavimui – termoplastinė plastmasė, pvz. nailonas. Abiem metodais gaminami neodiminiai magnetai charakterizuojasi dideliu magnetinių savybių pakartojamumu, labai siauromis matmenų tolerancijomis ir gera paviršiaus kokybe. Taikomų rišamųjų plastmasių tipas apibrėžia šių magnetų maksimalią darbo temperatūrą T_{max}. Epoksidinės dervos atveju tai yra maždaug 120°C, o nailono atveju maždaug 80°C [56].



1.15 pav. Neodiminiai surištieji (Nd–Fe–B) magnetai [56]

Neodiminius surištuosius magnetus galima gaminti izotropinėmis ir anizotropinėmis versijomis. Tačiau dažniausiai naudojami yra izotropiniai magnetai, kurių didžiausias energijos tankis (BH)_{max} ir likutinis įmagnetėjimas B_r yra maždaug du kartus didesnis nuo stipriausių feritinių magnetų. Anizotropinių surištuųjų Nd–Fe–B magnetų atveju, šios vertės yra maždaug keturis kartus didesnės. Abu minimi magnetų tipai turi labai dideles koercines jėgas H_c, o tai leidžia juos taikyti

Tiesiaaigio švytuojamojo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametrų įtaka variklio rodikliams stiprių išmagnetinančių laukų aplinkoje. Hermetiško miltelių Nd-Fe-B grūdelių uždarymo plastmasėje dėka, šie magnetai charakterizuojami dideliu atsparumu korozijai [56].

1.8 lentelė. Neodiminius surištuosius magnetus charakterizuojančios magnetinės savybės [56]

Medžiagos simbolis	Liktinis įmagnetėjimas (Br)	Koercinė jėga (bHc)	Koercinė jėga (jHc)	Energijos tankis (BH) max	
	[kGs]	[kOe]	[kOe]	[kJ/m ³]	[MGsOe]
W4	4,0 – 5,0	4,0 – 4,5	7,0 – 9,0	32 – 40	4,5 – 5,0
W6	5,0 – 6,0	4,0 – 4,5	7,0 – 9,0	40 – 60	5,5 – 7,5
W8	6,0 – 6,7	4,5 – 5,5	8,0 – 10,0	64 – 72	8,0 – 9,0
W8H	5,6 – 6,6	5,0 – 5,8	13,0 – 17,0	60 – 72	7,5 – 9,0
W10	6,6 – 7,0	5,0 – 5,5	8,0 – 10,0	72 – 80	9,0 – 10,0
W10H	6,9 – 7,3	5,0 – 6,0	9,5 – 10,0	80 – 88	10,0 – 11,0
W12	7,2 – 8,0	5,2 – 6,0	9,0 – 11,0	88 – 96	11,0 – 12,0
W12D	7,2 – 8,0	5,6 – 6,5	9,0 – 12,0	88 – 100	11,0 – 12,5

1.9 lentelė. Neodiminius surištuosius magnetus charakterizuojančios fizikinės savybės [56]

Medžiagos paženklinimas	Liktinio įmagnetėjimo temperatūrinis koeficientas TK (Br)	Koercinės jėgos temperatūrinis koeficientas TK (jHc)	Tankis	Kietumas pagal Brinelį	Rezistyvumas	Maks. darbo temp.
	[%/°C]	[%/°C]	[g/cm ³]	[HB]	[Ohm cm]	[°C]
W4	-0,10	-0,4	4,5–5,5	40–45	14000	150
W6	-0,10	-0,4	5,3–5,8	40–45	14000	150
W8	-0,10	-0,4	5,6–6,0	35–38	14000	140
W8H	-0,13	-0,4	5,6–6,0	35–38	14000	140
W10	-0,10	-0,4	5,8–6,1	35–38	14000	140
W10H	-0,10	-0,4	6,0–6,2	35–38	14000	150
W12	-0,10	-0,4	6,2–6,6	35–38	14000	150

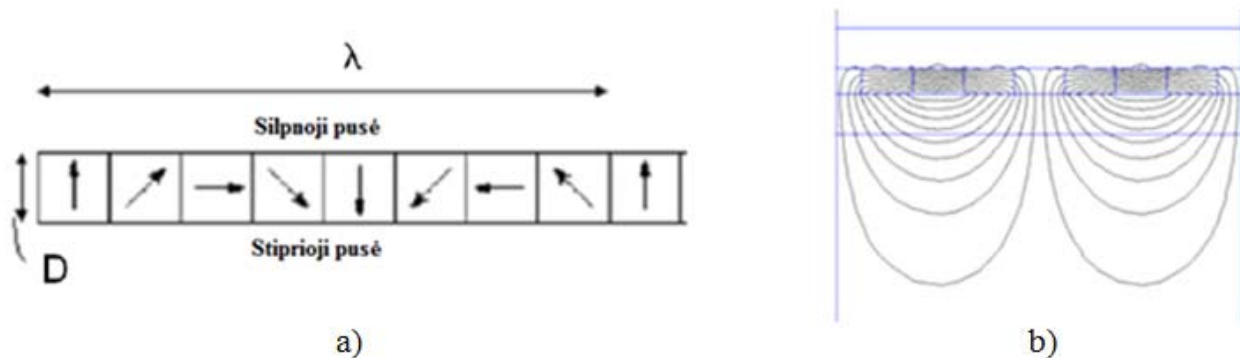
Svarbiausi neodiminių surištujų magnetų privalumai yra šie: didelis magnetinių savybių pakartojamumas, galimybė pagaminti komplikuotas ir pakartojamas formas be brangaus mechaninio apdirbimo, didelis atsparumas korozijai ir labai didelės koercinės jėgos H_c vertės.

1.3. Halbacho schema

Per pastaruosius 20 metų nuolatinių neodiminių (Nd–Fe–B) magnetų maksimalūs energijos tankis $(BH)_{\max}$, koercinės jėgos H_c , liktinis įmagnetėjimas B_r ir šiluminis stabilumas buvo žymiai pagerintas. Tai leido juos pritaikyti didelio masto sistemose, tokiose kaip varikliai, guoliai, Maglevo ir sūkurinių srovių stabdžiuose taip pat kitose transporto priemonėse, tokiose kaip hibridiniai automobiliai. Pagrindinis magnetų privalumas yra maksimalus magnetinė energija išreikšta megaGausais – Oesteradais (MGOe), bet ne ką mažiau svarbūs yra ir šiluminis stabilumas ir nuolatinių magnetų išmagnetinimo varža. Šiuo metu, Nd–Fe–B su didesne nei 50 MGOe magnetine energija yra komerciškai prieinami. Nd–Fe–B pakeičia samario kobalto (Sm–Co) ir alnico magnetus daugelyje sričių, bet Sm–Co magnetai vis dar prilygsta Nd–Fe–B srityse, kur temperatūra yra aukšta. Toliau apžvelgiamas neodiminių nuolatinių magnetų išdėstymas Halbacho schema [82].

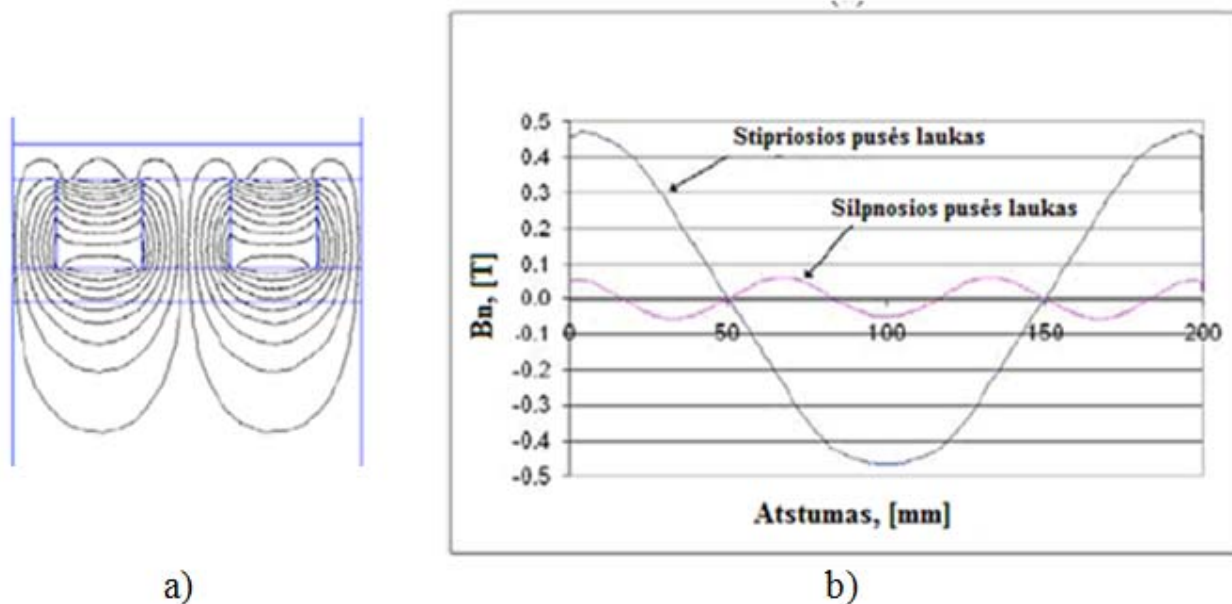
Linijinis Halbacho modelis (1.16 pav.) yra magnetinė struktūra, kur įmagnetinimo vektorius sukasi, sukurdamas stiprų magnetinį lauką vienoje modelio pusėje ir silpną lauką antroje pusėje. Ši struktūra pirmą kartą buvo apibūdinta J. C. Mallinsono 1973 metais, kaip vienpusis „magnetinio smalsumo“ srautas ir po to buvo nepriklausomai atrastas Klauso Halbacho norint panaudoti dalelių greitintuvus „Lawrence Livermore“ nacionalinėje laboratorijoje. Buvo pasiūlyta Halbacho modelius naudoti linijiniuose varikliuose, rotoriniuose varikliuose, Maglevo levitacijoje, sūkurinių srovių stabdžiuose ir didelių laukų magnetuose ir įvairios variacijos taip pat naudojamos kituose mechanizmuose [82].

Idealusis Halbacho modelis turi magnetinį vektorių, kuris nuolatos sukasi pagal struktūros ilgį. Šis idealusis modelis turi magnetinio srauto tankį stipriojoje pusėje, kuris kinta sinusoide kintant atstumui, ir nulinį lauką silpnojoje pusėje. Tačiau, Halbacho modeliai yra įprastai gaminami naudojant atskirus magnetus, kurių idealioji įmagnetinimo struktūra yra apytikriai nustatoma. Kaip Halbacho schema sukuria šiuos stiprios pusės ir silpnos pusės laukus, pavaizduota 1.16 pav. b [82].



1.16 pav. a) Halbacho schema, kai $N=8$; b) Halbacho schema ištirta baigtinių elementų metodu [82]

Halbacho schemas parametras yra skaičius N , kuris yra struktūros blokų skaičius bangos ilgiui. Kitas modelio parametras yra bloko storis D . Paveikslėlyje 1.16 a matoma Halbacho struktūra, kurios $N = 8$, o vektorius kiekviename bloke pasisuka 45° . Struktūros blokai nebūtinai turi būti kvadrato formos. Paveiksle 1.16 b matoma Halbacho struktūra, kurios $N= 8$, o magnetų skerspjūvio plotas yra keturkampis. Struktūros dvimačiame vaizde yra uždaros formos, bet trimatis vaizdas stipriai pakeičia laukų amplitudę prie struktūros galų ir už oro tarpų. Taip pat struktūros galuose silpnosios pusės laukas yra didesnis nei nuspėjama dvimatėje analizėje, taip pat dėl trimačio efekto.



1.17 pav. a) Halbacho schema ištirta baigtinių elementų metodu, kai $N=4$; b) Halbacho schemas stipriosios ir silpnosios pusės magnetinis laukas [82]

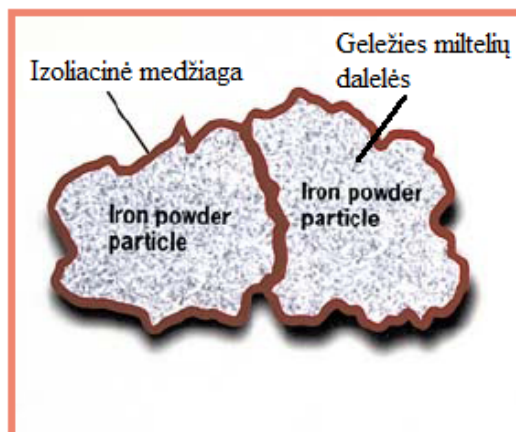
Halbacho schemas stipriojoje pusėje dominuoja pirmoji harmonika. Pirmoji silpnosios pusės harmonika yra pašalinama ir dominuojanti yra trečioji harmonika, kai $N= 4$ (1.17 pav.). $N= 8$

Tiesiaėigio švytuojamojo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametrų įtaka variklio rodikliams struktūroje, septintoji silpnosios pusės harmonika yra dominuojanti. Reikia pastebėti, kad silpnosios pusės laukai greitai silpnėja tolstant nuo magneto paviršiaus (1.17 pav. b) [82].

1.4. Minkštamagnetinės kompozitinės medžiagos (SMC)

Minkštamagnetinės kompozitinės medžiagos (SMC) yra naujoji alternatyva tradicinėms medžiagoms, tokioms kaip minkštieji magnetiniai feritai ir elektrotechniniai plienai, kintamų magnetinių laukų pritaikyme. Kadangi šių medžiagų potencialas yra didelis, jos yra įdomios miltelių metalurgijos (PM) pramonei. Pritaikant medžiagos savybes bei PM formavimo technologiją galima gauti naują konkurencingą elektromagnetinį modelį. Šių medžiagų pagrindines technologijos savybes ir nauda pateikta žemiau.

SMC medžiagos yra geležies miltelių dalelės atskirtos izoliatoriaus sluoksniu kaip parodyta 1.18 pav. Miltelių metalurgijos procesas buvo ilgą laiką naudojamas gaminant SMC komponentus aukšto dažnio induktoriams. Šios tradicinės SMC medžiagos daugiausiai susideda iš geležies dalelių, paskirstytų organinių medžiagų terpėje. Dėl pasiskirsčiusio oro tarpo ir gero aukšto dažnio veikimo branduoliai, pagaminti iš geležies SMC medžiagų, šiandien vis dar yra pats ekonomiškiausias sprendimas gaminant induktyvius komponentus įvairiose filtravimo ir galios keitimo srityse.



1.18 pav. SMC medžiagos schematinis vaizdavimas [28]

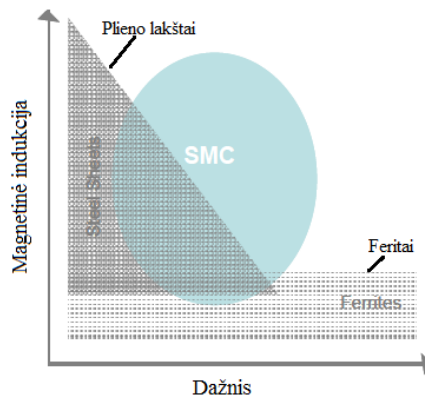
Gana neseniai SMC grupė buvo išplėsta pristatius naujas medžiagas. Šios medžiagos neturi organinės terpės, kuri riboja veikimo sąlygas. Tampa įmanoma pagaminti komponentus su daug didesne sotes indukcija, pralaidumu taip pat mažesniais histerezės nuostoliais. Todėl SMC dabar yra alternatyva elektrotechniniam plienams žemo – vidutinio dažnio srityse, tokiose kaip

TMPE – 12, Justinas Gerbenis

Tiesiaieigio švytuojamojo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametrų įtaka variklio rodikliams sukiosios mašinos, jutikliai ir greitai persijungiantys elektromagnetai. Kadangi technologija vis dar yra gana nauja, pritaikymas, medžiagos, procesai greitai vystosi [28].

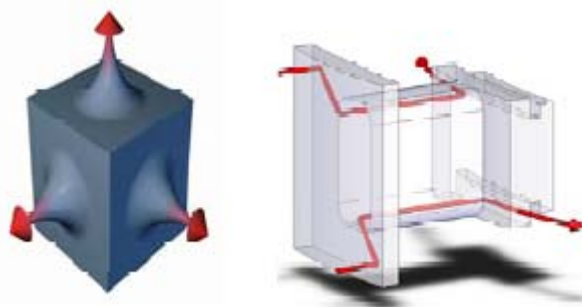
Iš esmės yra trys pagrindinės technologijos savybės:

1. Unikalus magnetinės soties ir žemų sūkurinių srovių nuostolių derinys (1.19 pav.)



1.19 pav. SMC palyginimas su tradicinėmis medžiagomis [28]

2. Trijų dimensijų srauto pernešimo galimybė 1.20 paveiksle pavaizduotos šios savybės vaizduoja šią savybę tiek paprastai geometriškai, tiek šiek tiek sudėtingesne struktūra. Dėl izotropinių SMC medžiagų savybių įmanoma suprojektuoti komponentus su 3D srautu. Ši savybė gali būti panaudojama gaminant dalis, kurios sukonzentruoja srautą. Tai yra viena iš pagrindinių savybių mažinant elektros mašinų dydžius [81].



1.20 pav. Trijų dimensijų srauto pernešimo galimybė pavaizduota paprastai geometriškai, ir sudėtingesne struktūra [28]

3. Ekonomiškiausia yra trijų dimensijų tinklo formos miltelių metalurgijos komponentų gamyba (1.21 pav.). SMC dalių gamyba susideda iš dviejų pagrindinių procesų: suspaudimo ir apdorojimo karščiu. Medžiagos atliekų būna mažai, nepriklausomai nuo komponento formos. Galima pasiekti didelį komponentų matmenų tikslumą ir lygius paviršius. SMC medžiagos savybės

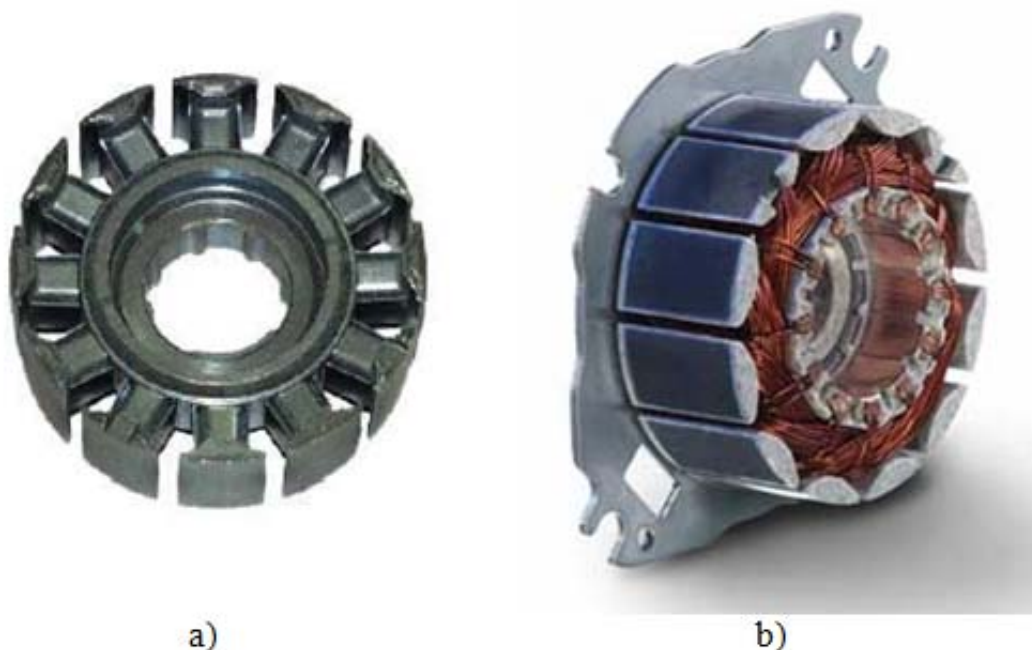
TMPE – 12, Justinas Gerbenis

Tiesiaeigio švytuojamojo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametrų įtaka variklio rodikliams yra beveik vienodos visomis kryptimis, nes tai yra izotropinė medžiaga. Šių medžiagų šeima gali būti unikaliai suformuota specifiniams pritaikymo poreikiams [81].



1.21 pav. Miltelių metalurgijos procesas [28]

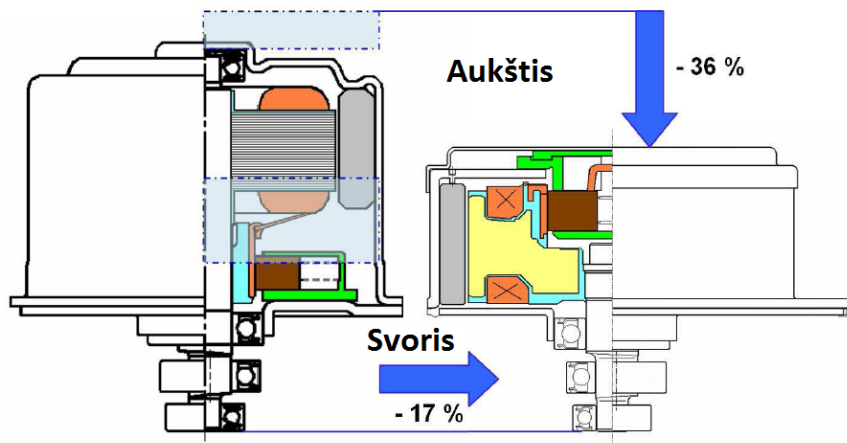
Aisin Seiki Co įmonė Japonijoje patobulino BDC elektros varikliu varoma alyvos pompą naudojama automobilio ABS stabdžių sistemoje. Pagrindinis tikslas buvo dydžio ir masės sumažinimas. Šiam tikslui pasiekti vietoje elektrotechninio plieno lakštų statoriuje buvo pagamintas statorius iš SMC medžiagos (1.22 pav.) [81].



1.22 pav. BDC variklio: a) statoriaus magnetolaidis iš SMC medžiagos, b) statorius su apvijomis [81]

Tiesiaieigio švytuojamojo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametrų įtaka variklio rodikliams

Panaudojus statorių, pagaminta iš SMC medžiagos, tolygiai pasiskirsto srautas magnetolaidyje, nes yra pasiekiamas arti 100 procentų magnetolaidžio užpildymo koeficientas ir supaprastėja apvijų suvyniojimas magnetolaidyje.



1.23 pav. Palyginamas seno ir naujo dizaino elektros variklis naudojamas alyvos pompos pavaroje [79]

1.23 paveiksle pavaizduotas naujo dizaino elektros variklis yra 36 procentais mažesnis ir 17 procentų lengvesnis, nei originalus elektros variklis pagamintas iš elektrotechninio plieno lakštų. Taip pat sumažėjo detalių skaičius, kas palengvino elektros variklio surinkimą, variklis tapo kompaktiškesnis.

Tiesiaieigis švytuojamojo judesio sinchroninis žadinamasis elektros variklis buvo pritaikytas Stirlingo šiluminės mašinos pavaroje (1.25 pav., 1.24 pav.).

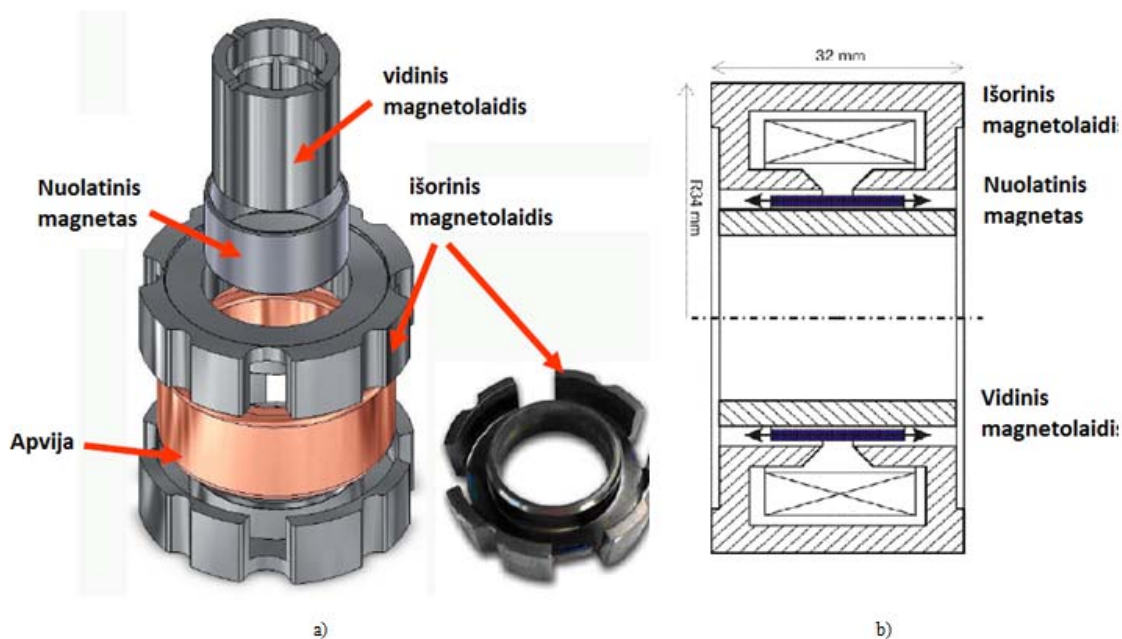


(a)



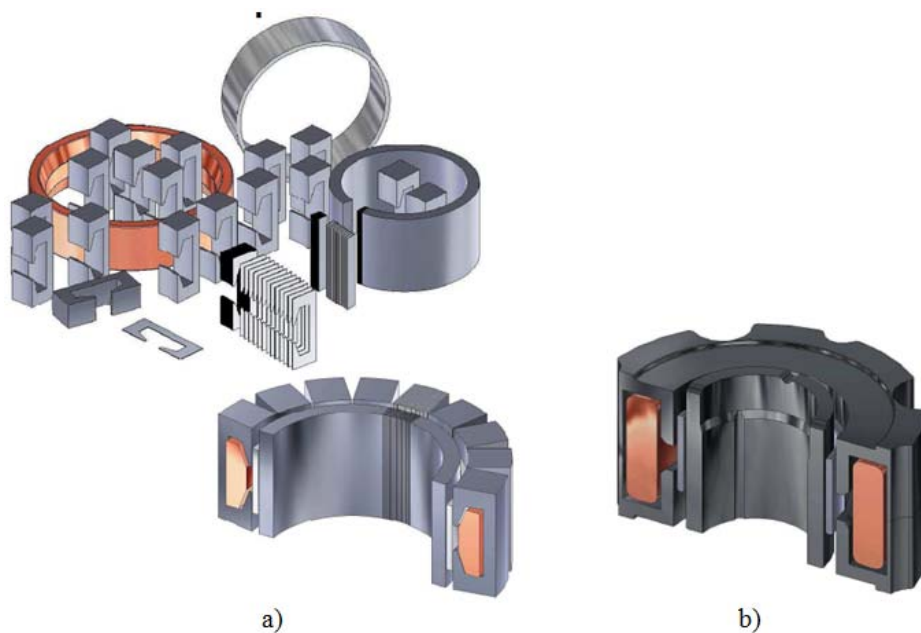
(b)

1.24 pav. Twinbird įmonės gaminama Stirlingo šiluminė mašina [64]



1.25 pav. Twinbird įmonės gaminama Stirlingo šiluminė mašina: a) Strilingo šiluminė mašina b) principinė švytuojamojo tiesiaeigio judesio elektros variklio schema [64]

Tradiciškai švytuojamojo tiesiaeigio judesio elektros variklio vidinis ir išorinis magnetolaidis gaminamas iš elektrotechninio plieno lakštų (1.26 pav. a). Norint, kad variklis taptų kompaktiškesnis, sumažėtų jo masė ir skleidžiamas garsas, vidinis ir išorinis magnetolaidis pagamintas iš elektrotechninio plieno lakštu pakeičiamas į magnetolaidžius pagamintus iš SMC medžiagos (1.26 pav. b) [64].



1.26 pav. Švytuojamasis tiesiaeigio judesio elektros variklis: a) surinktas iš elektrotechninio plieno lakštų (1300 detalių), b) SMC medžiagos (5 detalės) [29]

TMPE – 12, Justinas Gerbenis

Tiesiaeigio švytuojamojo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametrų įtaka variklio rodikliams

Gaminant švytuojamąjį tiesiaeigio judesio elektros variklį iš elektrotechninio plieno lakštų reikia panaudoti 1300 detalių, tai labai apsunkina variklio surinkimą. Gaminant vidinį magnetolaidį iš lakštų užpildymo koeficientas labai mažėja artėjant prie oro tarpo ir mažiausias užpildymo koeficientas yra oro tarpe šalia magneto. Taip pat iškyla apvijų įstatymo į išorinį magnetolaidį problema. Visų šių problemų nelieka, jeigu gaminame variklį iš SMC medžiagos. Išorinį statorių galima pagaminti iš dviejų dalių (1.25 pav. a), taip supaprastėja variklio surinkimas ir apvijų įstatymas į magnetolaidį. SMC koncepcija leidžia efektyviau išnaudoti apvijas. Dėl trumpesnių apvijų gali būti sumažintas vario kiekis. Izoliacija sumažinama dėl to, jog SMC komponentų paviršiai lygūs. Mažesnė izoliacija pagerina šiluminės savybes. SMC detalių gamybos metu pasiekiamas 100 proc. užpildymo koeficientas. Žema galutinė variklio kaina skatina atkreipti dėmesį į dvi pagrindines sritis: dalių skaičių ir integruotas savybes. Kainos pranašumas atsiranda dėl mažo dalių skaičiaus. Papildomos dalys, tokios kaip varžtai ir veržlės, gali būti pašalinti panaudojus integruotą konstrukciją su iš anksto paruoštomis surinkimo galimybėmis. Gamybos lankstumas leidžia išoriniame magnetolaidyje suformuoti tvirtinimo sekcijas ir aušinimo plokšteles [64].

Taigi, panaudojus SMC medžiagas supaprastėja surinkimas ir sumažėja gamybos kaina. Sumažėja svoris ir sklaidžiamas garsas. Pakeitus elektrotechninio plieno lakštų detales į SMC Stirlingo šiluminės mašinos charakteristikos išlieka panašios.

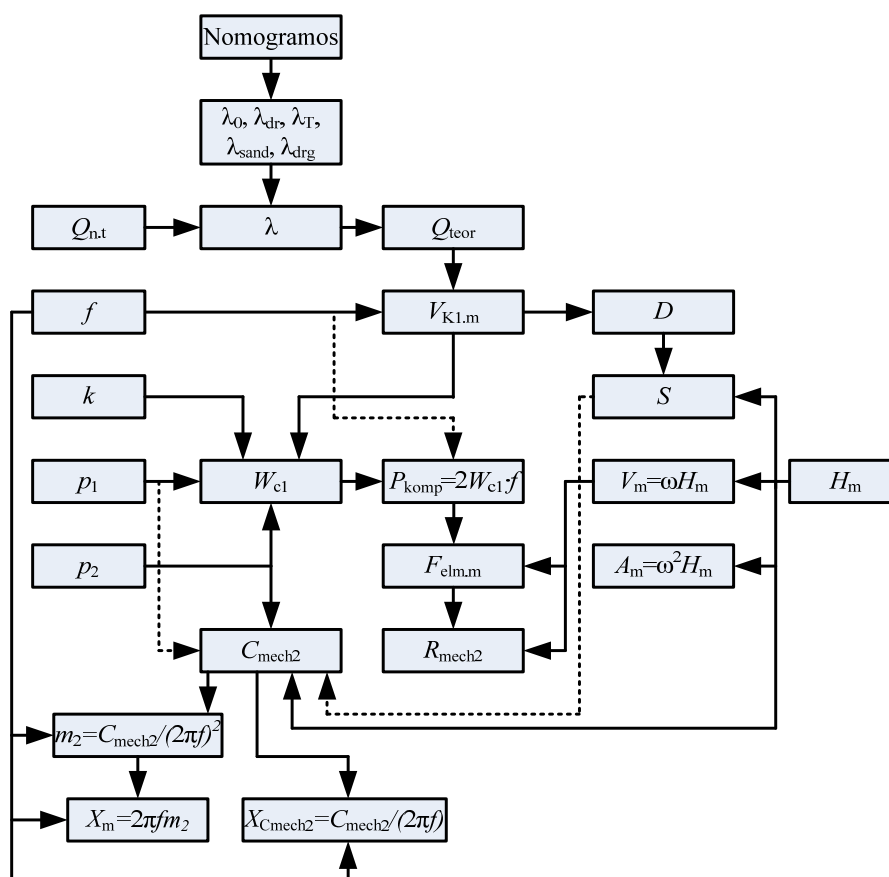
2. MATEMATINIS APRAŠYMAS

Darbe nagrinėjamas tiesiaeigis švytuojamasis žadinamasis elektros variklis. Minėtas elektros variklis turi būti projektuojamas kartu su darbo mechanizmu. Šiuo atveju pasirinktas dvipusis bespyruoklis stūmoklinis kompresorius, kuris yra neatskiriama viso įtaiso dalis. Šiame skyriuje pateikiamas tiesiaeigio švytuojamojo judesio sinchroninio žadinamojo variklio-kompresoriaus kūrimo eiga atsižvelgiant į įrenginio apkrovos mechanizmo parametrus, derinant konstrukcinius parametrus prie rezonansinio dažnio, kuris prilyginamas maitinančios įtampos dažniui (50 Hz).

Darbe analizuojamas įtaisas, kurio pagrindiniai duomenys įtaiso kūrimui yra: nominalusis našumas – $Q_{n,t} = 100 \text{ l/min}$ ($0,00167 \text{ m}^3/\text{s}$); įsiurbimo slėgis – $p_1 = 1 \text{ atm}$ (101325 Pa); įsiurbiamo oro temperatūra – $T_0 = 293 \text{ K}$; suspaudimo slėgis – iki $p_2 = 6 \text{ atm}$ (607950 Pa); didžiausia švytavimų amplitudė, skaičiuojant nuo centrinės judžiosios dalies padėties – $H_m = 8 \text{ mm}$ ($0,008 \text{ m}$); variklis žadinamas nuolatiniiais magnetais; variklio-kompresoriaus konstrukcija – stūmoklinis dvipusis, dvimasis, bespyruoklis, pulsuojamosios srovės, naudingumo koeficientas – ne mažiau

2.1. Variklio konstrukcinių parametrų parinkimas

Skaiciavimų schematizuota seka pateikiama 2.1 paveiksle. Kairėje pusėje yra pradiniai duomenys, kurie yra užsiduodami kūrimo pradžioje. Ir iš jų išsiskaičiuojami reikalingi mechaninės apkrovos parametrai tolimesniems skaičiavimams.



2.1 pav. Mechaninės sistemos parametrų skaičiavimo algoritmas

Remiantis pradiniais duomenimis buvo nustatyti sekantys kompresoriaus parametrai ir kintamieji: teorinis kompresoriaus našumas Q_{teor} , iš nomogramų ir kreivių nustatytas pataisos koeficientas λ , vienos pusės kameros didžiausias tūris $V_{K1.m}$, cilindro diametras D , judžiosios dalies greičio V_m ir pagreičio A_m amplitudės, vieno ciklo vieno kompresoriaus pusės atliekamas darbas W_{c1} , kompresoriaus galia P_{komp} , trinties didžiausia jėga $F_{tr.m}$. Apskaičiuoti kompresoriaus parametrai pateikti 2.1 lentelėje.

Remiantis aukščiau apskaičiuotais dydžiais, apskaičiuojami sutiesintos mechaninės apkrovos parametrai:

1) Apskaičiuojamas ekvivalentinės „oro spyruoklės“ standumas:

$$F = k \cdot x = C_{mech2} \cdot H \quad (2.1)$$

$$F = \Delta p \cdot S \quad (2.2)$$

$$\Delta p \cdot S = C_{mech2} \cdot H \quad (2.3)$$

$$C_{mech2} = \frac{\Delta p \cdot S}{2 \cdot (H_m - \Delta h)} = \frac{\Delta p \cdot S}{2 \cdot (H_m \cdot (1 - 0,05))} = \frac{0,5066 \cdot 10^6 \cdot 0,00151}{2 \cdot (0,008 \cdot 0,95)} = 50322,27 [N / m] \quad (2.4)$$

čia S – cilindro skerspjūvio plotas, m^2 ; Δh – judžiosios dalies koordinatės eigos skirtumas iki cilindro dugno (pradiniamis skaičiavimams priimtas 5% H_m).

2) Apskaičiuojama judžiosios dalies masė:

$$m_2 = \frac{C_{mech2}}{\omega^2} = \frac{50322,27}{314^2} = 0,510 [kg] \quad (2.5)$$

3) Apskaičiuojama reaktyvioji „oro spyruoklės“ mechaninė varža rezonanso metu:

$$X_{C_{mech2}} = \frac{C_{mech2}}{\omega} = \frac{50322,27}{314} = 160,26 [Ns / m] \quad (2.6)$$

4) Apskaičiuojama reaktyvioji mechaninė varža rezonanso metu:

$$X_m = \omega \cdot m_2 = 314 \cdot 0,510 = 160,14 [Ns / m] \quad (2.7)$$

5) Apskaičiuojama elektromagnetinė jėga (jos amplitudė) rezonanso metu:

$$F_{elm.m.} = \frac{2 \cdot P_{komp}}{V_m} = \frac{2 \cdot 404}{2,5} = 323 [N] \quad (2.8)$$

6) Apskaičiuojama mechaninė aktyvioji varža rezonanso metu:

$$R_{mech2} = \frac{F_{elm.m.}}{V} = \frac{323}{2,5} = 129,2 [Ns / m] \quad (2.9)$$

7) Apskaičiuojama bendroji įrenginio mechaninė kompleksinė varža rezonanso metu:

$$\underline{Z}_{mech} = R_{tr} + R_{mech2} + j \left(\omega m_2 - \frac{C_{mech2}}{\omega} \right) = 0,15 + 129,2 + j(160,14 - 160,26) = 129,35 [Ns / m] \quad (2.10)$$

8) Sudaromos greičio, pagreičio, jėgos ir eigos momentinės išraiškos:

$$V = V_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_v) = 2,5 \cdot \sin(314 \cdot t + \varphi_v) \quad (2.11)$$

Tiesiaieigio švytuojamojo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametrų įtaka variklio rodikliams

$$A = A_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_A) = 788,8 \cdot \sin(314 \cdot t + \varphi_A) \quad (2.12)$$

$$F = F_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_F) = 323 \cdot \sin(314 \cdot t + \varphi_F) \quad (2.13)$$

$$H = H_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_H) = 0,008 \cdot \sin(314 \cdot t + \varphi_H) \quad (2.14)$$

9) Variklio-kompresoriaus nuostolių skaičiavimas:

$$P = P_{mezh} + P_{Fe} + P_{Cu} = 0,93 + 7,5 + 64 = 72,43[W] \quad (2.15)$$

10) Naudingumo koeficiento skaičiavimas:

$$\eta = \frac{P_{komp}}{P_{komp} + P} = \frac{404}{404 + 72,45} = 0.847 \quad (2.16)$$

Galios koeficiento skaičiavimas:

11) Apskaičiuojamas koeficientas delta:

$$\Delta = (k_{eq} - \omega^2 m)^2 + (\omega B + h_{eq})^2 = (50322,30 - 314^2 \cdot 0,51)^2 + (314 \cdot 0,15 + 0,411)^2 = 3,73 \cdot 10^3 \quad (2.17)$$

12) Apskaičiuojama ekvivalentinė mechaninė varža:

$$R_{ec} = \frac{\omega K_{Ta}^2 (\omega B + h_{eq})}{\Delta} = \frac{314 \cdot 229,09^2 \cdot (314 \cdot 0,15 + 0,41)}{3,73 \cdot 10^3} = 2,10 \cdot 10^5 [\Omega] \quad (2.18)$$

13) Apskaičiuojamas ekvivalentinis mechaninis induktyvumas:

$$L_{ec} = K_{Ta}^2 \frac{(k_{eq} + \omega^2 \cdot m)}{\Delta} = 229,09^2 \cdot \frac{(50322,30 + 314^2 \cdot 0,51)}{3,73 \cdot 10^3} = 539,83[H] \quad (2.19)$$

14) Apskaičiuojama ekvivalentinė variklio-kompresoriaus varža:

$$R_{es} = R + R_{ec} = 64,17 + 2,10 \cdot 10^5 = 2,10 \cdot 10^5 [\Omega] \quad (2.20)$$

15) Apskaičiuojamas ekvivalentinis variklio-kompresoriaus induktyvumas:

$$L_{es} = L + L_{ec} = 2,13 + 539,83 = 541,96[H] \quad (2.21)$$

16) Apskaičiuojamas galio koeficientas:

$$\cos \varphi = \frac{R_{es}}{\sqrt{R_{es}^2 + (\omega L_{es})^2}} = \frac{2,10 \cdot 10^5}{\sqrt{(2,10 \cdot 10^5)^2 + (314 \cdot 541,96)^2}} = 0,79 \quad (2.22)$$

Visi prieš tai paminėti parametrai ir kintamieji apskaičiuoti naudojantis sutiesintos apkrovos principu, nes kompresoriaus apkrova varikliui, veikia kaip žemo dažnio filtras ir visi kintamieji dydžiai mechaninėje įrenginio dalyje turi tik pirmąsias harmonikas [13]. Apskaičiuoti kintamieji ir parametrai pateikiami 2.1 lentelėje.

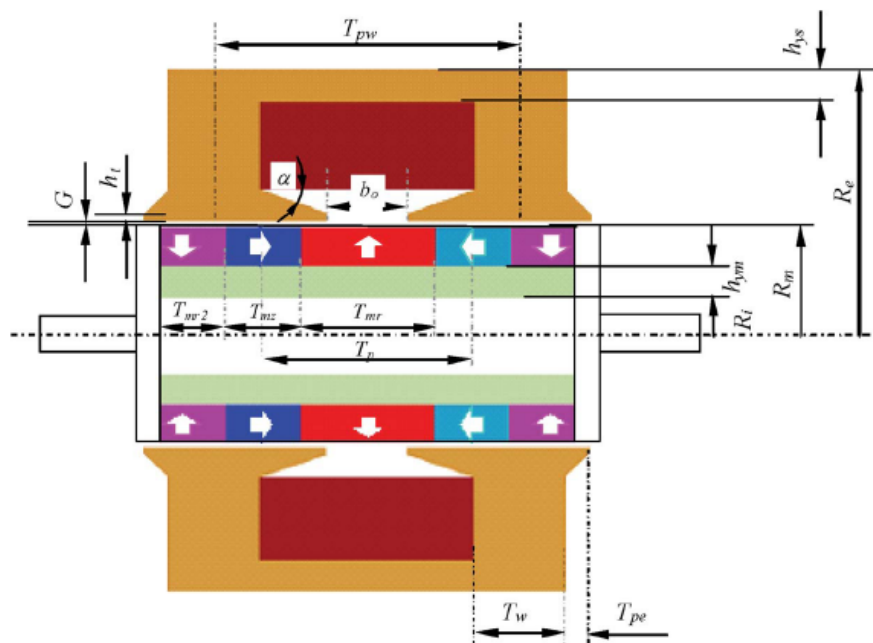
2.1 lentelė. Mechaninės įrenginio sistemos parametrų skaičiavimo rezultatai

Pradiniai duomenys				Skačiavimo rezultatai						
				λ_0	λ_{dr}	λ_T	λ_{sand}	λ_{drg}	λ	Q_{teor}
				-	-	-	-	-	-	m ³ /s
				0,795	0,95	0,95	0,97	0,99	0,69	$2,42 \cdot 10^{-3}$
$Q_{n.t}$	p_2	p_1	H_m	$V_{K1.m}$	D	V_m	A_m	W_{cl}	P_{komp}	$F_{tr.m}$
m ³ /s	Pa	Pa	m	m ³	m	m/s	m ² /s	J	W	N
$1,67 \cdot 10^{-3}$	607950	101325	$8 \cdot 10^{-3}$	$2,42 \cdot 10^{-5}$	$4,46 \cdot 10^{-2}$	2,512	788,8	4,04	404	0,4
T_0	η	$\cos\phi$	f	R_{mech2}	C_{mech2}	m_2	X_{Cmech2}	X_m	ϕ_{Zmech}	$F_{elm.m}$
K	-	-	Hz	Ns/m	N/m	kg	Ns/m	Ns/m	°	N
293	0,7	0,8	50	129,2	50322,3	0,510	160,14	160,26	0	323,2

ϕ_{Zmech} skaičiavimas neįtrauktas, nes rezonanso atveju fazė lygi nuliui.

2.2. Variklio konstrukcija ir parametrai

Judžiosios dalies ir statoriaus magnetinė grandinė parinkta remiantis 1.6 pav. variantu, dėl šios grandinės efektyvesnio magnetinio lauko sukūrimo. Pasirinktas žadinamasis variklis su dvejomis magnetovaromis. Statoriuje kintamą magnetovarą kuria kintamos srovės vienfazė apvija, o judžiojoje dalyje magnetovarą kuria nuolatiniai magnetai išdėstyti pagal Halbacho schemą.



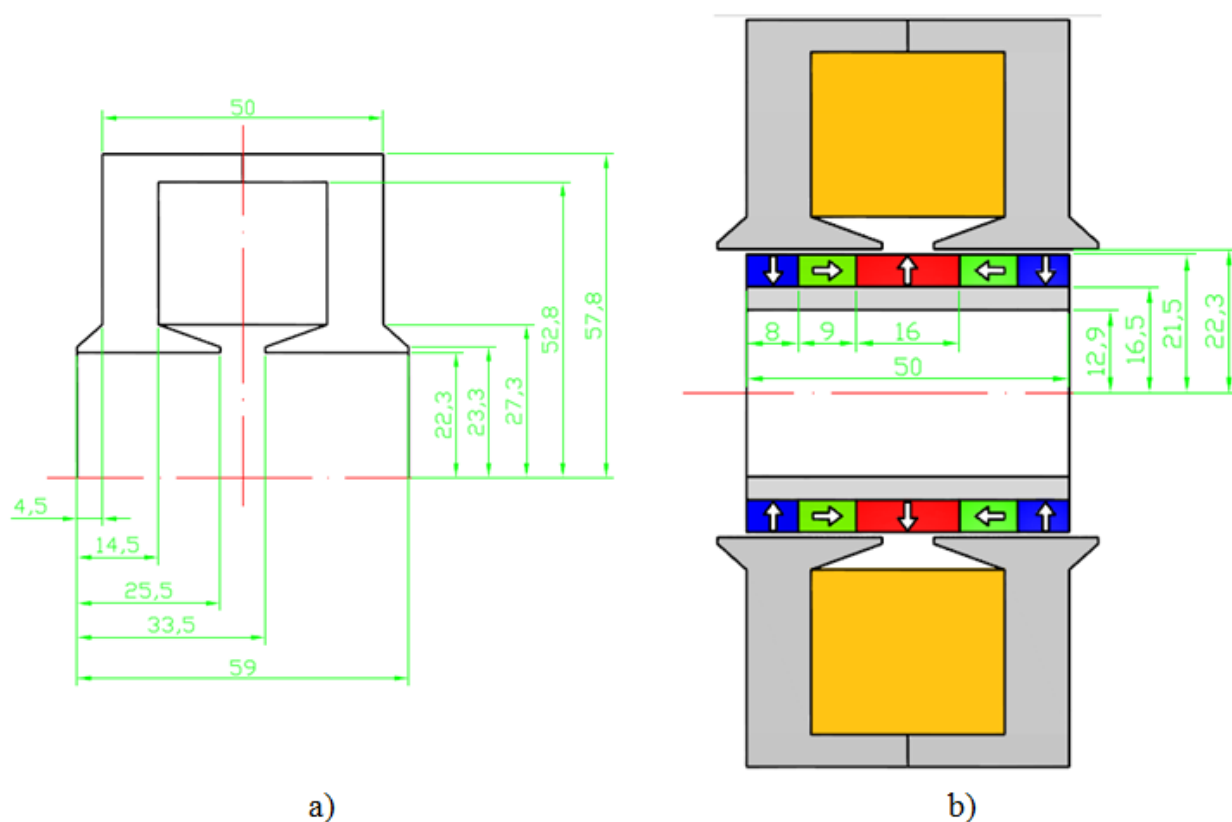
2.2 pav. Variklio konstrukcija ir parametrai

Tiesiaieigio švytuojamojo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametrų įtaka variklio rodikliams

Variklio parametrai (2.2 pav.) h_t , b_0 ir α lemia mašinos savybes, kurių vertės nustatytos: 0,001 m, 0,008 m ir 20 laipsnių atitinkamai.

Nors variklio sukuriama jėga didėja mažėjant oro tarpui G , jo mažiausia vertė yra ribojama gamybos ir surinkimo galimybių. Variklyje oro tarpas G yra 0,0008 m. Variklio naudingumo koeficientas gerėja, didėjant išorinio statoriaus spinduliui R_e , tačiau duotoms modelio specifikacijoms naudingumas mažėja, kai R_e yra didesnis nei 0,05 m. Ši vertė buvo pasirinkta kaip išorinio statoriaus spindulys R_e , tačiau dėl apvijų parametrų spindulys buvo padidintas iki 0,0578 m. Pagrindiniai parametrai lementis variklio savybes yra matmenų santykiai R_m/R_e ir T_{mr}/T_p . Didžiausias efektyvumas pasiekiamas, kai T_{mr}/T_p matmenų santykis yra nuo 0,5 iki 0,7, o R_m/R_e santykis yra nuo 0,36 iki 0,44. Variklio matmenų R_m/R_e santykiai lygus 0,37, o T_{mr}/T_p santykis lygus 0,64. Žinant elektromagnetinės jėgos amplitudės reikšmę, pasirinkus laido diametrą 0,5 mm ir priimant, kad efektinė srovė 1 A. Baigtinių elementų metodu apskaičiuota, kad apvija sudarys 3030 vijų. Variklio parametrų vertės pateiktos 2.2 lentelėje.

Variklio brėžinys su magnetolaidžio ir judančios dalies matmenimis pateiktas 2.3 paveiksle.

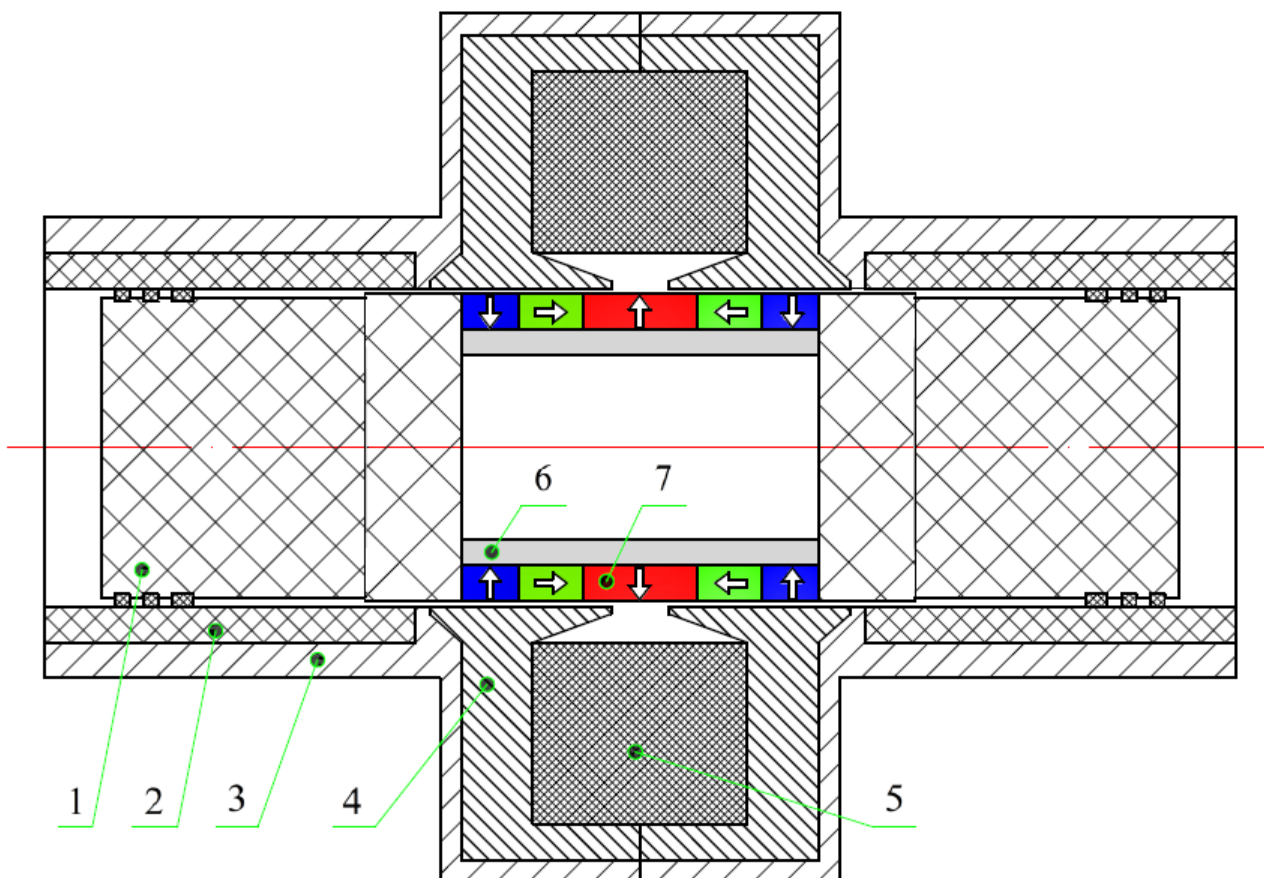


2.3 pav. Variklio brėžinys: a) magnetolaidžio brėžinys su matmenimis, b) judžiosios dalies brėžinys su matmenimis

2.2 lentelė. Variklio parametų vertės

Magnetolaidžio matmenys							
R_e	T_{pw}	h_{ys}	h_t	T_{pe}	T_w	α	b_0
0,0578	0,04	0,005	0,001	0,0045	0,01	20	0,008
Judžiosios dalies matmenys							
T_{mr2}	T_{mz}	T_{mr}	T_p	R_m	R_i	h_m	
0,008	0,009	0,016	0,025	0,0215	0,0129	0,005	

Elektros variklio-kompresoriaus pjūvis pavaizduotas 2.4 pav.



2.4 pav. Elektros variklio – kompresoriaus pjūvis

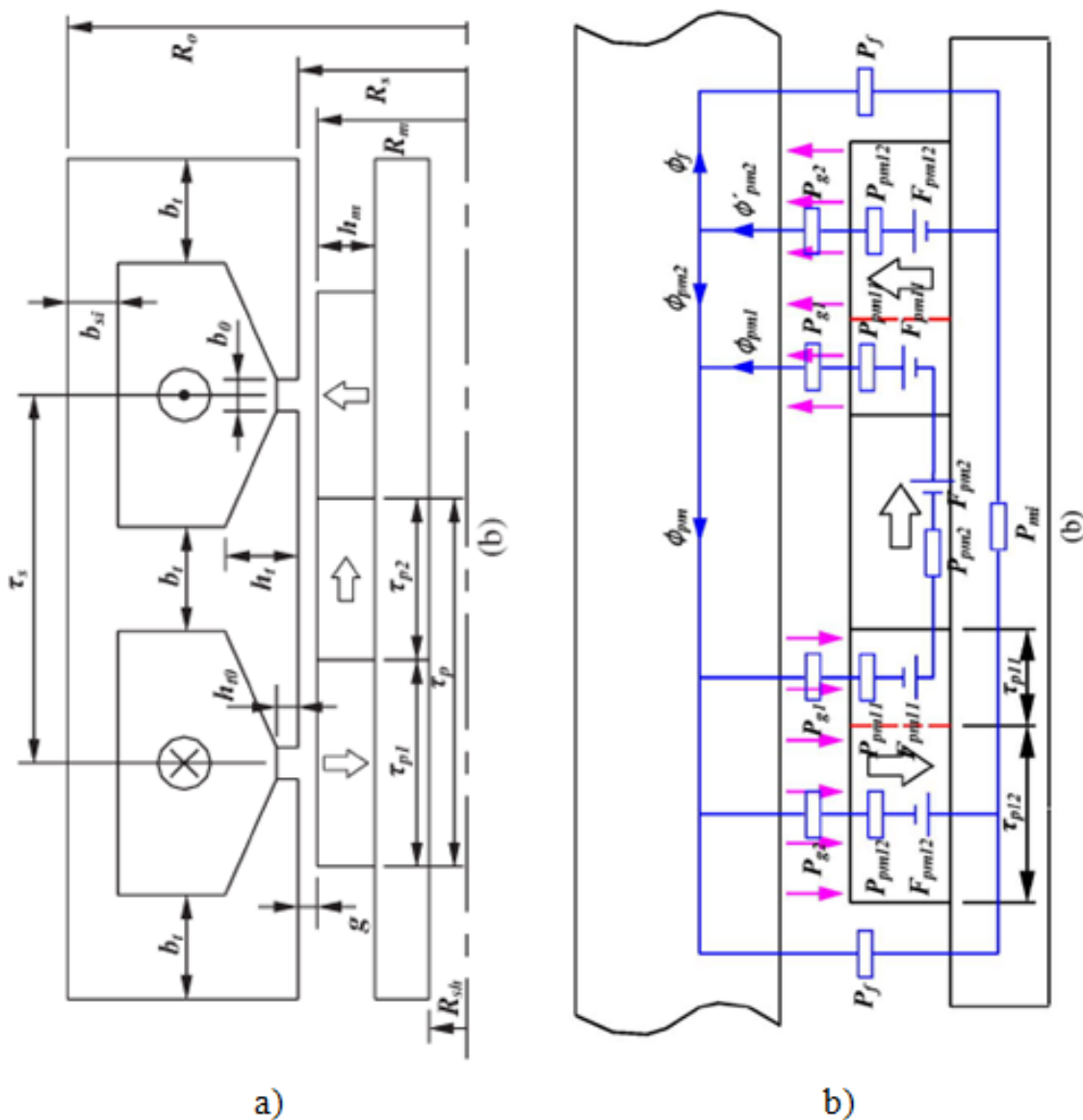
2.4 paveiksle pirmuoju numerių pažymėtas stūmoklis ir žiedai. Pagal apskaičiuotą cilindro vidinį diametrą parenkame stūmoklį ir žiedus. Antruoju numeriu pažymėta įvorė. Sausosios įvorės įpresuojamos į cilindre ištekintus lizdus. Magnetolaidžiui (4) sutvirtinti bus naudojamas cilindras(3). Jis apgaus magnetolaidį ir taip pat bus panaudotas kaip kompresoriaus kamera, kurioje bus suslegiamas oras. Cilindras apgaus magnetolaidį ir bus sutvirtinamas varžtais.

Tiesiaieigio švytuojamojo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametrų įtaka variklio rodikliams

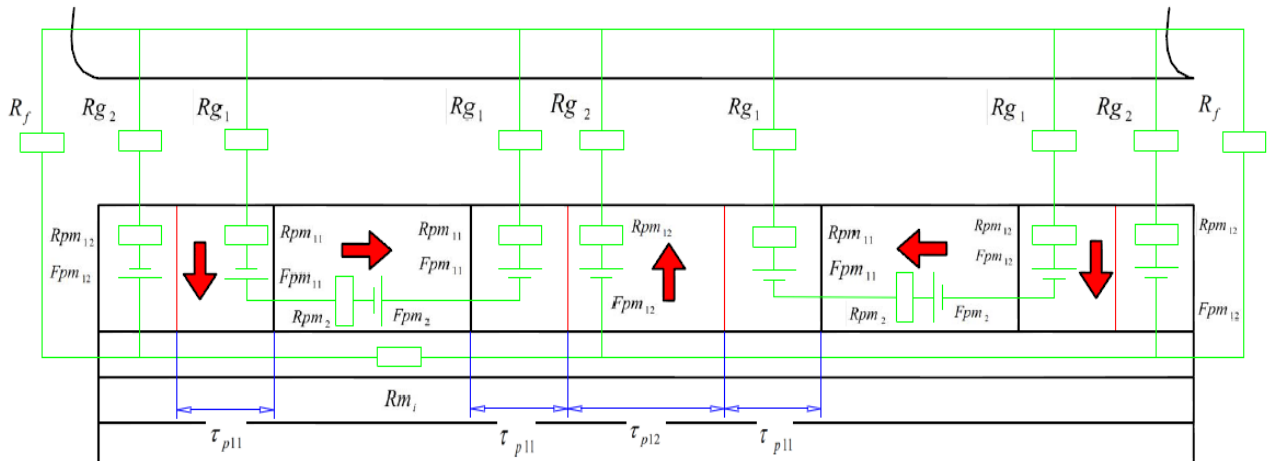
Cilindrai būna pagaminti iš pilkojo ketaus, legiruoto chromu, nikeliu, molibdenu arba iš aliuminio lydinių. Penktuoju numeriu pažymėta vienfazė kintamos srovės apvija. Vidinis statoriaus magnetolaidis žymimas šeštuoju numeriu. Septintuoju numeriu pažymėti nuolatiniai magnetai išdėstyti Halbacho schema.

2.3. Ekvivalentinės magnetinės ir elektrinės grandinės sudarymas

Remiantis [13] ir [58] straipsniuose pateiktais ekvivalentinės magnetinės grandinės sudarymo pavyzdžiais (2.5 pav.) sudaryta variklio oro tarpo ekvivalentinė magnetinė grandinė (2.6 pav.).



2.5 pav. Tiesiaieigio švytuojamojo judesio elektros variklio: a) konstrukcija ir parametrai, b) oro tarpo ekvivalentinė magnetinė grandinė [13]



2.6 pav. Variklio oro tarpo ekvivalentinė magnetinė grandinė

Sudarius oro tarpo ekvivalentinę magnetinę grandinę atliekami preliminarus grandinės skaičiavimai. Analitinių metodu apskaičiuojamos oro tarpo, magnetų ir vidinio magnetolaidžio magnetinės varžos ir magnetiniai laidžiai, magnetų magnetiniai srautai ir magnetovarų jėgos. Iš gautu rezultatų apskaičiuojamas bendras magnetinis srautas oro tarpe, kurį sukuria nuolatiniai magnetai išdėstyti Halbacho schema. Oro tarpo magnetinės grandinės analitiniai skaičiavimai naudojami projektavimo stadijoje apskaičiuoti pasirinktos variklio konstrukcijos išvystomą elektromagnetinę jėgą. Šie analitiniai skaičiavimai gali būti naudojami kaip analogas baigtinių elemento metodui.

Oro tarpo ekvivalentinės magnetinės grandinės skaičiavimai:

1) Apskaičiuojamas τ_{p11} ir τ_{p12} :

$$\tau_{p11} = \frac{R_m^2 - (R_m - h_m)^2}{2 \cdot R_m} = \frac{21,5^2 - (21,5 - 5)^2}{2 \cdot 21,5} = 4,42 \text{ mm} = 4,42 \cdot 10^{-3} [\text{m}] \quad (2.23)$$

$$\tau_{p12} = \tau_{p1} - \tau_{p11} = 8 \cdot 10^{-3} - 4,42 \cdot 10^{-3} = 3,58 \cdot 10^{-3} [\text{m}] \quad (2.24)$$

2) Apskaičiuojamos magnetų magnetinės varžos:

$$R_{pm11} = \frac{l}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_{vid} \cdot \tau_{p11}} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{1,045 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 19 \cdot 10^{-3} \cdot 4,4 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 3,14} = 7,26 \cdot 10^6 [H^{-1}] \quad (2.26)$$

$$R_{pm12} = \frac{l}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_{vid} \cdot \tau_{p12}} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{1,045 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 19 \cdot 10^{-3} \cdot 7,16 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 3,14} = 4,46 \cdot 10^6 [H^{-1}] \quad (2.27)$$

Tiesiaieigio švytuojamąo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametų įtaka variklio rodikliams

$$R_{pm2} = \frac{l}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot S} = \frac{9 \cdot 10^{-3}}{1,045 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 11,93 \cdot 10^{-4}} = 5,7 \cdot 10^6 [H^{-1}] \quad (2.28)$$

3) Apskaičiuojamas magnetų magnetinis srautas:

$$\Phi_{pm11} = \frac{H_{pm11} \cdot l}{R_{pm11}} = \frac{434320 \cdot 4,4 \cdot 10^{-3}}{7,26 \cdot 10^6} = 0,26 [mWb] \quad (2.29)$$

$$\Phi_{pm12} = \frac{H_{pm12} \cdot l}{R_{pm12}} = \frac{523137 \cdot 7,16 \cdot 10^{-3}}{4,46 \cdot 10^6} = 0,84 [mWb] \quad (2.30)$$

$$\Phi_{pm2} = \frac{H_{pm2} \cdot l}{R_{pm2}} = \frac{115303 \cdot 9 \cdot 10^{-3}}{5,7 \cdot 10^6} = 0,18 [mWb] \quad (2.31)$$

4) Apskaičiuojama magnetų magnetovaros jėga:

$$F_{pm11} = \Phi_{pm11} \cdot R_{pm11} = 0,26 \cdot 10^{-3} \cdot 7,26 \cdot 10^6 = 1,888 \cdot 10^3 [A] \quad (2.32)$$

$$F_{pm12} = \Phi_{pm12} \cdot R_{pm12} = 0,84 \cdot 10^{-3} \cdot 4,46 \cdot 10^6 = 3,75 \cdot 10^3 [A] \quad (2.33)$$

$$F_{pm2} = \Phi_{pm2} \cdot R_{pm2} = 0,18 \cdot 10^{-3} \cdot 5,7 \cdot 10^6 = 1,03 \cdot 10^3 [A] \quad (2.34)$$

5) Apskaičiuojamas vidinio magnetolaidžio magnetinis laidis:

$$\Lambda_{mi} = \mu_0 \cdot \mu_{rmi} \frac{\pi \cdot [(R_m - h_m)^2 - R_{sh}^2]}{\tau_{p2} + 2 \cdot \tau_{p11}} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot \frac{\pi \cdot [(0,0215 - 0,005)^2 - 0,0129^2]}{0,009 + 2 \cdot 0,00442} =$$

$$= 0,023 \cdot 10^{-6} [H] \quad (2.35)$$

6) Apskaičiuojami oro tarpo magnetiniai laidžiai:

$$\Lambda_f = \mu_0 \cdot \frac{\pi \cdot \tau_{p2} (2 \cdot R_s - g - h_m)}{2(g + h_m)} = 12,56 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\pi \cdot 0,009 \cdot (2 \cdot 0,0223 - 0,0008 - 0,005)}{2 \cdot (0,0008 + 0,005)} =$$

$$= 0,118 \cdot 10^{-6} [H] \quad (2.36)$$

$$\Lambda_{g2} = \mu_0 \cdot \frac{\pi \cdot \tau_{p12} (2 \cdot R_s - g)}{2 \cdot g} = 12,56 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\pi \cdot 0,00358 \cdot (2 \cdot 0,0223 - 0,0008)}{2 \cdot 0,0008} =$$

$$= 0,386 \cdot 10^{-6} [H] \quad (2.37)$$

$$\Lambda_{g1} = \mu_0 \cdot \frac{\pi \cdot \tau_{p11} (2 \cdot R_s - g)}{2 \cdot g} = 12,56 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\pi \cdot 0,00442 \cdot (2 \cdot 0,0223 - 0,0008)}{2 \cdot 0,0008} =$$

$$= 0,477 \cdot 10^{-6} [H] \quad (2.38)$$

Tiesiaėigio švytuojamojo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametrų įtaka variklio rodikliams

7) Apskaičiuojamas magnetinis srautas:

$$\Phi_{pm1} = \frac{2 \cdot F_{pm11} + F_{pm2}}{\frac{1}{\Lambda_{pm2}} + \frac{2}{\Lambda_{pm11}} + \frac{2}{\Lambda_{g1}}} = \frac{2 \cdot 1,89 \cdot 10^3 + 1,03 \cdot 10^3}{5,7 \cdot 10^6 + 2 \cdot 7,26 \cdot 10^6 + 2 \cdot 2,09 \cdot 10^6} = 0,19[mWb] \quad (2.39)$$

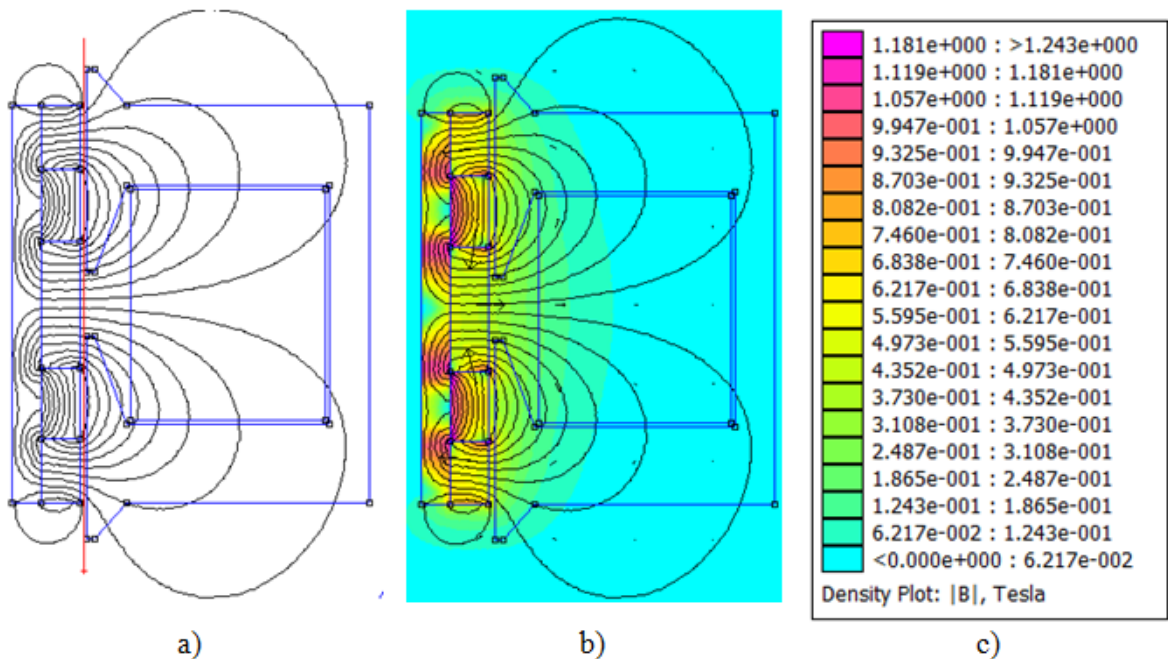
$$\Phi'_{pm2} = \frac{F_{pm12}}{\frac{1}{\Lambda_{pm12}} + \frac{1}{\Lambda_{g2}} + \frac{1}{2 \cdot \Lambda_{mi} + \Lambda_f}} = \frac{3,75 \cdot 10^3}{4,45 \cdot 10^6 + 2,59 \cdot 10^6 + 6,09} = 1,19[mWb] \quad (2.40)$$

$$\Phi_{pm2} = \frac{\Phi'_{pm2}}{1 + \frac{\Lambda_f}{2 \cdot \Lambda_{mi}}} = \frac{1,19 \cdot 10^{-3}}{1 + 2,56} = 0,33[mWb] \quad (2.41)$$

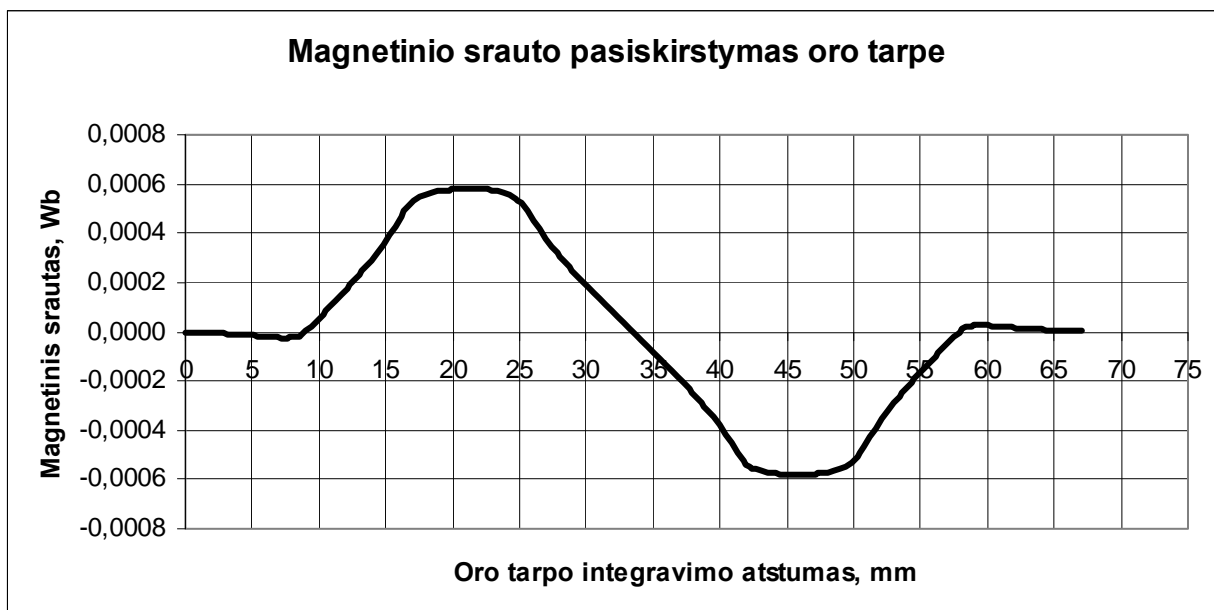
8) Apskaičiuojamas bendras magnetinis srautas oro tarpe:

$$\Phi_{pm} = \Phi_{pm1} + \Phi_{pm2} = 0,19 \cdot 10^{-3} + 0,33 \cdot 10^{-3} = 0,52[mWb] \quad (2.42)$$

Atlikus modeliavimą oro tarpe baigtinių elementu metodu (2.7 pav.) gautas magnetinio srauto pasiskirstymas oro tarpe (2.8 pav.).



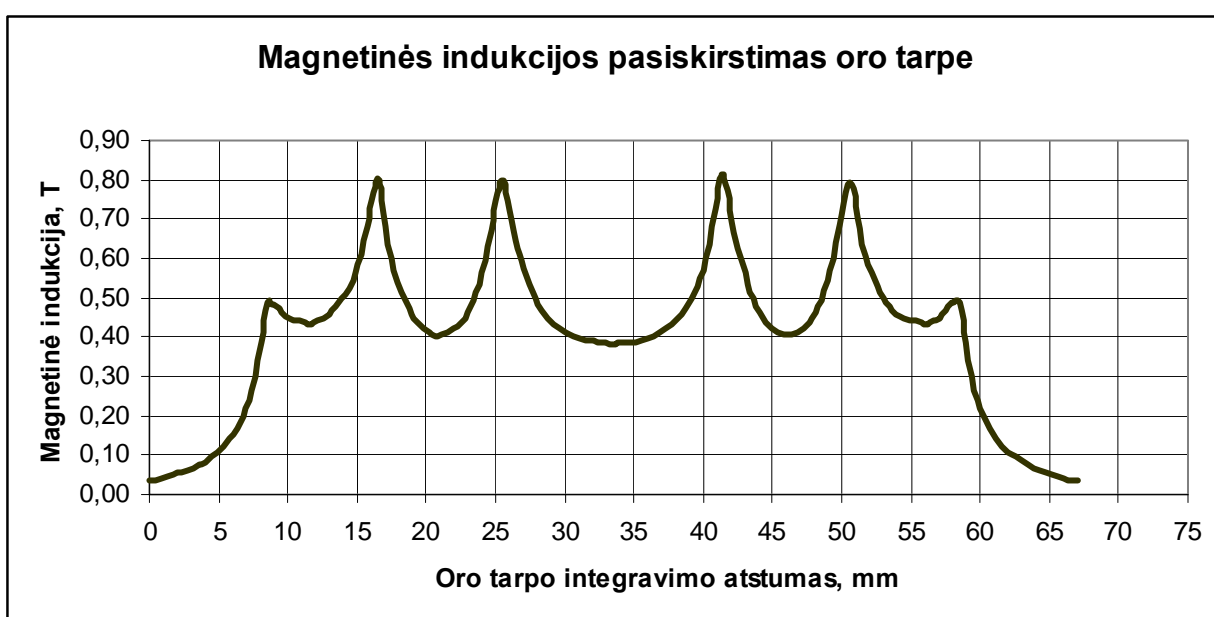
2.7 pav. Modeliavimo rezultatai: a) FEMM ašinis modelis su integravimo linija oro tarpe, b) FEMM ašinis modelis su magnetinio lauko linijomis, c) Magnetinio srauto tankio B stipris skirtingose magnetinės grandinės dalyse



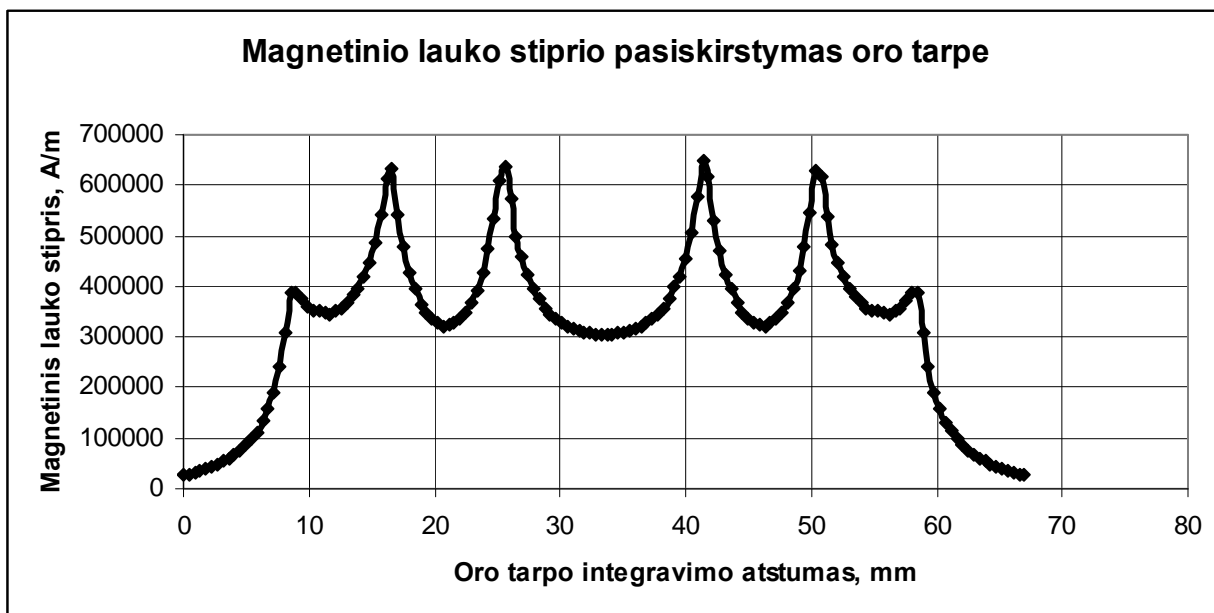
2.8 pav. Magnetinio srauto pasiskirstymas oro tarpe

Baigtinių elementų metodu gauta didžiausia magnetinio srauto vertė yra 0,00058 Wb, o analitiniu metodu apskaičiuota magnetinio srauto vertė yra 0,00052 Wb. Paklaida atsiranda analitiniame skaičiavime pasirenkant magneto magnetinio lauko stiprį ir ekvivalentinės grandinės suskaidymo tankį. Atliekant skaičiavimus buvo pasirinktas vidutinis magneto magnetinio lauko stipris.

Taip pat gautas magnetinės indukcijos (2.9 pav.) ir magnetinio lauko stiprio (2.10 pav.) pasiskirstymas oro tarpe.



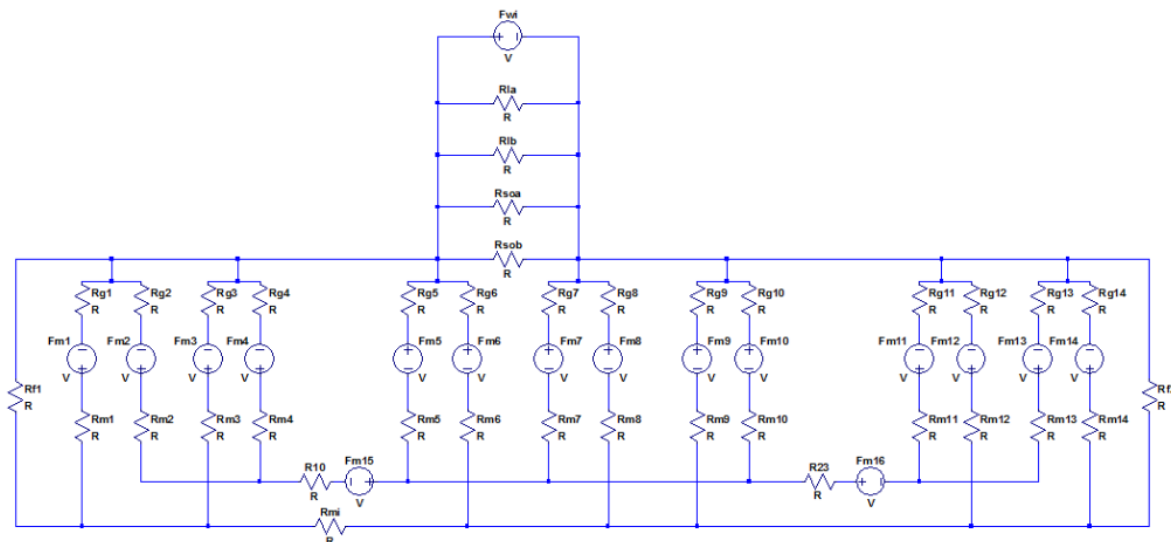
2.9 pav. Magnetinės indukcijos pasiskirstymas oro tarpe



2.10 pav. Magnetinio lauko stiprio pasiskirstymas oro tarpe

Iš grafikų matome, kad didžiausia magnetinės indukcijos vertė yra 0,816 T, o didžiausia magnetinio lauko stiprio vertė yra 649265 A/m.

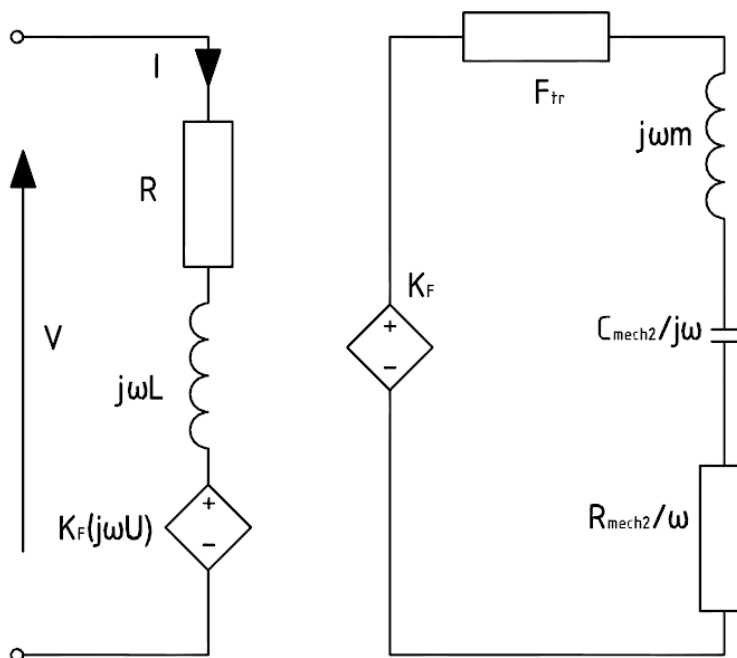
Remiantis [13] ir [58] straipsniuose pateiktais ekvivalentinės magnetinės grandinės sudarymo pavyzdžiais sudaryta variklio ekvivalentinė magnetinė grandinė (2.11 pav.).



2.11 pav. Elektros variklio magnetinė grandinė

Magnetinė grandinė sudaryta iš statoriaus magnetovaros F_{wi} , magnetinių varžų oro tarpe R_{gn} , R_{fn} , nuolatinių magnetų magnetovarų F_{mn} , nuolatinių magnetų varžų R_{mn} ir vidinio magnetolaidžio varžos R_{mi} .

Remiantis [91] straipsnyje pateiktu ekvivalentinės elektrinės grandinės sudarymo pavyzdžiu sudaryta švytuojamojo variklio-kompresoriaus ekvivalentinė elektrinė grandinė (2.12 pav.).



2.12 pav. Tiesiaieigio švytuojamojo judesio elektros variklio–kompresoriaus ekvivalentinė elektrinė grandinė

Tiesiaieigio švytuojamojo judesio elektros variklio–kompresoriaus sistemos nusistovėjusi būseną išreiškiama (2.43) lygtimi, kur ω yra maitinimo kampinis dažnis, \dot{U} , \dot{I} ir \dot{V} atitinkamai yra stūmoklio amplitudės, variklio srovės ir įtampos fazės vektoriai, K_F yra vidutinė jėgos vertė variklio–kompresoriaus „back-EMF“ koeficientas stūmoklio eigai, k_{eq} ir h_{eq} yra ekvivalentusis standumas ir dujų jėgos histerinio slopinimo koeficientas [91].

$$[(K + k_{eq} - \omega^2 \cdot m) + j(\omega \cdot F_{tr} + h_{eq})] \cdot \dot{U} = K_F \cdot \dot{I} \cdot j \cdot K_{Ta} \cdot \omega \cdot \dot{U} + (j \cdot \omega \cdot L + R) \dot{I} = \dot{V} \quad (2.43)$$

K yra bendras pakabos spyruoklių standumas, F_{tr} trinties koeficientas, kuris nurodo trinties jėga tarp stūmoklio ir cilindro, m yra bendra judžiosios dalies masė. L ir R yra variklio–kompresoriaus induktyvumas ir varža. Naudojantis analogija tarp mechaninių ir elektrinių dydžių (2.43) lygtį gali atitikti ekvivalentinė elektrinė schema, pavaizduota 2.12 pav., kur poslinkio fazės vektorius \dot{U} yra analogiškas elektrinio krūvio fazės vektoriui ir $j\omega\dot{U}$ ekvivalentus srovės fazės vektoriui. Taigi masė yra ekvivalenti induktyvumui, o spyruoklė – talpai. Išseikvota galia ekvivalentiniai varžai h_{eq} / ω atstoja naudingą darbą, atliktą suslegiant dujas. Sąveikia tarp elektrinės ir mechaninės sistemų pateikta dviem srove valdomais įtampos šaltiniais. Išsprendę lygtį \dot{I}

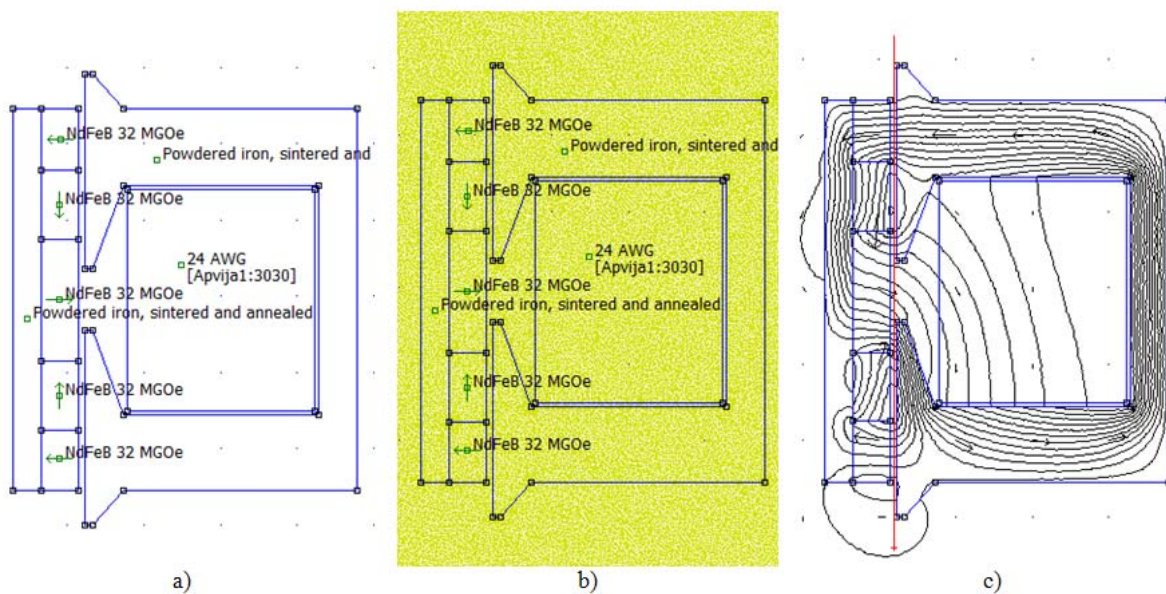
Tiesiaeigio švytuojamojo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametrų įtaka variklio rodikliams atžvilgiu gauname (2.44), kur Z_{es} , R_{es} ir L_{es} atitinkamai yra variklio–kompresoriaus sistemos pilnutinė varža, aktyvioji varža ir induktyvumas [91].

$$\dot{I} = \frac{\dot{V}}{Z_{es}} = \frac{\dot{V}}{R_{es} + j\omega L_{es}} = \frac{V}{|Z_{es}|} \angle \varphi \quad (2.44)$$

Variklio–kompresoriaus ekvivalentinės elektrinės grandinės apskaičiuoti parametrai pateikiami 2.14 – 2.21 išraiškose.

3. MAGNETINĖS IR ELEKTRINĖS GRANDINĖS MODELIAVIMO REZULTATŲ ANALIZĖ

Statoriaus ir judžiosios dalies magnetinėms grandinėms buvo atliktas skaičiavimas pasinaudojant baigtinių elementų metodu (panaudojant programinį paketą FEMM). Paveiksle 3.1 pav. a pateiktas FEMM ašinis modelis, kuriame įvertinta aplinka (šiuo atveju priimtas oras tarp judžiosios dalies ir statoriaus), magnetų išdėstymas pagal Halbacho schemą, magnetolaidžių formos ir apvija. Modeliavimas baigtinių elementų metodu buvo atliktas dviem etapais. Pirmame etape buvo keičiamos magnetolaidžio ir magnetų medžiagos. Išanalizavus gautus rezultatus pasirinktas medžiagų derinys, su kuriuo gauta didžiausia elektromagnetinė jėga ir atliekamas antras modeliavimo etapas. Atliekant antrojo etapo modeliavimą buvo keičiamas oro tarpas ir stebima kaip keičiasi variklio rodikliai.



3.1 pav. FEMM ašinis modelis su: a) parinktomis medžiagomis, b) tinkleliu; c) integravimo linija oro tarpe ir magnetinio lauko linijomis

Kiekvieno modeliavimo etapo metu buvo atliekami elektromagnetinės jėgos, surištojo magnetinio lauko, induktyvumo, nuostolių apvijoje, įtampos kritimo skaičiavimai esant įvairioms judžiosios dalies padėtims. Taip pat baigtinių elementų metodu buvo apskaičiuotas magnetinio lauko stiprio, magnetinės indukcijos ir magnetinio srauto pasiskirstymas oro tarpe esant įvairioms judžiosios dalies padėtims (3.1 pav. c).

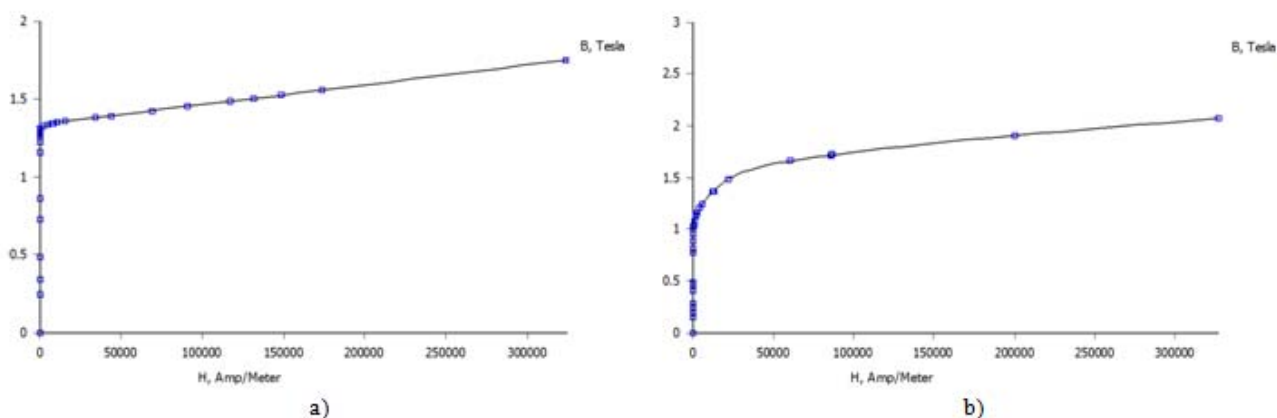
3.1. Pirmasis modeliavimo etapas

Pirmame modeliavimo etape buvo keičiamos magnetolaidžio ir magnetų medžiagos. Magnetolaidžiui parinktos 65 permalloy ir powdered iron medžiagos, o judžiojoje dalyje Halbacho schemai parinkti neodimio (NdFeB32) ir samario-kobalto (SmCo27) magnetai. Baigtinių elementų metodų buvo atliekami skaičiavimai su medžiagų deriniais parodytais 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Medžiagų deriniai su kuriais atlikti skaičiavimai baigtinių elementų metodu

Eil. Nr.	Magnetolaidžio medžiaga	Magnetų medžiaga
1	65 permalloy	neodimio (NdFeB32)
2	powdered iron	neodimio (NdFeB32)
3	65 permalloy	samario-kobalto (SmCo27)
4	powdered iron	samario-kobalto (SmCo27)

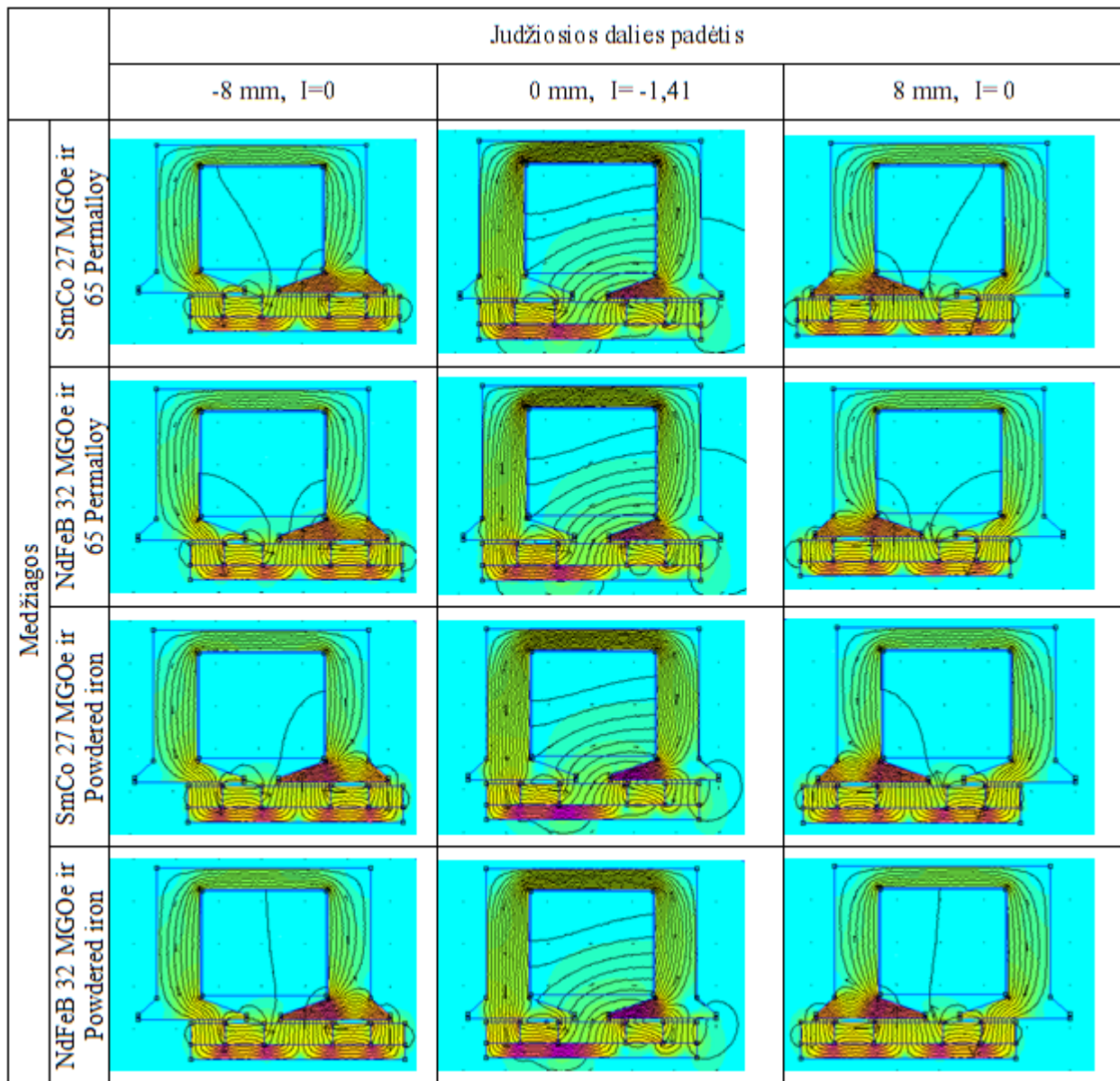
3.2 paveiksle pavaizduotos 65 permalloy ir powdered iron įmagnetinimo kreivės.



3.2 pav. 65 permalloy įmagnetinimo kreivė (a), powdered iron įmagnetinimo kreivė (b)

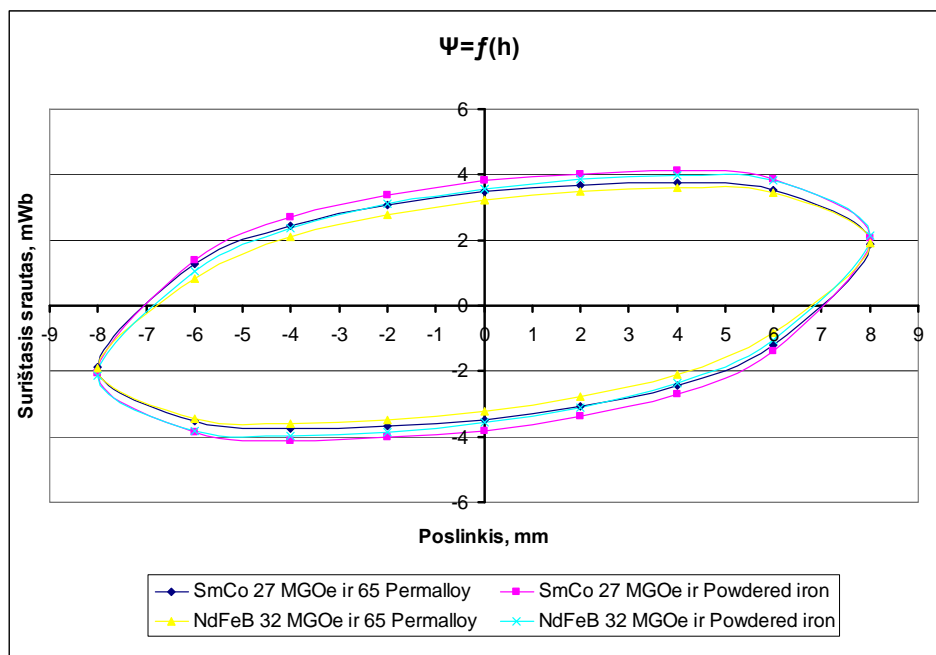
Baigtinių elementų metodu apskaičiuota, kaip magnetinio lauko linijos pasiskirsto judžioje dalyje ir statoriaus magnetolaidyje esant įvairioms judžiosios dalies padėtims. Gauti rezultatai

Tiesiaieigio švytuojamojo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametrų įtaka variklio rodikliams pateikiami 3.3 paveiksle ir 1 priede. 3.3 paveiksle pavaizduota, kai variklio judžioji dalis yra centrinėje ir kraštinėse padėtyse. Kraštinėse padėtyse srovė yra lygi nuliui, ir magnetinį lauką variklyje kuria nuolatiniai magnetai esantis judžiojoje dalyje.



3.3 pav. Magnetinio lauko linijų pasiskirstymas judžioje dalyje ir statoriaus magnetolaidyje esant judžiajai dalei centrinėje ir kraštinėse padėtyse

Atlikus skaičiavimus baigtinių elementų metodu iš gautų rezultatų nubraižyti surištojo magnetinio srauto (3.4 pav.), induktyvumo (3.5 pav.) ir elektromagnetinės jėgos (3.6 pav.) grafikai nuo judžiosios dalies poslinkio ir medžiagų tipo.

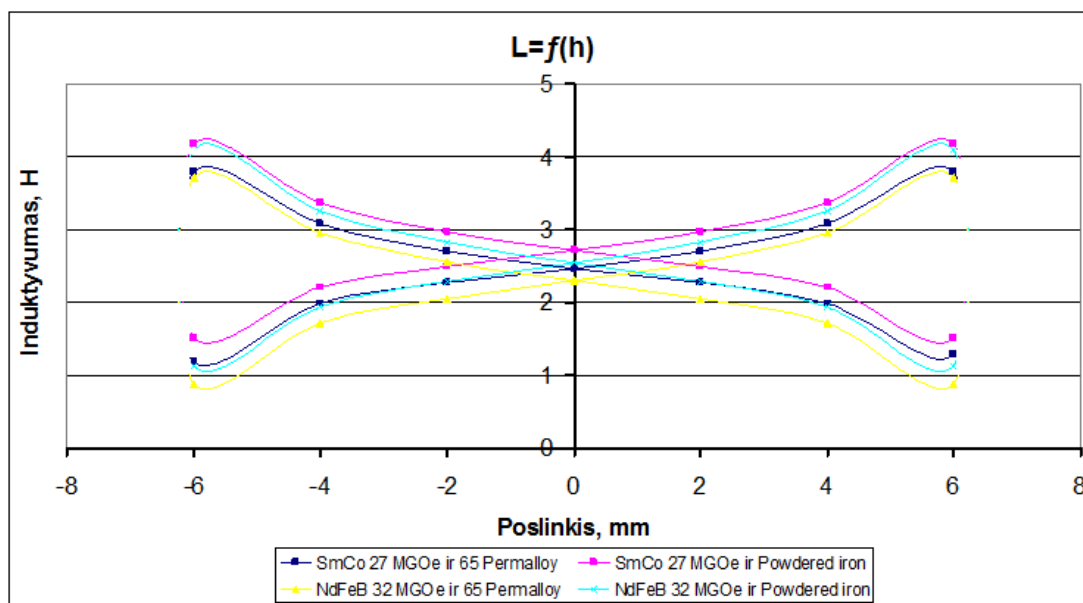


3.4 pav. Surištojo magnetinio lauko srtauto priklausomybė nuo poslinkio ir medžiagų tipo

Keičiant magnetolaidžio ir magnetų medžiagas surištasis magnetinis srautas kinta nuo 4,11 mWb iki -2,14 mWb. Elektromagnetinės jėgos vertė, kai judžioji dalis yra:

- ties 0 mm padėtimi kinta nuo 3,24 mWb iki 3,82 mWb
- ties 4 mm padėtimi kinta nuo 3,61 mWb iki 4,11 mWb
- ties 8 mm padėtimi kinta nuo 1,86 mWb iki 2,14 mWb

Didžiausias surištasis magnetinis srautas gaunamas pasirinkus samario kobalto magnetus ir iron powder medžiaga.



3.5 pav. Induktyvumo priklausomybė nuo poslinkio ir medžiagų tipo

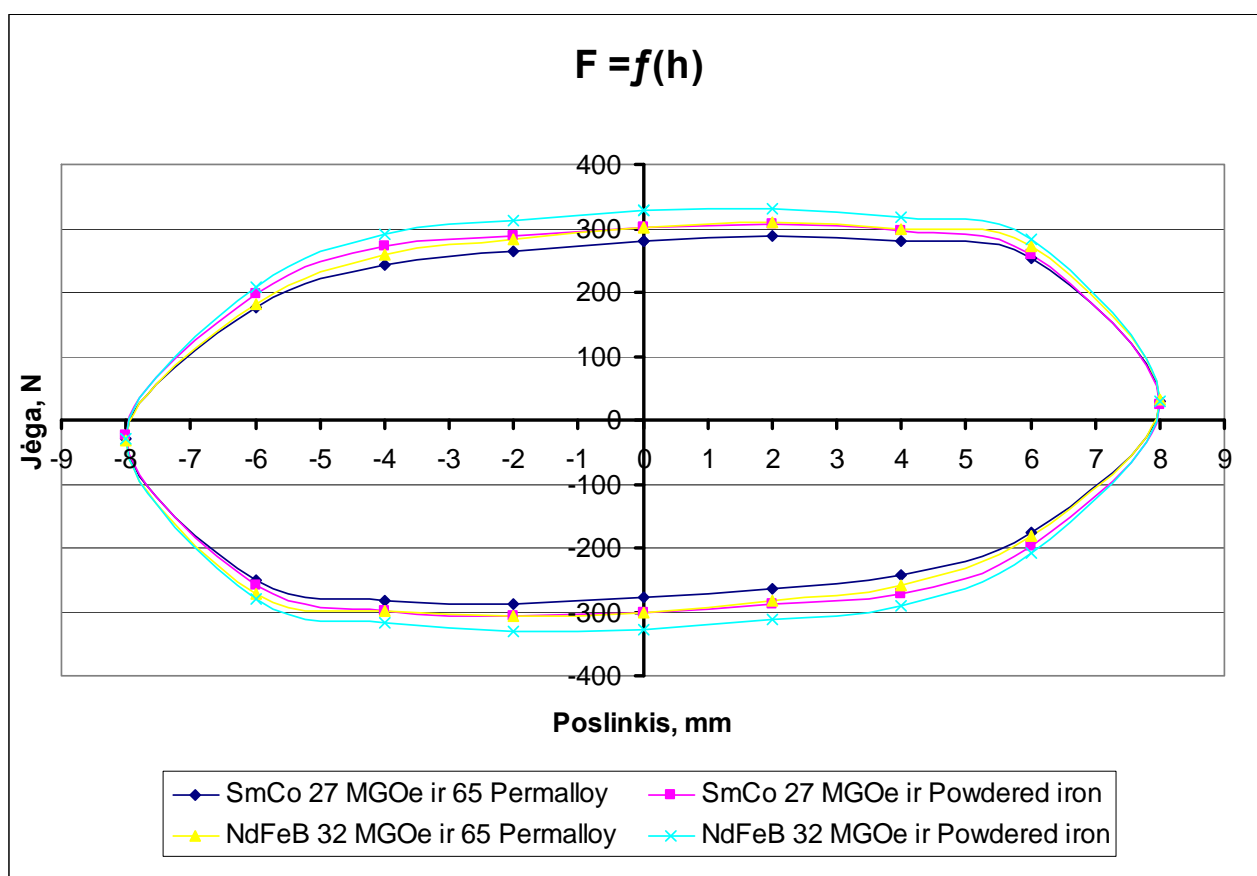
Tiesiaieigio švytuojamojo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametrų įtaka variklio rodikliams

Keičiant magnetolaidžio ir magnetų medžiagas induktyvumas kinta nuo 4,17 H iki 0,87 H.

Elektromagnetinės jėgos vertė, kai judžioji dalis yra:

- ties 0 mm padėtimi kinta nuo 2,29 H iki 2,71 H
- ties 4 mm padėtimi kinta nuo 2,96 H iki 3,369 H
- ties 6 mm padėtimi kinta nuo 3,72 H iki 4,17 H

Didžiausias induktyvumas gaunamas pasirinkus samario kobalto magnetus ir iron powder medžiagą.



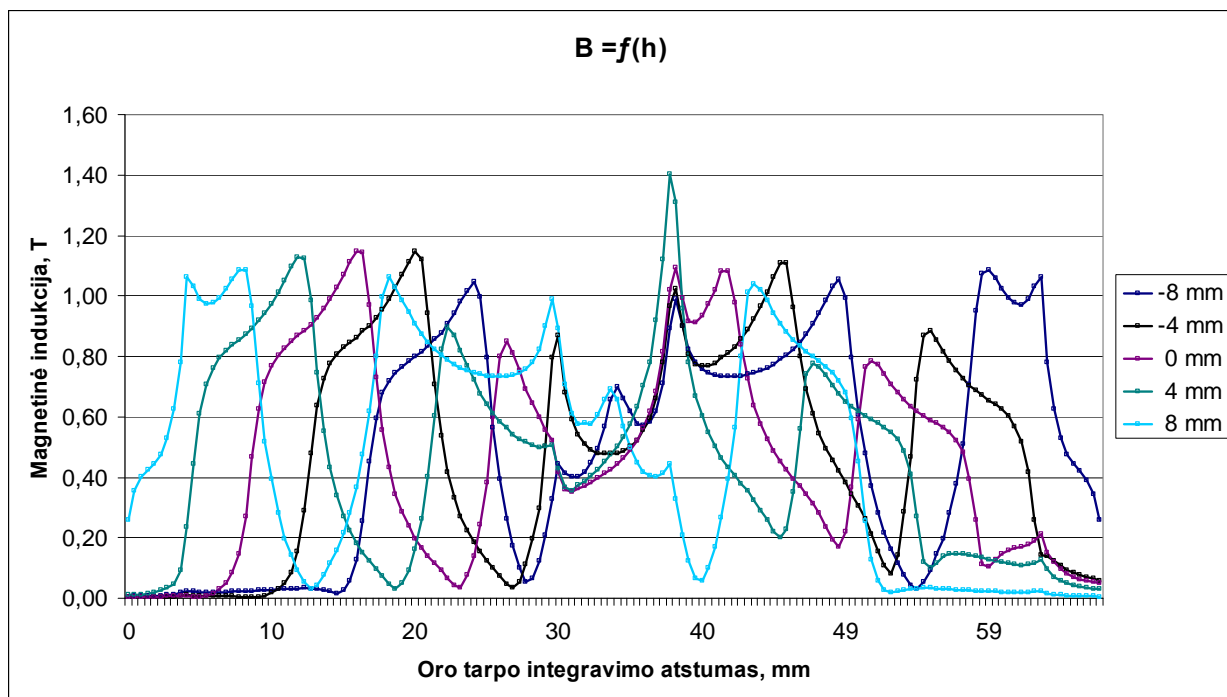
3.6 pav. Elektromagnetinės jėgos priklausomybė nuo poslinkio ir medžiagų tipo

Apskaičiuota, kad keičiant magnetolaidžio ir magnetų medžiagas elektromagnetinė jėga kinta nuo 23,67 N iki 327,23 N. Elektromagnetinės jėgos vertė, kai judžioji dalis yra:

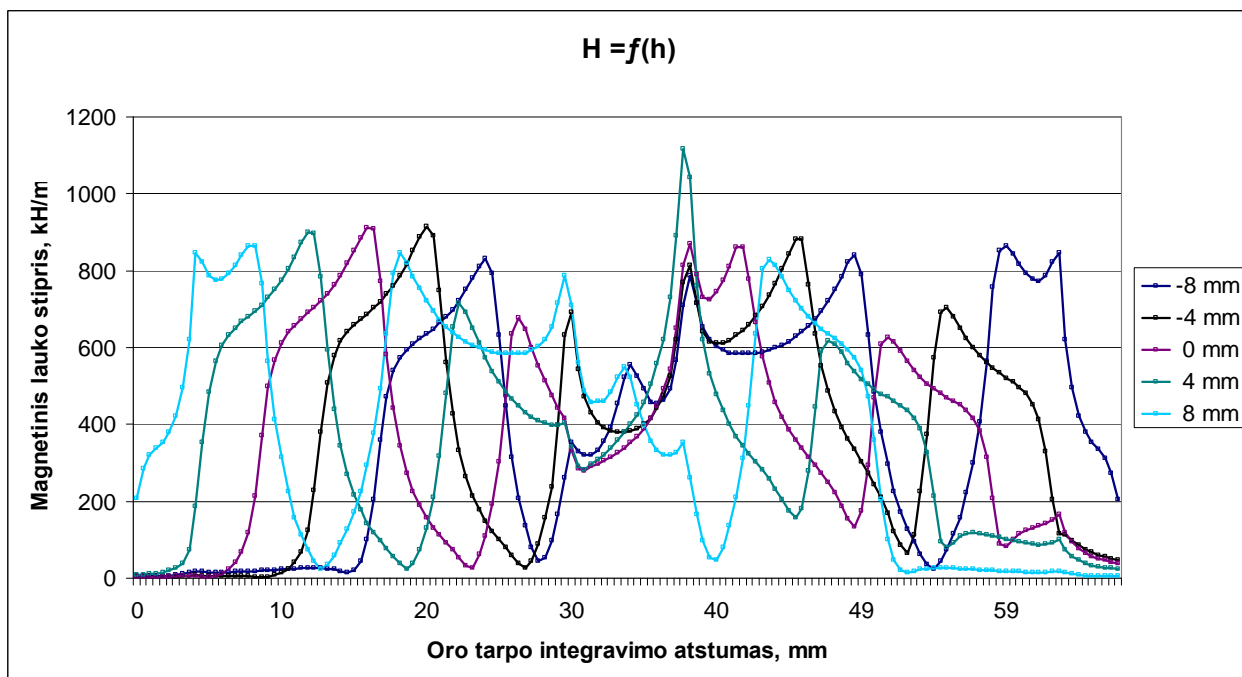
- ties 0 mm padėtimi kinta nuo 278,73 N iki 327,23 N
- ties 4 mm padėtimi kinta nuo 242,98 N iki 291,15 N
- ties 8 mm padėtimi kinta nuo 23,67 N iki 31,63 N

Didžiausia jėga išvystoma pasirinkus neodimio magnetus ir powdered iron medžiagą.

Baigtinių elementų metodu apskaičiuotas magnetinės indukcijos (3.7 pav.), magnetinio lauko stiprio (3.8 pav.) pasiskirstymas oro tarpe esant įvairioms judžiosios dalies padėtimis.



3.7 pav. Magnetinės indukcijos pasiskirstymas oro tarpe



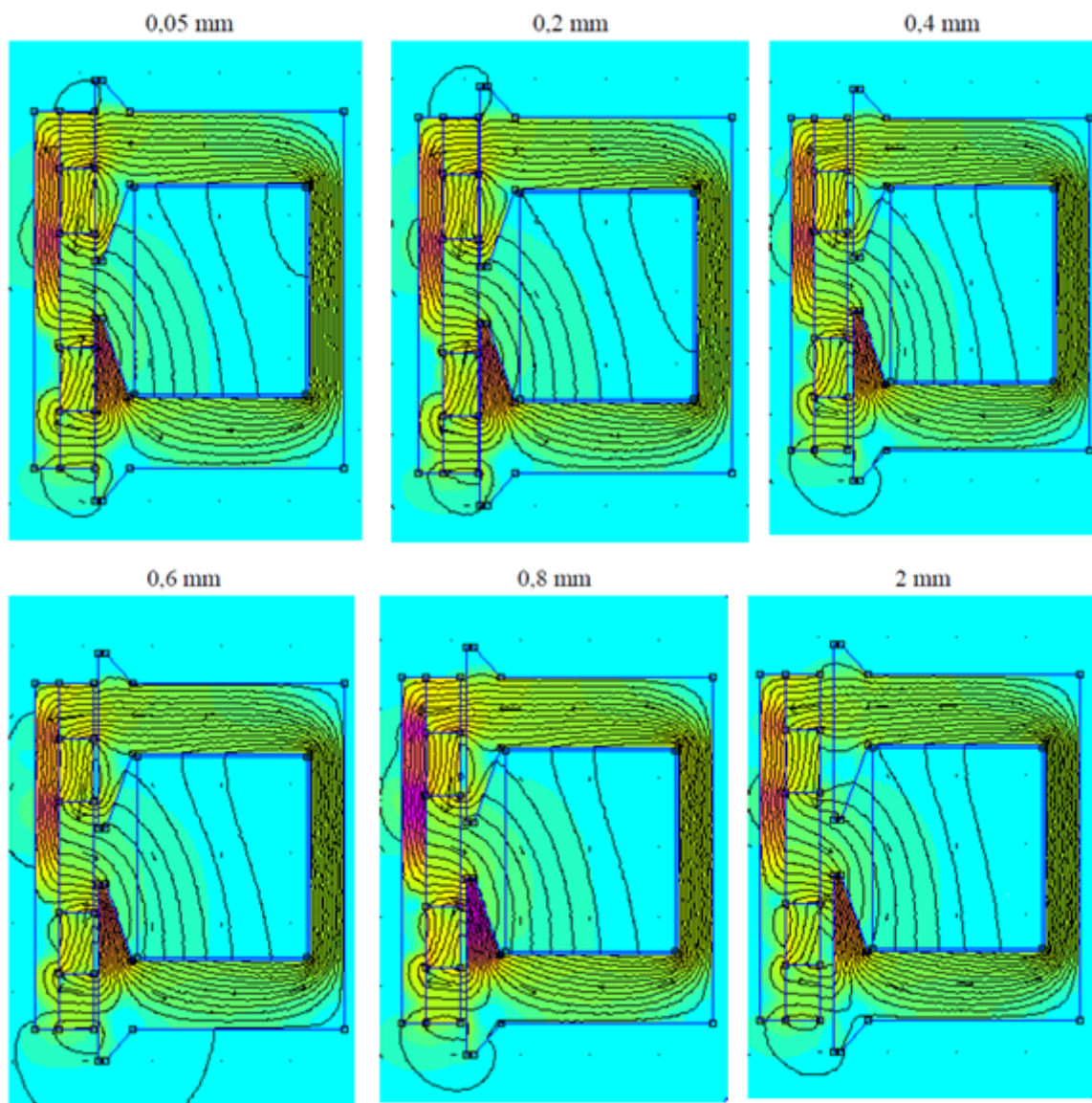
3.8 pav. Magnetinio lauko stiprio pasiskirstymas oro tarpe

Grafikuose pateikti neodimio magnetų ir powdered iron medžiagos skaičiavimo rezultatai. Kitų medžiagų grafikai pateikiami 2 ir 3 priede.

Atlikus skaičiavimus baigtinių elementų metodu ir išanalizavus gautus rezultatus, tolimesniems skaičiavimams pasirinkti neodimio magnetai ir powdered iron medžiaga.

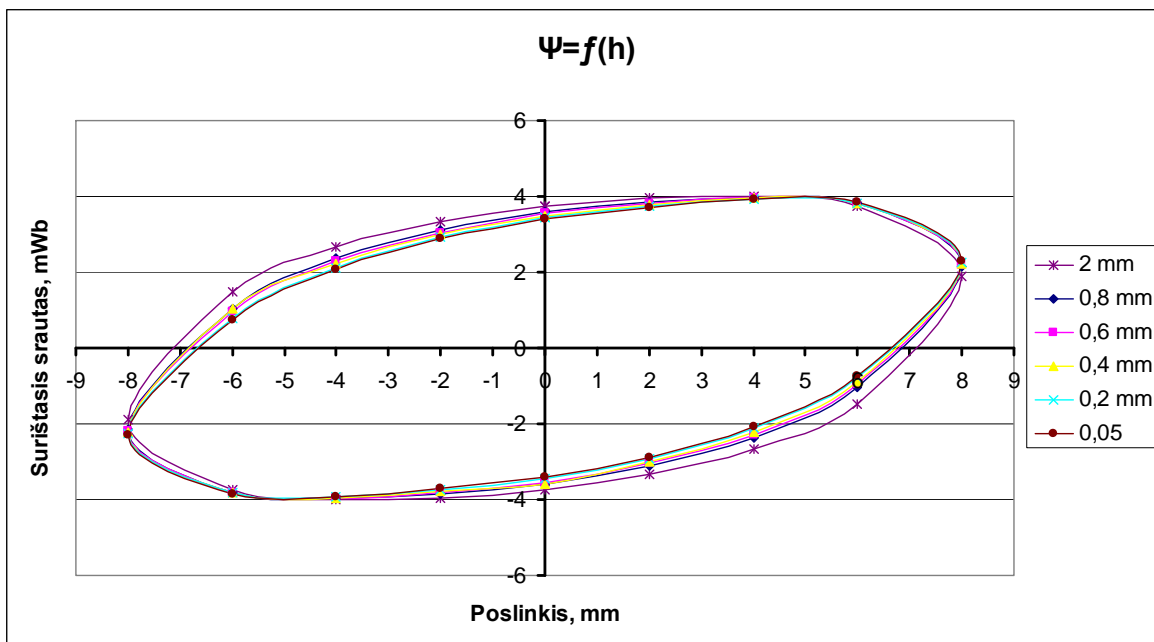
3.2. Antrasis modeliavimo etapas

Modeliavimas atliekamas keičiant oro tarpą. Pasirinktos oro tarpo vertės 2 mm, 0,8 mm, 0,6 mm, 0,4 mm, 0,2 mm ir 0,05 mm (3.9 pav.). FEMM skaičiavimo rezultatai keičiant oro tarpą pateikiami 4 priede.



3.9 pav. FEMM skaičiavimo rezultatai prie skirtingų oro tarpų

Atlikus skaičiavimus baigtinių elementų metodu iš gautų rezultatų nubraižyti surištojo magnetinio srauto (3.10 pav.), induktyvumo (3.11 pav.) ir elektromagnetinės jėgos (3.12 pav.) grafikai nuo judžiosios dalies poslinkio ir oro tarpo.

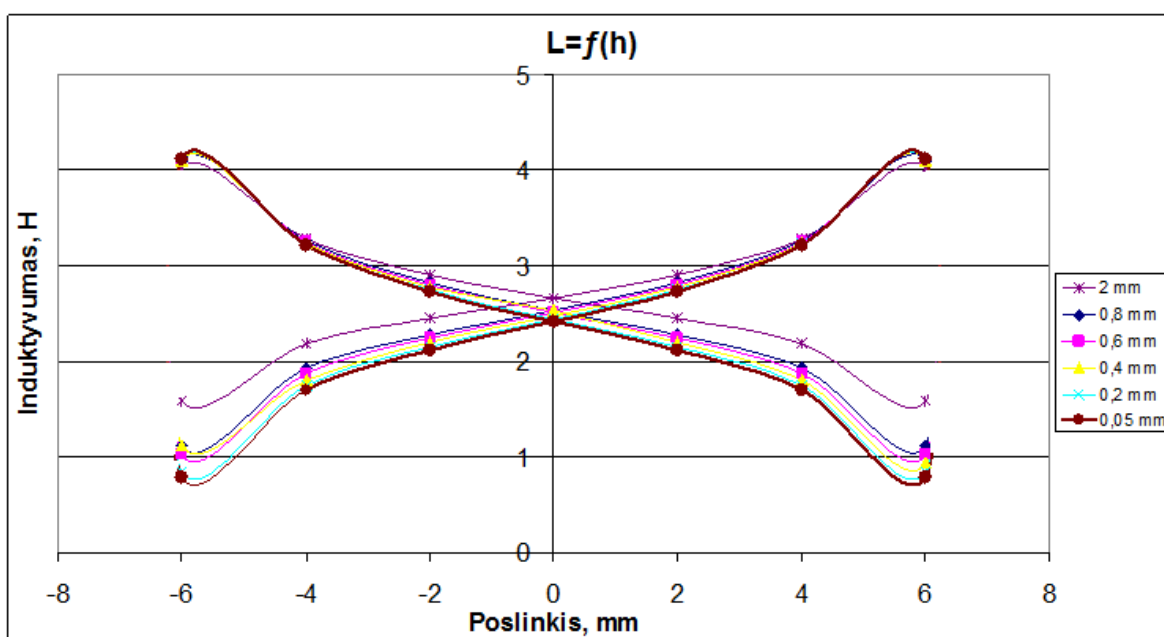


3.10 pav. Surištojo magnetinio lauko srauto priklausomybė nuo oro tarpo

Nustatyta, kad kintant oro tarpui nuo 0,05 mm iki 2 mm surištas magnetinis srautas kinta nuo -2,289 mWb iki 4,005 mWb. Surištojo magnetinio srauto vertė, kai judžioji dalis yra:

- ties 0 mm padėtimi kinta nuo 3,408 mWb iki 3,751 mWb
- ties 4 mm padėtimi kinta nuo 3,927 mWb iki 4,005 mWb
- ties 8 mm padėtimi kinta nuo -2,289 mWb iki -1,905 mWb

Didžiausias surištas magnetinis srautas gaunamas prie didžiausio oro tarpo.

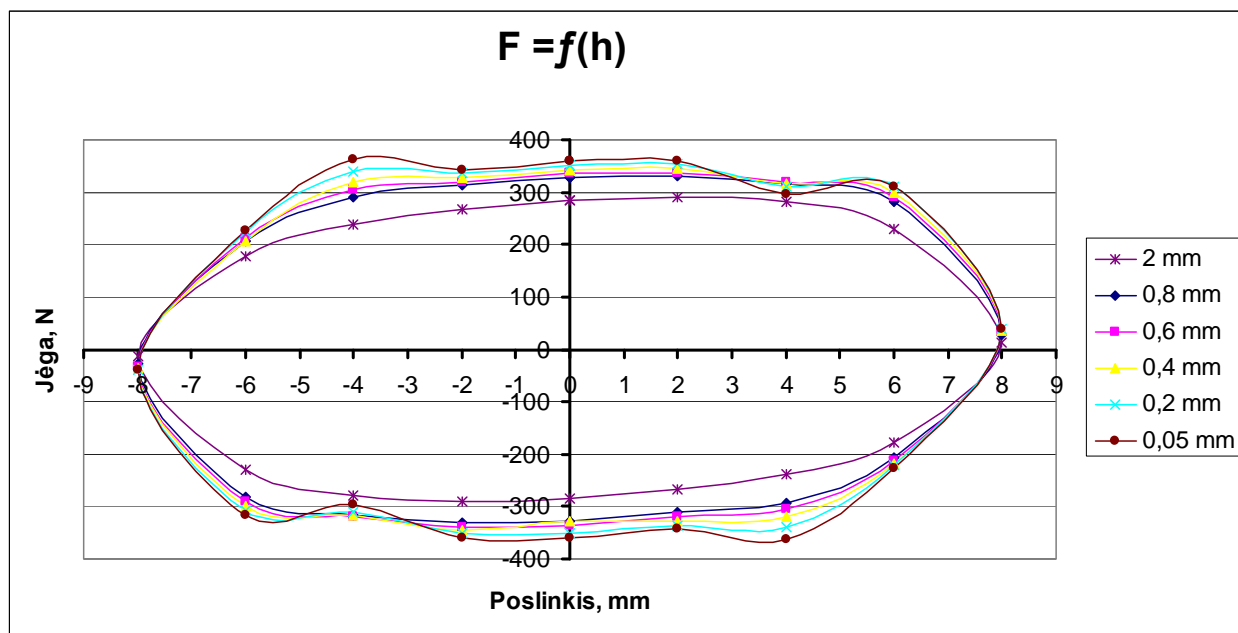


3.11 pav. Induktyvumo priklausomybė nuo oro tarpo

Nustatyta, kad kintant oro tarpui nuo 0,05 mm iki 2 mm induktyvumas kinta nuo 0,782 H iki 4,13 H. Induktyvumo vertė, kai judžioji dalis yra:

- ties 0 mm padėtimi kinta nuo 2,416 H iki 2,666 H
- ties 4 mm padėtimi kinta nuo 238,64 H iki 362,35 H
- ties 6 mm padėtimi kinta nuo 3,219 H iki 3,283 H

Didžiausias induktyvumas gaunamas prie mažiausio oro tarpo.



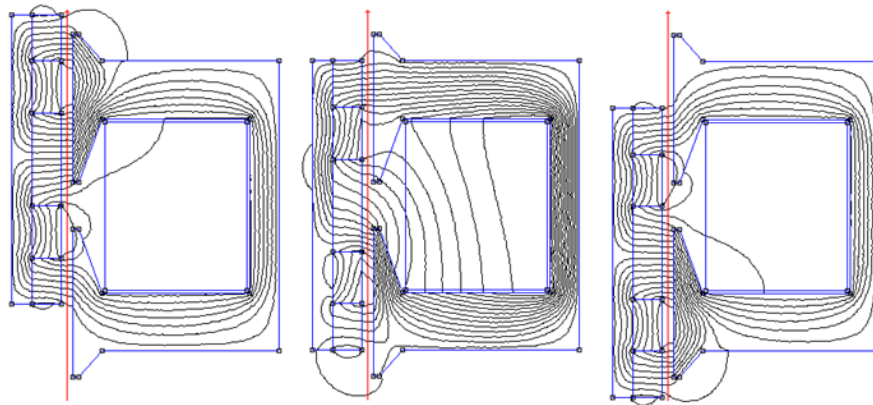
3.12 pav. Elektromagnetinės jėgos priklausomybė nuo oro tarpo

Nustatyta, kad kintant oro tarpui nuo 0,05 mm iki 2 mm elektromagnetinė jėga kinta nuo 12,76 N iki 362,35 N. Elektromagnetinės jėgos vertė, kai judžioji dalis yra:

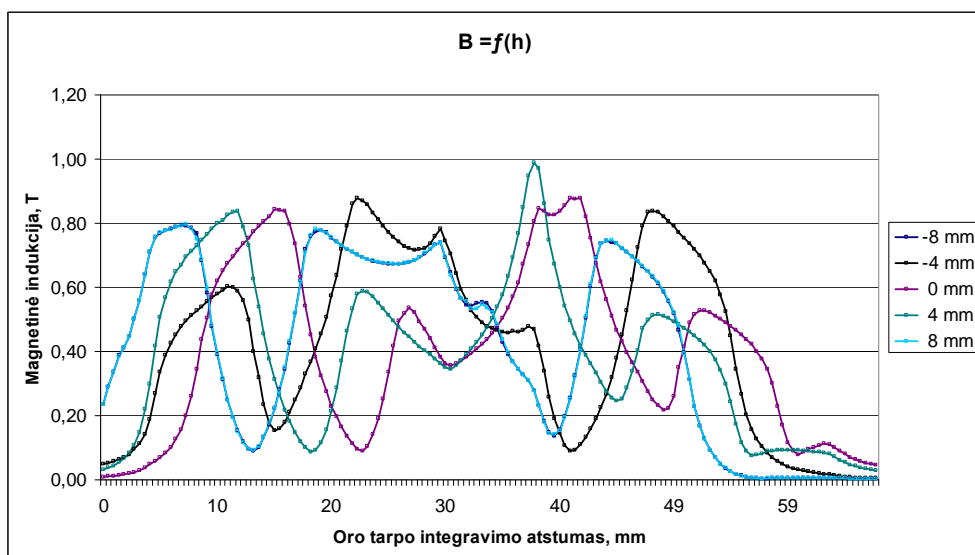
- ties 0 mm padėtimi kinta nuo 283,81 N iki 358,69 N
- ties 4 mm padėtimi kinta nuo 238,64 N iki 362,35 N
- ties 8 mm padėtimi kinta nuo 12,76 N iki 40,39 N

Didžiausia elektromagnetinė jėga gaunama prie mažiausio oro tarpo.

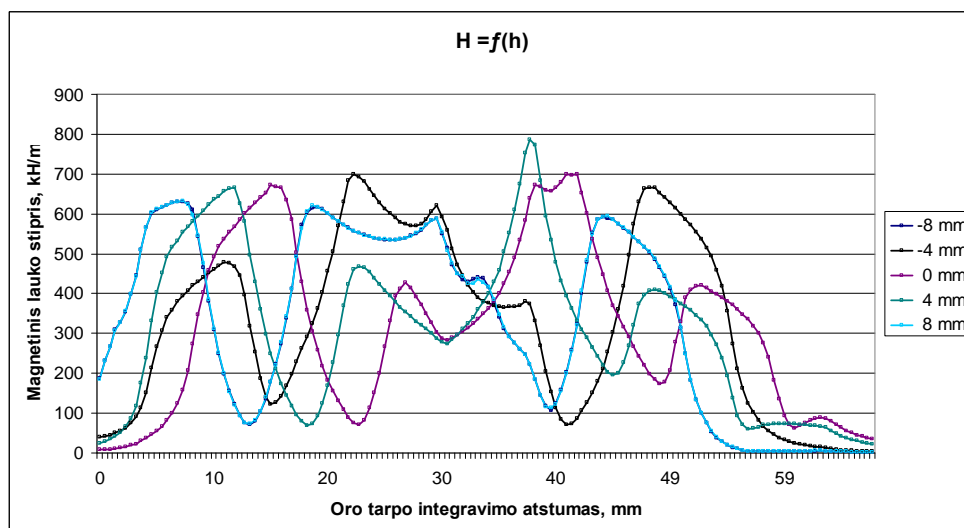
Apskaičiuotas magnetinės indukcijos (3.14 pav.) ir magnetinio lauko stiprio (3.15 pav.) pasiskirstymas oro tarpe prie įvairių judžiosios dalies padėčių. Iš skaičiavimo rezultatų nubraižyti maksimalios vertės (3.18 pav., 3.19 pav.), vidutinės absoliutinės vertės (3.17 pav., 3.20 pav.) ir efektingės vertės grafikai (3.18 pav., 3.21 pav.).



3.13 pav. FEMM ašinis modelis su integravimo linija oro tarpe ir magnetinio lauko linijomis judžiajai daliai esant centrinėje ir kraštinėse padėtyse



3.14 pav. Magnetinės indukcijos pasiskirstymas oro tarpe, kai oro tarpas yra 2 mm

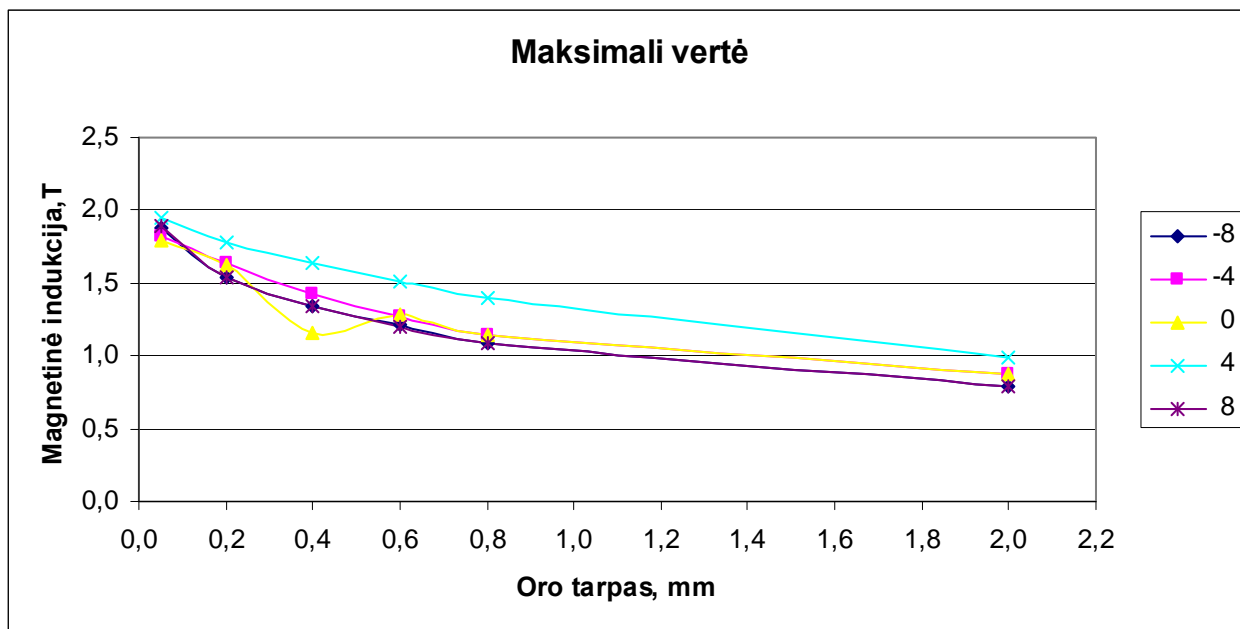


3.15 pav. Magnetinio lauko stiprio pasiskirstymas oro tarpe, kai oro tarpas yra 2 mm

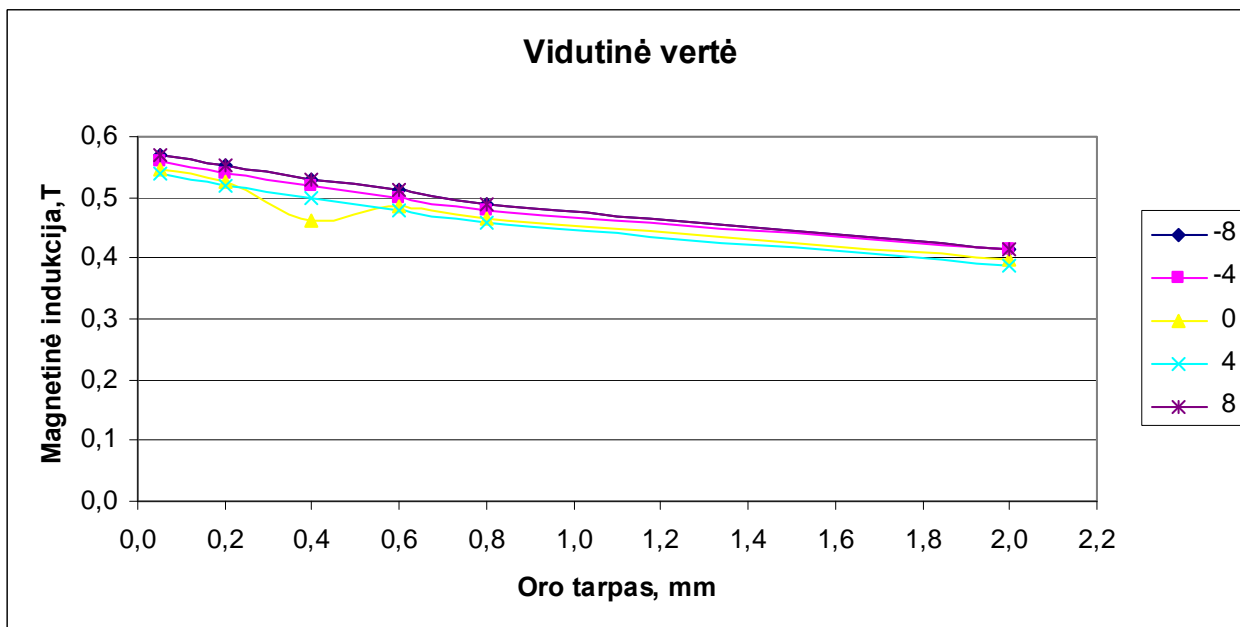
Tiesiaieigio švytuojamojo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametrų įtaka variklio rodikliams

Magnetinės indukcijos ir magnetinio laukio stiprio pasiskirstymo oro tarpe skaičiavimų rezultatai, su kitomis oro tarpo reikšmėmis pateikiamos 5 ir 6 priede.

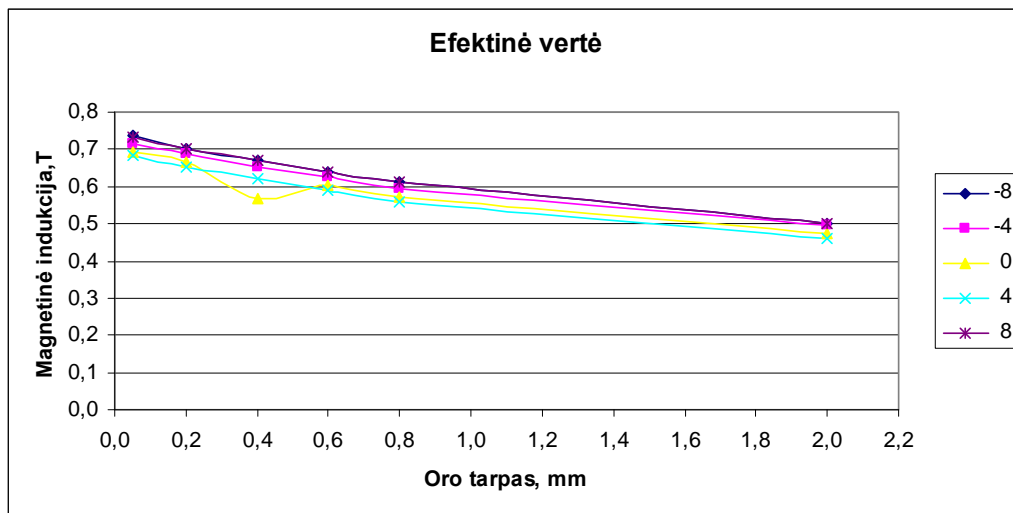
Iš gautų rezultatų oro tarpe nubraižomi magnetinės indukcijos maksimalios, vidutinės ir efektinės vertės grafikai, prie skirtingų oro tarpų.



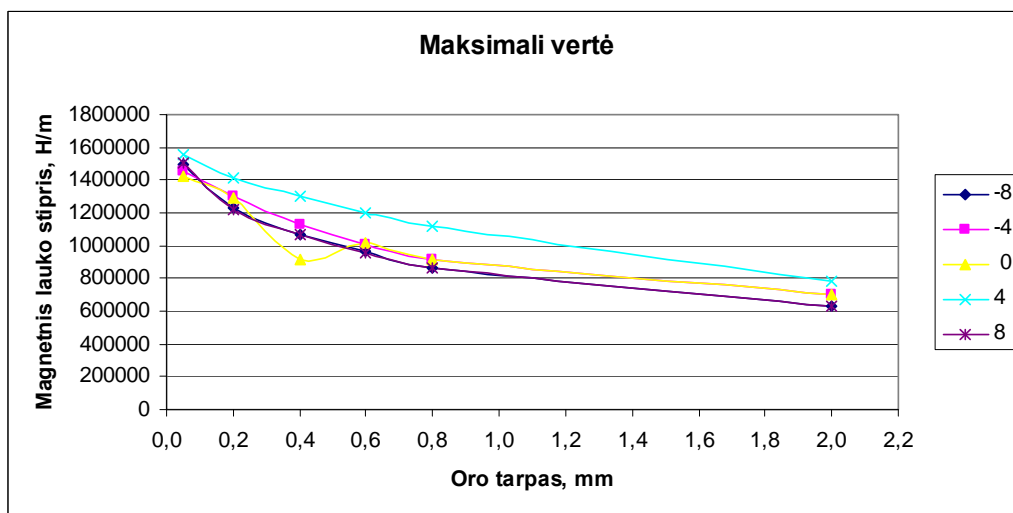
3.16 pav. Maksimali indukcijos vertė prie skirtingų oro tarpų



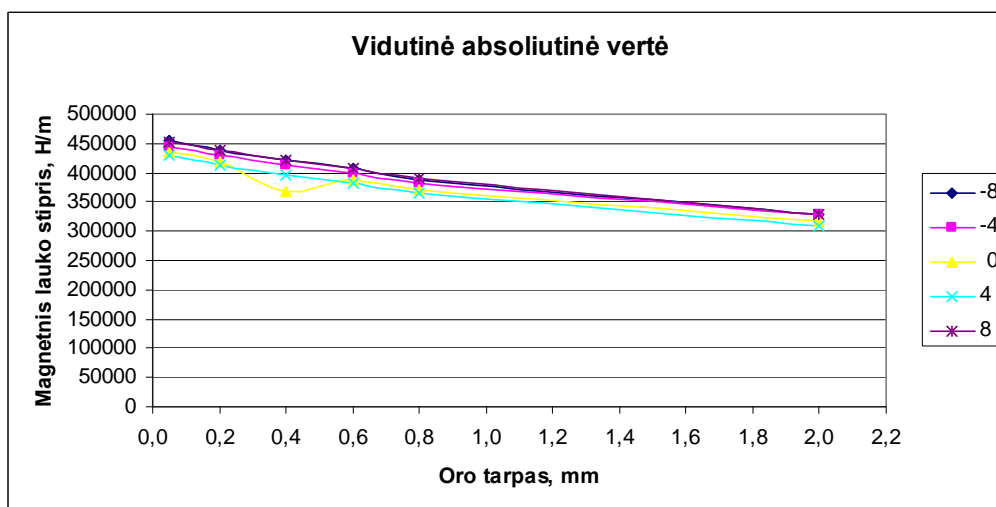
3.17 pav. Vidutinė indukcijos vertė prie skirtingų oro tarpų



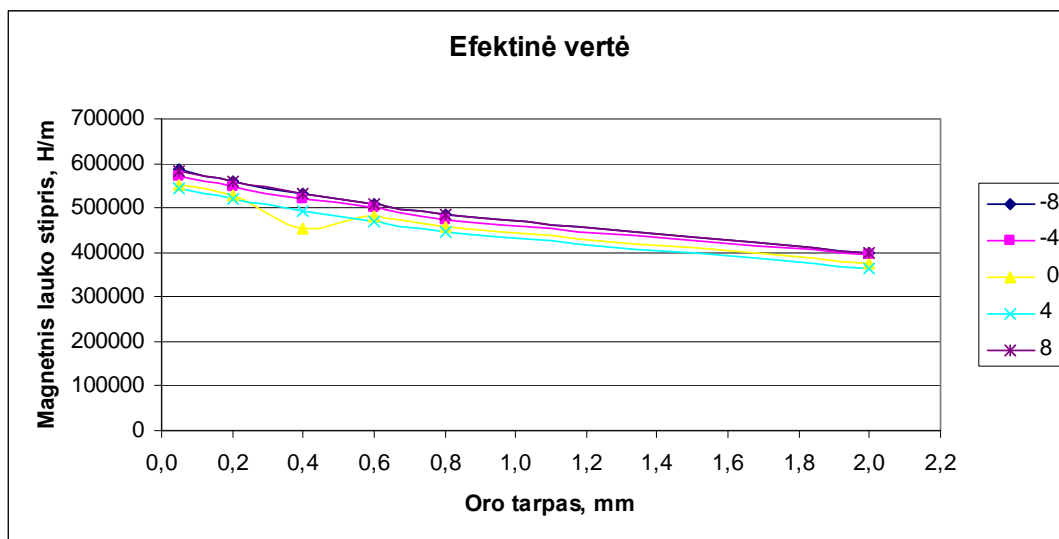
3.18 pav. Efektinė indukcijos vertė prie skirtingų oro tarpų



3.19 pav. Maksimali magnetinio lauko stiprio vertė prie skirtingų oro tarpų



3.20 pav. Vidutinė magnetinio lauko stiprio vertė prie skirtingų oro tarpų



3.21 pav. Efektinė magnetinio lauko stiprio vertė prie skirtingų oro tarpų

Didžiausios maksimalios magnetinės indukcijos vertės apskaičiuotos esant teigiamam srovės pusperiodžiui ir judžiajai daliai nutolus 4 mm į kairę nuo centrinės padėties. Didžiausia vertė gaunama, kai oro tarpas yra 0,05 mm, magnetinė indukcija yra 1,949 T. Kai oro tarpas yra 2 mm, magnetinės indukcijos maksimali vertė yra 0,988 T. Mažiausios maksimalios magnetinės indukcijos vertės apskaičiuotos judžiajai daliai esant kraštinėse padėtyse. Didžiausia vertė gaunama, kai oro tarpas yra 0,05 mm, magnetinė indukcija yra 1,881 T. Kai oro tarpas yra 2 mm, magnetinės indukcijos maksimali vertė yra 0,793 T.

Didžiausios maksimalaus magnetinio lauko stiprio vertės apskaičiuotos esant teigiamam srovės pusperiodžiui ir judžiajai daliai nutolus 4 mm į kairę nuo centrinės padėties. Didžiausia vertė gaunama, kai oro tarpas yra 0,05 mm, magnetinis lauko stipris yra 1,551 MH/m. Kai oro tarpas yra 2 mm, magnetinio lauko stiprio maksimali vertė yra 0,786 MH/m. Mažiausios maksimalaus magnetinio lauko stiprio vertės apskaičiuotos judžiajai daliai esant kraštinėse padėtyse. Didžiausia vertė gaunama, kai oro tarpas yra 0,05 mm, magnetinis lauko stipris yra 1,497 MH/m. Kai oro tarpas yra 2 mm, magnetinio lauko stiprio maksimali vertė yra 0,631 MH/m.

IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

1. Atlikus technologinio proceso ir konstrukcijų apžvalgą, pasirinkta konstrukcija kuri efektyviai sukuria magnetinį lauką. Konstrukcijos statorių sudaro „C-core“ tipo magnetolaidis, kuriame patalpinta vienfazė kintamos srovės apvija. Patobulintos konstrukcijos sukūrimui judžiojoje dalyje panaudojamas nuolatinųjų magnetų išdėstymas pagal Halbacho schemą.

Nustatyta, kad šie konstrukcijos parametrai - magnetolaidžio medžiaga, magnetų medžiaga ir oro tarpas turi svarbios įtakos variklio elektromagnetinės jėgos, induktyvumo ir surištojo magnetinio srauto rodikliams.

2. Analitiniu metodu apskaičiuoti švytuojamojo judesio ir jo apkrovos parametrai. Pagal pradinis duomenis, optimali judžiosios dalies masė (mechaninio rezonanso atveju) $m_2 = 0,510$ kg, kompresoriaus galia $P_{komp} = 404$ W, elektromagnetinės jėgos amplitudė $F_{elm.m} = 323,2$ N, cilindro diametras $D=4,39 \cdot 10^{-2}$ m.

Sudaryta variklio oro tarpo ekvivalentinė magnetinė grandinė įvertinant tik magnetų įtaką. Analitinių metodu apskaičiuojamos oro tarpo, magnetų ir vidinio magnetolaidžio magnetinės varžos ir magnetiniai laidžiai, magnetų magnetiniai srautai ir magnetovarų jėgos. Iš gautų rezultatų apskaičiuojamas bendras magnetinis srautas oro tarpe $\Phi_{pm}=0,52$ mWb, kurį sukuria nuolatiniai magnetai, išdėstyti Halbacho schema. Baigtinių elementų metodu apskaičiuotas bendras magnetinis srautas oro tarpe lygus $\Phi_{pm}=0,58$ mWb. Paklaida atsiranda analitiniame skaičiavime pasirenkant magneto magnetinio lauko stiprį ir ekvivalentinės grandinės suskaidymo tankį.

Sudaryta variklio-kompresoriaus ekvivalentinė elektrinė grandinė. Analitiniu metodu apskaičiuotas ekvivalentinis „oro spyruoklės“ standumas $C_{mech2} = 50322,3$ N/m, mechaninė aktyvioji varža $R_{mech2} = 129,2$ Ns/m. Įrenginiui apskaičiuoti energetiniai parametrai, naudingumo koeficientas $\eta=0,847$, galios koeficientas $\cos\varphi=0,79$ ir bendri nuostoliai $P=72,43$ W.

3. Modeliavimui baigtinių elementu metodu buvo pasirinkti samario-kobalto (SmCo27) ir neodimio (NdFeB32) magnetai judžiojoje dalyje ir permalloy ir presuotu geležies miltelių (powdered iron) medžiagos statoriui.

Nustatyta, kad keičiant magnetolaidžio ir magnetų medžiagas elektromagnetinę jėga kinta nuo 23,67 N iki 327,23 N. Elektromagnetinės jėgos vertė, kai judžioji dalis yra:

- ties 0 mm padėtimi kinta nuo 278,73 N iki 327,23 N
- ties 4 mm padėtimi kinta nuo 242,98 N iki 291,15 N
- ties 8 mm padėtimi kinta nuo 23,67 N iki 31,63 N

Didžiausias pokytis sudaro 25 % lyginant su 31,63 N, ties 8 mm, mažiausias pokytis sudaro 10,45 % lyginant su 281,42 N, ties 6 mm. Atlikus skaičiavimus geriausi rezultatai gauti parinkus

TMPE – 12, Justinas Gerbenis

Tiesiaeigio švytuojamojo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametrų įtaka variklio rodikliams neodimio magnetus judžiojoje dalyje ir magnetolaidžius sudarytus ir presuotu geležies miltelių (powdered iron). Su šiomis medžiagomis buvo atliekami tolimesni skaičiavimai.

4. Modeliavimas atliekamas keičiant oro tarpą. Pasirinktos oro tarpo vertės 2 mm, 0,8 mm, 0,6 mm, 0,4 mm, 0,2 mm ir 0,05 mm. Nustatyta, kad kintant oro tarpui nuo 0,05 mm iki 2 mm elektromagnetinė jėga kinta nuo 12,76 N iki 362,35 N. Elektromagnetinės jėgos vertė, kai judžioji dalis yra:

- ties 0 mm padėtimi kinta nuo 283,81 N iki 358,69 N
- ties 4 mm padėtimi kinta nuo 238,64 N iki 362,35 N
- ties 8 mm padėtimi kinta nuo 12,76 N iki 40,39 N

Didžiausias pokyti sudaro 34,14 % lyginant su 362,35 N, ties 4 mm, mažiausias pokytis sudaro 5,85 % lyginant su 297,22 , ties 4 mm.

Apskaičiuota oro tarpo magnetinė indukcija ir magnetinio lauko stipris prie įvairių judžiosios dalies padėčių. Iš skaičiavimo rezultatų nubraižyti maksimalios vertės, vidutinės absoliutinės vertės ir efektinės vertės grafikai.

5. Pasirinktas išorinis „C-core“ tipo magnetolaidis ir judžiojoje dalyje parinkti nuolatiniai magnetai išdėstyti Halbacho schema sukuria efektyvų, koncentruotą magnetinį lauką. Tradiciškai švytuojamojo tiesiaeigio judesio elektros variklio vidinis ir išorinis magnetolaidis gaminamas iš elektrotechninio plieno lakštų. Gaminant švytuojamąjį tiesiaeigio judesio elektros variklį iš elektrotechninio plieno lakštų apytiksliai reikia panaudoti 1300 detalių, tai labai apsunkina variklio surinkimą. Gaminant vidinį magnetolaidį iš lakštų užpildymo koeficientas labai mažėja artėjant prie oro tarpo ir mažiausias užpildymo koeficientas yra oro tarpe šalia magneto. Taip pat iškyla apvijos įstatymo į išorinį magnetolaidį problema. Norint, kad variklis taptų kompaktiškesnis, sumažėtų jo masė ir skleidžiamas garsas, vidinis ir išorinis magnetolaidis pagamintas iš elektrotechninio plieno lakštų pakeičiamas į magnetolaidžius pagamintus iš SMC medžiagos. Išorinį statorių galima pagaminti iš dviejų dalių taip supaprastėja variklio surinkimas ir apvijos įstatymas į magnetolaidį. Taigi, panaudojus SMC medžiagas supaprastėja surinkimas ir sumažėja gamybos kaina, sumažėja svoris ir skleidžiamas garsas.

Atlikus skaičiavimus baigtinių elementų metodu, iš gautų rezultatų nustatyta, kad didžiausia elektromagnetinė jėga gaunama parinkus suspaustų geležies miltelių (powdered iron) medžiagą magnetolaidžiams ir neodimio (NdFeB32) nuolatinius magnetus Halbacho schemai. Pasirinkus šias medžiagas buvo atliekami skaičiavimai keičiant oro tarpo vertes nuo 0,05 mm iki 2 mm. Iš gautų rezultatų matyti, kad didžiausia elektromagnetinė jėga gaunama, kai yra mažiausias oro tarpas. Tačiau mažėjant oro tarpui atsiranda daugiau pašalinių magnetinių laukų kurie stabdo magnetolaidį.

TMPE – 12, Justinas Gerbenis

Tiesiaieigio švytuojamojo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametrų įtaka variklio rodikliams

Didinant oro tarpą, didėja magnetinė varža ir pašalinių magnetinių laukų, kurie stabdo judžiąją dalį, sukuriama mažiau.

Analizuojant skaičiavimo rezultatus, kaip magnetinis laukas pasiskirsto prie įvairių judžiosios dalies padėčių, pastebėta, kad esant teigiamam srovės pusperiodžiui ir judžiąjai daliai nutolus 6 mm į dešinę nuo centrinės padėties, magnetinis laukas užsidaro tarp magnetolaidžio danties ir vidinio magnetolaidžio. Taigi, variklio didžiausia švytavimų amplitudę, skaičiuojant nuo centrinės judžiosios dalies padėties, reikia sumažinti iki 6 mm, taip išvengiant didelių pašalinių magnetinių laukų susidarymo.

Išanalizavus rezultatus, gautus baigtinių elementų metodu, pasirinkus magnetolaidžių ir magnetų medžiagas, pasirinkus oro tarpo dydį, būtų galima atlikti variklio konstrukcijos optimizavimą ir ištirti šio variklio valdymo galimybes.

LITERATŪRA

1. Al-Otaibi Z. S., Jack A. G. 2008. Utilising SMC in Single Phase Permanent Magnet Linear Motors for Compressor Applications. 4th IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives, PEMD. April 2-4, York, UK. ISBN 978-0-86341-900-3, p. 752-756.
2. Arnold Magnetic Technologies Corporation. 2012. Neodymium-Iron-Boron Magnets Summary Listing [interaktyvus]. Neodymium-iron-boron magnet catalogs [žiūrėta 2014 m. gegužės 19 d.]. Prieiga per internetą < http://www.arnoldmagnetics.com/Neodymium_Literature.aspx >.
3. Boldea I., Nasar S. A. 1999. Linear Electric Actuators and Generators. IEEE Transactions on Energy Conversion. ISSN 0885-8969. 14(3), p. 712-717.
4. Brazaitis A., Cirtautas V., Guseinovicė E., Jankūnas V., Žaltauskas V. 2006. Pavarų su švytuojamaisiais varikliais švytavimų amplitudės pozicionavimas // Technologijos mokslo darbai Vakarų Lietuvoje. Klaipėda: KU. Nr. 5, p. 9-12.
5. Brazaitis A., Guseinovicė E. 2004. Reaktyviųjų švytuojamojo judesio variklių skaitinis valdymas. Technologijos mokslo darbai Vakarų Lietuvoje IV. IV-osios mokslinės konferencijos medžiaga. Klaipėdos universitetas. Klaipėda: Klaipėdos universiteto leidykla, ISBN 9955-585-53-6. IV t., p. 34-38.
6. Brazaitis A., Guseinovicė E. 2006. Computer Aided Design on Oscillating Drives. Electronics and Electrical Engineering. ISSN 1392-1215. Kaunas: Technologija, No. 6(70), p. 19–22.
7. Brazaitis A., Guseinovicė E. 2009. Control of Activators of Mechatronic Devices by Real Time Information Transfer. Electronics and Electrical Engineering. ISSN 1392-1215. Kaunas: Technologija, No. 2(90), p. 89–94.
8. Brazaitis A., Guseinovicė E. 2011. Influence of Supply Current to the Characteristics of Reactive Oscillating Motors. Electronics and Electrical Engineering. ISSN 1392-1215. Kaunas: Technologija, No. 5(111), p. 115–118.
9. Brazaitis A., Guseinovicė E., Jankūnas V. 2010. Control of Oscillation Amplitude of Oscillating Motors. Electronics and Electrical Engineering. ISSN 1392-1215. Kaunas: Technologija, No. 3(99), p. 77–82.
10. Brazaitis A., Samuitis A. 1983. Elektromagnetinės jėgos švytuojančio judesio varikliuose// Elektrotechnika. Gamybos procesų ir valdymo automatizavimas, Kaunas. Vilnius: Lietuvos TSR aukštojo ir specialiojo vidurinio mokslo ministerija. P. 24.
11. Brazaitis A., Šatas J. 1999. Pavaros su švytuojamojo judesio reaktyviuoju varikliu skaitinis tyrimas. Mokslas ir technologijos Vakarų Lietuvoje. Klaipėda: KU 1-la, p. 16-21.

12. Chen, N. 2007. Study on Static and Dynamic Characteristics of Moving Magnet Linear Compressors. *Cryogenics*. ISSN 0011-2275. 47(9-10), p. 457–467.
13. Chen X., Zhu Z. Q. 2011. Analytical determination of optimal split ratio of E-core permanent magnet linear oscillating actuators. *Industry Applications, IEEE Transactions on* 47.1, p. 25-33.
14. Chen X., Zhu Z. Q. 2011. Analytical Determination of Optimal Split Ratio of E-core Permanent Magnet Linear Oscillating Actuators. *IEEE Transactions on Industry Applications*. ISSN 0093-9994. 1(47), p. 25-33.
15. Chen X., Zhu Z. Q., Howe D. 2009. Modeling and Analysis of a Tubular Oscillating Permanent-Magnet Actuator. *IEEE Transactions on Industry Applications*. ISSN 0093-9994. 45(6), p. 1961-1970.
16. Chertok A. 2003. Linear electrical machine for electric power generation or motive drive. U.S. Pat. 6914351 B2.
17. Chunping Z., Fangzhong G., Xiaoqing Z., Wei L. 2010. Design of miniature moving magnet linear actuator for thermoacoustic Stirling system. *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*. Chengdu, China, 28–31 March.
18. Colonel W., McLyman T. 2004. *Transformer and Inductor Design Handbook*. New York: Marcel Dekker.
19. Eglynas T. 2010. Švytuojamąo judesio elektros variklių magnetinių laidžių kitimo aprašymas laipsnių eilute. *Technologijos mokslo darbai Vakarų Lietuvoje VII*. VII–osios mokslinės konferencijos medžiaga. Gegužės 14 d., Klaipėdos universitetas. Klaipėda: Klaipėdos universiteto leidykla, ISSN 1822-4652, VII t., p. 314-319.
20. Finocchiaro T. 2008. New Linear Motor Concepts for Artificial Hearts. *IEEE Transactions on Magnetics*. ISSN 0018-9464. 44(6), p. 678–681.
21. Fukui Y., Funakubo A., Fukunaga K. 2004. Development of the Assisted Artificial Heart with Linear Motor Actuator. In: *SICE. Annual Conference*. Sapporo, Japan 4-6 August, p. 306–310.
22. Gerald D. 2000. Linear Motor. Patent Nr.: CA 2 475 936 A1.
23. Gheisari K., Shahriari S., Javadpour S. 2013. Structural evolution and magnetic properties of nanocrystalline 50 Permalloy powders prepared by mechanical alloying. *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 574, p. 71-82.
24. Guozhong D. 2010. Structural Study on Moving Magnet Compressor for Stirling Engine. *International Conference on Electrical and Control Engineering*. ICECE. June 25-27, Wuhan, China. ISBN 978-1-4244-6880-5, p. 4243-4246.

25. Guseinovicė E. 2002. Švytuojamojo sinchroninio pulsuojančiosios srovės variklio charakteristikos. Elektronika ir Elektrotechnika. ISSN 1392-1215. Kaunas: Technologija, Nr. 5(40), p. 55-58.

26. Guseinovicė E., Simanynicė L., Kudarauskas S. 2002. Oscillating Synchronous Pulsating Current Motor in the Piston Compressor's Drive. Elektronika ir Elektrotechnika. ISSN 1392-1215. Kaunas: Technologija, Nr. 3(38), p. 36-40.

27. Huang B. J., Chen Y. C. 2002. System Dynamics and Control of a Linear Compressor for Stroke and Frequency Adjustment. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. ISSN 0022-0434, vol. 124, p. 176-182.

28. Hultman L., Andersson O. 2009. Advances in SMC Technology – Materials and Applications [interaktyvus]. Copenhagen: presented at EURO PM2009 [žiūrėta 2014 m. gegužės 19 d.]. Prieiga per internetą <

http://www.hoganas.com/Documents/Published%20Articles/2009/PM09_16_EURO_PM2009_Hultman.pdf>.

29. Hultman L., Andersson O. 2010. SMC developments boost performance and strength. Metal Powder Report, p. 28-30.

30. Yang Y. P., Chen W. T. 1999. Dual Stroke and Phase Control and System Identification of Linear Compressor of a Split-Stirling Cryocooler. Asian Journal of Control. ISSN 1561-8625, vol. 1(2), p. 116-121.

31. Ying H. J. 2009. High Efficiency Linear Compressor Driven Pulse Tube Cryocooler Operating in Liquid Nitrogen Temperature. Chinese Science Bulletin. ISSN 1001-6538, vol. 54(23), p. 4428-4431.

32. Yoon S. B. 1997. Dynamic Analysis of a Reciprocating Linear Actuator for Gas Compression using Finite Element Method. IEEE Transactions on Magnetics. ISSN 0018-9464, vol. 33(5), p. 4113-4115.

33. Jang S. M. 2005. Thrust Analysis and Measurements of Tubular Linear Actuator with Cylindrical Halbach Array. IEEE Transactions on Magnetics. ISSN 0018-9464. 41(5), p. 2028-2031.

34. Jang S. M. 2005. The Influence of Mechanical Resonance on the Dynamic Performance of a Tubular Linear Actuator with Halbach Array. Proceedings of the 8th International Conference on Electrical Machines and Systems. ICEMS. September 27-29, Nanjing, China. ISBN 7-5062-7407-8, vol. 1, p. 264-269.

35. Jang S. M. 2005. The Influence of Mechanical Spring on The Dynamic Performance of a Moving – Magnet Linear Actuator with Cylindrical Halbach Array. Conference Record of the 2005

TMPE – 12, Justinas Gerbenis

Tiesiaieigio švytuojamojo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametrų įtaka variklio rodikliams

Industry Applications Conference. 40th IAS Annual Meeting. October 2-6, Honkong. ISBN 0-7803-9208-6, vol. 3, p. 2132-2139.

36. Jang S. M., Jeong S. S. 1997. Armature Reaction Effect and Inductance of Moving Coil Linear Oscillatory Actuator with Unbalanced Magnetic Circuit. IEEE Transactions on Magnetics. ISSN 0018-9464. 37(4), p. 2847-2850.

37. Jankūnas V., 2013. Švytuojamojo judesio sinchroninių pavarų su impulsiniais maitinimo šaltiniais tyrimas: daktaro disertacija. Kaunas.

38. Jankūnas V., Eidukas D., Guseinovicienė E., Cirtautas V. 2009. Investigation of Supply Possibilities of Mechatronic Actuator. Electronics and Electrical Engineering. ISSN 1392-1215. Kaunas: Technologija, No. 5(93), p. 25–28.

39. Jankūnas V., Eidukas D., Guseinovicienė E. 2011. Position Measurement of Oscillating Linear Movement of Mechatronic Device. Electronics and Electrical Engineering. ISSN 1392-1215. Kaunas: Technologija, No. 3(109), p. 7–10.

40. Jankūnas V., Guseinovicienė E., Urmonienė L. 2008. Adequacy of Mathematical and Physical Model of Oscillating Mechatronic Device. Electronics and Electrical Engineering. ISSN 1392-1215. Kaunas: Technologija, No. 7(87), p. 69–72.

41. Karaliūnas B. 2008. Research on Electric and Magnetic Asymmetry of Linear and Arc Motors. Electronics and Electrical Engineering. ISSN 1392-1215. Kaunas: Technologija, No. 1(81), p. 61–64.

42. Karaliūnas B., Matkevičius E. 2007. Investigation of the Linear Induction Motor Braking Modes by Spectral Method. Electronics and Electrical Engineering. ISSN 1392-1215. Kaunas: Technologija, No. 3(75), p. 37–40.

43. Karaliūnas B., Matkevičius E., Radzevičius L. 2008. Magnetic Field in the Air Gap of Double-sided Linear Induction Machine. Electronics and Electrical Engineering. ISSN 1392-1215. Kaunas: Technologija, No. 5(85), p. 13–16.

44. Karaliūnas B., Matkevičius E., Radzevičius, L. 2009. Peculiarities of Linear Induction Machine, Operating at the Mode of Phase Regulator. Electronics and Electrical Engineering. ISSN 1392-1215. Kaunas: Technologija, No. 4(92), p. 83–86.

45. Kim T. H. 2004. Development of a Flux Concentration-Type Linear Oscillatory Actuator. IEEE Transactions on Magnetics. ISSN 0018-9464. 40(4), p. 2092-2094.

46. Ko J., Jeong S. 2008. Analysis on the Stirling-Type Pulse Tube Refrigerator in Consideration of Dynamics of Linear Compressor. Cryogenics. ISSN 0011-2275. 48(1-2), p. 68-76.

47. Kraus B., Reick H., Schober U., Schroter A. 2005. Elektromotor für ein elektrisches Kleingerät. Patento Nr.: DE 103 55 446 A1.

48. Kudarauskas S. 2008. Development of Electrical System for Hybrid Vehicles using the Free-Swinging Piston Engine and Oscillating Rotating Generator. The 13th Power Electronics and Motion Control Conference. EPE-PEMC. September 1-3, Poznan, Poland. ISBN 978-1-4244-1741-4, p. 2200-2204.

49. Kudarauskas S. 2008. Švytuojamosios elektros mašinos: monografija. Klaipėda: Klaipėdos universiteto leidykla.

50. Lamantia M. 2002. Development of a High Performance Linear Compressor System. 17th European User Conference. October 14-16. Blankenberge, Belgium. ESRI, p. 1-8.

51. Li Q., Ding F., Wang C. 2005, Novel Bidirectional Linear Actuator for Electrohydraulic Valves. IEEE Transactions on Magnetics. ISSN 0018-9464, 41(6), p. 2199-2201.

52. Lin Z., Wang J., Howe D. A. 2011. Learning Feed-Forward Current Controller for Linear Reciprocating Vapor Compressors. IEEE Transactions on Industrial Electronics. ISSN 0278-0046, 58(8), p. 3383-3390.

53. Lu Q. 2011. Thrust Force of Novel PM Transverse Flux Linear Oscillating Actuators with Moving Magnet. IEEE Transactions on Magnetics. ISSN 0018-9464, pp(99), p. 1-4.

54. Magcraft 2007. Permanent magnet selection and design handbook. America: National imports LLC.

55. Magnetai. [interaktyvus], [žiūrėta 2014 m. gegužės 13 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.skymagnets.com/index.php>>.

56. Magnetai. [interaktyvus], [žiūrėta 2014 m. gegužės 13 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.magnetas-magnetas.com/>>.

57. Matkevičius E., Radzevičius L. 2007. Mathematical Model of the Linear Motor. Electronics and Electrical Engineering. ISSN 1392-1215. Kaunas: Technologija, No. 5(77), p. 11–14.

58. Mizuno T. 2005. An examination for increasing the motor constant of a cylindrical moving magnet-type linear actuator. Magnetics, IEEE Transactions on 41.10, p. 3976-3978.

59. Molis M., Matkevičius E., Radzevičius L. 2008. The Experimental Research of the Linear Motor. Electronics and Electrical Engineering. ISSN 1392-1215. Kaunas: Technologija, No. 7(87), p. 57–60.

60. Molis M., Matkevičius E., Radzevičius L. 2009. Calculation of the Mathematical Model of the Linear Motor. Electronics and Electrical Engineering. ISSN 1392-1215. Kaunas: Technologija, No. 7(95), p. 91–94.

61. Oono M. 2009. Analysis of a New Linear Actuator Made of Soft Magnetic Composite Material With Spring. International Conference on Electrical Machines and Systems. ICEMS. November 15-18. Tokyo, Japan. ISBN 978-1-4244-5177-7, p. 1-6.

62. Park K. B., Hong E. P. 2007. Linearmotor und diesen verwendender linearkompressor. Patento Nr.: DE 10 2006 023 445 A1.
63. Paulides J. J. H. 2006. Active Roll Compensation for Automotive Applications using a Brushless Direct-Drive Linear Permanent Magnet Actuator. 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference. PESC. June 18-22, Jeju, South Korea. ISBN 0-7803-9716-9, p. 1-6. [96S]
64. Pennander L. O., Nord G. 2006. Design of Soft Magnetic Composite Components for Tubular Linear Motors. Miami, Motor and Drive Systems Conference, vol. 16.
65. Pompermaier C. 2010. Performance Analysis of a Tubular Linear Motor Applied in Compressors. 5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD). April 19-21, Brighton, UK. (CD-ROM), p. 1-4.
66. Poška A. J., Savickienė Z., Šlepikas A. 2008. Unconventional Methods of Regulation and Control of Linear Electric Drives. Electronics and Electrical Engineering. ISSN 1392-1215. Kaunas: Technologija, No. 7(87), p. 65–68.
67. Poška A. J., Savickienė Z., Šlepikas A. 2010. Control and Adjustment of Linear Induction Motor Starting Force. Electronics and Electrical Engineering. ISSN 1392-1215. Kaunas: Technologija, No. 2(98), p. 21–24.
68. Radzevičius L., Matkevičius E. 2007. Research of the Characteristics of the Linear Induction Motor. Electronics and Electrical Engineering. ISSN 1392-1215. Kaunas: Technologija, No. 6(78), p. 9–12.
69. Rinkevičienė R., Lisauskas S. 2007. Control Environment of Linear Induction Drive Dynamics Models. Electronics and Electrical Engineering. ISSN 1392-1215. Kaunas: Technologija, No. 8(80), p. 63–66.
70. Rinkevičienė R., Smilgevičius A. 2007. Linear Induction Motor at Present Time. Electronics and Electrical Engineering. ISSN 1392-1215. Kaunas: Technologija, No. 6(78), p. 3–8.
71. Sadauskas T., Smilgevičius A., Savickienė Z. 2007. Distribution of Magnetic Field of Linear Induction Motor. Electronics and Electrical Engineering. ISSN 1392-1215. Kaunas: Technologija, No. 4(76), p. 63–66.
72. Samuitis A. 1994. Švytuojančio judesio pulsuojančios srovės variklio tyrimas. KU mokslo darbai. Technikos mokslai. Serija D, 1, Klaipėda, p. 87-95
73. Savickienė Z., Poška A. J. 2007. Simplified Calculation of Linear Induction Drives Characteristics. Electronics and Electrical Engineering. ISSN 1392-1215. Kaunas: Technologija, No. 5(77), p. 15–18.
74. Senulis A., 2013. Dvimasio tiesiaieigio švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso tyrimas spektriniu aspektu: daktaro disertacija. Kaunas.

75. Senulis A., Eidukas D., Guseinovicė E. 2011. Generalized mathematical model of controlled linear oscillating mechatronic device // Elektronika ir elektrotechnika = Electronics and Electrical Engineering. Kaunas: Technologija. ISSN 1392-1215. Nr. 2(108), p. 55-60. [ISI Web of Knowledge: Web of Sciences, INSPEC; VINITI; EBSCO].

76. Senulis A., Gerbenis J., 2012. Tiesiaieigio švytuojamąo judesio sinchroninio žadinamojo elektros variklio – kompresoriaus kūrimo aspektai. Technologijos mokslo darbai vakarų Lietuvoje. Klaipėda: Klaipėdos universiteto leidykla, p. 11-17.

77. Senulis A., Guseinovicė E., Jankūnas V., Urmonienė L., Andziulis A. Didžiokas R. 2007. Experimental investigation of oscillation center displacement of oscillating pulsating current motor and springless compressor drive // Elektronika ir elektrotechnika = Electronics and Electrical Engineering = Электроника и электротехника. Kaunas: Technologija. ISSN 1392-1215. Nr. 7(79), p. 66-69. [ISI Web of Knowledge: Web of Sciences, INSPEC; VINITI; EBSCO].

78. Senulis A., Guseinovicė E., Urmonienė L. 2010. Control possibilities of oscillating electrical motor using FFT analysis data // JVE Journal of Vibroengineering. Kaunas: Vibromechanika. ISSN 1392-8716. Vol. 12, no. 1, No. 530, p. 82-88. [ISI Web of Science; SCOPUS; EBSCO; INSPEC; VINITI].

79. Shokrollahi H., Janghorban K. 2007. Soft magnetic composite materials. Journal of Materials Processing Technology, vol 189, p. 1-12.

80. Simanynicė L. 2002. Švytuojamąo variklio ir kompresoriaus pavaros darbo charakteristikų analizė. Elektronika ir Elektrotechnika. ISSN 1392-1215. Kaunas: Technologija, Nr. 5(40), p. 51-54.

81. Soft, magnetic composites permit more creative motor designs. [interaktyvus], [žiūrėta 2014 m. gegužės 13 d.]. Prieiga per internetą: < <http://www.appliancedesign.com/articles/print/85534-motor-design-thinking-in-3d> >.

82. Thompson, M., T. 2009. Practical Issues in the Use of NdFeB Permanent Magnets in Maglev, Motors, Bearings and Eddy Current Brakes. Proceedings of the IEEE, vol. 97, p. 1758–1767.

83. Tsai N. C., Chiang C. W. 2010. Design and Analysis of Magnetically-Drive Actuator Applied for Linear Compressor. Mechatronics. ISSN 0957-4158. 5(20), p. 596-603.

84. Tsai N. C., Chiang C. W. 2010. High-Frequency Linear Compressor and Lateral Position Regulation. IEEE Transactions on Control Systems Technology. ISSN 1063-6536, pp(99) p. 1-12.

85. Uchida M. 2008. Sliding Mode Servo Control with Feedforward Compensation for Electromagnetic Engine Valve. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Xi'an, China 2-5 July, p. 589–594.

86. Ummaneni R. B. 2009. Experimental Characterisation of Linear Permanent Magnet Actuator with Gas Springs. IEEE International Electric Machines and Drives Conference. IEMDC. May 3-6, Miami, Florida, USA. ISBN 978-1-4244-4251-5, p. 369-372.

87. Ummaneni R. B., Nilssen R., Brennvall J. E. 2007. Force Analysis in Design of High Power Linear Permanent Magnet Actuator with Gas Springs in Drilling Applications. IEEE International Electric Machines & Drives Conference. IEMDC. May 3-5, Antalya, Turkey. ISBN 1-4244-0742-7, vol. 1., p. 285-288.

88. Urmonienė L. 2011. Investigation of Energetic Parameters of Oscillating Synchronous Pulsating Current Motors. Electronics and Electrical Engineering. ISSN 1392-1215. Kaunas: Technologija, No. 4(110), p. 17–20.

89. Wang J., Howe D., Lin Z. 2007. Comparative Studies on Linear Motor Topologies for Reciprocating Vapor Compressors. IEEE International Conference on Electric Machines & Drives Conference. IEMDC, May 3-5. Antalya, Turkey. ISBN 1-4244-0742-7. 2007, vol. 1, p. 364-369.

90. Wang J., Howe D., Lin Z. 2008. Analysis of a short-stroke, single phase, quasi-Halbach magnetized tubular permanent magnet motor for linear compressor applications. Electric Power Applications, p. 193–200.

91. Wang J., Howe D., Lin Z. 2010. Design Optimization of Short-Stroke Single-Phase Tubular Permanent-Magnet Motor for Refrigeration Applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics. ISSN 0278-0046. 57(1), p. 327-334.

92. Wang J., Ibrahim T., Howe D. 2008. Analysis of a single phase, quasi-Halbach magnetised tubular permanent magnet motor with non-ferromagnetic supporting tube. Power Electronics, Machines and Drives. 4th IET Conference on, p. 762–766.

93. Wang J., Ibrahim T., Howe D. 2010. Prediction and measurement of iron loss in a Short-Stroke, single-phase, tubular permanent magnet machine. Magnetics, IEEE Transactions on, vol. 46, p. 1315–1318. (15M)

94. Wang J., Zhengyu L., Howe D. 2010. Design optimization of short-stroke, single phase tubular permanent magnet motor for refrigeration applications. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 57, p. 327–334.

95. Wang J., Zhengyu L., Howe D. 2011. A learning feed-forward current controller for linear reciprocating vapor compressors. Industrial electronics, IEEE Transactions on, vol. 58, p. 3383–3390.

96. Wang, J., Zhengyu, L., Howe, D. 2007. A Resonant frequency tracking technique for linear vapor compressors. Electric Machines & Drives Conference, vol. 1, p. 370–375.

97. Wu D., Xie X., Zhou S. 2010. Design of a Normal Stress Electromagnetic Fast Linear Actuator. IEEE Transactions on Magnetics. ISSN 0018-9464. 4(46), p. 1007-1014.

98. Zhang J., Chang Y., Xing Z. 2009. Study on Self-Sensor of Linear Moving Magnet Compressor's Piston Stroke. IEEE Sensors Journal. ISSN 1530-437X, 9(2), p. 154-158.

99. Zhang S., Norum L., Nilssen R. 2009. Analysis of tubular linear permanent magnet motor for drilling application. International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems. EPECS . November 10-12, Sharjah, United Arab Emirates. ISBN 978-1-4244-5477-8.P. 1-5.

TMPE – 12, Justinas Gerbenis

Tiesiaieigio švytuojamojo sinchroninio žadinamojo elektros variklio konstrukcijos parametų įtaka variklio rodikliams

PRIEDAI