

KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS
JŪRŲ TECHNIKOS FAKULTETAS
ELEKTROTECHNIKOS KATEDRA

TVIRTINU _____
Katedros vedėja: prof. dr. Eleonora Guseinoviėnė
2014-....-....

ELEKTRONIKOS IR ELEKTROS INŽINERIJOS MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ
PROGRAMOS „PRAMONĖS ELEKTROS ĮRANGA IR AUTOMATIKA“
(Studijų kodas 612H60002)
BAIGIAMASIS DARBAS

AŠINIO SRAUTO GENERATORIAUS TYRIMAS

Recenzentas: _____
2014-....-....

Vadovas: prof. dr. Eleonora Guseinoviėnė
2014-....-....

Recenzentas: _____
2014-....-....

Rengė: TMPE-12, Karolis Navickas
2014-....-....

Klaipėda, 2014

KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS
JŪRŲ TECHNIKOS FAKULTETAS
ELEKTROTECHNIKOS KATEDRA

TVIRTINU.....

2014.....

Katedros vedėja: prof. dr. E. Guseinoviėnė

MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS

Studentui **Karoliui Navickui, TMPE-12.**

Darbo tema: Ašinio srauto generatoriaus tyrimas

Užbaigto darbo atidavimo terminas: 2014.....d.

Generatoriaus galia $P_2=10$ kW, apsisukimų skaičius $n=250$ aps/min, dažnis $f=50$ Hz, vieno rotoriaus oro tarpas $g=0,001$ m, naudingumo koeficientas $\eta=0,95$, $\cos\varphi=0,9$, fazių skaičius $m=3$, įtampa 220V, magneto parametrai $B_r=1,2$ T, $\mu_{rec}=1,05$, rotoriaus disko storis $h_m=0,01$ m, santykis tarp elektrovaros ir įtampos $\varepsilon=1,2$, srovės tankis statoriuje $A_m=20\ 000$ A/m

Aiškinamojo rašto turinys:

1. Įvadas
2. Vėjo elektrinės (sudedamosios dalys, konstrukcija, vėjo elektrinių skirstymas, vertikalių ir horizontalių elektrinių palyginimas).
3. Ašinio srauto nuolatinių magnetų mašina (bendras aprašymas, skirtingų konstrukcijų išskyrimas ir aprašymas).
4. Halbacho eilė.
5. Apvijų naudojamų bešerdėje ir feromagnetinėje konstrukcijoje aprašymas.
6. Medžiagų, naudojamų statoriui ir rotoriumi aprašymas.
7. Modeliavimas, keičiant statoriaus medžiagą - M27 plienas, 1018 plienas ir epoksidinė derva.
8. Modeliavimas, keičiant-rotoriaus medžiagą - M19 plienas ir 1100 aliuminis.

9. Modeliavimas, keičiant magnetus- NdFeB ir SmCo.
10. Modeliavimas, keičiant magnetų sudėjimą-įprastas ir Halbacho.
11. Modeliavimas, keičiant apvijos žingsnį ir magneto žingsnį.
12. Modeliavimas, keičiant oro tarpą.
13. Išvados
14. Literatūros sąrašas.

Grafinės dalies turinys:

1. Visais atvejais sudaryti magnetinio srauto tankio modulio ir normalinės magnetinio srauto tankio pirmajame oro tarpe kreives, pateikti magnetinio srauto tankio stiprio skirtingose magnetinės grandinės dalyse ir magnetinės grandinės pjūvio vaizdus.
2. Sudaryti palyginamuosius grafikus- momento, traukos jėgos, srauto, magnetinio srauto tankio, momento priklausomybės nuo srauto ir momento priklausomybės nuo magnetinio srauto tankio.
3. Prieduose pateikti magnetinio lauko stiprio modulio ir normalinio magnetinio lauko stiprio pirmajame oro tarpe kreives

Užduoties išdavimo data: 2014 m.....

Vadovas prof. dr. Eleonora Guseinovienė.....

Užduotį gavau Karolis Navickas.....

2014m.....

ANOTACIJA

Navickas N. Ašinio srauto generatoriaus tyrimas. Pramonės elektros įrangos ir automatikos programos magistro baigiamasis darbas.

Baigiamajame magistro darbe aptariamos skirtingos ašinio srauto generatorių konstrukcijos, jų panaudojimas. Šie generatoriai, ypač bešerdės konstrukcijos, lengvai pasigaminami namų sąlygomis, yra aukšto naudingumo koeficiento ir turi aukštą galios koeficientą. Puikiai panaudojami vėjo elektrinėms, kaip varikliai, dėl savo plokščios formos, labai efektyviai gali būti panaudojami elektromobiliuose, tokį variklį montuojant tiesiai į ratą.

Aprašomos medžiagos, kurias galima naudoti skirtingoms konstrukcijoms, jos lyginimos, bandoma surasti optimalų mašinos variantą, kur būtų maksimaliai didelė magnetinio srauto tankio vertė, mažas pasipriešinimo momentas ir kuo mažesnė traukos jėga. Lyginamos bešerdės ir feromagnetinės konstrukcijos, aptariamos jų teigiamos ir neigiamos savybės.

Tiriamąjoje dalyje baigtinių elementų metodu modeliuojamos magnetinės grandinės, keičiant statoriaus, rotoriaus medžiagą, magnetus, jų sudėjimo tvarką. Lyginama, kuri iš analizuojamų konstrukcijų yra optimaliausia ir labiausiai tinkama eksploatuoti.

Buvo sudaryti magnetinio srauto tankio modulio ir normalinio magnetinio srauto tankio grafikai, taip pat pateikti magnetinės grandinės vaizdai su magnetinio srauto tankio stipriu skirtingose vietose ir pats magnetinės grandinės pjūvis. Iš modeliavimo rezultatų sudaryti palyginamieji įvairių mašinos konstrukcijų grafikai.

Raktiniai žodžiai: ašinio srauto nuolatinių magnetų generatorius, ašinio srauto nuolatinių magnetų bešerdis generatorius, Halbacho eilė, feromagnetinė šerdis.

ABSTRACT

Navickas N., analysis of axial flux generator. Master thesis of study program Electrical equipment and automatics in industry.

In this master thesis various constructions of axial flux generators and their usage are discussed. These generators, especially coreless constructions, are easy to make at home, they have high efficiency and power factor. They are easy to use in wind turbine applications. As motors, because of their flat shape, they are easy to use in electric cars, for in-wheel applications.

Various materials, which are available to use in construction, are discussed, they are compared, optimal version of machine was tried to find, where maximum available value of magnetic flux density, minimum torque and minimum attraction force would be available.

Coreless and ferromagnetic constructions are compared, their positive and negative sides are discussed.

In the modelation part, magnetic circuits were simulated, using finite element method, while changing materials of stator and rotors, permanent magnets and their array. Comparative study is made between analysed constructions, trying to find the optimal and the most suitable for operation.

In this work, magnetic circuit of axial flux permanent magnet generator was simulated, axial flux density module and normal axial flux density graphs were compiled, also views of magnetic circuit, with flux density in various places of magnetic circuit and the cross section of magnetic circuit.

Keywords: axial flux permanent magnet generator, axial flux permanent magnet coreless generator, halbach array, ferromagnetic core.

Paveikslėlių sąrašas

1.1 pav.	HAWT	elektrinės	rotorius	[3]
.....				18
1.2 pav.	HAWT	elektrinės	rotorius, kai naudojamas ASNM generatorius	[8]
.....				19
1.3 pav.	Elektrinės su bokštu vaizdas [6]			19
2.1 pav.	Maiklo Faradėjaus 1831 m. Generatorius [13]			21
2.1 pav.	N. Teslos 1889 m. Užpatentuotas <i>Elektro-magnetinis variklis</i> [2]			22
2.3 pav.	a)-radialinio srauto mašina, b)-ASNMM mašina [2]			24
2.4 pav.	Kairėje- radialinio srauto nuolatinių magnetų mašinos (RSNMM) pjūvis, dešinėje-ašinio srauto nuolatinių magnetų mašinos (ASNMM) vaizdas iš šono [12]			24
2.5 pav.	ASNMM tipai: a) viopusė, su grioveliais b) dvopusė be griovelių, vidinis statorius, du išoriniai rotoriai c) statoriai su grioveliais, rotorius vidinis d) dvipusis bešerdis variklis, statorius vidinis 1-statoriaus šerdis, 2-statoriaus apvijos, 3-rotorius, 4-nuolatiniai magnetai, 5-korpusas, 6-guoliai, 7-velenas [2]			27
2.6 pav.	ASNMM viopusės mašinos a) viopusė b) viopusė su skriemuliu 1-statorius iš plokštelių, 2-nuolatiniai magnetai, 3-rotorius, 4-korpusas, 5-ašis, 6-skriemulys [2]			28
2.7 pav.	ASNMM dvipusė mašina su vidiniu rotoriumi ir 2 išoriniais statoriais 1-rotorius, 2-nuolatiniai magnetai, 3-statoriaus šerdis, 4-statoriaus apvija [2]			28
2.8 pav.	Dvipusis servo variklis su vidiniu rotoriumi ir 2 išoriniais statoriais, su elektromagnetiniu stabdžiu ir enkoderiu. 1-statoriaus apvija, 2-statoriaus šerdis, 3-rotorius su nuolatiniais magnetais, 4-ašis, 5,6-korpusas, 7-jungė, 8-stabdžio korpusas, 9-stabdžio jungė, 10-elektromagnetinis stabdis, 11-enkoderis [2]			29
2.9 pav.	ASNMM dvipusės mašinos su vienu statoriumi a) vidiniu rotoriumi b) išoriniu rotoriumi 1-statoriaus šerdis, 2-statoriaus apvija, 3-plieninis rotorius, 4-nuolatiniai magnetai, 5-derva, 6-korpusas, 7-ašis [2]			30
2.10 pav.	Trifazė apvija, nuolatinių magnetų poliariškumas ir magnetinių srautų kelias dvipusės mašinos su vienu statoriumi be griovelių 1-apvija, 2-nuolatiniai magnetai, 3-statoriaus jungas, 4-rotoriaus jungas [2]			31

2.11 pav. Dvipusė ASNM mašina. 1-statorius su grioveliais, 2-NdFeB magnetas, 3-polių, 4-nemagnetinis rotorius diskas [2].....	32
2.12 pav. Magnetinės grandinės vaizdas. (a)-konstrukcijos be griovelių, (b)-konstrukcijos su grioveliais [2]	32
2.13 pav. Ašinio srauto nuolatinių magnetų bešepetėlis variklis e-TORQ™ su bešerdžiu statoriumi: (a) bendras vaizdas; (b) variklis integruotas saulės energija varomo automobilio rate [2]	33
2.14 pav. Disko tipo bešerdė mašina: 1 -statorius, 2-nuolatiniai magnetai, 3-dvigubas rotorius,4-ašis,5-guoliai,6-korpusas. [2]	34
2.15 pav. Halbacho eilė [32]	35
2.16 pav. Dviejų rotorių nuolatinių magnetų išdėstymas 90°, 60° ir 45° Halbacho eile [2]	36
2.17 pav. Linijinė Halbacho eilė ir magnetinio lauko linijos apie magnetus [33]	36
2.18 pav. Magnetinio srauto tankio kitimas išilgai 2.17 pav. a kontūro [33]	37
2.19 pav. Normalinė ir tangentinė magnetinio srauto tankio dedamosios oro tarpe bešerdėje dvipusėje mašinoje su išoriniais rotoriais, kai magnetai sudėti Halbacho eile, ir kampas (a) 90°, (b) 45° [2]	37
2.20 pav. 6-polės trifazės mašinos su 18 apvijų ir išoriniu rotoriumi, būgno tipo apvija [2]	39
2.21 pav. 8-polės trifazės mašinos su išoriniu rotoriumi, bešerdžio statoriaus apvija [2]	39
2.22 pav. A-trapecinė apvija, B-rombinė apvija [35]	40
2.23 pav. Rombinės apvijos su vandens aušinimu [35]	40
3.1 pav. Magnetinių savybių aiškinamoji B-H kreivė [2]	44
4.1 pav. M-19 plieno B-H kreivė ir savybių lentelė	47
4.2 pav. 1018 plieno B-H kreivė ir savybių lentelė	47
4.3 pav. M-27 plieno B-H kreivė ir savybių lentelė	48
4.4 pav. NdFeB ir SmCo savybių lentelė	48
Magnetinio srauto tankio modulio ir normalinės magnetinio srauto tankio kreivės pateikiamos 4.9....	49
4.6 pav. Magnetinės ASNM generatoriaus grandinės pjūvio vaizdas, kai magnetai sudėti Halbacho eile.	

4.8 pav. Magnetinio srauto tankio B stipris skirtingose magnetinės grandinės dalyse, kai magnetai sudėti Halbacho eile	50
Magnetinio srauto tankio modulio ir normalinės magnetinio srauto tankio kreivės pateikiamos 4.15 ..	52
4.11 pav. Magnetinės ASNM generatoriaus grandinės pjūvio vaizdas, kai magnetai sudėti įprastai	52
4.12 pav. Magnetinės ASNM generatoriaus grandinės pjūvio vaizdas, kai magnetai sudėti Halbacho eile	52
4.13 pav. Magnetinio srauto tankio B stipris skirtingose magnetinės grandinės dalyse, kai magnetai sudėti įprastai	52
4.14 pav. Magnetinio srauto tankio B stipris skirtingose magnetinės grandinės dalyse, kai magnetai sudėti Halbacho eile	53
4.15 pav. Magnetinio srauto tankio modulis $ B $ ir normalinis magnetinio srauto tankis B_n oro tarpe, kai magnetai sudėti įprastai	53
4.16 pav. Magnetinio srauto tankio modulis $ B $ ir normalinis magnetinio srauto tankis B_n oro tarpe, kai magnetai sudėti Halbacho eile	53
Magnetinio srauto tankio modulio ir normalinės magnetinio srauto tankio kreivės pateikiamos 4.21 ..	54
4.17 pav. Magnetinės ASNM generatoriaus grandinės pjūvio vaizdas, kai magnetai sudėti įprastai	54
4.18 pav. Magnetinės ASNM generatoriaus grandinės pjūvio vaizdas, kai magnetai sudėti Halbacho eile	54
4.19 pav. Magnetinio srauto tankio B stipris skirtingose magnetinės grandinės dalyse, kai magnetai sudėti įprastai.....	55
4.20 pav. Magnetinio srauto tankio B stipris skirtingose magnetinės grandinės dalyse, kai magnetai sudėti Halbacho eile	55
4.21 pav. Magnetinio srauto tankio modulis $ B $ ir normalinis magnetinio srauto tankis B_n oro tarpe, kai magnetai sudėti įprastai	55
4.22 pav. Magnetinio srauto tankio modulis $ B $ ir normalinis magnetinio srauto tankis B_n oro tarpe, kai magnetai sudėti Halbacho eile	56
4.23 pav. Magnetinės ASNM generatoriaus grandinės pjūvio vaizdas, kai magnetai sudėti įprastai	57

4.24 pav. Magnetinės ASNM generatoriaus grandinės pjūvio vaizdas, kai magnetai sudėti Halbacho eile	57
4.25 pav. Magnetinio srauto tankio B stipris skirtingose magnetinės grandinės dalyse, kai magnetai sudėti įprastai	57
4.26 pav. Magnetinio srauto tankio B stipris skirtingose magnetinės grandinės dalyse, kai magnetai sudėti Halbacho eile	57
4.27 pav. Magnetinio srauto tankio modulis $ B $ ir normalinis magnetinio srauto tankis B_n oro tarpe, kai magnetai sudėti įprastai	58
4.28 pav. Magnetinio srauto tankio modulis $ B $ ir normalinis magnetinio srauto tankis B_n oro tarpe, kai magnetai sudėti Halbacho eile	58
4.29 pav. Magnetinės ASNM generatoriaus grandinės pjūvio vaizdas, kai magnetai sudėti įprastai	59
4.30 pav. Magnetinės ASNM generatoriaus grandinės pjūvio vaizdas, kai magnetai sudėti Halbacho eile	59
4.31 pav. Magnetinio srauto tankio B stipris skirtingose magnetinės grandinės dalyse, kai magnetai sudėti įprastai	60
4.32 pav. Magnetinio srauto tankio B stipris skirtingose magnetinės grandinės dalyse, kai magnetai sudėti Halbacho eile	60
4.33 pav. Magnetinio srauto tankio modulis $ B $ ir normalinis magnetinio srauto tankis B_n oro tarpe, kai magnetai sudėti įprastai	60
4.34 pav. Magnetinio srauto tankio modulis $ B $ ir normalinis magnetinio srauto tankis B_n oro tarpe, kai magnetai sudėti Halbacho eile	61
4.35 pav. Magnetinės ASNM generatoriaus grandinės pjūvio vaizdas, kai magnetai sudėti įprastai	62
4.36 pav. Magnetinės ASNM generatoriaus grandinės pjūvio vaizdas, kai magnetai sudėti Halbacho eile	62
4.37 pav. Magnetinio srauto tankio B stipris skirtingose magnetinės grandinės dalyse, kai magnetai sudėti įprastai	62
4.38 pav. Magnetinio srauto tankio B stipris skirtingose magnetinės grandinės dalyse, kai magnetai sudėti Halbacho eile	63

4.39 pav. Magnetinio srauto tankio modulis $ B $ ir normalinis magnetinio srauto tankis B_n oro tarpe, kai magnetai sudėti įprastai	63
4.40 pav. Magnetinio srauto tankio modulis $ B $ ir normalinis magnetinio srauto tankis B_n oro tarpe, kai magnetai sudėti Halbacho eile	63
4.41 pav. Magnetinės ASNM generatoriaus grandinės pjūvio vaizdas, kai magnetai sudėti Halbacho eile	64
4.42 pav. Magnetinio srauto tankio B stipris skirtingose magnetinės grandinės dalyse, kai magnetai sudėti Halbacho eile	64
4.43 pav. Magnetinio srauto tankio modulis $ B $ ir normalinis magnetinio srauto tankis B_n oro tarpe, kai magnetai sudėti Halbacho eile	65
4.44 pav. Magnetinės ASNM generatoriaus grandinės pjūvio vaizdas, kai magnetai sudėti Halbacho eile	65
4.45 pav. Magnetinio srauto tankio B stipris skirtingose magnetinės grandinės dalyse, kai magnetai sudėti Halbacho eile	66
4.46 pav. Magnetinio srauto tankio modulis $ B $ ir normalinis magnetinio srauto tankis B_n oro tarpe, kai magnetai sudėti Halbacho eile	66
4.47 pav. Magnetinės ASNM generatoriaus grandinės pjūvio vaizdas, kai magnetai sudėti Halbacho eile	67
4.48 pav. Magnetinio srauto tankio B stipris skirtingose magnetinės grandinės dalyse, kai magnetai sudėti Halbacho eile.....	67
4.49 pav. Magnetinio srauto tankio modulis $ B $ ir normalinis magnetinio srauto tankis B_n oro tarpe, kai magnetai sudėti Halbacho eile	67
4.50 Skirtingų savybių mašinų magnetinio srauto vertės pirmajame oro tarpe	69
4.51 Normalinės magnetinio srauto tankio vertės pirmajame oro tarpe.....	70
4.52 Pirmojo rotoriaus traukos jėga	72
4.53 Pirmojo rotoriaus sukimo momentas	74
4.54 Pirmojo rotoriaus momento priklausomybė nuo normalinės magnetinio srauto tankio pirmajame oro tarpe $M=f(B_n)$	75

4.55 Pirmojo rotoriaus momento priklausomybė nuo magnetinio srauto pirmajame oro tarpe $M=f(\Phi)$	76
4.56 Pirmojo rotoriaus momento priklausomybė nuo normalinės magnetinio srauto tankio pirmajame oro tarpe $M=f(B_n)$, kai konstrukcija bešerdė	77
4.57 Pirmojo rotoriaus momento priklausomybė nuo magnetinio srauto pirmajame oro tarpe $M=f(\Phi)$, kai konstrukcija bešerdė	78
4.58 Pirmojo rotoriaus traukos jėga, kai konstrukcija bešerdė	79
5.1 pav. $ H $ ir $H.n$ – Magnetinio lauko stiprio modulis išilgai analizuojamo kontūro ir statmenai analizuojamos linijos, kai magnetai sudėti įprastai	85
5.2 pav. $ H $ ir $H.n$ – Magnetinio lauko stiprio modulis išilgai analizuojamo kontūro ir statmenai analizuojamos linijos, kai magnetai sudėti į Halbacho eilę	85
5.3 pav. $ H $ ir $H.n$ – Magnetinio lauko stiprio modulis išilgai analizuojamo kontūro ir statmenai analizuojamos linijos, kai magnetai sudėti įprastai	86
5.4 pav. $ H $ ir $H.n$ – Magnetinio lauko stiprio modulis išilgai analizuojamo kontūro ir statmenai analizuojamos linijos, kai magnetai sudėti į Halbacho eilę	86
5.5 pav. $ H $ ir $H.n$ – Magnetinio lauko stiprio modulis išilgai analizuojamo kontūro ir statmenai analizuojamos linijos, kai magnetai sudėti įprastai	87
5.6 pav. $ H $ ir $H.n$ – Magnetinio lauko stiprio modulis išilgai analizuojamo kontūro ir statmenai analizuojamos linijos, kai magnetai sudėti į Halbacho eilę	87
5.7 pav. $ H $ ir $H.n$ – Magnetinio lauko stiprio modulis išilgai analizuojamo kontūro ir statmenai analizuojamos linijos, kai magnetai sudėti įprastai	88
5.8 pav. $ H $ ir $H.n$ – Magnetinio lauko stiprio modulis išilgai analizuojamo kontūro ir statmenai analizuojamos linijos, kai magnetai sudėti į Halbacho eilę	88
5.9 pav. $ H $ ir $H.n$ – Magnetinio lauko stiprio modulis išilgai analizuojamo kontūro ir statmenai analizuojamos linijos, kai magnetai sudėti įprastai	89
5.10 pav. $ H $ ir $H.n$ – Magnetinio lauko stiprio modulis išilgai analizuojamo kontūro ir statmenai analizuojamos linijos, kai magnetai sudėti į Halbacho eilę.....	89
5.11 pav. $ H $ ir $H.n$ – Magnetinio lauko stiprio modulis išilgai analizuojamo kontūro ir statmenai analizuojamos linijos, kai magnetai sudėti įprastai	90

5.12 pav. $ H $ ir $H.n$ – Magnetinio lauko stiprio modulis išilgai analizuojamo kontūro ir statmenai analizuojamos linijos, kai magnetai sudėti į Halbacho eilę	90
5.13 pav. $ H $ ir $H.n$ – Magnetinio lauko stiprio modulis išilgai analizuojamo kontūro ir statmenai analizuojamos linijos, kai magnetai sudėti į Halbacho eilę	91
5.14 pav. $ H $ ir $H.n$ – Magnetinio lauko stiprio modulis išilgai analizuojamo kontūro ir statmenai analizuojamos linijos, kai magnetai sudėti į Halbacho eilę	91
5.15 pav. $ H $ ir $H.n$ – Magnetinio lauko stiprio modulis išilgai analizuojamo kontūro ir statmenai analizuojamos linijos, kai magnetai sudėti į Halbacho eilę	92

Lentelių sąrašas

3.1. lentelė Daugiausiai naudojamų silicio plienų pavadinimai pagal skirtingus standartus [2].....	41
3.2. lentelė <i>Accucore</i> kompozicinės medžiagos B-H kreivės taškai ir nuostoliai[2]	42
3.3. lentelė Magnetų savybių palyginimo lentelė [37]	43
3.4. lentelė Hicorex neodimio magnetų savybės [2]	45

TURINYS

ĮVADAS.....	16
1.VĖJO ELEKTRINĖS.....	18
1.1 Vėjo elektrinės konstrukcija.....	18
1.2 Vertikalių ir horizontalių vėjo elektrinių palyginimas.....	20
2.AŠINIO SRAUTO NUOLATINIŲ MAGNETŲ MAŠINA.....	21
2.1 Ašinio srauto mašinos ir jų vystymosi istorija.....	21
2.2 Ašinio ir radialinio srautų mašinų palyginimas.....	23
2.3 Ašinio srauto mašinų tipai ir konstrukcijos.....	26
2.3.1 Vienpusė mašina.....	27
2.3.2 Dvipusė mašina su vidiniu rotoriumi.....	28
2.3.3 Dvipusės mašinos su vidiniu žiedo formos statoriumi.....	30
2.3.4 Dvipusės mašinos su vidiniu statoriumi su grioveliais.....	31
2.3.5 Dvipusės mašinos su vidiniu bešerdžiu nemagnetiniu statoriumi.....	33
2.3.6 Dvipusės mašinos su vidiniu bešerdžiu nemagnetiniu statoriumi ir bešerdžiais rotoriais.....	34
2.4 Halbacho eilė.....	35
2.5 Apvijos.....	38
2.5.1 Būgno tipo apvija.....	38
2.5.2 Bešerdžio statoriaus apvija. Trapecinė apvija.....	39
2.5.3 Bešerdžio statoriaus apvija. Rombinė apvija.....	40
3.MAŠINŲ GAMYBOJE NAUDOJAMOS MEDŽIAGOS.....	41
3.1 Medžiagos statoriui.....	41
3.2 Medžiagos rotoriumi.....	43
4. TIRIAMOJI DALIS.....	45
4.1 Bendri duomenys.....	45
4.2 Virtualaus eksperimento rezultatai.....	46
4.2.1 Magnetinės grandinės modeliui panaudotos medžiagos.....	46
4.2.2 Magnetinė grandinė, kai statoriuje naudojamas M-27, rotoriuje M-19, magnetai NdFeB 40MGOe.....	49

4.2.3	Magnetinė grandinė, kai statoriuje naudojamas M-27, rotoriuje 1100 aliuminis, magnetai NdFeB 40MGOe	51
4.2.4	Magnetinė grandinė, kai statoriuje naudojamas 1018 plienas, rotoriuje M-19, magnetai NdFeB 40MGOe	54
4.2.5	Magnetinė grandinė, kai statoriuje naudojamas M-27 plienas, rotoriuje M-19, magnetai SmCo 27MGOe	56
4.2.6	Magnetinė grandinė, kai statoriuje naudojamas M-27 plienas, rotoriuje M-19, magnetai NdFeB 40MGOe, magneto žingsnis sumažintas 2mm, nekeičiant jo tūrio.....	59
4.2.7	Magnetinė grandinė, kai statoriuje naudojamas M-27 plienas, rotoriuje M-19, magnetai NdFeB 40MGOe, apvijos žingsnis padidintas 10 mm	61
4.2.8	Magnetinė grandinė, kai statoriuje naudojama epoksidinė derva, rotoriuje 1100 aliuminis, magnetai NdFeB 40MGOe.....	64
4.2.9	Magnetinė grandinė, kai statoriuje naudojama epoksidinė derva, rotoriuje 1100 aliuminis, magnetai NdFeB 40MGOe, magneto žingsnis sumažintas 2mm, nekeičiant jo tūrio.....	65
4.2.10	Magnetinė grandinė, kai statoriuje naudojama epoksidinė derva, rotoriuje 1100 aliuminis, magnetai NdFeB 40MGOe, apvijos žingsnis padidintas 10 mm.....	66
4.3	Gautų rezultatų palyginamieji grafikai	68
IŠVADOS.....		80
PRIEDAI		85
	H ir H.n kreivės, kai statoriuje naudojamas M-27, rotoriuje M-19, magnetai NdFeB 40MGOe	85
	H ir H.n kreivės, kai statoriuje naudojamas M-27, rotoriuje Aluminum 1100, magnetai NdFeB 40MGOe.....	86
	H ir H.n kreivės, kai statoriuje naudojamas 1018 plienas, rotoriuje M19, magnetai NdFeB 40MGOe	87
	H ir H.n kreivės, kai statoriuje naudojamas M27 plienas, rotoriuje M19, magnetai SmCo 27MGOe	88
	H ir H.n kreivės, kai statoriuje naudojamas M27 plienas, rotoriuje M19, magnetai NdFeB 40MGOe, magneto žingsnis sumažintas 2mm, nekeičiant jo tūrio	89
	H ir H.n kreivės, kai statoriuje naudojamas M27 plienas, rotoriuje M19, magnetai NdFeB 40MGOe, apvijos žingsnis padidintas 10mm.....	90
	H ir H.n kreivės, kai statoriuje naudojama epoksidinė derva, rotoriuje 1100 aliuminis, magnetai NdFeB 40MGOe	91

H ir H.n kreivės, kai statoriuje naudojama epoksidinė derva, rotoriuje 1100 aliuminis, magnetai NdFeB 40MGOe, magneto žingsnis sumažintas 2mm, nekeičiant jo tūrio.....	91
H ir H.n kreivės, kai statoriuje naudojama epoksidinė derva, rotoriuje 1100 aliuminis, magnetai NdFeB 40MGOe, apvijos žingsnis padidintas 10 mm	92

ĮVADAS

Garų variklio išradimas, vėliau sekęs labai greitas kitų technologijų vystymasis, kur naudojamas gana lengvai išgaunamas iškastinis kuras, rodėsi, nustumus vėjo elektrines į užmarštį amžiams. Netgi galima teigti, kad 20 amžiaus 6-jame dešimtmetyje tai buvo įvykę. Vis dėlto, to pačio amžiaus septintojo dešimtmečio pabaigoje, pradėjus stipriai brangti ištekliams, prasidėjo vėjo elektrinių skaičiaus augimo periodas. 20 a. 10 dešimtmetyje, vėjo elektrinių augimas pasidarė labai spartus. Milžinišką vėjo elektrinių skaičiaus didėjimą galime laikyti vienu reikšmingiausių energetikos įvykių 20-jame amžiuje. [6]

Vėjo elektrinėse naudojami įvairių tipų generatoriai. Darbe bus tiriamas ašinio srauto nuolatinių magnetų generatorius. Generatoriaus konstrukcija yra perspektyvi, su geromis aušinimo savybėmis, dideliu momentu bei prilygsta ar net lenkia įprastinių konstrukcijų generatorius, ypač jei lyginsime tos pačios masės ar tūrio ašinio ir radialinio srautų mašinas jų galių atžvilgiu.

Ašinio srauto nuolatinių magnetų mašina (ASNMM) (AFPM-axial flux permanent magnet), taip pat dar vadinama disko tipo mašina, yra patraukli alternatyva įprastinei radialinio srauto mašinoms dėl savo „blyno“ formos (naudinga ten, kur nėra galimybės sumontuoti radialinius generatorius, kurių ašinis ilgis daug didesnis), kompaktiškos konstrukcijos bei aukšto sukimo momento. ASNMM varikliai yra tinkami elektromobiliams, siurbliams, vožtuvų valdymui, centrifugoms, ventiliatoriams, robototeknikai bei tinkami panaudojimui kitose pramonės srityse. ASNMM mašinos kaip generatoriai naudojami vėjo elektrinėse, portabiliuose generatoriuose, transporto technikoje. Šių mašinų galia svyruoja nuo vato dalių iki megavatų. [2]

Darbo objektas: ašinio srauto generatorius

Darbo tikslas: Sudaryti ir iširti ašinio srauto generatoriaus magnetinės ir elektrinės grandinių parametų priklausomybes nuo generatoriaus konstrukcijos parametų..

Darbo uždaviniai:

- Nustatyti esamų ašinio srauto generatorių charakteristikų ir parametų įvairovę ir tirtinų parametų aibę magnetinėms generatoriaus grandinėms.
- Atlikti analitinį kuriamo generatoriaus magnetinių ir elektrinių grandinių įvertinimą.
- Baigtinių elementų metodu sumodeliuoti tiriamojo generatoriaus magnetinę grandinę ir nustatyti geriausius šios grandinės parametrus.
- Sudaryti sukurto generatoriaus magnetinių ir elektrinių grandinių kintamųjų charakteristikas šių grandinių parametų atžvilgiu.

Baigiamajame darbe tikslo ir uždavinių bus siekiama šiais būdais:

- 1) Mokslinės literatūros analizė;
- 2) Matematinis modeliavimas;
- 3) Duomenų regresinė analizė;
- 4) Analitinis skaičiavimas;
- 5) Virtualus eksperimentas.

1. VĖJO ELEKTRINĖS

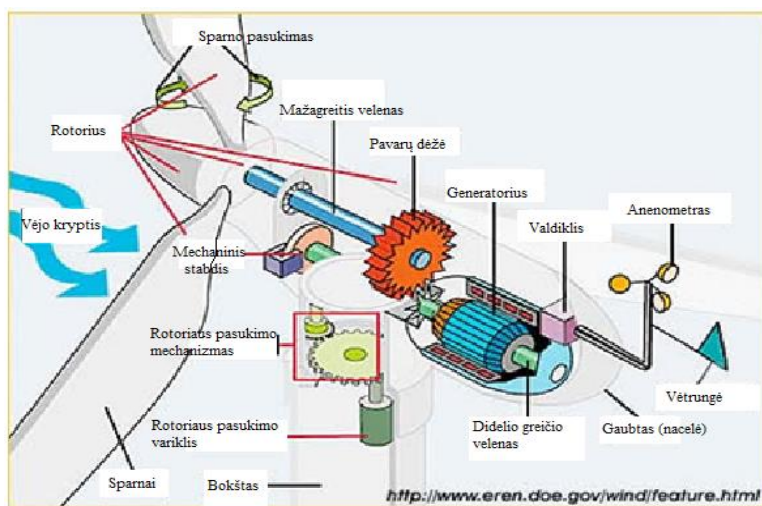
1.1 Vėjo elektrinės konstrukcija

Šiuo metu pats populiariausias ir labiausiai paplitęs elektrinės dizainas yra HAWT (angl. horizontal axis wind turbine). Tai reiškia, kad sukimosi ašis yra lygiagreči žemei. HAWT rotorai yra skirstomi:

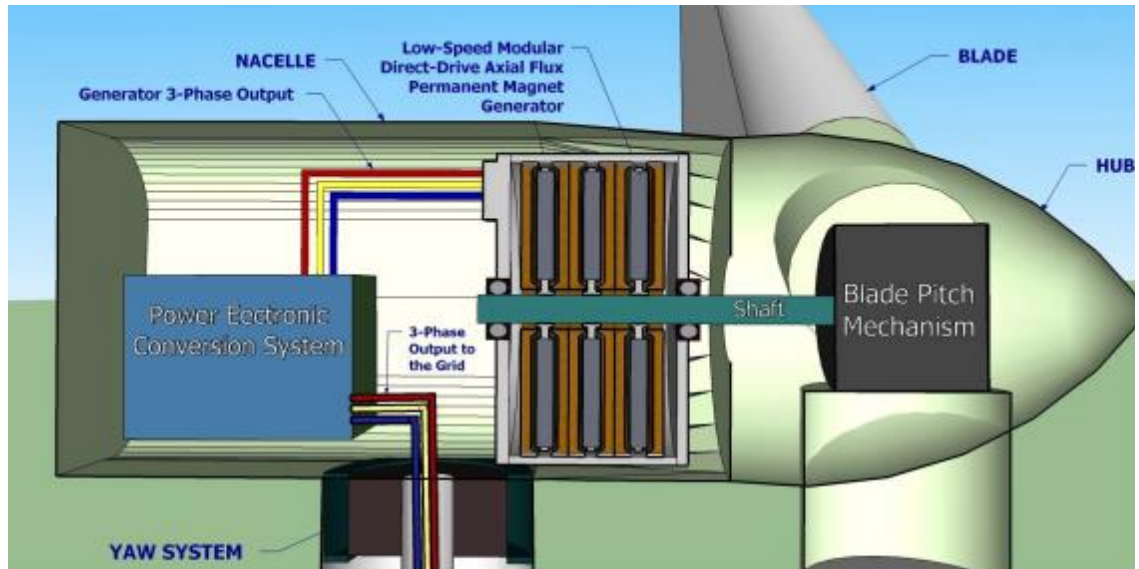
- Priešvėjiniai ir pagalvėjiniai;
- Pagal centrą (hub)-standus arba balansuojantis;
- Pagal sparnų valdymą-kai sparnai pasukami, norint pagauti efektyviausią vėją, arba kai fiksuoti;
- Pagal sparnų kiekį-paprastai du arba trys;
- Taip pat pagal rotoriaus tipą-pasukamas pavėjui, arba fiksuotos padėties;
- Pagal sparnų medžiagą, konstrukcijos tipą;
- Pastovaus arba kintančio rotoriaus greičio;
- Pagal naudojamo generatoriaus tipą;
- Pagal pavarų-generatorius sukamas per pavarų dėžę arba tiesiogiai

[6].

Horizontalios ašies elektrinės rotoriaus sudedamosios dalys pateikiamos 1.1 ir 1.2 paveiksluose :

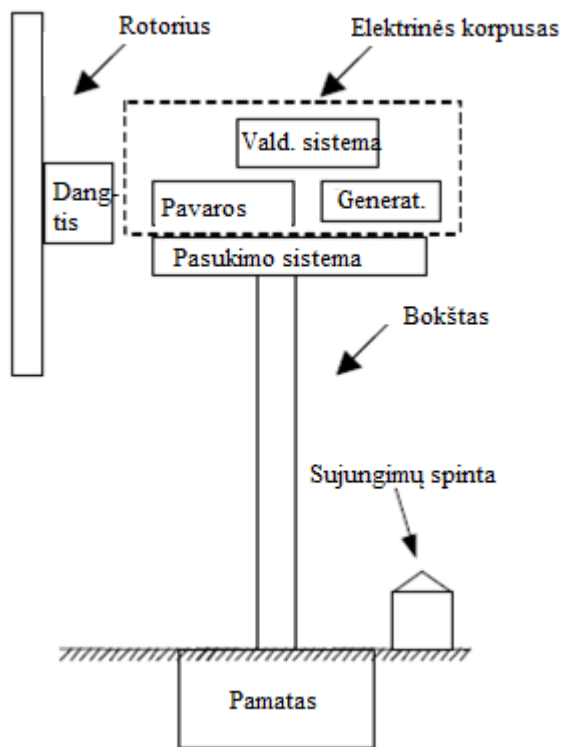


1.1 pav. HAWT elektrinės rotorius [3]



1.2 pav. HAWT elektrinės rotorius, kai naudojamas ANSM generatorius [8]

Vertikalios vėjo elektrinės su bokštu schema pateikiama 1.3 paveiksle :



1.3 pav. Elektrinės su bokštu vaizdas [6]

Vėjo elektrinę sudaro šie pagrindiniai elementai:

- Rotorius (rotor);
- Jį laikantis dangtis (hub);
- Pavaros (drive train)-įeina stabdymo sistema, pavarų dėžė, įvairūs sujungimai, generatorius;
- Valdymo sistema (control);
- Generatorius (generator);
- Jėgainės korpusas (nacelle cover);
- Pasukimo sistema (yaw system);
- Bokštas (tower);
- Pamatai (foundation);
- Sujungimų spinta (balance of electrical system) [6].

1.2 Vertikalių ir horizontalių vėjo elektrinių palyginimas

- *Dydis ir masė* – surinktos vertikalios elektrinės gali būti gana nedidelės. Kita vertus, renkant vertikalią elektrinę, dalių dydis bus daug didesnis ir jos bus brangesnės.
- *Vėjo kryptis* – horizontalios elektrinės veikia nepriklausomai nuo vėjo krypties, vertikalioms elektrinėms vėjo kryptis svarbi.
- *Naudingumas* – dėl savo daugiakryptiškumo, horizontalios elektrinės daugiau vėjo energijos gali paversti elektros energija.
- *Priežiūra* – abiejų tipų elektrinės yra gana lengvai prižiūrimos, ir gali veikti iki kelių metų be didesnio remonto. [4]
- *Triukšmas* – vertikalaus rotoriaus elektrinės yra tylesnės. Būnant 2 metrų atstumu nuo besisukančio rotoriaus, triukšmas sieks tik 2 dB, kai tuo tarpu horizontali elektrinė skleidžia apie 50 dB triukšmą. Nors ir gali atrodyti, jog sparnai sukasi lėtai, greitis sparno viršūnėje gali siekti ir iki 100 mylių per valandą. Sparno viršūnėje greičiau ir lėčiau judantis oras, artėjant link rotoriaus centro, sukelia erzinantį pulsuojančią garsą. Jei šalia tokios elektrinės yra pastatų, toks žemo dažnio garsas veikia pastatų sienas ir langus kaip vibracija. Jei elektrinė galinga ir didelė, šalia jos triukšmas gali siekti ir 100 dB.

- *Kaina* – horizontali vėjo elektrinė kainuoja daug daugiau nei vertikali elektrinė. Vis dėlto, ilgainiui didesnė kaina atsiperka dėl aukštesnio horizontalios elektrinės naudingumo.
- *Galia* – kai kurios horizontalios elektrinės per metus gali pagaminti 5000 kWh elektros energijos, esant 12,5 mylių per valandą vėjo greičiui. Tuo tarpu vertikali elektrinė gali pagaminti 7000-10000 kWh elektros energijos. [1]

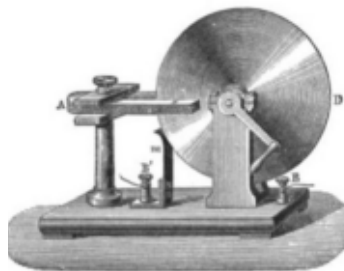
2. AŠINIO SRAUTO NUOLATINIŲ MAGNETŲ MAŠINA

2.1 Ašinio srauto mašinos ir jų vystymosi istorija

Retųjų žemės metalų nuolatinių magnetų kainų kritimas bei galios elektronikos progresas suvaidino svarbų vaidmenį nuolatinių magnetų bešepetėlių mašinų vystymesi per pastaruosius 3 dešimtmečius. Šios mašinos visai neseniai buvo pradėtos naudoti vis plačiau dėl savo aukšto naudingumo koeficiento, didelio sukimo momento, patikimumo. Šios mašinos kai kuriose srityse netgi pradėjo išstumti įprastines nuolatinės srovės ar narvelio tipo elektros mašinas.

Unikali disko forma leidžia mašinas kurti kintamo dizaino. Gali būti konstruojamos kaip vieno ar kelių oro tarpų, su grioveliais arba be jų, su vienu ar keliais rotoriumi ir statoriumi. Rotoriai ir statoriai gali būti feromagnetiniai arba bešerdžiai (be feromagnetinių medžiagų). Mažos galios mašinos paprastai projektuojamos be griovelių, su nuolatiniais magnetais, išdėstytais ant rotoriaus paviršiaus. Projektuojant tokias mašinas, didesnis dėmesys turėtų būti skiriamas rotoriaus ir veleno sujungimams, kas paprastai yra viena dažniausių gedimų priežasčių.

Šių mašinų istorija prasidėjo 1831 metais, kai Maiklas Faradėjus išgavo nuolatinę srovę, naudodamasis pirmuoju tuometiniu elektros generatoriumi (pavaizduotas 2.1 paveiksle), kurį sudarė varinis diskas, kuris sukosi ašiniame sraute.



2.1 pav. Maiklo Faradėjaus 1831 m. Generatorius [13]

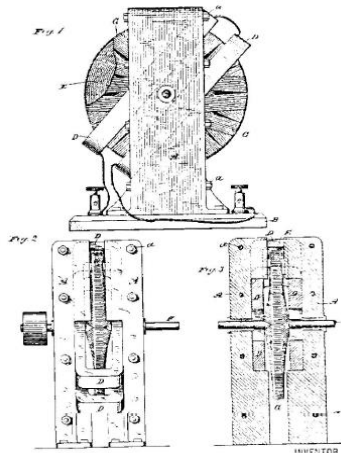
Prietaisas vėliau tapo žinomas kaip „homopoliarinis generatorius“, ir jo koncepcija buvo panaudota vėlesniu laiku, pavyzdžiui Bumby darbe apie superlaidžias nuolatinės srovės mašinas [9]. Nors ir Faradėjaus darbai buvo milžiniškas kertinis akmuo gilinantis į elektrą ir magnetizmą, vis dėlto generatoriaus koncepcija didelio populiarumo nesulaukė. [10]

Šios mašinos neprigijo dėl šių priežasčių:

- Labai stipri trauka tarp statoriaus ir rotoriaus, todėl kilo problemos patikimai juos įtvirtinant;
- Gamybos sunkumai, tokie kaip griovelių išpjovimas;
- Aukšta gamybos kaina;
- Sunkumai surenkant mašiną-išlaikant nustatytą oro tarpą. [2]

Netrukus po Faradėjaus pristatymo, Tomas Deavenportas iš JAV, Brandono, Vermonto sukūrė radialinio lauko mašiną ir ją užpatentavo JAV 1837 metais. [10]

2.2 paveiksle pateikiamas N. Teslos 1889 metais užpatentuotas elektro-magnetinis variklis:



2.2 pav. N. Teslos 1889 m. Užpatentuotas *Elektro-magnetinis variklis* [2]

Taip pat labai didelę įtaką turėjo tai, kad kaip nuolatiniai magnetai buvo naudojamos kietamagnetės medžiagos, kurios neturi tokių savybių, kurias turi retųjų žemių metalų magnetai. Paskelbus apie AlNiCo (1931 m.), bario ferito (20 amžiaus 6 dešimtmetis), bei, svarbiausia, neodimio magneto išradimą (NdFeB 1983 m.), taip pat Campbellui paskelbus savo darbą [11] 1974 m., susidomėjimas šiomis mašinomis vėl sukilo, ir jos yra tobulinamos iki šiol [2, 10].

2.2 Ašinio ir radialinio srautų mašinų palyginimas

Dabartiniu laiku dauguma pristatomų lėtaeigių generatorių vėjo elektrinėms yra nuolatinių magnetų mašinos. Nuolatinių magnetų charakteristikos gerėja, o kaina mažėja. Nuolatinių magnetų mašinos paprastai būna ašinio arba radialinio srauto. Ašinio srauto mašinos paprastai turi statorius be griovelių, dėl ko supaprastėja apvijų projektavimas ir skaičiavimai. Magnetai paprastai naudojami plokščios formos, taip pat ašinio srauto mašinos ilgis bus daug mažesnis už radialinio srauto mašinos ilgį. Čia iškyla pagrindinė problema- kuo mažesnę oro tarpą norime gauti tarp statoriaus ir rotoriaus, tuo didesnė trauka tarp jų, dėl ko tampa sudėtingesnis rotoriaus ir statoriaus įtvirtinimas, atsiranda apribojimas norint suprojektuoti didelio diametro mašiną. [5]

Dėl naujų medžiagų atradimo-išradimo, inovatyvių konstrukcijos bei surinkimo idėjų, geresnių aušinimo savybių, santykio augimas tarp gaunamos galios ir mašinos masės- tūrio pasidarė vis labiau įmanomas. Radialinio srauto mašinoms šis santykio didėjimas yra ribotas dėl:

- Dauguma magnetolaidžio apie rotoriaus veleną yra neišnaudojama kaip magnetinė grandinė;
- Prastas šilumos atidavimas, kaista tiek statorius, tiek rotorius.

Šie trūkumai nėra lengvai pašalinami.

Tuo tarpu ASNM mašina:

- Santykis tarp diametro ir ilgio yra žymiai didesnis-geresnis aušinimas;
- Oro tarpas gali būti keičiamas;
- Galimybė išgauti didesnę galią, nei iš tos pačios masės- tūrio RSNM mašinos;
- Kuo didesnis diametras, tuo daugiau galima sudėti polių porų, dėl ko tinkama ten, kur reikalingas aukštas dažnis arba mažas sukimosi greitis.

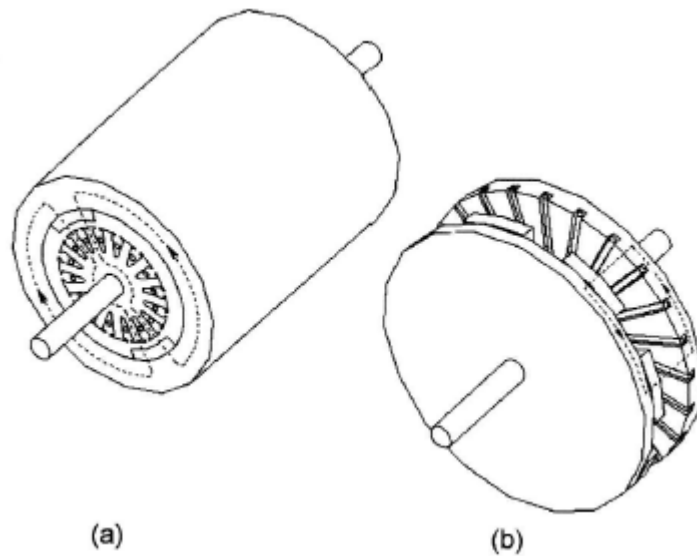
Vis dėlto, tai yra labai sąlyginis skirstymas. Šiuo klausimu įvairūs autoriai turi labai skirtingą nuomonę, bei lygina dar įvairesniais aspektais. [2]

Pavyzdžiui, radialinio srauto generatorius gali būti skiriamas į 2 tipus: išorinių magnetų ir įleistų į rotorių magnetų. Paprasčiausia yra taikyti išorinių magnetų metodą, tačiau čia reikia naudoti brangius NdFeB magnetus, todėl juos reikia stengtis panaudoti kuo efektyviau. Taip pat šie magnetai turėtų būti mechaniškai apsaugoti.

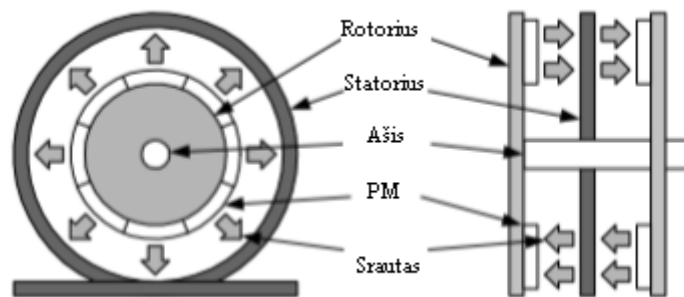
Galima naudoti kur kas pigesnius, įleidžiamus ferito magnetus. Nors jie ir yra pigesni už retųjų žemių metalų magnetus, tačiau jų sumontavimas, įleidimas yra daug brangesnis nei NdFeB paviršinių magnetų, taip pat ferito magnetų reikės daug daugiau, dėl ko išauga rotoriaus masė.

Šiuo atveju Spooner ir Williamson [7] panaudojo originalų sprendimą-buvo panaudoti abu montavimo būdai : NdFeB magnetus montuojant rotoriaus paviršiuje, kartu su ferito magnetais, įmontuotais į patį rotorių. Tokioje mašinoje galima naudoti sąlyginai mažą poliaus žingsnį, dėl ko mažėja diametras. Tokios mašinos apvijoje buvo gauta beveik sinusinė įtampa. Vis dėlto, taip pat buvo gautos ir ryškios harmonikos. [5]

Aiškumui 2.3 ir 2.4 paveiksluose šalia viena kitos pateikiamos tipinės radialinės ir ašinio srauto mašinų konstrukcijos:



2.3 pav. a)-radialinio srauto mašina, b)-ASNMM mašina [2]



2.4 pav. Kairėje- radialinio srauto nuolatinių magnetų mašinos (RSNMM) pjūvis, dešinėje-ašinio srauto nuolatinių magnetų mašinos (ASNMM) vaizdas iš šono [12]

Leung ir Chan [13] pasiūlė geometrinį palyginimą tarp ašinio ir radialinio srautų topologijų, įvertinant šių skirtingų konstrukcijų srautų ir srovių santykį, esant tiems patiems magnetiniams ir elektriniams apkrovimams, ir išreiškiant galios santykį tokia formule [10]:

$$\frac{P_{axial}}{P_{radial}} = \frac{(D_o + D_i)^2 (D_o - D_i)}{4d^2 l} \quad (2.1)$$

Kur:

D_o -ASM statoriaus išorinis diametras

D_i -ASM statoriaus vidinis diametras

d -RLM oro tarpo diametras

l -RLM ašinis ilgis

Be perdavimo mechanizmo sukamuose generatoriuose, skirtuose vėjo elektrinėms, Spooner ir Williamson [7] aprašo eilę konstrukcijų, turinčių apie 2 metrų diametrą. Buvo pradėta svarstyti ašinio srauto topologija, tačiau jos atsisakyta dėl praktinių problemų, nes buvo sumodeliuota ir apskaičiuota 155 kN jėga tarp statoriaus ir kiekvieno iš rotorų, taip pat dėl statoriaus struktūrinių problemų.

Kitame straipsnyje pateikiamas pilnas ašinio ir radialinio srauto nuolatinių magnetų sinchroninių variklių palyginimas. [15] Buvo lyginamas elektromagnetinis momentas, ir buvo padarytos tokios išvados:

- RSM yra labiau pageidaujamos, kur ašinis variklio ilgis yra didelis; Didinant polių skaičių, sukimo momentas auga iki tam tikro taško, tačiau nuo šio taško pradeda mažėti dėl augančių nuostolių pliene;
- ASM gali išgauti aukštą sukimo momentą, jei ašinis mašinos ilgis yra nedidelis, ir jei polių skaičius didinamas, momentas auga ir esant dideliame polių skaičiui, kitaip tariant masė auga mažiau, nei auga elektromagnetinis momentas, kai polių skaičius didinamas.

Buvo padaryta išvada, kad ASM tinkamosios ten, kur reikia nedidelio ašinio mašinos ilgio, ir kai mašina turi didelį polių skaičių.

Brown pristatė požiūrį, lyginant mašinas iš elektromagnetinės pusės, priimant, jog elektrinė ir magnetinė apkrovos nekinta, todėl lyginami tik geometriniai parametrai [16]. Priimant, kad nuolatinių magnetų tūris vienai ir kitai mašinai vienodas, padaryta išvada, jog mašinoms su daugiau nei 10 polių, ASNMM yra mažesnė, tačiau RSM mažesnė tokiu atveju, kai naudojama nedaug polių.

Nors ir vyrauja įvairios nuomonės, yra sutariama, kad ASM gali varžytis su RSM, taip pat kai kuriais atvejais, kaip ir minėtu, kai ašinis mašinos ilgis nedidelis, taip pat jos diametras nedidelis ir naudojama daug polių, ASM pranoksta RSM. [10]

2.3 Ašinio srauto mašinų tipai ir konstrukcijos

Konstruksiškai mašinos gali būti vienpusės ir dvipusės, su ar be griovelių, su ar be rotoriaus šerdimi, su vidiniais ar išoriniais rotoriais, su paviršiniais ar įleistais magnetais. Jei konstrukcija yra dvipusė, gali būti išorinis statorius arba išorinis rotorius. Antrasis variantas yra laikomas perspektyvesniu ir naudingesniu.

Dvipusės mašinos:

-Su vidiniu statoriumi: (2.5 pav. b)

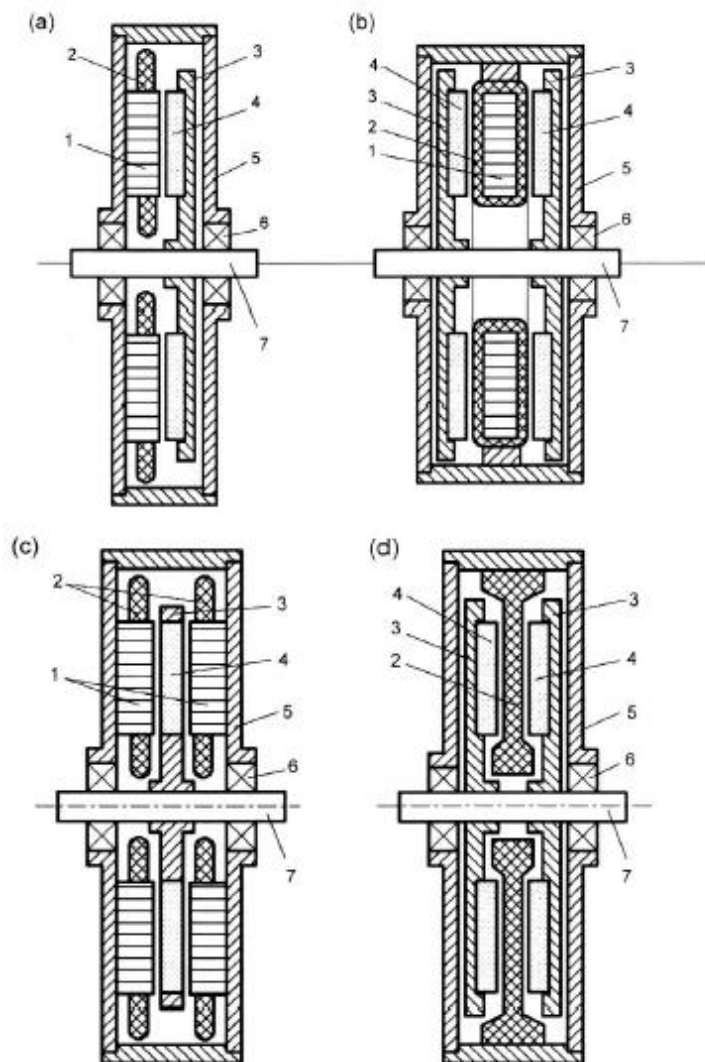
- statorius turi griovelius
- statorius neturi griovelių
- Statorius turi plieninę šerdį
- Statorius neturi šerdies (2.5 pav. d)
- Statorius ir rotorius neturi šerdžių
- Su ryškiapoliu statoriumi.

-Su vidiniu rotoriumi: (2.5 pav. c)

- Statorius su grioveliais
- Statorius be griovelių
- Ryškiapolis statorius [2]

Vienpusės mašinos:

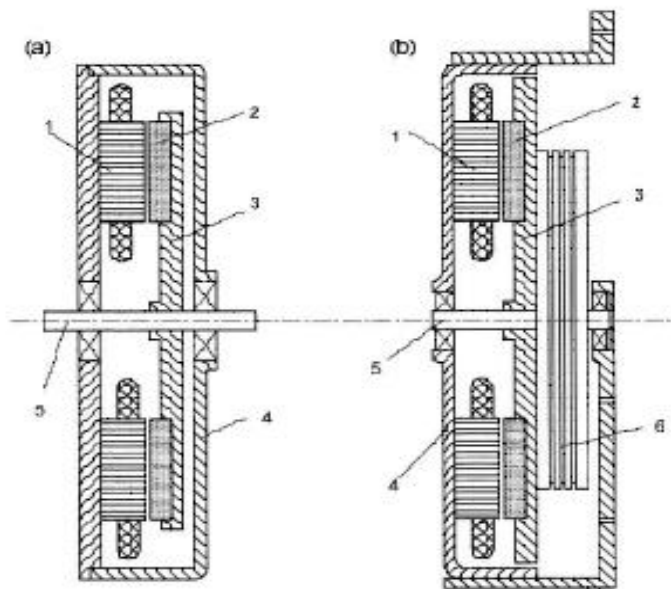
- Statorius turi griovelius (6pav. a)
- Statorius neturi griovelių
- Ryškiapolis statorius.



2.5 pav. ASNMM tipai: a) vienpusė, su grioveliais b) dvipusė be griovių, vidinis statorius, du išoriniai rotoriai c) statoriai su grioveliais, rotorius vidinis d) dvipusis bešerdis variklis, statorius vidinis 1-statoriaus šerdis, 2-statoriaus apvijos, 3-rotorius, 4-nuolatiniai magnetai, 5-korpusas, 6-guoliai, 7-velenas [2]

2.3.1 Vienpusė mašina

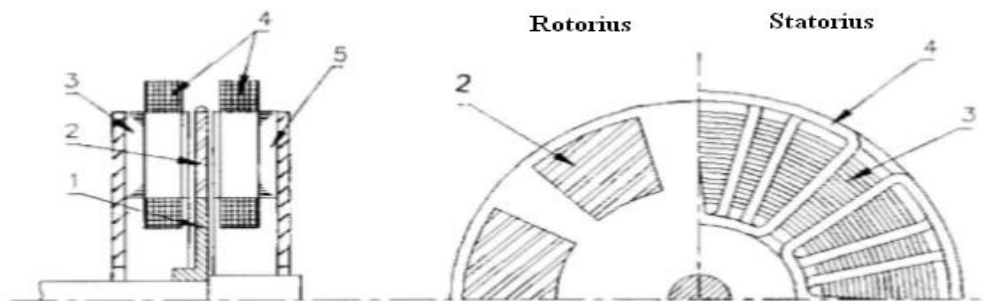
Vienpusės ASNMM konstrukcija yra paprastesnė nei dvipusės, bet išgaunamas sukimo momentas yra žemesnis. Paveikslėlyje 2.6 pavaizduotos vienpusės ASNMM su feromagnetiniais statoriais iš plokštelių. Vienpusis variklis 2.6 a) paveiksle turi standartinį rėmą ir ašį. Gali būti panaudojamas pramonėje, servo mechanizmuose. Konstrukcija 2.6 b) turi skriemulį lynui ir stabdį (nepavaizduotas). Naudojama liftuose. [2, 17]



2.6 pav. ASNM vienusės mašinos a) vienusė b) vienusė su skriemuliu 1-statorius iš plokštelių, 2-nuolatiniai magnetai, 3-rotorius, 4-korpusas, 5-ašis, 6-skriemulys [2]

2.3.2 Dvopusė mašina su vidiniu rotoriumi

Mašinose su vidiniu rotoriumi ir 2 išoriniais statoriais, apvijos yra suvyniotos ant išorinių statorių. Rotoriaus diskas su nuolatiniais magnetais sukasi tarp šių statorių. Aštuonių polių konstrukcija parodyta 2.7 paveiksle:

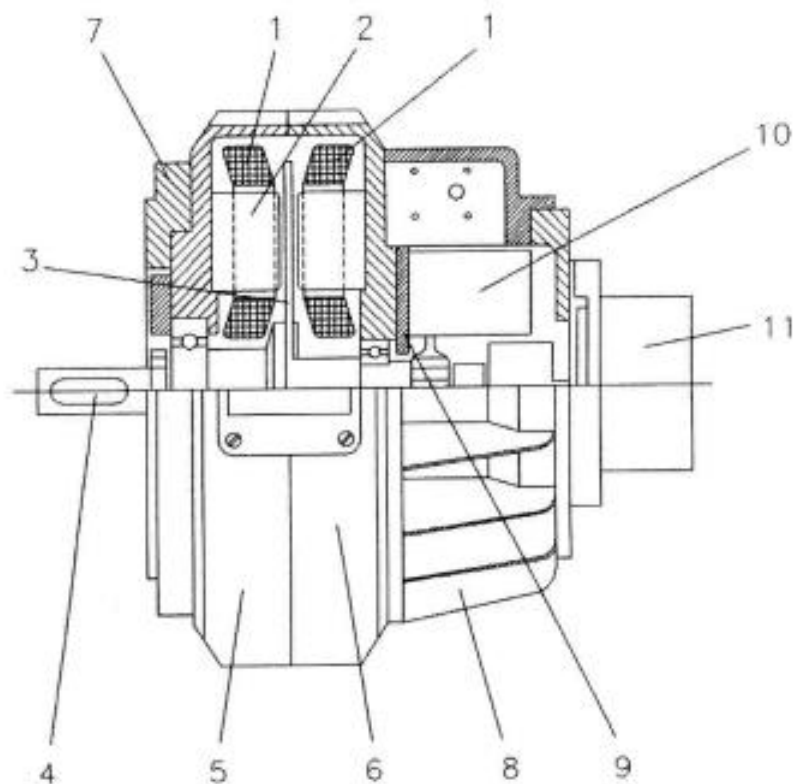


2.7 pav. ASNM dvopusė mašina su vidiniu rotoriumi ir 2 išoriniais statoriais 1-rotorius, 2-nuolatiniai magnetai, 3-statoriaus šerdis, 4-statoriaus apvija [2]

Nuolatiniai magnetai yra integruoti arba priklijuoti prie nemagnetinės rotoriaus konstrukcijos.

Nemagnetinis oro tarpas yra didelis, kitaip tariant, pilnutinis oro tarpas yra lygus dviems oro tarpeliams tarp rotoriaus ir kiekvieno iš statorių ir magneto storiui iš kiekvienos rotoriaus pusės, jei magnetai priklijuoti. Dvipusė mašina su lygiagrečiai sujungtais statoriais gali veikti, net jei vieno iš statoriaus apvija pažeidžiama. Vis dėlto, nuoseklus statorių sujungimas yra labiau pageidautinas, nes taip sukuriama vienoda, tačiau skirtingų kryptių traukos jėga.

Realus pavyzdys pateikiamas 2.8 paveiksle. [2, 18]



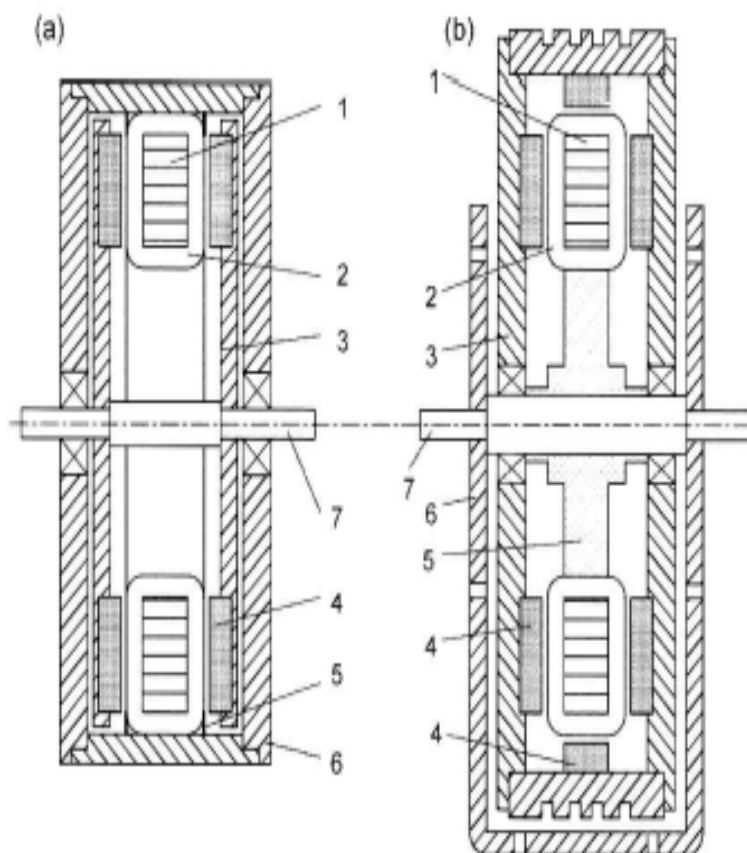
2.8 pav. Dvipusis servo variklis su vidiniu rotoriumi ir 2 išoriniais statoriais, su elektromagnetiniu stabdžiu ir enkoderiu. 1-statoriaus apvija, 2-statoriaus šerdis, 3-rotorius su nuolatiniais magnetais, 4-ašis, 5,6-korpusas, 7-jungė, 8-stabdžio korpusas, 9-stabdžio jungė, 10-elektromagnetinis stabdis, 11-enkoderis [2]

Trifazė apvija sujungta Y, du statoriai sujungti nuosekliai. Variklis naudojamas servo pavarose. [2, 18, 19, 20]

2.3.3 Dvipusės mašinos su vidiniu žiedo formos statoriumi

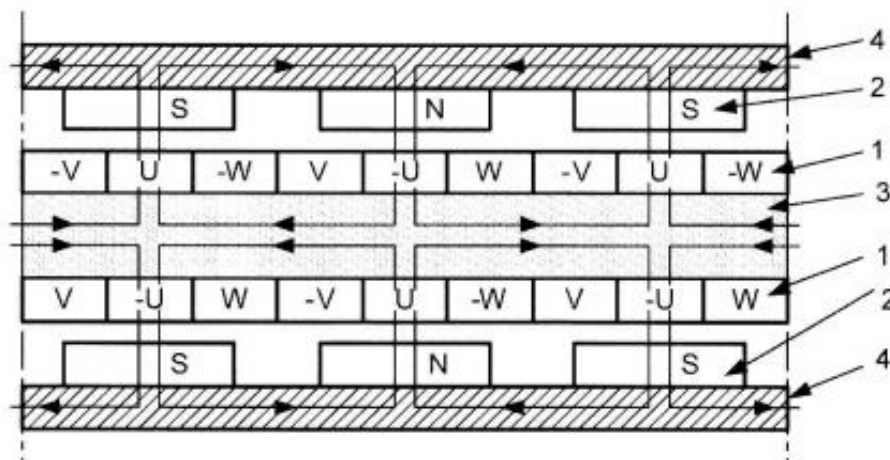
Dvipusė mašina su vidiniu žiedo formos statoriumi turi būgno tipo apviją, suvyniotą ant feromagnetinio statoriaus paviršiaus. [21-24] Šioje mašinoje žiedo formos statorius formuojamas iš plieno plokštelių arba miltelinės medžiagos. Pilnutinis oro tarpas yra lygus statoriaus apvijos su izoliacija storiui, oro tarpui ir nuolatinio magneto storiui.

Dvipusis rotorius paprastai vadinamas dvigubu rotoriumi su nuolatiniais magnetais yra sumontuotas iš abiejų statoriaus pusių. Konstrukcijos su vidiniais ir išoriniais rotoriais pavaizduotos 2.9 paveiksle.



2.9 pav. ASNM dvipusės mašinos su vienu statoriumi a) vidiniu rotoriumi b) išoriniu rotoriumi 1- statoriaus šerdis, 2-statoriaus apvija, 3-plieninis rotorius, 4-nuolatiniai magnetai, 5-derva, 6-korpusas, 7-ašis [2]

Magnetinė grandinė pavaizduota 2.10 paveiksle.



2.10 pav. Trifazė apvija, nuolatinių magnetų poliariškumas ir magnetinių srautų kelias dvipusės mašinos su vienu statoriumi be griovelių 1-apvija, 2-nuolatiniai magnetai, 3-statoriaus jungas, 4-rotoriaus jungas [2]

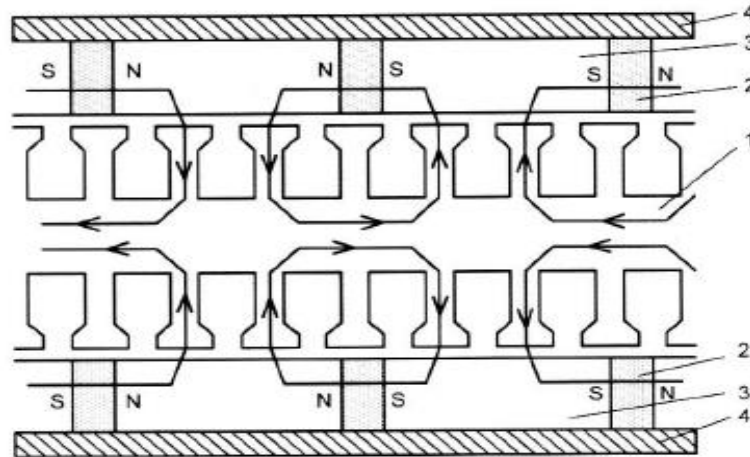
Mašina, kaip paveiksle 2.9 a), gali būti naudojama kaip varomasis variklis ar tiesiog generatorius. Paveiksle 2.9 b) pavaizduotoji naudojama kėlimo įrenginiams, taip pat panašios konstrukcijos variklis gali būti naudojamas kaip pagrindinis variklis montuojamas į ratus elektromobilyje.

Dėl didelio oro tarpo, maksimalus srauto tankis neviršija 0,65 T. Norint išgauti tokį srauto tankį, reikia didelio tūrio nuolatinių magnetų. Kadangi statorius neturi griovelių, pasipriešinimo momento („cogging torque“) praktiškai nėra. Kita vertus, mašinos konstrukcijai trūksta patikimumo. [23]

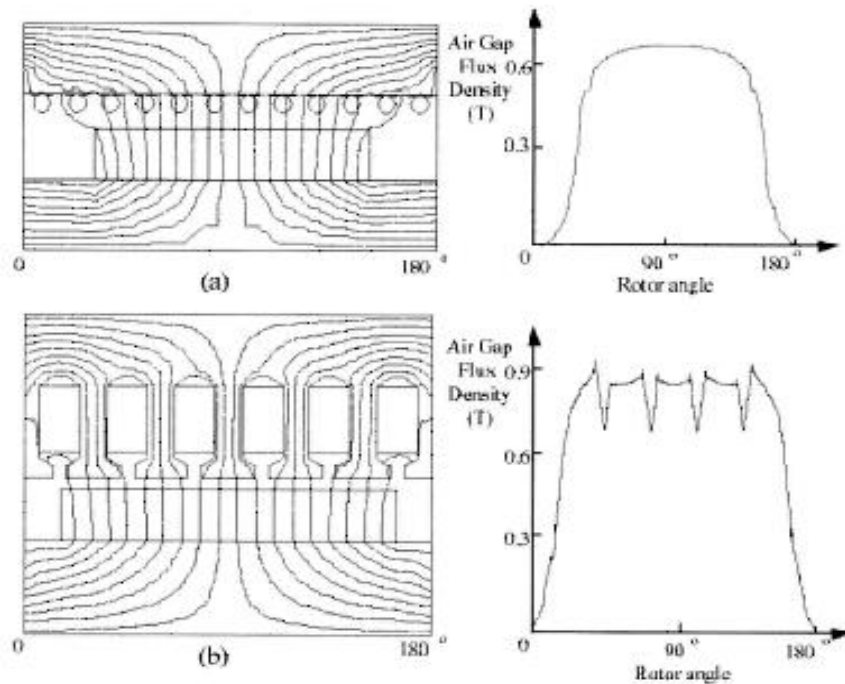
Disko tipo varikliai su išoriniais rotoriais turi privalumą, kur reikia nedidelio greičio ir aukšto sukimo momento, kaip pvz. autobusai. Nedideliems elektromobiliams rekomenduotinas elektros variklis montuojamas tiesiai į ratą. [21]

2.3.4 Dvipusės mašinos su vidiniu statoriumi su grioveliais

Žiedo tipo statorius taip pat gali būti ir su grioveliais (pav. 2.11). Kai statorius yra su grioveliais, oro tarpas yra mažas ($g < 1\text{mm}$), magnetinio srauto tankis oro tarpe gali siekti 0,85T. [21] Šiai konstrukcijai reikalingas apie 50% mažesnis magnetų tūris, nei minėtai 2.9 ir 2.10 pav.



2.11 pav. Dvipusė ASNМ mašina. 1-statorius su grioveliais, 2-NdFeB magnetas, 3-polius, 4-nemagnetinis rotoriaus diskas [2]



2.12 pav. Magnetinės grandinės vaizdas. (a)-konstrukcijos be griovelių, (b)-konstrukcijos su grioveliais [2]

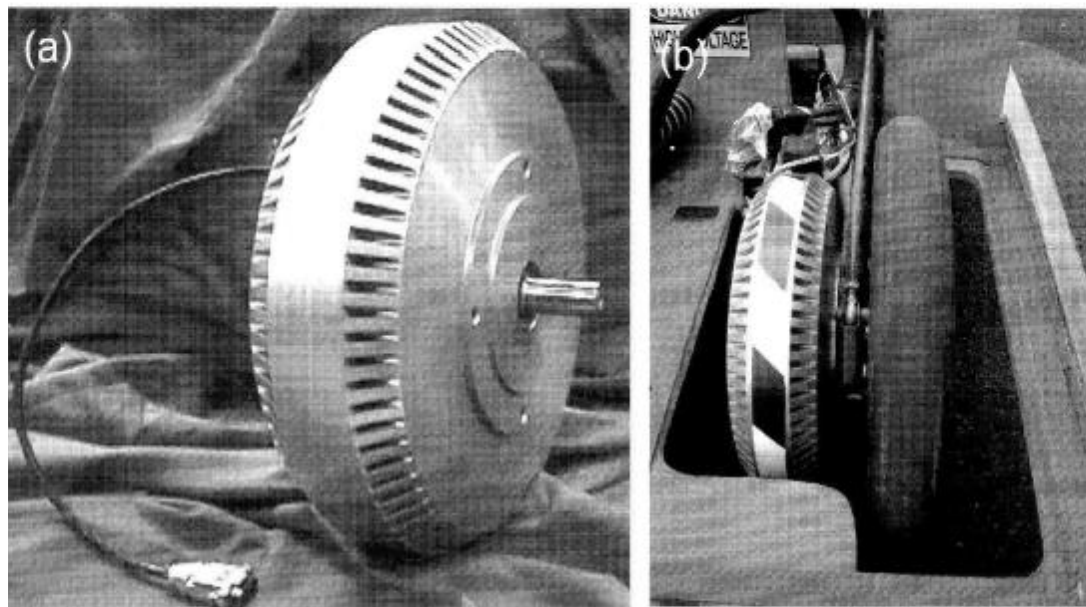
Kaip matyti iš 2.12 paveikslo, modeliujant magnetinę grandinę konstrukcijos su grioveliais (b variantas) ir be griovelių (a variantas), magnetinio srauto tankis gaunamas aukštesnis, kai statorius turi griovelius.

2.3.5 Dvipusės mašinos su vidiniu bešerdžiu nemagnetiniu statoriumi

ASNM mašinose su bešerdžiais statoriais apvija vnyiojama ant nemagnetinio ir nelaidaus pagrindo, tai reiškia, kad nėra nuostolių dėl statoriaus medžiagos (sūkurinių srovių). Nuostoliai nuolatinuose magnetuose ir rotorų plieniniuose diskuose yra nežymūs. Tokiai konstrukcijai reikalingas žymiai didesnis magnetų tūris, nei konstrukcijoje, kai statorius yra sudarytas iš plokštelių.

Statoriaus apvija yra veikiamą magnetinio srauto, kuriamo nuolatinių magnetų ant besisukančių rotorų (pav 2.5 d).

Mašiną eksploatuojant aukštu dažniu, sūkurinės srovės gali pasireikšti pačioje statoriaus apvijoje. [2, 25]



2.13 pav. Ašinio srauto nuolatinių magnetų bešepetėlis variklis e-TORQ™ su bešerdžiu statoriumi:

(a) bendras vaizdas; (b) variklis integruotas saulės energija varomo automobilio rate [2]

356 mm diametro e-TORQ™ varikliai buvo sėkmingai panaudoti Šiaurės Dakotos Valstijos Universiteto studentų 2003 m., variklį panaudojant automobiliui, varomam saulės energija (pav 2.13 a) ir b)). Gerai suprojektuotam saulės energija varomam automobiliui reikia labai efektyvaus ir lengvo variklio, paversti maksimalų kiekį saulės energijos į mechaninę energiją su minimaliu riedėjimo pasipriešinimu. Šis variklis tenkina šiuos reikalavimus. [2]

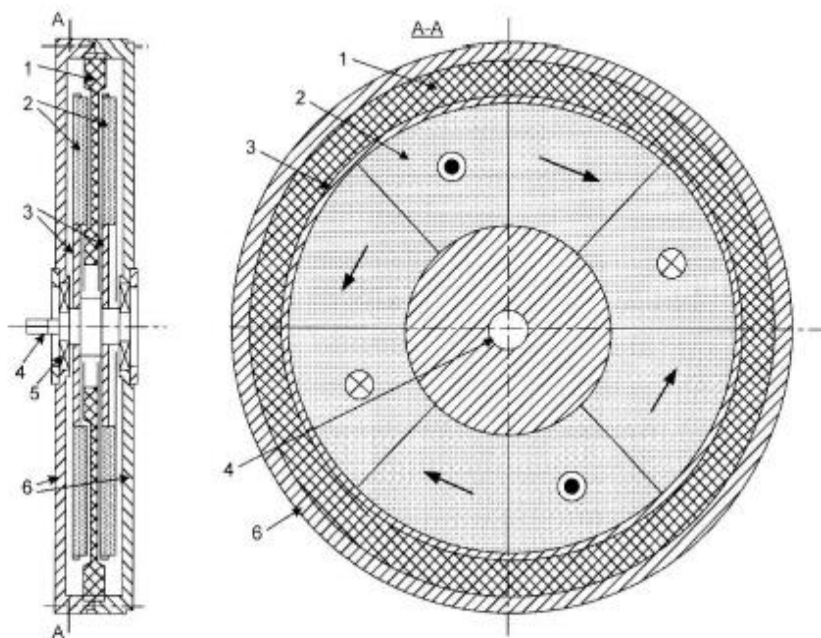
2.3.6 Dvipusės mašinos su vidiniu bešerdžiu nemagnetiniu statoriumi ir bešerdžiais rotoriais

Dabar, kai lengvai galima įsigyti labai galingų magnetų, ASNMM statoriai ir rotorai gali būti gaminami be feromagnetinių šerdžių.[26-29]

Bešerdė konstrukcija yra lengvesnė ir su aukštesniu naudingumo koeficientu, nei anksčiau paminėtos. Taip pat, tokioje konstrukcijoje nėra traukos jėgos tarp statoriaus ir rotoriaus, nėra sukimo momento pulsacijos, kai apvijomis neteka srovė.

Komerciniu būdu tokios mašinos pradėtos gaminti 20 amžiaus 10 dešimtmečio pabaigoje servo mechanizmas ir pramoninėms pavaroms [27], saulės energija varomiems automobiliams [29], taip pat mikrovarikliams kompiuterinėje technikoje ir kaip vibruojantys varikliai mobiliems telefonams. [2]

Bešerdė mašina pavaizduota 2.14 paveiksle.



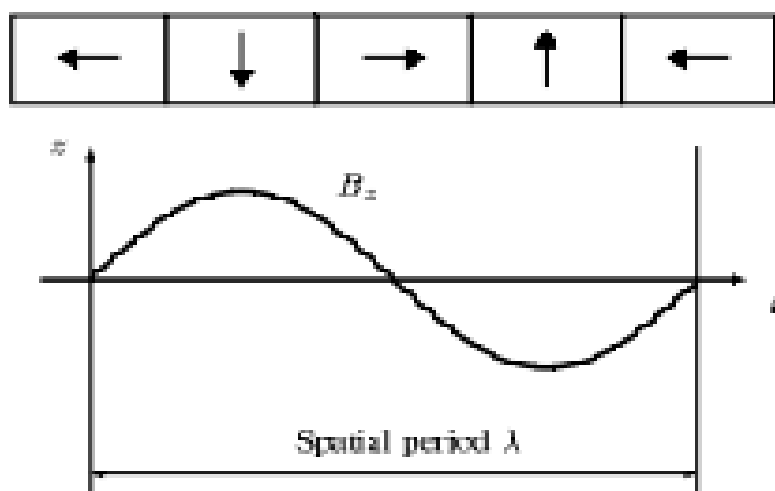
2.14 pav. Disko tipo bešerdė mašina: 1 -statorius, 2-nuolatiniai magnetai, 3-dvigubas rotorius,4-ašis,5-guoliai,6-korpusas. [2]

Vienintelės sūkurinės srovės tokioje konstrukcijoje yra nuostoliai statoriaus apvijose laidininkuose ir metalinėse dalyse (jei jų yra), kurios sutvirtina statorių. Norint turėti aukšto galios

tankio mašiną, magnetinio srauto tankis oro tarpe jose turėtų būti kuo didesnis. Tai daroma magnetus sudedant į Halbacho eilę.

2.4 Halbacho eilė

Ašinio srauto mašinos dvigubam rotorui gali būti naudojami nuolatiniai magnetai, sudėti į Halbacho eilę. Pagrindinė Halbacho eilės savybė-nuolatinių magnetų įmagnetinimo vektorius yra kaip atstumo funkcija išilgai šios eilės. Halbacho eilės privalumai:

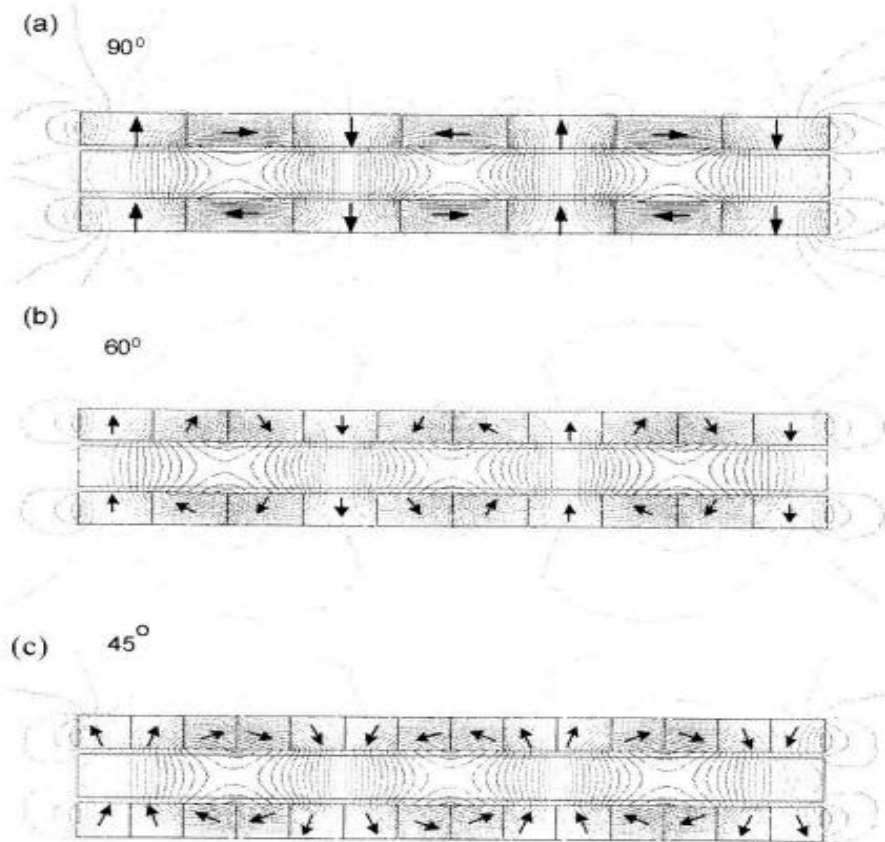


2.15 pav. Halbacho eilė [32]

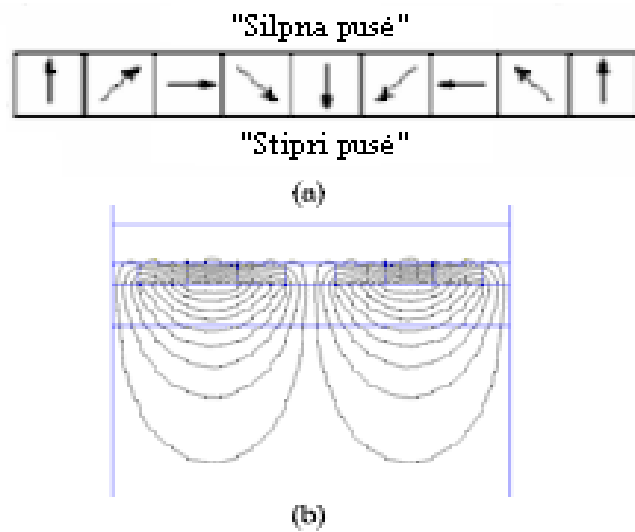
- Magnetinis laukas yra 1,4 karto stipresnis nei įprastinėje magnetų eilėje, taip pat du kartus padidinamas naudingumo koeficientas;
- Nuolatinių magnetų eilei nereikia jokios plieninės kompensacinės magnetinės grandinės, taip magnetai gali būti tvirtinami tiesiai prie neferomagnetinės laikančiosios medžiagos (aliuminio, plastiko);
- Magnetinis laukas yra labiau sinusoidinis nei įprastinėje magnetų eilėje;
- Sukuriama mažiau šalutinių sukurinių laukų.

Išsamus Halbacho eilės naudojimas yra pateiktas [30]. Naujos gamybos technologijos, apvijų išdėstymas ir rotorai su į Halbacho eilę sudėtais magnetais gali tapti nauju rodikliu, kai kalbama apie aukščiausią naudingumo koeficientą ir sukimo momento bei mašinos masės santykį. [31-32]

Magnetai gali būti dedami 45, 60 arba 90 laipsnių kampu:

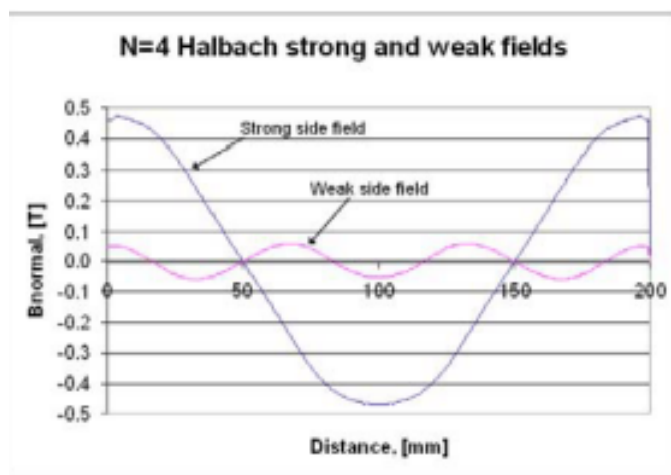


2.16 pav. Dviejų rotorių nuolatinių magnetų išdėstymas 90° , 60° ir 45° Halbacho eile [2]



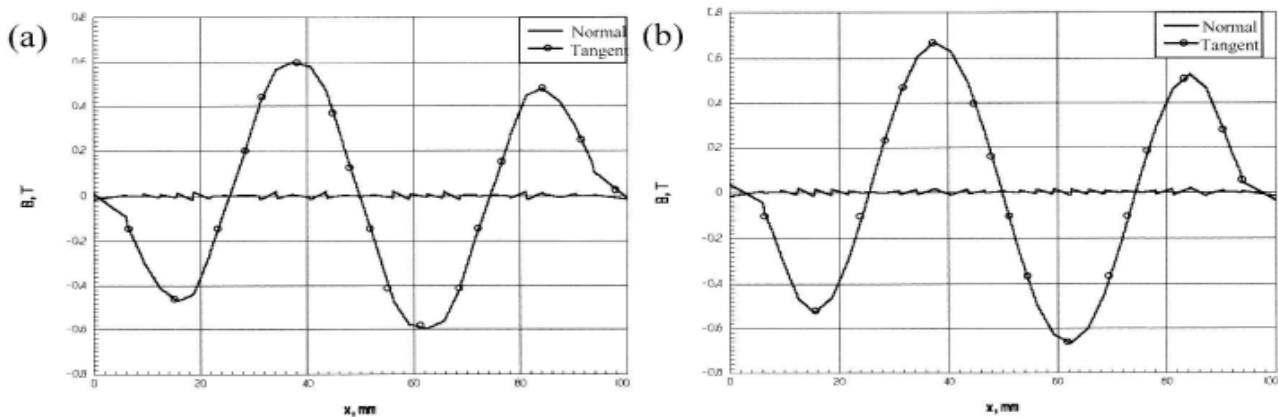
2.17 pav. Linijinė Halbacho eilė ir magnetinio lauko linijos apie magnetus [33]

Magnetinio srauto tankio normalinės dedamosios B_n kitimas išilgai kontūro pavaizduotas 2.18 pav.



2.18 pav. Magnetinio srauto tankio kitimas išilgai 2.17 pav. a kontūro [33]

Halbacho eilės pagalba normalinė magnetinio srauto tankio vertė gali siekti daugiau nei 0,6 T. Tai vertė, pakankama pasiekti aukštą elektromagnetinį momentą. Vertė gali būti netgi didesnė, kai magnetinė grandinė optimizuojama. Praktikoje, 90° , 60° ir 45° Halbacho eile išgaunama panaši magnetinio srauto tankio didžiausia vertė (paveikslas 2.19).



2.19 pav. Normalinė ir tangentinė magnetinio srauto tankio dedamosios oro tarpe bešerdėje dvipusėje mašinoje su išoriniais rotoriais, kai magnetai sudėti Halbacho eile, ir kampas (a) 90° , (b) 45° [2]

Didžiausia normalinės dedamosios vertė yra didesnė, nei kai magnetai sudedami standartiškai. Jei magnetai sudedami paprastai ir ant plieninių diskų, taip vis tiek nepasiekiamas srauto tankio vertė, pasiekiamą Halbacho eilės pagalba. [2]

2.5 Apvijos

Paprastai yra siekiama kiek įmanoma sumažinti oro tarpą (optimizuoti), kadangi vario magnetinės savybės yra panašios į oro, tai jei griovelių nėra, oro tarpas nebūna mažesnis už apvijos storį, o jis sąlyginai didelis. Norint to išvengti, yra naudojami grioveliai, ir apvijos klojamos juose. Taip galima lengviau optimizuoti oro tarpą. Apvijų klojimas į griovelius leidžia išgauti aukštesnes magnetinio srauto tankio ir srauto vertes, taip pat varinės gyslos yra apsaugomos nuo sūkurinių srovių. Taip pat žiūrint iš mechaninės pusės, taip apvijos patikimiau įtvirtinamos. Mašinos su grioveliais turi didesnį galios tankį, todėl jų dydis yra mažesnis.

Vis dėlto, laidininkai grioveliuose yra prasčiau aušinami, dėl ko pro juos galima praleisti mažesnę srovę. Kintanti magnetinė skvarba apie griovelio dantis gali sukurti harmonikas srautui ir elektrovarai, dėl ko atsiranda papildomos sūkurinės srovės, tuščios eigos stabdantis momentas (ang. cogging torque). Srauto tankis dantyse yra aukštas, dėl ko atsiranda papildomi nuostoliai plienuose. Dėl mažesnio oro tarpo išauga traukos jėga tarp rotorų ir statoriaus, dėl ko tokios mašinos pagaminimas tampa problemiškesnis, taip labai išauga jos kaina, gamyba yra sudėtinga. [10]

Statoriaus apvijos paprastai vyniojamos iš izoliuotų vario laidininkų. Apvija gali būti apvalaus arba kvadratinio skerspjūvio. Didelėms ašinio srauto mašinoms gali būti projektuojamas tiesioginis aušinimas skysčiu. $j_a=6,57 \text{ [A/mm}^2\text{]}$ – tai priimtina srovės tankio reikšmė disko tipo mašinoms nuo 1 iki 10 kW. Apvijos laidininkams su F klasės emalio izoliacija, laido su izoliacija diametras 0.548 mm.

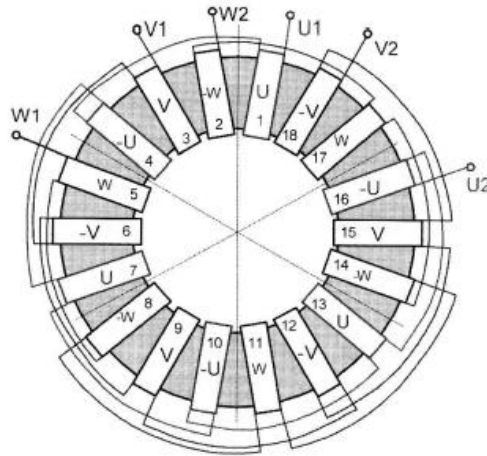
Jei laidininkas yra storesnis nei 1,5 mm, tokį laidininką yra sunku vynioti griovelyje. Jei srovės tankis yra per didelis, lygiagretūs mažesnio diametro laidininkai yra rekomenduotini vietoj storesnių laidininkų.

Linijinis srovės tankis-tai elektrinė vieno statoriaus aktyvaus paviršiaus apkrova, kai apvija vyniojama grioveliuose (dvipusis išorinis statorius ir vidinis rotorius) arba viso statoriaus apkrova generatoriuje su vidiniu arba bešerdžiu statoriumi. [2]

2.5.1 Būgno tipo apvija

Būgno tipo apvijos yra naudojamos generatoriuose su dvigubu rotoriumi ir vidiniu statoriumi.

Būgнинė 6-polės trifazė ASNMM su išoriniu rotoriumi apvija parodyta paveiksle 2.20



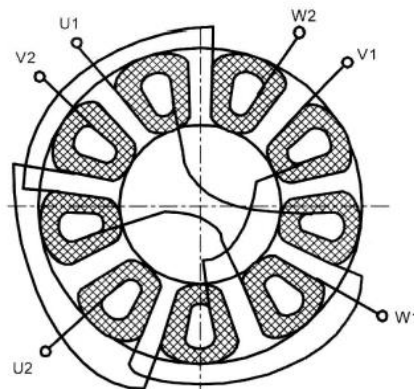
2.20 pav. 6-polės trifazės mašinos su 18 apvijų ir išoriniu rotoriumi, būgno tipo apvija [2]

Kiekviena iš fazių turi vienodą apvijų skaičių, kad būtų išvengta sukurinių srovių statoriuje. Būgninės apvijos (kartais dar vadinamos toroidine) pagrindiniai privalumai yra paprasta statoriaus konstrukcija ir paprastas pačių apvijų klojimas statoriuje. [2, 34]

2.5.2 Bešerdžio statoriaus apvija. Trapecinė apvija

Bešerdžio statoriaus apvijos naudojamos dviejų rotorių, vieno statoriaus ASNMM. (2.5 pav d)

Konstrukcijos paprastumui, paprastai statoriaus apvija sudaroma iš trapecijos formos atskirų apvijų. Apvijos tarpusavyje sutvirtinamos kietinančių medžiagų pagalba (epoksidinės dervos su papildomu kietikliu).

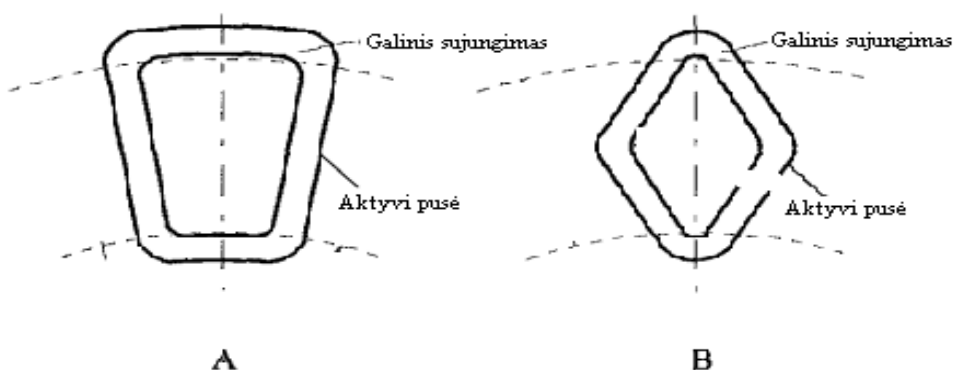


2.21 pav. 8-polės trifazės mašinos su išoriniu rotoriumi, bešerdžio statoriaus apvija [2]

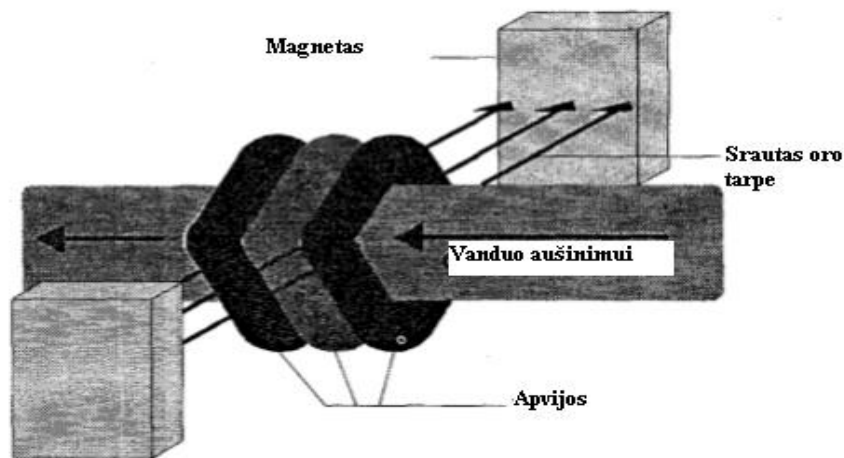
Paveiksle 2.21 pavaizduota bešerdžio statoriaus apvija. Terminai, kurie buvo naudoti statoriui su grioveliais, gali būti naudojami ir bešerdžiui statoriui su trapecinėmis apvijomis, išskyrus terminą „griovelis“ (ang. slot), kuris pakeičiamas į „apvijos pusė“ (ang. coil side).

2.5.3 Bešerdžio statoriaus apvija. Rombinė apvija

Dar viena apvija naudojama bešerdžiame statoriuje yra rombinė apvija. Ji turi trumpesnius galinius sujungimus nei trapecinė apvija. Apvijos konstrukcija leidžia naudoti jų aušinimą vandeniu. Pagrindinis trūkumas yra mažesnis sukimo momentas nei konstrukcijoje su trapecinėmis apvijomis. Paveiksle 2.23 B pavaizduota rombinė apvija, A-trapecinė apvija, 2.23 paveiksle-rombinė apvija su aušinimu.



2.22 pav. A-trapecinė apvija, B-rombinė apvija [35]



2.23 pav. Rombinės apvijos su vandens aušinimu [35]

3. MAŠINŲ GAMYBOJE NAUDOJAMOS MEDŽIAGOS

3.1 Medžiagos statoriui

Šių mašinų statoriai yra gaminami iš plieno plokštelių arba kompozicinių medžiagų. Kompozicinės palengvina gamybos procesą ir kainą.

Dauguma statorių yra pagaminta iš elektrotechninio plieno plokštelių, kurių storis nuo 0,12 iki 0,64 mm. Medžiagos magnetinės savybės yra vienodos praktiškai visomis kryptimis. Į elektrotechninio plieno sudėtį įeina nuo 0,5 % iki 3,25 % silicio, kartu su 0,5 % aliuminio, kad padidinti varžą, ir sumažinti pirminę rekristalizacijos temperatūrą. Universaliausias ir visuotinai priimtas elektrotechninių plienų gradavimas yra „American Iron and Steel Industry“ taip vadinamas M-gradavimas pateikiamas lentelėje 3.1.

3.1. lentelė Daugiausiai naudojamų silicio plienų pavadinimai pagal skirtingus standartus [2]

Europe IEC 404-8-4 (1986)	U.S.A. AISI	Japan JIS 2552 (1986)	Russia GOST 21427 0-75
250-35-A5	M-15	35A250	2413
270-35-A5	M-19	35A270	2412
300-35-A5	M-22	35A300	2411
330-35-A5	M-36	—	—
270-50-A5	—	50A270	—
290-50-A5	M-15	50A290	2413
310-50-A5	M-19	50A310	2412
330-50-A5	M-27	—	—
350-50-A5	M-36	50A350	2411
400-50-A5	M 43	50A400	2312
470-50-A5	—	50A470	2311
530-50-A5	M-45	—	2212
600-50-A5	—	50A600	2112
700-50-A5	M-47	50A700	—
800-50-A5	—	50A800	2111
350-65-A5	M-19	—	—
400-65-A5	M-27	—	—
470-65-A5	M-43	—	—
530-65-A5	—	—	2312
600-65-A5	M-45	—	2212
700-65-A5	—	—	2211
800-65-A5	—	65A800	2112
1000-65-A5	—	65A1000	—

Mažos galios (iki 75 kW) mašinoms gali būti naudojami M-27, M-36, M-43, M-45, M-47. [2]

Taip pat naudojamos kompozicinės medžiagos. Jos naudojamos, kai reikia išgauti sudėtingas konstrukcijas, arba gaminant nedidelės galios mašinas. Kompozitą sudaro geležies rūda, dielektrikas (epoksidinė derva) ir užpildas (stiklo arba anglies pluoštas) mechaniniam sutvirtinimui.

Kompozitai skirstomi į:

- Dielektromagnetikus ir magnetodielektrikus;
- Magnetinius „sinterius“ (ang. Magnetic sinter) [2, 36]

3.2. lentelė *Accucore* kompozicinės medžiagos B-H kreivės taškai ir nuostoliai[2]

Magnetization curve		Specific core loss curves		
Magnetic flux density, B T	Magnetic field intensity, H A/m	60 Hz W/kg	100 Hz W/kg	400 Hz W/kg
0.10	152	0.132	0.242	1.058
0.20	233	0.419	0.683	3.263
0.30	312	0.772	1.323	6.217
0.40	400	1.212	2.072	9.811
0.50	498	1.742	2.976	14.088
0.60	613	2.315	3.968	18.850
0.70	749	2.954	5.071	24.295
0.80	909	3.660	6.305	30.490
0.90	1107	4.431	7.650	37.346
1.00	1357	5.247	9.039	44.489
1.10	1677	6.129	10.582	52.911
1.20	2101	7.033	12.214	61.377
1.30	2687	7.981	13.845	70.151
1.40	3525	8.929	15.565	79.168
1.50	4763	9.965	17.394	90.302
1.60	6563	10.869	19.048	99.671
1.70	9035	11.707	20.635	109.880
1.75	10,746	12.125	21.407	

Dielektromagnetikai ir magnetodielektrikai yra pavadinimai, atspindintys medžiagų pagrindinius komponentus: feromagnetikas (daugiausiai geležies rūda) ir dielektrikas (daugiausiai epoksidinė derva) [36].

Pagrindinė dielektrinių medžiagų užduotis-feromagnetinių dalelių izoliacija ir surišimas. Praktikoje kompozicinės medžiagos, turinčios ne mažiau 2 % dielektrinių medžiagų, laikomos dielektromagnetikais [36].

3.2 Medžiagos rotoriumi

Rotoriumi gaminti paprastai naudojami tokia pati medžiaga kaip ir statoriumi, ir kadangi rotoriume nuostoliai nebūna žymūs, literatūroje rotoriumo medžiagos nesureikšminamos.

Išskyrus atvejį, kai konstrukcija yra su bešerdžiu statoriumi ir feromagnetiniu rotoriumi. Tada, akivaizdu, statoriumo ir rotoriumo medžiagos skiriasi.

Taip pat ir atveju, kai konstrukcijoje be bešerdžio statoriumo naudojamas ir bešerdis rotoriumas, tada rotoriumas gali būti gaminamas iš Aliuminio, epoksidinės dervos.

Neodimio magnetas NdFeB-apie tokio magneto išradimą 1983 metais paskelbė *Sumitomo Special Metals*, Japan. Elementas Nd yra daug dažniau aptinkamas, nei iki NdFeB išradimo plačiai naudotas samaris. Neodimio magnetas turi geresnes magnetines savybes nei SmCo magnetas. Vis dėlto, tik kambario temperatūroje. Dabar NdFeB magnetai naudojami ten, kur reikia už sąlyginai nedidelę pinigų sumą pagerinti galios koeficientą, naudingumo koeficientą, sumažinti įrenginio išorinius parametrus. [2]

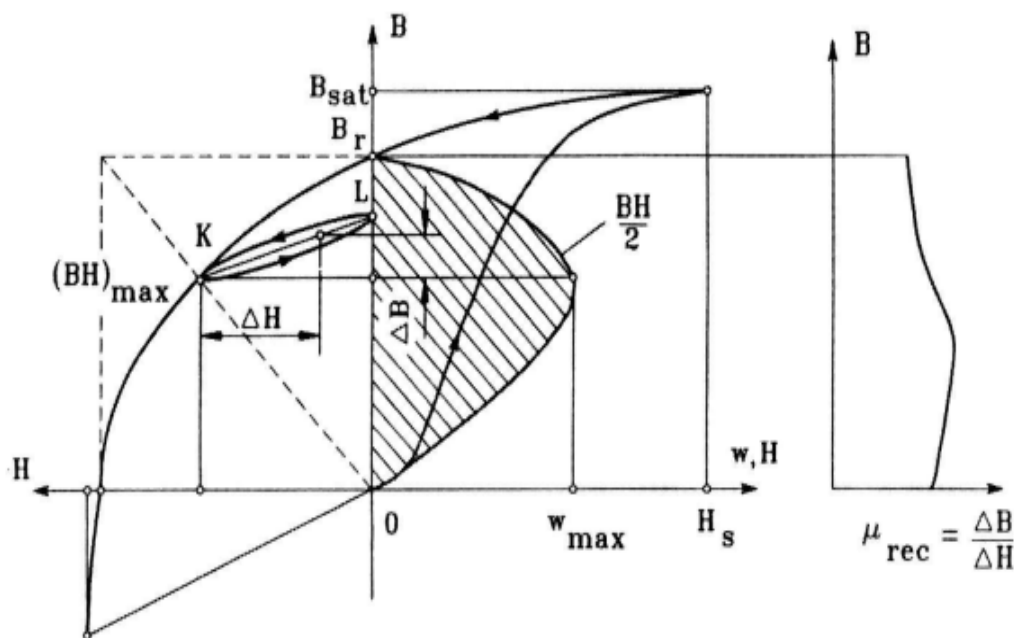
Šios medžiagos savybės panašios kaip ir Samario-Kobalto magnetų, tik NdFeB lengviau oksiduojama ir neturi temperatūrinės varžos. Vis dėlto, NdFeB produktai siekia 52MGOe (Megagauss-Oersted), yra mechaniškai tvirtesni nei SmCo ir sukuria daugiausiai srauto iš visų magnetų. Neapsaugoti NdFeB magnetai pradeda koroduoti, todėl paprastai būna padengti apsauginiu sluoksniu (vario, sidabro, aukso, nikelio, cinko ir plonu epoksidinės dervos apvalku) [37].

3.3. lentelė Magnetų savybių palyginimo lentelė [37]

	Maximum Energy Product <i>Bh_{max}(MGOe)</i>	Residual Flux Density <i>Br(G)</i>	Coercive Force <i>H_c(Koe)</i>	Working Temperature °C
Ceramic 5	3.4	3950	2400	400
Sintered Alnico 5	3.9	10900	620	540
Cast Alnico 8	5.3	8200	1650	540
Samarium Cobalt 20 (1,5)	20	9000	8000	260
Samarium Cobalt 28 (2,17)	28	10500	9500	350
Neodymium N45	45	13500	10800	80
Neodymium 33UH	33	11500	10700	180

Nuolatiniai magnetai yra kietamagnetinės medžiagos su plačia B-H histerezės kilpa. Pagrindas, pagal kurį vertinami nuolatiniai magnetai, yra kairysis viršutinis histerezės kilpos kvadrantas,

vadinamas *išmagnetinimo kreive* (ang. *demagnetization curve*) (parodyta 3.1 paveiksle). Jeigu magnetas yra veikiamas neigiamu magnetinio lauko stipriu H , jo magnetinio srauto tankis nukrenta iki taško K . Kai šis neigiamas magnetinio lauko stipris panaikinamas, magnetinio srauto tankis grįžta į tašką L . Tai reiškia, kad šis neigiamas lauko stipris sumažino magneto liktinę indukciją nuo B_r iki L . Magnetą vėl pradėjus veikti neigiamu lauko stipriu, magnetinio srauto tankis vėl nukris iki maždaug taško K . Taip brėžiama mini histerezės kilpa, kurią su nedidele paklaida galima pakeisti linija *recoil line*. Šios linijos „statumą“ nusako koeficientas μ_{rec} -santykinė magnetinė skvarba (relative recoil magnetic permeability). Iki kol neigiamo lauko stiprio vertė neviršija taško K , galima magnetą laikyti nuolatiniumi. Jei, vis dėlto, šis neigiamas lauko stipris bus didesnis nei taško K vertė, tada magnetinio srauto tankis taip pat nukris žemiau taško K , ir lauką panaikinus, vietoj taško L atsiras nauja indukcijos vertė, o su ja ir kita *recoil* linija.



3.1 pav. Magnetinių savybių aiškinamoji B-H kreivė [2]

B_r -nuolatinė magnetinio srauto tankis (ang. *remanent magnetic flux density* arba *remanence*)-magnetinio srauto tankio vertė, kai magnetas neveikiamas magnetinio lauko stipriu.

H_c -koercinis magnetinio lauko stipris, kurio reikia, norint įmagnetintos medžiagos B_r sumažinti iki nulio.

B_r ir H_c krenta, kylant magneto temperatūrai.

μ_{rec} -santykinė magnetinė skvarba, nusako santykį tarp $\Delta B/ \Delta H$. Reikšmė gali būti 1...4,5.
 $(BH)_{max}$ -atspindi maksimalius energijos tankio taškus B_{max} ir H_{max} išmagnetinimo kreivėje.
Maksimali objekto magnetinė energija, sukuriama nuolatinio magneto išorinėje erdvėje, yra lygi maksimaliam magnetinės energijos tankiui w_{max} , kuris lygus $((BH)_{max})/2$.

Hicorex neodimio magnetų pagrindinės savybės pateiktos lentelėje 3.4.

3.4. lentelė Hicorex neodimio magnetų savybės [2]

Parametras	Hicorex-Super HS-38AV	Hicorex-Super HS-25EV	Hicorex-Super HS-47AH
Liktinis įmagnetinimas B_r , T	1.20 to 1.30	0.98 to 1.08	1.35 to 1.43
Koercivumas H_c , kA/m	875 to 1035	716 to 844	1018 to 1123
Vidinis koercivumas iH_c , kA/m	min. 1114	min. 1989	min. 1114
$(BH)_{max}$, kJ/m ³	278 to 319	183 to 223	342 to 390
Santykinė magnetinė skvarba		1.03 to 1.06	
Temperatūrinis koeficientas α_{B_r} of B_r at 20 to 100°C, %/°C		-0.11 to -0.13	
Temperatūrinis koeficientas α_{iH_c} of iH_c at 20 to 100°C, %/°C		-0.65 to -0.72	
Kiuri temperatūra, °C		≈ 310	
Maksimali pastovi eksploatavimo temperatūra, °C	160	180	140
Šiluminis laidumas λ , W/(m°C)		≈ 7.7	
Specifinis tankis ρ_{PM} , kg/m ³		7500	
Elektrinis laidumas $\times 10^6$ S/m		≈ 0.67	
Šiluminio plėtimosi koeficientas at 20 to 100°C, $\times 10^{-6}/°C$		-1.5	
Jungo modulis $\times 10^6$ MPa		0.150	
Lenkimo jėga, MPa		260	
Vickerso standumas		≈ 600	
Savybės	Didelės energijos produktas	Tinka aukštomis temperatūroms	Super aukštas našumas

4. TIRIAMOJI DALIS

4.1 Bendri duomenys

Magnetinė grandinė buvo modeliuojama FEMM 4.2 programa.

Atliekant virtualų eksperimentą, buvo keičiamos šios medžiagos ir parametrai :

- Statoriaus medžiaga (plienas M27, plienas 1018, epoksidinė derva);
- Rotoriaus medžiaga (M19, aliuminis 1100);
- Magnetai (NdFeB 40 MGOe, SmCo 27MGOe);
- Magnetų sudėjimas (įprastas, Halbacho);
- Rotoriaus tarpas (1mm ir 2mm);

- Magnetų žingsnis (0,137 mm ir 0,135 (mažintas 2mm, sumažinant magneto aukštį 2mm, ir praplečiant jį po 1mm iš abiejų pusių));
- Apvijos žingsnis (0,091m ir 0,101m);

Kiekvienam atvejui nubrėžti tokie grafikai:

- $|B|$ – Magnetinio srauto tankio modulis išilgai analizuojamo kontūro
- **B.n.**-Magnetinio srauto tankis statmenai analizuojamos linijos;
- **B.t.**-Magnetinio srauto tankis išilgai analizuojamos linijos-liestinė;
- $|H|$ – Magnetinio lauko stiprio modulis išilgai analizuojamo kontūro;
- **H.n.**-Magnetinio lauko stipris statmenai analizuojamos linijos;
- **H.t.**-Magnetinio lauko stipris išilgai analizuojamos linijos-liestinė;
- Taip pat kiekvienam atvejui buvo sumodeliuotas magnetinės generatoriaus grandinės pjūvio vaizdas ir magnetinio srauto tankio B stipris skirtingose magnetinės grandinės dalyse.

Pastaba: analizuojama linija-pirmojo rotoriaus oro tarpas

4.2 Virtualaus eksperimento rezultatai

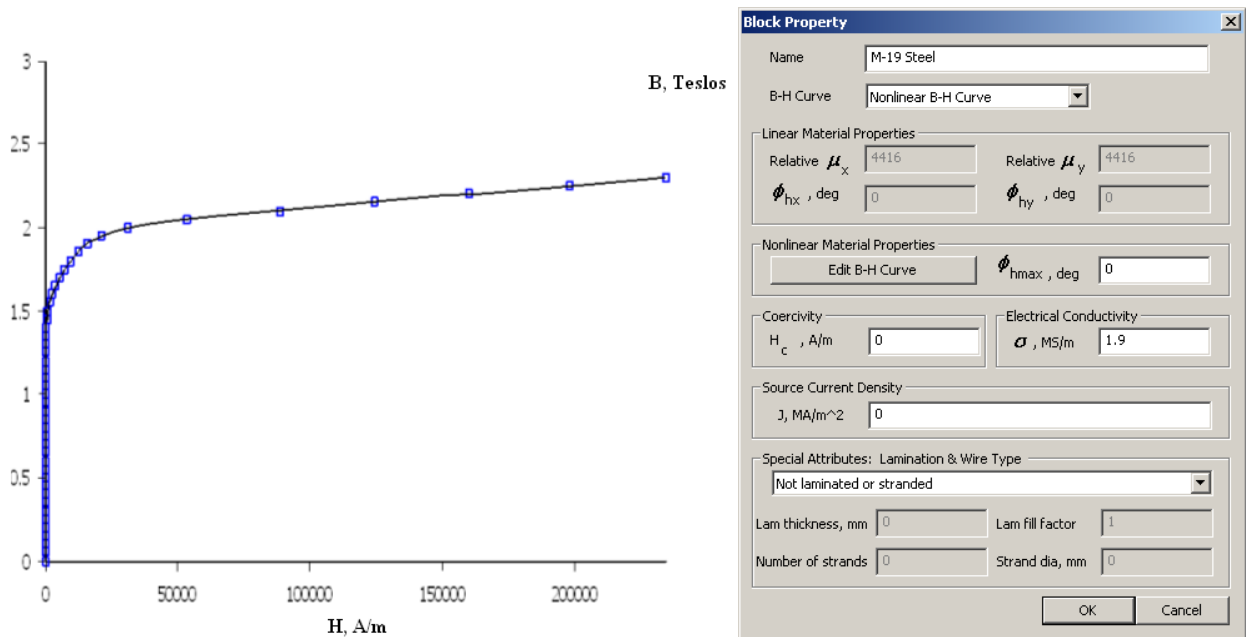
Eksperimentas buvo atliekamas baigtinių elementų programiniu FEMM 4.2 (Finite element Method Magnetics). Modelis buvo nubrėžtas Autocad 2013 programa, tada įkeltas į FEMM.

Modelis suskaidomas į pasirenkamą baigtinių elementų kiekį. Programa sprendžia netiesinių lygčių sistemą.

4.2.1 Magnetinės grandinės modeliui panaudotos medžiagos

Modeliuojant magnetinę grandinę, buvo keičiamos statoriaus, rotoriaus, magnetų medžiagos, oro tarpas tarp statoriaus ir rotoriaus, apvijos žingsnis ir magnetų žingsnis. Rotoriui panaudotos šios medžiagos:

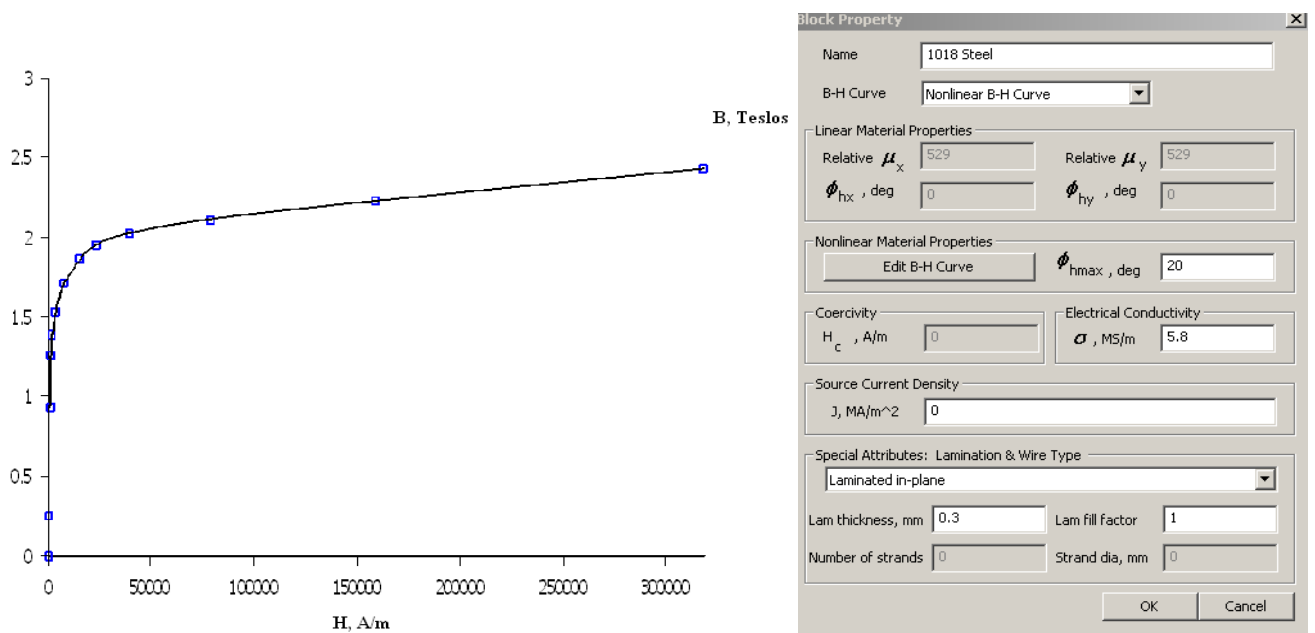
- Elektrotechninis plienas M-19, B-H kreivė pateikta paveiksle 4.1;
- Aliuminis 1100;



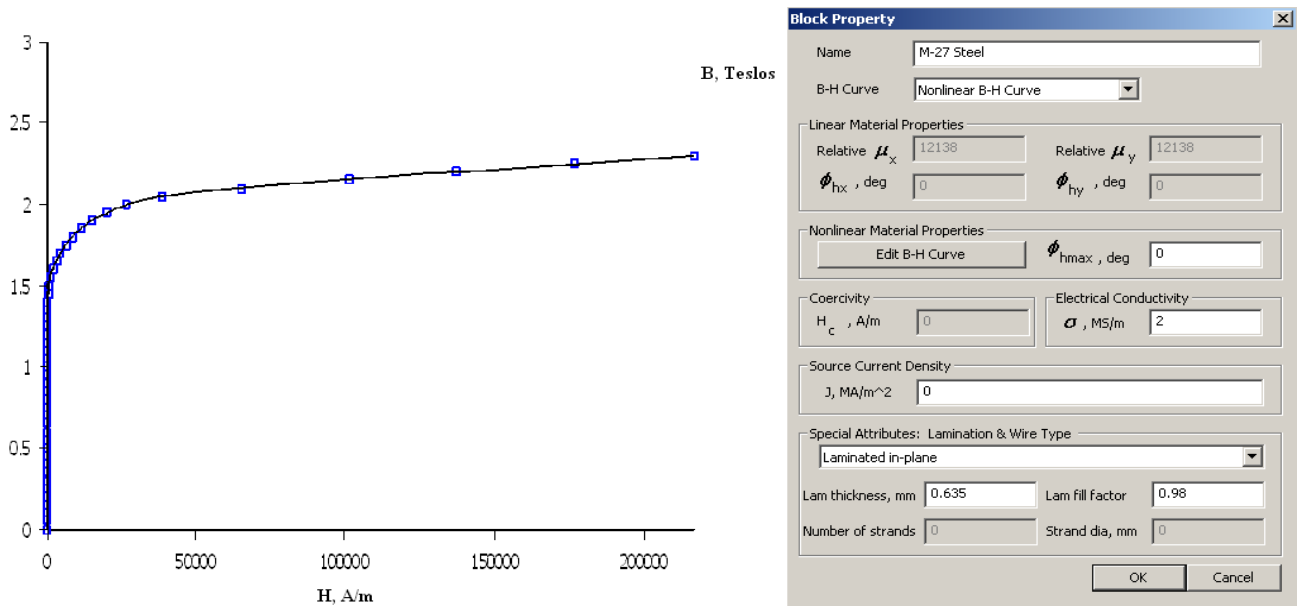
4.1 pav. M-19 plieno B-H kreivė ir savybių lentelė

Statoriui panaudotos šios medžiagos:

- Plienas 1018, B-H kreivė ir savybių lentelė pateikta paveiksle 4.2;
- Elektrotechninis plienas M-27, B-H kreivė ir savybių lentelė pateikta paveiksle 4.3;
- Epoksidinė derva .



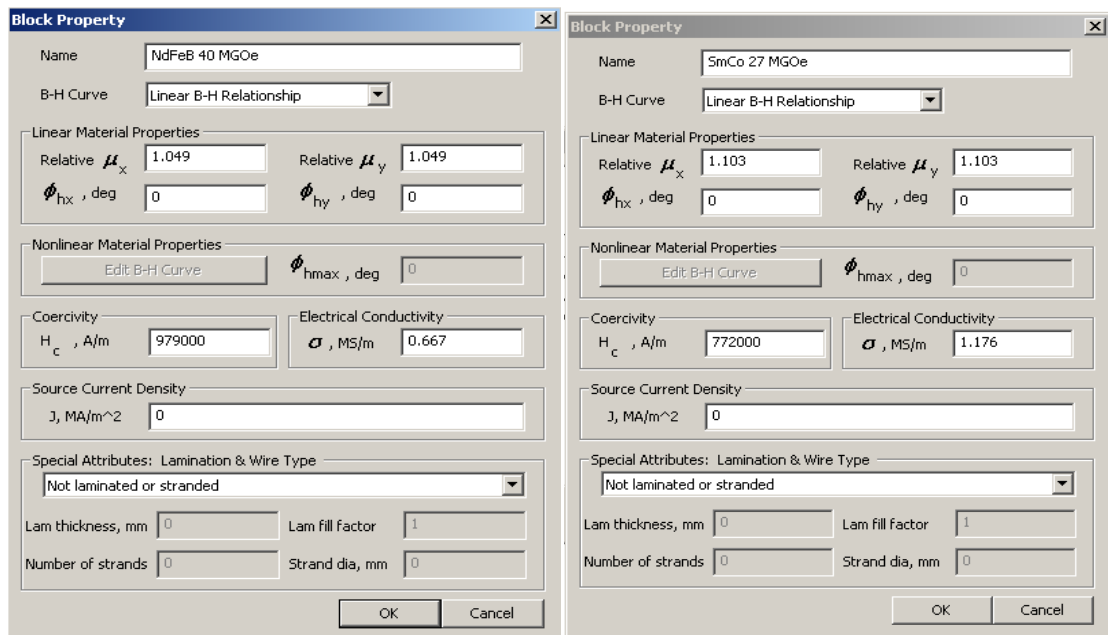
4.2 pav. 1018 plieno B-H kreivė ir savybių lentelė



4.3 pav. M-27 plieno B-H kreivė ir savybių lentelė

Nuolatiniai magnetai buvo panaudoti:

- NdFeB 40MGOe, savybių lentelė pateikta paveiksle 4.4
- SmCo 27MGOe, savybių lentelė pateikta paveiksle 4.4



4.4 pav. NdFeB ir SmCo savybių lentelė

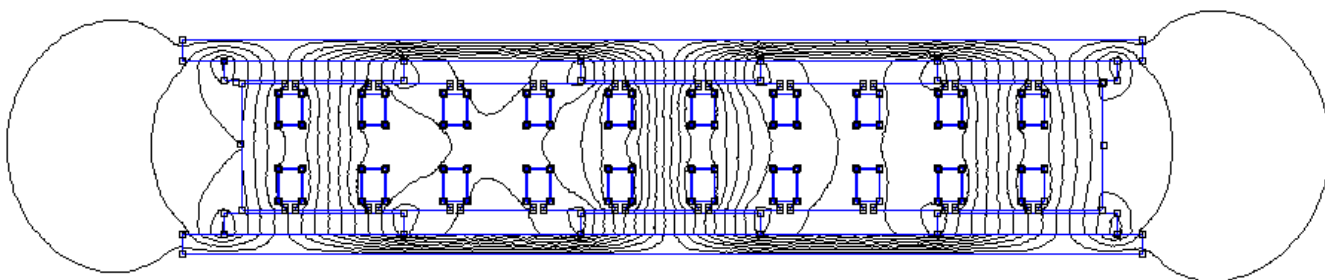
Konstrukcijai, tiek rotoriumi tiek statoriumi, pagrinde naudojamas elektrotechninis plienas, NdFeB nuolatiniai magnetai vario apvijos. Kaip ir rekomenduojama literatūroje, statoriuje naudotas M-27 elektrotechninis plienas, sudarytas iš plokštelių. Iš esmės, visų elektrotechninių plienų savybės panašios, todėl galima buvo naudoti ir kitą. Rotoriumi naudotas M-19. Norint modeliavimą priartinti prie realių sąlygų, kompozicinės medžiagos nenaudotos, nes taip konstrukcija yra gaminama sudėtingiau ir yra brangesnė. Taip pat, kaip ir buvo minėta, Halbacho eilei panaudota neferomagnetinė rotoriaus medžiaga. Pasirinktas aliuminis, tačiau lygiai taip pat galima bandyti naudoti ir kitą neferomagnetinę medžiagą. Statoriaus bešerdei konstrukcijai palinkta epoksidinė derva dėl žemos kainos, ir labai paprastos gamybos procedūros.

4.2.2 Magnetinė grandinė, kai statoriuje naudojamas M-27, rotoriuje M-19, magnetai NdFeB 40MGOe

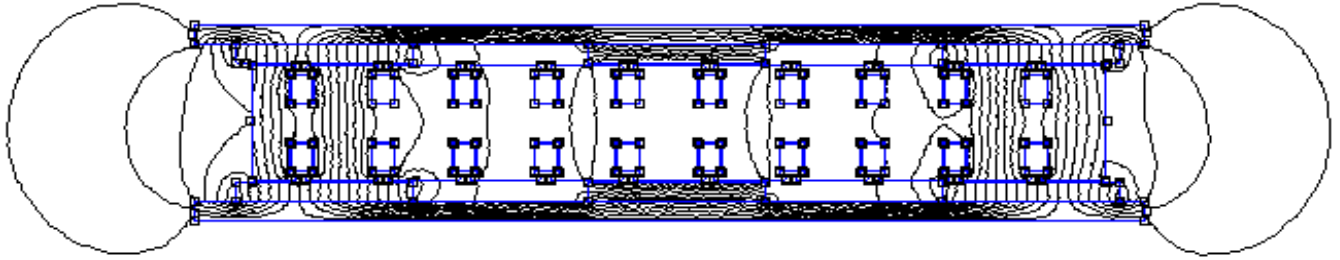
Magnetinės grandinės vaizdas, kai magnetai sudėti įprastai, pateikiamas paveiksle 4.5. Kai magnetai sudėti Halbacho eile, pateikiamas 4.6 paveiksle. Buvo naudojama 90° Halbacho eilė, kuri parodyta 2.16 pav. a)

Magnetinio srauto tankio stipris pateikiamas paveiksluose 4.7 (kai magnetai sudėti įprastai) ir 4.8 (kai magnetai sudėti Halbacho eile).

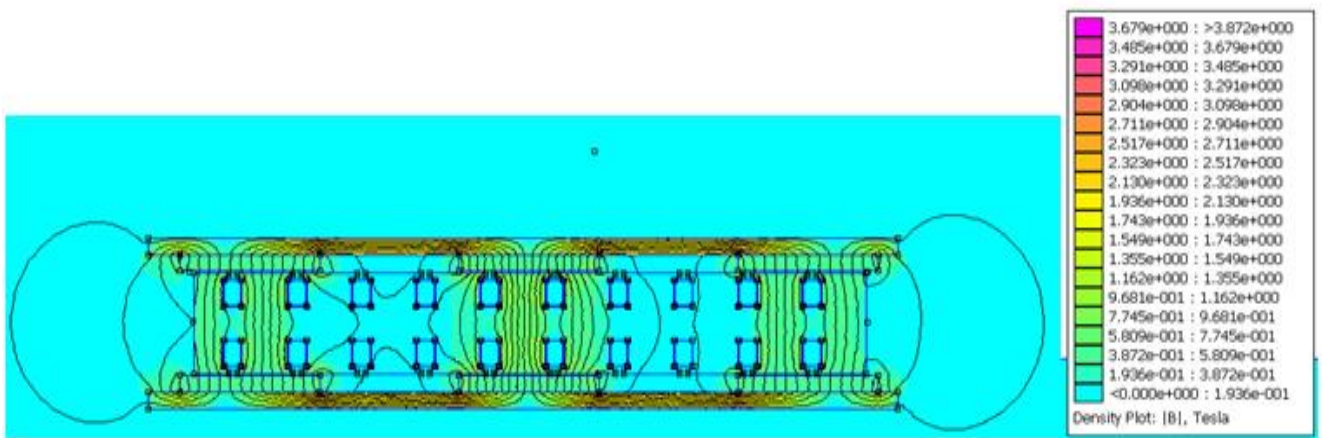
Magnetinio srauto tankio modulio ir normalinės magnetinio srauto tankio kreivės pateikiamos 4.9 (kai magnetai sudėti įprastai) ir 4.10 paveiksluose (kai magnetai sudėti Halbacho eile).



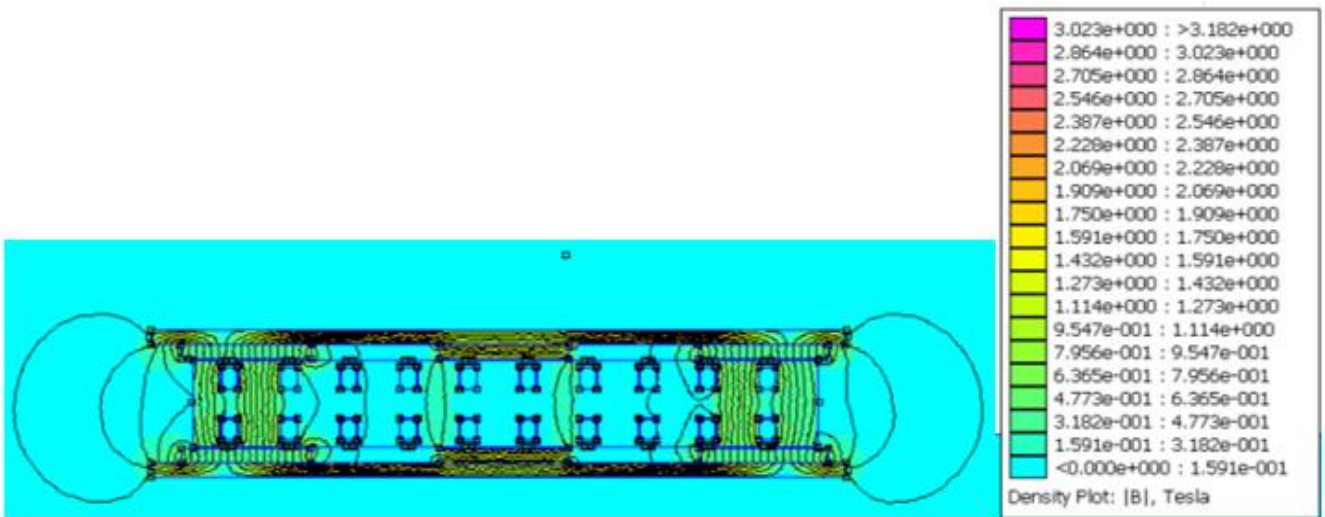
4.5 pav. Magnetinės ASNM generatoriaus grandinės pjūvio vaizdas, kai magnetai sudėti įprastai



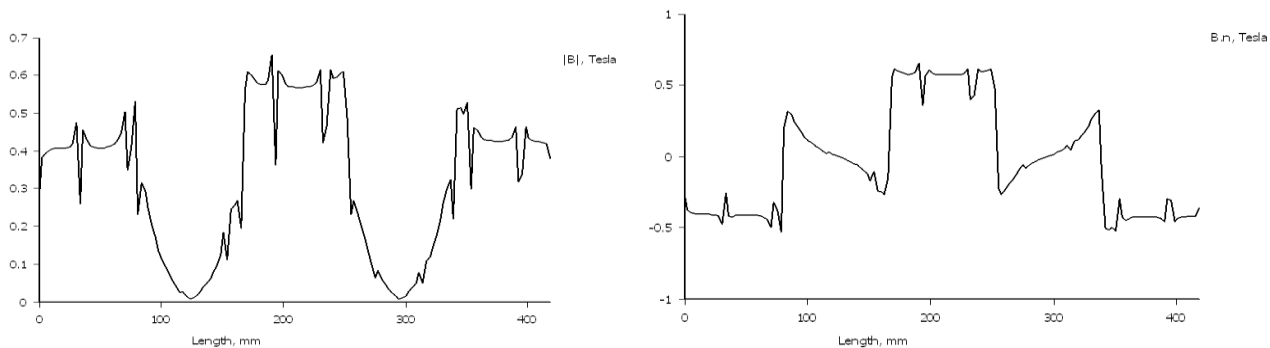
4.6 pav. Magnetinės ASNM generatoriaus grandinės pjūvio vaizdas, kai magnetai sudėti Halbacho eile



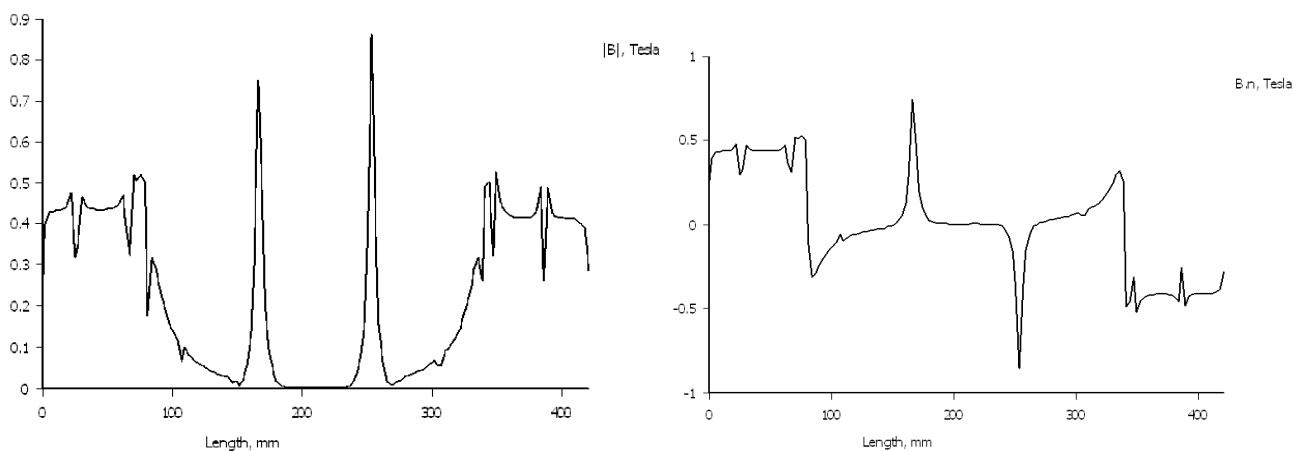
4.7 pav. Magnetinio srauto tankio B stipris skirtingose magnetinės grandinės dalyse, kai magnetai sudėti įprastai



4.8 pav. Magnetinio srauto tankio B stipris skirtingose magnetinės grandinės dalyse, kai magnetai sudėti Halbacho eile



4.9 pav. Magnetinio srauto tankio modulis $|B|$ ir normalinis magnetinio srauto tankis B_n oro tarpe, kai magnetai sudėti įprastai



4.10 pav. Magnetinio srauto tankio modulis $|B|$ ir normalinis magnetinio srauto tankis B_n oro tarpe, kai magnetai sudėti Halbacho eile

- Maksimali magnetinio srauto tankis oro tarpe, kai magnetai sudėti paprastai -0.56T
- Maksimali magnetinio srauto tankis oro tarpe, kai magnetai sudėti Halbacho eile -0.45T

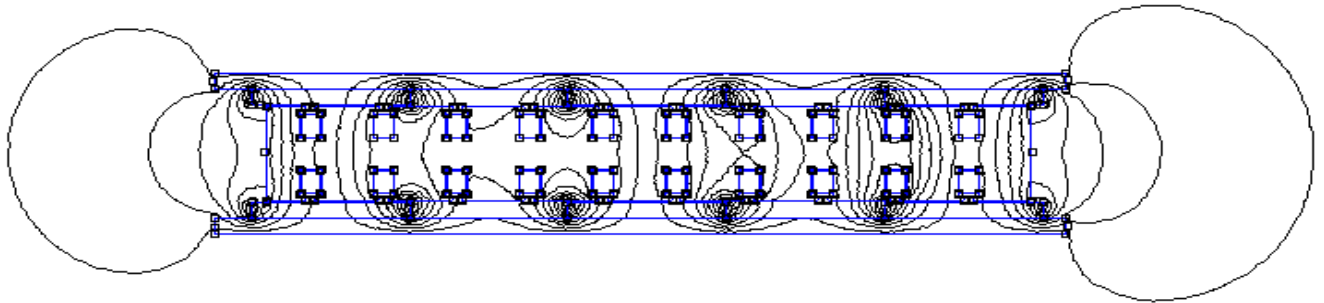
Iš magnetinės grandinės matoma, jog kai magnetai sudėti paprastai, statoriuje magnetinio srauto tankio vertė yra apie 0.8 T, kai sudėti Halbacho eile-0.6T.

4.2.3 Magnetinė grandinė, kai statoriuje naudojamas M-27, rotoriuje 1100 aliuminis, magnetai NdFeB 40MGOe

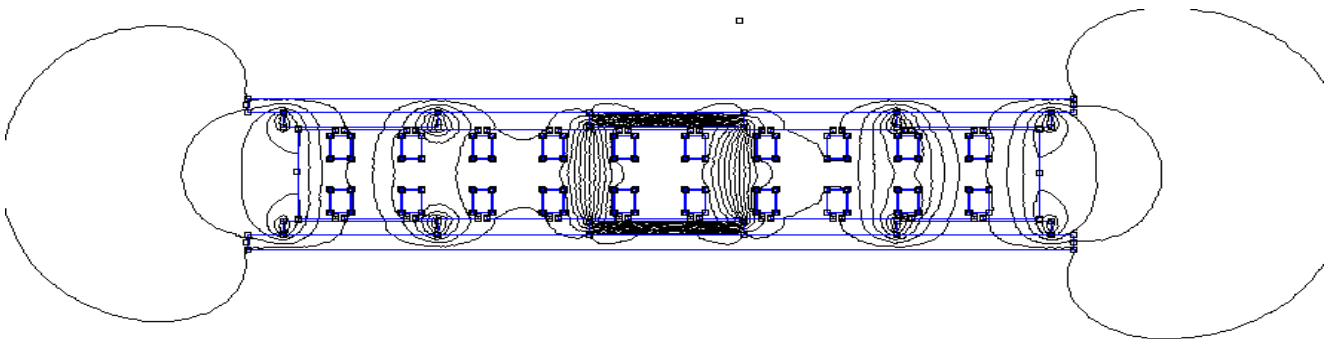
Magnetinės grandinės vaizdas, kai magnetai sudėti įprastai, pateikiamas paveiksle 4.11. Kai magnetai sudėti Halbacho eile, pateikiamas 4.12 paveiksle. Buvo naudojama 90° Halbacho eilė, kuri parodyta 2.16 pav. a)

Magnetinio srauto tankio stipris pateikiamas paveiksluose 4.13 (kai magnetai sudėti įprastai) ir 4.14 (kai magnetai sudėti Halbacho eile).

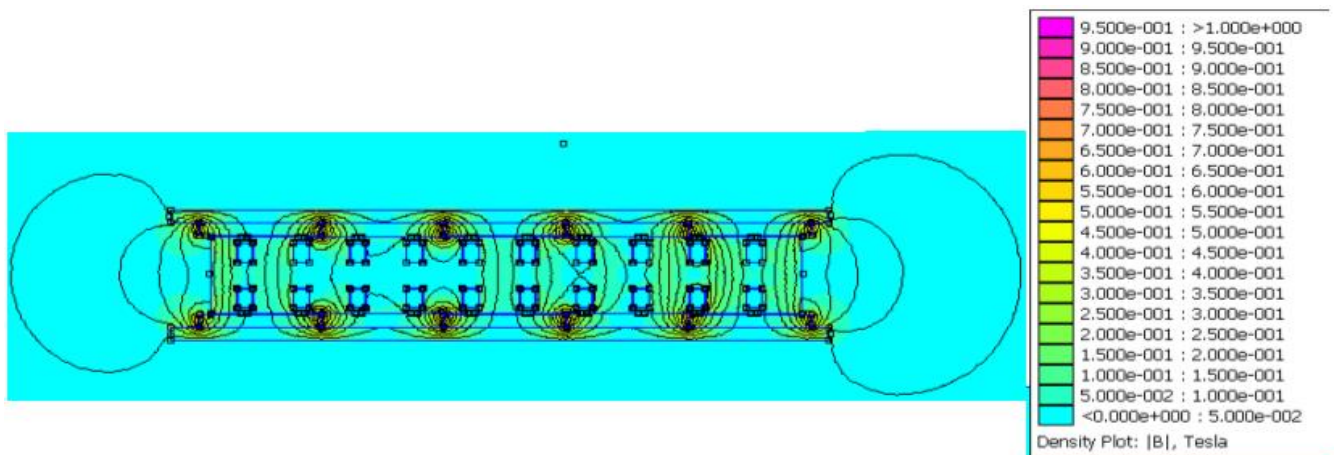
Magnetinio srauto tankio modulio ir normalinės magnetinio srauto tankio kreivės pateikiamos 4.15 (kai magnetai sudėti įprastai) ir 4.16 paveiksluose (kai magnetai sudėti Halbacho eile).



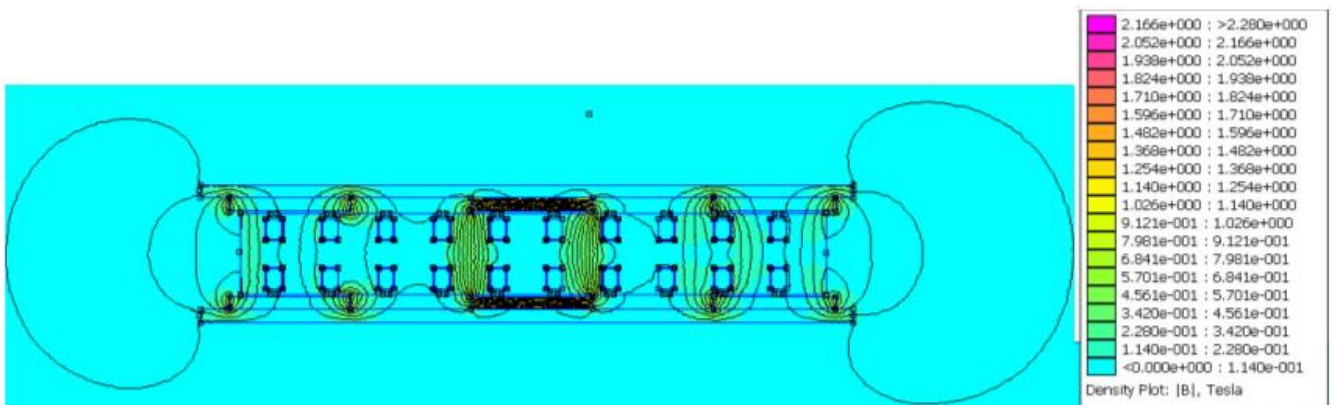
4.11 pav. Magnetinės ASNM generatoriaus grandinės pjūvio vaizdas, kai magnetai sudėti įprastai



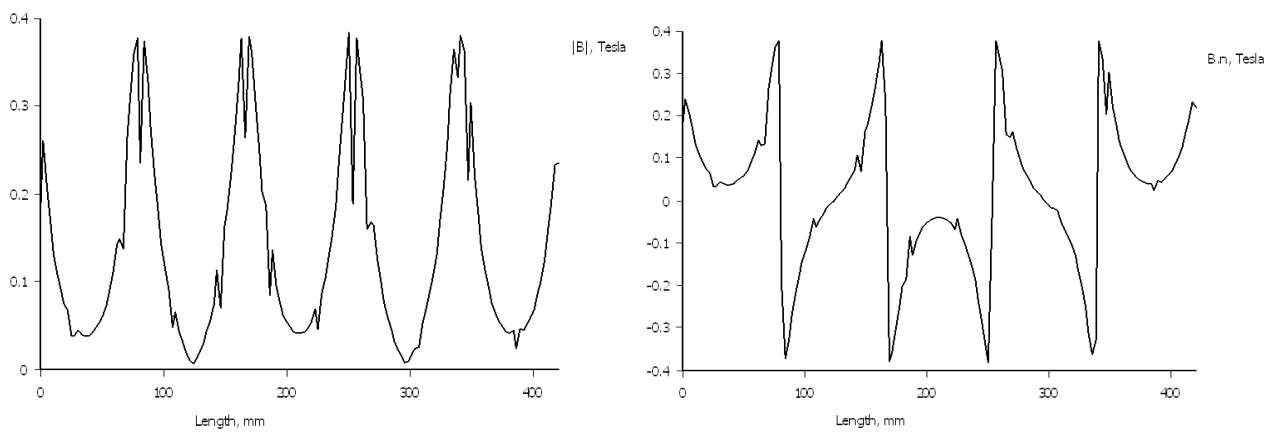
4.12 pav. Magnetinės ASNM generatoriaus grandinės pjūvio vaizdas, kai magnetai sudėti Halbacho eile



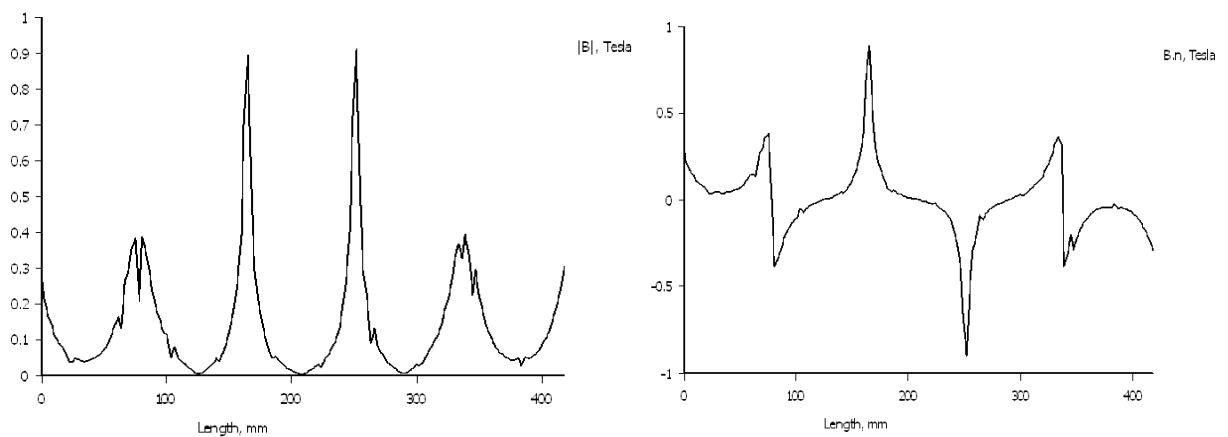
4.13 pav. Magnetinio srauto tankio B stipris skirtingose magnetinės grandinės dalyse, kai magnetai sudėti įprastai



4.14 pav. Magnetinio srauto tankio B stipris skirtingose magnetinės grandinės dalyse, kai magnetai sudėti Halbacho eile



4.15 pav. Magnetinio srauto tankio modulis $|B|$ ir normalinis magnetinio srauto tankis $B.n.$ oro tarpe, kai magnetai sudėti įprastai



4.16 pav. Magnetinio srauto tankio modulis $|B|$ ir normalinis magnetinio srauto tankis $B.n.$ oro tarpe, kai magnetai sudėti Halbacho eile

- Maksimali magnetinio srauto tankis oro tarpe, kai magnetai sudėti paprastai -0.38T
- Maksimali magnetinio srauto tankis oro tarpe, kai magnetai sudėti Halbacho eile -0.4T

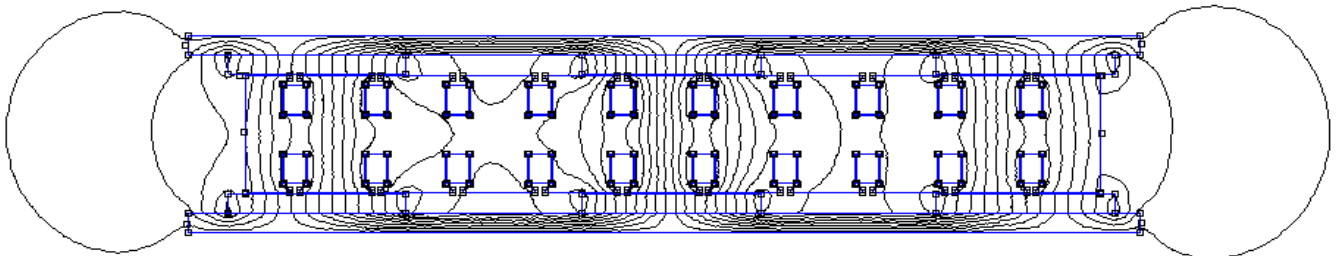
Iš magnetinės grandinės matoma, jog kai magnetai sudėti paprastai, statoriuje magnetinio srauto tankio vertė yra apie 0.3 T, kai sudėti Halbacho eile-0.4T.

4.2.4 Magnetinė grandinė, kai statoriuje naudojamas 1018 plienas, rotoriuje M-19, magnetai NdFeB 40MGOe

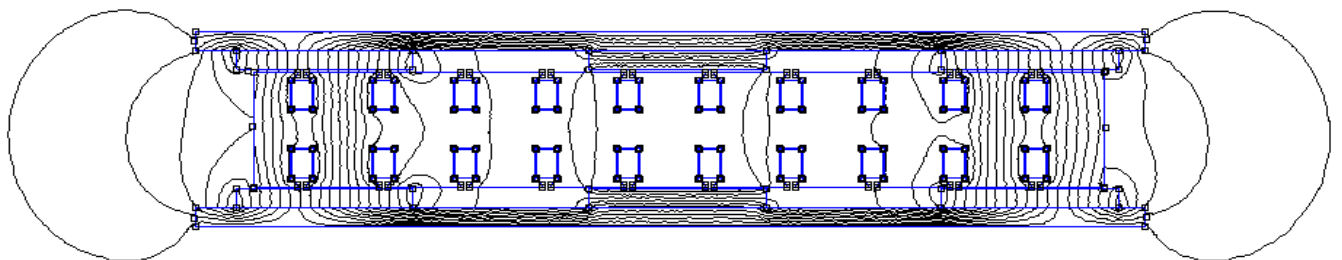
Magnetinės grandinės vaizdas, kai magnetai sudėti įprastai, pateikiamas paveiksle 4.17. Kai magnetai sudėti Halbacho eile, pateikiamas 4.18 paveiksle. Buvo naudojama 90° Halbacho eilė, kuri parodyta 2.16 pav. a)

Magnetinio srauto tankio stipris pateikiamas paveiksluose 4.19 (kai magnetai sudėti įprastai) ir 4.20 (kai magnetai sudėti Halbacho eile).

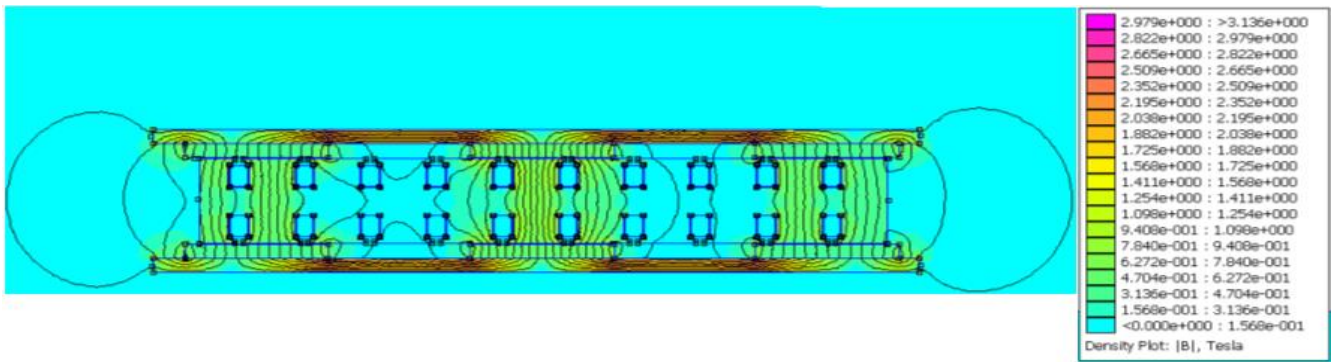
Magnetinio srauto tankio modulio ir normalinės magnetinio srauto tankio kreivės pateikiamos 4.21 (kai magnetai sudėti įprastai) ir 4.22 paveiksluose (kai magnetai sudėti Halbacho eile).



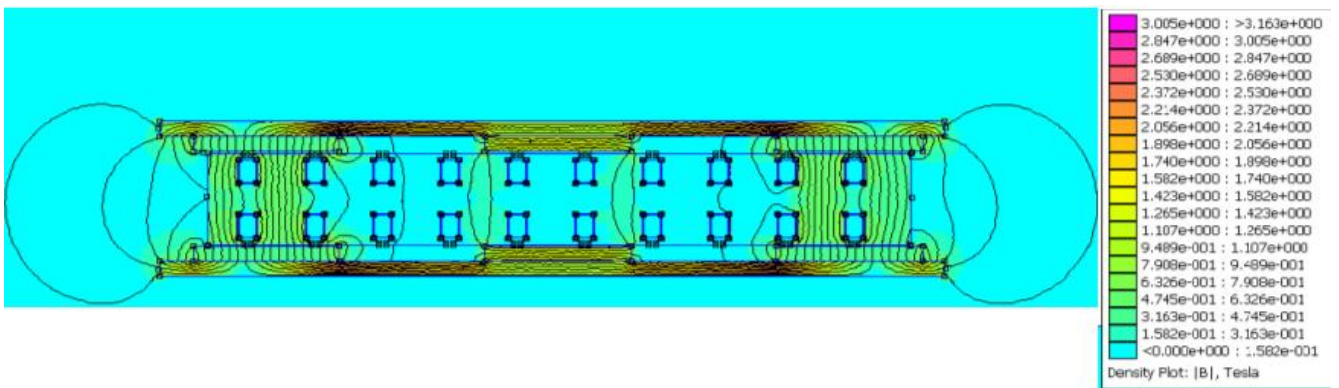
4.17 pav. Magnetinės ASNM generatoriaus grandinės pjūvio vaizdas, kai magnetai sudėti įprastai



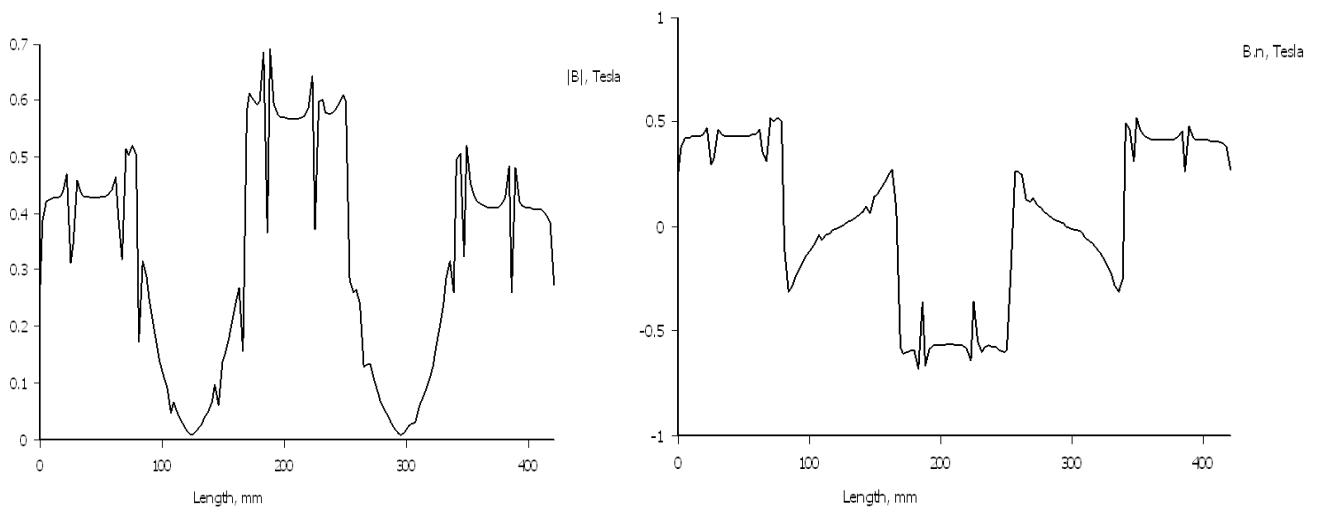
4.18 pav. Magnetinės ASNM generatoriaus grandinės pjūvio vaizdas, kai magnetai sudėti Halbacho eile



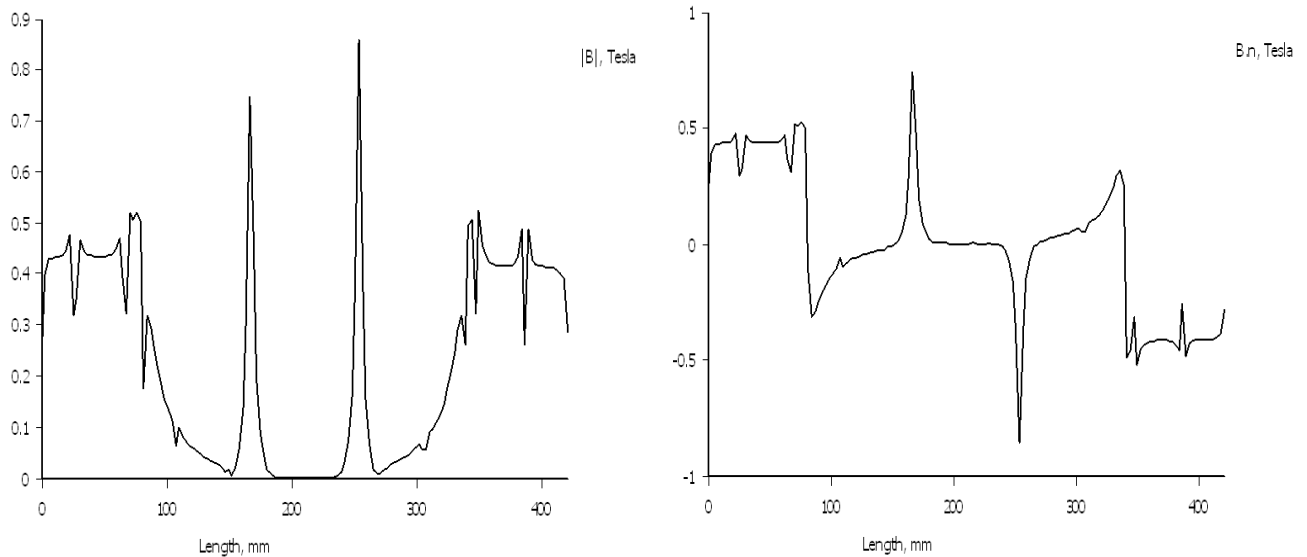
4.19 pav. Magnetinio srauto tankio B stipris skirtingose magnetinės grandinės dalyse, kai magnetai sudėti įprastai



4.20 pav. Magnetinio srauto tankio B stipris skirtingose magnetinės grandinės dalyse, kai magnetai sudėti Halbacho eile



4.21 pav. Magnetinio srauto tankio modulis $|B|$ ir normalinis magnetinio srauto tankis $B.n.$ oro tarpe, kai magnetai sudėti įprastai



4.22 pav. Magnetinio srauto tankio modulis $|B|$ ir normalinis magnetinio srauto tankis $B.n$. oro tarpe, kai magnetai sudėti Halbacho eile

- Maksimali magnetinio srauto tankis oro tarpe, kai magnetai sudėti paprastai $-0.58T$
- Maksimali magnetinio srauto tankis oro tarpe, kai magnetai sudėti Halbacho eile $-0.45T$

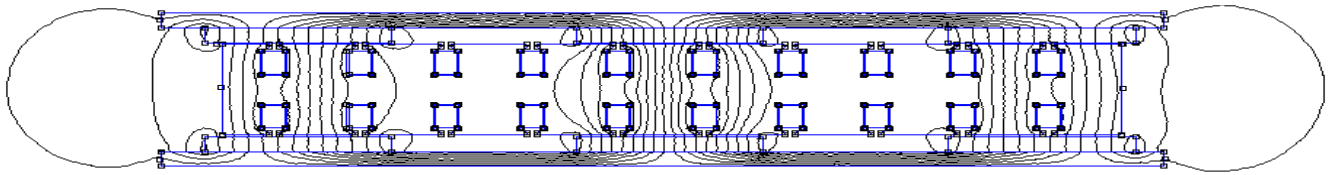
Iš magnetinės grandinės matoma, jog kai magnetai sudėti paprastai, statoriuje magnetinio srauto tankio vertė yra apie $1.0 T$, kai sudėti Halbacho eile- $1.0 T$.

4.2.5 Magnetinė grandinė, kai statoriuje naudojamas M-27 plienas, rotoriuje M-19, magnetai SmCo 27MGOe

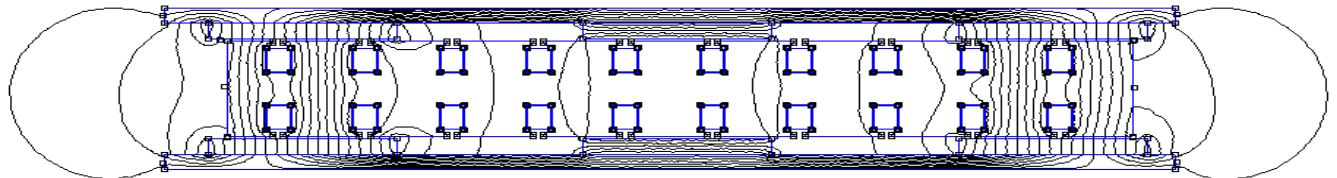
Magnetinės grandinės vaizdas, kai magnetai sudėti įprastai, pateikiamas paveiksle 4.23. Kai magnetai sudėti Halbacho eile, pateikiamas 4.24 paveiksle. Buvo naudojama 90° Halbacho eilė, kuri parodyta 2.16 pav. a)

Magnetinio srauto tankio stipris pateikiamas paveiksluose 4.25 (kai magnetai sudėti įprastai) ir 4.26 (kai magnetai sudėti Halbacho eile).

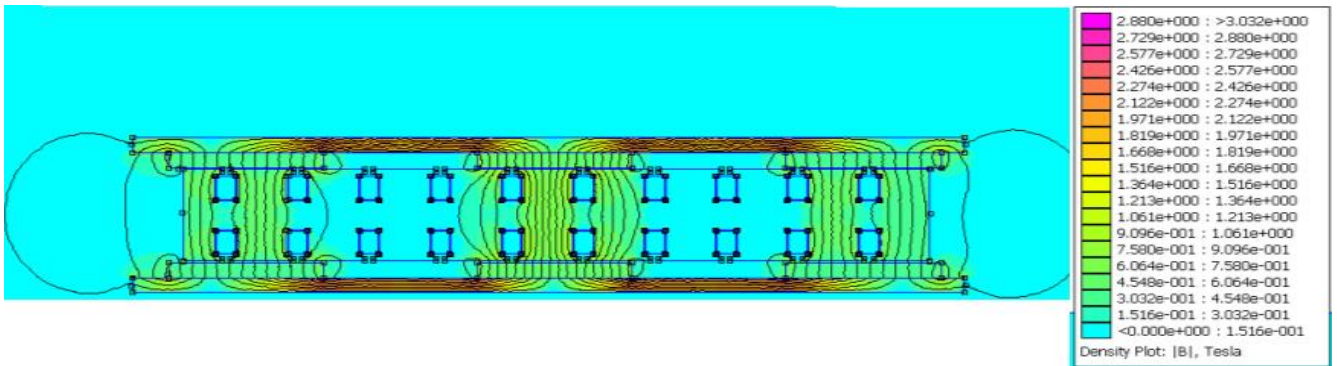
Magnetinio srauto tankio modulio ir normalinės magnetinio srauto tankio kreivės pateikiamos 4.27 (kai magnetai sudėti įprastai) ir 4.28 paveiksluose (kai magnetai sudėti Halbacho eile).



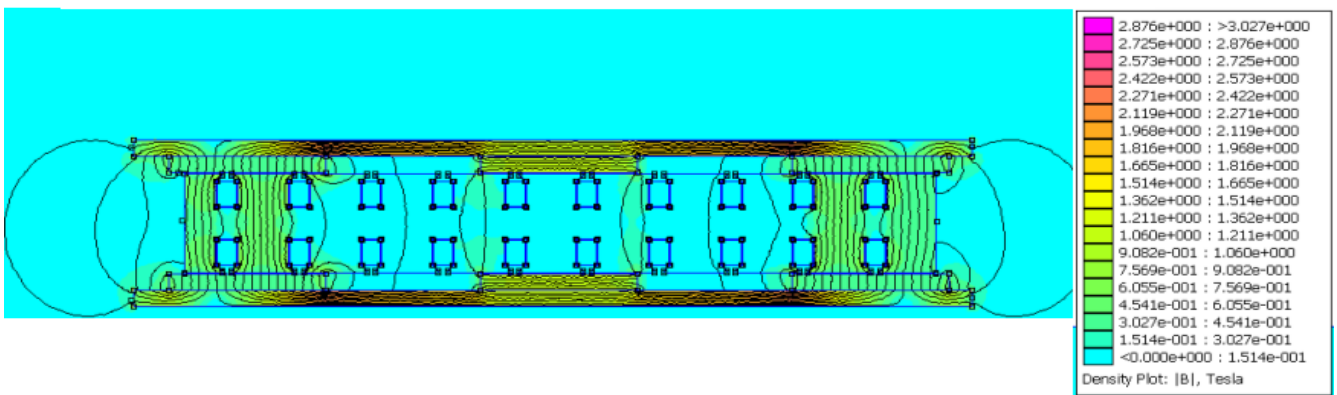
4.23 pav. Magnetinės ASNM generatoriaus grandinės pjūvio vaizdas, kai magnetai sudėti įprastai



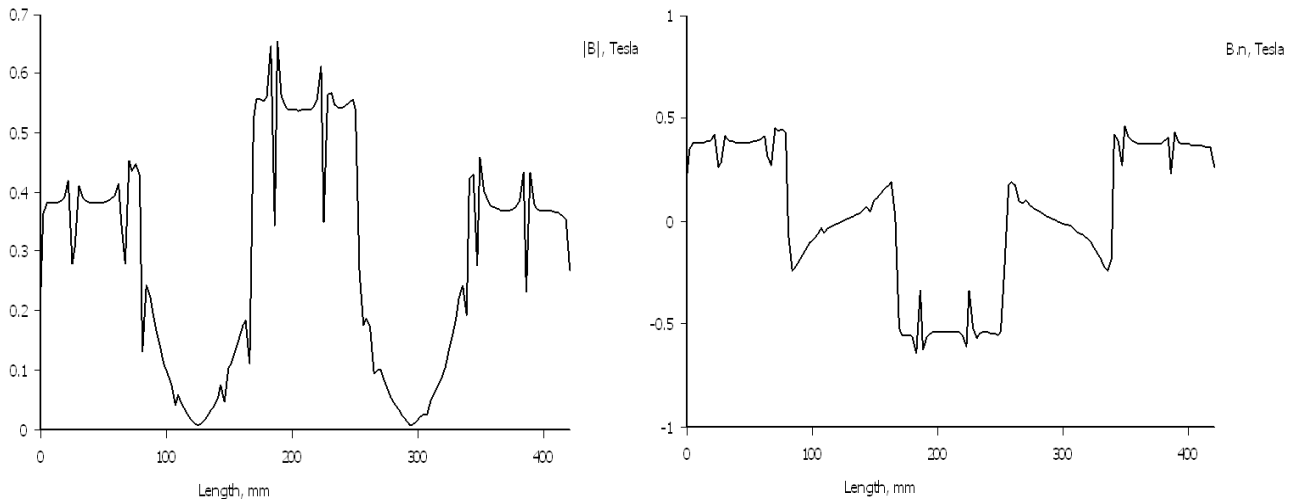
4.24 pav. Magnetinės ASNM generatoriaus grandinės pjūvio vaizdas, kai magnetai sudėti Halbacho eile



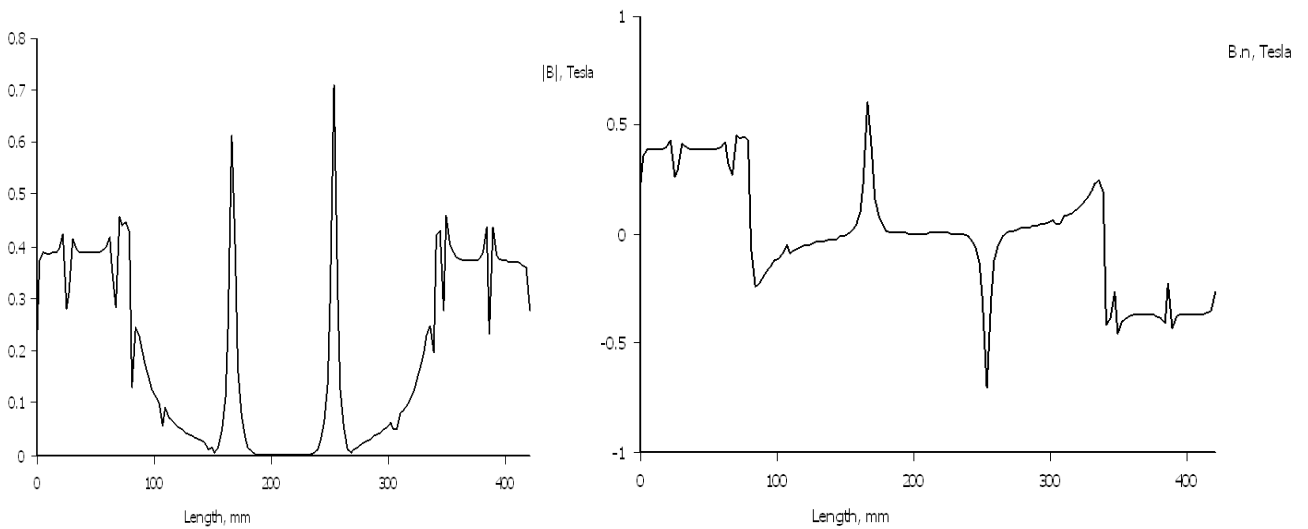
4.25 pav. Magnetinio srauto tankio B stipris skirtingose magnetinės grandinės dalyse, kai magnetai sudėti įprastai



4.26 pav. Magnetinio srauto tankio B stipris skirtingose magnetinės grandinės dalyse, kai magnetai sudėti Halbacho eile



4.27 pav. Magnetinio srauto tankio modulis $|B|$ ir normalinis magnetinio srauto tankis $B.n.$ oro tarpe, kai magnetai sudėti įprastai



4.28 pav. Magnetinio srauto tankio modulis $|B|$ ir normalinis magnetinio srauto tankis $B.n.$ oro tarpe, kai magnetai sudėti Halbacho eile

- Maksimali magnetinio srauto tankis oro tarpe, kai magnetai sudėti paprastai $-0.55T$
- Maksimali magnetinio srauto tankis oro tarpe, kai magnetai sudėti Halbacho eile $-0.40T$

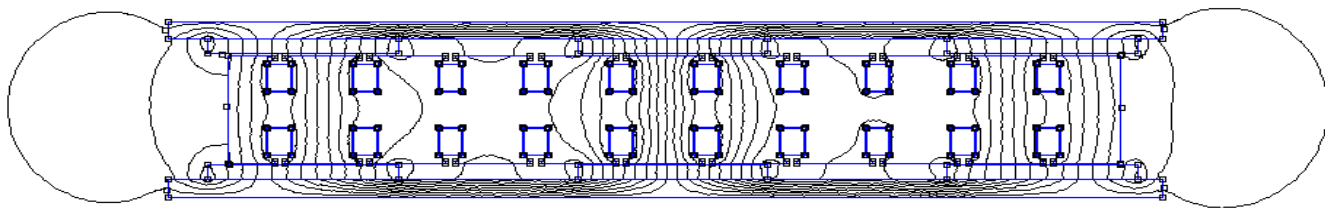
Iš magnetinės grandinės matoma, jog kai magnetai sudėti paprastai, statoriuje magnetinio srauto tankio vertė yra apie $1.0 T$, kai sudėti Halbacho eile $-0.95 T$.

4.2.6 Magnetinė grandinė, kai statoriuje naudojamas M-27 plienas, rotoriuje M-19, magnetai NdFeB 40MGOe, magneto žingsnis sumažintas 2mm, nekeičiant jo tūrio

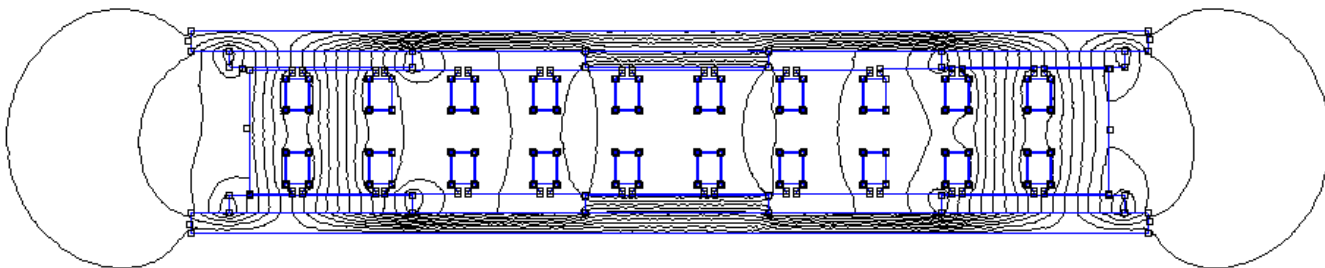
Magnetinės grandinės vaizdas, kai magnetai sudėti įprastai, pateikiamas paveiksle 4.29. Kai magnetai sudėti Halbacho eile, pateikiamas 4.30 paveiksle. Buvo naudojama 90° Halbacho eilė, kuri parodyta 2.16 pav. a)

Magnetinio srauto tankio stipris pateikiamas paveiksluose 4.31 (kai magnetai sudėti įprastai) ir 4.32 (kai magnetai sudėti Halbacho eile).

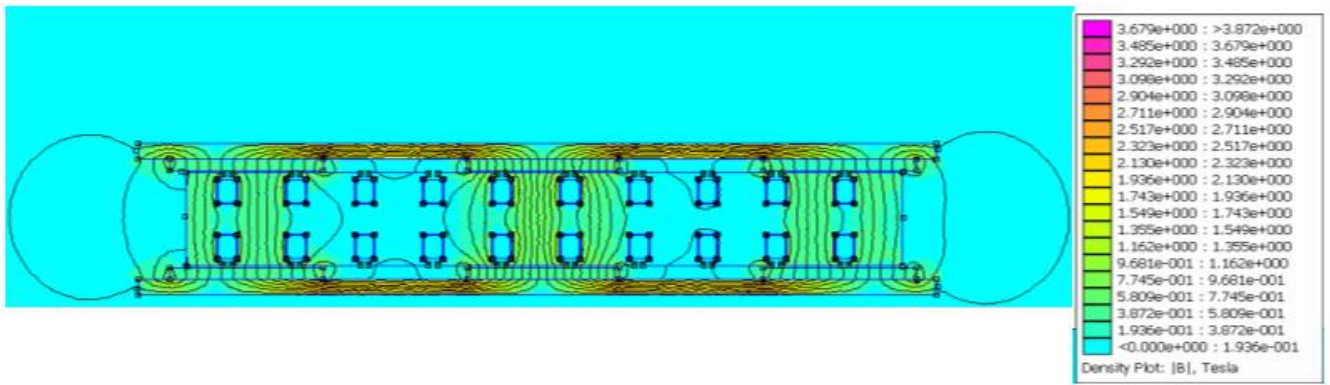
Magnetinio srauto tankio modulio ir normalinės magnetinio srauto tankio kreivės pateikiamos 4.33 (kai magnetai sudėti įprastai) ir 4.34 paveiksluose (kai magnetai sudėti Halbacho eile).



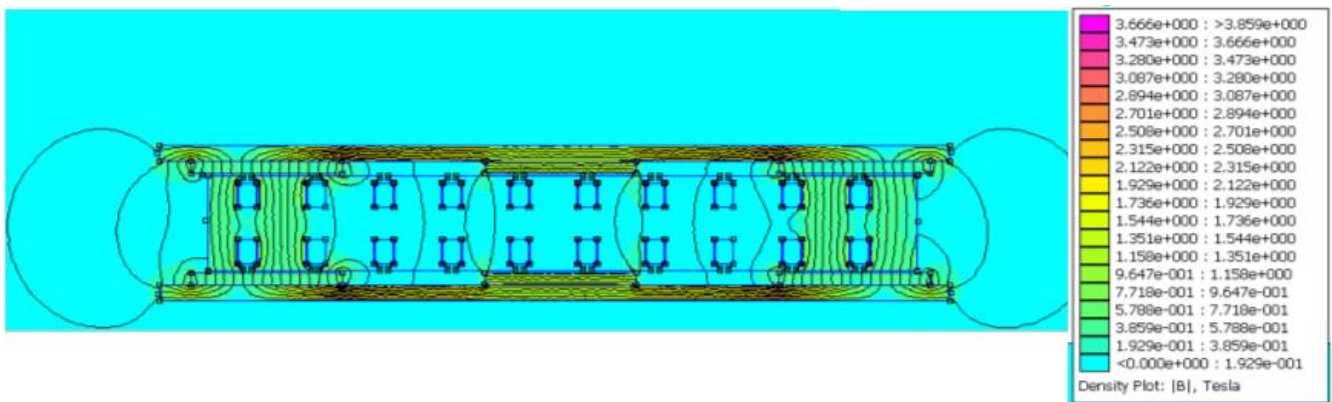
4.29 pav. Magnetinės ASNM generatoriaus grandinės pjūvio vaizdas, kai magnetai sudėti įprastai



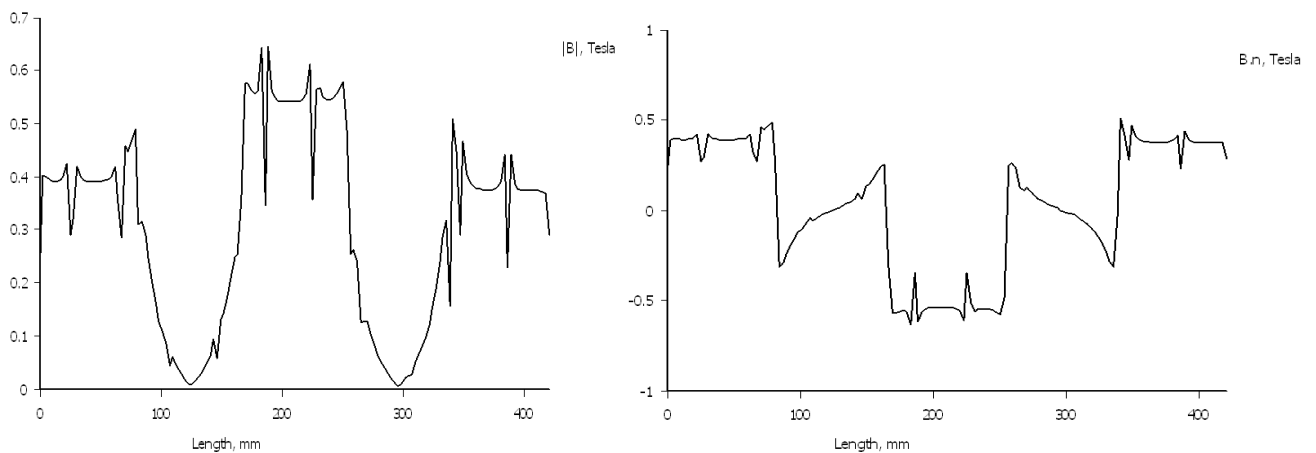
4.30 pav. Magnetinės ASNM generatoriaus grandinės pjūvio vaizdas, kai magnetai sudėti Halbacho eile



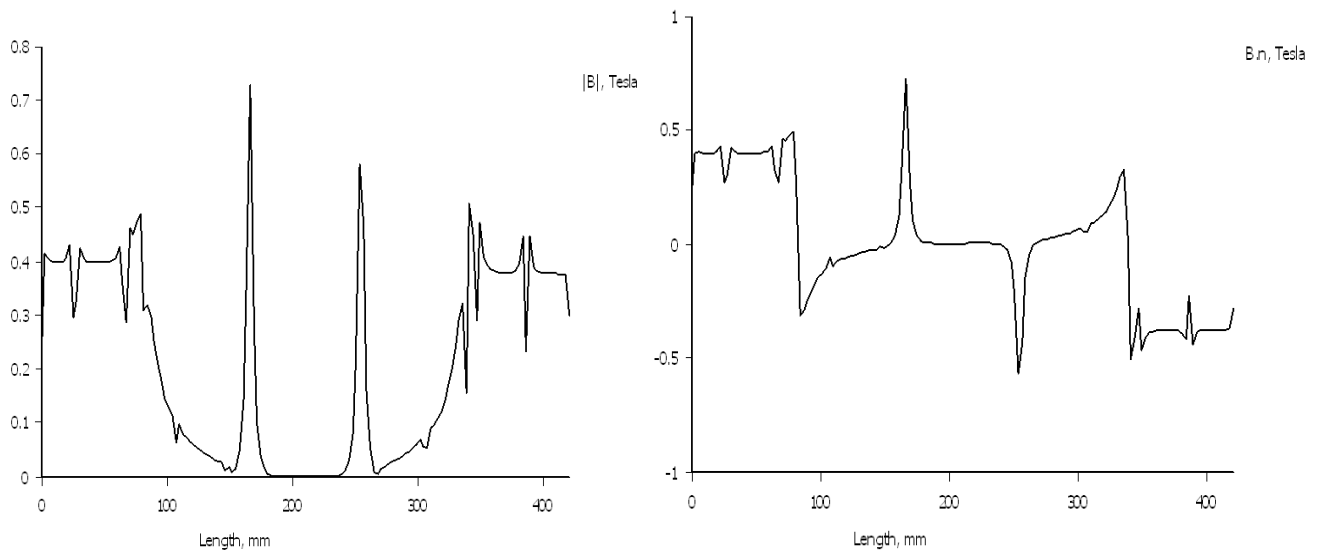
4.31 pav. Magnetinio srauto tankio B stipris skirtingose magnetinės grandinės dalyse, kai magnetai sudėti įprastai



4.32 pav. Magnetinio srauto tankio B stipris skirtingose magnetinės grandinės dalyse, kai magnetai sudėti Halbacho eile



4.33 pav. Magnetinio srauto tankio modulis |B| ir normalinis magnetinio srauto tankis B.n. oro tarpe, kai magnetai sudėti įprastai



4.34 pav. Magnetinio srauto tankio modulis $|B|$ ir normalinis magnetinio srauto tankis $B.n.$ oro tarpe, kai magnetai sudėti Halbacho eile

- Maksimali magnetinio srauto tankis oro tarpe, kai magnetai sudėti paprastai -0.55 T
- Maksimali magnetinio srauto tankis oro tarpe, kai magnetai sudėti Halbacho eile -0.39 T

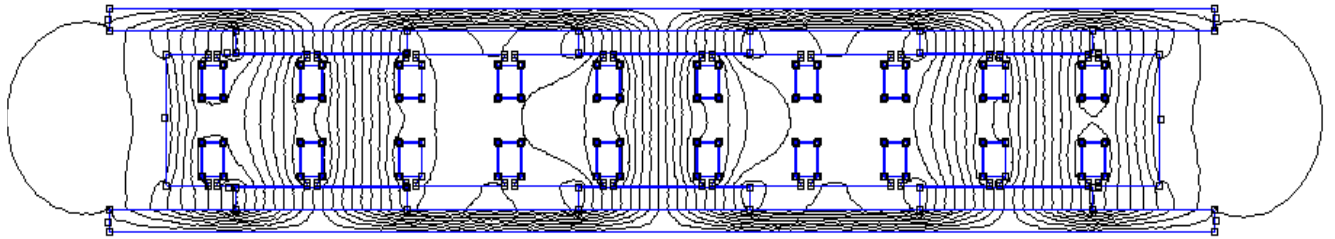
Iš magnetinės grandinės matoma, jog kai magnetai sudėti paprastai, statoriuje magnetinio srauto tankio vertė yra apie 1.1 T, kai sudėti Halbacho eile-0.9 T.

4.2.7 Magnetinė grandinė, kai statoriuje naudojamas M-27 plienas, rotoriuje M-19, magnetai NdFeB 40MGOe, apvijos žingsnis padidintas 10 mm

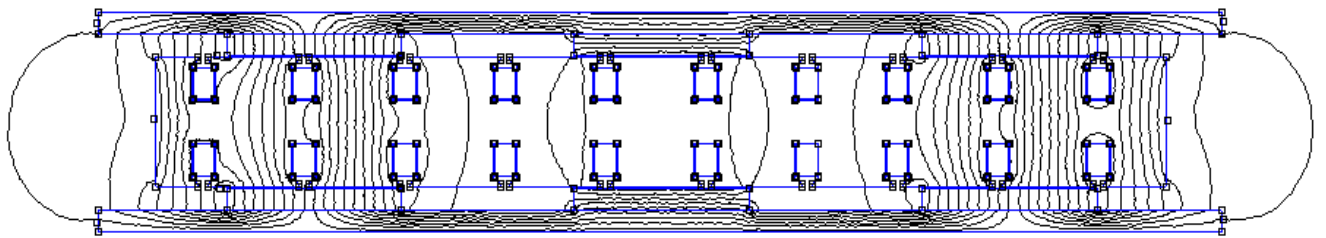
Magnetinės grandinės vaizdas, kai magnetai sudėti įprastai, pateikiamas paveiksle 4.35. Kai magnetai sudėti Halbacho eile, pateikiamas 4.36 paveiksle. Buvo naudojama 90° Halbacho eilė, kuri parodyta 2.16 pav. a)

Magnetinio srauto tankio stipris pateikiamas paveiksluose 4.37 (kai magnetai sudėti įprastai) ir 4.38 (kai magnetai sudėti Halbacho eile).

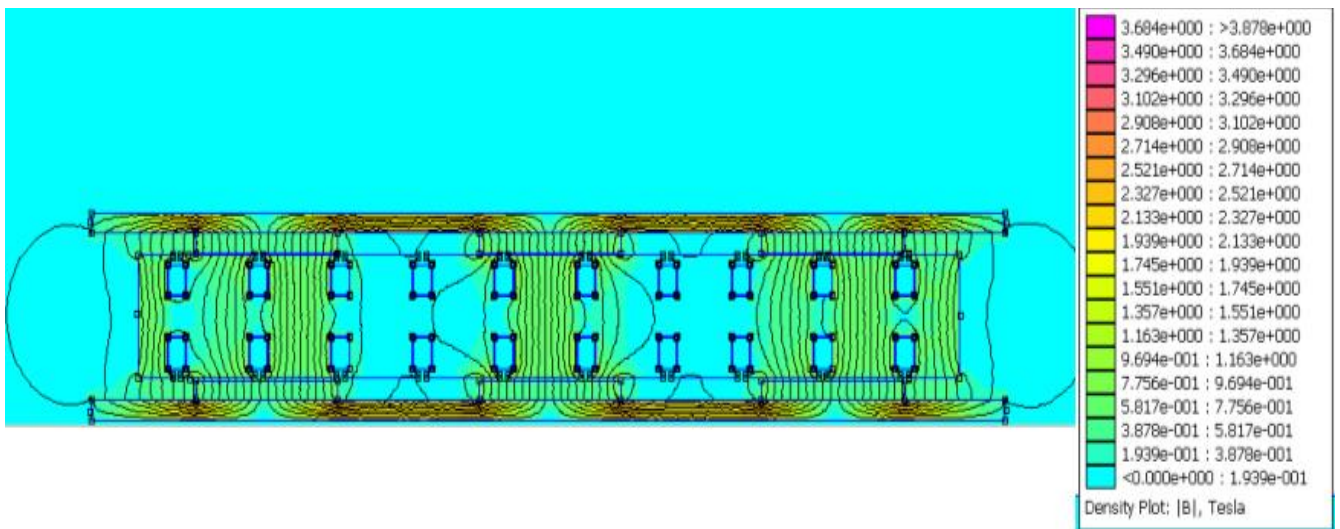
Magnetinio srauto tankio modulio ir normalinės magnetinio srauto tankio kreivės pateikiamos 4.39 (kai magnetai sudėti įprastai) ir 4.40 paveiksluose (kai magnetai sudėti Halbacho eile).



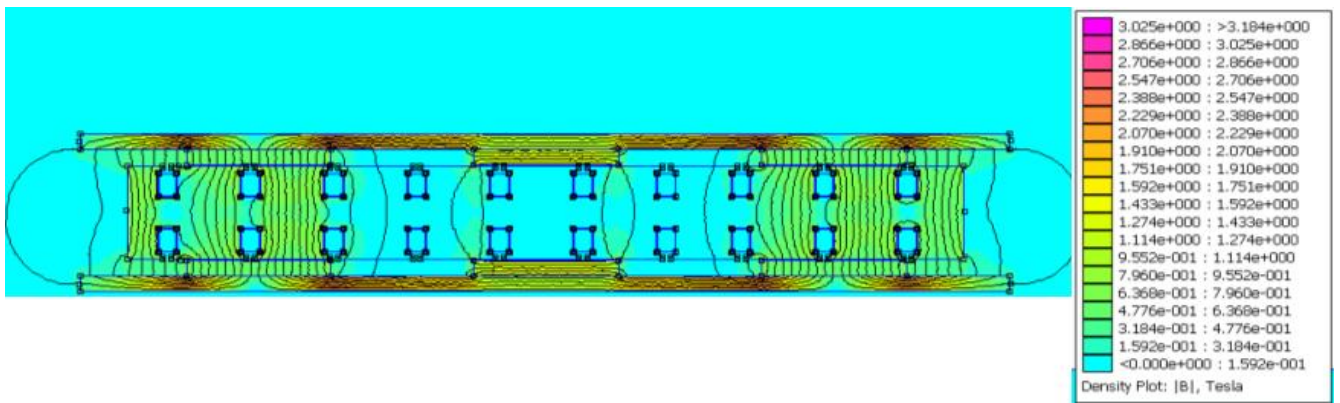
4.35 pav. Magnetinės ASNM generatoriaus grandinės pjūvio vaizdas, kai magnetai sudėti įprastai



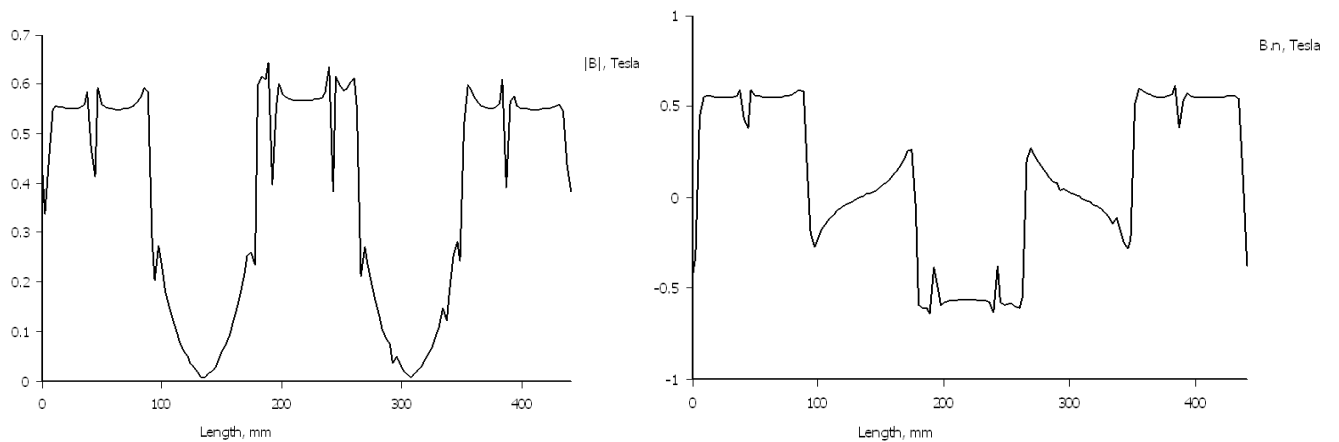
4.36 pav. Magnetinės ASNM generatoriaus grandinės pjūvio vaizdas, kai magnetai sudėti Halbacho eile



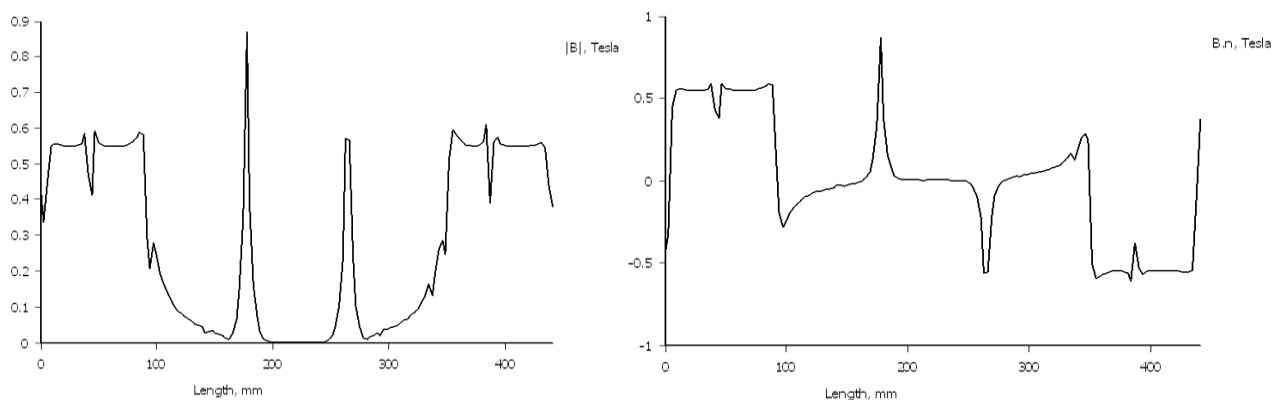
4.37 pav. Magnetinio srauto tankio B stipris skirtingose magnetinės grandinės dalyse, kai magnetai sudėti įprastai



4.38 pav. Magnetinio srauto tankio B stipris skirtingose magnetinės grandinės dalyse, kai magnetai sudėti Halbacho eile



4.39 pav. Magnetinio srauto tankio modulis |B| ir normalinis magnetinio srauto tankis B.n. oro tarpe, kai magnetai sudėti įprastai



4.40 pav. Magnetinio srauto tankio modulis |B| ir normalinis magnetinio srauto tankis B.n. oro tarpe, kai magnetai sudėti Halbacho eile

- Maksimali magnetinio srauto tankis oro tarpe, kai magnetai sudėti paprastai -0.58T
- Maksimali magnetinio srauto tankis oro tarpe, kai magnetai sudėti Halbacho eile -0.57T

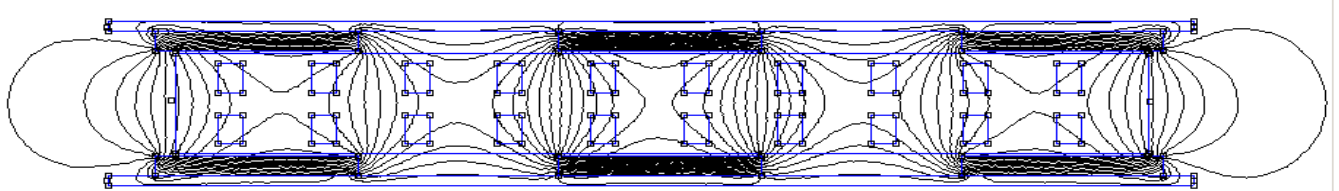
Iš magnetinės grandinės matoma, jog kai magnetai sudėti paprastai, statoriuje magnetinio srauto tankio vertė yra apie 1.1 T, kai sudėti Halbacho eile-1.2 T.

4.2.8 Magnetinė grandinė, kai statoriuje naudojama epoksidinė derva, rotoriuje 1100 aliuminis, magnetai NdFeB 40MGOe

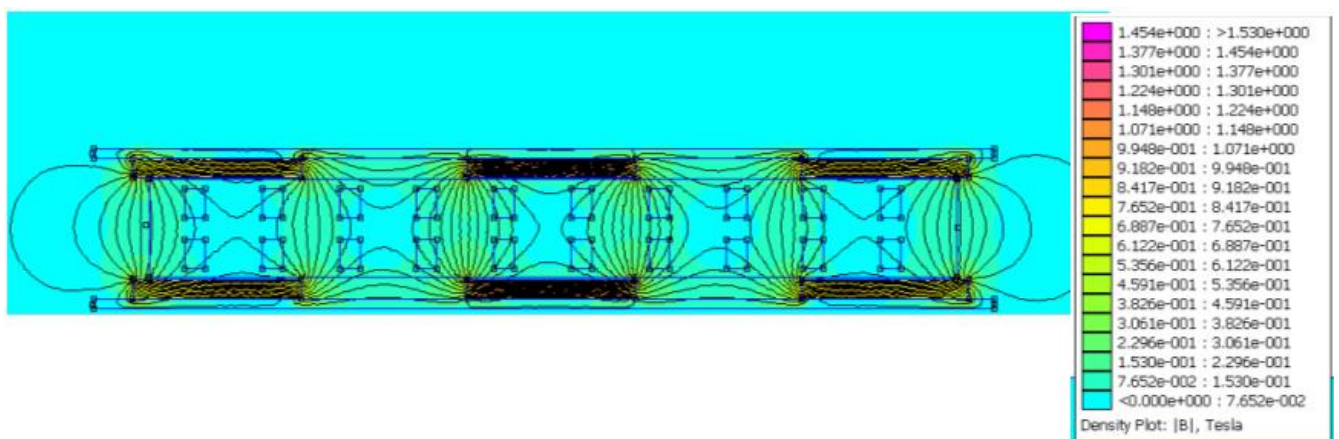
Magnetinės grandinės vaizdas, kai magnetai sudėti Halbacho eile, pateikiamas 4.41 paveiksle. Buvo naudojama 45° Halbacho eilė, kuri parodyta 2.16 pav. b)

Magnetinio srauto tankio stipris pateiktas paveiksle 4.42 (kai magnetai sudėti Halbacho eile).

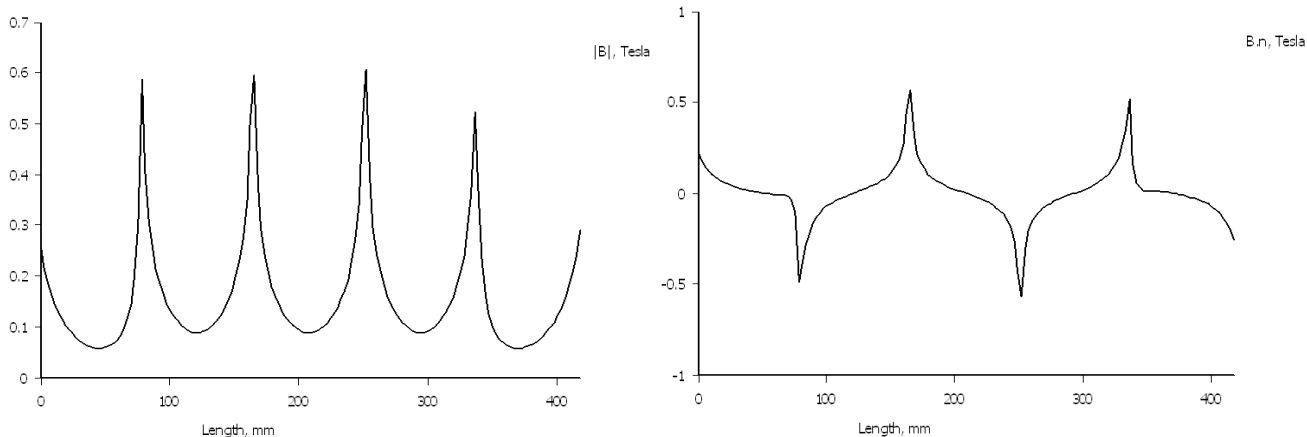
Magnetinio srauto tankio modulio ir normalinės magnetinio srauto tankio kreivės pateikiamos 4.43 (kai magnetai sudėti Halbacho eile).



4.41 pav. Magnetinės ASNM generatoriaus grandinės pjūvio vaizdas, kai magnetai sudėti Halbacho eile



4.42 pav. Magnetinio srauto tankio B stipris skirtingose magnetinės grandinės dalyse, kai magnetai sudėti Halbacho eile



4.43 pav. Magnetinio srauto tankio modulis $|B|$ ir normalinis magnetinio srauto tankis $B.n$ oro tarpe, kai magnetai sudėti Halbacho eile

Maksimali magnetinio srauto tankis oro tarpe, kai magnetai sudėti Halbacho eile $-0.55T$

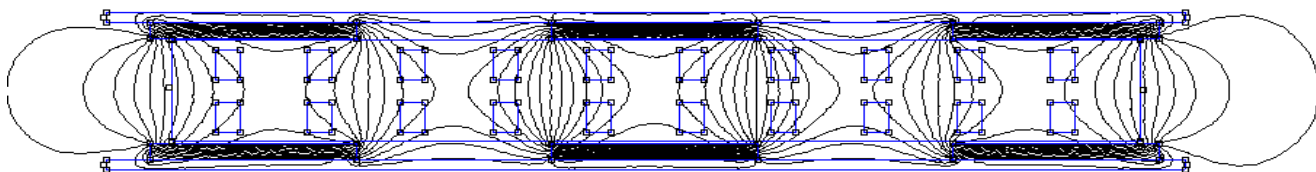
Iš magnetinės grandinės matoma, jog kai magnetai sudėti Halbacho eile, statoriuje magnetinio srauto tankio vertė yra apie $0.2 T$.

4.2.9 Magnetinė grandinė, kai statoriuje naudojama epoksidinė derva, rotoriuje 1100 aliuminis, magnetai NdFeB 40MGOe, magneto žingsnis sumažintas 2mm, nekeičiant jo tūrio

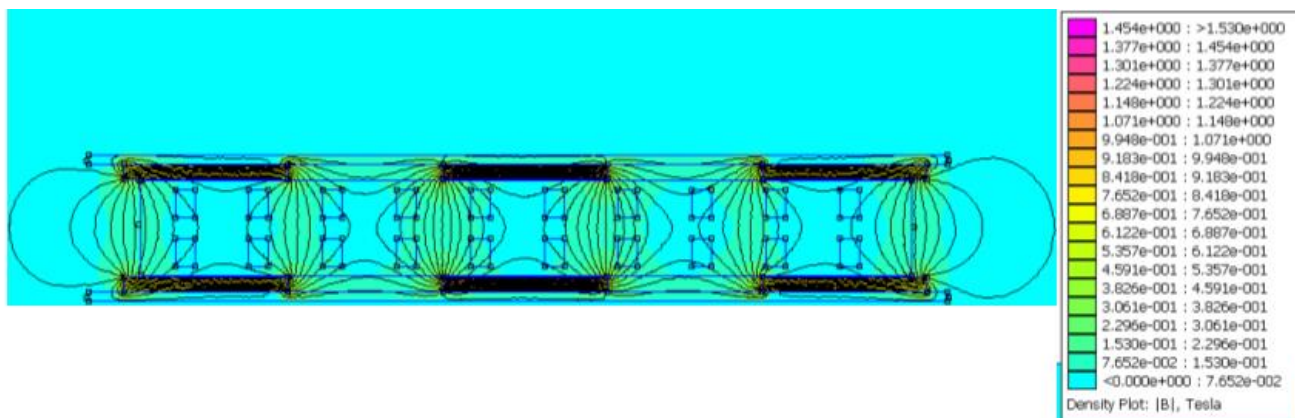
Magnetinės grandinės vaizdas, kai magnetai sudėti Halbacho eile, pateikiamas 4.44 paveiksle. Buvo naudojama 45° Halbacho eilė, kuri parodyta 2.16 pav. b)

Magnetinio srauto tankio stipris pateiktas paveiksle 4.45 (kai magnetai sudėti Halbacho eile).

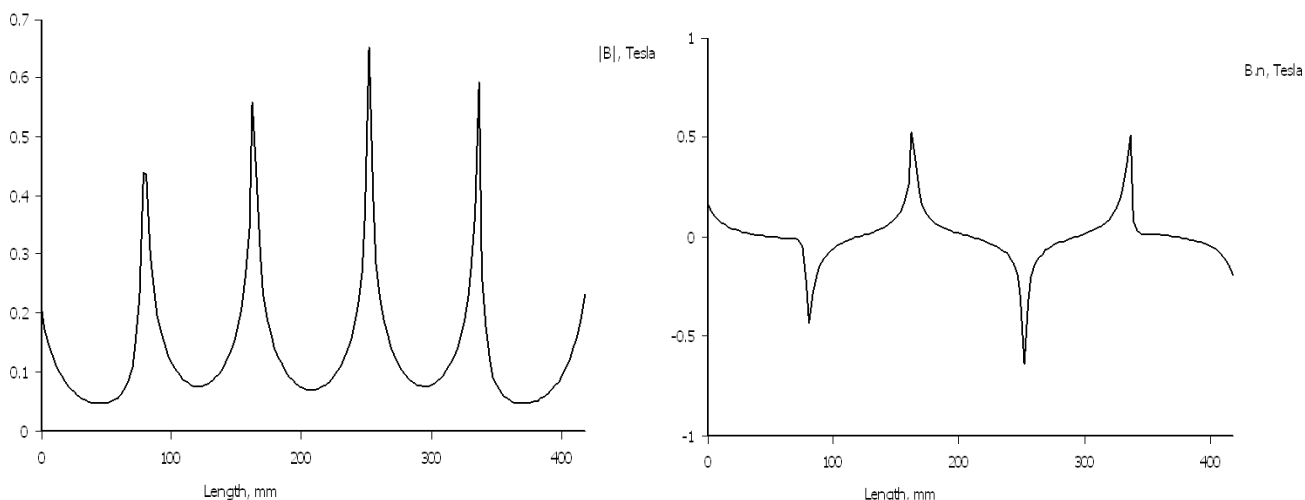
Magnetinio srauto tankio modulio ir normalinės magnetinio srauto tankio kreivės pateikiamos 4.46 (kai magnetai sudėti Halbacho eile).



4.44 pav. Magnetinės ANSM generatoriaus grandinės pjūvio vaizdas, kai magnetai sudėti Halbacho eile



4.45 pav. Magnetinio srauto tankio B stipris skirtingose magnetinės grandinės dalyse, kai magnetai sudėti Halbacho eile



4.46 pav. Magnetinio srauto tankio modulis $|B|$ ir normalinis magnetinio srauto tankis $B.n.$ oro tarpe, kai magnetai sudėti Halbacho eile

Maksimali magnetinio srauto tankis oro tarpe, kai magnetai sudėti Halbacho eile -0.53T

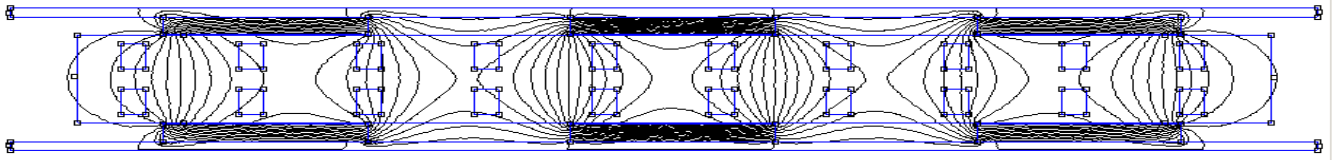
Iš magnetinės grandinės matoma, jog kai magnetai sudėti Halbacho eile, statoriuje magnetinio srauto tankio vertė yra apie 0.2 T.

4.2.10 Magnetinė grandinė, kai statoriuje naudojama epoksidinė derva, rotoriuje 1100 aliuminis, magnetai NdFeB 40MGOe, apvijos žingsnis padidintas 10 mm

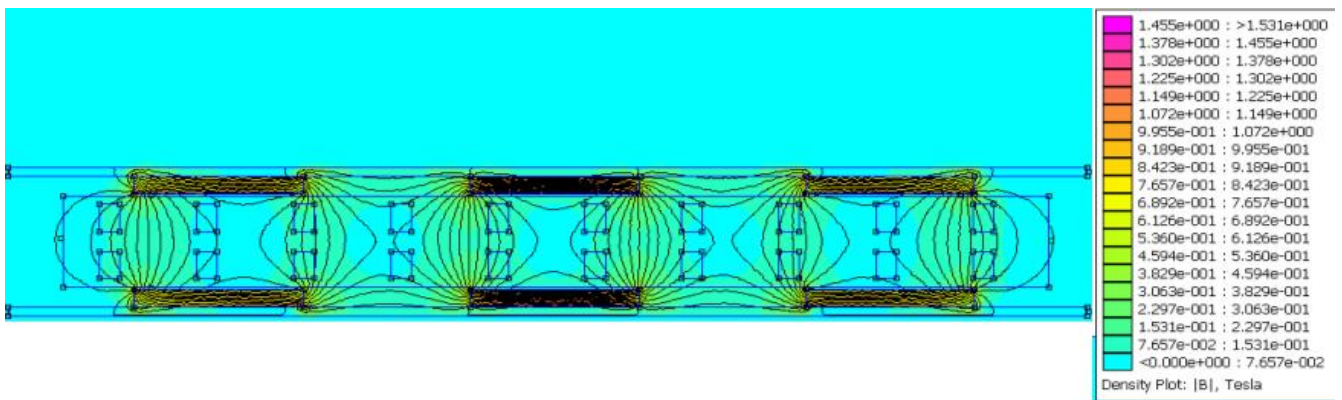
Magnetinės grandinės vaizdas, kai magnetai sudėti Halbacho eile, pateikiamas 4.47 paveiksle. Buvo naudojama 45° Halbacho eilė, kuri parodyta 2.16 pav. b)

Magnetinio srauto tankio stipris pateiktas paveiksle 4.48 (kai magnetai sudėti Halbacho eile).

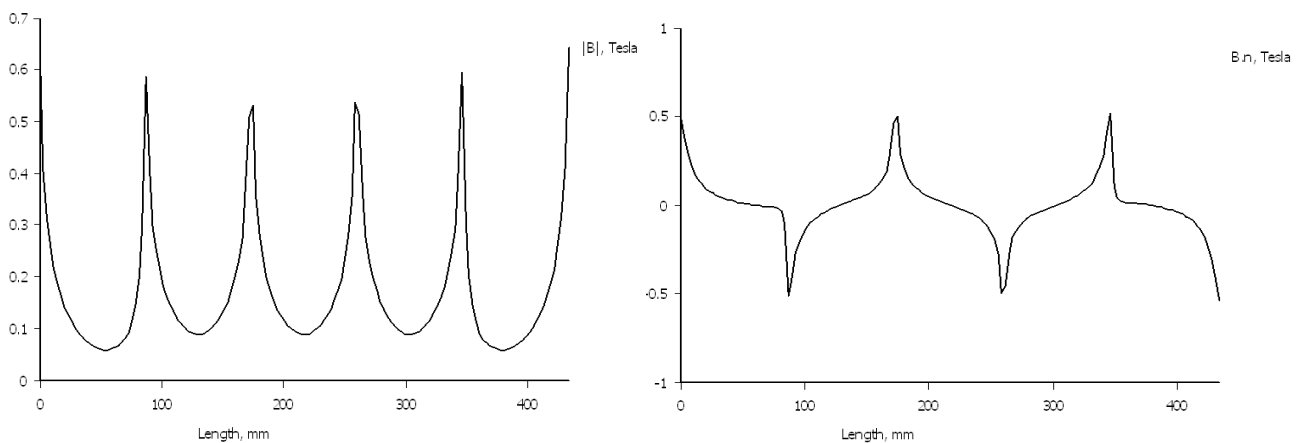
Magnetinio srauto tankio modulio ir normalinės magnetinio srauto tankio kreivės pateikiamos 4.49 (kai magnetai sudėti Halbacho eile).



4.47 pav. Magnetinės ASNM generatoriaus grandinės pjūvio vaizdas, kai magnetai sudėti Halbacho eile



4.48 pav. Magnetinio srauto tankio B stipris skirtingose magnetinės grandinės dalyse, kai magnetai sudėti Halbacho eile



4.49 pav. Magnetinio srauto tankio modulis $|B|$ ir normalinis magnetinio srauto tankis $B.n.$ oro tarpe, kai magnetai sudėti Halbacho eile

Maksimali magnetinio srauto tankis oro tarpe, kai magnetai sudėti Halbacho eile -0.5T

Iš magnetinės grandinės matoma, jog kai magnetai sudėti Halbacho eile, statoriuje magnetinio srauto tankio vertė yra apie 0.3 T.

4.3 Gautų rezultatų palyginamieji grafikai

Kiekvienu iš aukščiau paminėtų atvejų, modelyje buvo išmatuotos šios vertės:

- Magnetinio srauto tankis B_n pirmajame ir antrajame oro tarpuose;
- Magnetinio srauto Φ vertė pirmajame ir antrajame oro tarpuose;
- Pirmojo ir antrojo rotoriaus traukos jėga;
- Pirmojo ir antrojo rotoriaus sukimo momentas.

Buvo sudaryti palyginamieji grafikai: magnetinio srauto tankis B_n , magnetinio srauto Φ vertė, sukimo momentas ir traukos jėga, kai oro tarpas 1mm ir 2 mm, taip pat $M=f(\Phi)$ ir $M=f(B_n)$.

Skirtingų savybių mašinų magnetinio srauto vertės pirmajame oro tarpe pateiktos paveiksle 4.50.

Magnetinio srauto tankio vertės pirmajame oro tarpe-4.51 paveiksle.

Pirmojo rotoriaus traukos jėga-4.52 paveiksle.

Pirmojo rotoriaus sukimo momentas-4.53 paveiksle.

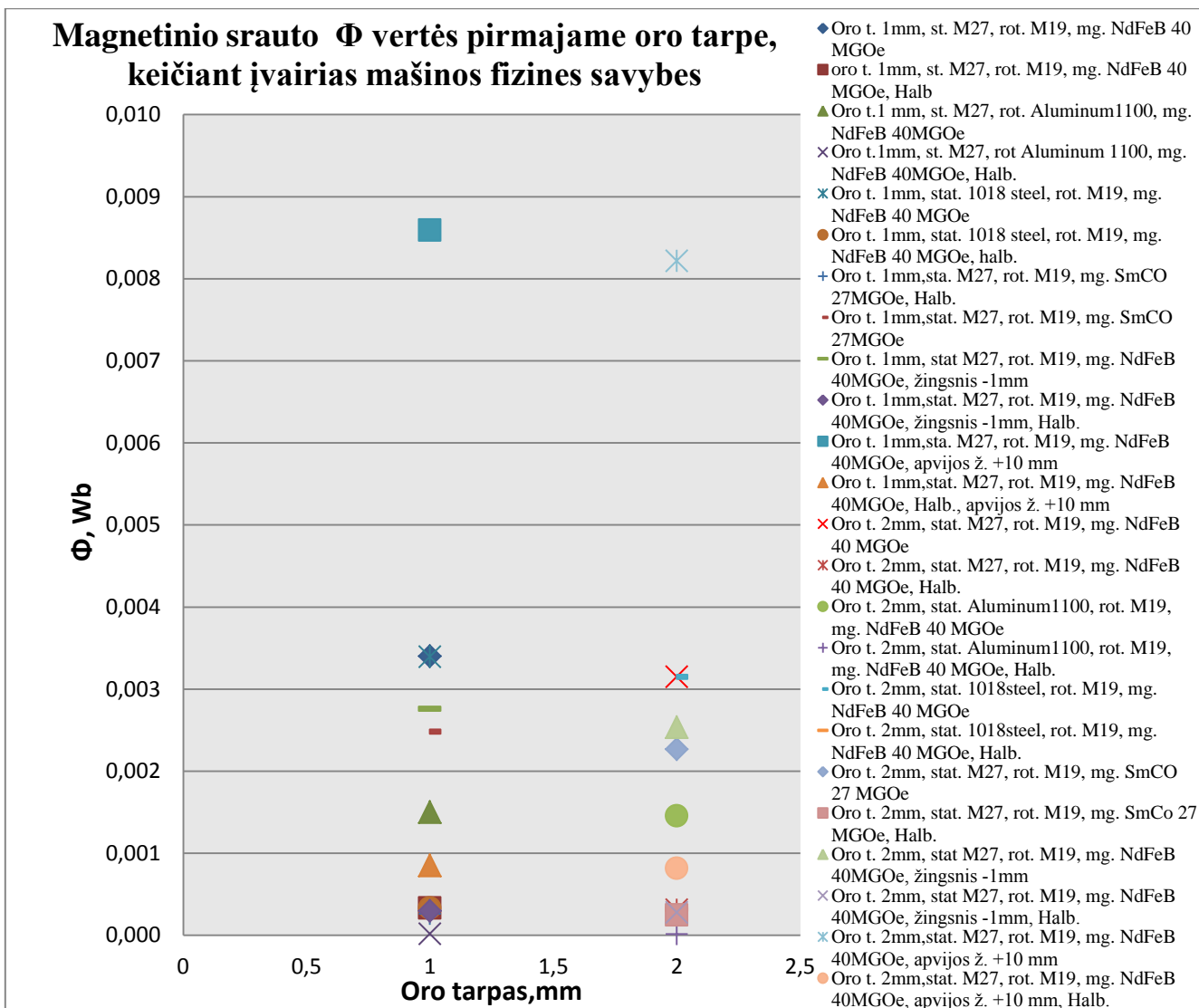
Pirmojo rotoriaus momento priklausomybė nuo magnetinio srauto tankio pirmajame oro tarpe $M=f(B_n)$ -4.54 paveiksle.

Pirmojo rotoriaus momento priklausomybė nuo srauto pirmajame oro tarpe $M=f(\Phi)$ -4.55 paveiksle.

Pirmojo rotoriaus $M=f(B_n)$, kai konstrukcija bešerdė-4.56 paveiksle.

Pirmojo rotoriaus $M=f(\Phi)$, kai konstrukcija bešerdė -4.57 paveiksle.

Pirmojo rotoriaus traukos jėga, kai konstrukcija bešerdė-4.58 paveiksle.



4.50 Skirtingų savybių mašinų magnetinio srauto vertės pirmajame oro tarpe

Iš grafiko 4.50 matyti, kad aukščiausia magnetinio srauto vertė tiek kai oro tarpas 1mm, tiek kai 2mm yra mašinos variante, kai statorius yra iš M27 plieno, rotoriai iš M19, naudojami NdFeB 40 MGOe magnetai, kurie sudėti įprastai, ir apvijos žingsnis yra padidintas 10 mm, lyginant su pirminiu apvijos žingsniu. Jis siekia 8.2-8.5 mWb.

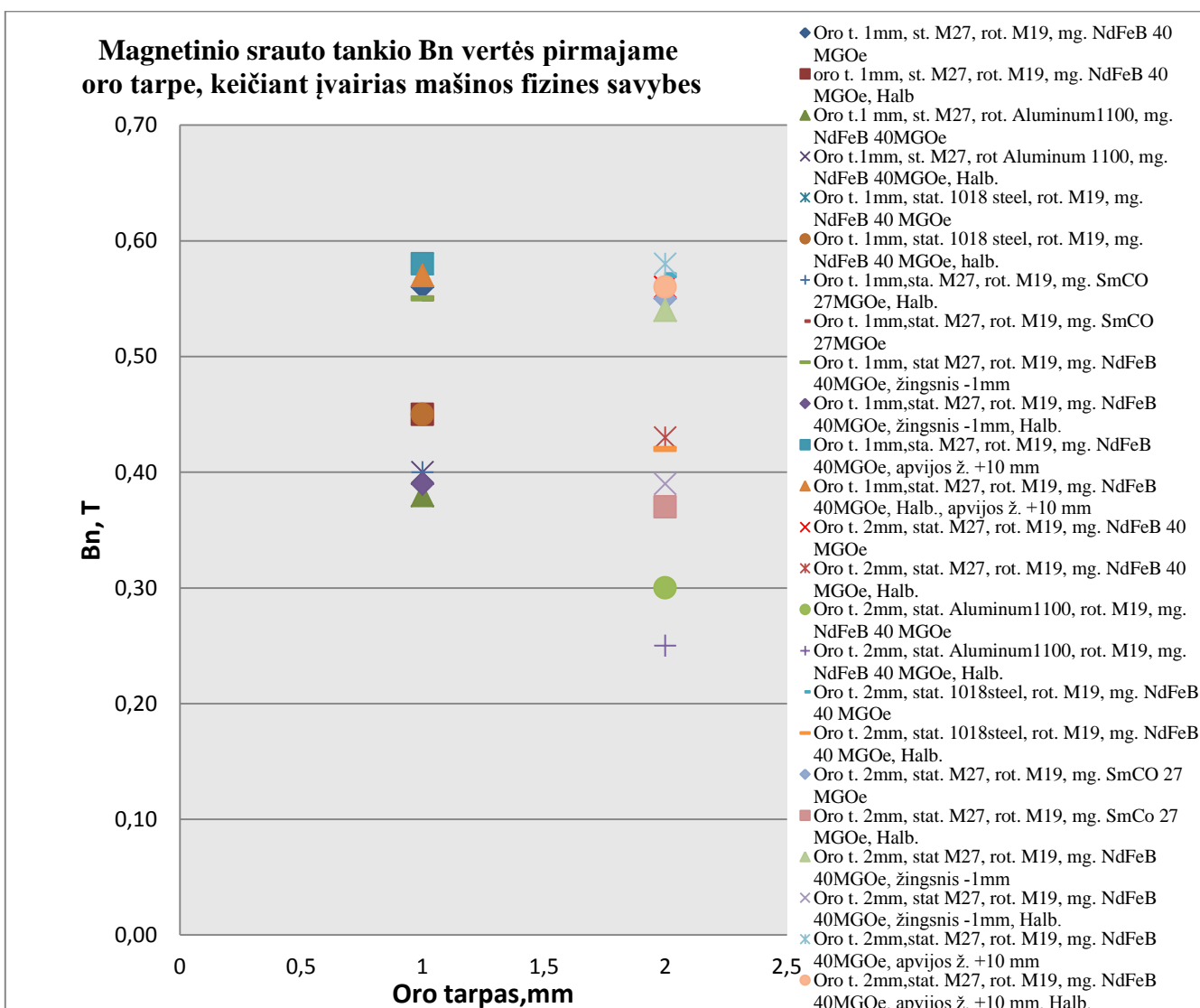
Jeigu lyginant su šios konstrukcijos variantu, kai magnetai sudėti į Halbacho eilę, čia srauto vertė mažesnė 10 kartų, t.y. siekia 0.81-0.85 mWb.

Mažiausia srauto vertė (siekia 0.014 mWb) tiek kai oro tarpas 1mm, tiek ir 2mm buvo gauta konstrukcijos variante, kai statorius pagamintas iš M27 plieno, rotoriai iš 1100 aliuminio, naudojami magnetai NdFeB 40MGOe, kurie sudėti į Halbacho eilę.

Lyginant su tuo pačiu variantu, tik kai magnetai sudėti ne į Halbacho eilę, o įprastai, magnetinio srauto vertė kai oro tarpas 1 ir 2 mm yra 1.4 mWb-100 kartų didesnė.

Jeigu konstrukcijai, kai statorius yra iš M27 plieno, rotoriai iš M19, bus naudojami SmCo magnetai, kai jie sudėti paprastai, srauto vertė bus apie 2.4 mWb (tam pačiam variante, tik kai naudojami neodimio magnetai, srauto vertė siekia 3.3 mWb).

Kai buvo sumažintas magneto žingsnis, nekeičiant jo tūrio, magnetinis srautas konstrukcijose su 1 ir 2 mm oro tarpais sumažėjo (su pirminiu magneto žingsniu 3.3 mWb, sumažinus 2.8 mWb).



4.51 Normalinės magnetinio srauto tankio vertės pirmajame oro tarpe

Padidinus apvijos žingsnį 10 mm, magnetinis srautas padidėjo. Nepadidinus buvo 3.2-3.3 mWb, padidinus-8.2-8.5 mWb.

Keičiant rotoriaus medžiagą iš M19 į aliuminį, srautas mažėjo (nuo 3.2-3.3 mWb iki 1.5 mWb).

Keičiant statoriaus medžiagą iš M27 į 1018 plieną, srauto vertės praktiškai nekito (3.2-3.3 mWb).

Iš grafiko 4.51 matyti, kad aukščiausia magnetinio srauto tankio vertė tiek kai oro tarpas 1mm, tiek kai 2mm yra mašinos variante, kai statorius yra iš M27 plieno, rotoriai iš M19, naudojami NdFeB 40 MGOe magnetai, kurie sudėti įprastai, ir apvijos žingsnis yra padidintas 10 mm, lyginant su pirminiu apvijos žingsniu. Ji siekia 0.57-0.58 T.

Jeigu lyginant su šios konstrukcijos variantu, kai magnetai sudėti į Halbacho eilę, čia srauto tankio vertė labai panaši, t.y. siekia 0.56-0.57 T.

Mažiausia vertė 0.38-0.4T kai oro tarpas 1mm, statorius pagamintas iš M27 plieno, rotoriai iš 1100 aliuminio, naudojami magnetai NdFeB 40MGOe, kurie sudėti tiek į Halbacho, tiek į paprastą eilę, kai oro tarpas 2mm, tame pačiame konstrukcijos variante, kai magnetai sudėti Halbacho eile, magnetinio srauto tankio vertė 0.25 T.

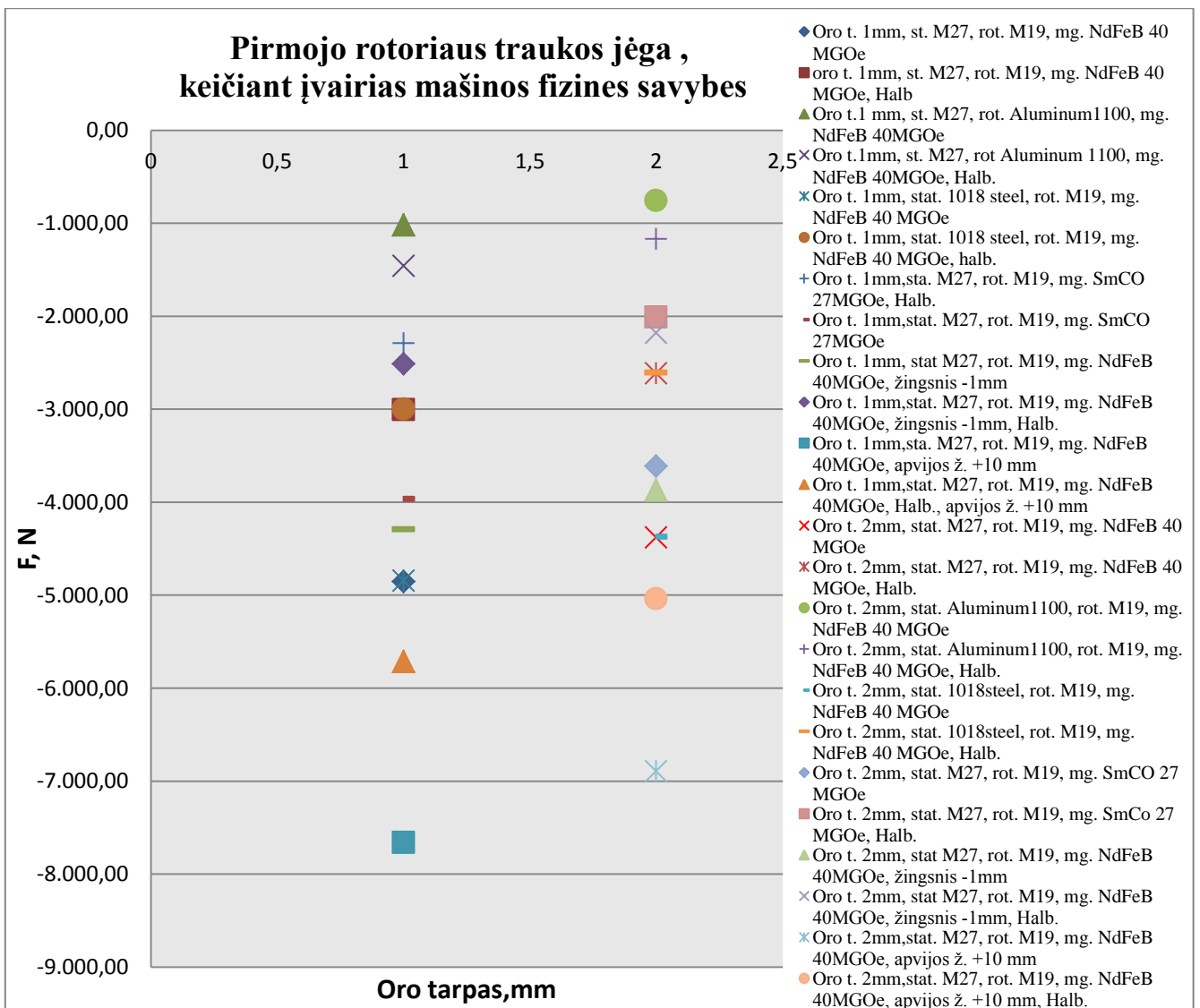
Jeigu konstrukcijai, kai statorius yra iš M27 plieno, rotoriai iš M19, bus naudojami SmCo magnetai, kai jie sudėti paprastai, srauto tankio vertė bus 0.55 T (tam pačiam variante, tik kai naudojami neodimio magnetai, srauto vertė taip pat 0.55T).

Kai buvo sumažintas magneto žingsnis, nekeičiant jo tūrio, magnetinis srauto tankis konstrukcijose su 1 ir 2 mm oro tarpais išliko panašus, kai magnetai sudėti įprastai (su pirminiu magneto žingsniu ir padidinus-0.55T), ir kai sudėti Halbacho eile (su pirminiu magneto žingsniu ir padidinus-0.39 T)

Padidinus apvijos žingsnį 10 mm, padidėjo nuo 0.55T iki 0.58T, kai magnetai sudėti įprastai, ir nuo 0.45 T iki 0.57 T, kai sudėti Halbacho eile.

Keičiant rotoriaus medžiagą iš M19 į aliuminį, magnetinis srauto tankis sumažėjo nuo 0.56T iki 0.38T.

Keičiant statoriaus medžiagą iš M27 į 1018 plieną, vertė šiek tiek padidėjo nuo 0.56T iki 0.58T.



4.52 Pirmojo rotoriaus traukos jėga

Iš grafiko 4.52 matyti, kad didžiausia traukos jėga tiek kai oro tarpas 1mm (-7658 N), tiek kai 2mm (-6891 N) yra mašinos variante, kai statorius yra iš M27 plieno, rotoriai iš M19, naudojami NdFeB 40 MGOe magnetai, kurie sudėti įprastai, ir apvijos žingsnis yra padidintas 10 mm

Jeigu lyginant su šios konstrukcijos variantu, kai magnetai sudėti į Halbacho eilę, traukos jėga yra mažesnė, kai magnetai yra Halbacho eilėje. Kai oro t. 1 mm- -5711 N, kai oro t. 2 mm -5036 N.

Mažiausia traukos jėga tiek kai oro tarpas 1 mm (-1017 N), tiek kai 2 mm (-755 N), yra, kai statorius pagamintas iš M27 plieno, rotoriai iš 1100 aliuminio, naudojami magnetai NdFeB 40MGOe, kurie sudėti į įprastą eilę,

Jeigu konstrukcijai, kai statorius yra iš M27 plieno, rotoriai iš M19, bus naudojami SmCo magnetai, kai jie sudėti paprastai, traukos jėga bus mažesnė (-3963 N, kai oro t. 1 mm, ir -3610 N, kai oro t. 2 mm), lyginant su konstrukcija, kur naudoti NdFeB magnetai (-4851 N, kai oro t. 1 mm ir -4378 N, kai oro t. 2 mm).

Kai buvo sumažintas magneto žingsnis, nekeičiant jo tūrio, traukos jėga konstrukcijose su 1 ir 2 mm oro tarpais sumažėjo. Su 1mm oro tarpu- nuo -4851 N iki -4290 N, su 2 mm oro tarpu nuo -4378 N iki -3870 N.

Padidinus apvijos žingsnį 10 mm, traukos jėga padidėjo nuo -4851 N iki -7658 N, kai oro tarpas 1 mm, ir nuo -4378 N iki -6891 N, kai oro tarpas 2 mm.

Keičiant rotorius medžiagą iš M19 į aliuminį, traukos jėga sumažėjo nuo -4851 N iki -1017 N, kai oro tarpas 1mm, ir nuo -4378 N iki -755 N, kai oro tarpas 2 mm.

Keičiant statoriaus medžiagą iš M27 į 1018 plieną, sukimo momentas išliko panašus.

Iš grafiko 4.53 matyti, kad didžiausias sukimo momentas tiek kai oro tarpas 1 mm (-29 Nm), tiek kai 2 mm (-26 Nm) yra mašinos variante, kai statorius yra iš M27 plieno, rotoriai iš M19, naudojami NdFeB 40 MGoe magnetai, kurie sudėti įprastai, ir apvijos žingsnis yra padidintas 10 mm, lyginant su pirminiu apvijos žingsniu.

Jeigu lyginant su šios konstrukcijos variantu, kai magnetai sudėti į Halbacho eilę, sukimo momentas yra mažesnis, kai magnetai yra Halbacho eilėje. Kai oro t. 1 mm- -21 Nm, kai oro t. 2 mm - -19 Nm.

Mažiausias sukimo momentas tiek kai oro tarpas 1 mm (-4 Nm), tiek kai 2 mm (-3 Nm), yra, kai statorius pagamintas iš M27 plieno, rotoriai iš 1100 aliuminio, naudojami magnetai NdFeB 40MGoe, kurie sudėti į įprastą eilę,

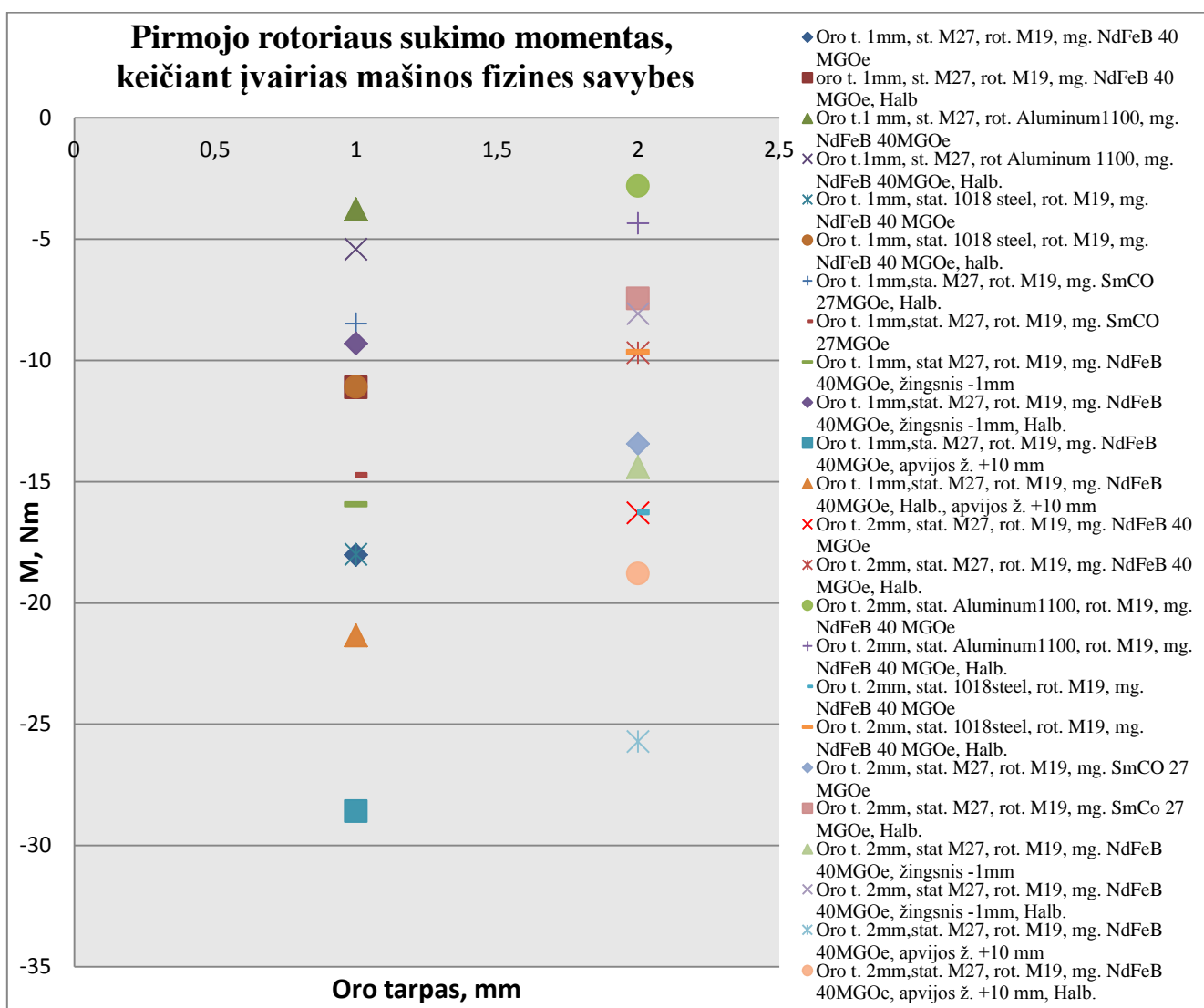
Jeigu konstrukcijai, kai statorius yra iš M27 plieno, rotoriai iš M19, bus naudojami SmCo magnetai, kai jie sudėti paprastai, sukimo momentas bus mažesnis (-15 Nm, kai oro t. 1 mm, ir -13 Nm, kai oro t. 2 mm), lyginant su konstrukcija, kur naudoti NdFeB magnetai (-18 Nm, kai oro t. 1 mm ir -16 Nm, kai oro t. 2 mm).

Kai buvo sumažintas magneto žingsnis, nekeičiant jo tūrio, sukimo momentas konstrukcijose su 1 ir 2 mm oro tarpais sumažėjo. Su 1 mm oro tarpu- nuo -18 Nm iki -16 Nm, su 2 mm oro tarpu nuo -16 Nm iki -14 Nm.

Padidinus apvijos žingsnį 10 mm, sukimo momentas padidėjo nuo -18 Nm iki -29 Nm, kai oro tarpas 1 mm, ir nuo -16 Nm iki -26 Nm, kai oro tarpas 2mm.

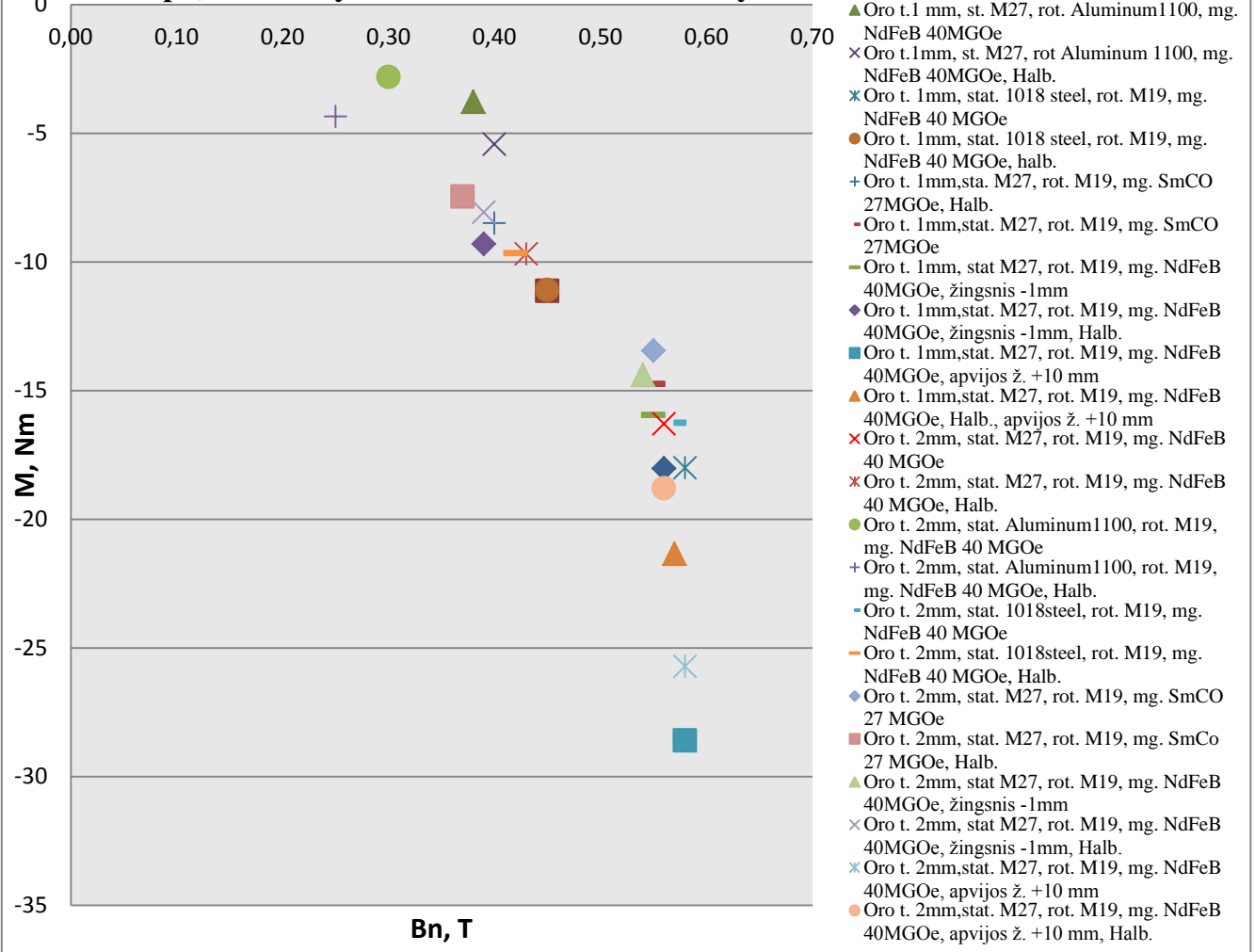
Keičiant rotoriaus medžiagą iš M19 į aliuminį, sukimo momentas sumažėjo nuo -18 Nm iki -4 Nm, kai oro tarpas 1 mm, ir nuo -16 Nm iki -3 Nm, kai oro tarpas 2 mm.

Keičiant statoriaus medžiagą iš M27 į 1018 plieną, sukimo momentas išliko panašus.



4.53 Pirmojo rotoriaus sukimo momentas

Pirmojo rotoriaus sukimo momento priklausomybė nuo magnetinio srauto tankio B_n vertės pirmajame oro tarpe, keičiant įvairias mašinos fizines savybes



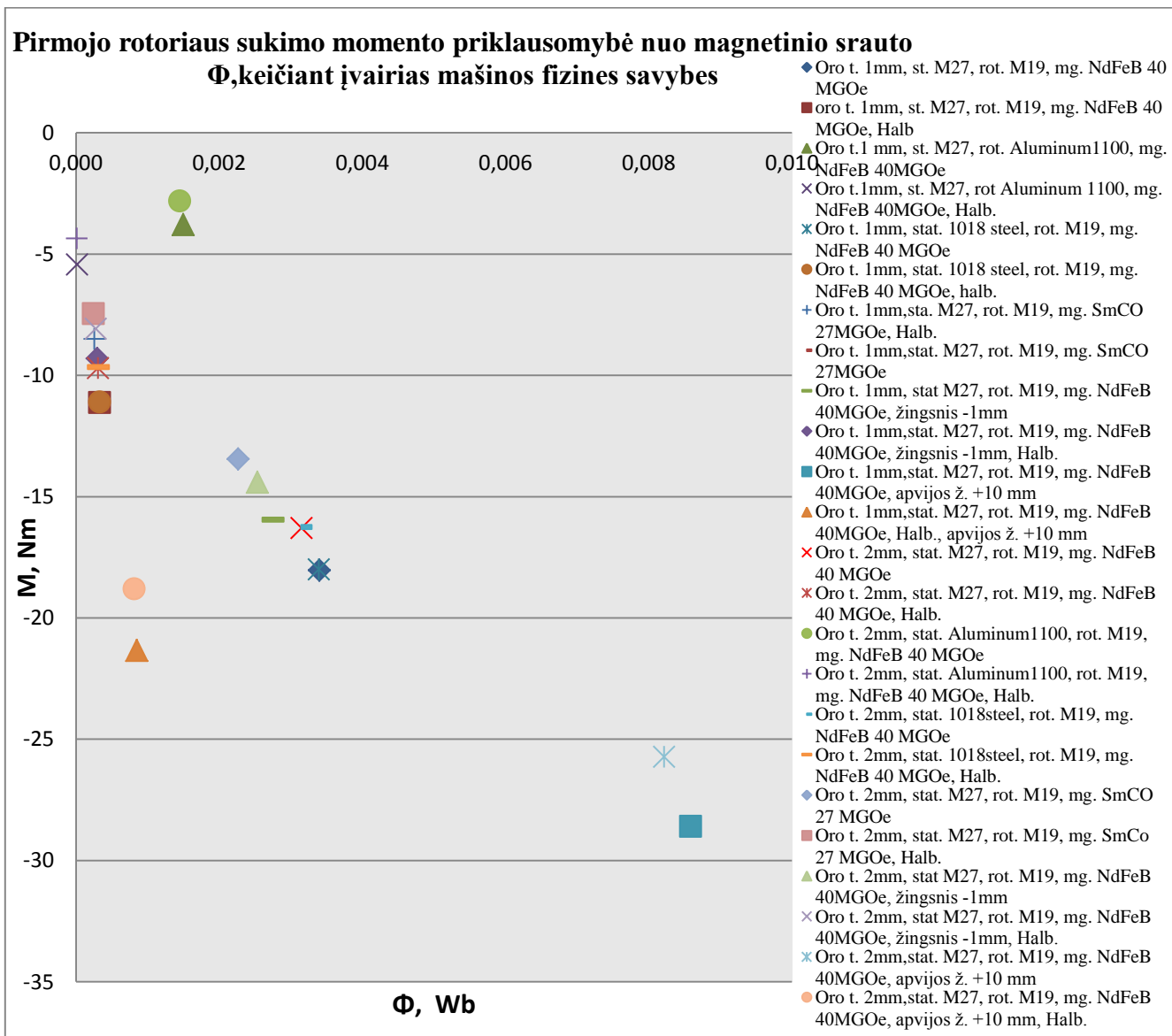
4.54 Pirmojo rotoriaus momento priklausomybė nuo normalinės magnetinio srauto tankio pirmajame oro tarpe $M=f(B_n)$

Iš grafiko 4.54 $M=f(B_n)$ matoma, jog aukščiausias magnetinio srauto tankis bus mašinoje, su 10 mm didintu apvijos žingsniu, nors ir pasipriešinimo momentas čia pats didžiausias. Toje pačioje mašinoje, kai oro tarpas 2 mm, magnetinio srauto tankio vertė labai panaši, tačiau momentas mažesnis.

Dar mažesnis momentas ir panaši srauto tankio vertė bus mašinoje, kai apvijos žingsnis didintas 10 mm, oro tarpas 1mm, tačiau magnetai sudėti Halbacho eile.

Bendrai galima teigti, jog, kaip matyti grafike, net 12 mašinų išgaunama panaši magnetinio srauto tankio vertė, tik skiriasi momentai (dėl to, jog skiriasi magnetiniai srautai).

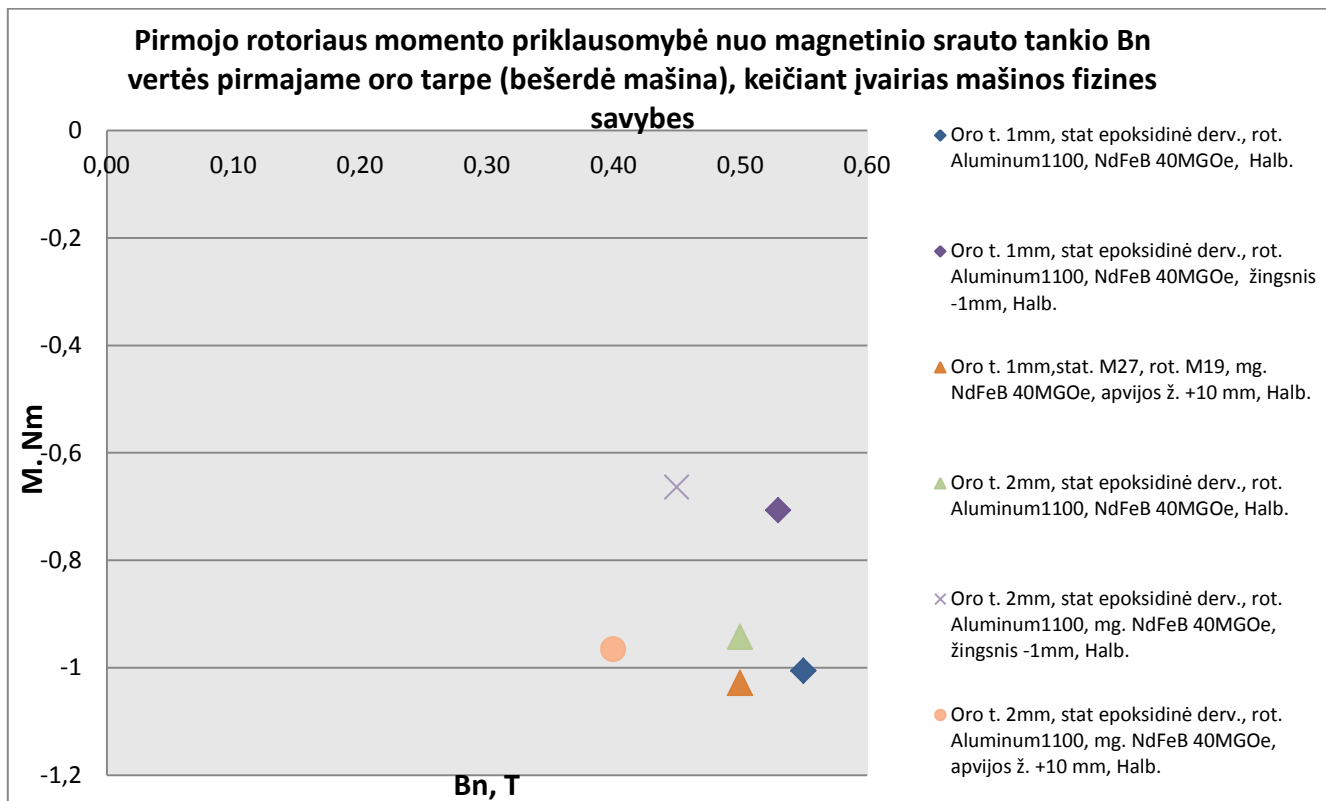
Mažiausia srauto tankio vertė bus mašinoje su aliuminio rotoriais, kai magnetai sudėti Halbacho eile, nors pasipriešinimo momentas tokioje konstrukcijoje nėra pats mažiausias. Mažiausias momentas bus mašinoje su aliuminio rotoriais, kai magnetai sudėti įprasta eile.



4.55 Pirmojo rotoriaus momento priklausomybė nuo magnetinio srauto pirmajame oro tarpe $M=f(\Phi)$

Iš 4.55 grafiko $M=f(\Phi)$ galima teigti, jog aukščiausia magnetinio srauto vertė bus konstrukcijoje, kai apvijos žingsnis didintas 10 mm, oro tarpas 2 mm, ir magnetai sudėti įprastai. Toje pačioje mašinoje, tik su 2mm oro tarpu, bus gaunama panaši magnetinio srauto vertė, tačiau su mažesniu momentu.

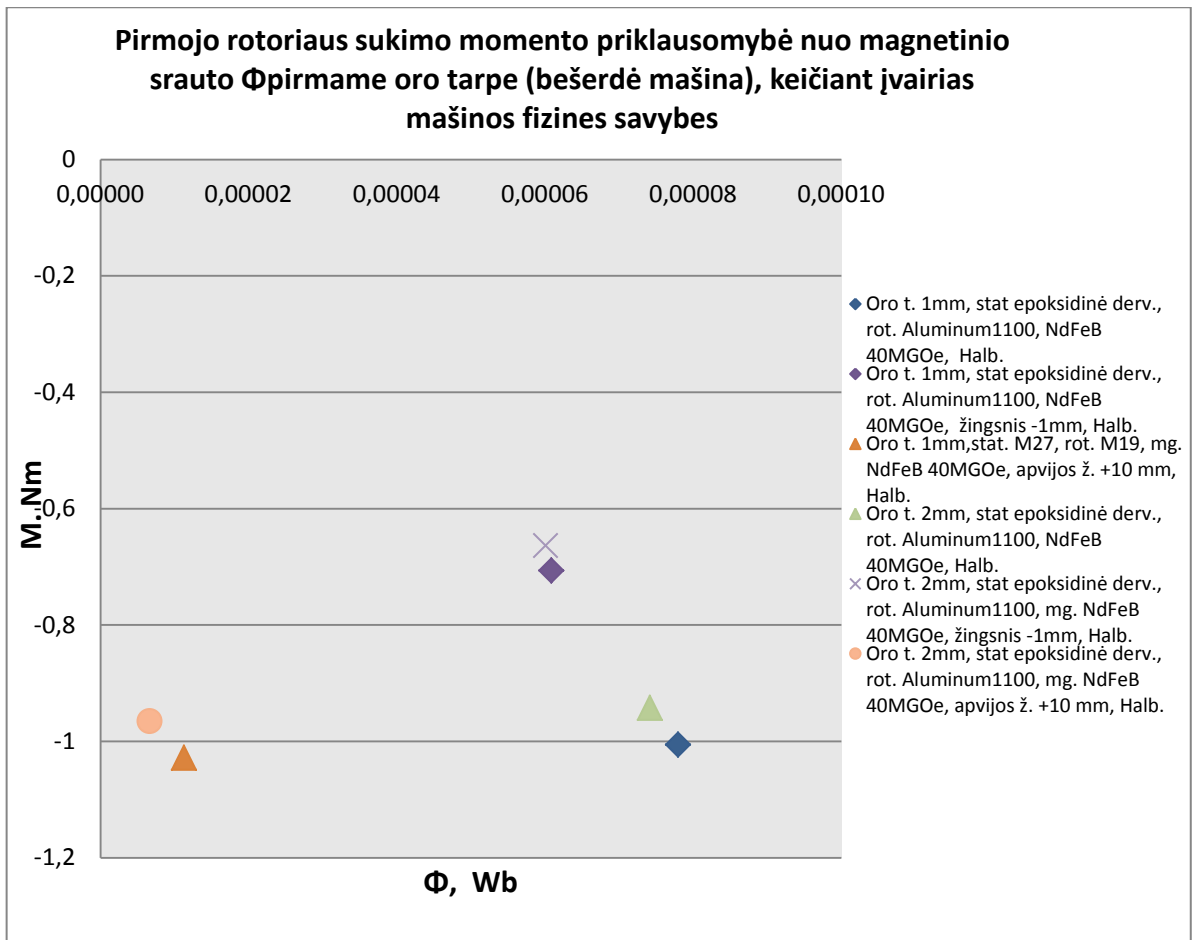
Mažiausia srauto vertė bus mašinoje, kai statorius M27, rotorius iš aliuminio, magnetai NdFeB, sudėti į Halbacho eilę. Srautas panašus tiek su 1 mm oro tarpu, tiek su 2 mm, tik su 2 mm momentas šiek tiek mažesnis.



4.56 Pirmojo rotoriaus momento priklausomybė nuo normalinės magnetinio srauto tankio pirmajame oro tarpe $M=f(B_n)$, kai konstrukcija bešerdė

Paveiksle 4.56 pavaizduotas grafikas, kai mašina yra bešerdė. Tokiu atveju, aukščiausias magnetinio srauto tankis (0,55 T) bus , kai statorius iš epoksidinės dervos, rotoriai iš 1100 aliuminio, magnetai NdFeB 40 MGOe, sudėti į Halbacho eilę. Žemiausia vertė (0,4 T), kai oro tarpas 2mm, apvijos žingsnis 10 mm padidintas, statorius iš epoksidinės dervos, rotoriai 1100 aliuminio, apvijo magnetai NdFeB 40MGOe, ir jie sudėti į Halbacho eilę.

Galima pastebėti, kad bešerdėje konstrukcijoje momento vertės daug mažesnės, nei mašinose, turinčiose feromagnetinių dalių. Žemiausia vertė (-0,66 Nm), kai magneto žingsnis sumažintas 1mm, didžiausias (-1,03 Nm), kai apvijos žingsnis padidintas 10 mm.



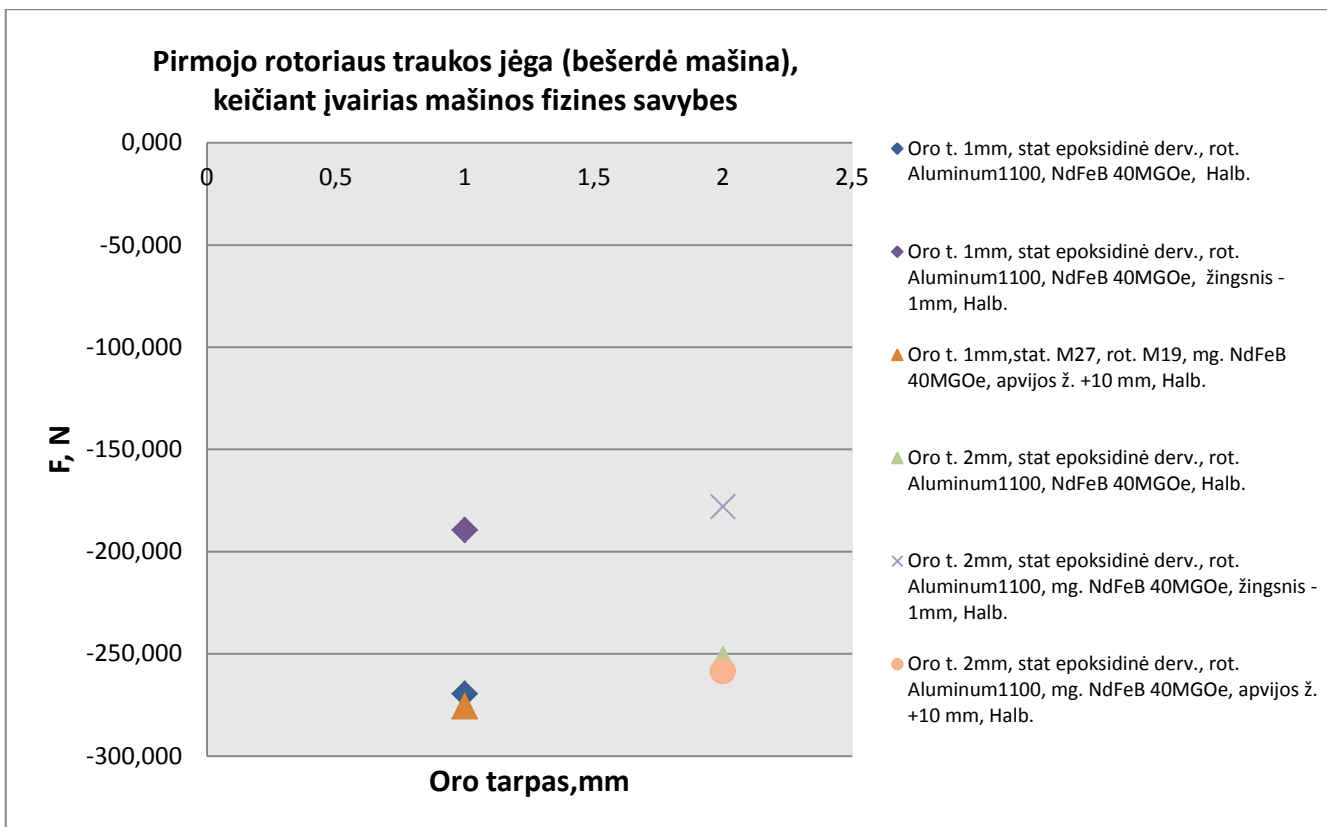
4.57 Pirmojo rotoriaus momento priklausomybė nuo magnetinio srauto pirmajame oro tarpe $M=f(\Phi)$, kai konstrukcija bešerdė

Paveiksle 4.57 pavaizduotas grafikas, kai mašina yra bešerdė. Tokiu atveju, aukščiausia magnetinio srauto vertė (0,08 mWb) bus, kai statorius iš epoksidinės dervos, rotoriai iš 1100 aliuminio, magnetai NdFeB 40 MGOe, sudėti į Halbacho eilę. Čia momento vertė -1 Nm.

Žemiausia srauto vertė (0,006 mWb), kai oro tarpas 2mm, apvijos žingsnis padidintas 10 mm, statorius iš epoksidinės dervos, rotoriai 1100 aliuminio, magnetai NdFeB 40MGOe, ir jie sudėti į Halbacho eilę. Čia momento vertė $-0,97$ Nm.

Paveiksle 4.58 matyti, jog bešerdėje konstrukcijoje maksimali traukos jėga (-275 N) bus beveik 28 kartus mažesnė, nei konstrukcijoje, turinčioje feromagnetinių dalių (-7658 N).

Didžiausia traukos jėga bus konstrukcijoje, kai apvijos žingsnis padidintas 10 mm, mažiausiai magnetų žingsnis sumažintas 2mm (-178 N).



4.58 Pirmojo rotoriaus traukos jėga, kai konstrukcija bešerdė

Apibendrinant galima teigti, kad naudojant Halbacho eilę, gaunamos labai mažos srauto vertės. Taip gali būti dėl to, kad generatorius buvo projektuotas kaip konstrukcijai su feromagnetinėmis medžiagomis su grioveliais, o modeliavimui tai pačiai konstrukcijai buvo tiesiog panaudotos neferomagnetinės medžiagos ir panaikinti statoriaus grioveliai.

Kai medžiagos feromagnetinės, šiuo atveju optimaliausia konstrukcija buvo, kai didinau apvijos žingsnį. Taip galima teigti, jog apvijos žingsnis šiuo atveju galėjo būti suprojektuotas šiek tiek per mažas magnetinio srauto tankio ir magnetinio srauto atžvilgiu, tačiau padidinus šį žingsnį, traukos jėga gaunama labai didelė.

IŠVADOS

1. Baigiamajame magistro darbe buvo išanalizuotas ašinio magnetinio srauto nuolatinių magnetų generatorius. Nustatyta, jog mašina gali būti naudojama ir kaip variklis, ir kaip generatorius. Naudojamos kaip varikliai: elektromobiliams, siurbliams, vožtuvų valdymui, centrifugoms, ventiliatoriams, robototechnikai bei įvairiose pramonės srityse. Kaip generatoriai naudojamos vėjo elektrinėse, portabiliuose generatoriuose, transporto technikoje.
2. Sudarytos ir ištirtos magnetinės grandinės parametų priklausomybės nuo generatoriaus konstrukcijos parametų. Buvo keistos statoriaus, rotoriaus, magnetų medžiagos, apvijos, magnetų žingsnis. Modeliavimas buvo atliktas kai oro tarpas 1mm ir 2mm. Nustatyta, kad Halbacho eilė konstrukcijai su feromagnetine šerdimi neefektyvi, nes magnetinis srauto tankis ir srautas gaunami mažesni, nei konstrukcijoje su įprastai sudėtais magnetais, nors momentas ir traukos jėga taip pat sumažėja.
3. Gauta, jog kai apvijos žingsnis padidintas nuo 0,091m iki 0,101m ir konstrukcija yra su feromagnetinėmis dalimis, gaunamos aukščiausios srauto tankio ir srauto vertės:
 - Aukščiausias magnetinio srauto tankis-0,58 T
 - Aukščiausia srauto vertė- 8,5 mWbVis dėlto, čia ir momentas bei traukos jėga bus didžiausi. Momentas-29 Nm, traukos jėga -7658N.
Keičiant magneto žingsnį, indukcijos, srauto, momento ir traukos jėgos keitėsi nežymiai.
4. Nustatyta, jog kai statorius feromagnetinis, naudoti rotorius iš aliuminio neefektyvu. Nors ir traukos jėga sumažėja iki -755 N , o momentas iki -3 Nm, taip pat labai sumažėja magnetinio srauto tankis ir srautas. Magnetinis srauto tankis iki 0,38 T, o srautas iki 0,014 mWb. Kai konstrukcija bešerdė ir magnetai sudėti į Halbacho eilę, labai sumažėja traukos jėga (iki -275N) ir momentas (iki -1,03 Nm- -0,66 Nm), nors magnetinio srauto tankis išlieka panaši (0,4-0,55T). Vis dėlto, labai sumažėja ir srautas (0,006 mWb-0,08 mWb).
5. Generatoriaus konstrukcija yra perspektyvi, su geromis aušinimo savybėmis, dideliu momentu bei prilygsta ar net pralenkia įprastinių konstrukcijų generatorius, ypatingai jei lyginsime tos pačios masės ar tūrio AFPM ir RFPM mašinas jų išgaunamų galių atžvilgiu. Optimizuojant siūloma naudoti bešerdę konstrukciją, tačiau apvijas klojant vienu sluoksniu, ne dviem. Taip pat feromagnetinėje konstrukcijoje siūloma magnetus dėti į kitą įprastinę eilę, parodytą 2.11 pav. Dabar buvo sudėta, kaip aprašyta šaltinyje [38].

Literatūros sąrašas

1. Markham A. 2012. [interaktyvus]. [žiūrėta 2013 m. gegužės 10 d.] The Differences Between a Vertical Wind Turbine and a Horizontal Wind Turbine. Prieiga per Internetą: <<http://ezinearticles.com/?The-Differences-Between-a-Vertical-Wind-Turbine-and-a-Horizontal-Wind-Turbine&id=4023096>>
2. Gieras, J.,F., Wang, R.,J, Kamper, M., J. 2004. Axial flux permanent magnet brushless machines. Netherlands:Kluwer academic publishers, 340p.
3. Horizon Wind Energy LLC., 2011. Horizon Wind Energy LLC. [Interaktyvus] [Žiūrėta 2013m. balandžio 12d.] Prieiga per Internetą: <<http://www.horizonwind.com/about/ftkc/howdoeswindturbinework.aspx>>
4. Gapinski., J. 2013. Horizontal Vs. Vertical Wind Turbines. [Interaktyvus] [Žiūrėta 2014m. balandžio 23d.] Prieiga per Internetą: http://www.ehow.com/facts_5775671_horizontal-vs_-vertical-wind-turbines.html
5. Lampola, P. 2000 Directly Driven, Low-Speed Permanent-Magnet Generators for Wind Power Applications. Finland:Helsinki university of technology, 62p.
6. Manwell,J., F., McGowan, J., G., Rogers. 2009. Wind energy explained:theory, design and application. United kingdom:John Wiley & Sons, 689 p.
7. Spooner, E., Williamson, A.C. 1996. Direct-Coupled, Permanent-Magnet Generators for Wind Turbine Applications. IEE Proceedings, Electric Power Applications, 1996, Vol._143, No._1, p 1–8.
8. Ahmed, D., Ahmad, A. 2013. An optimal design of coreless direct-drive axial flux permanent magnet generator for wind turbine. 6th Vacuum and Surface Sciences Conference of Asia and Australia
9. Bumby, JR. 1983 .Superconducting rotating electrical machines., CLARENDON PRESS, OXFORD
10. Martin, Richard. 2007. Axial flux permanent magnet machines for direct drive applications, Durham theses, Durham University. Available at Durham E-Theses Online: <http://etheses.dur.ac.uk/2567/>
11. Campbell, P. 1974. Principles of a permanent magnet axial field DC machine, PROC. IEE, Vol. 121, No. 12, , pp. 1489-1494
12. Rossouw, F., G. 2009. Analysis and design of axial flux permanent magnet wind generator system for direct battery charging applications: master thesis. Matieland, South Africa

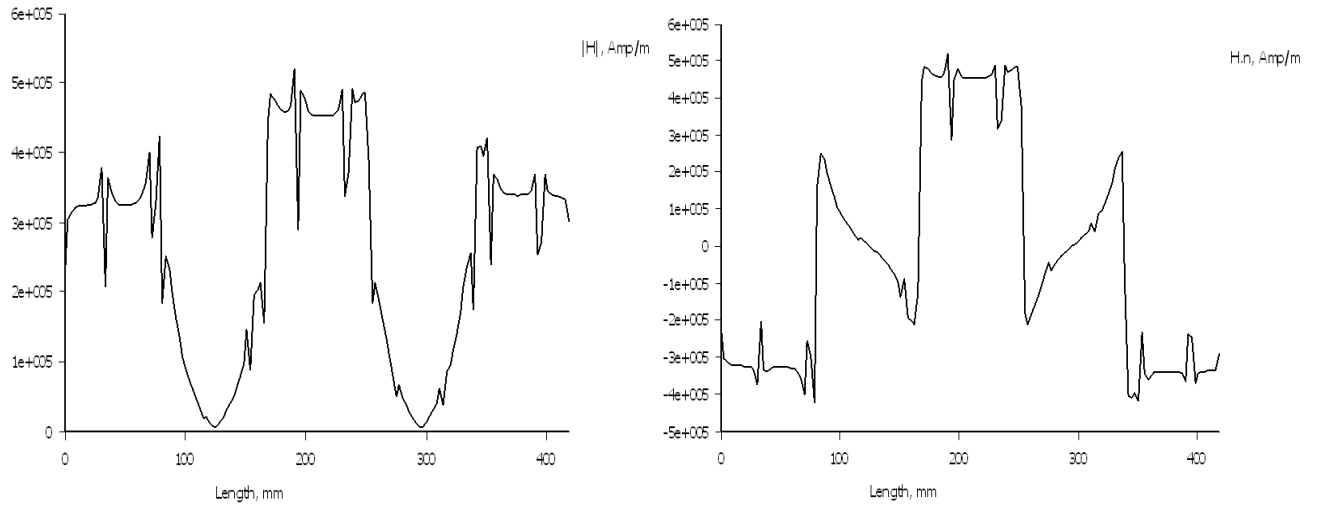
13. Mondragon university. 2013. Design of electric machines : Axial flux machines. Electric energy magazine No. 4. Spain
14. Leung, WS and Chan, JCC. 1980. A new design approach for axial-field electrical machines, IEEE TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS, Vol. PAS-99, No.4, pp. 1679-1685
15. Cavagnino, A, Lazzari, M, Profumo, F, and Tenconi, A. 2002 A comparison between the axial flux and the radial flux structures for PM synchronous motors, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, Vol. 38, No.6, , pp. 1517-1524
16. Brown, NL, Haydock, L, and Bumby, JR. 2002. An idealised approach to electromagnetically comparing axial and radial flux permanent magnet machines, PROC. INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES, BRUGGE, BELGIUM
17. Hakala H. 2000. Integration of motor and hoisting machine changes the elevator business, Int. Conf. on Electr. Machines ICEM'2000, Vol 3, Espoo, Finland, pp.1242 1245.
18. Klug L., Guba, R. 1992. Disc rotor a.c. servo motor drive, Electr. Drives and Power Electronics Symp. EDPE'92, KoSice, Slovakia, pp.341-344.
19. Hrabovcovd V., and Brslica v. 1990. Disk synchronous machines with permanent magnets - electric and thermal equivalent circuits, Electr. Drives S1nnp., Capri, Italy, pp. 163-169.
20. Klug L. 1990. 'Axial field a.c. servomotor," Electr. Drives and Power Electronics Symp. EDPE'90, Kosice, Slovakia, pp. 154-159
21. Gair S., Eastham J.F., Profumo F. 1995. Permanent magnet brushless d.c. drives for electric vehicles, Int. Aeagean Conf. on Electr. Machines and Power Electronics ACEMP'95, Kugadasi, Turkey, pp. 638-643.
22. Lukaniszyn M., Wrobel R., Mendrela A., and Drzewoski R. 2000. Towards optimisation of the disc-fype brushless d.c. motor by changing the stator core structure, Int. Conf. on Electr. Machines ICEM'2000, Vol. 3, Espoo, Finland, pp. 1357 1360.
23. Spooner E., Chalmers B., El-Missiry M.M. 1990. A compact brushless d.c. machine, Electr. Drives Symp. EDS'90, Capri, Italy, pp. 239 243.
24. Zhang Z., Profumo F., Tenconi A. 1994. Axial flux interior PM synchronous motors for electric vehicle drives, Symp. on Power Electronics, Electr. Drives, Advanced Electr. Motors SPEEDAM'94, Taormina, Italy, pp. 323-328.
25. Wang R., Kamper M.J. 2002. Evaluation of eddy current losses in axial flux permanent magnet (AFPM) machine with an ironless stator, IEEE 37th IAS Meeting, Pittsburgh, PA, U.S.A.

26. Gieras J.F., Gieras I.A. 2002. Performance analysis of a coreless permanent magnet brushless motor, IEEE 37th IAS Meeting, Pittsburgh, PA, U.S.A.
27. Kessinger R.L., Robinson S. 1997. SEMA-based permanent magnet motors for high-torque, high-performance, Naval Symp. on Electr. Machines, Newport, RI, U.S.A . pp. 151 -155
28. Kessinger R. L., Stahura P.A., Receveur P. E., Dockstader K. D. 1998. Interlocking segmented coil array. U.S. Patent No. 5,744,896.
29. Ramsden V.S., Mecrow S.C., and Lovatt H.C. 1997. Design of an in wheel motor for a solar-powered electric vehicle, Proc. of EMD'91 ,pp. 192-191
30. Z. Zhu. 2007. Recent development of halbach permanent magnet machines and applications, in Power Conversion Conference, (PCC'07), pp. K-9-K-16.
31. O. Winter, S. Ucsnik, M. Rudolph, C. Kral, E. Schmidt. 2012. Ironless in wheel hub motor design by using multi-domain finite element analyses, in International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, (SPEEDAM'12)
32. Winter O., Kral C., Schmidt E. 2012. Design study of magnet shapes for axial Halbach arrays using 3D Finite Element Analyses, IEEE Electrical Machines (ICEM), 2012 XXth International Conference, Marseille, France, pp. 2660 – 2665
33. Thompson, Marc T. 2009. Practical Issues in the Use of NdFeB Permanent Magnets in Maglev, Motors, Bearings and Eddy Current Brakes, Proceedings of the IEEE Volume:97 , Issue: 11, pp. 1758 – 1767
34. Spooner E., Chalmers B. J. 1992. TORUS: a slotless, toroidal-stator, permanent-magnet generator, Proc. of IEE, Pt. B EPA Vol. 139, pp.497 -506.
35. Caricchi F., Crescimbeni F., Honorati O., Lo Bianco G., Santini E. 1997. PERFORMANCE OF CORELESS-WINDING AXIAL-FLUX PERMANENT-MAGNET GENERATOR WITH POWER OUTPUT AT 400 Hz - 3000 rev/min, Industry Applications Conference, 1997. Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS '97., Conference Record of the 1997 IEEE pp. 61 - 66 vol. 1
36. Weglinski, B. 1990. Soft magnetic powder composites dielectromagnetics and magnetodielectrics, Reviews on Powder Metallurgy and Physical Ceramics," Vol. 4, No. 2, Freund Publ. House Ltd., London, UK.
37. Magcraft. 2007. Permanent magnet selection and design handbook. Vienna, VA, U.S.A
38. Virtič P., Pišek P., Marčič T., Hadžiselimovič M., Štumberger B. 2008. Analytical Analysis of Magnetic Field and Back Electromotive Force Calculation of an Axial-Flux Permanent Magnet

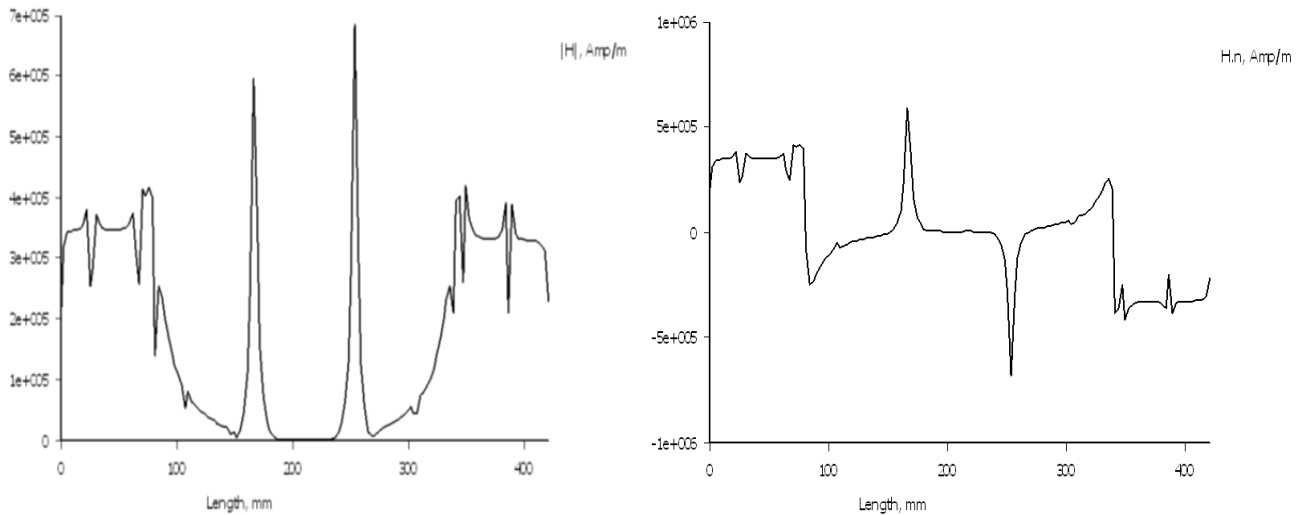
Synchronous Generator With Coreless Stator, IEEE Transactions on magnetics, vol. 44, NO. 11,
November 2008 pp. 4333 - 4336

PRIEDAI

$|H|$ ir $H.n$ kreivės, kai statoriuje naudojamas M-27, rotoriuje M-19, magnetai NdFeB 40MGOe

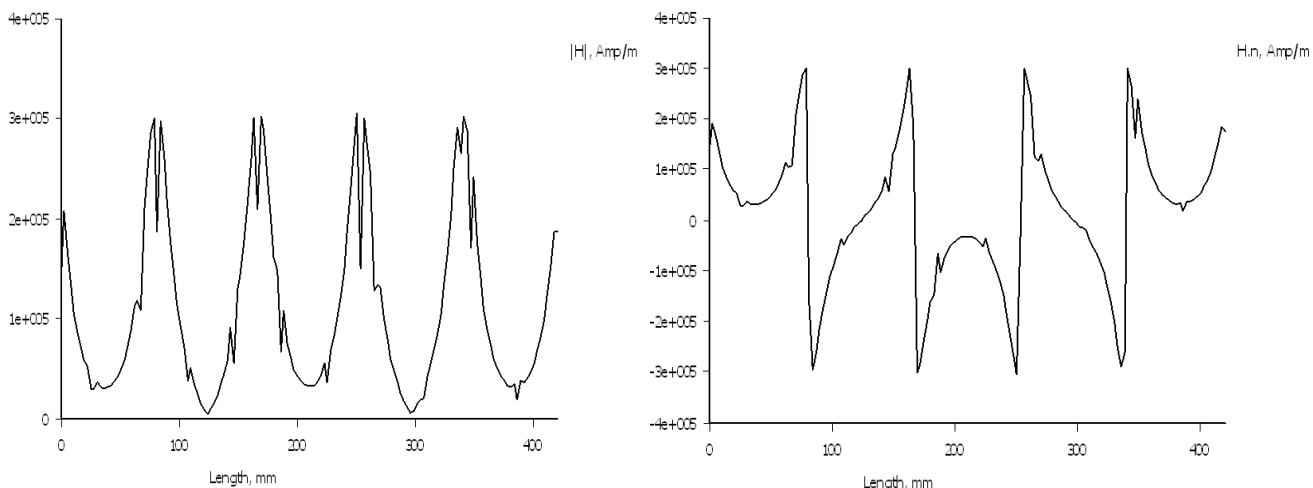


5.1 pav. $|H|$ ir $H.n$ – Magnetinio lauko stiprio modulis išilgai analizuojamo kontūro ir statmeni analizuojamos linijos, kai magnetai sudėti įprastai

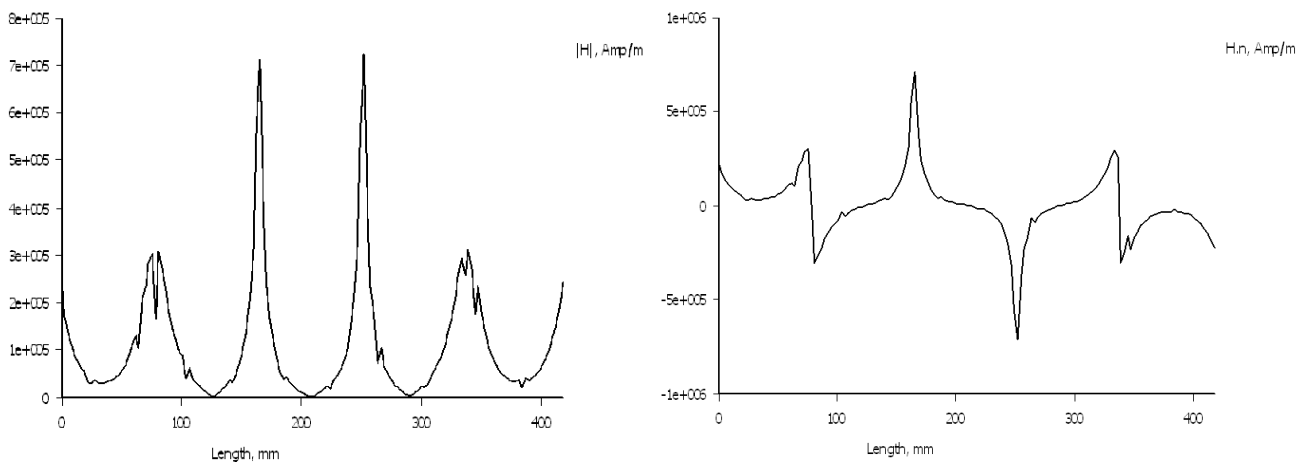


5.2 pav. $|H|$ ir $H.n$ – Magnetinio lauko stiprio modulis išilgai analizuojamo kontūro ir statmeni analizuojamos linijos, kai magnetai sudėti į Halbacho eilę

***|H| ir H.n kreivės, kai statoriuje naudojamas M-27, rotoriuje Aluminum 1100,
magnetai NdFeB 40MGOe***

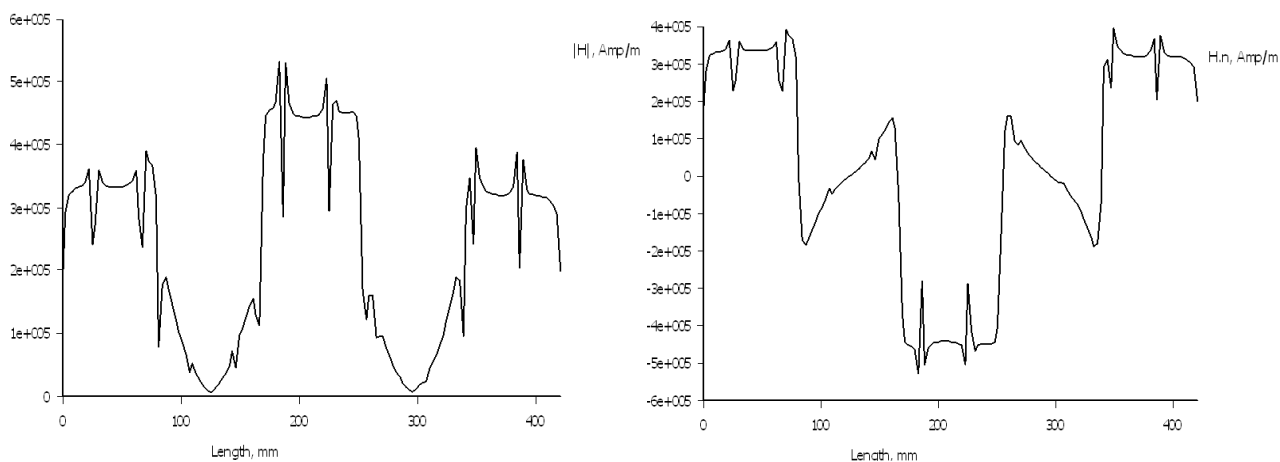


5.3 pav. $|H|$ ir $H.n$ – Magnetinio lauko stiprio modulis išilgai analizuojamo kontūro ir statmenai analizuojamos linijos, kai magnetai sudėti įprastai

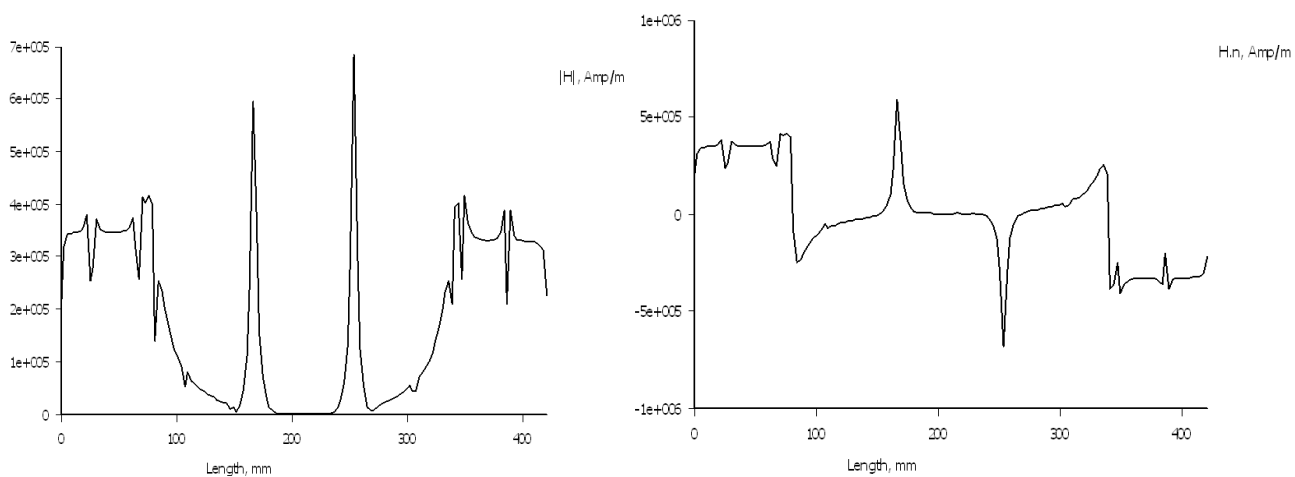


5.4 pav. $|H|$ ir $H.n$ – Magnetinio lauko stiprio modulis išilgai analizuojamo kontūro ir statmenai analizuojamos linijos, kai magnetai sudėti į Halbacho eilę

$|H|$ ir $H.n$ kreivės, kai statoriuje naudojamas 1018 plienas, rotoriuje M19, magnetai NdFeB 40MGOe

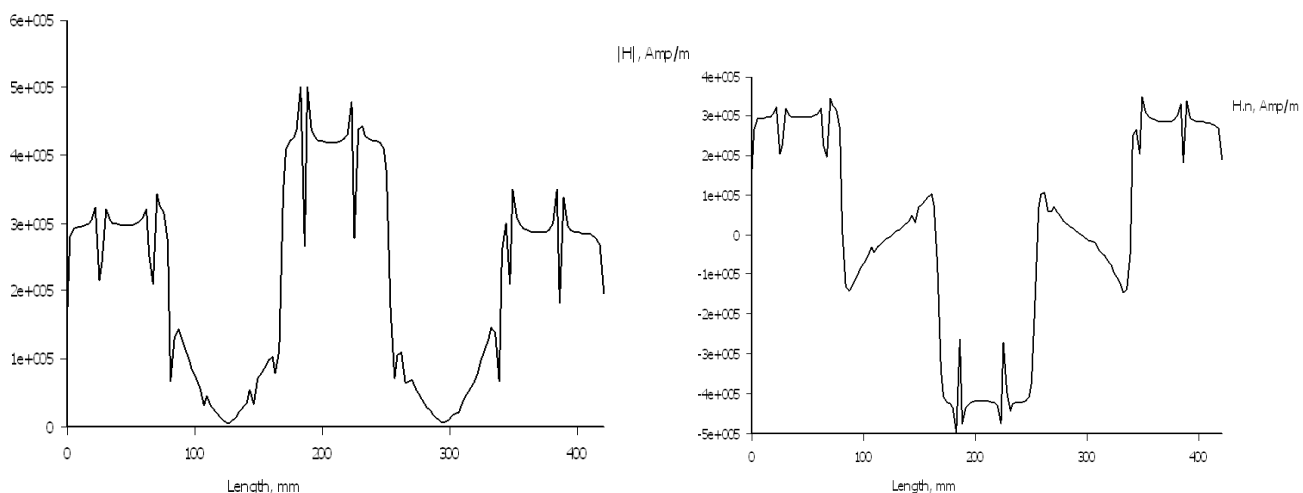


5.5 pav. $|H|$ ir $H.n$ – Magnetinio lauko stiprio modulis išilgai analizuojamo kontūro ir statmenai analizuojamos linijos, kai magnetai sudėti įprastai

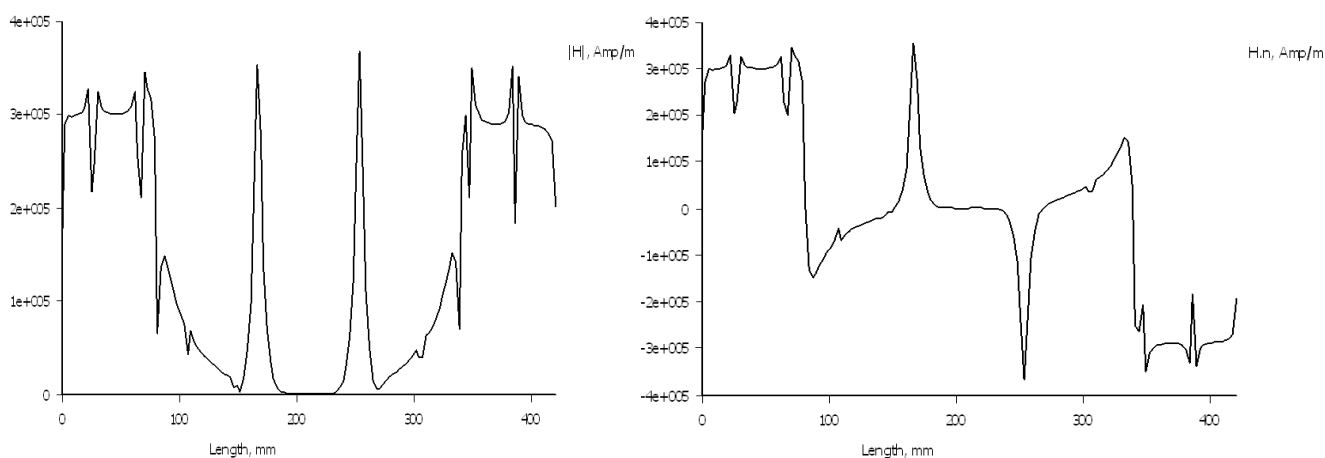


5.6 pav. $|H|$ ir $H.n$ – Magnetinio lauko stiprio modulis išilgai analizuojamo kontūro ir statmenai analizuojamos linijos, kai magnetai sudėti į Halbacho eilę

$|H|$ ir $H.n$ kreivės, kai statoriuje naudojamas M27 plienas, rotoriuje M19, magnetai SmCo 27MGOe

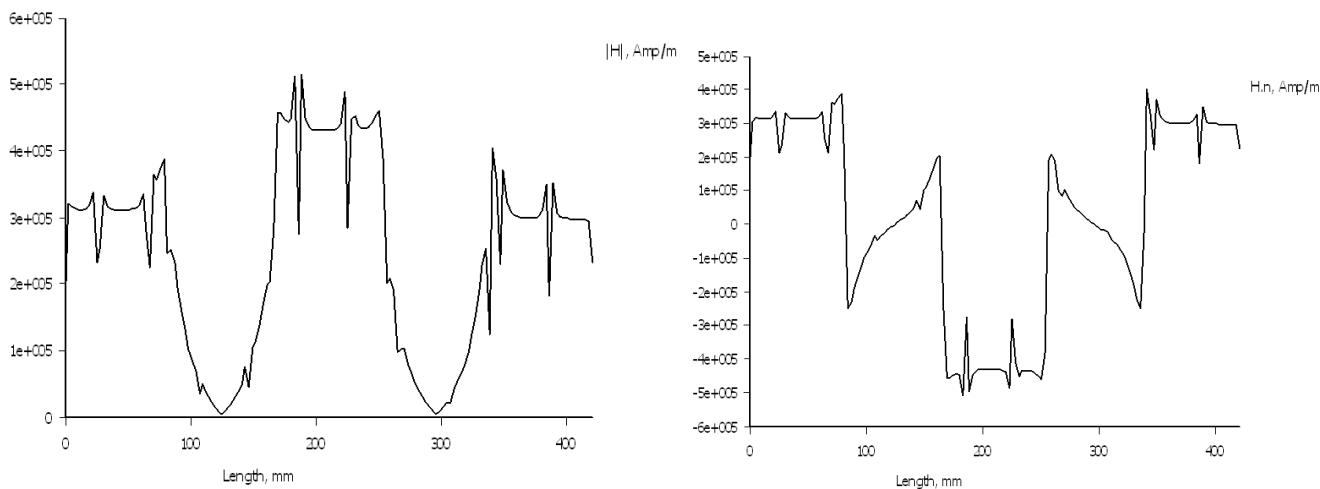


5.7 pav. $|H|$ ir $H.n$ – Magnetinio lauko stiprio modulis išilgai analizuojamo kontūro ir statmeni analizuojamos linijos, kai magnetai sudėti įprastai

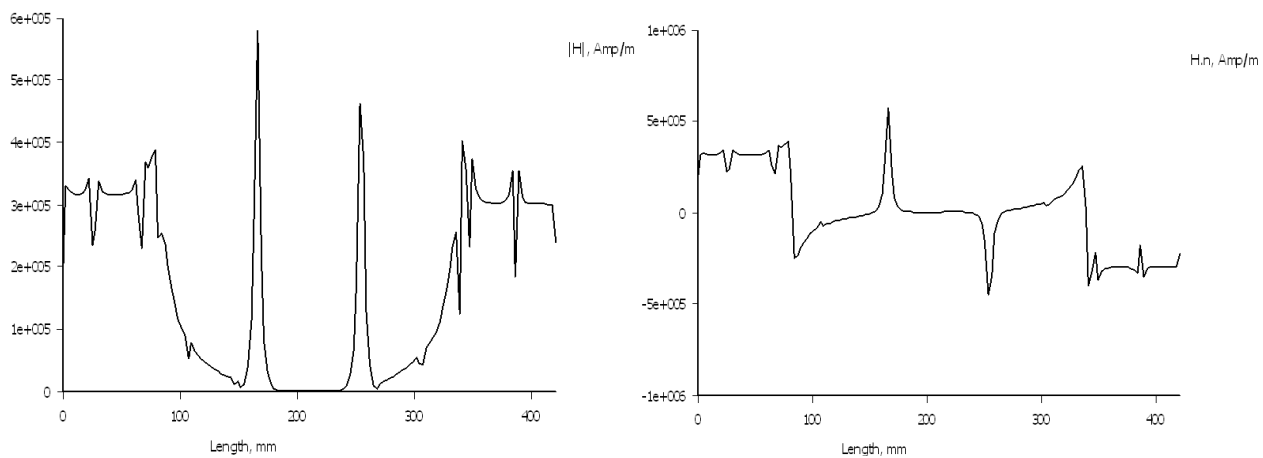


5.8 pav. $|H|$ ir $H.n$ – Magnetinio lauko stiprio modulis išilgai analizuojamo kontūro ir statmeni analizuojamos linijos, kai magnetai sudėti į Halbacho eilę

$|H|$ ir $H.n$ kreivės, kai statoriuje naudojamas M27 plienas, rotoriuje M19, magnetai NdFeB 40MGOe, magneto žingsnis sumažintas 2mm, nekeičiant jo tūrio

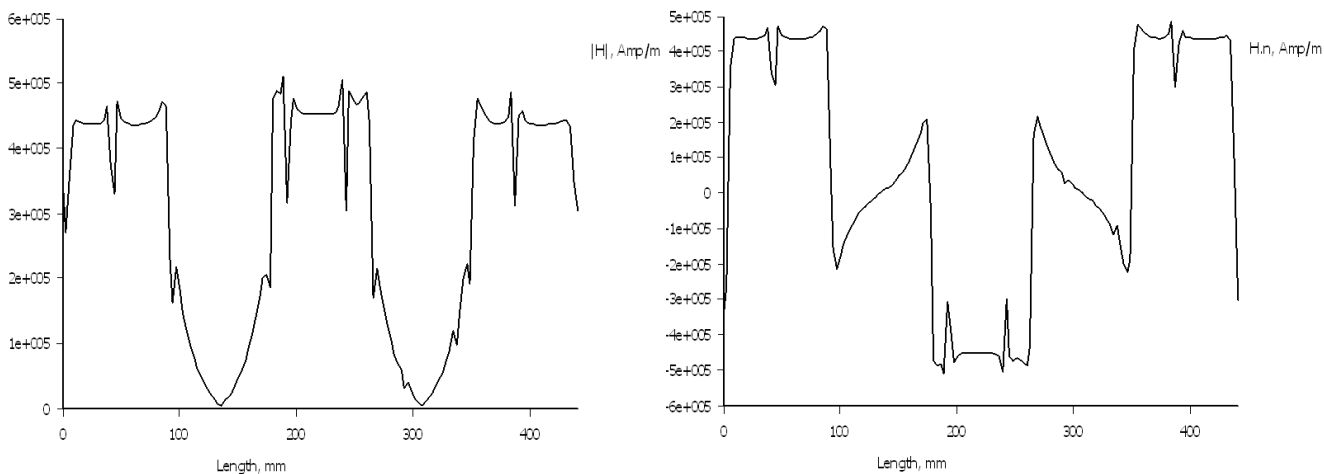


5.9 pav. $|H|$ ir $H.n$ – Magnetinio lauko stiprio modulis išilgai analizuojamo kontūro ir statmenai analizuojamos linijos, kai magnetai sudėti įprastai

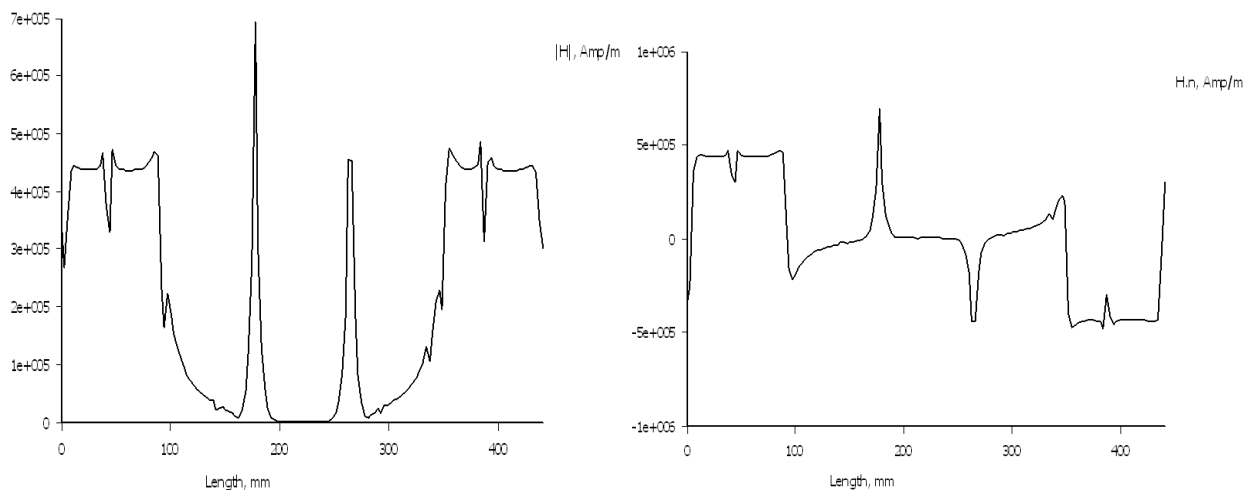


5.10 pav. $|H|$ ir $H.n$ – Magnetinio lauko stiprio modulis išilgai analizuojamo kontūro ir statmenai analizuojamos linijos, kai magnetai sudėti į Halbacho eilę

$|H|$ ir $H.n$ kreivės, kai statoriuje naudojamas M27 plienas, rotoriuje M19, magnetai NdFeB 40MGOe, apvijos žingsnis padidintas 10mm

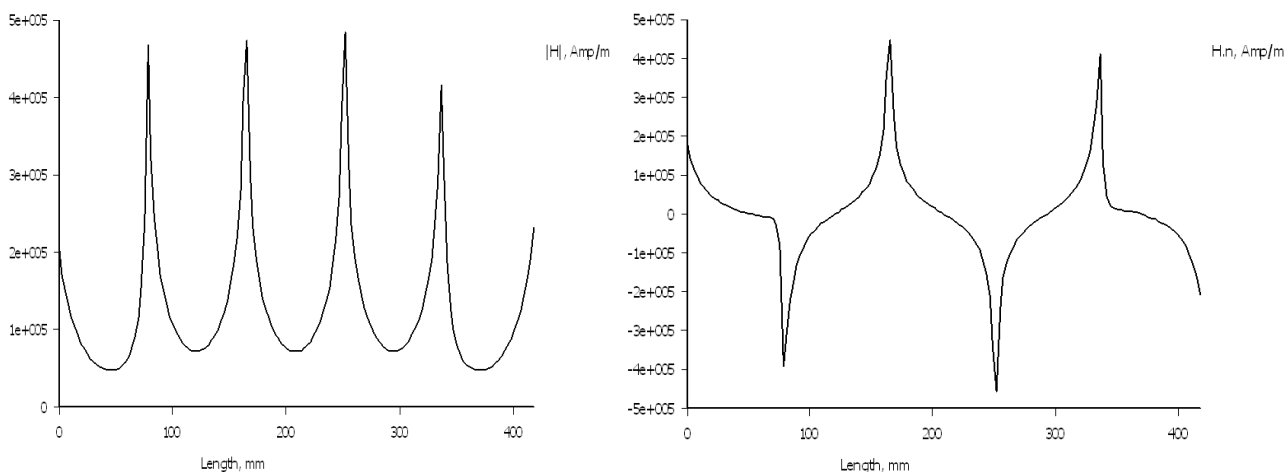


5.11 pav. $|H|$ ir $H.n$ – Magnetinio lauko stiprio modulis išilgai analizuojamo kontūro ir statmenai analizuojamos linijos, kai magnetai sudėti įprastai;



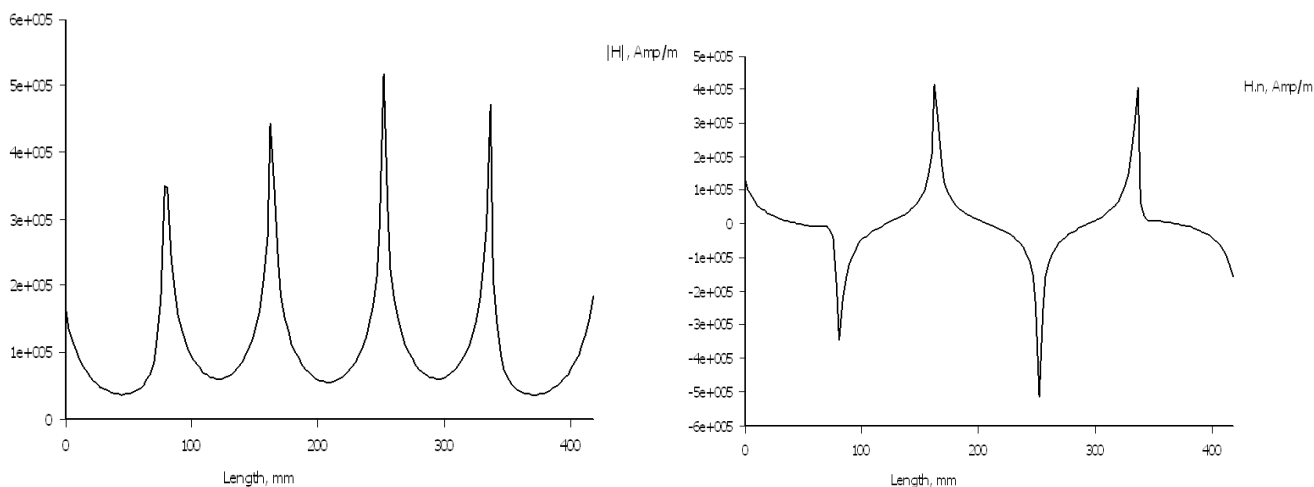
5.12 pav. $|H|$ ir $H.n$ – Magnetinio lauko stiprio modulis išilgai analizuojamo kontūro ir statmenai analizuojamos linijos, kai magnetai sudėti į Halbacho eilę

|H| ir H.n kreivės, kai statoriuje naudojama epoksidinė derva, rotoriuje 1100 aliuminis, magnetai NdFeB 40MGOe



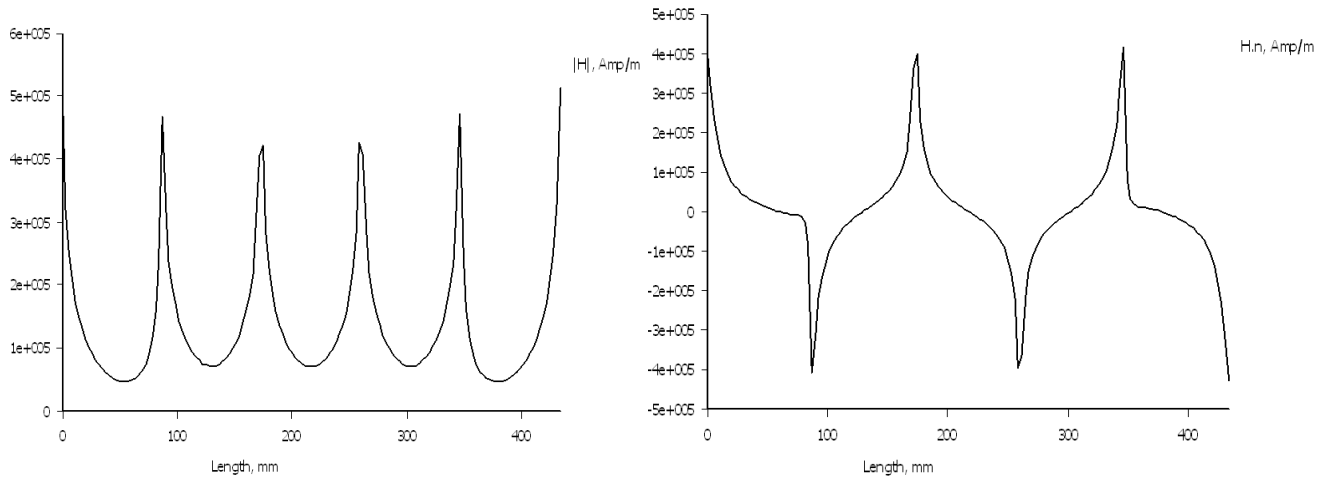
5.13 pav. $|H|$ ir $H.n$ – Magnetinio lauko stiprio modulis išilgai analizuojamo kontūro ir statmenai analizuojamos linijos, kai magnetai sudėti į Halbacho eilę

|H| ir H.n kreivės, kai statoriuje naudojama epoksidinė derva, rotoriuje 1100 aliuminis, magnetai NdFeB 40MGOe, magneto žingsnis sumažintas 2mm, nekeičiant jo tūrio



5.14 pav. $|H|$ ir $H.n$ – Magnetinio lauko stiprio modulis išilgai analizuojamo kontūro ir statmenai analizuojamos linijos, kai magnetai sudėti į Halbacho eilę

$|H|$ ir $H.n$ kreivės, kai statoriuje naudojama epoksidinė derva, rotoriuje 1100 aliuminis, magnetai NdFeB 40MGOe, apvijos žingsnis padidintas 10 mm



5.15 pav. $|H|$ ir $H.n$ – Magnetinio lauko stiprio modulis išilgai analizuojamo kontūro ir statmenai analizuojamos linijos, kai magnetai sudėti į Halbacho eilę

Generatorių, naudojamų mažos galios vėjo elektrinėms, palyginamoji analizė

K. Navickas*, S. Keliotis*, A. Senulis**

*Klaipėdos Universitetas, Jūrų technikos Fakultetas, Elektrotechnikos katedra, Bijūnų g., 17, Klaipėda, Lietuva, LT-9122, E. paštas: KarolisNI@yahoo.com

**Klaipėdos Universitetas, Jūrų technikos Fakultetas, Mechatronikos mokslo institutas, Bijūnų g., 17, Klaipėda, Lietuva, LT-9122, E. paštas: audriussenulis@yahoo.com

Anotacija

Straipsnyje palyginami generatoriai, naudojami mažos galios vėjo elektrinėms. Apžvelgiami sinchroniniai ašinio ir radialinio srauto generatoriai, jų tipai, panaudojimo galimybės. Darbe palyginti generatorių optimaliausio panaudojimo atvejai. Išanalizuoti vėjo elektrinių skirstymas į skirtingus tipus, įvertinant įvairius aspektus.

Pagrindiniai žodžiai: ašinio magnetinio lauko generatorius, radialinio magnetinio lauko generatorius, vėjo elektrinė.

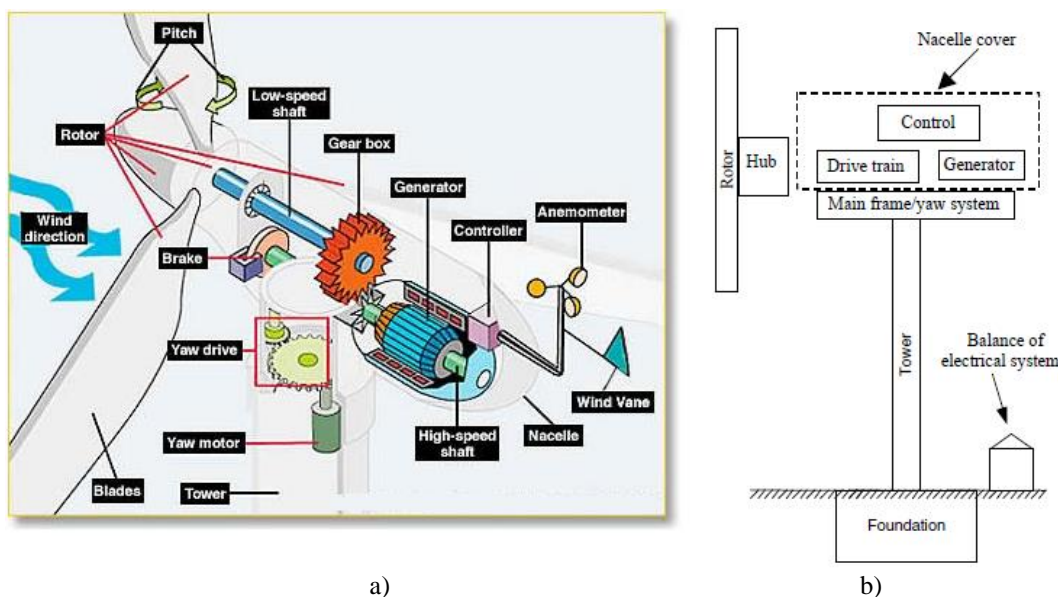
Annotation

This paper compares generators for small wind power plants. Overview of synchronous axial and transverse field generators, their types, the use of options is presented. A comparison for optimal use of the generator analyzed. Investigation of wind power plants into different types, taking into account various aspects is analyzed.

Key Words: axial field flux generator, radial flux generator, wind generator.

Įvadas

Vėjo elektrinė – tai elektromechaninis keitiklis, vėjo mechaninę energiją verčiantis į elektros energiją. Vėjo elektrinės intensyviai naudojamos elektros energijos gamybai iš atsinaujinančių elektros energijos šaltinių. Pastaruoju metu reali elektros energijos gamybos savikaina, pagaminama vėjo elektrinėse, mažėja dėl sumažėjusių įdiegimo kaštų ir padidėjusio vėjo elektrinių efektyvumo. Nemaža dalis eksploatuojamų vėjo elektrinių yra mažos, iki 10 kW, galios. Intensyvus šių mažos galios vėjo elektrinių naudojimas skatina technologijų progresą tiek generatorių srityje, tiek ir pašių vėjo elektrinių konstrukcijose. Tai sąlygoja naujų generatorių tipų atsiradimą, jų efektyvumo didinimą ir gamybos kainų mažinimą. Šie tikslai pasiekiami keičiant generatorių konstrukciją, apvijų išdėstymo schemas, naudojant geresnių charakteristikų medžiagas, atliekant modalinę generatorių sujungimą.



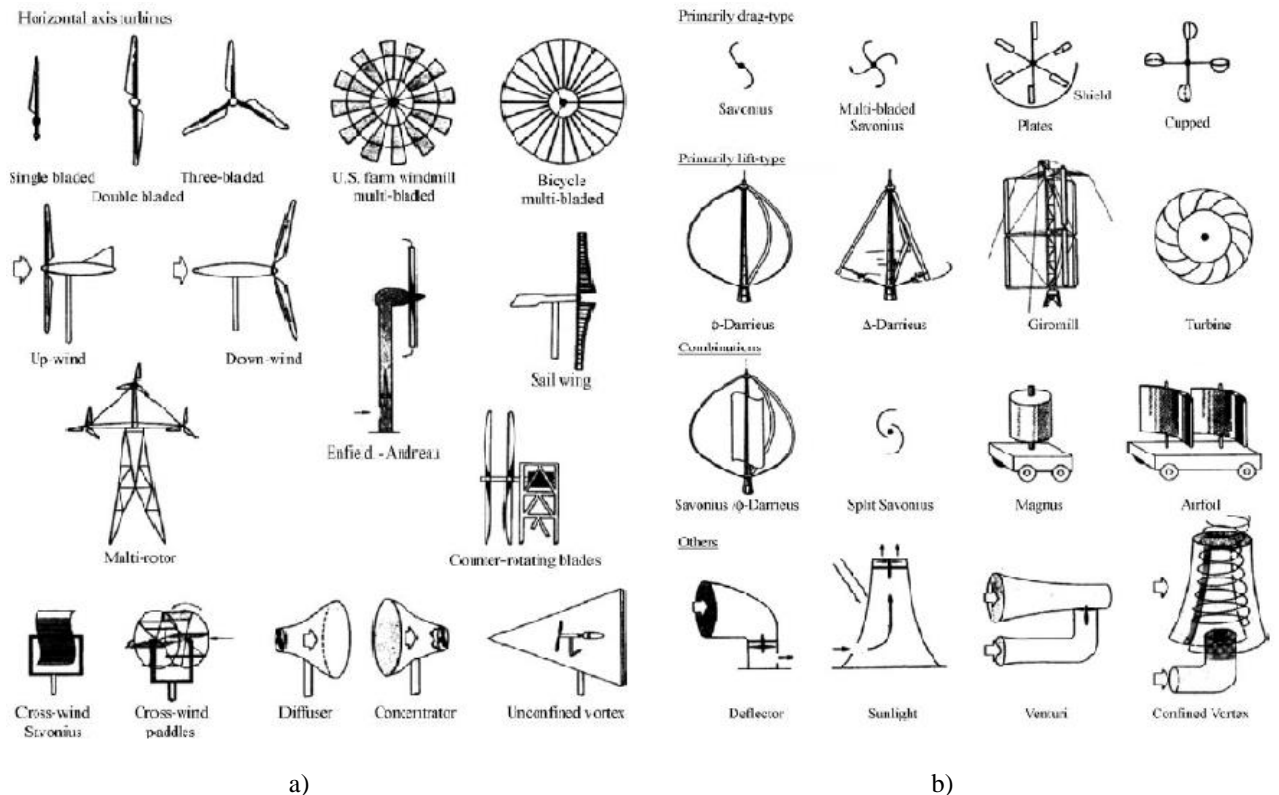
1 pav. Tipinė vėjo jėgainės sandara: a) Horizontalios ašies vėjo elektrinė (angl. HAWT) jėgainės rotorius [1], b) Jėgainės su bokštu vaizdas [2]

Vėjo jėgainę sudaro [2] (1 pav.): rotorius (rotor); rotorių laikantis dangtis (hub); pavaros (drive train), kurias sudaro stabdymo sistema, pavarų dėžė, įvairūs sujungimai, generatorius ir valdymo sistema (control); generatorius (generator);

elektrinės korpusas (nacelle cover); pasukimo sistema (yaw system); bokštas (tower); pamatai (foundation); sujungimų spinta (balance of electrical system).

Vėjo elektrinių skirstymas

Dažniausiai paplitusi vėjo elektrinės konstrukcija yra horizontalios ašies (HAWT – horizontal axis wind turbine, 2 pav. a). Tokių elektrinių sukimosi ašis yra lygiagrečiai žemei. HAWT rotorai yra skirstomi į [2]: priešvėjinius ir pavėjinius. Taip pat skirstoma pagal: centro standumą (hub) – standus arba balansuojantis; sparnų valdymą – kai sparnai pasukami, siekiant efektyviausio vėjo elektrinės darbo; sparnų kiekį – įprastai du arba trys (gali būti ir vieno su priešsvoriu, arba daugiamentės – 4, 5 ar daugiau sparnų); rotoriaus tipą – pasukamas pavėjui, arba fiksuotos padėties; sparnų medžiagą ir konstrukcijos tipą; pastovaus arba kintančio rotoriaus greičio; naudojamo generatoriaus tipą; pavarą mechaninę pavarą – generatorius sukamas per pavarų dėžę arba tiesiogiai.



2 pav. Vėjo elektrinių skirstymas: a) Horizontalios ašies jėgainės [1], b) Vertikalios ašies jėgainės [2].

Taip pat naudojamos ir vertikalios ašies vėjo elektrinės (VAWT – vertical axis wind turbine) (2 pav. b), tačiau jos dažniausiai pritaikomos individualių ūkių arba nedidelių namų vėjo sistemose. Egzistuoja ir kitokios konstrukcijos vėjo elektrinių, tačiau jos dažnai esą eksperimentinės, o praktikoje dažniausiai taikomos HAWT.

Generatorių skirstymas

Dauguma lėtaeigių ir tiesioginės pavaros generatorių, naudojamų, vėjo elektrinėse, yra nuolatinių magnetų elektros mašinos. Nuolatinių magnetų elektros mašinos būna ašinio arba radialinio srauto. Ašinio srauto mašinos paprastai turi statorius be griovelių, dėl ko supaprastėja apvijų projektavimas ir skaičiavimai. Magnetai, tokiose generatoriuose, naudojami plokščios formos. Matmenų atžvilgiu ašinio srauto mašinos ilgis bus daug mažesnis už radialinio srauto mašinos ilgį, tačiau didesnį skersmenį turi ašinio srauto elektros mašina. Dėl didelio skersmens ašinio srauto generatoriuose atsiranda problema – siekiant gauti kuo mažesnę oro tarpą, o tuo pačiu ir mažesnę magnetinės grandinės varžą, tarp statoriaus ir rotoriaus, tuo didesnė trauka tarp šių konstrukcinių dalių. Dėl šios priežasties sudėtingėja rotoriaus ir statoriaus įtvirtinimo konstrukcinis sprendimas ir atsiranda apribojimas didelio skersmens mašinos projektavimui [3].

Y. Chen [4] generatorius skirsto sekančiai:

- a) Radialinio srauto generatorius su vidiniu rotoriumi,
- b) Radialinio srauto generatorius su išoriniu rotoriumi,

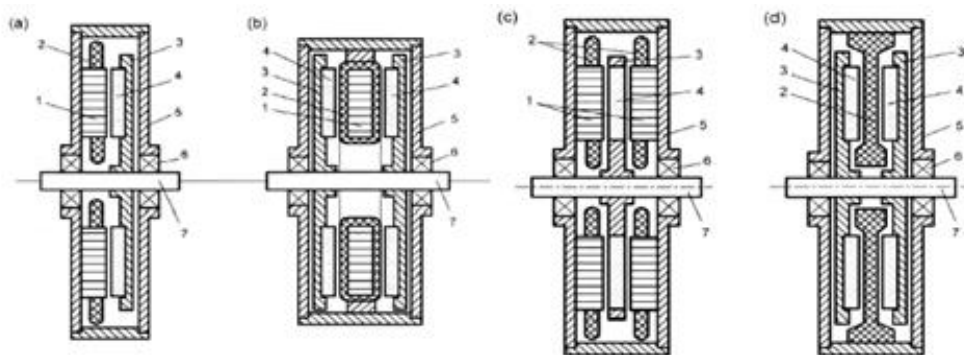
- c) Ašinio srauto generatorius su dvigubu statoriumi ir su grioveliais,
 - d) Ašinio srauto generatorius su dvigubu rotoriumi ir statoriumi su grioveliais,
 - e) Ašinio srauto generatorius su vienu statoriumi su grioveliais ir vienu rotoriumi, bei statoriaus balansu,
 - f) Ašinio srauto generatorius su vienu statoriumi su grioveliais ir vienu rotoriumi, bei rotoriaus balansu,
 - g) Ašinio srauto generatorius su dviem rotoriais ir vienu statoriumi be griovelių, su toroidine apvija.
- J. F. Gieras, ašinio srauto nuolatinių magnetų mašinos (ALNMM) skirsto taip [5]:

Vienpusės mašinos:

- Statorius turi griovelius (3 pav. a),
- Statorius neturi griovelių,
- Ryškiapolis statorius.

Dvipusės mašinos:

- Su vidiniu statoriumi (3 pav. b): statorius su grioveliais; statorius be griovelių; statorius su magnetolaidžiu; statorius be magnetolaidžio (3 pav. d); statorius ir rotorius be magnetolaidžių; su ryškiapoliu statoriumi,
- Su vidiniu rotoriumi: (3 pav. c): statorius su grioveliais; statorius be griovelių; ryškiapolis statorius.

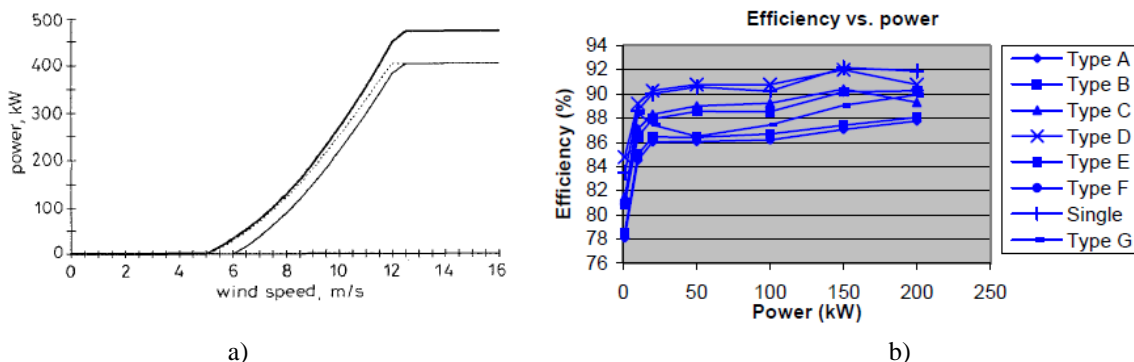


3 pav. ALNMM tipai: a) vienpusė, su grioveliais b) dvipusė be griovelių, vidinis statorius, du išoriniai rotoriai c) statorius su grioveliais, rotorius vidinis d) dvipusis bešerdis variklis, statorius vidinis 1-statoriaus šerdis, 2-statoriaus apvijos, 3-rotorius, 4-nuolatiniai magnetai, 5-korpusas, 6-guoliai, 7- velenas [5].

Radialinio srauto generatorius skirstomas į 2 tipus: išorinių magnetų ir įleisčių į rotorių magnetų. Paprasčiausia yra taikyti išorinių magnetų metodą, tačiau čia reikia naudoti brangius NdFeB magnetus, todėl juos reikia stengtis panaudoti kuo efektyviau. Taip pat šie magnetai turėtų būti mechaniškai apsaugoti.

Naudotini ir įleidžiami ferito magnetai, nors jie ir yra pigesni už retųjų žemių metalų magnetus, tačiau jų sumontavimas, įleidimas yra daug brangesnis nei NdFeB paviršinių magnetų, taip pat ferito magnetų kiekis didesnis. Dėl minėtos priežasties padidėja rotoriaus masė.

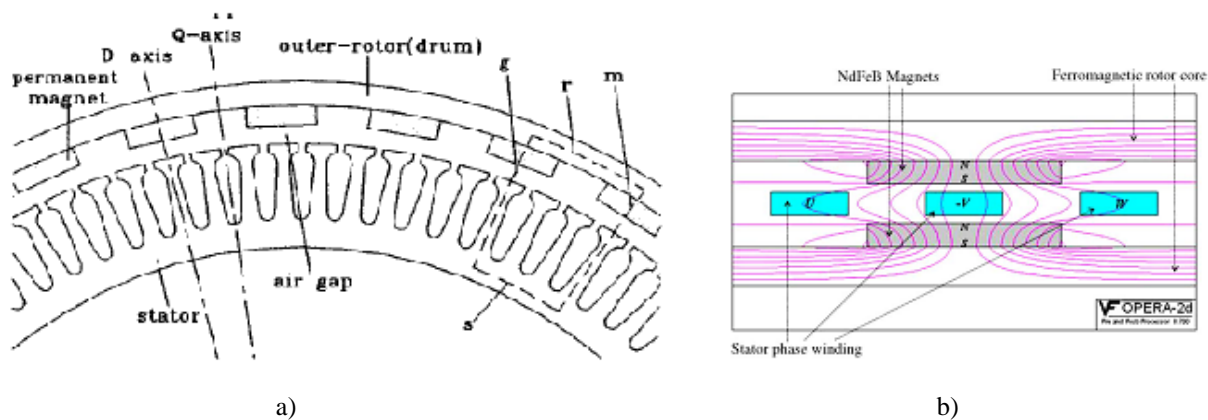
Šiuo atveju E. Spooner ir A. C. Williamson [6] panaudojo originalų sprendimą – buvo panaudoti abu montavimo būdai: NdFeB magnetus montuojant rotoriaus paviršiuje, kartu su ferito magnetais, įmontuotais į patį rotorius. Tokioje mašinoje galima naudoti sąlyginai mažą poliaus žingsnį, dėl ko mažėja mašinos skersmuo. Tokios mašinos apvijoje buvo gauta beveik sinusinė įtampa. Vis dėlto, taip pat buvo gautos ir aukštesniosios harmonikos.



4 pav. a) Vėjo elektrinės galios priklausomybė nuo vėjo greičio [6], b) Įvairių mašinų naudingumo koeficiento priklausomybė nuo galios [4].

ALNM generatoriaus, jungiamo be mechaninės perdavos vėjo elektrinės menčių rotoriaus, galios tipinė priklausomybė nuo vėjo greičio pateikta 4 pav. a grafike. Analizuojant šį grafiką, galima teigti, kad vėjo elektrinė yra įjungama prie pakankamai didelio vėjo greičio – 6 m/s (vertinant Lietuvos meteorologines sąlygas, kai vėjo vidutinis greitis pajūryje neviršija 7 m/s). Optimalus vėjo greitis tokiai vėjo elektrinei yra $V_{opt} = 12$ m/s, o elektrinė paleidžiama esant sąlygai, kai vėjo greitis pasiekia $\frac{1}{2} V_{opt}$. Prie kokio vėjo greičio bus pasiekta nominali generatoriaus galia, priklauso nuo elektrinės tipo, reduktoriaus, sparnų skaičiaus ir t.t. Kai generatorius pasiekia optimalią galią, elektrinės sukimosi greitis yra reguliuojamas, reguliuojant sparnų pokrypio kampą, arba naudojant aerodinaminį stabdį.

Iš 4 pav. b grafiko galima teigti, kad aukščiausią naudingumo koeficientą turi ašinio srauto mašina su dvigubu rotoriumi (D tipo), nes jos nuostoliai magnetolaidyje yra mažiausi. Žemiausias naudingumo koeficientas – radialinio lauko elektros mašinos (A ir B tipo).

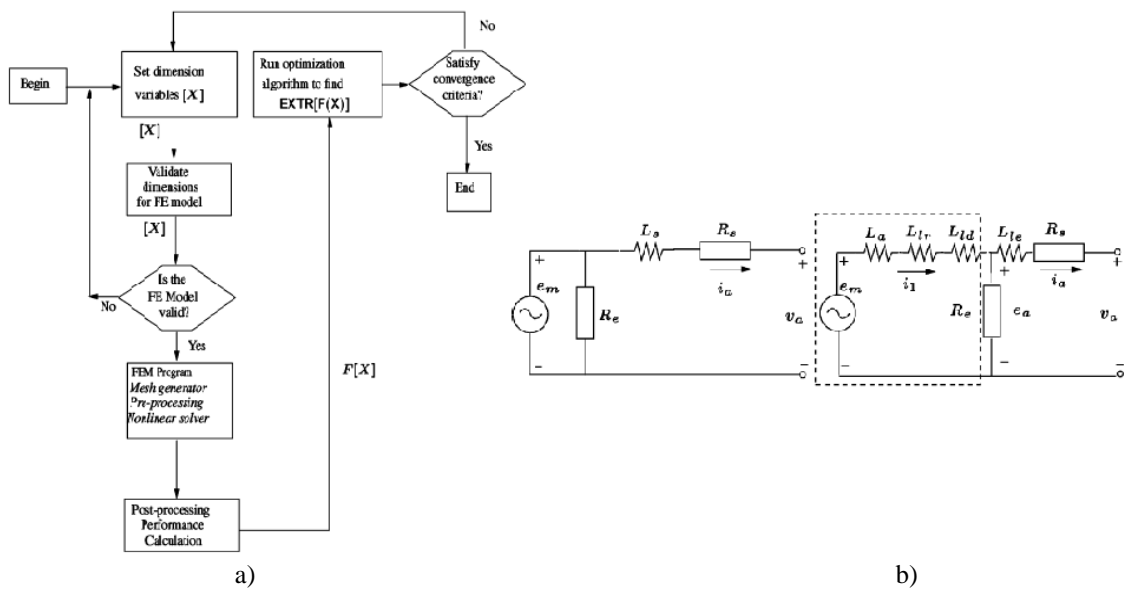


5 pav. a) Radialinio srauto generatoriaus magnetinės grandinės pjūvis [8], b) ALNM generatoriaus magnetinės grandinės pjūvis [7].

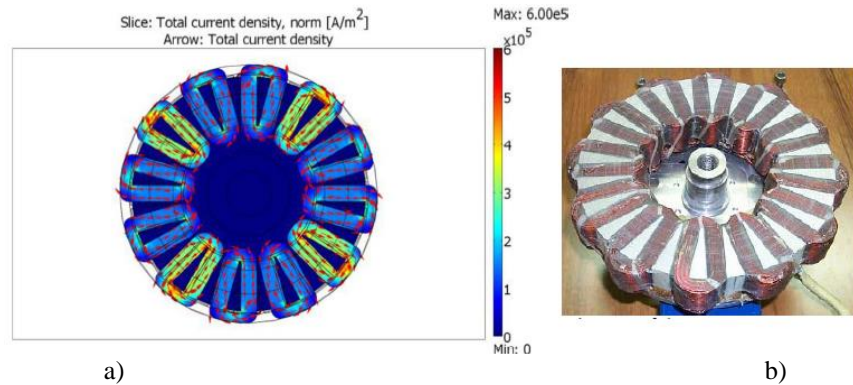
Visuose minėtose mašinos su nuolatiniais magnetais (tiek radialinio srauto, tiek ir ašinio srauto), magnetai yra montuojami rotorijuje arba ant rotoriaus paviršiaus, tam kad išvengti šepetėlių naudojimo rotoriaus grandinėje. 5 pav. schematiniuose eskizuose pateikti magnetinės grandinės konstrukciniai sprendimai radialinio srauto elektros mašinai (a) ir ALNM generatoriui (b). Abiem atvejais magnetai montuojami paviršiniu būdu, o statorijuje montuojama generatorių apviją.

Atliekant ALNM generatorių projektavimo ir kūrimo etapus, yra aktualus pradinis tokių generatorių charakteristikų skaičiavimas, kuris atliekamas naudojantis šiuolaikiniais baigtinių elementų metodų programinės įrangos sprendimais (FEMM, Comsol Multiphysics, Ansys ir kt.), bet taip pat aktualu naudoti ir optimizavimo algoritmus, kurių vienas pateiktas 6 pav. a. Algoritmo sekos esmė susideda iš pakartotino baigtinių elementų metodo panaudojimo ir konstrukcijos optimizavimo po kiekvieno tokio skaičiavimo. ALNM konstrukcija (b) ir srovės tankio pasiskirstymas statoriaus apvijoje (a) pateiktas 7 pav. Tokios elektros mašinos statoriaus dantys yra kylio formos ir dėl to ties vidine statoriaus dantų dalimi gali vykti magnetolaidžio prisisotinimas, todėl projektuojant mašinas, magnetilaidžio srauto pralaidumas tikrinamas prie siauriausios danties dalies [2].

6 pav. b dalyje pateikta ALNMM vienos fazės apvijos atstojamoji schema. Šioje schemoje: L_s ir R_s – statoriaus induktyvumas ir aktyvioji varža; R_e – ekvivalentinė varža įvertinanti, sukurinių srovių sukuriamus galios nuostolius $I^2 R_e$; e_m – magnetų indukuota elektrovara; v_a ir i_a – įtampa ir srovė statoriaus fazės apvijoje. Detalesnėje schemoje (6 pav. b): statoriaus induktyvumas L_s yra išskaidytas į L_a ir $L_i = L_{ir} + L_{id} + L_{ie}$, kur L_a – inkaro reakcijos induktyvumas, L_{ir} – nuotėkio induktyvumas, L_{id} – skirtuminis nuotėkio induktyvumas aplink laidininkus, L_{ie} – apvijų galo induktyvumas.



6 pav. a) ALNMM optimizavimo procedūra [9], b) ALNMM vienos fazės atstojamosios schemas [9].



7 pav. a) Srovės tankis ALNMM statoriaus apvijose [10], b) ALNMM statorius [12]

Atlikus mokslinių darbų analizę ir remiantis [11] nustatyta, kad tokie generatoriaus parametrai ir kaštai turi įtakos generatorių kūrimui, projektavimui ir gamybai: veiksmingumas, gamybos kaina, medžiagų kaina, dinaminės savybės, greičio diapazonas, triukšmas, momento pulsacijos, negendamumas, patikimumas, perkrovos galimybės, galios ir masės santykis, momento ir masės santykis. Į visus šiuos parametrus būtina atsižvelgti, siekiant optimalios generatorių konstrukcijos ir jų ilgaamžiško darbo.

Išvados

1. Apžvelgti vėjo elektrinių ir juose naudojamų elektros generatorių tipai, jų konstrukcijos. Išsamiau išanalizuotos ir palygintos ašinio ir radialinio srauto elektros mašinos, jų konstrukciniai ir energetiniai skirtumai. Pateikta ašinio srauto elektros mašinų klasifikacija, pateikti magnetinės grandinės realizavimo būdai. Pateiktos baigtinių elementų metodo panaudojimo galimybės optimizuojant ir konstruojant ALNM.

2. ALNM generatoriaus konstrukcija yra perspektyvi, su geromis aušinimo savybėmis, dideliu momentu. Šių mašinų energetinės charakteristikos prilygsta ar net yra geresnės už įprastinių konstrukcijų (ašinio srauto elektros mašinų) generatorius, ypatingai lyginant tos pačios masės ar tūrio ALNMM ir SLNMM mašinas jų atiduodamos galios atžvilgiu.

Literatūros sąrašas

1. Horizon Wind Energy LLC., 2011. [Interaktyvus] Horizon Wind Energy LLC. Available at: <<http://www.horizonwind.com/about/fkic/howdoeswindturbinework.aspx>> [Peržiūrėta 2012-04-02]
2. Manwell, J., F., McGowan, J., G., Rogers, A., L. 2009. Wind energy explained: theory, design and application. United Kingdom: John Wiley & Sons.
3. Lampola, P., Directly Driven., 2000. Low-Speed Permanent-Magnet Generators for Wind Power Applications. Finland: Helsinki university of technology.
4. Chen, Y., Pillay, P., Khan, A., 2000. PM Wind Generator Comparison of Different Topologies. *IEE Proceedings On Electric Power Applications*, USA.
5. Gieras, J., F., Wang, R., J., Kamper, M., J., 2004 Axial flux permanent magnet brushless machines. Netherlands: Kluwer academic publishers,
6. Spooner, E., Williamson, A. C., 1996. Direct-Coupled, Permanent-Magnet Generators for Wind Turbine Applications. *IEEE Proceedings On Electric Power Applications*, 143(1), pp. 1–8.
7. Hosseini, S., M., Agha-Mirslim, M., Mirzaei, M., 2008. Design, Prototyping, and Analysis of a Low Cost Axial-Flux Coreless Permanent-Magnet Generator. *IEEE Transactions on Magnetics*, 44(1), pp. 75-80.
8. Jianyi Chen, Chemmangot V. Nayar and Longya Xu., 2000. Design and finite-element analysing of an outer-rotor permanent-magnet generator for directly coupled wind turbines, *IEEE Transactions on Magnetics*, 36(5), pp. 3802-3809.
9. Gieras, J., F., Wang, R., J., Kamper, M., J., Van der Westhuizen, K., 2005. Optimal Design of a Coreless Stator Axial Flux Permanent-Magnet Generator. *IEEE Trans. Magnetics*, 41(1), pp. 55-64.
10. Marignetti, F., Colli, D., V., Coia, V., 2008. Design of Axial Flux PM Synchronous machines Through 3-D Coupled Electromagnetic Thermal and Fluid-Dynamical Finite-Element Analysis. *IEEE Transaction On Industrial Electronics*, 55(10), pp. 3591-3601.
11. Chrisanov, V., Wiszniewski, S., 2009. Unconventional PM Synchronous Generators for Wind and Wave Integrated Platform Plants. Szczecin: West Pomeranian University of Technology.
12. Marignetti, F., Tomassi, G., Cancelliere, P., Colli, D., V., Di Stefano, R., Scarano, M., 2006. PM Electromagnetic and Mechanic Design of a Fractional-slot-Windings Axial-flux PM synchronous Machine with Soft Magnetic Compound Stator., *Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting*. Tampa-FL 8-12 Oct. 2006, pp. 62-69.