



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Magnetinės sankabos elementų magnetinių ir geometrinių
parametrų įtakos jos mechaninėms charakteristikoms tyrimas**

Baigiamasis magistro studijų projektas

Antanas Sirvydis

Projekto autorius

Doc. dr. Robertas Lukočius

Vadovas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Magnetinės sankabos elementų magnetinių ir geometrinių parametrų įtakos jos mechaninėms charakteristikoms tyrimas

Baigiamasis magistro studijų projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

Antanas Sirvydis

Projekto autorius

Doc. dr. Robertas Lukočius

Vadovas

Prof. dr. Alvydas Dosinas

Recenzentas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Antanas Sirvydis

Magnetinės sankabos elementų magnetinių ir geometrinių parametrų įtakos jos mechaninėms charakteristikoms tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Antano Sirvydžio, baigiamasis projektas tema „Magnetinės sankabos elementų magnetinių ir geometrinių parametrų įtakos jos mechaninėms charakteristikoms tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Sirvydis, Antanas. Magnetinės sankabos elementų magnetinių ir geometrinių parametrų įtakos jos mechaninėms charakteristikoms tyrimas. Magistro studijų baigiamasis projektas / vadovas Doc. dr. Robertas Lukočius; Kauno technologijos universitetas Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): studijų kryptis – elektros inžinerija, krypčių grupė – inžinerijos mokslai;

Reikšminiai žodžiai: Magnetinė sankaba, ašinė magnetinė sankaba, sukimo momentas, nuolatiniai magnetai, FEM modelis.

Kaunas, 2019. 42 p.

Santrauka

Darbe atlikta magnetinės sankabos literatūros analizė, apžvelgti magnetinių sankabų tipai, pristatyti jų konstrukcijos elementai ir medžiagos iš kurių jie pagaminti, taip pat pagrindinės mechaninės charakteristikos, modeliavimo metodai ir magnetinių sankabų pritaikymo galimybės.

Ištirtas ašinės magnetinės sankabos modelis, paremtas 3D baigtinių elementų metodu. Ištirta magnetinių ir geometrinių parametrų, tokių kaip polių porų skaičius, oro tarpas, magnetų storis, jungų storis, jungo medžiaga, ašinės magnetinės sankabos disko dydis, įtaka maksimaliam ašinės magnetinės sankabos sukimo momentui. 3D FEM modelis verifikuotas, palyginus gautus modelio rezultatus, su eksperimentiniais.

Sirvydis, Antanas. Research of magnetic clutch elements magnetic and geometric parameters impact on its mechanical characteristics. Master's Final Degree Project / Assoc. Prof. Dr. Robertas Lukočius; Faculty of electrical and electronics engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): study field – electrical engineering, study field group – engineering.

Keywords: Magnetic clutch, axial magnetic clutch, torque, permanent magnets, FEM simulations.

Kaunas, 2019. 42 pages.

Summary

In this paper, a literature analysis of magnetic clutches is presented, main magnetic clutch types are overviewed, also its' construction elements and materials they are made of are analyzed as well as main mechanical characteristics, modeling methods and possible application of magnetic clutch are presented.

The model of magnetic clutch based on 3D finite elements method is analyzed. The influence of magnetic and geometric parameters such as pole pair number, air gap, magnets thickness, yoke thickness, the material yoke made of, axial magnetic disk size on axial magnetic clutch main characteristic - maximum mechanical torque - is researched and analyzed. 3D FEM model verified by comparing acquired values to experiment values.

Turinys

Paveikslų sąrašas	8
Lentelių sąrašas.....	9
Įvadas.....	10
1. Literatūros analizė	11
1.1. Magnetinių sankabų tipai	12
1.1.1. Radialinė magnetinė sankaba	12
1.1.2. Ašinė magnetinė sankaba	14
1.1.3. Sūkurinių srovių magnetinė sankaba	14
1.2. Magnetinės sankabos konstrukcija ir panaudojimas.....	16
1.2.1. Nuolatiniai magnetai.....	16
1.2.2. Jungai.....	17
1.2.3. Sandarinimo ekranai	17
1.2.4. Magnetinės sankabos panaudojimo galimybės	18
1.3. Pagrindinės mechaninės magnetinės sankabos charakteristikos.....	19
1.4. Magnetinės sankabos modeliavimo metodai	20
1.5. Literatūros analizės išvados	21
2. Tiriamasis darbas.....	22
2.1. Programinė įranga ir ašinės magnetinės sankabos modelis	23
2.1.1. Naudota programinė įranga COMSOL.....	23
2.1.2. COMSOL Multiphysics ašinės magnetinės sankabos modelis	23
2.2. Ašinės magnetinės sankabos modelio verifikavimas.....	26
2.3. Momento priklausomybės nuo geometrinių ir magnetinių parametrų tyrimas.....	31
2.3.1. Ašinės magnetinės sankabos maksimalaus sukimo momento priklausomybė nuo polių porų skaičiaus	31
2.3.2. Ašinės magnetinės sankabos maksimalaus sukimo momento priklausomybė nuo nuolatinių magnetų storio	32
2.3.3. Ašinės magnetinės sankabos maksimalaus sukimo momento priklausomybė nuo jungo medžiagos	33
2.3.4. Ašinės magnetinės sankabos maksimalaus sukimo momento priklausomybė nuo jungo storio	36
2.3.5. Ašinės magnetinės sankabos maksimalaus sukimo momento priklausomybė nuo nuolatinių magnetų ir diskų dydžio	37
2.4. Tiriamojo darbo išvados	39

Išvados	40
3. Naudota literatūra	41

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Magnetinių sankabų klasifikacija pagal magnetų darbinį paviršių [1]	12
1.2 pav. Pagrindiniai cilindrinės magnetinės sankabos geometriniai parametrai [2].....	13
1.3 pav. Pagrindiniai šešių polių porų ($p = 6$) ašinės magnetinės sankabos geometriniai parametrai [3]	14
1.4 pav. Sūkurinės srovės magnetinės sankabos pagrindiniai geometriniai parametrai [4].....	15
1.5 pav. Radialinė magnetinė sankaba, kuria galima būtų pakeisti įprastą sankabą vėjo turbinose, ir jos geometriniai parametrai [8].....	18
1.6 pav. „Millo Appliances“ sukurtas daržovių ir vaisių plaktuvas, panaudojant magnetinę sankabą [13]	19
1.7 pav. Sukimo momento priklausomybė nuo kampinio poslinkio, elektriniais laipsniais [14]	19
1.8 pav. Sukimo momento priklausomybė nuo kampinio poslinkio, geometriniais laipsniais [14].	20
2.1 pav. Pagrindiniai ašinės magnetinės sankabos modelio geometriniai ir magnetiniai parametrai „COMSOL Multiphysics“ aplinkoje	23
2.2 pav. Ašinės magnetinės sankabos modelis, kai oro tarpas $h_{ag}=2\text{mm}$	24
2.3 pav. Ašinės magnetinės sankabos modelis, kai oro tarpas $h_{ag}=10\text{mm}$	24
2.4 pav. Ašinės magnetinės sankabos modelis, vaizdas iš viršaus	25
2.5 pav. Tiriamojo darbo metu sudaryto modelių gauta sukimo momento priklausomybė nuo kampinio poslinkio, geometriniais laipsniais	25
2.6 pav. Ašinės magnetinės sankabos sukimo momento priklausomybė nuo oro tarpo	27
2.7 pav. Momento priklausomybė nuo polių porų skaičiaus pagal sudarytą modelį	28
2.8 pav. Momento priklausomybė nuo polių porų skaičiaus pagal [3]	29
2.9 pav. Modelio apskaičiuoto ir eksperimentiniu būdu apskaičiuota momento priklausomybė nuo kampinio poslinkio δ	30
2.10 pav. Ašinės magnetinės sankabos sukimo momento priklausomybė nuo polių porų skaičiaus, keičiant oro tarpo dydį	32
2.11 pav. Ašinės magnetinės sankabos sukimo momento priklausomybė nuo oro tarpo, keičiant magnetų storį	33
2.12 pav. Ašinės magnetinės sankabos sukimo momento priklausomybė nuo oro tarpo, keičiant jungo medžiagą.....	34
2.13 pav. Magnetinės sankabos magnetinio srauto tankis B [T], kai abu jungai pagaminti iš feromagnetinių medžiagų	35
2.14 pav. Magnetinės sankabos magnetinio srauto tankis B [T], kai vienas jungas pagamintas iš feromagnetinių medžiagų, kitas – ne iš feromagnetinių medžiagų	35
2.15 pav. Magnetinės sankabos magnetinio srauto tankis B [T], kai abu jungai pagaminti iš neferomagnetinių medžiagų	36
2.16 pav. Ašinės magnetinės sankabos sukimo momento priklausomybė nuo oro tarpo, keičiant jungo storį.....	37
2.17 pav. Ašinės magnetinės sankabos sukimo momento priklausomybė nuo oro tarpo keičiant diskų ir magnetų dydį.....	38

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Nuolatinių magnetų tipų palyginimas [1].....	17
1.2 lentelė. Elektriniai plienai ir jų panaudojimas [1].....	17
2.1 lentelė. Pagrindiniai ašinės magnetinės sankabos geometriniai parametrai.....	26
2.2 lentelė. Pagrindiniai ašinės magnetinės sankabos geometriniai parametrai 2.4.1. skyriaus tyrimui	31
2.3 lentelė. Pagrindiniai ašinės magnetinės sankabos geometriniai parametrai 2.4.2. skyriaus tyrimui	32
2.4 lentelė. Pagrindiniai ašinės magnetinės sankabos geometriniai parametrai 2.4.3. skyriaus tyrimui	34
2.5 lentelė. Pagrindiniai ašinės magnetinės sankabos geometriniai parametrai 2.4.4 skyriaus tyrimui	36
2.6 lentelė. Pagrindiniai ašinės magnetinės sankabos geometriniai parametrai 2.4.5 skyriaus tyrimui	37

Įvadas

Nuolatiniais magnetais arba magnetais vadinami ilgai neišsimagnetinantys kūnai. Feromagnetinės medžiagos – tai geležis, nikelis, kobaltas. Dėl elektronų sąveikos juose atsiranda skirtingai įmagnetintos sritys, magnetiniame lauke jų įsimagnetinimas suvienodėja (kryptis pasidaro maždaug vienoda), ir visas kūnas tampa nuolatinium magnetu. Nuolatinis magnetas, kaip ir ritė, kuria teka elektros srovė, turi du polius: šiaurinį ir pietinį. Vienodi magnetų poliai vienas kitą stumia, o skirtingi – traukia. Nuolatiniai magnetai būna įvairių formų: strypiniai, pasagiškieji, žiediniai, apvalieji ir t.t. Paprasčiausias nuolatinis magnetas yra magnetinė rodyklė.

Magnetinė sankaba – įtaisas skirtas perkelti sukimo momentą iš vieno disko ar cilindro į kitą naudojant magnetinį lauką, o ne fizinį sujungimą. Dėl to magnetinę sankabą galima vadinti bekontakte (angl. *contactless*). Tokios sankabas lengva eksploatuoti, teoriškai jos yra ilgaamžės, todėl, kad tarp dviejų diskų nėra mechaniškai sujungtų dalių. Magnetinės sankabos plačiai naudojamos pramonėje, tačiau labiausiai pradėta naudoti per pastaruosius 20 metų, kai magnetinės sankabos pradėtos gaminti su iš retųjų žemės lydinių (angl. *rare-earth alloy*) pagamintais nuolatiniais magnetais.

Darbo tikslas: Ištirti magnetinės sankabos elementų magnetinių ir geometrinių parametrų įtaką jos mechaninėms charakteristikoms.

Darbo uždaviniai:

1. Apžvelgti naujausius tyrimus, mokslinius straipsnius ir literatūrą apie magnetinės sankabas, jų tipus, pagrindines charakteristikas.
2. Ištirti ašinės magnetinės sankabos modelį.
3. Naudojant modelį ištirti ašinės magnetinės sankabos mechanines charakteristikas keičiant polių porų skaičių;
4. Naudojant modelį ištirti ašinės magnetinės sankabos mechanines charakteristikas keičiant magnetų storį;
5. Naudojant modelį ištirti ašinės magnetinės sankabos mechanines charakteristikas keičiant jungo medžiagą;
6. Naudojant modelį ištirti ašinės magnetinės sankabos mechanines charakteristikas keičiant feromagnetinio jungo storį;
7. Naudojant modelį ištirti ašinės magnetinės sankabos mechanines charakteristikas keičiant magnetinės sankabos diskų dydį

1. Literatūros analizė

Magnetai gali būti pritaikyti įvairiuose prietaisuose, pavyzdžiui, sankabose, guoliuose, tvirtinimo detalėse, motoruose, jutikliuose, apsaugos prietaisuose, optikoje ar kituose įrenginiuose. Magnetinės sankabos naudojamos orlaivių, jūrų, medicinos ir chemijos pramonėje, be kita ko, ir prietaisuose, įskaitant pramonines krosnis, siurblius, kompresorius, matavimo prietaisus, valdiklius ir hidraulinės mašinas, gali būti panaudotos ir vėjo turbinose, ar kitose agresyviose aplinkose, pvz., vandenyje, ar dujose.

Literatūros analizės tikslas: Supažindinti su magnetinių sankabų struktūra, jų tipais, charakteristikomis, modeliavimo metodais.

Literatūros analizės uždaviniai:

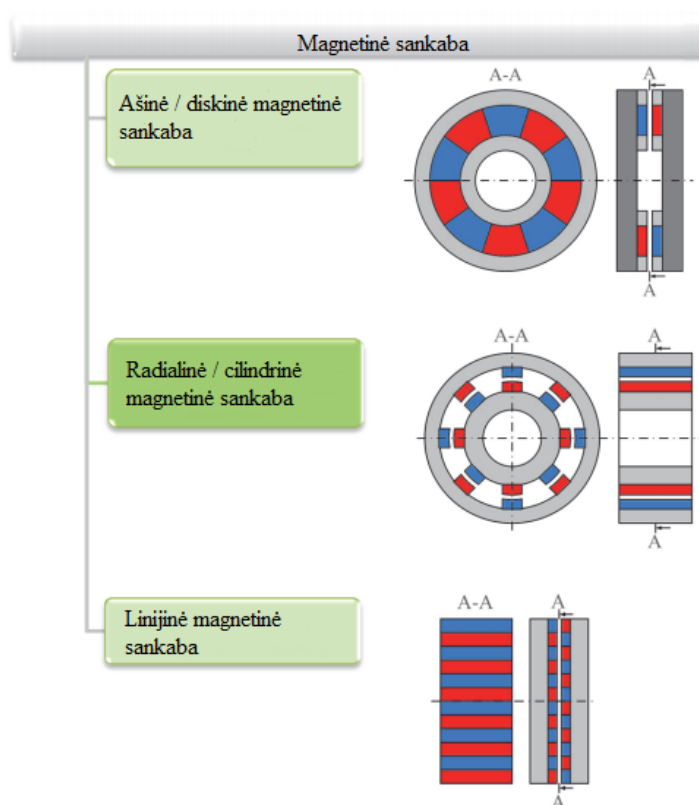
1. Apžvelgti ašinę magnetinę sankabą;
2. Apžvelgti radialinę magnetinę sankabą;
3. Pristatyti sūkurinių srovių magnetinę sankabą;
4. Pristatyti magnetinių sankabų konstrukciją;
5. Pristatyti magnetinių sankabų tyrimą (analizavimo metodai, baigtinių elementų metodai)
6. Apžvelgti jungų įtaką magnetinių sankabų mechaninėms charakteristikoms;

1.1. Magnetinių sankabų tipai

Magnetinė sankaba yra mechanizmas, kuris naudojamas perkelti mechaninį sukimo momentą be dviejų pagrindinių dalių, pusinių movų (angl. *half couplings*), kurios dažniausiai būna diskas arba cilindras, kontakto. Sukimo momentas perduodamas naudojant traukos ir atramos jėgas iš nuolatinių magnetų pritvirtintų ant abiejų pagrindinių dalių. Magnetinė sankaba veikia tokiu principu: rotorius suka vieną diską (ašinės sankabos atveju) ar cilindrą (radialinės sankabos atveju), ir dėl traukos ir stūmos jėgų, tarp nuolatinių magnetų kitas diskas arba cilindras pradeda sukis. Šios jėgos veikia vienodai abejomis pusėmis: kai viena pusinė mova sukama, kita seka, kai vienas diskas ar cilindras stabdomas, kitas irgi stovi vietoje. Magnetinės sankabos literatūroje dažniausiai klasifikuojamos pagal magneto darbinį paviršių:

- radialinė / cilindrinė magnetinė sankaba (magnetai sąveikauja tarp ašių);
- ašinė / diskinė magnetinė sankaba;
- linijinė magnetinė sankaba (beveik neištirta, informacijos apie ją beveik nėra)

Palyginimui žr 1.1 pav. ten, raudona spalva pažymėtas šiaurinis magneto polis, mėlyna – pietinis, pilka spalva pažymėtas jungas.

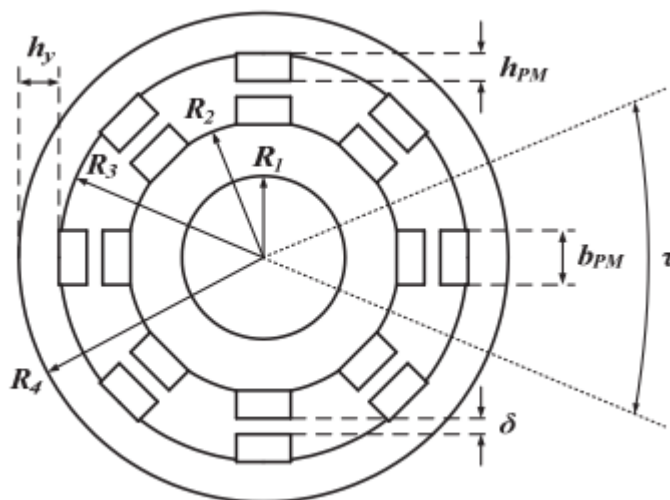


1.1 pav. Magnetinių sankabų klasifikacija pagal magnetų darbinį paviršių [1]

1.1.1. Radialinė magnetinė sankaba

Cilindrinę magnetinę sankabą sudaro vidinė mova ir išorinė pusinė mova, kur pirmoji, vidinė mova, yra įdedama į antrąją, išorinę movą. Pagrindinės dalys yra pagamintos iš plieno, nuolatiniai magnetai (angl. *PM* – *Permanent magnets*) yra ant pagrindo, dažniausiai jie gaminami iš lydinių, tokių kaip,

neodimis-geležis-boras (Nd-Fe-B) ar samaris-kobaltas (Sm-Co). Pagrindiniai cilindrinės magnetinės sankabos geometriniai parametrai parodyti 1.2 pav.



1.2 pav. Pagrindiniai cilindrinės magnetinės sankabos geometriniai parametrai [2]

R_1 – vidinės movos spindulys; R_2 – vidinės movos nuolatinių magnetų išdėstymo spindulys; R_3 – išorinės movos nuolatinių magnetų išdėstymo spindulys; R_4 – išorinės movos spindulys; δ – oro tarpas; h_{PM} – nuolatinio magneto aukštis; b_{PM} – nuolatinio magneto plotis; h_y – išorinės movos pagrindo storis.

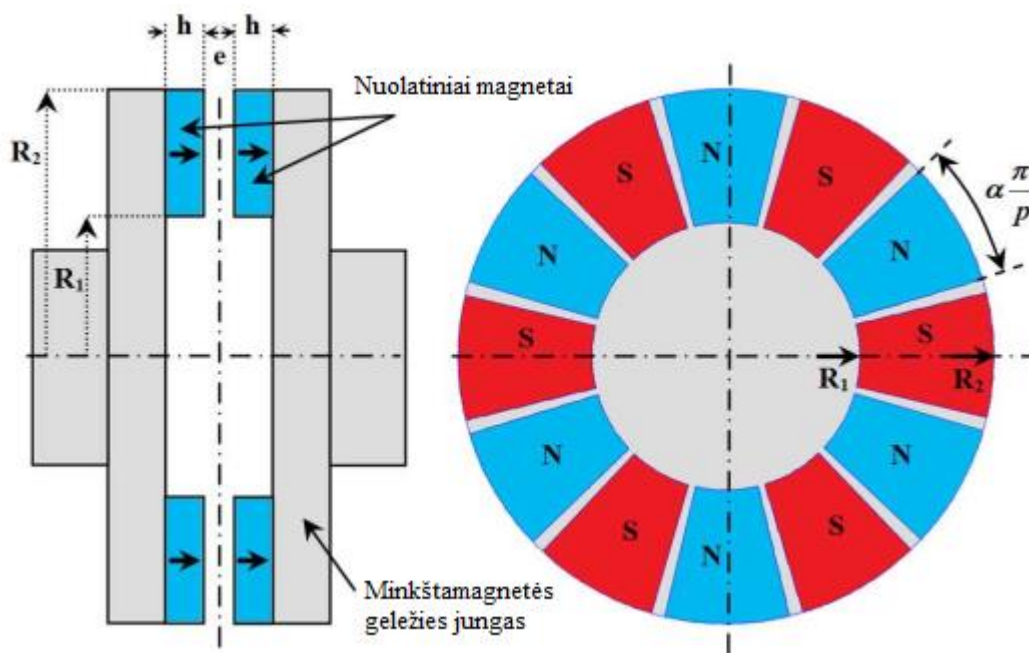
Pagrindinę cilindrinė magnetinių sankabų techninė informacija [1]:

- užsandarintas ekranas, tinkamas steriliai aplinkai;
- gali būti naudojamos įvairių medžiagų, tokių kaip skysčiai, dujos ir kietos dalelės, apdorojimui;
- sukurtos veikti dideliame galios diapazone (<2,5 kW);
- geba veikti dideliame slėgio diapazone (<4MPa);
- gali veikti įvairiose temperatūrose (10-200 °C, priklausomai nuo pastovaus magneto temperatūros).

1.1.2. Ašinė magnetinė sankaba

Kadangi sukimo momentas gali būti perduodamas per atskyrimo sieną, ašinės magnetinės sankabos gerai tinkamos naudoti izoliuotose sistemose, tokiose kaip vakuuminiai arba aukšto slėgio indai. Be to, jos turi apibrėžtą didžiausią sukimo momentą, kuris užtikrintą apsaugą nuo perkrovos.

Ašinės magnetinės sankabos susideda iš dviejų priešingų diskų su nuolatiniais magnetais, kaip parodyta 1.3 pav. Magnetai yra magnetizuoti ašine kryptimi. Jie įrengti pakaitomis šiaurinis polius ir pietinis (žr. 1.3 pav. dešinėje). Magnetinis srautas uždaromas minkštamagnetės geležies jungais. Vienam diskui taikomas sukimo momentas per oro tarpą perkeliamas į kitą diską. Kampinis poslinkis tarp dviejų diskų priklauso nuo perduotos sukimo momento vertės. Pagrindinis ašinio tipo magnetinių sankabų trūkumas yra didelė ašių traukos jėga tarp dviejų diskų. [3]

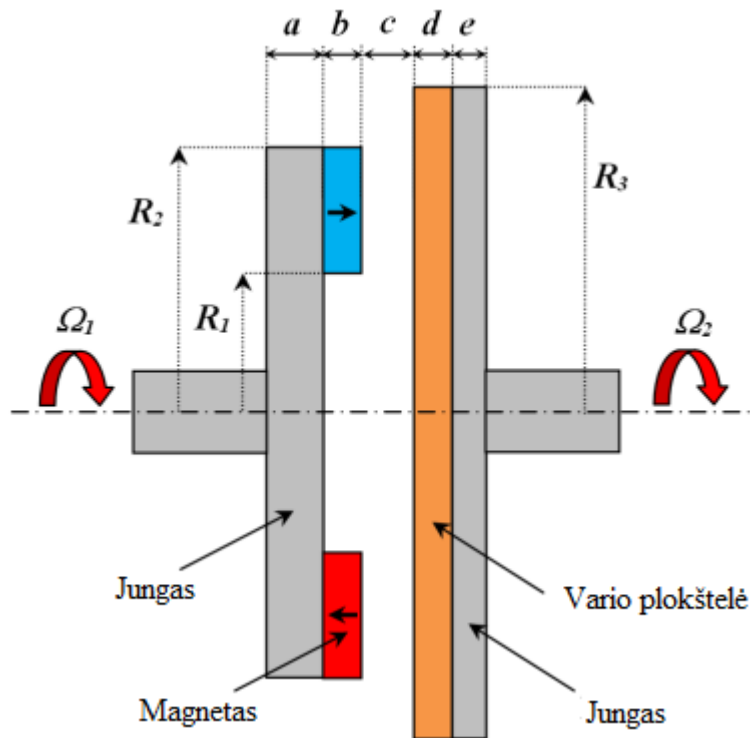


1.3 pav. Pagrindiniai šešių polių porų ($p = 6$) ašinės magnetinės sankabos geometriniai parametrai [3]

R_1, R_2 – magnetinės sankabos spinduliai; h – magneto aukštis; e – oro tarpas.

1.1.3. Sūkurinių srovių magnetinė sankaba

Tai magnetinių sankabų tipas labai panašus į ašinės magnetinės sankabas, tik vietoje nuolatinių magnetų varomajame diske panaudota vario plokštelė prisukta prie geležies jungo. Tokio įtaiso sukimo momentas atsiranda dėl magnetų lauko ir indukuotų srovių sąveikos varinėje plokštėje, kuri priklauso nuo slydimo greičio tarp dviejų diskų. 1.4 pav. pateikti pagrindiniai sūkurinių srovių magnetinės sankabos geometriniai parametrai.



1.4 pav. Sūkurinės srovės magnetinės sankabos pagrindiniai geometriniai parametrai [4]

R_1 – vidinis magnetų spindulys; R_2 – išorinis magnetų spindulys; R_3 – vario plokštelės spindulys;

a – jungo (varančio disko) storis; b – magneto storis; c – oro tarpas; d – vario plokštelės storis;

e – jungo (varomo disko) storis;

Norint tiksliai suprojektuoti sūkurinės srovės magnetinę movą, būtina atsižvelgti į temperatūros poveikį vario laidumui. Dėl sūkurinių srovių nuostolių (šilumos šaltinio) vario temperatūra pakils, todėl vario elektros laidumas sumažės. Todėl sumažėja sukimo momentas [4].

Jei ašinės ir radialinės sankabos yra sinchroninės, tai sūkurinės srovės magnetinė sankaba yra asinchroninė, dėl slydimo.

1.2. Magnetinės sankabos konstrukcija ir panaudojimas

Magnetinė sankaba sudaryta iš trijų pagrindinių elementų: nuolatinių magnetų, jungų ir sandarinimo ekrano. Toliau pateikiama kiekvieno iš šių trijų elementų sandara.

1.2.1. Nuolatiniai magnetai

Pirmose magnetinėse sankabose buvo naudojami paprasti nuolatiniai magnetai pagaminti iš Ba-ferito, Sr-ferito, Co-ferito, Ni-ferito arba aliuminio-nikelio-kobalto lydinių (AlNiCo) [1].

Feritai, dar vadinami keraminiais magnetais yra pagaminti iš geležies oksido ir metalo karbonato. Feritai buvo plačiai naudojami dėl jų prieinamumo. Populiariausi keraminiai nuolatiniai magnetai buvo Ba-feritai ir Sr-feritai. Keraminiai magnetai gaminami naudojant presavimą ir sukepinimą. Keraminiai magnetai mechaniškai yra trapūs, bet kieti – jiems apdoroti reikalingi deimantiniai įrenginiai, kad būtų suformuota magneto forma. Keraminiai magnetai, palyginti su kitais nuolatinių magnetais, kainuoja pigiau, atsparūs korozijai, turi didelį atsparumą karščiui (iki 400 °C), tačiau jų mechaninis atsparumas yra mažas, todėl dabar naudojami kitokie magnetai.

Kiti naudojami magnetai AlNiCo pagaminti iš aliuminio (Al), nikelio (Ni) ir kobalto (Co) lydinio, iš ten kilęs ir pavadinimas AlNiCo. Nedidelis kiekis kitų elementų yra pridedama siekiant pagerinti magneto savybes. AlNiCo magnetai gali būti gaminami naudojant liejimą ir sukepinimą. Šie magnetai pasižymi geru temperatūros stabilumu (kai kurie magnetai gali veikti iki 540 °C ir neprarasti magnetinių savybių), taip pat turi gerą atsparumą korozijai. Didžiausias Alnico magnetų trūkumas yra tas, kad jie yra linkę išsimagnetinti nuo susidūrimo.

Populiariausia šiais laikais nuolatinių magnetų grupė – retieji žemės lydiniai (angl. *rare-earth alloys*), pirmieji buvo SmCo magnetai, po jų sekė NdFeB magnetai. SmCo magnetai yra labai atsparūs oksidacijai, turi mažesnę maksimalią darbinę temperatūrą nei keraminiai ar Alnico magnetai, tačiau didesnę maksimalią darbinę temperatūrą ir didesnę terminį atsparumą, nei NdFeB magnetai. SmCo magnetai yra trapūs ir susidūrę su terminiu šoku dažnai sutrūkinėja. Šie magnetai daugiausiai naudojami įrenginiuose, kur atsparumas korozijai yra labai svarbus veiksnys.

Šiais laikais NdFeB magnetai yra patys populiariausi. Lyginant su SmCo jie yra stipresni mechaniškai, mažiau atsparūs temperatūrai ir lengvai oksiduojami, todėl buvo sukurti paviršių apdorojimo būdai iš įvairių medžiagų (nikelio, cinko ir alavo, vario, aukso, epoksidinės dervos ir kt.)

Nuolatiniai magnetai turi savybę prarasti visas magnetines savybes pasiekę tam tikrą temperatūrą. ši temperatūra vadinama Curie temperatūra t_C . Ji lemia maksimalią darbinę nuolatinio magneto temperatūrą. Nuolatiniai magnetai dažniausiai naudojami temperatūroje nuo 0 °C iki maksimalios darbinės temperatūros, išimtis yra tik Ba-ferito magnetai, nes juos galima naudoti iki -40 °C.

Kai magnetas naudojamas aukštesnėje negu maksimali darbinė magneto temperatūra, bet mažesnė negu Curie temperatūra, tam tikras magnetizmo procentas yra negrįžtamai prarandamas. Esant tokiai situacijai, kai magneto temperatūra grįžta į kambario temperatūrą (20 °C), magnetas turės magnetines savybes, tačiau stiprumas bus silpnesnis.

Toliau pateikta 1.1 lentelė, kurioje palyginamos nuolatinių magnetų savybės.

1.1 lentelė. Nuolatinių magnetų tipų palyginimas [1]

NM medžiagos tipas	Maksimali vertė				
	Maksimali produkto energija BH_{max} , (kJ/m ³)	Liekama indukcija B_r (T)	Koerciškumas H_c (kA/m)	Maksimali darbinė temperatūra $T_{op\ max}$ (°C)	Curie temperatūra t_c (°C)
Keraminis	32	0,4	240	200	450
Alnico	36	1,15	130	540	860
SmCo	250	1,00	1200	350	800
NdFeB	430	1,20	1350	200	350

1.2.2. Jungai

Jungai paprastai gaminami iš magnetiškai minkšto plieno. Plienas klasifikuojamas pagal Europos Sąjungos standartą EN 10020:2000 „Plieno rūšių apibrėžimas ir klasifikavimas“. Standarte apibrėžtas klasifikavimas pagal cheminę sudėtį ir pagrindines savybes. Vienas iš plieno tipų – elektrinis plienas (dar vadinamas silicio plienas, silicio elektrinis plienas, transformatoriaus plienas arba laminavimo plienas), tai geležies ir silicio lydinys.

Elektriniai plienai skirstomi į orientuotą ir neorientuotą elektrinį plieną. Orientuotame pliene kristalų kubo kraštas yra lygiagretus plieno valcavimo kryptims. Tokie elektriniai plienai turi didelį magnetinį pralaidumą. Neorientuoti elektriniai plienai, turi tokias magnetines savybes, kurios bet kuria kryptimi yra beveik tokios pačios medžiagos plokštumoje. Neorientuoti elektriniai plienai su specialiu apdorojimu gali turėti didelį laidumą net esant dideliame magnetiniame lauke. Elektrinių plienų magnetinės savybės priklauso nuo terminio apdorojimo. Visiškai apdoroti elektriniai plienai paprastai yra padengiami izoliacine danga. 1.2 lentelėje pateikti elektrinių plienų tipai ir jų pritaikymas.

1.2 lentelė. Elektriniai plienai ir jų panaudojimas [1]

Orientuotas elektrinis plienas	Neorientuotas elektrinis plienas
Transformatorių šerdys	Dideli ir maži motorai ir generatoriai
Dideli generatoriai	Dideli ir maži transformatoriai
Įrenginiai, kuriems reikia kryptinių magnetinių charakteristikų	Uždegimo ritės

Naujausiuose tyrimuose [5] jungui vietoj plieno naudojamas akrilinis diskas. Dėl jo naudojimo galima pašalinti magnetinio prisotinimo, atsirandančio ant plieninio jungo, poveikį ir sumažinti NdFeB magnetų kiekį magnetinėje sankaboje, taip pat tai sumažina ašines jėgas dėl ko atsiranda galimybė lengviau atskirti du diskus, tačiau sumažinamas maksimalus sukimo momentas. Akrilas yra optiškai skaidrus amorfinis termoplastikas, kurio neveikia drėgmė, jis pasižymi dideliu stiprumo ir svorio santykiu. Chemiškai tai yra sintetinis metilo polimeras metakrilato monomeras. Akrilą galima lengvai pjaustyti, gręžti, frezuoti, taip pat lengva sulenkti esant mažai temperatūrai.

1.2.3. Sandarinimo ekranai

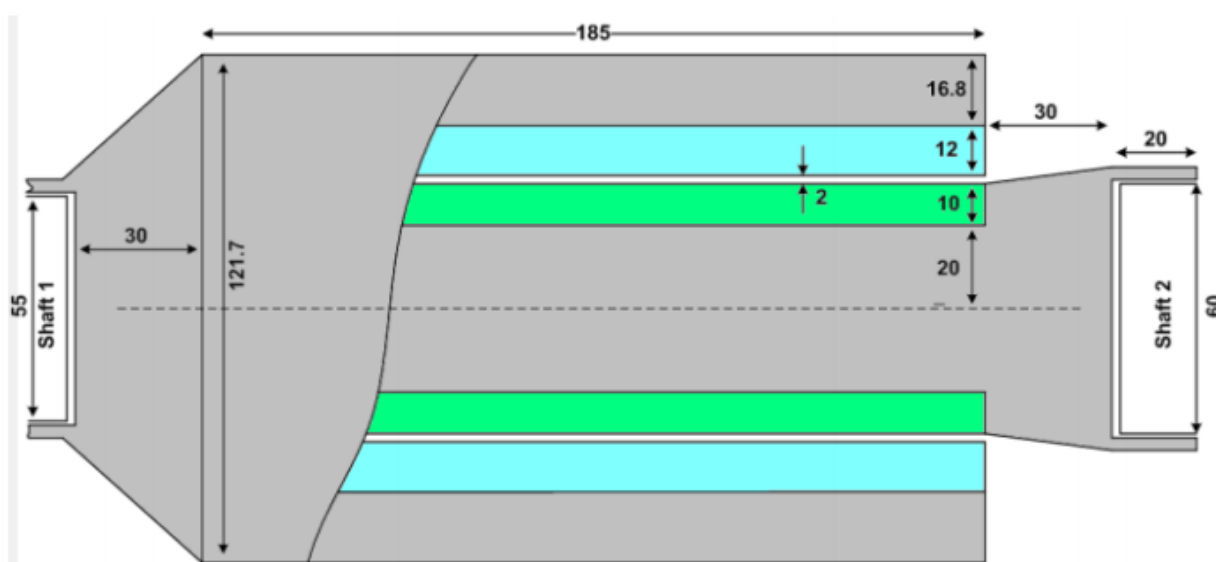
Magnetinės sankabos dažniausiai gaminamos ir naudojamos su sandarinimo ekranais (angl. *sealing screens*). Šis ekranas gali būti pagamintas iš įvairių medžiagų priklausomai nuo gamintojo.

Populiariausios medžiagos, iš kurių gaminami sandarinimo ekranai, tai nerūdijantis plienas, anglies pluoštas ar oksido keramikos.

1.2.4. Magnetinės sankabos panaudojimo galimybės

Kai kurie nardymo aparatai ir nuotoliniu būdu valdomos povandeninės transporto priemonės naudoja magnetinę sankabą, kad elektros variklio sukimo momentas būtų perduodamas į propelerį [6].

Taip pat atliekami tyrimai panaudoti magnetinę sankabą vėjo turbinose, kaip priemonė užtikrinti didesnę patikimumą [7]. Kitame tyrime, teoriškai apskaičiuota, kokių geometrinių parametrų magnetinė sankaba, galėtų pakeisti įprastą sankabą. Nustatyta, kad magnetinės sankabos gali būti pritaikytos vėjo turbinose, tačiau neįmanoma gauti identiškų magnetinės ir įprastos sankabos maksimalaus sukimo momento verčių. Pažymima, kad magnetinės sankabos privalumas, yra tas, kad ji gali išlaikyti daugiau mechaninės apkrovos ir geriau blokuoti vėjo turbiną negu įprasta sankaba [8]. 1.5 pav. parodyta [8] sumodeliuota radialinė magnetinė sankaba, kuria galima pakeisti įprastą sankabą.



1.5 pav. Radialinė magnetinė sankaba, kuria galima būtų pakeisti įprastą sankabą vėjo turbinose, ir jos geometriniai parametrai [8]

Magnetinė sankaba panaudojama chemijoje naudojamose magnetinėse maišyklėse, dažų maišyklėse, pramonės įrenginiuose, taip pat akvariumuose, automobiliuose (kondicionieriaus sujungimui) [9], magnetinės sankabos principą bandoma pritaikyti oro transporte, net kosminiuose laivuose [10]. Tirtas ir magnetinių sankabų pritaikymas elektriniuose automobiliuose [11] ar elektrinių automobilių įkrovimo stotelėse [12].

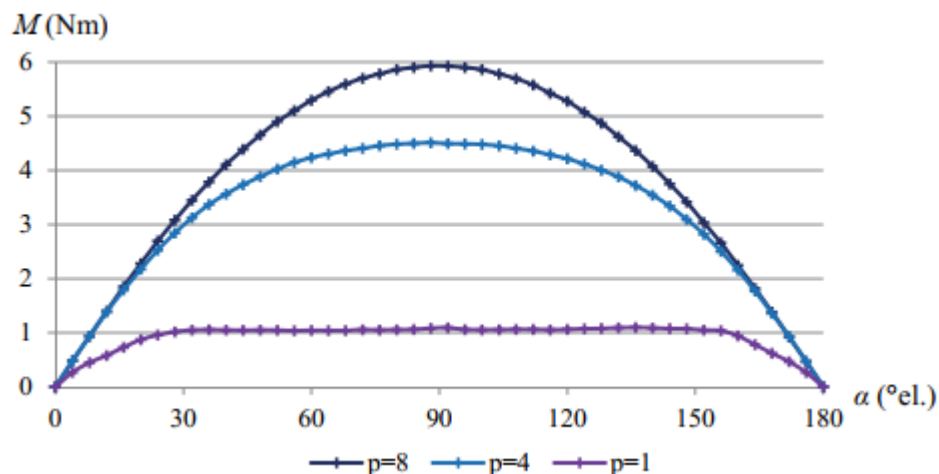
Vienas iš netikėčiausių magnetinės sankabos pritaikymų – lietuvių įkurtos įmonės „Millo Appliances“ sukurtas ir užpatentuotas vaisių ir daržovių trintuvas, kurio viduje yra variklis ir magnetinė sankaba [13]. Plaktuvo prototipas parodytas 1.6 pav.



1.6 pav. „Millo Appliances“ sukurtas daržovių ir vaisių plaktukas, panaudojant magnetinę sankabą [13]

1.3. Pagrindinės mechaninės magnetinės sankabos charakteristikos

Iš ankstesnių skyrių matyti, kad magnetines sankabas galima gaminti iš įvairių medžiagų, ir visos medžiagos turi skirtingas magnetines savybes. Šios savybės daro didelę įtaką magnetinės sankabos sukimo momentui. Magnetinės sankabos pagrindinė mechaninė charakteristika – maksimalus sukimo momentas. Mechaninio radialinės magnetinės sankabos sukimo momento priklausomybė nuo pusinės movos pasukimo kampo skirtingam polių porų skaičiui parodyta 1.7 pav. [14].

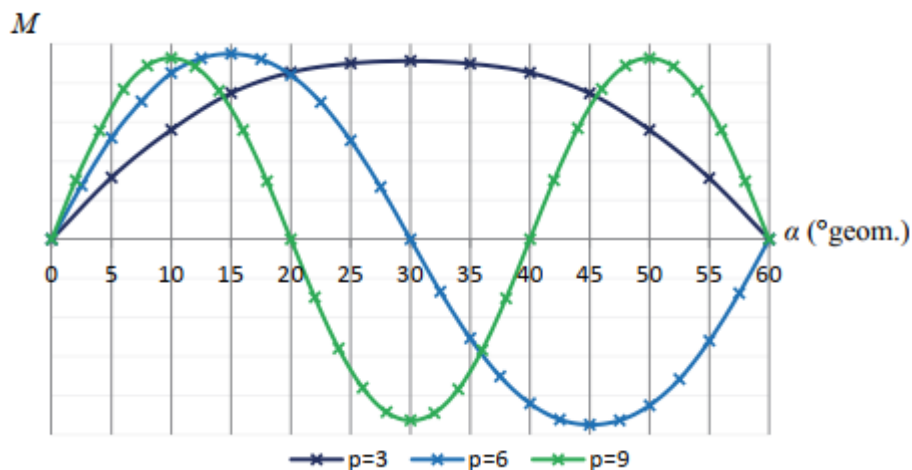


1.7 pav. Sukimo momento priklausomybė nuo kampinio poslinkio, elektriniais laipsniais [14]

Pagal šį grafiką matome, kad didžiausias sukimo momentas bus, kai cilindrinė magnetinė sankabos pusinės movos bus nukreiptos viena į kitą stačiu kampu el. laipsniais, tai yra pasuktas taip, kad vienas diskas būtų pasuktas per pusę magneto dydžio. Kad nustatyti, koku kampu bus geometriniais

laipsniais, panaudojama formulė 1.1.1. [15]. 1.8 pav. pateikta, kaip priklauso maksimalus sukimo momentas nuo kampinio poslinkio keičiant polių porų skaičių.

$$\alpha = \frac{90^\circ}{p} \quad (\text{Formulė 1.1.1})$$



1.8 pav. Sukimo momento priklausomybė nuo kampinio poslinkio, geometriniais laipsniais [14]

1.4. Magnetinės sankabos modeliavimo metodai

Norint numatyti sukimo momentą ir ašinę jėgą, būtina tiksliai žinoti magnetinio lauko pasiskirstymą. Magnetinį lauką galima įvertinti analitiniais metodais [16] [17] arba skaitmeniniais metodais, tokiais kaip baigtinių elementų metodas [18] [19] [20].

Baigtinių elementų metodu modeliavimas suteikia tikslius rezultatus, įvertinant trijų dimensijų (3-D) poveikį ir magnetinių medžiagų netiesiškumą. Tačiau šis metodas užima daug laiko kompiuteriu ir nėra lankstus pirmojo projekto etapo metu.

Skaičiavimai analitiniais metodais užima mažiau laiko nei baigtinių elementų skaičiavimai, todėl tai yra geras būdas pirminiam ašinių magnetinių sankabų vertinimui pirmajame projekto etape.

Literatūroje pateikiami du pagrindiniai magnetinės sankabos modeliavimo metodai:

1. 3D modeliavimas pagrįstas Amperien model naudojant Bio-Savaro dėsnį arba Coulombian modelį naudojant įkrovimo paviršius, tai yra baigtinių elementų metodo modelis [21] [22] [23]. Šis metodas naudojamas šio projekto tiriamojo darbo dalyje.
2. Furje analizė paremta Maksvelo lygčių kintamųjų atskyrimo metodu. Šiame modelyje dauguma skaičiavimų atliekami 2D, todėl nėra įvertinama labai tiksliai, tam kad įvertinti tiksliau yra įvedami įvairūs koeficientai [21] [24]. Pagal [3] 2D modeliu negalima labai tiksliai nustatyti pagrindinio magnetinės sankabos parametro – maksimalaus sukimo momento, jis nuo eksperimento metu gauto skiriasi iki 20%, todėl šio būdo šiame darbe nenaudojame, nes mums aktualus maksimalus magnetinės sankabos sukimo momentas.

1.5. Literatūros analizės išvados

1. Apžvelgti pagrindiniai magnetinių sankabų tipai – ašinės ir radialinės, kurios skiriasi magneto veikimo paviršiumi, yra sinchroninės, taip pat apžvelgta sūkurinių srovių magnetinė sankaba, kuri yra asinchroninė.
2. Magnetinių sankabų naudojamos vietose, kur gali būti didelis slėgis, aukšta temperatūra, todėl dažnai panaudojamos nardymo aparatuose, lėktuvuose, vėjo turbinose, tačiau galima panaudoti ir elektromobiliuose, jų įkrovimo stotelėse ar automobilių sistemose.
3. Magnetinės sankabos dvi pagrindinės dalys yra nuolatinis magnetas ir jungas, tiriamajame darbe bus tiriama, kaip nuo magnetinių ir geometrinių charakteristikų keičiasi visos magnetinės sankabos charakteristikos.
4. Pagrindinė magnetinės sankabos charakteristika – sukimo momentas, kuris priklauso nuo visų panaudotų medžiagų magnetinių ir geometrinių charakteristikų.

2. Tiriamasis darbas

Tiriamąo darbo tikslas – ištirti ašinę magnetinę sankabą baigtinių elementų metodu (angl. *Finite Elements Method – FEM*) veikiančia programine įranga ir nustatyti, kaip keičiasi mechaninės magnetinės sankabos charakteristikos keičiant magnetinius ir geometrinius elementų parametrus.

Uždaviniai:

1. Sudaryti ašinės magnetinės sankabos modelį;
2. Verifikuoti ašinės magnetinės sankabos modelį;
3. Ištirti ašinės magnetinės sankabos mechanines charakteristikas keičiant polių porų skaičių;
4. Ištirti ašinės magnetinės sankabos mechanines charakteristikas keičiant magnetų storį;
5. Ištirti ašinės magnetinės sankabos mechanines charakteristikas keičiant jungo medžiagą;
6. Ištirti ašinės magnetinės sankabos mechanines charakteristikas keičiant feromagnetinio jungo storį;
7. Ištirti ašinės magnetinės sankabos mechanines charakteristikas keičiant magnetinės sankabos diskų dydį;

2.1. Programinė įranga ir ašinės magnetinės sankabos modelis

2.1.1. Naudota programinė įranga COMSOL

„COMSOL Multiphysics“ yra kompleksinė baigtinių elementų analizės, sprendimų ir daugiafunkcinė modeliavimo programinė įranga. Ši programinė įranga turi atskirus išplėtinius, kurie yra naudojami elektros, mechaniniams, skysčių, cheminiams, daugiafunkciniams skaičiavimams. Taip pat, įranga turi patogų duomenų įkėlimo/iškėlimo į kitą programinę įrangą modulį.

Programinėje įrangoje yra didelė medžiagų duomenų bazė (virš 2500 medžiagų), kuri padeda tiksliai įvertinti, kaip keičiasi charakteristikos, keičiant medžiagos tipą. Vienas iš aktualiausių mums programinės įrangos modulių – *AC/DC module*, kuris naudojamas modeliuoti elektrinius, magnetinius ir elektromagnetinius laukus statinėje ir mažo dažnio modeliuose [25].

COMSOL pradėtas kurti 1986 m. liepos mėnesį Svante Littmarcko ir Farhado Saeidi Karališkajame technologijos institute Stokholme, Švedijoje.

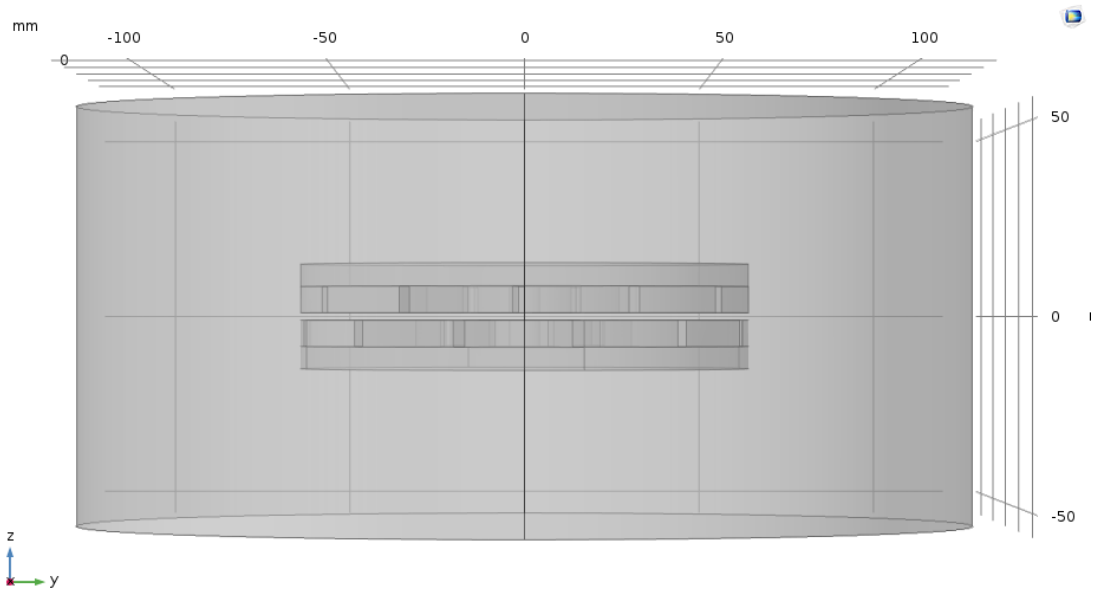
2.1.2. COMSOL Multiphysics ašinės magnetinės sankabos modelis

Su COMSOL Multiphysics sudaryta magnetinė sankaba, kurios parametrus galima labai lengvai keisti programinės įrangos aplinkoje. Pagrindiniai ašinės magnetinės sankabos parametrai parodyti 2.1 pav.

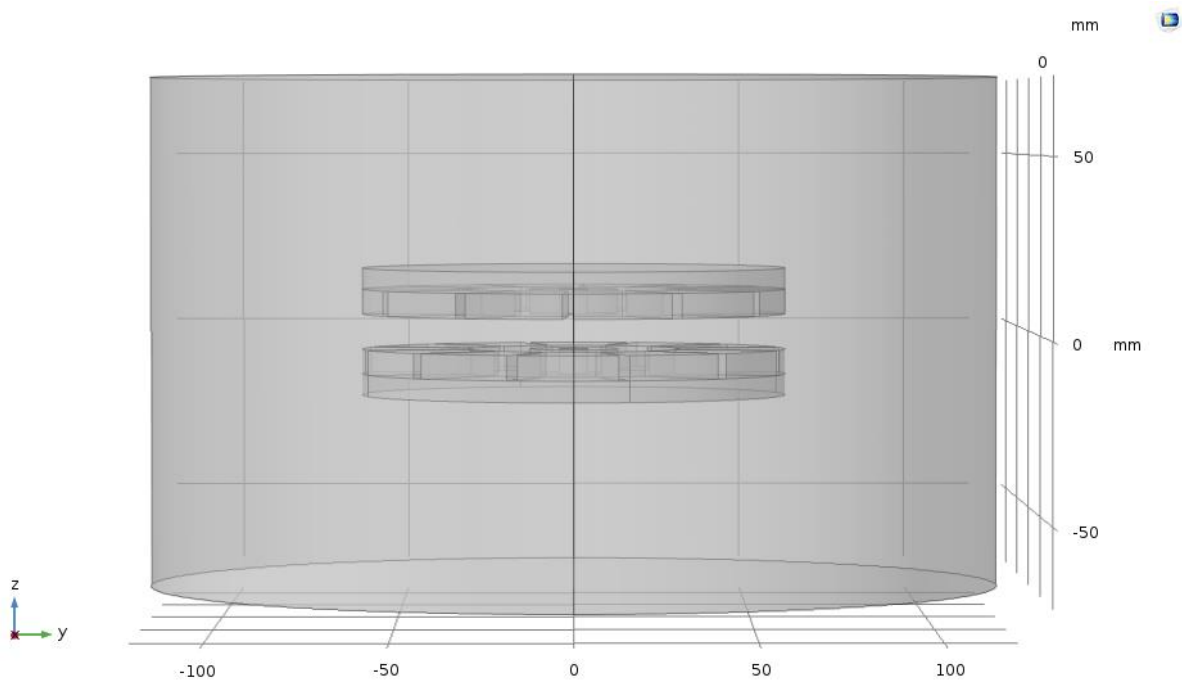
Name	Expression	Value	Description
Hag	2 [mm]	0.002 m	Oro tarpo aukštis
p	6	6	Polių porų skaičius
alpha_d	15 [deg]	0.2618 rad	Pasūkimo kampas
Rmo	60[mm]	0.06 m	Išorinis pirmo disko mag...
Rmo2	Rmo	0.06 m	Išorinis antro disko magn...
Rmi	30[mm]	0.03 m	Vidinis pirmo disko mag...
Rmi2	Rmi	0.03 m	Vidinis antro disko magn...
Ro	60[mm]	0.06 m	Pirmo disko išorinis spin...
Ro2	Ro	0.06 m	Antro disko išorinis spind...
Hm	7 [mm]	0.007 m	Pirmo disko magnetų au...
Hm2	7 [mm]	0.007 m	Antro disko magnetų auk...
Hs	6 [mm]	0.006 m	Pirmo disko jungo aukštis
Hs2	6 [mm]	0.006 m	Antro disko jungo aukštis
alpha	$360/(p*2)*0.9$ [deg]	0.47124 rad	Posūkio kampas
Brem	1.25 [T]	1.25 T	Liekama NM indukcija
Ri	100[mm]	0.1 m	Vidinis sankabos spindulys

2.1 pav. Pagrindiniai ašinės magnetinės sankabos modelio geometriniai ir magnetiniai parametrai „COMSOL Multiphysics“ aplinkoje

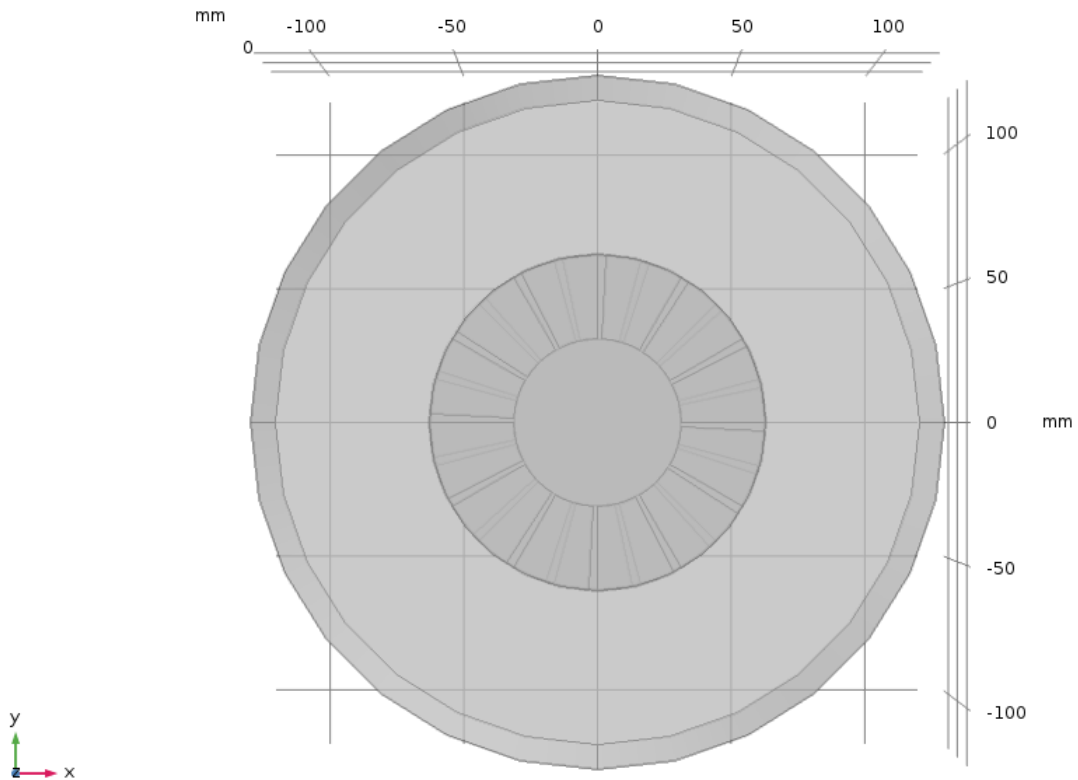
Kadangi projektuojama 3D modeliavimo programine įranga, gaunamas 3D modelis, kurio atvaizdavimas pateiktas 2.2, 2.3, 2.4 pav.



2.2 pav. Ašinės magnetinės sankabos modelis, kai oro tarpas $h_{ag}=2\text{mm}$

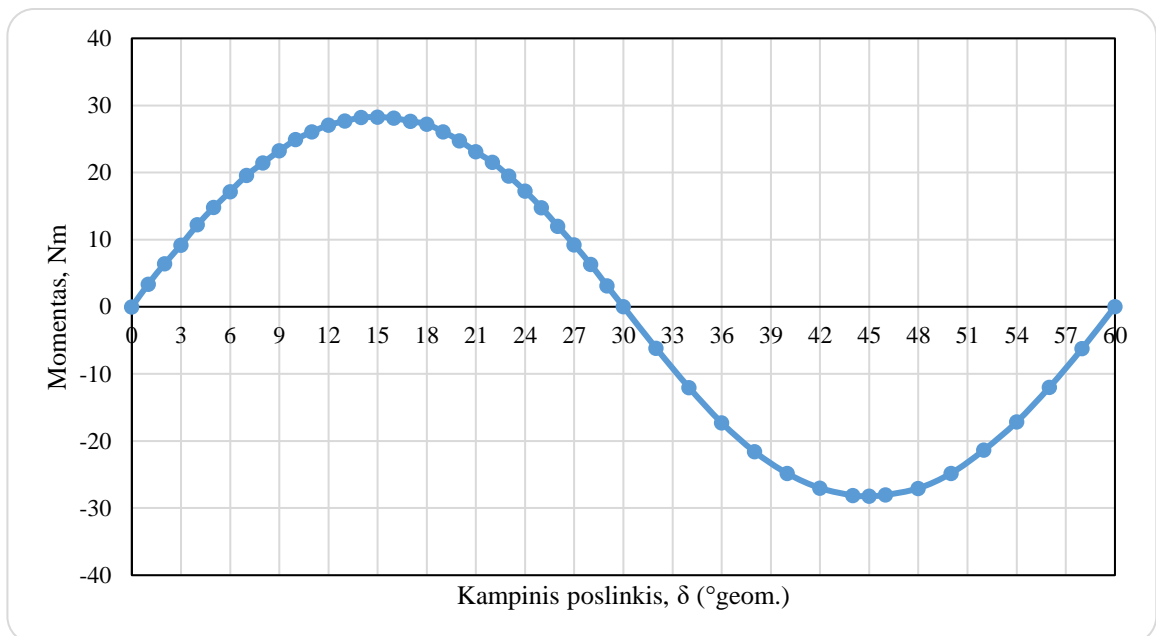


2.3 pav. Ašinės magnetinės sankabos modelis, kai oro tarpas $h_{ag}=10\text{mm}$



2.4 pav. Ašinės magnetinės sankabos modelis, vaizdas iš viršaus

Pasirinkta patikrinti ar galioja literatūros analizės dalyje 1.8 pav. pateikta priklausomybė. Pasirinkta magnetinė sankaba su šešiais poliais ($p=6$).



2.5 pav. Tiriomojo darbo metu sudaryto modeliū gauta sukimo momento priklausomybė nuo kampinio poslinkio, geometriniais laipsniais

Iš šio grafiko patvirtiname, kad su 6 polių poromis maksimalus magnetinės sankabos sukimo momentas yra ties 15° , grafikai sutampa su literatūros analizės dalyje 1.8 pav. pateikta verte.

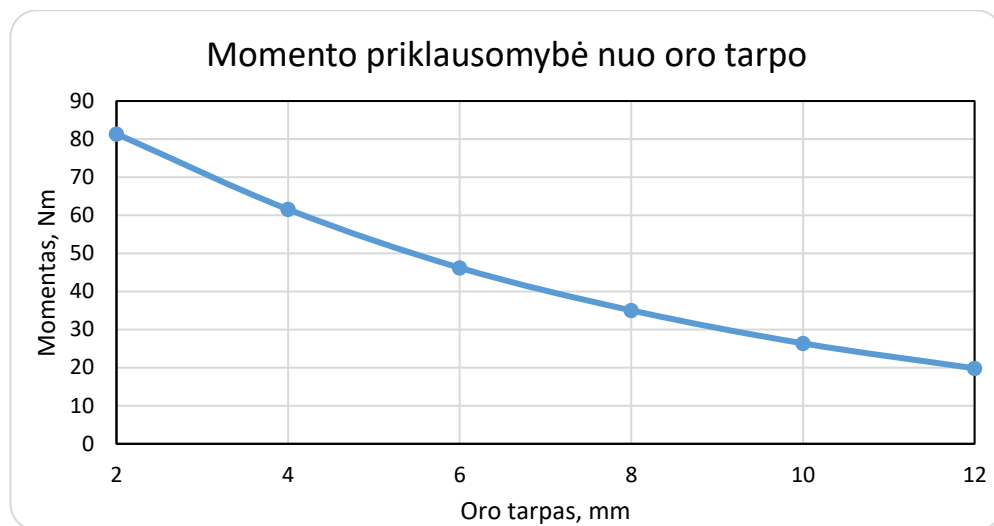
2.2. Ašinės magnetinės sankabos modelio verifikavimas

Eksperimentinės tyrimo dalies nebuvo įmanoma atlikti, todėl modelio verifikavimui buvo naudojami kitų mokslininkų eksperimentiniai ir skaičiuojamieji tyrimai. Pagal [3] parenkami identiški parametrai, pagal eksperimentinę tyrimo dalį. Visi dydžiai pateikti 2.1 lentelėje.

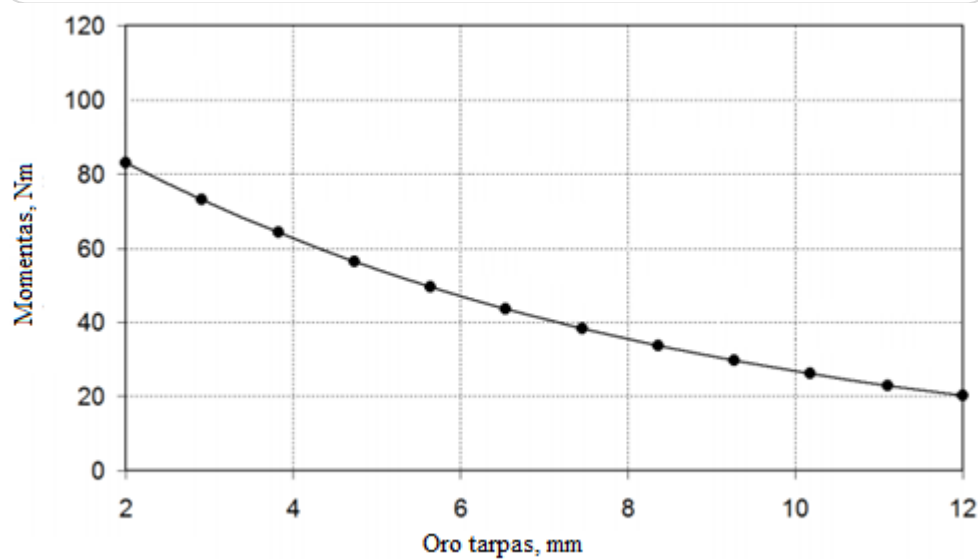
2.1 lentelė. Pagrindiniai ašinės magnetinės sankabos geometriniai parametrai

Trumpinys	Pavadinimas	Dydis
h_{ag}	Oro tarpo aukštis	Kintamas, nuo 1 iki 12 mm
p	Polių porų skaičius	Kintamas, nuo 1 iki 12
αd	Kampinis poslinkis	Kintamas, nuo 1 iki 15°
R_{mo}	Išorinis magneto spindulys	60 mm
R_{mi}	Vidinis magneto spindulys	30 mm
R_o	Išorinis disko spindulys	60 mm
H_m	Magneto storis	7 mm
H_s	Jungo storis	10 mm

Pirmiausia, palyginta, kaip tyrimo modelis sutampa su [3] tyrimo modeliu. 2.6 pav. palyginami grafikai „Momento priklausomybė nuo oro tarpo“.



(a)



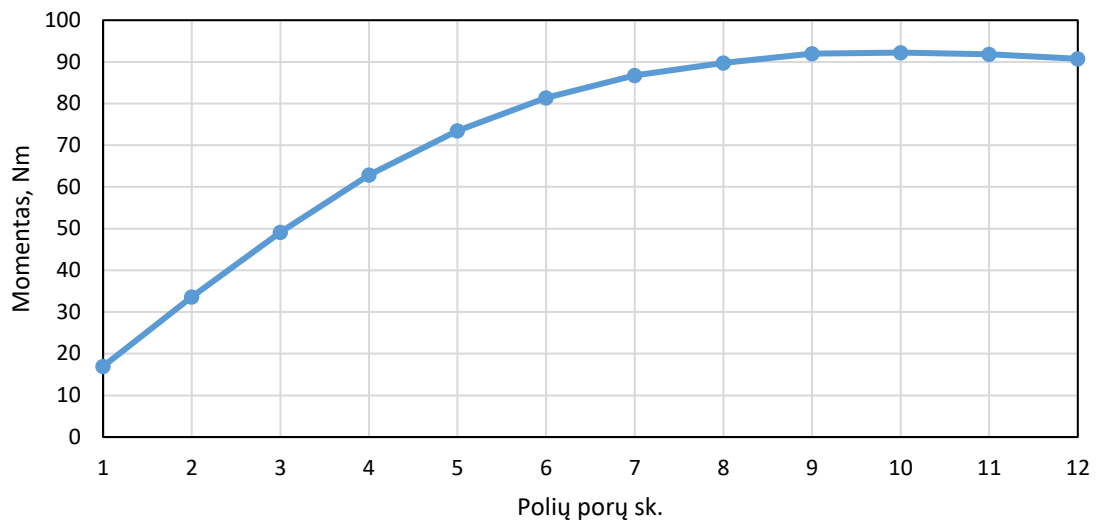
(b)

2.6 pav. Ašinės magnetinės sankabos sukimo momento priklausomybė nuo oro tarpo

(a) modeliuojama magnetinė sankaba; (b) [3] tyrimo modelis

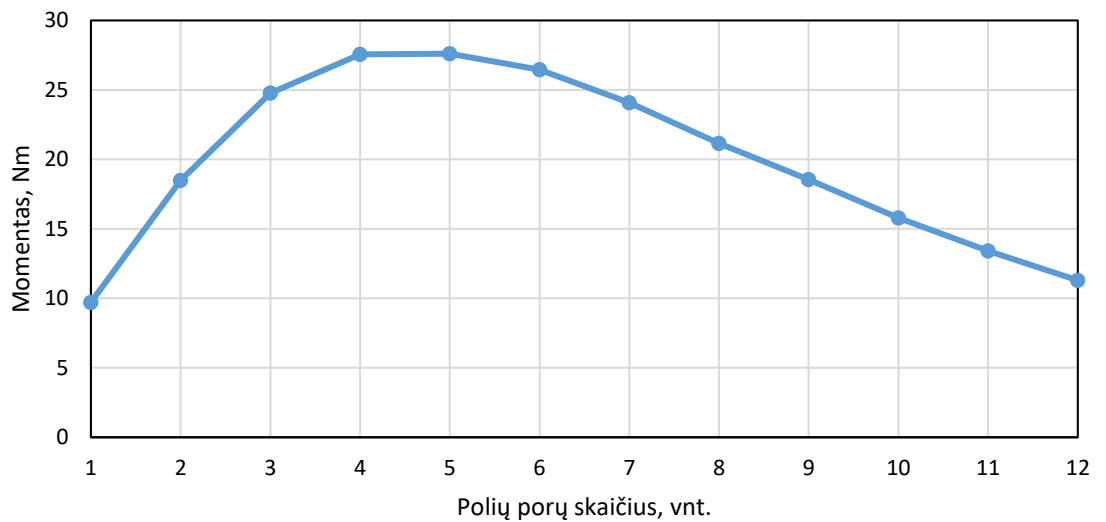
Identiškai patikrinta ir sukimo momento priklausomybė nuo polių porų skaičiaus. Rezultatai pateikti 2.7 pav., palyginimui pateikti [3] tyrimo rezultatai 2.8 pav.

Momento priklausomybė nuo polių porų sk.



(a)

Momento priklausomybė nuo polių porų sk.

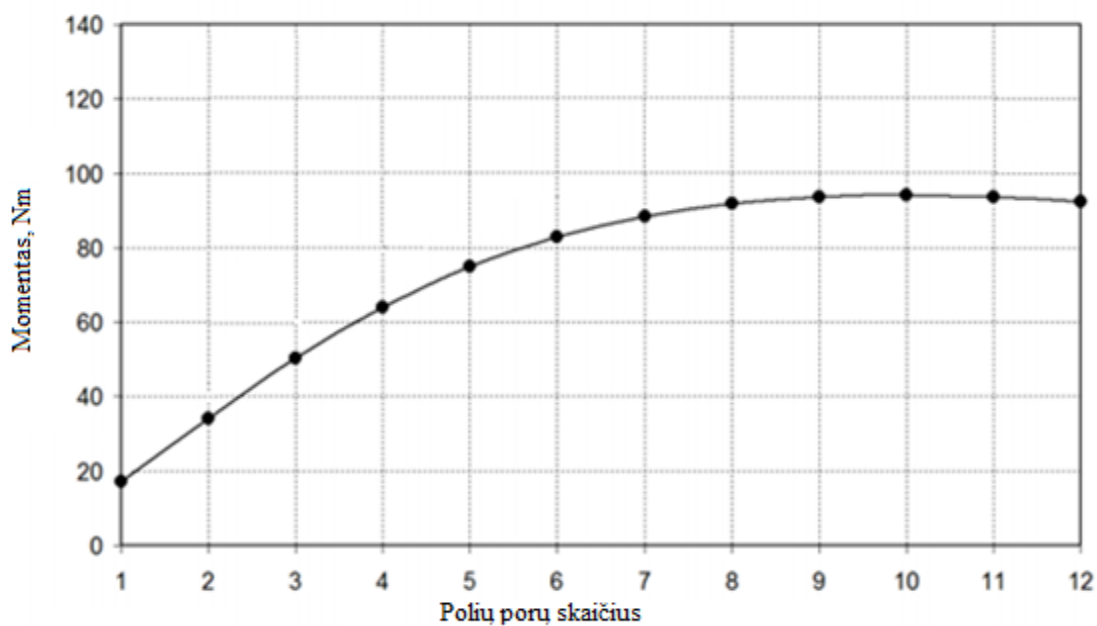


(b)

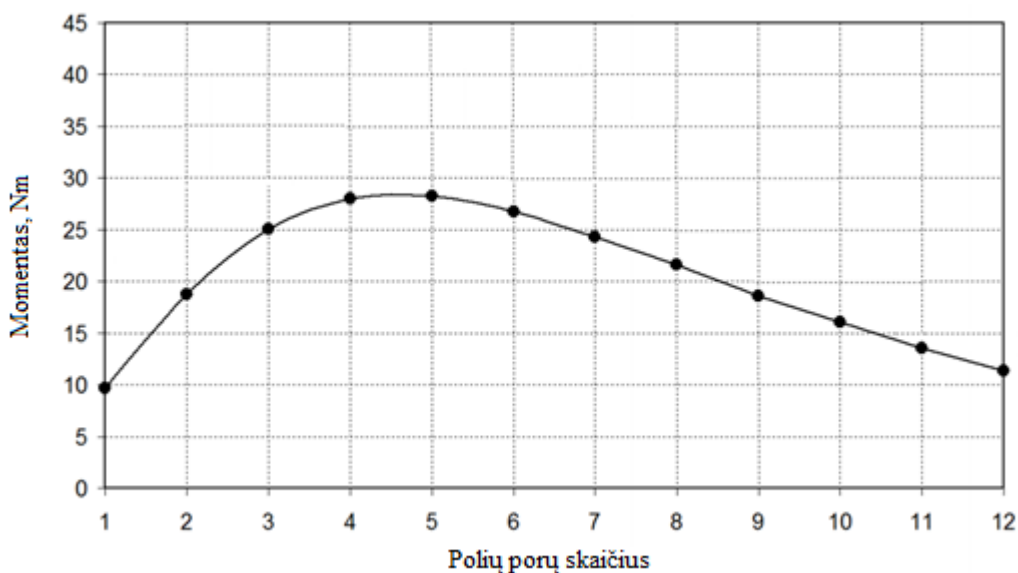
2.7 pav. Momento priklausomybė nuo polių porų skaičiaus pagal sudarytą modelį

(a) Oro tarpas $h_{ag}=2$ mm

(b) Oro tarpas $h_{ag}=10$ mm



(a)



(b)

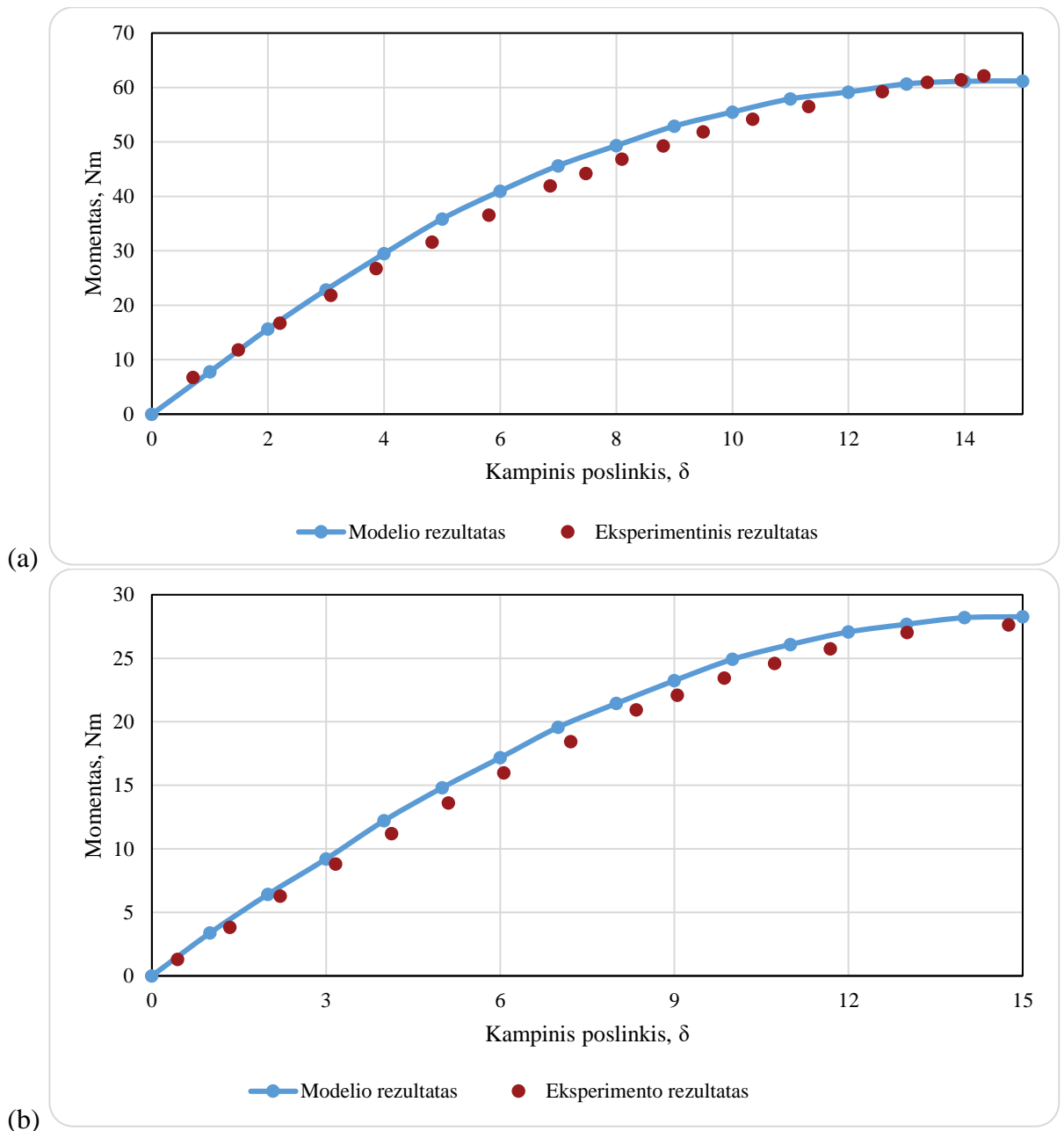
2.8 pav. Momento priklausomybė nuo polių porų skaičiaus pagal [3]

(a) Oro tarpas $h_{ag}=2$ mm

(b) Oro tarpas $h_{ag}=10$ mm

Pagal grafikus modeliuojamos magnetinės sankabos ir [3] šaltinio sumodeliuoti rezultatai mažai skiriasi.

Toliau patikriname, kaip magnetinės sankabos modelis atitinka eksperimentiškai gautus rezultatus. 2.9 pav. pateikta išmatuota eksperimentiškai [3] ir apskaičiuota modeliu momento priklausomybė nuo kampinio poslinkio.



2.9 pav. Modelio apskaičiuoto ir eksperimentiniu būdu apskaičiuota momento priklausomybė nuo kampinio poslinkio δ .

(a) Oro tarpas $h_{ag} = 4$ mm

(b) Oro tarpas $h_{ag} = 9,5$ mm

Iš pateikto 2.9 pav. matome, kad apskaičiuotų modeliu su „COMSOL Multiphysics“ programine įranga beveik nesiskiria nuo eksperimentiškai patikrintų rezultatų. Didžiausias skaičiavimo nuokrypis – apie 7-10%, tačiau tai yra nedidelis nuokrypis nuo eksperimentinių rezultatų.

2.3. Momento priklausomybės nuo geometrinių ir magnetinių parametru tyrimas

Toliau buvo tiriama, kaip atskirų ašinės magnetinės sankabos elementų magnetinės ir geometrinės savybės lemia maksimalų ašinės magnetinės sankabos sukimo momentą.

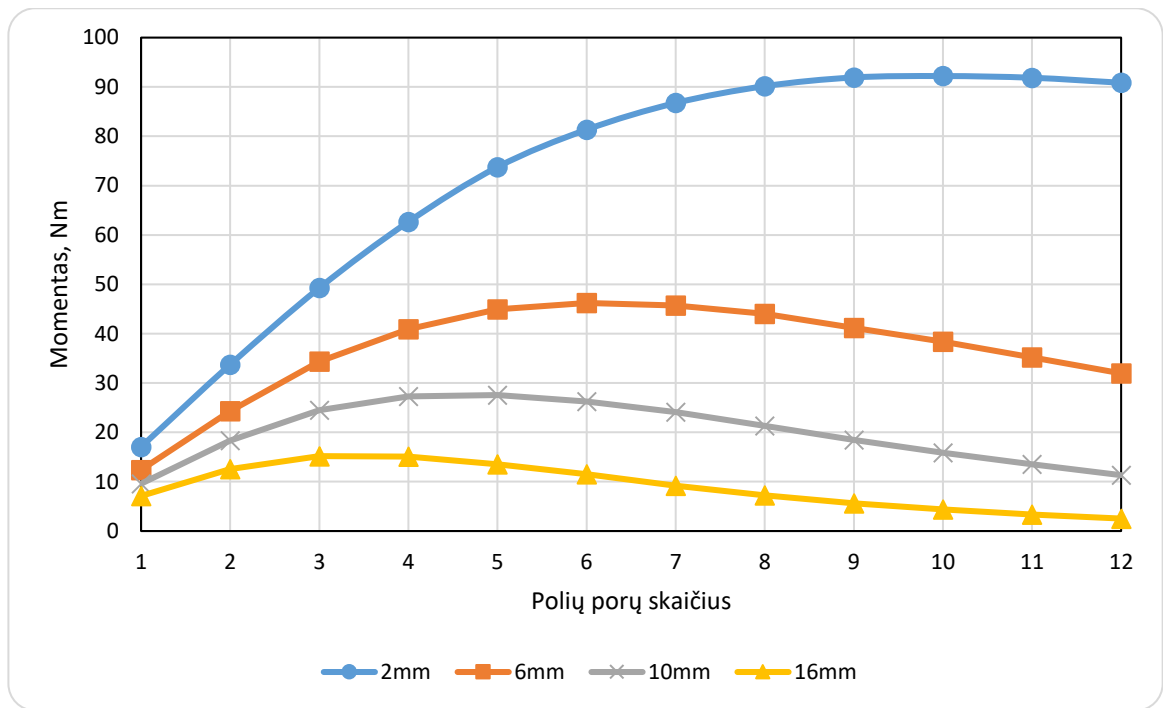
Prie kiekvieno tyrimo pateiktos lentelės su pagrindinėmis ašinės magnetinės sankabos savybėmis, lentelėje nurodoma kurie dydžiai keičiami, kurie dydžiai yra pastovūs. Pasirinkta, kad pradinis oro tarpas 2 mm, nes mažesnio oro tarpo dažnai neįmanoma nustatyti dėl konstrukcijos ribojimų [3]. Oro tarpas didinamas 2 mm žingsniu iki 20 mm, daugiau didinti nėra didelės prasmės, nes gaunamas palyginti mažas maksimalus sukimo momentas.

2.3.1. Ašinės magnetinės sankabos maksimalaus sukimo momento priklausomybė nuo polių porų skaičiaus

Šiame tyrime siekiama išsiaiškinti, kaip polių porų skaičius lemia maksimalų sankabos sukimo momentą. Modeliavimo metu parinkta vienodų geometrinių parametru ašinė magnetinė sankaba ir keista tik jos polių porų skaičius ir kampinis poslinkis, taip, kad visada būtų gaunamas maksimalus ašinės magnetinės sankabos sukimo momentas. Kai yra 9 polių poros kampinis poslinkis 10° , kai 6 – 15° , kai 3 – 30° ir t.t. šis kampinis poslinkis apskaičiuojamas panaudojant 1.1.1. formulę. Pagrindiniai tiriamos ašinės magnetinės sankabos geometriniai parametrai pateikti 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Pagrindiniai ašinės magnetinės sankabos geometriniai parametrai 2.4.1. skyriaus tyrimui

Trumpinys	Pavadinimas	Dydis
Hag	Oro tarpo aukštis	Kintamas
p	Polių porų skaičius	1-12
αd	Kampinis poslinkis	Kintamas, kad būtų gaunamas maksimalus sukimo momentas
Rmo	Išorinis magneto spindulys	60 mm
Rmi	Vidinis magneto spindulys	30 mm
Ro	Išorinis disko spindulys	60 mm
Hm	Magneto storis	7 mm
Hs	Jungo storis	10 mm



2.10 pav. Ašinės magnetinės sankabos sukimo momento priklausomybė nuo polių porų skaičiaus, keičiant oro tarpo dydį

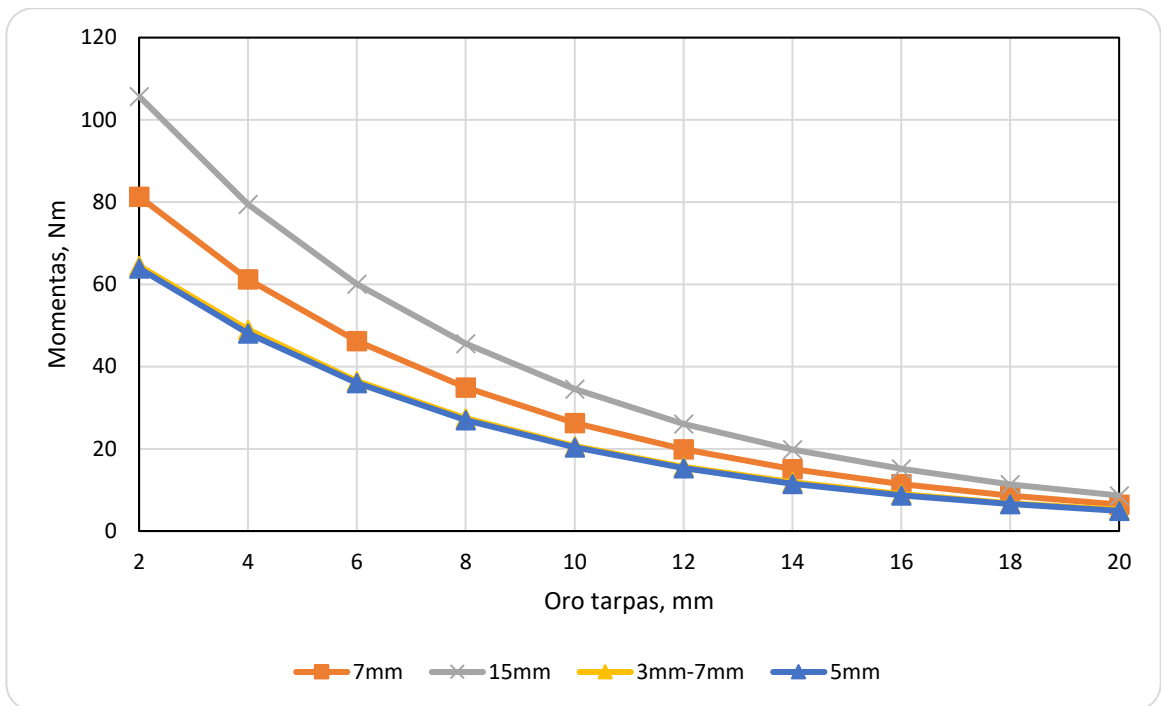
Iš 2.10 pav. matome, kad prie tam tikro oro tarpo dydžio yra optimalus polių porų skaičius. Prie oro tarpo 2 mm optimalus polių porų skaičius yra 10 porų, prie 6 mm oro tarpo – 6 polių poros, prie 10 mm – 5 polių poros, prie 16 mm oro tarpo optimalu yra 3 polių poros.

2.3.2. Ašinės magnetinės sankabos maksimalaus sukimo momento priklausomybė nuo nuolatinių magnetų storio

Šioje dalyje ištirta, kaip ašinės magnetinės sankabos maksimalus sukimo momentas priklauso nuo magnetų storio. Parinkti 4 variantai – kai abu magnetai yra 15 mm, 7 mm, 5 mm storio ir kai vienas magnetas yra 7 mm, kitas – 3 mm storio. Pagrindiniai tiriamos ašinės magnetinės sankabos geometriniai parametrai pateikti 2.3 lentelėje.

2.3 lentelė. Pagrindiniai ašinės magnetinės sankabos geometriniai parametrai 2.4.2. skyriaus tyrimui

Trumpinys	Pavadinimas	Dydis
Hag	Oro tarpo aukštis	Kintamas nuo 2 iki 20 mm
p	Polių porų skaičius	6
α_d	Kampinis poslinkis	15°
Rmo	Išorinis magneto spindulys	60 mm
Rmi	Vidinis magneto spindulys	30 mm
Ro	Išorinis disko spindulys	60 mm
Hm	Magneto storis	5, 7, 15, 3 ir 7
Hs	Jungo storis	10 mm



2.11 pav. Ašinės magnetinės sankabos sukimo momento priklausomybė nuo oro tarpo, keičiant magnetų storį

Gauti rezultatai logiški, kuo didesnis magneto storis, tuo stipresnis yra magnetinis laukas, ir tuo didesnę maksimalų sukimo momentą turi ašinė magnetinė sankaba. Kai ašinės magnetinės sankabos abiejų diskų magnetai yra 15 mm storio jo maksimalus sukimo momentas, prie 2 mm oro tarpo yra 65,5% didesnis, negu kai abiejų diskų magnetų storis 5 mm.

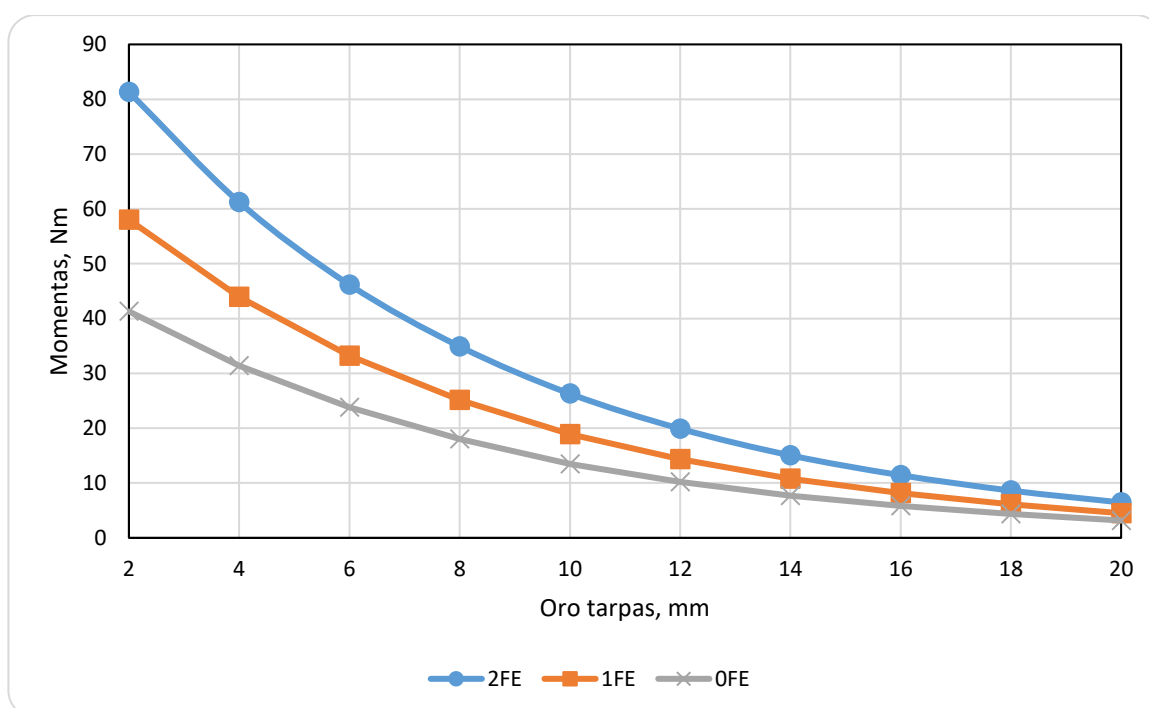
Įdomu, kad kai abu magnetai 5mm ir kai vienas 7mm, kitas 3mm rezultatai gaunasi beveik identiškai.

2.3.3. Ašinės magnetinės sankabos maksimalaus sukimo momento priklausomybė nuo jungo medžiagos

Šioje dalyje tiriama, kokią įtaką jungo medžiaga daro mechaninėms magnetinės sankabos charakteristikoms. Keičiamas oro tarpo dydis ir jungo medžiaga. Ištirti visi trys atvejai: kai abu jungai pagaminti iš feromagnetinės medžiagos (2.12 pav. 2FE), kai vienas diskas yra feromagnetikas, kitas ne feromagnetikas (2.12 pav. 1FE) ir kai abu jungai pagaminti iš ne feromagnetinės medžiagos (2.12 pav. 0FE). Pagrindiniai geometriniai ašinės magnetinės sankabos parametrai pateikti 2.4 lentelėje.

2.4 lentelė. Pagrindiniai ašinės magnetinės sankabos geometriniai parametrai 2.4.3. skyriaus tyrimui

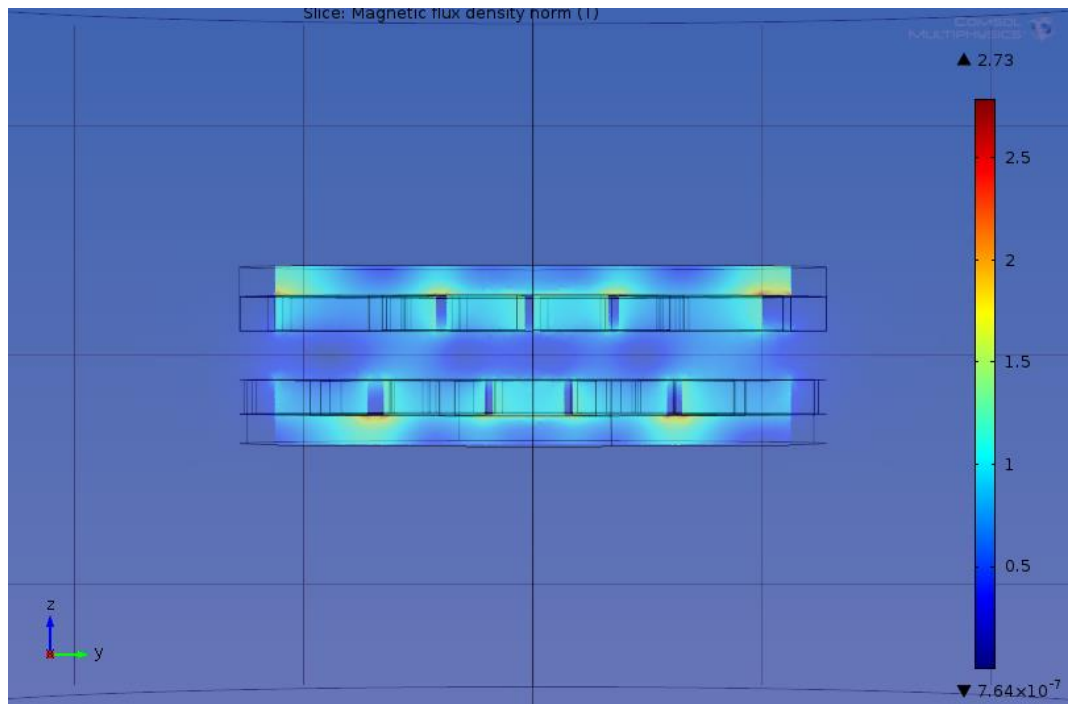
Trumpinys	Pavadinimas	Dydis
Hag	Oro tarpo aukštis	Kintamas
p	Polių porų skaičius	6
αd	Kampinis poslinkis	15°
Rmo	Išorinis magneto spindulys	60 mm
Rmi	Vidinis magneto spindulys	30 mm
Ro	Išorinis disko spindulys	60 mm
Hm	Magneto storis	7 mm
Hs	Jungo storis	10 mm
Keičiama jungo medžiaga		



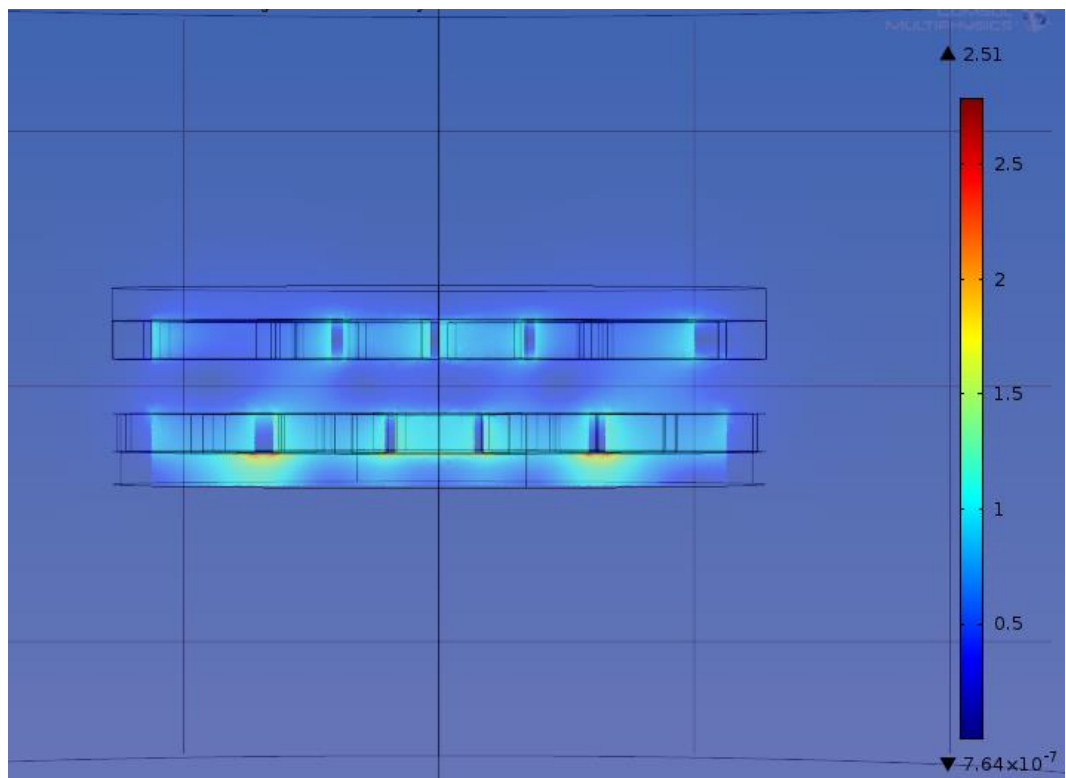
2.12 pav. Ašinės magnetinės sankabos sukimo momento priklausomybė nuo oro tarpo, keičiant jungo medžiagą

Iš 2.12 pav. matome, kad ašinės magnetinės sankabos sukimo momentas labai priklauso nuo to iš kokios medžiagos, feromagnetinės ar neferomagnetinės, pagamintas jungas. Ašinės magnetinės sankabos, kurios abu jungai pagaminti iš feromagnetinių medžiagų, sukimo momentas maždaug pusantro karto didesnis negu sankabos, kurios vienas diskas pagamintas iš feromagnetinės medžiagos, o kitas ne ir maždaug du kartus didesnis negu atveju, kai abu jungai pagaminti ne iš feromagnetinės medžiagos.

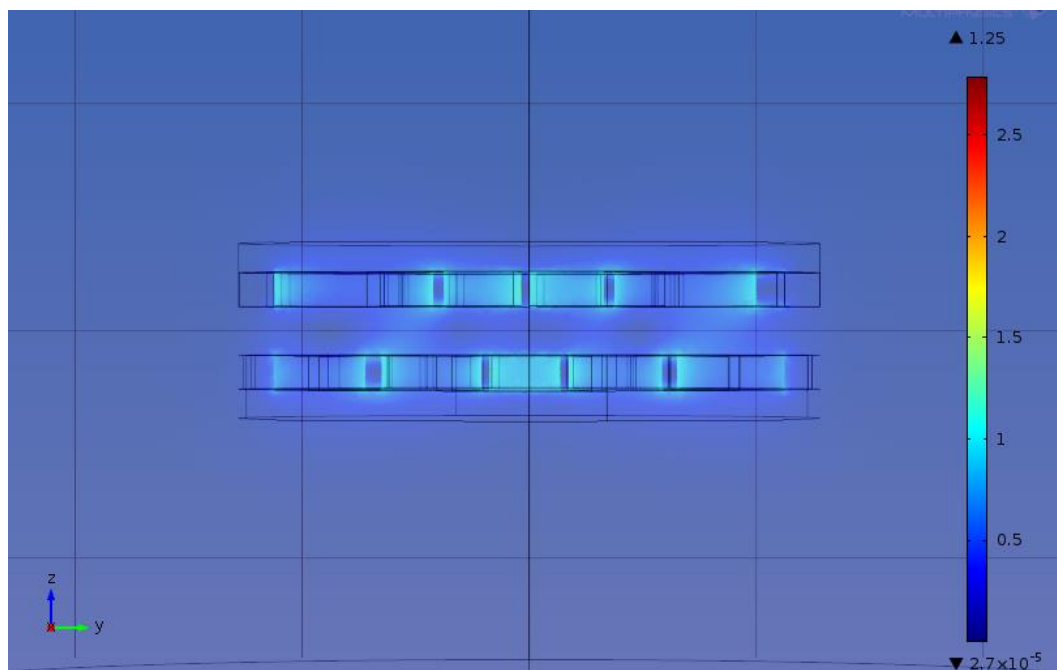
Toliau pateikiamuose 2.13, 2.14, 2.15 pav. parodytas magnetinio srauto tankis B (vienetai T – tesla) visais trimis atvejais.



2.13 pav. Magnetinės sankabos magnetinio srauto tankis B [T], kai abu jungai pagaminti iš feromagnetinių medžiagų



2.14 pav. Magnetinės sankabos magnetinio srauto tankis B [T], kai vienas jungas pagamintas iš feromagnetinių medžiagų, kitas – ne iš feromagnetinių medžiagų



2.15 pav. Magnetinės sankabos magnetinio srauto tankis B [T], kai abu jungai pagaminti iš neferomagnetinių medžiagų

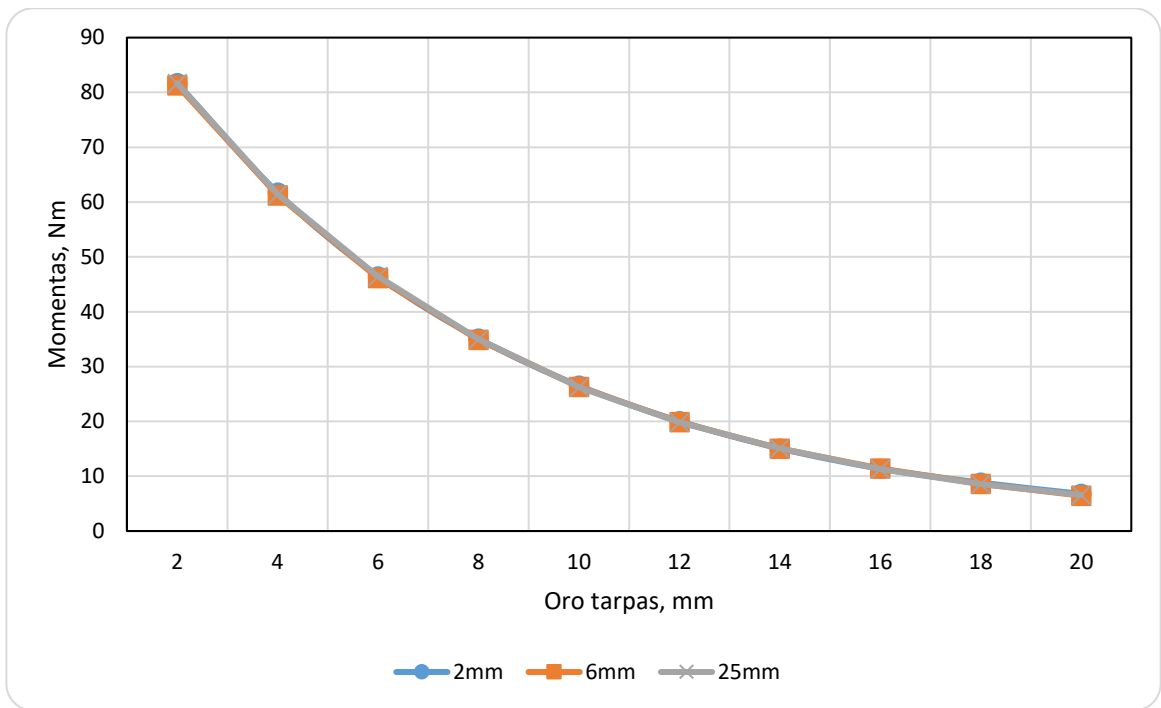
Šie paveikslai rodo, kad keičiant jungų medžiagas į neferomagnetines, mažėja magnetinio lauko tankis, dėl to mažėja ašinės magnetinės sankabos maksimalus sukimo momentas.

2.3.4. Ašinės magnetinės sankabos maksimalaus sukimo momento priklausomybė nuo jungo storio

„COMSOL Multiphysics“ programinėje įrangoje yra apie 2500 medžiagų, su jų eksperimentiškai nustatytais charakteristikomis, šiam bandymui naudotas minkštamagnetės geležies jungas, kurios magnetinė charakteristika $B(H)$ įvertinta programinės įrangos. Pagrindiniai geometriniai tiriamos ašinės magnetinės sankabos parametrai pateikti 2.5 lentelėje

2.5 lentelė. Pagrindiniai ašinės magnetinės sankabos geometriniai parametrai 2.4.4 skyriaus tyrimui

Trumpinys	Pavadinimas	Dydis
Hag	Oro tarpo aukštis	Kintamas
p	Polių porų skaičius	6
α_d	Kampinis poslinkis	15°
Rmo	Išorinis magneto spindulys	60 mm
Rmi	Vidinis magneto spindulys	30 mm
Ro	Išorinis disko spindulys	60 mm
Hm	Magneto storis	7 mm
Hs	Jungo storis	2, 6, 25 mm



2.16 pav. Ašinės magnetinės sankabos sukimo momento priklausomybė nuo oro tarpo, keičiant jungo storį. Matome, kad maksimalus sukimo momentas visiškai nepriklauso nuo jungo storio. Tai gali būti todėl, kad magnetinė sankabos jungas veikia tiesinėje $B(H)$ charakteristikos dalyje ir jungas neįmagnetinamas daugiau nei tiesinė $B(H)$ dalis.

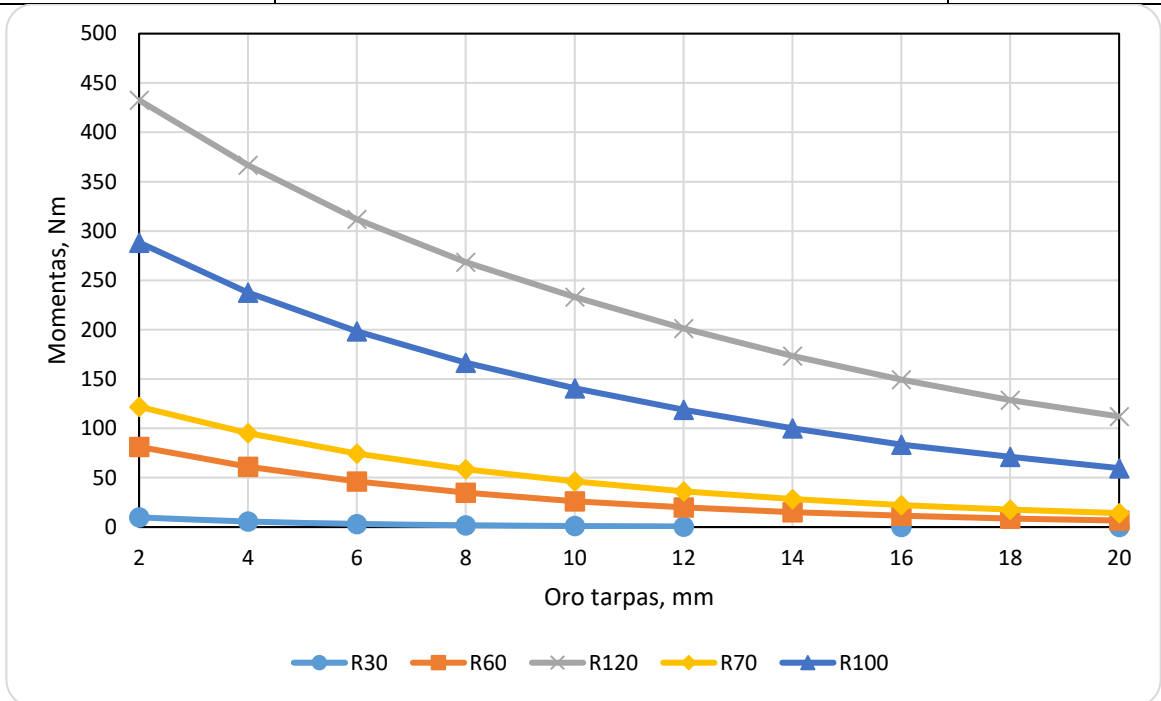
2.3.5. Ašinės magnetinės sankabos maksimalaus sukimo momento priklausomybė nuo nuolatinųjų magnetų ir diskų dydžio

Šiame tyrime siekiama išsiaiškinti, kaip ašinės magnetinės sankabos diskų ir magnetų dydis lemia jos maksimalų sukimo momentą. Pagrindiniai ašinės magnetinės sankabos geometriniai parametrai pateikti 2.6 lentelėje

2.6 lentelė. Pagrindiniai ašinės magnetinės sankabos geometriniai parametrai 2.4.5 skyriaus tyrimui

Trumpinys	Pavadinimas	Dydis
Hag	Oro tarpo aukštis	Kintamas
p	Polių porų skaičius	6
α_d	Kampinis poslinkis	15°
Rmo	Išorinis magneto spindulys	R30 – 30 mm R60 – 60 mm R120 – 120 mm R70 – 70 mm R100 – 100 mm
Rmi	Vidinis magneto spindulys	R30 – 15 mm R60 – 30 mm R120 – 60 mm R70 – 35 mm R100 – 50 mm
Ro	Išorinis disko spindulys	R30 – 30 mm R60 – 60 mm

Trumpinys	Pavadinimas	Dydis
		R120 – 120 mm R70 – 70 mm R100 – 100 mm
Hm	Magneto storis	7 mm
Hs	Jungo storis	10 mm



2.17 pav. Ašinės magnetinės sankabos sukimo momento priklausomybė nuo oro tarpo keičiant diskų ir magnetų dydį

Iš šios priklausomybės matome, kad kuo didesnis disko skersmuo ir disko dydis, tuo didesnis maksimalus sukimo momentas gaunamas. Turint disko dydį virš 100 mm, gaunama, kad magnetinė sankaba gali atlaikyti tikrai nemažą sukimo momentą, priklausantį nuo tarpo tarp diskų.

2.4. Tiriamojo darbo išvados

1. Tiriamojo darbo metu „COMSOL Multiphysics“ programine įranga, kuri skaičiuoja baigtinių elementų metodu ištirta sudaryta ašinė magnetinė sankaba.
2. Modelis palygintas su kitų mokslininkų modeliais ir eksperimentiniais rezultatais, gautas labai nedidelis skirtumas tarp jų. Tarp darbe tiriamo sudaryto modelio ir kitų mokslininkų gautų eksperimentinių rezultatų gaunamas apie 7-10% maksimalus nuokrypis, tačiau mums aktualiausias maksimalus ašinės sankabos sukimo momentas, kuris beveik sutampa su eksperimentiniais rezultatais.
3. Darbe ištirta, kad kiekvienam oro tarpo dydžiui yra tam tikras polių porų skaičius prie kurio ašinės magnetinės sankabos sukimo momentas yra didžiausias.
4. Ištirta, kad didinant magnetų storį didėja maksimalus ašinės magnetinės sankabos sukimo momentas.
5. Ištirta, kad feromagnetinį jungą keičiant neferomagnetine medžiaga krenta magnetinio srauto tankis, dėl to gaunamas maksimalus sukimo momentas mažėja.
6. Atlikus tyrimą gauta, kad diskų feromagnetinio jungo storis nedaro esminės įtakos ašinės magnetinės sankabos maksimaliam sukimo momentui, o maksimalaus sukimo momento dydis, prie visų jungo storių nesikeičia daugiau kaip 1%.
7. Ištirus kelių dydžių magnetines sankabas pastebėta, kad kuo didesnis disko skersmuo ir magneto dydis, tuo didesnę maksimalų sukimo momentą pasiekia ašinė magnetinė sankaba.

Išvados

1. Svarbiausia magnetinės sankabos mechaninė charakteristika yra jos sukimo momentas. Jis užtikrina judesio perdavimą nuo vedančios dalies ant apkrovos dalies, dėl to darbe nagrinėjama jo priklausomybė nuo įvairių parametrų, kurie gali daryti įtaką maksimaliam sukimo momentui.
2. Pagrindiniai magnetinės sankabos elementai – nuolatiniai magnetai ir feromagnetiniai jungai. Jie, kartu su oro tarpo dydžiu daro pagrindinę įtaką maksimaliam magnetinės sankabos sukimo momentui.
3. Pagrindiniai magnetinės sankabos modeliavimo metodai 2D analitinis metodas ir 3D baigtinių elementų metodas, darbe naudojamas pastarasis, nes jo maksimalaus sukimo momento rezultatai labai artimi mokslininkų eksperimentiškai patikrintiems, 2D metodu analitiniu metodu apskaičiuotas sukimo momentas gali būti 20-30% didesnis nei eksperimentiniai rezultatai.
4. Ištirta, kad modelio maksimalaus sukimo momento reikšmė nuo kitų mokslininkų eksperimentiškai ištirtos vienodų geometrinių parametrų ašinės magnetinės sankabos skiriasi apie 1%, todėl galima teigti, kad modelis yra patikimas.
5. Gauta, kad kiekvienam oro tarpo dydžiui yra optimalus polių porų skaičius. Tiriamuoju atveju prie 2 mm gauta 10 polių porų, prie 6 mm gauta 6 polių poros, prie 10 mm – 5 polių poros ir prie 16 mm – 3 polių poros.
6. Ištirta, kaip maksimalus ašinės magnetinės sankabos sukimo momentas didėja didinant magnetų storį. Palyginimui, prie 2 mm oro tarpo, kai ant diskų sumontuoti 15 mm storio magnetai ašinės magnetinės sankabos maksimalus sukimo momentas yra 65,5% didesnis, negu tomis pačiomis sąlygomis ant diskų būtų 5 mm storio magnetai.
7. Sumodeliavus, kaip keičiasi tiriamos ašinės magnetinės sankabos maksimalus sukimo momentas keičiant jungo medžiagą, gauta, kad tuo atveju, kai abiejų diskų jungai pagaminti iš feromagnetinės medžiagos maksimalus sukimo momentas yra maždaug 1,5 karto didesnis, negu kai tik vieno disko jungas pagamintas iš feromagnetinės medžiagos ir maždaug 2 kartus didesnis negu, kai abiejų diskų jungai pagaminti ne iš feromagnetinės medžiagos.
8. Atlikus tyrimą gauta, kad diskų feromagnetinio jungo storis nedaro esminės įtakos ašinės magnetinės sankabos maksimaliam sukimo momentui, maksimalaus sukimo momento dydis, prie visų jungo storių nesikeičia daugiau kaip 1%.
9. Ištyrus kelių dydžių magnetines sankabas pastebėta, kad kuo didesnis disko skersmuo ir magneto dydis, tuo didesnį maksimalų sukimo momentą pasiekia ašinė magnetinė sankaba.

3. Naudota literatūra

- [1] B. Ose-Zala, *DESIGN OPTIMIZATION OF CYLINDRICAL MAGNETIC COUPLER BASED ON CALCULATIONS OF MAGNETIC FIELD*, Riga, 2015.
- [2] B. Ose-Zala, O. Onzevs ir V. Pugachov, *Formula Synthesis of Maximal Mechanical Torque*, Riga, 2013.
- [3] T. Lubin, S. Mezani ir A. Rezzoug, *Simple Analytical Expressions for the Force and Torque of Axial Magnetic Couplings*, 2012.
- [4] J. Fontchastagner, T. Lubin, S. Mezani ir N. Takorabet, *Design optimization of an axial-field eddy-current magnetic coupling based on magneto-thermal analytical model*, 2018.
- [5] S. Syam, S. Soeparman, D. Widhiyanuriawan ir S. Wahyudi, *Comparison of Axial Magnetic Gears Based on Magnetic Composition Topology Differences*, t. 11, *Energies*, 2018.
- [6] Z. Hui, „Application of Magnetic Material in the Underwater Power Tools,“ Ji'nan, 2015.
- [7] J. Azzouzi, G. Barakat ir B. Dakyo, *Analytical modeling of an axial flux permanent magnet synchronous generator for wind energy application*, 2005.
- [8] B. Ose-Zala, E. Jakobsons ir P. Suskis, *The use of Magnetic Coupler instead of Lever Actuated Friction Clutch for Wind Plant*, t. 18, *ELEKTRONIKA IR ELEKTROTEHNIKA*.
- [9] R. Baumgart, F. van der Seylberg, J. Aurich ir T. von Unwerth, *New Energy-Efficient Electromagnetic Clutch for Automotive Air Conditioning Compressors*, 2012.
- [10] R. P. Praveen, M. H. Ravichandran, V. T. Sadasivan Achari, V. P. Jagathy Raj, G. Madhu ir G. R. Bindu, „A Novel Slotless Halbach-Array Permanent-Magnet Brushless DC Motor for Spacecraft Applications,“ t. 59, nr. 9, 2012.
- [11] W. Cai, C. Gu ir X. Hu, „Analysis and Design of a Permanent Magnet Bi-Stable Electro-Magnetic Clutch Unit for In-Wheel Electric Vehicle Drives,“ t. 8, 2015.
- [12] M. Budhia, J. T. Boys, G. A. Covic ir C.-Y. Huang, *Development of a Single-Sided Flux Magnetic Coupler for Electric Vehicle IPT Charging Systems*, t. 60, *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 2013.
- [13] R. Rutkaskienė, „Trintuvus glotnučiams pritaikys viešosioms erdvėms,“ Verslo žinios, 27 December 2017. [Tinkle]. Available: <https://www.vz.lt/pramone/2017/12/27/trintuvus-glotnuciams-pritaikys-viesosioms-erdvems>. [Kreiptasi 20 May 2019].
- [14] A. Ya. Krasil'nikov and A. A. Krasil'nikov, *Torque Determination for a Cylindrical Magnetic Clutch*, t. 29, *Russian Engineering Research*, 2009.

- [15] A. Ya. Krasilnikov, *ANALYSIS OF MAXIMUM ANGLE OF MISMATCH BETWEEN HALF COUPLINGS OF A MAGNETIC CLUTCH AND HIGHLY COERSIVE PERMANENT MAGNETS*, t. 49, Chemical and Petroleum Engineering, 2013.
- [16] E. P. Furlani, „Formulas for the force and torque of axial couplings,“ t. 29, nr. 5, 1993 Sept.
- [17] JP. YONNET, S. HEMMERLIN, E. RULLIERE ir G. LEMARQUAND, *Analytical calculation of permanent magnet couplings*, t. 29, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 1993.
- [18] T. Chan, W. Wang ir L. L. Lai, „Performance of an Axial-Flux Permanent Magnet Synchronous Generator From 3-D Finite-Element Analysis,“ t. 25, nr. 3, 2010 Sept..
- [19] R. Wang, E.P. Furlani ir Z.J. Cendes, *Design and Analysis of a Permanent Magnet Axial Coupling Using 3D Finite Element Field Computations*, t. 30, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 1994.
- [20] Harijaona Lalao Rakotoarison, Jean-Paul Yonnet ir Benoît Delinchant, *Using Coulombian approach for Modeling Scalar Potential and Magnetic Field of a Permanent Magnet with Radial Polarization*, t. 43, IEEE Transactions on Magnetics, 2007.
- [21] B. Dolisy, P. Lubin, S. Mezani ir J. Leveque, *Three-Dimensional Analytical Model for an Axial-Field Magnetic Coupling*, 2014.
- [22] N. V. SIVAKUMARI ir V. RAMESH BABU, „MODELLING OF AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINE AND ITS STABILITY ANALYSIS,“ t. 4, nr. 4.
- [23] Romain Ravaud, Valerie Lemarquand ir Guy Lemarquand, *Analytical Design of Permanent Magnet Radial Couplings*, t. 46, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 2010.
- [24] J. Fontchastagner, Y. Lefèvre ir F. Messine, *Some Co-Axial Magnetic Couplings Designed Using an Analytical Model and an Exact Global Optimization Code*, t. 45, 2009.
- [25] „COMSOL Multiphysics,“ 4 10 2018. [Tinkle]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/COMSOL_Multiphysics. [Kreiptasi 18 05 2019].