



VILNIAUS GEDIMINO TECHNINIS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

AUTOMATIKOS KATEDRA

Valdas Šveistys

**ELEKTROS PAVAROS SU TIESIAEIGIU ASINCHRONINIŲ VARIKLIŲ
TYRIMAS**

**RESEARCH OF ELECTRIC DRIVE WITH LINEAR INDUCTION
MOTOR**

Baigiamasis magistro darbas

Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 62101T101

Automatikos specializacija

Elektros ir elektronikos mokslo kryptis

Vilnius, 2008

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Elektronikos fakultetas
Automatikos katedra

ISBN	ISSN
Egz. sk. 3	
Data 2008 06 11	

Automatikos studijų programos baigiamasis magistro darbas
Pavadinimas Elektros pavaros su tiesiaiegiu asinchroniniu varikliu tyrimas
Autorius Valdas Šveistys Vadovas doc. dr. **Lionginas Radzevičius**

X

Reikšminiai žodžiai: elektros pavara, tiesiaiegis asinchroninis variklis, *MathCAD 2001 Professional*.

Vilniaus Gediminas Technical University
Faculty of **Electronics**
Department of **Automatics**

ISBN ISSN
No. of copies: 3
Date 2008 06 11

Automatic study programme master thesis

Title: **Research of electric drive with Linear Induction Motor**

Author: **Valdas Šveistys**

Academic supervisor doc. dr. Lionginas Radzevičius

Language

☒ x

Lithuanian

☐ English

Annotation

In master thesis researching high-speed electric drive with Linear Induction Motor (LIM) design peculiarities, internals and indexes of quality. With programmable pack *MathCAD 2001 Professional* is created mathematical model of Linear Induction Motor. Alternate of Linear Induction Motor parameters (SE thickness, air gap length between inductor and secondary cell, inductor width, number of coils and etc) getting for the definite model are note mechanicals characteristics.

In master thesis are produced a view of electric drives with Linear Induction Motor review and theirs internals analysis.

The investigation part involving the creation of Linear Induction Motor mathematical model and investigation of mechanicals characteristics on programmable pack *MathCAD 2001 Professional*. The programme displaying results of calculating in graph form. Results are analyzed and summarized. Have been investigation academics and practical of LIM motor operations aspects, produced conclusions and suggestions

The results of research can be used for rational and optimal realization of LIM in various technological systems.

Structure: introduction, literature electrical drive with LIM questions review, research purpose and tasks, computational skill, summarizing of research results, conclusions and suggestions, references.

KEYWORDS

Electric drive, Linear Induction Motor, *MathCAD 2001 Professional*

TURINYS

1. ĮVADAS	7
2. LITERATŪROS ELEKTROS PAVAROS SU TIESIAEIGIU ASINCHRONINIU VARIKLIU KLAUSIMAIŠ APŽVALGA	9
3. TYRIMO TIKSLAS IR UŽDAVINIAI	12
4. TYRIAMOJI DALIS	15
4.1. Elektros pavaros su tiesiaeigiu asinchroniniu varikliu ypatumai ir charakteristikos	15
4.2. Elektros pavaros su tiesiaeigiu asinchroniniu varikliu stabdymo proceso analizė	27
4.3. Elektros pavaros su tiesiaeigiu asinchroniniu varikliu matematinio modelio tyrimas	31
5. SKAIČIUOJAMOJI DALIS	43
5.1. Skaičiavimo charakteristikų palyginimas	43
5.2. Elektros pavaros su tiesiaeigiu asinchroniniu varikliu charakteristikų analizė	49
6. TYRIMO REZULTATŲ APIBENDRINIMAS	52
6.1. Išvados	52
6.2. Rekomendacijos ir pasiūlymai	53
7. LITERATŪRA IR KITI ŠALTINIAI	54

1. ĮVADAS

Pramonėje ir transporte naudojami įvairūs technikos įrenginiai, kurių veikimas pagrįstas bėgamojo magnetinio lauko ir srovių laidžiuose kūnuose sąveika. Tai tiesiaiegiai asinchroniniai varikliai (TAV), magnetinės hidrodinamikos įrenginiai, stabdymo įtaisai ir kt.

Tiesiaiegiai asinchroniniai varikliai naudojami tais atvejais, kai reikia gauti tiesiaiegi, slenkamąjį arba slenkamąjį – grįžtamąjį judesį. Tačiau kartais jie naudojami ir sukamajam judesiui gauti, kai plokščias arba lanko pavidalo induktorius yra virš arba abiejų besisukančio disko ar būgno pusių. Be to, žinomi atvejai, kai tiesiaiegio variklio elementas nejuda, o palaiko prispaustą judamąją mechanizmo dalį [1].

Tiesiaiegiui judesiui kurti dar ir dabar yra naudojamos pavarų sistemos, sudarytos iš sukamojo judesio variklio, tarpinio įtaiso, keičiančio variklio perduodamą sukamąjį judesį į tiesiaiegi ir perduodančio tą judesį darbo mašinos pagalbiniam įtaisui, bei darbo įtaiso. Elektros variklio perduodama per išvardintas tarpines grandis energija palaipsniui prarandama kinematinėse grandyse, todėl tokių sistemų našumas nedidelis dėl itin didelių galios nuostolių. Pagrindinė šių nuostolių priežastis – sistemoje veikiančios trinties jėgos. Be to, svarbus faktorius yra įrenginio dydis, svoris ir konstrukcijos sudėtingumas, nes tai tiesiogiai susiję su visos sistemos darbo patikimumu, patvarumu ir ilgaamžiškumu [2].

Supaprastinus tokias sistemas, mažinant tarpinių grandžių skaičių ir sistemos dydį, sumažėja nuostoliai ir pagerėja įrenginio techniniai – ekonominiai rodikliai. Taip tiesiaiegio judesio kūrimo problema tampa bene svarbiausia pramonės ir transporto tobulinimo uždaviniu: sukurti pavaras, mažinant sistemos matmenis, svorį bei supaprastinant variklio valdymą. O tiesiaiegio asinchroninio variklio sukūrimas – pagrindinė šio uždavinio sprendimo kryptis.

Mechatroninių sistemų su tiesiaiegiėmis elektros pavaromis taikymo sritys yra labai skirtingos ir plečiasi. Tiesiaiegiai varikliai mechatroninėse sistemose dažnai naudojami kaip vykdykliai baigiamajam judesiui vykdyti. Vykdomieji varikliai praktiškai dirba pereinamųjų procesų režimu. Todėl tiesiaiegiu asinchroninių variklių veikimui būdingi dažni paleidimai, stabdymai ir reversai.

Šiuo metu tiesiaiegiės elektros pavaros taikomos: puslaidininkinių ir elektronikos pramonėje, sprogimų nustatymo sistemose, pramonės robotuose, transporto sistemose, kompiuterinėje technikoje, medicinos prietaisuose, staklėse, energetikos objektų apsaugos ir valdymo sistemose.

Tais atvejais, kai technologinis procesas reikalauja stabdymo metu riboti pagreitį ar keisti stabdymo proceso trukmę, reikia nagrinėti ne tik statinius, bet ir dinامينius elektrinio stabdymo režimus [3]. Technologinių įrenginių variklis turi būti ne tik dažnai paleidžiamas, bet

ir stabdomas. Skirtingai nuo sukiųjų variklių, stabdymo režimai yra būdingi netgi paprastosioms tiesiaieigėms pavaroms. Tiesiaiegių asinchroninių variklių elektrinis stabdymas sudaro atskirą mokslinę ir techninę problemą.

Darbe bus nagrinėjama greitaiegio transporto elektros pavana su simetriniu tiesiaiegiu asinchroniniu varikliu. Simetriniame TAV modelyje oro tarpai tarp induktorių yra vienodi. Antrinio elemento medžiagų storai yra lygūs.

Tiesiaiegių asinchroninių variklių modelių našumas priklauso nuo oro tarpų tarp induktorių ir antrinio elemento dydžio bei medžiagos, iš kurios jis pagamintas, savybių. Todėl, tam tikri tiesiaiegių asinchroninių variklių tipai, taikomi vienoje srityje, negali būti taikomi kitose. Dažniausiai tokį skirstymą sąlygoja skirtingi tiesiaiegio asinchroninio variklio veikimo režimai. Tai yra aktualu norint racionalizuoti ir optimizuoti elektros pavarų, kurių sudėtyje yra TAV, darbą. Pavyzdžiui, tiesiaiegius asinchroninius variklius, kurių oro tarpas yra didesnis (ir todėl didesni nuostoliai), tikslingiausia yra taikyti mechanizmuose ir sistemose, veikiančiose trumpalaikiu arba trumpalaikiu kartotiniu režimu ir visiškai neracionalu taikyti ilgalaikio darbo režimo sistemose, nes tokiu atveju sistemos našumas nebus didelis [14].

Darbe bus nagrinėjamas tiesiaiegio asinchroninio variklio (TAV) charakteristikų tyrimas, panaudojant sisteminiu principu sudarytą simetrinį apibendrintą TAV matematinį modelį. Darbe nagrinėjamos greitaieigės elektros pavaros su TAV modelio, kurį sudaro du induktoriai ir tarp jų esančiu antriniu elementu. Tyrinėjamos TAV veikiančios jėgos įvairiems variklio konstrukcijos atvejams ir skirtingoms Reynoldso skaičiaus vertėms, stabdant TAV.

Tyrimui panaudoti konkretūs TAV techniniai duomenys. TAV tiriamas statikoje ir galutiniai tyrimų rezultatai yra statinių charakteristikų nustatymas. Statinės charakteristikos gaunamos, keičiant TAV elementų parametrus. Šiuo atveju TAV charakteristikos apibūdina variklio veikimą nusistovėjusiame režime.

Toks asinchroninio variklio tyrimas šiame darbe bus atliekamas programiniu paketu *MathCAD 2001 Professional*. Tyrimas šia programa suteikia galimybę tirti TAV modelių įvairius elektrinius režimus, nesunkiai pakeičiant reikiamus elementų parametrus, gauti elektromechanines charakteristikas ir priklausomybes, ir t.t. Tai žymiai paprastesnis TAV tyrimo metodas, lyginant jį su analitiniu (paremtu sudėtingais matematiniais skaičiavimais), grafiniu ir pan.

Apibendrinus tyrimo metu gautus rezultatus galima juos panaudoti projektuojant ir modeliuojant tiesiaiegius asinchroninius variklius.

2. LITERATŪROS ELEKTROS PAVAROS SU TIESIAEIGIU ASINCHRONINIŲ VARIKLIŲ KLAUSIMAIŠ APŽVALGA

Užsienio ir lietuvių literatūra pateikia nemažai medžiagos apie tiesiaeigių asinchroninių variklių tipus, konstrukciją, veikimo principą, savybių skaičiavimą, valdymą ir optimizavimą ir pan.

Pirmasis Lietuvoje tyrimas, susijęs su tiesiaeigio variklio panaudojimu skystajam reostatui, buvo atliktas Kaune 1964 m. Sistemingi tiesiaeigių asinchroninių variklių tyrimai Lietuvoje pradėti 1970 m. ir tęsiami iki šiol.

Tokie tyrimai reikalingi racionalių sprendimų paieškai ir radimui, atsižvelgiant į tokiems varikliams keliamus reikalavimus. Straipsniuose, disertacijose ir kituose literatūros šaltiniuose plačiai aptariami TAV taikymo, valdymo ir sistemų su TAV optimizavimo klausimai.

Be minėtų TAV tyrimų kryptį nagrinėjami klausimai: TAV pereinamieji procesai, tiesiaeigių asinchroninių variklių stabdymas bei kiti dinaminiai režimai, tiesiaeigių variklių magnetiniai laukai, kraštų efektų klausimai bei statinės ir dinaminės savybės, TAV panaudojimas mechatroninėse sistemose.

Visi tiesiaeigių asinchroninių variklių skaičiavimai yra pagrįsti elektromagnetinio lauko lygčių sprendimu. Bėgamojo lauko lygčių sprendimo būdas priklauso nuo pasirinktos problemos sudėtingumo ir ribinių sąlygų. Pagrindiniai tiesiaeigių asinchroninių variklių teorinio tyrimo metodai:

- a) tiesioginis elektromagnetinio lauko lygčių sprendimas;
- b) spektrinis metodas;
- c) skaitiniai metodai, pvz., baigtinių elementų metodas;
- d) kiti metodai, pvz., Fourier eilutės, srovinės apkrovos idealizacija, delta funkcija arba diskrečiosios aplinkos metodas [6].

Šiame baigiamajame darbe pagrindinis dėmesys skiriamas apibendrintam tiesiaeigio asinchroninio variklio modeliui. Tokio modelio matematinis aprašymas pateiktas L. Radzevičiaus ir E. Matkevičiaus moksliniame straipsnyje „Tiesiaeigio asinchroninio variklio charakteristikų tyrimas“, kur pateiktas tiesiaeigio asinchroninio variklio charakteristikų tyrimas, panaudojant sistemų principu sudarytą nesimetrinį apibendrintą TAV matematinį modelį. Šiame literatūros šaltinyje yra pateikiamos ištirtos TAV jėgos, veikiančios išilgai x koordinatės priklausomybės nuo antrinio elemento (AE) parametrų ir induktorių tarpusavio padėties ribiniais atvejais, kai induktorių poliai priešingi (NS poliai) ir vienvardžiai (NN poliai).

Nustatytos jėgos priklausomybės nuo oro tarpo tarp induktoriaus ir antrinio elemento, nemagnetinio bei magnetinio AE sluoksnio storio. Parodyta, kad egzistuoja tam tikra AE magnetinio sluoksnio storio vertė, kuriai esant galima gauti didžiausią TAV jėgą [5].

R. Rinkevičienė, A. J. Poška ir A. Smilgevičius yra monografijos apie tiesiaeigės mechatroninės sistemos autoriai. Teorija ir taikymas. Monografijoje nagrinėjami tiesiaeigių mechatroninių sistemų teorijos ir praktinio taikymo klausimai: sandara, statiniai ir dinaminiai režimai, valdymo būdai, programinė įranga, pateikiami realių sistemų pavyzdžiai.

Tiesiaeigėms mechatroninėms sistemoms nagrinėti sudaryti matematiniai ir imitaciniai modeliai, pagrįsti realiomis tokių sistemų funkcionavimo sąlygomis, skaičiavimų ir procesų imitacijos rezultatai pateikiami gausios iliustracinės medžiagos pavidalu.

Monografijoje pateikiami atlikti platūs tiesiaeigių mechatroninių sistemų teoriniai ir taikomieji tyrimai, gauti nauji moksliniai rezultatai, turintys įtakos ir reikšmės elektros ir elektronikos mokslo šakos plėtrai, naujų technologijų kūrimui ir mokymuisi. Tai labai prisidėjo prie naujos tiesiaeigių variklių mokslinės krypties – tiesiaeigių mechatroninių sistemų dinaminį režimą tyrimo Lietuvoje [7].

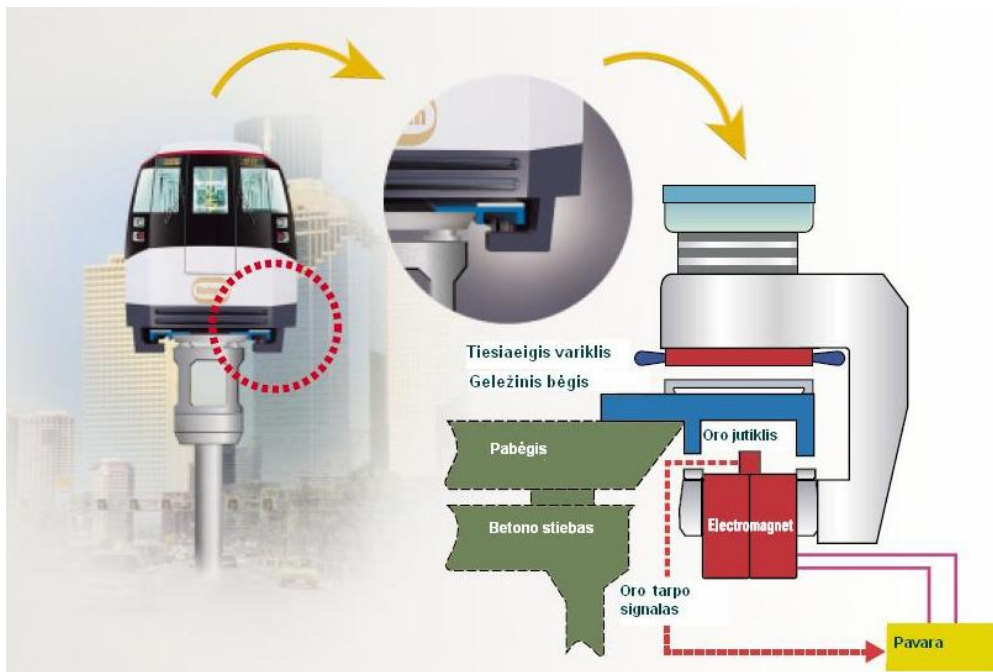
Dauguma literatūros šaltinių savo tematika yra orientuoti į TAV tyrimus, siekiant gerinti jų dinamines ir statines savybes.

Mokslinėse publikacijose nagrinėjami tokie su TAV susiję pagrindiniai klausimai:

1. Tiesiaeigio asinchroninio variklio modelio magnetinių laukų radimas.
2. Tiesiaeigio asinchroninio variklio dinaminį ir statinių charakteristikų bei parametrų skaičiavimo metodai.
3. Tiesiaeigio asinchroninio variklio modelio įvairių konstrukcijų (antrinio elemento simetrijos, magnetinės skvarbos, elektrinio laidžio, Reynoldso skaičiaus atžvilgiais), ekvivalentinių schemų tyrimas.
4. Tiesiaeigių asinchroninių valdymo būdų tyrimas.
5. Tiesiaeigio asinchroninio variklio pereinamųjų procesų skaičiavimas bei darbo režimai.
6. Tiesiaeigių asinchroninio variklių taikymas pramonėje [2].

Galima sudaryti atskirą literatūros apžvalgą, kurioje būtų pateikiama informacija apie pasaulinės transporto ir infrastruktūros sektorių greitaeigių elektros pavarų su TAV projektavimą, modeliavimą, ekonomiškumo klausimus, konkrečių projektų įgyvendinimą. Tai greitaeigės transporto priemonės, (angl. „Maglev“), kurios veikia magnetinės levitacijos pagrindu. Tokia sistema aiškinama taip, kad elektros pavara, kurios pagrindas yra TAV, judėdama nesiliečia su kelio paviršiumi. Išsilaikyti kelių centimetrų aukštyje virš bėgių traukiniui padeda stiprus elektromagnetinis laukas. Tai technologija, kuri užtikrina tylesnį ir

gerokai greitesnį judėjimą, nei įprastų ratinių traukinių. Šiuolaikinės tokios konstrukcijos transporto priemonės užtikrina iki 500 km/h greitį [15]. Greitaeigės pavaros „Maglev“ modelio sandara pateikiama 2.1 pav.



2.1 pav. Greitaeigės transporto priemonės *Maglev* modelis su TAV

Tokios greitaeigės elektros pavaros principas - elektromagnetai yra nustatyti ant dviašio traukinio vagono bėgių, kurie priverčia transporto priemonę kilti ir pasilikti, kad tinkamai išlygintų oro tarpą, veikiant traukos jėgai. Elektromagnetai nesiliečia arba laikosi ant geležinkelio bėgių nuo to laiko, kai elektromagnetai yra kontroliuojami oro tarpo jutiklio, kuris reguliuoja erdvę tarp geležinkelio bėgio ir transporto priemonės.

Tokias sistemas daugiausia tiria ekonomiškai stiprių valstybių tokių kaip Japonijos, Jungtinių Amerikos Valstijų, Kanados, Kinijos, Prancūzijos, Šveicarijos, Vokietijos, Italijos (kur šios sistemos jau veikia ir kur ruošiami būsimi urbanizacijos projektai) mokslininkai. Mokslinius straipsnius apie greitaeigių transporto elektros pavarų su TAV galima rasti oficialiame tarptautinių konferencijų „Maglev“ internetiniame puslapio archyve. „Maglev“ konferencija apima platų diapazoną temų, kuriose aiškinamos magnetinės levitacijos sistemos ir analizuojami tiesiaiegių asinchroninių variklių ypatumai, optimizavimo klausimai, principai, pateikiamos magnetinės ir mechaninės charakteristikos, pateikiami šiuolaikiniai TAV modeliai, uždaviniai, sukuriamos naujos konstrukcinės technologijos, pateikiami naujos paleidimo, valdymo, stabdymo schemos. Pirmą „Maglev“ konferenciją buvo laikyta 1997 Bostone (JAV). Nuo tada buvo dar daug konferencijų įvairiose pasaulio šalyse. Paskutinė konferencija įvyko 2006 Dresdene (Vokietija) [15].

3. TYRIMO TIKSLAS IR UŽDAVINIAI

Šio darbo tikslas - naudojant apibendrintą simetrinį modelį, ištirti greitaigės elektros pavaros su tiesiaeigiu asinchroniniu varikliu jėgos, veikiančios išilgai x koordinatės priklausomybės nuo antrinio elemento parametru, panaudojant sisteminiu principu sudarytą simetrinį apibendrintą TAV matematinį modelį. Išanalizuoti variklinio ir stabdymo režimų veikimą (priešinio jungimo ir rekuperacinio stabdymo) ir mechanines savybes.

Pagrindiniai apibendrinto modelio kriterijai:

1. Reynoldso skaičius;
2. Neferomagnetinis sluoksnis;
3. Oro tarpas tarp induktoriaus ir antrinio elemento;
4. Polių porų skaičius;
5. Induktoriaus plotis;
6. Apvijų skaičius.

Be oro tarpo dydžio esminius TAV modelių charakteristikų skirtumus lemia medžiagos, iš kurių pagaminti tiesiaeigio asinchroninio variklio elementai. Plienas yra feromagnetikas, kurio indukcija $B \gg B_0$ (B – medžiagos kuriamo lauko indukcija, B_0 – magnetinio srauto tankis vakuume). Aliuminis yra paramagnetikas, kurio indukcija $B > B_0$, o varis diamagnetikas, kurio $B < B_0$ [11].

Visos minėtos medžiagos (geležis (Fe), aliuminis (Al) ir varis (Cu)) turi skirtingas magnetines ir elektrines savybes (magnetines skvarbas μ bei elektrinius laidžius γ). Šių medžiagų naudojimas TAV lemia skirtingas magnetines ir mechanines charakteristikas.

Be anksčiau išvardintų kriterijų TAV parinkimui yra labai svarbūs konstrukciniai parametrai: oro tarpas tarp induktoriaus ir antrinio elemento, polių porų skaičius, polių ilgis, simetriška ar nesimetriška antrinio elemento padėtis ir t. t.

Oro tarpas yra svarbiausias elementas TAV funkcionavimui ir jo veikimui. Nominalia apkrova apkraunat greitaigius TAV, oro tarpas tarp induktoriaus ir antrinio elemento turi būti 10 – 11 mm ribose [13].

Kadangi greitaigiui transportui elektros pavaras su TAV gamina nemažai įmonių, pavyzdžiui, „Baldor Electric Company“, „Danaher Motion“, H2W Technologies“, „NSK Precision America“, „Electromate“. Šiame darbe bus pasirinktas „Power Superconductor Applications Corporation“ greitaigės pavaros su TAV modelis, kurio pagrindiniai techniniai duomenys pateikiami 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Firmos „Power Superconductor Applications Corporation“ gaminamų TAV parametrai

Modelis	LIM-200	LIM-300	LIM-400	LIM-600	LIM-800	LIM-1000	LIM-1025	LIM-1250	LIM-1350	LIM-2300
Jėga, N	1000	1000	1330	2275	3030	4500	4500	5500	6000	10000
Greitis, m/s	10	15	30	33	33	35,5	45,5	55,6	66,7	112
Maksimalus dažnis, Hz	60	60	180	60	60	60	86	115	190	215
Maksimali galia, kW	10	15	40	75	100	160	200	308	400	1120
Maitinimo įtampa, V	240	480	480	480	480	480	560	560	750	1200
Oro tarpas, mm	3	4	4	5	6	4	4,5	4,5	5	7
Statoriaus paviršiaus plotas, m ²	0,035	0,104	0,104	0,208	0,393	0,205	0,238	0,312	0,396	0,521
Griovelių gylis, mm	78	89	89	89	100	90	100	105	105	110
Bendras plotis, mm	280	290	290	290	455	305	305	406	455	508
Standartinis ilgis, mm	1,56	591	591	1182	1560	2050	1560	2050	1560	2050
Masė, kg	18	63	63	126	285	290	345	450	575	756

Tam, kad ištirtume pasirinkto TAV modelio statines savybes, parinksime skirtingus TAV modelio konstrukcinius parametrus.

- 1) TAV modelis, kai Reynoldso skaičius yra $\varepsilon_0 = 8; 10; 12; 14$.
- 2) TAV modelis, kai neferomagnetinis sluoksnis Δ_1 didinamas $\Delta_1 = 0,005\text{m}; 0,01\text{m}; 0,015\text{m}; 0,02\text{m}$.
- 3) TAV modelis, kai oro tarpas tarp induktoriaus ir antrinio elemento δ_1 didinamas $\delta_1 = 0,005\text{m}; 0,01\text{m}; 0,015\text{m}; 0,02\text{m}$.
- 4) TAV modelis, kai polių porų skaičius p didinamas $p = 6; 8; 12; 14$.

- 5) TAV modelis, kai induktoriaus plotis didinamas $2c = 0,306 \text{ m}; 0,406 \text{ m}; 0,506 \text{ m}; 0,606 \text{ m}$.
- 6) TAV modelis, kai apvijų skaičius didinamas $w_1 = 960; 1160; 1360; 1560$.

TAV modeliai gali būti sudaromi įvairiai: aprašomi matematinėmis lygtimis (analitiniai modeliai), programomis (skaitmeniniai modeliai) ir pan. Kiekvienu atveju stengiamasi aprašomą modelį kuo labiau priartinti prie realaus TAV, kurį veikia ne tik naudingos variklio darbui jėgos, bet ir trikdžiai. Todėl tam yra įvedami pataisų koeficientai bei sudaromos papildomos prielaidos. Tokiu atveju galima teigti, kad toks modelis yra gana sudėtingas ir mažai kur taikomas, nes nėra veiksmingas. Daug patogesnis TAV tyrimo ir projektavimo būdas yra – programinis modelis, kurio tyrimas keičiant parametrus yra labai greitas, o tikslūs rezultatai pateikiami vartotojui patogiausią forma.

Pagrindinis šio tiriamojo darbo uždavinys - ištirti minėtą TAV modelį programiniu paketu *MathCAD 2001 Professional*:

- a) sudaryti skaičiavimo aplinkos veikimo principą;
- b) gauti TAV veikiančios jėgos priklausomybes nuo slydimo, esant skirtingam Reynoldso skaičiui ir keičiant konstrukcinius parametrus;
- c) gautus rezultatus išanalizuoti, apibendrinti ir padaryti išvadas.

Gauti rezultatai padeda pasiekti tikslą – sudaryti priklausomybes, kuriomis remiantis galima racionalizuoti ir optimizuoti transporto sistemų darbą, našumą, patikimumą bei galimybes, naudojant elektros pavaras su TAV modelius. Kadangi elektros pavarų su tiesiaiegiais asinchroniniais varikliais taikymas nėra efektyvus ir racionalus visose sistemose, turi būti nagrinėjami ekonomiško, našumo, patikimumo, techninės įrangos ir kiti klausimai.

Pažymėtina, kad tiesiaiegių elektros pavarų taikymo srityje pasitaiko visi rotacinėms asinchroninėms elektros pavaroms būdingi netiesiškumai ir dar papildomi, kurie būdingi tik tiesiaiegio judesio elektros pavaroms. Pavyzdžiui, katapultuojant TAV antrinį elementą, trumpėja induktoriaus ir antrinio elemento sąveikos zona. Dėl to netiesiškai kinta TAV jėga: antriniam elementui išeinant iš induktoriaus aktyviosios zonos. Taip pat kinta ir TAV atstojamosios schemos parametrai, o kartu ir santykinė jėga, t.y. jėga, veikianti antrinio elemento ploto vienetą.

Pagrindiniai greitaeigės elektros pavaros su TAV keliami reikalavimai – darbo našumo, patikimumo kėlimas, didesnės TAV traukos jėgos vystymas, mechaninių charakteristikų gerinimas ir t.t. Kiekvienam TAV tipui būdingos savitos charakteristikos, privalumai ir trūkumai. Būtent todėl kiekvienam TAV tipui keliami skirtingi reikalavimai.

Gautus rezultatus galima palyginti su teorija ir panaudoti naujausių mokslo pasiekimų elektros pavarų su tiesiaiegiais asinchroniniais varikliais modelių tyrimų srityje.

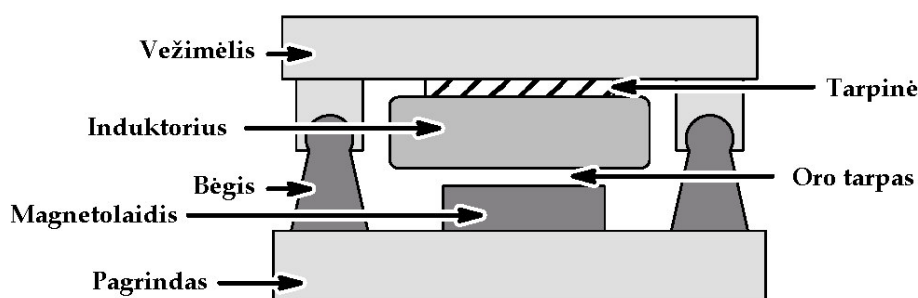
4. TIRIAMOJI DALIS

4.1. Elektros pavaros su tiesiaeigiu asinchroniniu varikliu ypatumai ir charakteristikos

4.1.1. Konstrukciniai tiesiaeigių variklių ypatumai

Savo konstrukcija tiesiaeigiai asinchroniniai varikliai (TAV) yra labai įvairūs. Jie gali būti klasifikuojami atsižvelgiant į induktoriaus ir antrinio elemento formą, magnetines savybes, apvijų išdėstymą ir kitus požymius.

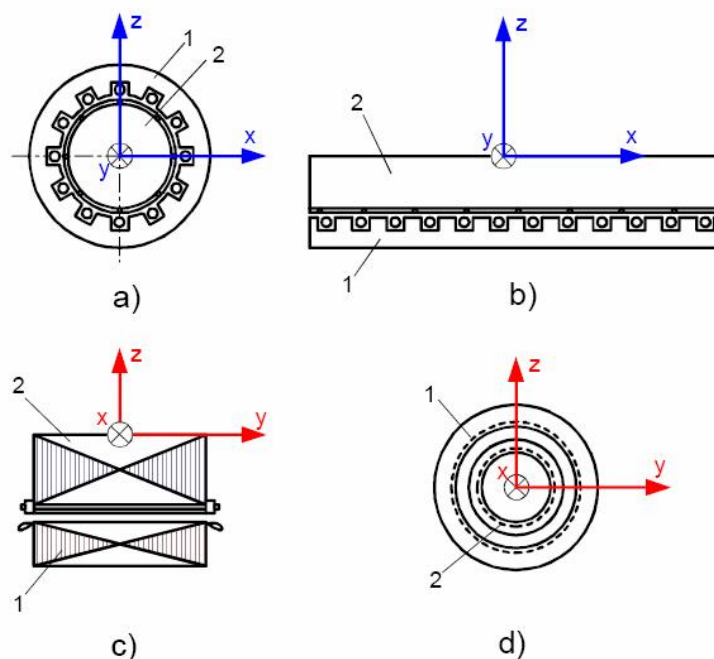
Plačiausiai naudojami plokštieji tiesiaeigiai asinchroniniai varikliai, kurie pasižymi didele galia ir nesudėtingu valdymu. Tačiau jų trūkumas – skersiniai ir išilginiai kraštų efektai. Kraštų efektai nebūdingi cilindriniams tiesiaeigiams varikliams, kadangi čia antrinio elemento paviršius išnaudojamas maksimaliai. Viena iš perspektyviausių sričių, kur naudojami tiesiaeigiai varikliai, yra transportas. Didelės galios TAV naudojami transporte kaip traukiantieji varikliai. Tokio variklio modelis pateikiamas 4.1.1 pav. Čia variklio induktoriaus pakabintas ant transporto priemonės (vežimėlis), o plieno lakštas (magnetolaidis) sumontuotas horizontaliai ant kelio pagrindo tarp bėgių [18].



4.1.1 pav. TAV pritaikymas transporto sistemose

Pagal antrinių elementų konstrukciją TAV galima skirstyti į TAV su neferomagnetiniu, feromagnetiniu ir sudėtinu antriniu elementu.

Pagal induktoriaus padėtį antrinio elemento atžvilgiu TAV skirstomi į elektriškai vienpusius, (kai induktorius yra tik vienoje antrinio elemento pusėje) ir elektriškai dvipusius (kai abiejuose antrinio elemento pusėse yra po vieną induktorių). Vienpusiams tiesiaeigiams asinchroniniams varikliams būdinga gana didelė normalinė jėgos dedamoji F_z (žr. 4.1.1.2 pav.), o tai gali būti panaudota magnetinės pakabos reiškiniui realizuoti. Kadangi elektriškai dvipusis TAV išvysto palyginti didesnę jėgos dedamąją F_x (žr. 4.1.1.2 pav.), tai daugelis specialistų jiems ir teikia pirmenybę [2].



4.1.2 pav. Sukamojo judesio asinchroninio variklio pakeitimas TAV

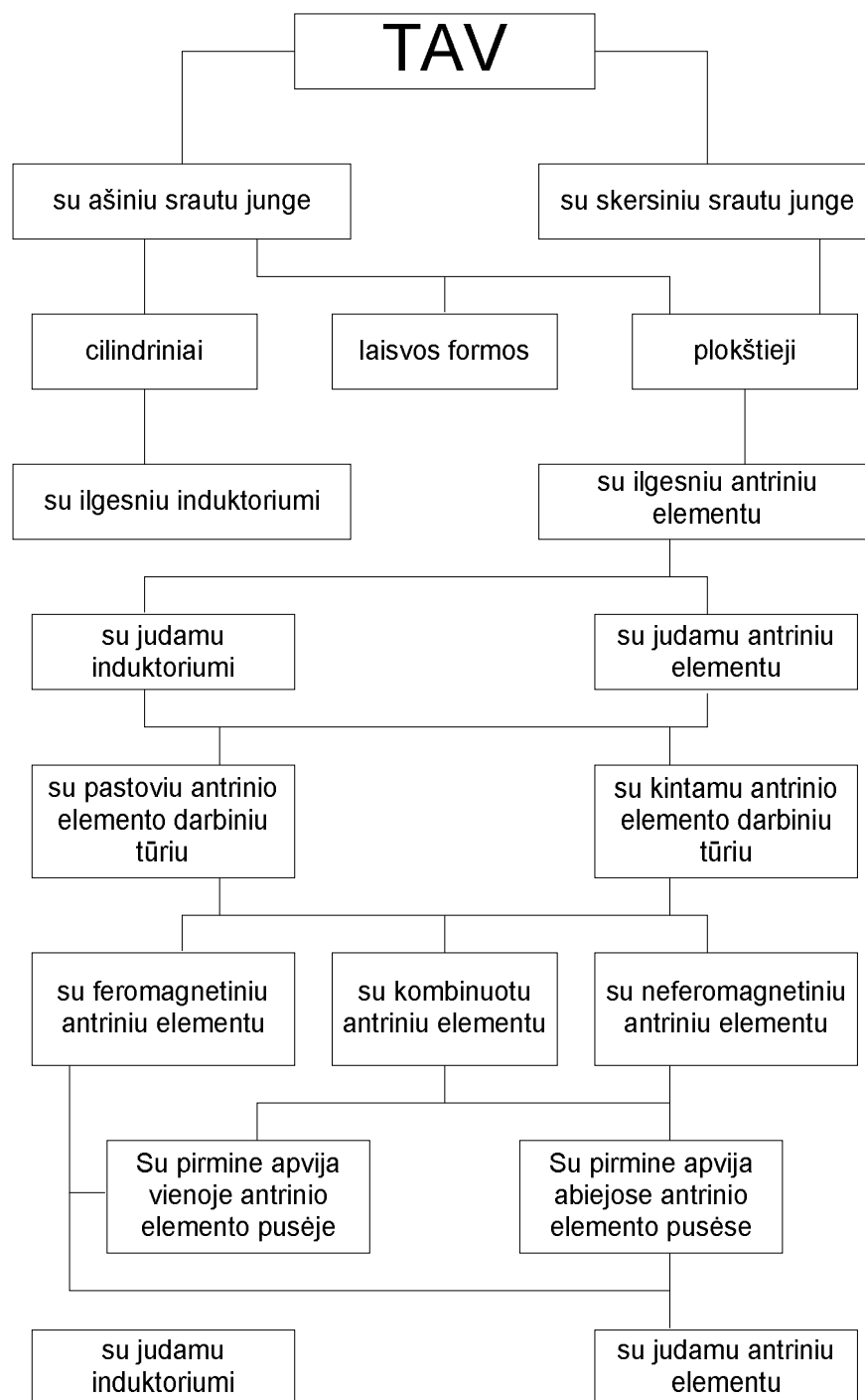
Būtina pažymėti, kad tiesiaiegiams asinchroniniams varikliams būdingas didesnis oro tarpas nei sukamojo judesio asinchroninių variklių, o tai pablogina šios mašinos techninius–ekonominius rodiklius.

Nors TAV techniniais rodikliais atsilieka nuo sukamojo judesio asinchroninių variklių, tačiau savo paprasta konstrukcija ir gamybos technologija gali būti sąlyginai pigesni. Šalia TAV valdymui taikomų tų pačių valdymo būdų kaip ir sukamojo judesio asinchroniniams varikliams, greitis juose gali būti keičiamas ir naujais principais, pavyzdžiui, keičiant oro tarpo tarp induktorių kito induktoriaus atžvilgiu x ašies kryptimi elektriškai dvipusio TAV modelyje, keičiant antrinio elemento plotį arba storį. Šie valdymo būdai savo realizavimu ir taikytinų techninių priemonių atžvilgiu yra labai paprasti, leidžia atsisakyti atskirų valdymui skirtų sudėtingų įtaisų pavaroje. Visą tiesiaiegių asinchroninių variklių klasifikaciją pagal konstrukcinius požymius vaizduoja schema, pateikta 4.1.3 pav.[2].

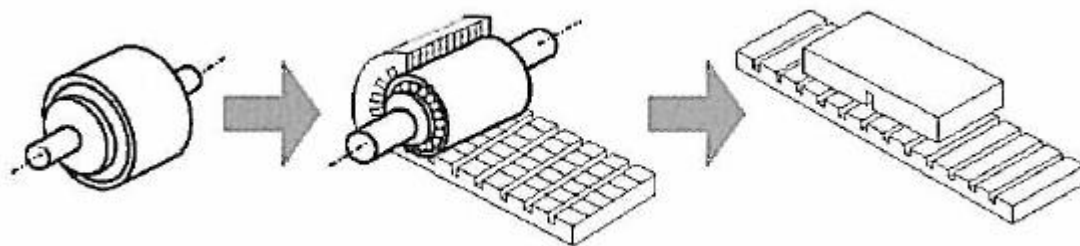
Savo konstrukcija TAV yra labai įvairūs. Jie gali būti klasifikuojami atsižvelgiant į induktoriaus ir antrinio elemento formą, magnetines savybes, apvijų išdėstymą ir kitus požymius.

Pagal srauto kryptį TAV skirstomi į dvi grupes: su išilginiu ir skersiniu srautais. TAV su skersiniais srautais leidžia mažinti priekines induktoriaus apvijų dalis ir mašinos gabaritus, esant dideliems slydimams.

Plokščiųjų asinchroninių variklių konstrukcija paprasta, jie technologiškai, leidžia didinti jėgas, praplatinant TAV antrinį elementą už induktoriaus ribų, reguliuoti mašinos greitį ir jėgą, keičiant antrinio elemento padėtį [2].



Tiesiaegio asinchroninio variklio konstrukcija gali būti pavaizduota kaip „ištiesintas“ sukusis variklis, kaip parodyta 4.1.4 pav. [7].



4.1.4 pav. Plokščiojo TAV konstrukcijos principas

Cilindrinės formos TAV maksimaliai išnaudojamas antrinio elemento paviršius, juose nėra skersinio kraštų efekto reiškinių. Šie TAV neturi priekinių induktoriaus apvijų dalių, fazinių srovių atžvilgiu jie labiau simetriški. Tačiau jų konstrukcija yra sudėtingesnė negu plokščiųjų TAV.

Pagal induktoriaus ir antrinio elemento ilgį, TAV gali būti su ilgesniu arba trumpesniu už antrinį elementą induktoriumi. Atsižvelgiant į techninius – ekonominius rodiklius, pirmenybė teikiama TAV su ilgesniu antriniu elementu.

TAV gali būti projektuojamas tiek su judamu, tiek su nejudamu induktoriumi. Pirmuoju atveju sunkiau spręsti maitinimo ir pavaros greitaeigiškumo klausimus.

Antrinio elemento dalies keitimosi su induktoriumi tūris gali būti pastovus arba kintamas, pavyzdžiui, jei antrinio elemento plotis ir storis išilgai mašinos yra nevienodas.

Pagal antrinių elementų konstrukciją TAV galima būtų skirti į TAV su neferomagnetiniu, feromagnetiniu ir kombinuotu antriniu elementu.

Pagal pirminės (induktoriaus) apvijų išdėstymą antrinio elemento atžvilgiu TAV skirstomi į elektriškai vienusius, kai minėta apvija išdėstyta tik vienoje antrinio elemento pusėje, ir elektriškai dvipusius, kai pirminė apvija išdėstyta abiejose antrinio elemento pusėse. Elektriškai vienusiai TAV gali būti su magnetiniu šuntu, jeigu antrinis elementas patalpintas tarp induktoriaus ir magnetinės medžiagos elemento, arba be jo. Magnetinio šunto paskirtis – padidinti tiek traukos jėgą F_x , tiek normalinę jėgą F_z .

Esminis sukamojo judesio ir tiesiaegių asinchroninių variklių skirtumas, kad TAV dėl baigtinio magnetolaidžio ilgio pasireiškia išilginis kraštų efektas, o plokščiajame AE labiau išryškėja skersinio kraštų efekto įtaka. Tai neigiamai atsiliepia TAV techniniams ir ekonominiams rodikliams. TAV su storesniu antriniu elementu būdinga ir didesnė srovės

išstūmimo efekto antriniam elementui įtaka. Išilginis kraštų efektas susidaro netolygiai pasiskirstant magnetiniam srautui išilgai (x ašies kryptimi) induktoriaus. Skersinio kraštų efekto reiškinys susijęs su induktoriaus pločiu (y ašies kryptimi) ir netolyginiu antrinių srovių pasiskirstymu pagal antrinio elemento plotį [2].

Viena iš naudingesnių tiesiaeigių elektros pavarų savybė yra ta, kad jas galima valdyti keičiant jų kelio (antrinio elemento) sandarą. Į tiesiaeigį asinchroninį variklį galima įmontuoti judėjimo ir padėties jutiklius, kuriems konstruoti gali būti panaudoti paties variklio elementai.

Tiesiaeigiai asinchroniniai varikliai yra lengvai pritaikomi prie vykdymo mechanizmo ir gamybos procese pasižymi technologiniu atžvilgiu. Traukimo jėgos, kurios atsiranda tarp pirminės ir antrinės tiesiaeigio asinchroninio variklio dalies arba tarp induktorių, esant dvipusiam varikliui, vienais atvejais yra nuostolingos, kitais atvejais naudingos, kadangi gali nukrauti atraminius ratukus ar rolgangus (gravitacinius konvejerius). Pastaroji savybė gali būti sėkmingai naudojama įvairių pramoninių mechanizmui stabdymui ir padėties fiksavimui [17].

Nepaisant visų tiesiaeigių asinchroninių variklių privalumų, jie turi ir trūkumų, kuriuos lemia pagrindinė išskirtina šių variklių savybė – magnetinės grandinės atvirumas. Dėl to tiesiaeigių asinchroninių variklių gamybai turi būti naudojamos brangesnės ir geros kokybės medžiagos. Magnetinės grandinės atvirumas lemia kraštų efekto atsiradimą, kuris blogina energetinius variklio rodiklius ir variklio charakteristikas. Dar vieną jų lemia tai, kad varikis turi būti priderintas prie darbinio mechanizmo. Šiuo atveju variklis netenka konstrukcinio universalumo. Norint priderinti tiesiaeigį asinchroninį variklį prie darbinio mechanizmo, būtina jį atskirai projektuoti atitinkamo eigos ilgio, jėgos, galio ir judėjimo greičio. Projektuojant sistemas su tiesiaeigiais asinchroniniais varikliais, galima gaminti komplektines tiesiaeigės elektros pavaras, tačiau jų serijinė gamyba nėra naudinga. Šiuo atveju viena iš išečių būtų – gaminti unifikuotus serijinius tiesiaeigių asinchroninių variklių modelius, ką daro nemažai užsienių firmų [18].

Baigiamajame darbe analizuojamas greitaigės elektros pavaros tiesiaeigio asinchroninio variklio darbo režimai, iš kurių bus gaunamos savybės. Nagrinėjamas modelis yra maitinamas iš trifazio tinklo be griovelių, pagal konstrukciją – dvipusis, srovė sutelkta plonuose abiejų induktorių paviršutiniuose sluoksniuose.

4.1.2. Savitosios tiesiaeigių asinchroninių elektros pavarų savybės

Įvairios galios sukamojo judesio asinchroniniai elektros varikliai reguliuojamo greičio asinchroninės elektros pavaros gaminamos serijomis. Jos yra daugelio šiuolaikinių mechatroninių sistemų pagrindas. Tačiau mokslinėse publikacijose nurodama, kad apie 50 % sukiųjų elektros variklių panaudojama gamybos įrenginiuose, kurių vykdymo elementas juda slenkamuoju arba grįžtamai slenkamu judesiu. Todėl tarp variklio ir vykdymo elemento įtaisomos kinematinės grandys, elektros variklio sukamąjį judesį keičiančios slenkamuoju. Toks mechaninis įrenginys didina pavaros matmenis, masę ir blogina visos sistemos dinamines charakteristikas. Todėl kuriamos specialios elektros pavaros su tiesiaeigio judesio elektros varikliais, tiesiogiai perduodančiais judesį vykdymo elementui. Paprasčiausi ir universaliausi yra tiesiaeigiai asinchroniniai varikliai (TAV).

Tačiau tiesiaeigių asinchroninių elektros pavarų (TAEP) charakteristikos dažnai yra paprastesnės už sukiųjų, todėl pavaros mechaninių grandžių pašalinimo ir net TAV antrinio elemento sutapatinimo su valdomojo įrenginio dalimis argumentai yra nepakankami pavarų su TAV taikymui pagrįsti. Šį klausimą būtina spręsti iš daugiakriterinių pozicijų [7].

Dėl šių priežasčių TAEP negaminamos didesnėmis serijomis, o projektuojamos ir gaminamos konkrečioms mechanizmams. Atliekant TAEP daugiakriterinę analizę, jas projektuojant, gaminant ir diegiant būtina atsižvelgti į toliau nagrinėjamas savitąsias TAV ir visos TAEP savybes:

1. kuriant TAEP paprastai nėra fiksuoti jokie konstrukciniai variklių parametrai ir techniškai realūs jų deriniai lemia aibę galimų pavaros mechaninių charakteristikų. Valdomo greičio ir jėgos tiesiaeigių elektros pavarų mechaninės charakteristikos dar priklauso nuo reguliuojamųjų parametrų derinių ir padidina šios aibės elementų skaičių. Norint numatyti tokių pavarų galimybes, reikia apskaičiuoti visą įmanomą pavaros charakteristikų aibę. Į reguliuojamų ir įvairaus būdais stabdomų kintamos srovės elektros pavarų galios keitiklius galima žiūrėti kaip į diskretinę keitiklių aibę, o į valdomąsias pavaras – kaip į nepertraukiamą valdomųjų mechatroninių sistemų aibę.
2. Kadangi tiesiaeigės elektros pavaros bendruoju atveju turi prastesnes energetines charakteristikas negu sukiosios elektros pavaros, jų greičiui, jėgai ir kitiems parametrų reguliuoti gali būti taikomi paprasti, nors neekonomiški reguliavimo būdai: induktoriaus įtampos reguliavimas nekeičiant dažnio superpozicijos metodai, impulsinis induktoriaus įtampos reguliavimas, vieno induktoriaus perstūmimas kito induktoriaus atžvilgiu elektriškai ir magnetiškai

dvipusiuose elektros varikliuose ir kt. Reguliuojamų tiesiaeigių elektros pavarų savybių aibės leidžia tirti tiesiaeigių mechatroninių sistemų savybes ir parinkti tiesiaeigę elektros pavarą konkrečiam mechanizmui.

3. Trumpalaikiu režimu veikiančių TAV magnetolaidžius galima gaminti iš vientisojo (ne elektrotechninio) plieno detalių, taip supaprastinant variklių gamybą, pavyzdžiui, aukštos įtampos jungtuvų vienvariklėms arba daugiavariklėms pavaroms.
4. TAV su vientisais laidžiais neferomagnetiniais antriniais elementais turi didelius nemagnetinius tarpus, todėl nedidelės galios TAV induktoriaus srovė praktiškai nepriklauso nuo antinio elemento slydimo. Nedidelės ir dinaminės srovės amplitudės. Šios TAV savybės leidžia kurti labai paprastas TAEP impulsinio valdymo sistemas ir elektros katapultą.
5. Technologiškai paprastas dvipusio TAV nemagnetinio tarpo ir antrinio elemento medžiagos bei matmenų keitimas. Tai leidžia dideliu diapazonu keisti TAV paleidimo jėgą.
6. Plokščios konstrukcijos TAV paleidimo jėgą diskretiškai galima keisti abiejų induktorių apvijas sujungiant lygiagrečiai, nuosekliai arba maitinant tik vieną iš apvijų.
7. Paskutiniu 6 punkte minėtu atveju vieną iš apvijų galima naudoti TAV paleisti pirmyn, o kitą – jam paleisti atgal. Toks valdymo principas padeda sukurti reversinę bekontaktę pavarą, kurioje yra tik 6 galios tiristoriai ir 6 galios diodai.
8. TAV su duraliumininiu antriniu elementu pasižymi ypatinga veikimo sparta. Todėl tokie TAV naudojami kurti ugnį užtveriančiomis sklendėmis, kurios taikomos ugnies ir sprogimų židiniams lokalizuoti, taip sušvelninant avarių padarinius.
9. Galima plačiu diapazonu keisti cilindrinės konstrukcijos TAV antinio elemento masę, pavyzdžiui, siekiant tiek padidinti aukštos įtampos jungtuvo inerciją, kad jo įjungimo procesas sėkmingai baigtųsi ir tuo atveju, kai automatinio kartotinio įjungimo metu vėl įvyksta trumpasis jungimas ir pavaros maitinimo įtampa labai sumažėja. Taip pavyksta išvengti energijos kaupiklių pastotėse sudėtingų ir brangių talpinių ir induktyviųjų energijos kaupiklių pastotėse su kintamąja operatyviają įtampa.
10. Čia išanalizuotos savitosios TAEP savybės, į kurias būtina atsižvelgti sprendžiant TAEP taikymo ir tikslingumo įvairiose srityse klausimus [7].

4.1.3. Tiesiaeigių asinchroninių variklių kokybė

Variklio kokybės faktorius gali būti išreškiamas taip [7]:

$$G_0 = \frac{X_m}{R_m} \quad (4.1.3.1)$$

X_m - įmagnetinimo šakos induktyvioji varža;

R_m - įmagnetinimo šakos aktyvioji varža.

TAV skirstomi į greitaeigius, vidutinių greičių ir lėtaeigius. Skirstymo kriterijus yra Jamamuros (Yamamura) funkcionalas:

$$F_J = \frac{\mu_0 v^2}{4\omega_0 \rho_s g} \quad (4.1.3.2)$$

μ_0 - magnetinė konstanta;

v - TAV antrinio elemento greitis;

$\omega_0 = 2\pi f_1$ - induktoriaus srovės kampinis dažnis;

$\rho_s = \frac{\rho}{g_s} = \frac{\rho}{2\Delta}$ - antrinio elemento dalinė varža;

ρ - antrinio elemento medžiagos savitoji varža;

$g_c = 2\Delta$ - antrinio elemento storis;

$g = 2\delta$ - nemagnetinis tarpas.

Greitaeigiams TAV funkcionalas $F_J \gg 1$; lėtaeigiams $F_J < 1$. TAV, kurių parametrų derinys neatitinka nė vienos iš šių sąlygų vadinami vidutinių greičių TAV. Šį funkcionalą patogiu išreikšti magnetiniu Reinoldso (Reynolds) skaičiumi ε_0 , kurio operuojama tiesiaeigių asinchroninių ir magnetohidrodinaminių mašinų teorijoje:

$$F_J = \frac{\varepsilon_0}{4} (1-s)^2 \quad (4.1.3.3)$$

$\varepsilon_0 = \frac{\mu_0 \gamma_M \omega_0 \tau^2}{\pi^2} \cdot \frac{\Delta}{\delta}$ - magnetinis Reinoldso skaičius;

$s = \frac{v_0 - v}{v_0}$ - antrinio elemento slydimas;

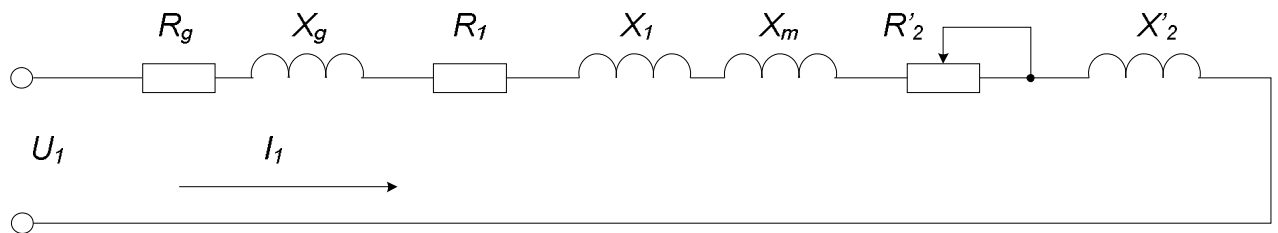
$v_0 = 2\pi f_1$ - sinchroninis greitis;

γ_M - antrinio elemento medžiagos savitasis laidis;

τ - poliaus žingsnis.

Esant dideliui kokybės faktoriui su ribotu polių skaičiumi $2p=8, 10$ reikia atsižvelgti į galų efektą. Kai kokybės faktorius mažas, net esant $2p=4, 6$ dinaminis galų efektas yra nežymus.

Galų reiškinyje gali būti statinis arba dinaminis. Statinis reiškinyje yra būdingas varikliams su nedideliu polių skaičiumi. Jo prigimtis yra nesimetrinės pirminės grandinės srovės, atsirandančios dėl nesimetrinės variklio magnetinės grandinės, o dinaminis galų reiškinyje yra susijęs su antrinio lemento judesiu. Ekvivalentinėje schemoje jo įtaka įvertinama papildomomis galų efekto varžomis, kurios priklauso nuo slydimo. TAV nuosekloji ekvivalentinė schema parodyta 4.1.3.1 pav.



4.1.3.1 pav. TAV nuosekloji ekvivalentinė schema

Pateiktoje schemoje nuosekliai sujungtos varžos: R_g ir X_g – galų efekto aktyvioji ir induktyvioji varžos; R_1 ir X_1 – TAV induktoriaus fazės (pirminės grandinės) aktyvioji ir induktyvioji varžos; X_m – pagrindinė induktyvioji varža; R'_2 ir X'_2 – antrinės aktyvioji ir induktyvioji varžos [7].

Galų reiškinyje įtaka variklio darbui priklauso nuo antrinio elemento judėjimo greičio, induktoriaus ir antrinio elemento parametrų. Šis reiškinyje yra tuo silpnesnis, kuo mažesnis greitis ir kuo ilgesnis induktorius, t.y. kuo didesnis polių skaičius. Galų efekto įtaka tiesiaiegių elektros pavarų klasei stiprėja didėjant sustabdytojo TAV magnetiniam Reynoldso skaičiui.

Dėl galų reiškinyje mažėja TAV traukos arba stūmos jėga, fazių pilnutinės varžos ir fazinės srovės tampa nevienodos, nors maitinimo įtampa yra simetriška [1].

Išilginis kraštų efektas susijęs su tiesiaiegio asinchroninio variklio baigtiniu ilgiu. TAV oro tarpe, be bėgančio magnetinio lauko, egzistuoja pulsuojantis laukas, kuris judančiame antriniame elemente indukuoja sroves, sukeliančias nuostolius, didinančias fazių induktyvias varžas. Išilginis kraštų efektas įvertinamas papildomomis varžomis, kurios priklauso nuo slydimo. Kuo mažesnis slydimas (didesnis judriojo elemento greitis), tuo didesnę įtaką variklio charakteristikoms turi išilginis kraštų efektas.

Šonų efekto prasmė aiškinama taip: kai TAV trumpai sujungtas antrinis elementas pakeičiamas laidžia monolitine plokšte, pasikeičia antrinio elemento srovių linijos. Monolitiniame antriniame elemente srovės linijos ne visame induktoriaus plote yra statmenos jo judėjimo kryptims. Todėl šis reiškinys yra tolygus aktyviųjų laidininkų sutrumpinimui. Kartu sumažėja variklio kuriamoji jėga. Tiesiaeigio asinchroninio variklio mechaninė charakteristika yra panaši į sukiojo, bet yra minkštesnė.

Sudarant tiesiaeigių variklių modelius, daromos patogios ir elektros pavaroms taikomos tokios prielaidos: a) į išilginį kraštų efektą neatsižvelgiama; b) magnetinis laukas išilgai variklio oro tarpo pasiskirstęs pagal sinuso dėsnį; c) oro tarpas tarp induktoriaus ir judriojo elemento pastovus; d) fazinės apvijos simetriškos ir sujungtos žvaigžde be nulinio laido; e) variklio apvijos prijungtos prie simetrinės įtampos; d) variklis maitinamas iš begalinės galios elektros tinklo [9].

4.1.4. Greitaeigių ir lėtaeigių tiesiaeigių asinchroninių variklių palyginamoji analizė

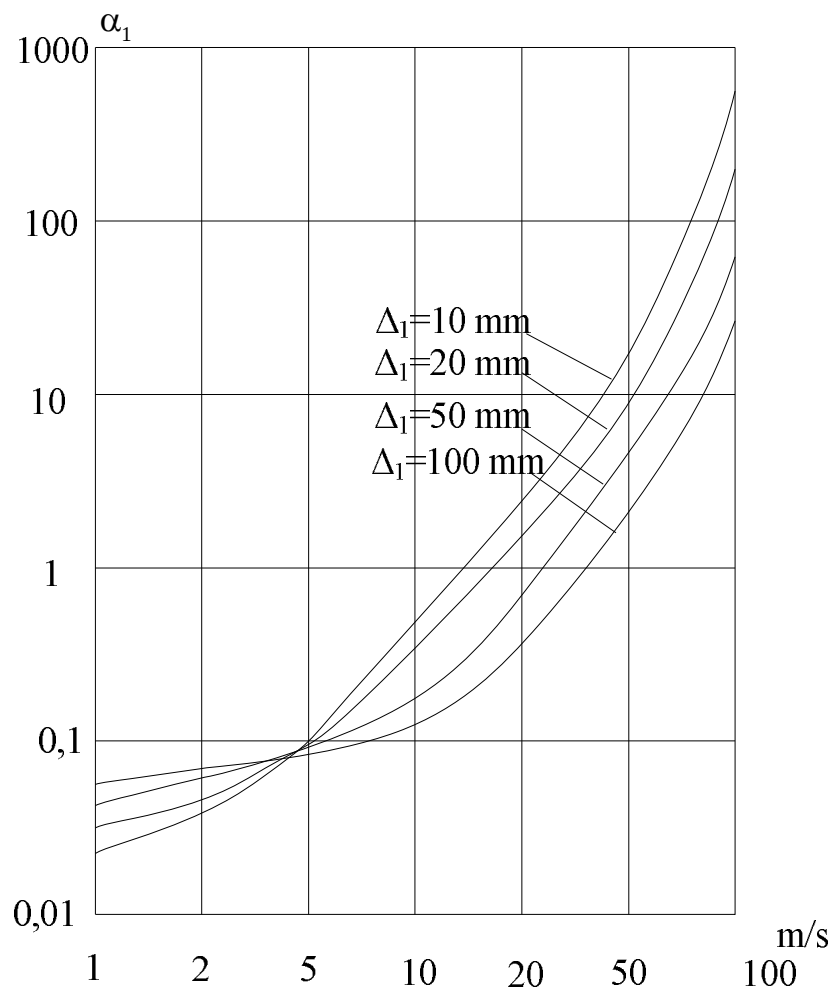
Greitaeigiai ir lėtaeigiai asinchroniniai varikliai skiriasi savo mechaninėmis savybėmis, nepriklausomai nuo to ar variklis yra sukusis, ar tiesiaeigis. Bendruoju atveju greitaeigių sukiųjų asinchroninių variklių charakteristikos yra geresnės, negu lėtaeigių variklių. Tačiau tai netaikoma tiesiaeigiams varikliams. Pagrindinis skirtumas tarp tiesiaeigio asinchroninio variklio ir asinchroninio variklio su sukamuoju rotoriumi yra tas, kad skiriasi jų oro tarpas. TAV oro tarpas yra nutrauktas tiek variklio pradžioje, tiek pabaigoje, o sukiojo variklio oro tarpas yra uždaras. Būtent dėl tokio oro tarpo TAV mechaninės charakteristikos yra labiau išskirtinės, negu sukiųjų asinchroninių variklių.

Tyrimai parodė, kad greitaeigių ir lėtaeigių tiesiaeigių variklių galų efekto pasireiškimas visiškai skirtingas šiems varikliams. Lėtaeigiuose varikliuose galų efekto jėgos greitis gali būti greitesnis nei variklio greitis ir netgi didesnis nei jo sinchroninis greitis, o tuo tarpu greitaeigiuose varikliuose galų efekto jėgos greitis yra artimas variklio greičiui ir negali būti didesnis nei sinchroninis greitis.

Lėtaeigiuose varikliuose galų efekto jėgos numalšinimas įvyksta greitai, o greitaeigiuose varikliuose galų efekto jėga lėtai numalšinama, kuri išlieka per visą oro tarpo ilgį. Toks efektas turi įtakos greitaeigių variklių mechaninėms charakteristikoms. Lėtaeigių variklių galų efekto jėga gerina variklio savybes mažo slydimo srityje, didindama traukimo jėgą ir galingumo koeficientą. Be to, dar ši jėga padeda padidinti traukimo jėgą netgi prie sinchroninio ir dar didesnio greičio. Traukimo jėga ir galingumo koeficientas greitaeigiuose varikliuose

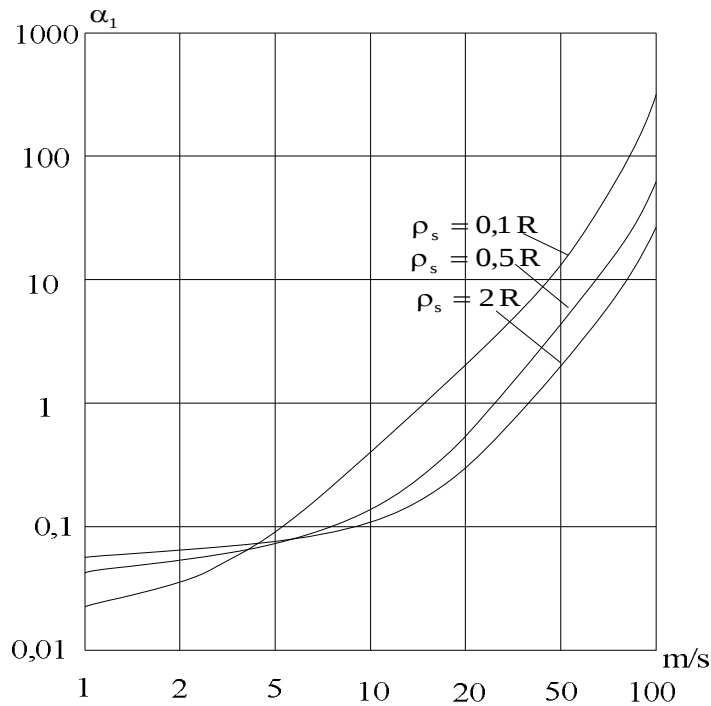
žymiai nusileidžia mažų slydimų srityje. Dėl to pritaikymas tampa sudėtingas. Skirtumai tarp greitaeigių ir lėtaeigių variklių seniau nebuvo tyrinėjami, todėl gauti lėtaeigių variklių rezultatai buvo pritaikyti ir greitaeigiams varikliams. Dėl šios priežasties nebuvo ištyrinėta greitaeigių variklių galų efekto įtaka.

Greitaeigiuose varikliuose įsiskverbimo gylis α_1 galų efekto jėgos įtakai yra didesnis, negu lėtaeigiuose. Galų efekto jėgos įtaka TAV savybėms yra žymiai didesnė greitaeigių variklių, negu lėtaeigių. Iš (4.1.4.1 pav.) ir (4.1.4.2 pav.) matyti, kad nemagnetinio tarpo dydis Δ_1 ir antrinio elemento dalinė varža ρ_s skirtingai veikia įsiskverbimo gylį α_1 įeinančių galų efekto, greitaeigiuose ir lėtaeigiuose varikliuose. Lėtaeigiuose varikliuose, kuo didesnis Δ_1 , tuo didesnis α_1 , o su greitaeigiais atvirkščiai, didėjant nemagnetiniam tarpui, mažėja įsiskverbimo gylis. Dėl to keičiasi paviršiaus pasipriešinimai [25].



4.1.4.1 pav. Įsiskverbimo gilio priklausomybė nuo greičio,

$$\text{kai } f_1 = 50 \text{ Hz, } \rho = 3,38 \cdot 10^{-6} \Omega.$$



4.1.4.2 pav. Įsiskverbimo gylio priklausomybė nuo greičio, kai $f_1 = 50 \text{ Hz}$, $\Delta_1 = 20 \text{ mm}$, $R = 1,69 \cdot 10^{-6} \Omega$.

Galų efekto jėgos greičio priklausomybė yra pateikta išraiškoje:

$$v_e = \frac{\omega \tau_e}{\pi} = v_s \frac{\tau_e}{\tau} = 2 f_1 \tau_e \quad (4.1.4.1)$$

- čia v_e - galų efekto jėgos greitis;
 ω - kampinis dažnis;
 τ_e - induktoriaus poliaus ilgis;
 τ - induktoriaus poliaus žingsnis;
 v_s - sinchroninis greitis;
 f_1 - dažnis.

Mažų greičių tiesiaeigiuose asinchroniniuose varikliuose galų efekto jėgos greitis yra didesnis už variklio sinchroninį greitį ir priklauso nuo dažnio, nemagnetinio sluoksnio ir dalinės varžos. Pavyzdžiui, esant dažniui $f_1 = 50 \text{ Hz}$, $\rho_s = 3,38 \cdot 10^{-5} \Omega$ ir $v = 10 \text{ m/s}$, tai $v_e = 23 \text{ m/s}$. Mažų greičių srityje, galų efekto jėga juda daugiau nei dvigubai didesniu greičiu nei variklio greitis. Toks greitis gali būti tik lėtaeigiuose tiesiaeigiuose asinchroniniuose varikliuose.

Lėtaeigiuose varikliuose galų efekto jėga greitai išnyksta ir jos įtaka variklio savybėms yra nežymi [25].

4.2. Elektros pavaros su tiesiaiegiu asinchroniniu varikliu stabdymo proceso analizė

Tiesiaiegių variklių taikymas technikos įrenginiuose ir mechanizmuose kelia pavarai labai skirtingus ir savitus reikalavimus. Didesniąją dalį sudaro įrenginiai ir mechanizmai, kuriems reikalinga ilgalaikė tiesiaiegio variklio galia [8].

Šiuo atveju svarbūs viso įrenginio energetiniai bei ekonominiai rodikliai. Kitais atvejais svarbu gauti maksimalią jėgą, kai antrinis elementas nejuda arba judėjimo greitis yra mažas ir ribotas. Būdingas darbo režimas – trumpalaikis ir trumpalaikis kartotinis.

Yra specifinės paskirties mechanizmų ir įrenginių, kuriuos naudojant svarbiausia gauti maksimalią energiją ribotoje kelio atkarpoje arba per tam tikrą laiką. Tokių įrenginių pavyzdžiai: lėktuvų greitinimo, automobilių ir laivų poveikio reikalingos pavaros. Joms keliama kiti reikalavimai negu bendrosios paskirties varikliams.

Tiesiaiegio asinchroninio variklio elektrinio stabdymo mokslinę bei techninę problemą sudaro šie pagrindiniai klausimai:

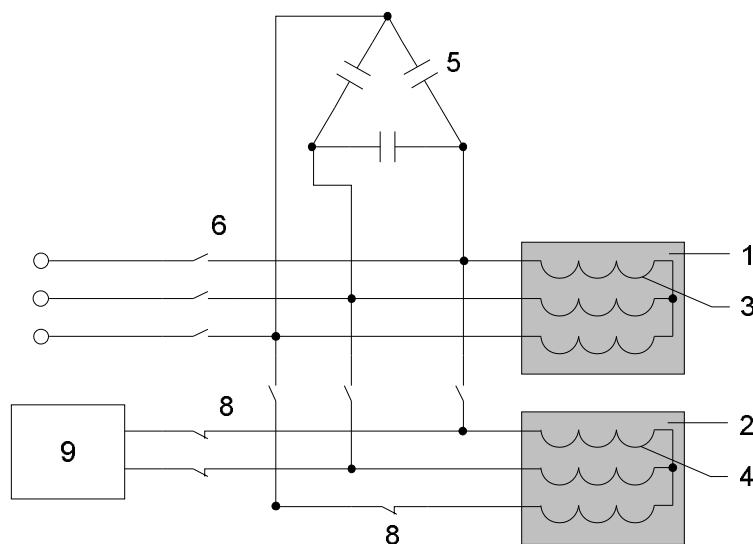
1. Tiesiaiegio asinchroninio variklio matematinio modelio sudarymas stabdymo režimams skaičiuoti.
2. Induktoriaus elektromagnetinio lauko aprašymas ir skaičiavimas.
3. Stabdymo jėgos skaičiavimas esant įvairiems tiesiaiegio variklio konstrukcijos atvejams ir skirtingoms magnetinio Reynoldso skaičiaus vertėms.
4. Nestacionaraus stabdymo režimo skaičiavimai, atsižvelgiant į pagreičio įtaką variklio charakteristikoms.
5. Įvairių stabdymo būdų efektyvumas.
6. Naujų stabdymų tyrimas ir schemų kūrimas [8].

Vienas iš svarbiausių dydžių, apibūdinančių tiesiaiegio variklio tinkamumui konkrečiam pramonės mechanizmui, yra jo išvystoma traukos jėga. Traukos jėgą suprantame jėgą, veikiančią antrinį elementą jo judėjimo kryptimi. Tačiau traukos jėgą galima laikyti ir elektromagnetinę jėgą, kuri nejudantį induktorių veikia antrinio elemento judesiui priešinga kryptimi [10].

Tiesiaiegiuose asinchroniniuose varikliuose atsirandančios jėgos bendruoju atveju veikia visų trijų koordinačių kryptimi. Svarbiausia iš jų yra jėga veikiant išilginės mašinos ašies, t.y. x koordinatės kryptimi. Tos jėgos kryptis priklauso nuo darbo režimo, ir vienais atvejais ji yra traukos jėga, o kitais stabdymo jėga. Stabdymo jėga, veikianti x ašies kryptimi, yra pagrindinis šio tyrimo objektas [10].

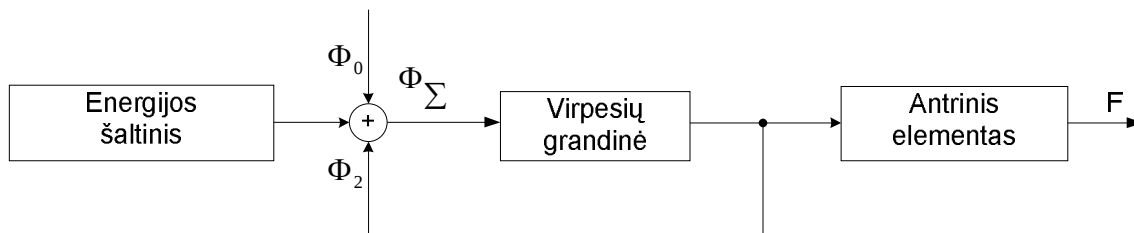
Tiesiaeigių asinchroninių variklių elektriniam stabdymui naudojami visi žinomi įprastų asinchroninių variklių stabdymo būdai. Tiesiaeigiams varikliams yra sukurti nauji stabdymo būdai: kondensatorinis stabdymo būdas, stabdant priešiniu jungimu, stabdant pulsuojamąja srove ir kt. Taip pat sukurtos naujos stabdymo schemos.

Pasiūlytas naujas stabdymo būdas remiantis išradimu Nr. 725176 (4.2.1 pav.) leidžia sumažinti stabdymo trukmę. Stabdymo schemeje pažymėta 1 ir 2 – tiesiaeigio variklio induktoriai, 3 ir 4 – fazinės apvijos, 5 – kondensatorių baterija, 6, 7 ir 8 – kontaktorių kontaktai, 7 – komutatoriaus kontaktai, 9 – vienfazės įtampos šaltinis. Tokios schemos stabdymas vyksta taip: kontaktorius 6 pirmiausia atjungia nuo tinklo induktorių fazines apvijas 3 ir 4, kurios buvo sujungtos lygiagrečiai, ir kondensatorių bateriją 5. Nuo atjungimo momento kondensatoriai tiekia reaktyviąją srovę apvijoms 3, 4 ir palaiko liekamąjį magnetinį srautą. Dėl to prasideda kondensatorinis stabdymas ir susidaro pradinė stabdymo jėga. Toliau atjungiami komutatoriaus kontaktai 7 ir sujungiami 8. Atjungus kontaktus 7, abiejų induktorių apvijos atskiriamos. Viena induktoriaus 2 fazinė apvija sujungiama trumpai, o kitos dvi apvijos prijungiamos prie vienfazės įtampos šaltinio. Induktoriaus 1 apvijos lieka prijungtos prie kondensatorių baterijos 5. Per dvi induktoriaus 2 fazines apvijas 4 teka vienfazė kintamoji srovė, kuri kuria pulsuojamąjį magnetinį srautą. Antrinio elemento srovių ir pulsuojamojo srauto sąveikos rezultatas – vienfazio stabdymo jėga. Induktoriuje 1 toliau vyksta kondensatorinis stabdymas, kol pasibaigia susižadinimo procesas, o Induktoriuje 2 – vienfazis stabdymas. Stabdymo metu variklio antrinį elementą veikia dvi stabdymo jėgos. Pulsuojamasis magnetinis srautas palaiko stabilų susižadinimo procesą mažesnei kondensatorių talpai [7].



4.2.1 pav. Stabdymo būdas pagal išradimą Nr. 725176

Tyrimai rodo, kad elektromechaninė sistema, kurią sudaro asinchroninis variklis ir kondensatorių baterija, pagal struktūrą, veikimo principą ir savybes generatorinio režimo atveju atitinka tipinę autovirpesių sistemą (žr. 4.2.2 pav.), o stabdymo atveju slopstančiųjų virpesių sistemą.



4.2.2 pav. Autovirpesių sistema asinchroninė mašina – kondensatorius

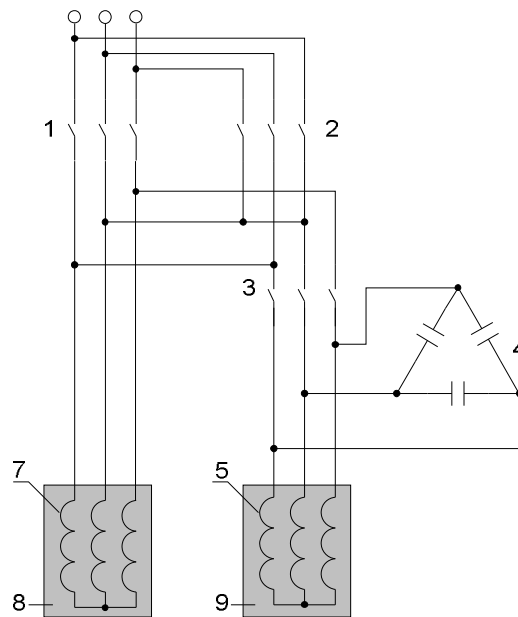
Čia yra šios savaiminių virpesių sistemos grandys: virpesių grandinė – variklio ekvivalentinės varžos ir kondensatoriaus reaktyvioji varža; magnetinio srauto grįžtamas ryšys – elektromagnetinis ryšys tarp statoriaus ir rotoriaus, kurį sudaro antrinis žadinimo srautas; energijos šaltinis – kitas variklis arba judamųjų sistemos dalių inercija.

Jeigu variklio antrinio elemento greitis yra didesnis už kontūro rezonansinį dažnį ω , mašina veikia generatoriniu režimu, kurio slydimas s yra neigiamas.

Susižadinimo procesas yra ekvivalentiškas virpesių susidarymui rezonansinėje grandinėje, kurios virpesių pastovumas yra susijęs su vidutiniu srauto grįžtamuoju ryšiu ir su antrinio elemento judesio greičiu. Kai tokioje sistemoje susidaro elektromagnetinio rezonanso sąlygos, gaunamas stabilus asinchroninės mašinos generatorinis arba stabdomasis režimas.

Kondensatoriaus teikiama srovė yra grynai reaktyvaus pobūdžio, todėl stabdymo jėgos sukurti negali. Ji dalyvauja tik energijos mainuose ir palaiko srautą susižadinimo metu [8].

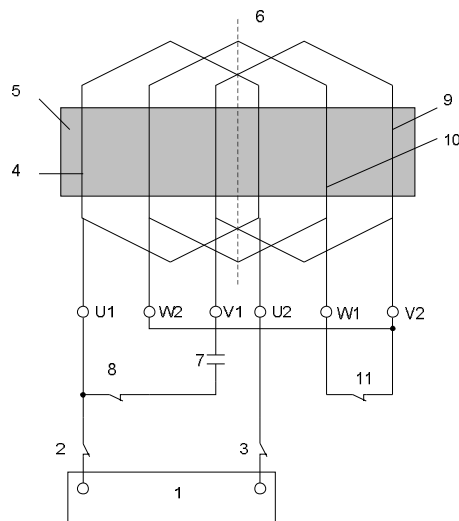
Stabdymo būdas pagal išradimą Nr. 928552 (4.2.3 pav.) leidžia padidinti stabdymo efektyvumą. Stabdymo schemeje pažymėta: 1 ir 2 – reversinio kontaktoriaus kontaktai, 4 – kondensatorių baterija, 5 ir 7 – induktorių apvijos, 6 ir 8 – tiesiaeigio variklio induktoriai. Stabdymo procesas vyksta taip: perjungiami reversavimo kontaktai ir kartu atjungiami kontaktai 3. Tuomet induktoriaus 8 fazinės apvijos 7 prijungiamos prie kitos fazių sekos tinklo, o kito induktoriaus 6 fazinės apvijos 5 – prie kondensatorių baterijos 4. Induktorius 8 bėgamas magnetinis laukas kerta kito induktoriaus fazines apvijas 5 ir indukuoja jose elektrovaras, kurios palaiko žadinimo srautą ir susižadinimo procesą. Stabdant šiuo būdu induktoriuje 8 vyksta priešinio jungimo stabdymas. Palyginti su priešinio jungimo stabdymu, stabdymo trukmė sumažinta 21 %, o stabdymo kelias 17 %.



4.2.3 pav. Stabdymo įtaisas pagal išradimą Nr. 928552

Stabdymo įtaisą remiantis išradimu Nr. 856185 (4.2.4 pav.) sudaro tiesiaiegis variklis, kintamos srovės šaltinis, kontaktorius ir kondensatorius.

Stabdant variklis atjungiamas nuo tinklo, įjungiamas stabdymo kontaktorius, kurio kontaktai 2, 3, 8 ir 11 užsidaro. Tuomet U fazės apvija prijungiama prie kintamos srovės šaltinio, V fazės grandinėje įjungiamas kondensatorius, o W fazė sujungta trumpai. Vidurinės V fazės induktyvioji varža yra didesnė negu kitų dviejų, kurios arčiau induktoriaus kraštų. Todėl U ir W fazinių apvijų srovė yra didesnė negu V fazėje. Toks stabdymo įtaisas padidina stabdymo jėgą 10 % ir sumažina stabdymo laiką bei kelią 6% [7].



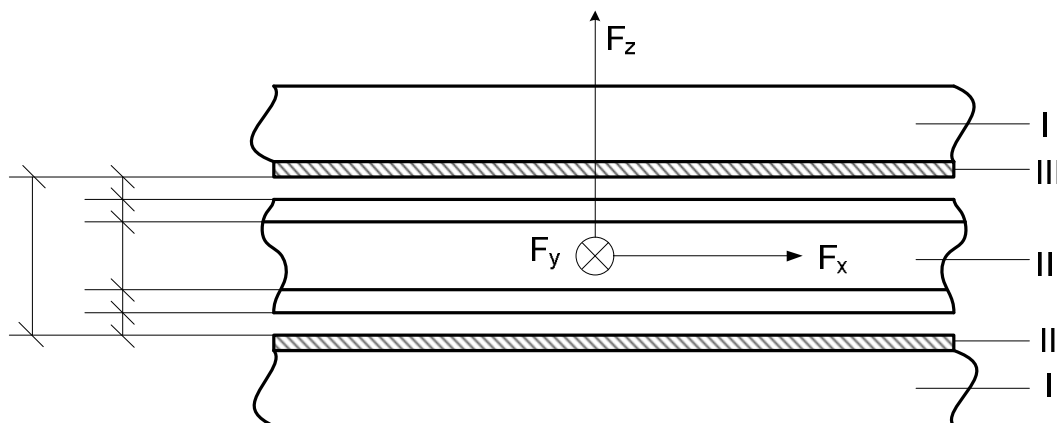
4.2.4 pav. Stabdymo įtaisas pagal išradimą Nr. 856185

4.3. Elektros pavaros su tiesiaeigiu asinchroniniu varikliu matematinio modelio tyrimas

4.3.1 Elektros pavaros su TAV matematinio modelio sudarymas

Tiesiaeigių asinchroninių variklių elektrinio stabdymo mokslinė bei techninė problema sprendžiama sudarant TAV matematinį modelį stabdymo režimams skaičiuoti, aprašant elektromagnetinį lauką bei skaičiuojant stabdymo jėgą, esant įvairiai tiesiaeigio variklio konstrukcijai ir skirtingoms magnetinio Reynoldso skaičiaus vertėms [4].

Darbe nagrinėjamas greitaigės elektros pavaros su TAV modelis, kuris yra sudarytas iš dviejų lygiagrečių induktorių, kuriuose sutelktos paviršinės srovės kuria sklindantį magnetinį lauką. Tiriant tiesiaeigio asinchroninio variklio mechanines charakteristikas, naudojamas geometrinis modelis, kuris pavaizduotas 4.3.1 pav.



4.3.1 pav. Apibendrintas TAV modelis

Pateiktame paveiksle išskiriamos tokios tiesiaeigio asinchroninio variklio modelio zonos:

- I – induktorius;
- II – antrinis elementas;
- III – labai plonas srovinis sluoksnis;
- IV – oro tarpai tarp induktoriaus ir antrinio elemento.

Maitinant induktorių trifaze kintamąja srove, jame sukuriamas magnetinis sklindantis laukas, kuris antriniame elemente indukuoja sroves. Šių srovių sąveika su induktoriaus magnetiniu lauku sukuria jėgą, kurią galima išsklaidyti į tris dedamąsias:

- F_x – nukreipta x ašies kryptimi, vadinamoji traukos jėga, kuriai veikiant antrinis elementas arba induktorius pradeda judėti tiesiaeigiu judesiu. Tokia jėga yra didžiausia TAV modelyje su dviem induktoriais;

- F_y – nukreipta y ašies kryptimi, vadinama šoninio veikimo jėga, kuri atsiranda, kai TAV yra nesimetriškas zx plokštumos atžvilgiu.
- F_z – nukreipta z ašies kryptimi, vadinama normaline arba pritraukimo jėga, kuri atsiranda, kai TAV nesimetriškas xy plokštumos atžvilgiu. Ši jėga yra didžiausia TAV modelyje su nemagnetinės medžiagos antriniu elementu ir vienu induktoriumi.

Greitaeigio transporto elektros pavaroms induktoriai gaminami iš geležies, tokia feromagnetinė medžiaga pasižymi labai stipriomis mechaninėmis, fizikinėmis ir elektromagnetinėmis savybėmis.

Geležis ir jos lydiniai yra plačiausiai naudojamas metalas (jie sudaro 95% visų metalinių gaminių masės). Toks populiarumas susijęs su geležies santykiniu pigumu ir tvirtumu, dėl kurio ją galima panaudoti įvairiose srityse, įskaitant automobilių pramonę, laivų statybą, statybinių konstrukcijų gamybą. Geležies pagrindu kuriamos naujos medžiagos, atsparios aukštai arba žemai temperatūrai, vakuumui ar dideliui slėgiui, agresyvioms aplinkoms, didelėms kintamoms apkrovoms, jonizuojantiems spinduliams [20].

Geležies magnetinė skvarba yra labai didelė, lyginant su vario ar aliuminio magnetinėmis skvarbomis ($\mu_0 = \infty$), o elektrinis laidis lyginant su minėtomis medžiagomis yra labai mažas ($\gamma = 0$). Oro magnetinė skvarba yra lygi vienetui.

Galima pažymėti, kad santykinė magnetinė skvarba yra lygi:

$$\mu = 1 + \chi \quad (4.3.1.1)$$

čia: χ - magnetinis jautris ($\chi_{(Fe)} = 3000, \chi_{(Cu)} = -0,92, \chi_{(Al)} = 2,2$) [19].

Iš anksčiau pateiktų duomenų galima apskaičiuoti naudojamų medžiagų santykinę magnetinę skvarbą, kurios vėliau bus panaudotos skaičiavimams su programiniu paketu *MathCAD 2001 Professional*. Vadinasi geležies santykinė magnetinė skvarba lygi 3001.

Sukurtas apibendrintas modelis leidžia tirti įvairius statinius TAV režimus. Norint tirti variklio konstrukcinių parametrų ar statinės apkrovos įtaką reikia apskaičiuoti ir keisti modelio parametrus. Parametrų apskaičiavimams pasirinktas konkretus greitaeigės elektros pavaros su tiesiaeigiu asinchroniniu varikliu „LIM – 1250“ modelis, kurio duomenys pateikti 4.3.1 lentelėje.

4.3.1 lentelė. Tiesiaeigio asinchroninio variklio modelio „LIM – 1350“ techniniai parametrai.

Nr.	Pavadinimas	Žymėjimas	Vertė	Matavimo vienetai
1.	Maksimali galia	P_{max}	400	kW
2.	Jėga	F_{max}	6	kN
3.	Įtampa	U_1	750	V
4.	Tinklo dažnis	f_1	50	Hz
5.	Masė	m	575	kg
6.	Sinchroninis greitis	v_s	66,7	m/s
7.	Fazių skaičius	m_1	3	-
8.	Apvijų skaičius	w_1	960	-
9.	Apvijų koeficientas	k_{ap}	1	-
10.	Induktoriaus plotis	$2c$	0,406	m
11.	Polių porų skaičius	p	8	-
12.	Aktyvioji varža	r_1	2,82	Ω
13.	Induktyvioji varža	$x_{\sigma 1}$	5,96	Ω
14.	Polių ilgis	τ	0,1	m
15.	Reynoldso skaičius	ε_0	8, 10, 12, 14	-
16.	Magnetinė skvarba	μ_3	3001	-
17.	Oro tarpo plotis	δ_1	0,005	mm
18.	Neferomagnetinis sluoksnis SE	Δ_1	0,005	mm
19.	Neferomagnetinis sluoksnis SE	Δ_3	0	mm

Visi skaičiavimai atliekami taikant programinį paketą *MathCAD 2001 Professional*. Taikant programinį paketą pagal, sekančias formules sudaromas matematinis elektros pavaros su tiesiaeigio asinchroniniu varikliu modelis statinėms charakteristikoms tirti.

Srovės, kuri kerta apvijas, tankis gali būti apskaičiuota iš šios formulės:

$$J_1 = \frac{3\sqrt{2}w_1k_{ap}}{p\tau} I_1, \quad (4.3.1)$$

čia: w_1 – apvijų skaičius;
 k_{ap} – apvijų koeficientas;
 p – polių skaičius;
 τ – polių ilgis;
 I_1 – elektros srovė.

TAV elektromagnetinė jėga veikianti išilgai x koordinatės formulė:

$$F_x = \frac{m_1 L_{\delta 0} \alpha K_m U_1^2}{(r_1 - \omega_1 L_{\delta 0} K_m)^2 + (x_{\sigma 1} + \omega_1 L_{\delta 0} K_r)^2}; \quad (4.3.2)$$

Apskaičiuojama induktyvumo reikšmė:

$$L_{\delta 0} = \mu_0 \frac{m_1 w_1^2 k_{ap}^2 2c}{p}; \quad (4.3.3)$$

Apskaičiuojami koeficientai:

$$K = K_r + iK_m; \quad (4.3.4)$$

$$K^{NN} = \frac{a_1 sha\delta_1 + \beta b_1 cha\delta_1}{a_1 cha\delta_1 + \beta b_1 sha\delta_1}; \quad (4.3.5)$$

$$K^{NS} = \frac{a_2 sha\delta_1 + \beta b_2 cha\delta_1}{a_2 cha\delta_1 + \beta b_2 sha\delta_1}; \quad (4.3.6)$$

$$a_1 = ch\lambda_3 \Delta_3 ch\lambda_2 \Delta_1 + \Theta sh\lambda_3 \Delta_3 sh\lambda_2 \Delta_1 \quad (4.3.7)$$

$$b_1 = ch\lambda_3 \Delta_3 sh\lambda_2 \Delta_1 + \Theta sh\lambda_3 \Delta_3 ch\lambda_2 \Delta_1; \quad (4.3.8)$$

$$a_2 = sh\lambda_3 \Delta_3 ch\lambda_2 \Delta_1 + \Theta ch\lambda_3 \Delta_3 sh\lambda_2 \Delta_1 \quad (4.3.9)$$

$$b_2 = sh\lambda_3 \Delta_3 sh\lambda_2 \Delta_1 + \Theta ch\lambda_3 \Delta_3 ch\lambda_2 \Delta_1; \quad (4.3.10)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{\tau}; \quad (4.3.11)$$

$$\beta = \frac{\alpha}{\lambda_2}; \quad (4.3.12)$$

$$\Theta = \frac{\lambda_2 \mu_3}{\lambda_3 \mu_0}; \quad (4.3.13)$$

Kampinis greitis randamas iš formulės (4.3.14)

$$\omega_1 = 2\pi f_1; \quad (4.3.14)$$

$$\lambda_2 = \alpha \sqrt{1 + i\varepsilon_2}; \quad (4.3.15)$$

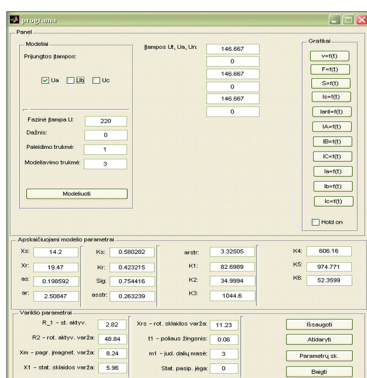
$$\lambda_3 = \alpha \sqrt{1 + i\varepsilon_3}, \quad (4.3.16)$$

čia: m_1, f_1, ω_1, U_1 – fazių skaičius, dažnis, kampinis dažnis, tinklo įtampa;
 w_1, k_{ap} – apvijų skaičius, ritės koeficientas;
 $2c$ – induktoriaus plotis;
 $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m – magnetinė vakuumo skvarba;
 $r_1, x_{\sigma 1}$ – aktyvios ir reaktyviosios sklaidos induktoriaus apvijų varžos;
 $\varepsilon_2, \varepsilon_3$ – Reynoldso magnetinis skaičius;
 $L_{\delta 0}$ – induktyvumo reikšmė;
 K, K^{NN}, K^{NS} – kompleksas koeficientų, induktyvių polių, kurie (NN) ir (NS) yra priešiniams poliams tarp induktorių.

4.3.2 TAV charakteristikų skaičiavimo programos

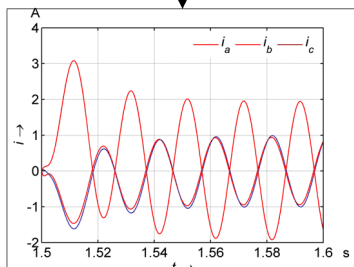
Jau seniai elektromechaninių sistemų su varikliais tyrimui, skaičiavimui, projektavimui bei modeliavimui naudojamos įvairios šiuolaikinės automatizuoto modeliavimo bei projektavimo programos, palengvinančios ir pagreitinančios TAV charakteristikų skaičiavimus bei daugelio savybių automatizavimą.

Viena iš pagrindinių ir dažniausiai naudojamų TAV tyrimui programinių paketų – *MATLAB*. Ją patogiu naudoti tiriant ar modeliuojant tiesiaeigio asinchroninio variklio pereinamuosius procesus. Su šia programa galima analizuoti bei projektuoti įvairius variklius (ar pavaras) ir jų valdymo ar elektromechanines sistemas. Pradiniai duomenys – matematinis variklio modelis (matematinės lygtys). Remiantis jomis su ir ją optimizuoti. Programa pateikia gana tikslius ir patogius analizavimui rezultatus. Ypatingai patogiu naudoti *MATLAB* tiriant arba projektuojant tiesiaeigių variklių valdymo sistemas. Programinio paketo *MATLAB* aplinkos struktūrinė schema pateikta 4.3.2.1 pav. [21].

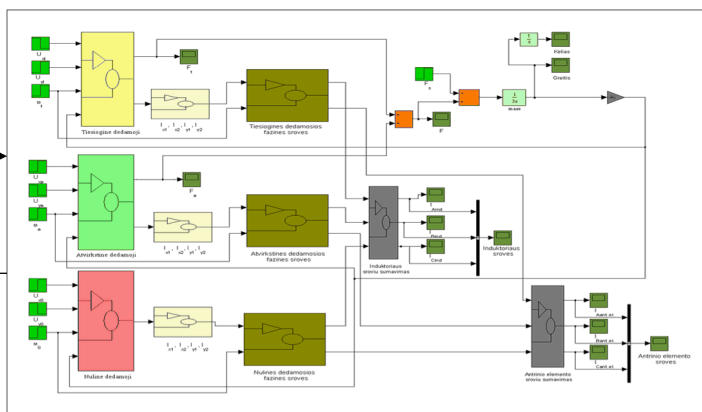


Imitacijos rezultatų
grafinis išvedimas

Charakteristikos

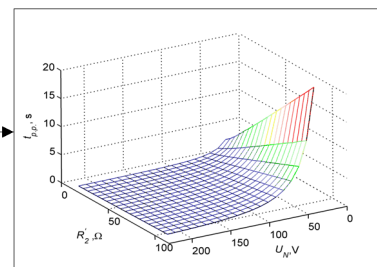


Apibendrintas modelis



Programa imitācijas
rezultatams apdoroti

Rezultatai

[illegible]

4.3.2.1 pav. *MATLAB* modeliavimo aplinkos veikimo principas

Daugelis programinių paketų gali tirti keletą pasirinkto objekto modelio charakteristikų. Pavyzdžiui, mechaninius įtempimus, Joule'o šilumos efektą, elektrostatiką, elektromagnetizmą, magnetizmą, pereinamuosius procesus. Be to, programos leidžia tirti modelio mišrias užduotis (pvz., elektrostatiką ir kartu šilumos pasiskirstymą ir pan.).

Šio tyrimo mechaninių savybių ir skaičiavimo analizei pasirinktas matematinis paketas *MathCAD 2001 Professional*. Ši programa leidžia sujungti tekstą, matematinius skaičiavimus ir grafiką į vieną mokamąją medžiagą, tai ji daro pakankamai lengvai. *MatchCAD* – tai skaitmeninis matematinis paketas, turintis ir kai kurias simbolinio (analitinio) skaičiavimo funkcijas. Skaitmeniniai matematiniai paketai visus veiksmus atlieka apytiksliai, naudodami skaitmeninius skaičiavimo metodus, todėl jie ne visada gali pateikti analitinės išraiškas. Matematinio paketu *MathCAD* galima automatizuoti sudėtingus skaičiavimo procesus. *MathCAD* pavadinimas kilęs iš anglų kalbos žodžių *MATHeMatica* ir *CAD (Compiuter Aided Design)*. *MathCAD* išsiskiria nesudėtinga vartotojo sąsaja, standartinių funkcijų ir simbolinio skaičiavimo bei programavimo priemonėmis, galimybe naudotis *Windows*, puikia grafika ir labai didele pavyzdžių biblioteka. Paketas taikomas įvairiose mokslo, technikos, ekonomikos srityse skaičiavimo procesų modeliavimui ir vizualizacijai.

Palyginus su *MATLAB* matematiniu paketu, *MathCAD 2001 Professional* pasižymi lengviau išmokstama ir paprasčiau naudojama vartotojo sąsaja, todėl pirmieji žingsniai būna itin lengvi. Tačiau kuriant sudėtingesnius modelius gana greitai ši patogi sąsaja nebepadeda: sudėtingus, realius mokslo uždavinius spręsti skirtos sistemos ne paprastesnės kaip *MATLAB* ar net tradicinės programavimo kalbos. Paketas turi ir programavimo galimybes, tačiau vartotojo programų darbo sparta ribota, nes tai yra interpretuojanti sistema. Funkcijas *MathCAD* galima rašyti ir „C++“ programavimo kalba (DLL bibliotekos forma), tačiau paprastai darbo grupė, ėmusi programuoti „C++“ pastebi, jog paprasčiau šia kalba užprogramuoti visą užduotį, išskyrus nebent rezultatų vizualizaciją.

Daug geriau *MathCAD 2001 Professional* pasiteisina tradicinėmis kalbomis sukurtų modelių rezultatų vizualizavimui, kurį lengva derinti su baigiamąja statistine analize ir kitomis panašiomis operacijomis. Šiuo atveju patys modeliai gali būti vykdomi ir superkompiuteriuose, naudojant lygiagretų programavimą (su *MathCAD 2001 Professional* tai nėra galima). Draugiška sąsaja šiuo atveju naudojama greitai keisti informacijos pateikimo būdus. Tokiu būdu efektyviai išvengiama daug darbo reikalaujančio grafikos programavimo, kuris biologui ar fizikui didelės fundamentalios mokslinės vertės neturi.

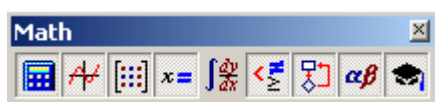
MathCAD 2001 Professional neblogai tinka ir statistinei duomenų analizei, jei ji yra bent kiek sudėtingesnė [20].

MathCAD 2001 Professional visą darbinę darbo lapo erdvę skirsto į kelias sritis. Kiekvienoje srityje užrašyti veiksmai arba skaičiavimai atliekami tuoj pat kai tik patraukiame žymeklį iš tos srities. Sritys būna trijų pagrindinių tipų:

1. **Tekstiniai** fragmentai;
2. **Matematinės** išraiškos;
3. **Grafinės** sritys.

Kitaip nenurodžius, automatiškai sukuriami matematinė sritis, kurioje galima vykdyti matematinius skaičiavimus. Informaciją apie *MathCAD 2001 Professional* komandas ir operacijas galima gauti paspaudus pagalbos mygtuką **F1**. Pagrindinės sritys ir operacijos, kurios taikomos šiame darbe, aprašomos detaliau.

Pagrindinių įrankių rinkiniai iškviečiamas taip: **View** → **Toolbars** → **Math**. 4.3.2 pav. Parodytas matematinių simbolių įrankių langas.



4.3.2 pav. *MathCAD 2001 Professional*
matematinų simbolių įrankiai

Matematinių simbolių, formulių įvedimo ir skaičiavimo įrankių sąrašas:

1. Brėžinių įrankiai (aprašius funkciją ir jos kitimo ribas galima nubrėžti bet kurios funkcijos įvairių formų grafiką).
2. Matricinių skaičiavimo įrankiai.
3. Šablonų operatoriai.
4. Išvestinių integralų, progresijų, ribų skaičiavimo įrankiai.
5. Lygčių, tapatybių ir palyginimo operacijos ir kt.
6. Programavimo įrankiai (*Add Line, if, for, while, otherwise* ir kt.).
7. Graikiška abėcėlė (α, β, χ ir kt.) .
8. Simbolinio skaičiavimo įrankiai (suprastinti, išskaidyti dauginamaisiais, apskaičiuoti ir kt.).

Matematinių išraiškų sritis yra kuriama automatiškai, todėl be papildomų nurodymų galima atlikti skaičiavimus. Vietą darbalaukyje žymi „+“ ženklas. *MathCAD 2001 Professional* turi šias standartines operacijas:

„^“	- kėlimas laipsniu;
„/“	- dalyba;
„*“	- daugyba;
„+“	- sudėtis;
„-“	- atimtis;
„[Ctrl][Enter]“	- sudėtis pereinant į naują eilutę
„\“	kvadratinė šaknis;
„!“	faktorialas;
„ “	modulis;
„:“	priskyrimas (ekrane matome :=);
„=“	įvykdyti operaciją.

Matematinės funkcijos. Matematinis paketas - *MathCAD* turi savyje standartines matematines funkcijas, tokias kaip *sin, cos, tan, exp, ln, log* ir kt. Taip pat galima sukurti ir nestandartines funkcijas, tam reikia naudoti priskyrimo operaciją.

Vienmatės funkcijos grafikas iššaukiamas paspaudus @ arba pasirinkus grafinę paletę  *MathCAD* sukurs grafiko sritį, kurioje reikia nurodyti iteracinį kintamąjį (apačioje viduryje), funkciją (kairėje viduryje) ir grafiko ribas. Nenurodžius šių ribų, jos nustatomos automatiškai.

Funkcijų kintamieji. Kintamųjų vardai sudaromi iš raidžių, skaitmenų bei pabraukimo simbolių ir visada turi prasidėti raide. Kintamieji gali būti lokalūs ir globalūs. Lokalūs kintamieji apibrėžiami $Shift + : (:=)$, globalūs - $\equiv$.

MathCAD 2001 Professional privalumai:

- matematinių uždavinių užrašymo forma maksimaliai priartina natūraliai užrašymo formai. Nėra nematomų objektų;
- nedidelė kaina, todėl tinka masiniam vartojimui;
- universali sistema – galima rinkti tekstą, atlikti skaitinius ir analitinius skaičiavimus, vaizduoti funkcijas grafiškai ir kt.;
- talpina daug matematinių funkcijų;
- platus įvairių tipų grafikų spektras;
- programavimo galimybės;
- palaikoma OLE technologija leidžia keisti objektus su kitomis programomis [22].

MathCAD 2001 Professional atliekamos matematinės operacijos:

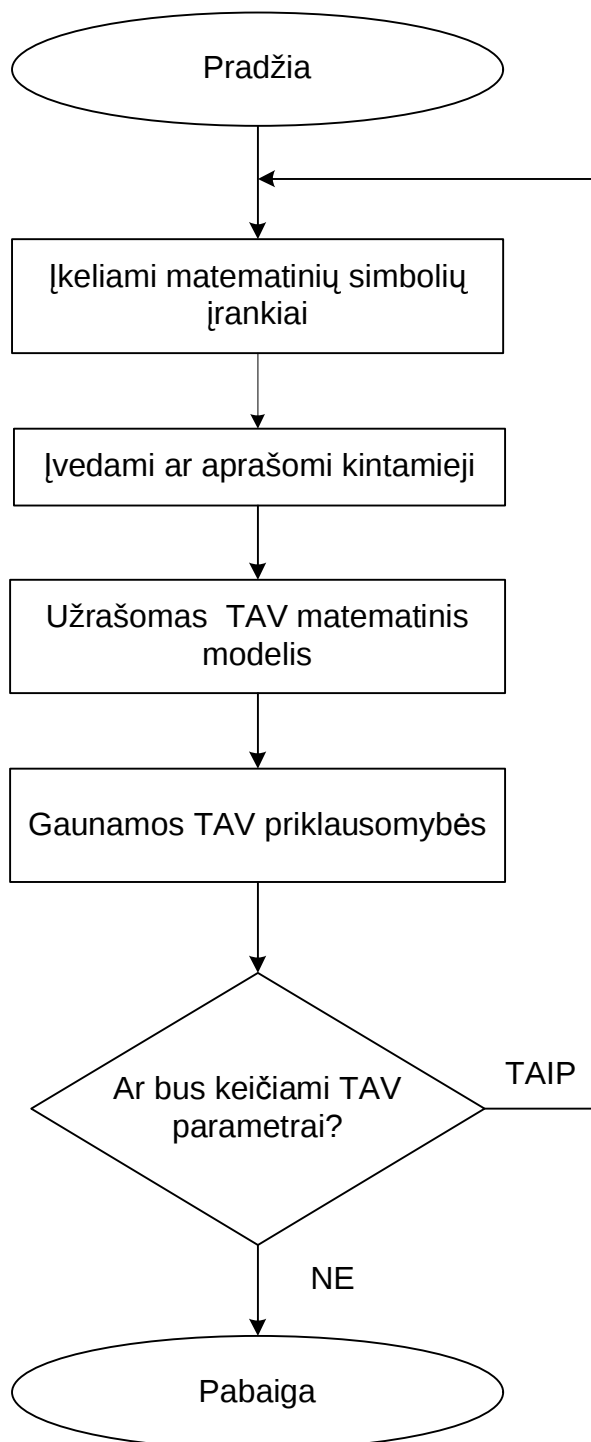
- operacijos su realiais ir kompleksiniais skaičiais, taip pat su daugelio matavimų (dimensijų) dydžiais;
- loginės funkcijos ir operatoriai su skaičiais, vektoriais ir matricomis;
- diferencijavimo, integravimo, sumavimo ir sandaugų operatoriai;
- elementarių ir specialių funkcijų dvimačių ir trimačių grafikų sukūrimas;
- Furje transformacijos;
- darbas su simbolinėmis išraiškomis, simbolinis integravimas, diferencijavimas, eilučių ribų skaičiavimas;
- operacijos su vektoriais, matricomis, tiesinių algebrinių lygčių sprendimas;
- apie 200 statistinių f-jų statistiniam duomenų apdorojimui;
- duomenų aproksimacija [23].

Lyginant su kitais panašaus tipo programiniais paketais, *MathCAD 2001 Professional* skaičiavimus atlieka labai greitai ir tiksliai bei pasižymi labai dideliu lankstumu. Tai ypač svarbu siekiant optimizuoti tiriamojo objekto tam tikrus parametrus.

Rezultatai pateikiami apskaičiuotų TAV priklausomybių ir grafikų pavidalu. Skaičiuojant užsiduoto TAV matematinio modelio savybes programa automatiškai tikrina, ar

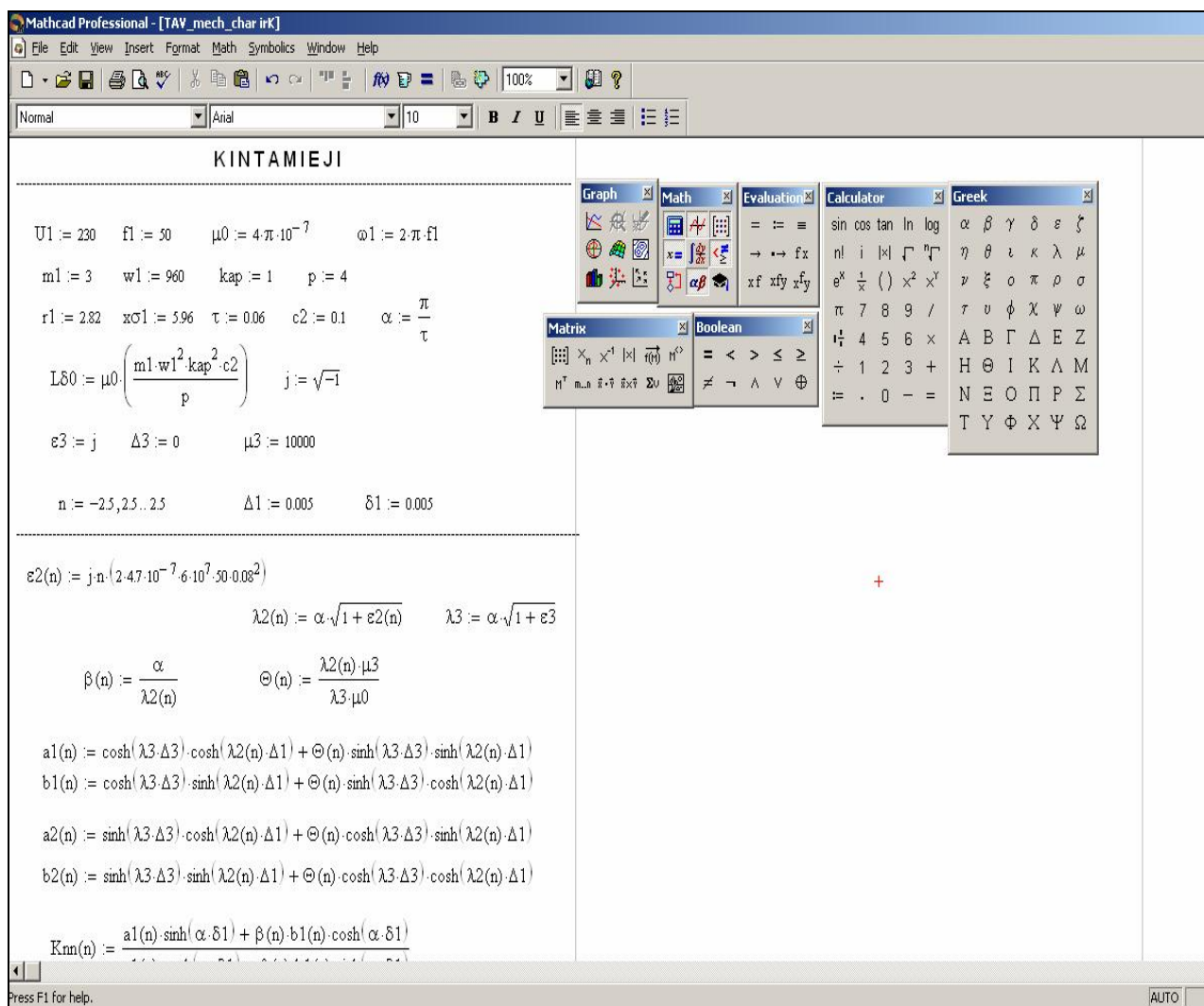
tenkinamos užsiduotos sąlygos. Jei vartotojo nustatyti parametrai neteisingi, programa nutraukia skaičiavimo procesą, perspėdama apie nustatymo parametrų klaidą.

Visų tipų skaičiavimai atliekami dideliu (pasirinktiniai) tikslumu, nes sprendžiant uždavinius skaičiavimams yra panaudotos specialios didelio tikslumo aproksimavimo funkcijos. *MathCAD 2001 Professional* veikimo principas pavaizduotas 4.3.3 pav.



4.3.3 pav. Veiksmų eiga tiriant TAV modelį matematiniu paketu *MathCAD*

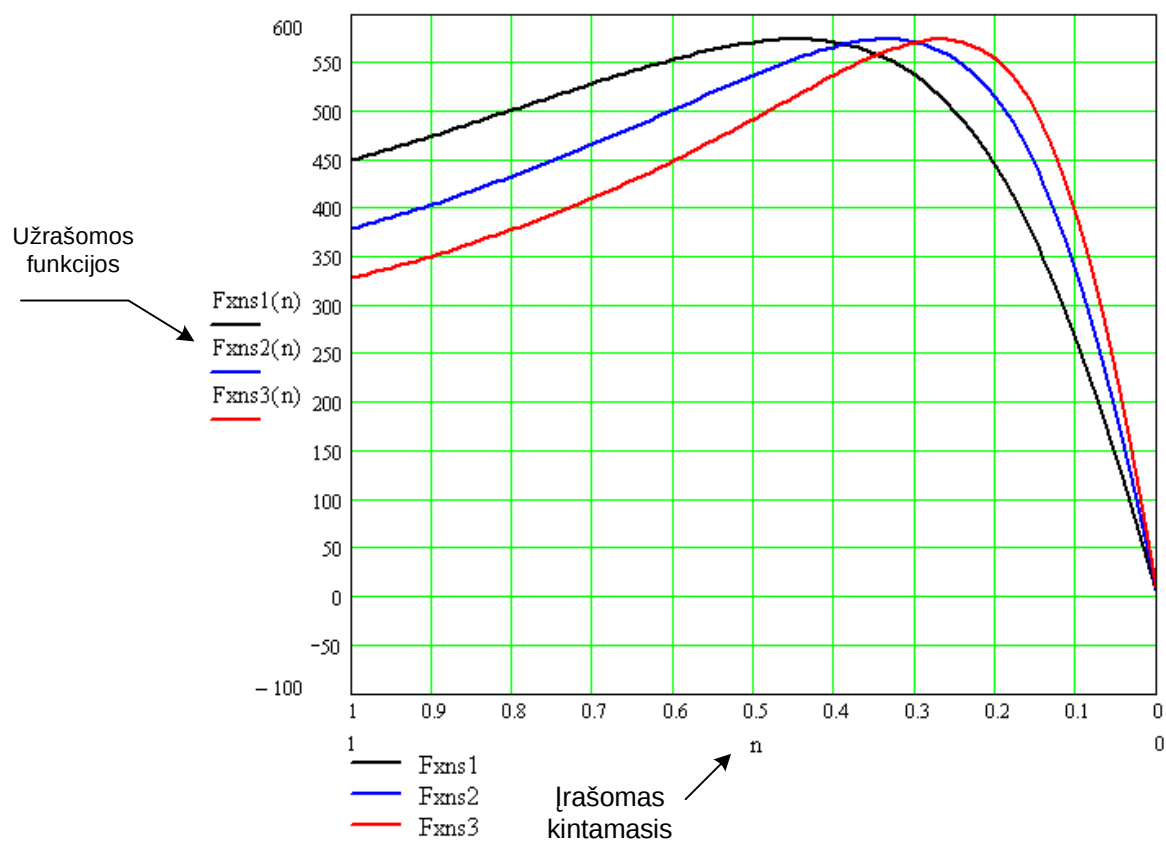
Toliau aprašyti apibendrinto TAV matematinio modelio rezultatų skaičiavimo, priklausomybių ir savybių pateikimo būdai. Pagrindinis darbinis *MathCAD 2001 Professional* modeliavimo langas pavaizduotas 4.3.4 pav.



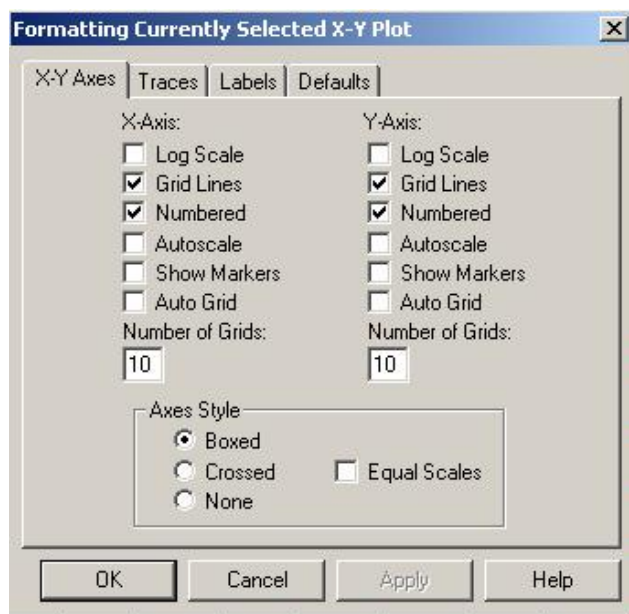
4.3.4 pav. Darbinis *MathCAD 2001 Professional* langas su TAV modeliu

Pirmiausia įkeliami matematinių simbolių įrankiai. Tada aprašomi kintamieji. Po to kuriamas matematinis modelis. Surašomos pagrindinės formulės darbiniam lange. Kai modelis teisingai aprašytas, programa leidžia skaičiuoti rezultatus. Apibendrinto TAV matematinio modelio rezultatai yra priklausomybės. Grafinės terpės lange užrašoma funkcija ir kintamasis (žr. 4.3.5 pav.)

TAV priklausomybėms ir charakteristikoms būdingi tam tikri parametrai, kurie nustatomi grafinės terpės parametrų lentelėje (žr. 4.3.6 pav.)



4.3.5 pav. Grafinė terpė su TAV charakteristikomis



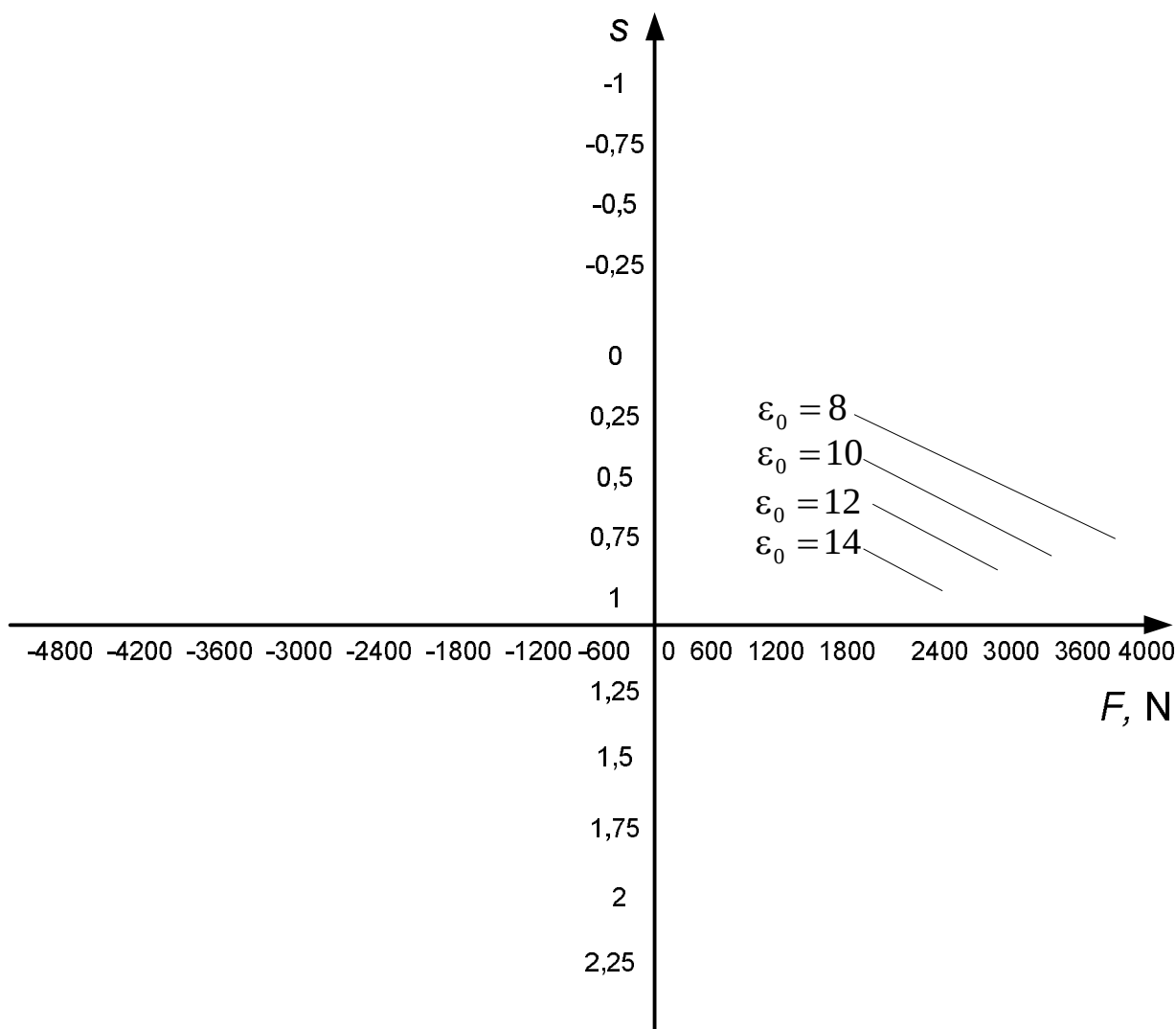
4.3.6 pav. Mechaninių charakteristikų parametrų nustatymo lentelė

5. SKAIČIUOJAMOJI DALIS

5.1. Skaičiavimo charakteristikų palyginimas

Tam, kad ištirti greitaeigių TAV ypatumus analitiniu būdu buvo skaičiuojamos TAV, kurio parametrai nurodyti 4.3.1 lentelėje, mechaninės charakteristikos $F = f(s)$ prie skirtingo Reynoldso skaičiaus $\varepsilon_0 = 8; 10; 12; 14$ esant skirtingiems induktorių polių (N-S) vienas priešais kitą išdėstymui.

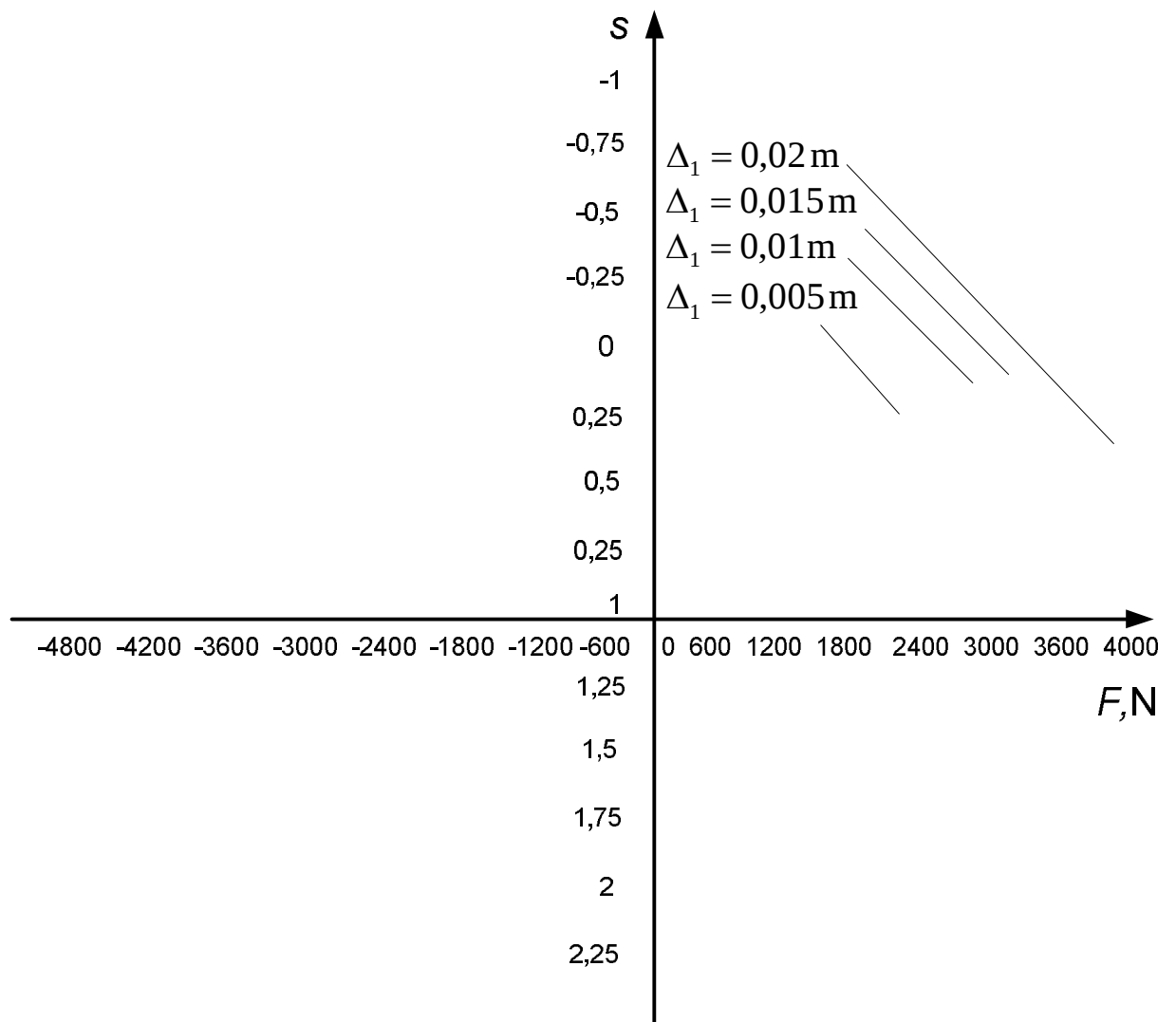
Skaičiavimai buvo atlikti, naudojant programinį paketą *MathCAD 2000 Professional*. Tyrimo metu gautus skaičiavimo rezultatus atspindi 5.1.1 pav., 5.1.2 pav., 5.1.3 pav., 5.1.4 pav., 5.1.5 pav., 5.1.6 pav. pateiktos kreivės.



5.1.1 pav. TAV mechaninės charakteristikos, esant $\Delta_1 = 0,005$ m, $\delta_1 = 0,005$ m, $\Delta_3 = 0$,

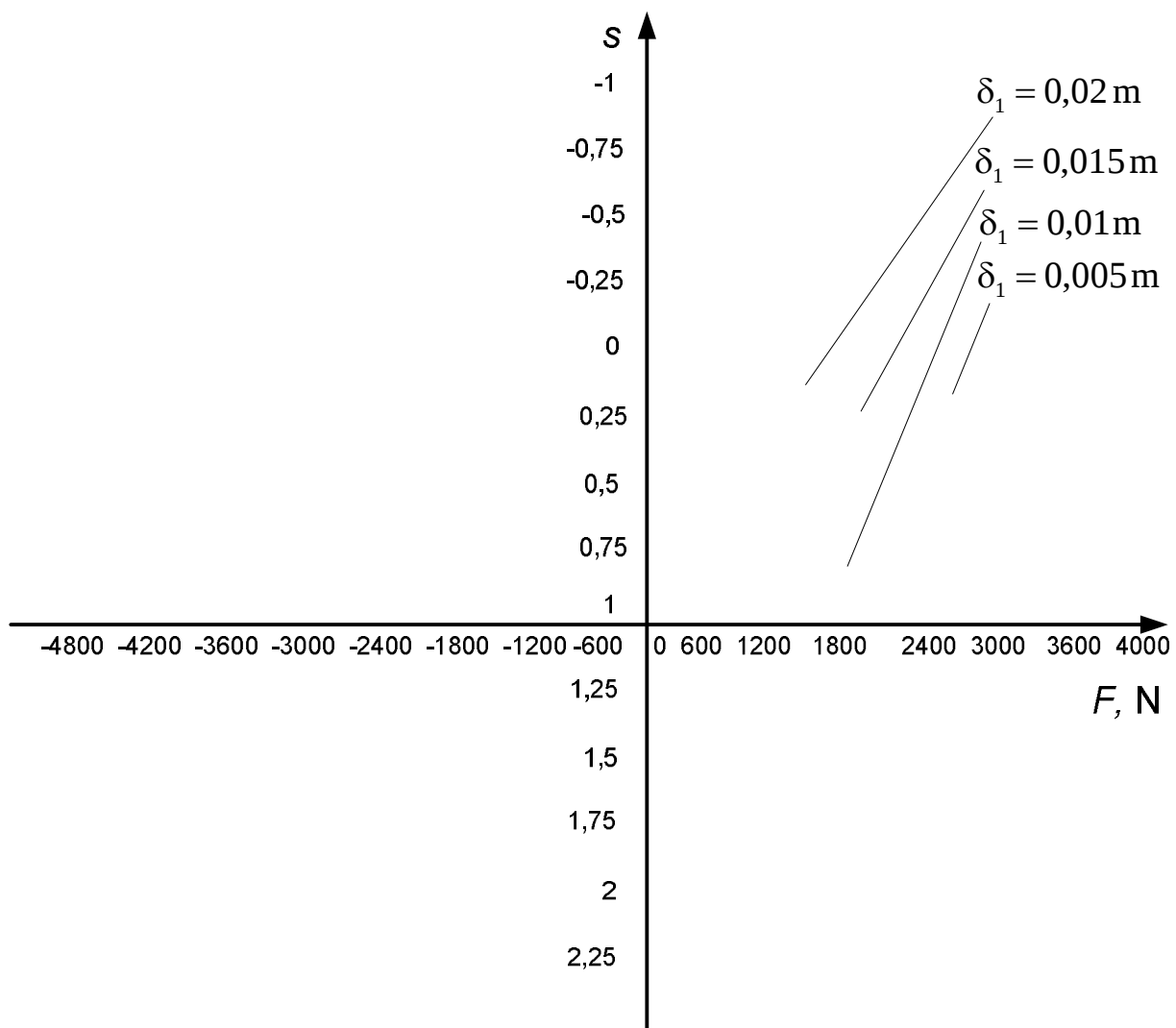
kai Reynoldso skaičius $\varepsilon_0 = 8, 10, 12, 14$

5.1.2 pav. pateiktos greitaigės elektros pavaros su tiesiaiegiu asinchroniniu varikliu tyrimo metu gautos kreivės, kai keičiamas neferomagnetinis sluoksnis Δ_1 .



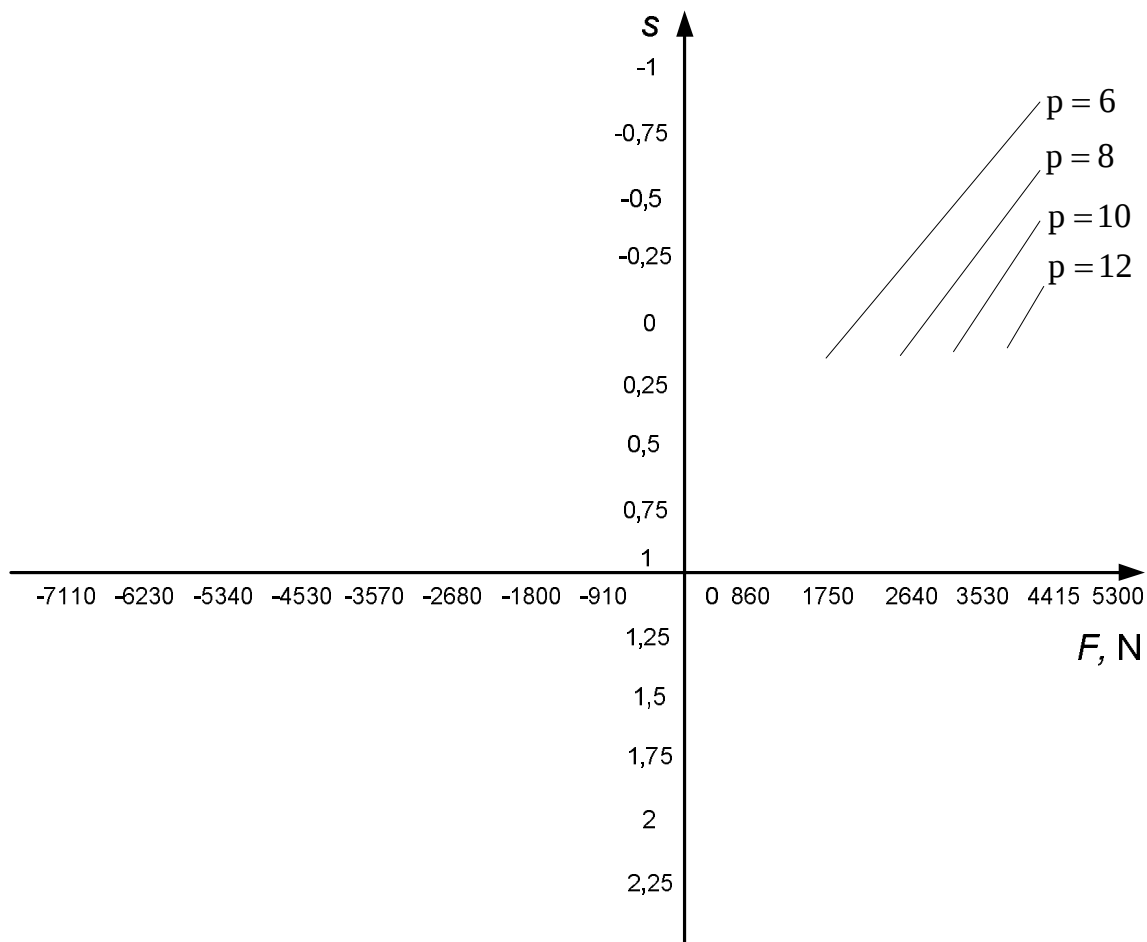
5.1.2 pav. TAV mechaninės charakteristikos, esant $\Delta_3 = 0$, pastoviam oro tarpui $\delta_1 = 0,005 \text{ m}$, kai neferomagnetinis sluoksnis $\Delta_1 = 0,005 \text{ m}$, $\Delta_1 = 0,01 \text{ m}$, $\Delta_1 = 0,015 \text{ m}$, $\Delta_1 = 0,02 \text{ m}$

5.1.3 pav. pateiktos greitaigės elektros pavaros su tiesiaiegiu asinchroniniu varikliu tyrimo metu gautos kreivės, kai keičiamas oro tarpas δ_1 .



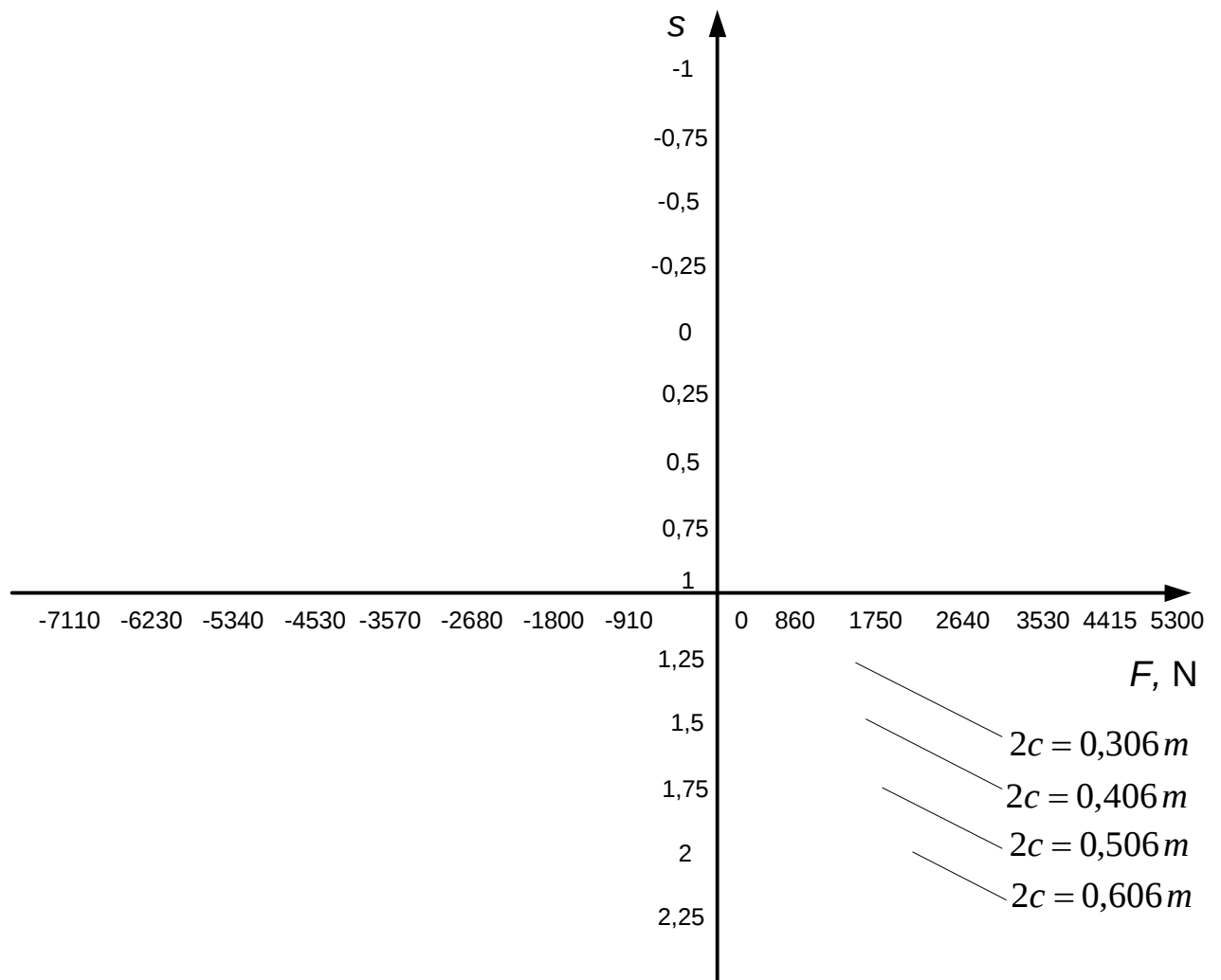
5.1.3 pav. TAV mechaninės charakteristikos, esant neferomagnetiniam sluoksniui $\Delta_1 = 0,005 \text{ m}$, kai $\delta_1 = 0,005 \text{ m}$, $\delta_1 = 0,01 \text{ m}$, $\delta_1 = 0,015 \text{ m}$, $\delta_1 = 0,02 \text{ m}$.

Tyrimo metu gautos TAV mechaninės charakteristikos, kai didinamas polių porų skaičius p . TAV mechaninės charakteristikos pateiktos 5.1.4 pav.



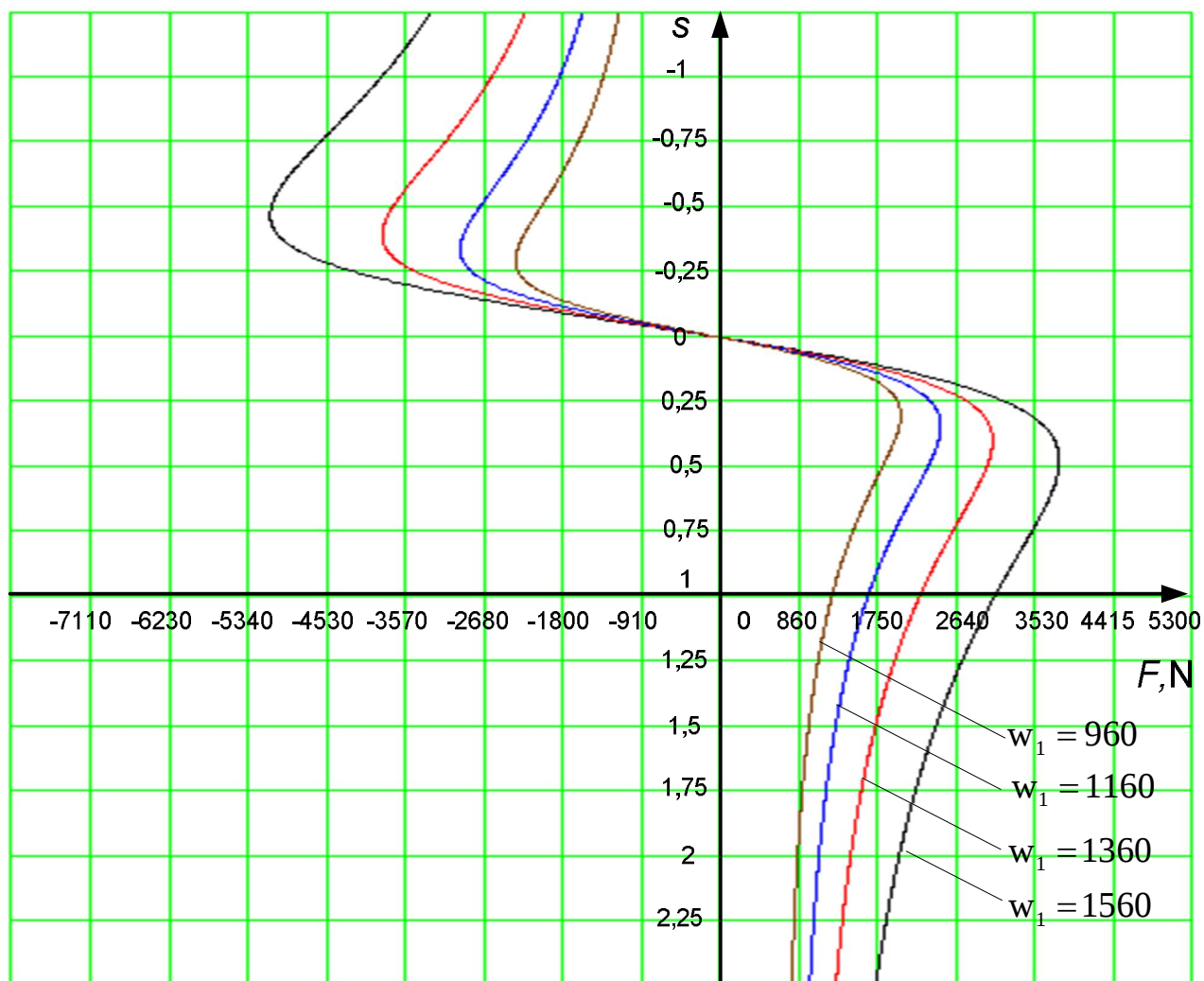
5.1.4 pav. TAV mechaninės charakteristikos, esant neferomagnetiniams sluoksniams $\Delta_1 = 0,005 \text{ m}$, $\Delta_3 = 0$ ir nekintančiam $\delta_1 = 0,005 \text{ m}$, kai $p = 6$, $p = 8$, $p = 10$, $p = 12$

5.1.5 pav. pateiktos greitaigės elektros pavaros su tiesiaiegiu asinchroniniu varikliu tyrimo metu gautos kreivės, kai keičiamas induktoriaus plotis $2c$.



5.1.5 pav. TAV mechaninės charakteristikos, esant nekintantiems $\Delta_1 = 0,005 m$ ir $\delta_1 = 0,005 m$, kai $2c = 0,306 m$, $2c = 0,406 m$, $2c = 0,506 m$, $2c = 0,606 m$

Tyrimo metu gautos TAV mechaninės charakteristikos, kai didinamas statoriaus apvijų skaičius. TAV mechaninės charakteristikos pateiktos 5.1.6 pav.



5.1.6 pav. TAV mechaninės charakteristikos, esant $\Delta_1 = 0,005 \text{ m}$, $\delta_1 = 0,005 \text{ m}$, $\Delta_3 = 0$,
kai apvijų skaičius $w_1 = 960$, $w_1 = 1160$, $w_1 = 1360$, $w_1 = 1560$

5.2. Elektros pavaros su tiesiaeigio asinchroniniu varikliu charakteristikų analizė

Tyrimo metu gautos tiesiaeigio asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos įrodo, kad keičiant tiesiaeigio asinchroninio variklio konstrukcinius parametrus, TAV veikianti jėga vienais atvejais didesnė, kitais atvejais mažesnė. Dėl šios priežasties priklauso tiesiaeigio asinchroninio variklio efektyvumas, dirbant skirtinguose režimuose.

Kaip matyti iš 5.1.1 pav. pateiktų kreivių, mechaninių charakteristikų pobūdis esant dideliame Reynoldso skaičiui, atitinka klasikinius sukamojo judesio asinchroninių variklių mechaninių charakteristikų pobūdį. Pagal gautus rezultatus, galima teigti, kad greitaigio TAV mechaninės charakteristikos varikliniame režime priklauso nuo ε_0 dydžio ir jam didėjant šios charakteristikos didėja, tačiau didinant ε_0 paleidimo jėga mažėja.

Kaip rodo tyrimai (žr. 5.1.1 pav. IV kvadrantas), stabdymo efektyvumo atžvilgiu efektyvesnis stabdymas priešinio jungimo režime greitaigio tiesiaeigio asinchroninių variklių yra, kai $\varepsilon_0 = 8$, o ne efektyvus stabdymas, kai $\varepsilon_0 = 12$. Tad galima teigti, kad TAV varikliniame režime tikslinga parinkti tokius parametrus, kad Reynoldso skaičius būtų gerokai didesnis, tačiau tokiais atvejais stabdymo efektyvumas bus mažesnis, negu TAV su mažesniu ε_0 .

Kaip vaizduoja 5.1.1 pav. pateiktos TAV mechaninės charakteristikos rekuperacinio stabdymo režime (žr. 5.1.1 pav. II kvadrantas) efektyvesnis stabdymas yra tais atvejais didesnės, kai $\varepsilon_0 = 8$.

Pagal atliktų tyrimų rezultatus galima daryti apibendrintą išvadą, kad, kai Reynoldso skaičius yra didinamas ($\varepsilon_0 = 8, 10, 12, 14$) TAV veikiančio varikliniame režime, charakteristikos praktiškai yra artimos viena kitai ir skiriasi paleidimo momentu, kai $s = 1$. Stabdant rekuperaciniu būdu efektyvesniu stabdymu tampa TAV su mažesniu ε_0 .

Analogiškai (programiniu paketu *MathCAD 2001 Professional*) buvo gautos greitaigio tiesiaeigio asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos, esant skirtingam neferomagnetiniam sluoksniui Δ_1 .

Iš 5.1.2 pav. pateiktų kreivių matyti, kad varikliniame režime jėgos priklausomybė nuo slydimo priklauso ir nuo neferomagnetinio sluoksnio Δ_1 . Pastebėta, kad didinant neferomagnetinį sluoksnį Δ_1 , TAV mechaninės charakteristikos gerėja, dėl didėjančio magnetinio srauto antriniame elemente. Paleidimo metu, apkrova ženkiai skiriasi, kai nagrinėjamu atveju $\Delta_1 = 0,02 \text{ m}$. Kitais atvejais, kai $\Delta_1 = 0,005 \text{ m}$; $\Delta_1 = 0,01 \text{ m}$; $\Delta_1 = 0,015 \text{ m}$, mechaninės charakteristikos yra žymiai prastesnės ir apytiksliai vienodo apkrovimo $F_p \approx 2,1 \text{ kN}$.

Esant priešinio jungimo stabdymo režimui (žr. 5.1.2 pav. IV kvadrantas), stabdymo efektyvumo atžvilgiu efektyvesnis stabdymas greitaeigių pavarų su TAV yra, kai neferomagnetinis sluoksnis yra $\Delta_1 = 0,02$ m. Mažinant neferomagnetinį sluoksnį, stabdymo jėga žymiai sumažėja. Todėl nagrinėjamu atveju galima teigti, kad, kuo didesnis neferomagnetinis sluoksnis, tuo didesnis stabdymo efektyvumas.

Iš 5.1.2 pav. kreivių matyti, kad rekuperacinio stabdymo režime (žr. 5.1.2 pav. II kvadrantas) pateiktos greitaeigių TAV mechaninės charakteristikos įrodo, kad efektyvesnis stabdymas yra, kai $\Delta_1 = 0,02$ m.

Tyrimo metu buvo gautos greitaeigių TAV mechaninės charakteristikos, keičiant oro tarpą δ_1 .

Kaip matyti iš 5.1.3 pav. pateiktų mechaninių charakteristikų, oro tarpo įtaka turi didelę reikšmę greitaeigių TAV efektyvumui. Tyrimai rodo, kad didėjant oro tarpui δ_1 dėl proporcingai didėjančių nuostolių oro tarpe, mechaninės charakteristikos prastėja.

Pagal pateiktas kreives galima teigti, kad kuo didesnis oro tarpas δ_1 , tuo mažiau mechaninės jėgos F dydis priklauso nuo to oro tarpo dydžio. Paleidimo momentu, esant oro tarpui $\delta_1 = 0,005$ m, nagrinėjamu atveju paleidimo jėga yra didžiausia $F_p \approx 3,3$ kN. Kai oro tarpas didinamas iki $\delta_1 = 0,01$ m, tuomet paleidimo jėga sumažėja iki 2,2 karto, kai $\delta_1 = 0,015$ m iki 4,2 karto, ir kai $\delta_1 = 0,02$ m, tuomet paleidimo jėga sumažėja iki 5,5 karto.

Iš tyrimo matyti, kad priešinio jungimo stabdymo režime (žr. 5.1.3 IV kvadrantas) stabdymas, efektyvumo atžvilgiu, yra efektyviausias tuomet, kai oro tarpas yra mažiausias $\delta_1 = 0,005$ m. Didinant oro tarpą priešinio jungimo režime, stabdymo jėga mažėja.

5.1.3 pav. pateiktos TAV mechaninės charakteristikos rekuperacinio stabdymo režime (žr. 5.1.3 pav. II kvadrantas) yra geresnės, kai oro tarpas $\delta_1 = 0,005$ m.

Apibendrinus tyrimo rezultatus, galima teigti, kad, kai oro tarpas, nagrinėjamu atveju, yra mažas $\delta_1 = 0,005$ m, TAV veikiančiam varikliniame režime mechaninės charakteristikos sutampa ir tik yra skirtingos paleidimo momentu, kai $s = 1$. Stabdant priešinio jungimo ir rekuperaciniu būdu, mechaninių charakteristikų efektyvumas ypač pastebimas, kai $\delta_1 = 0,005$ m.

5.1.4 pav. pavaizduotos greitaeigių TAV mechaninės charakteristikos, kai keičiamas polių porų skaičius $p = 6; 8; 10; 12$. Iš pateiktų kreivių matyti, kad didėjant polių porų skaičiui, mechaninės charakteristikos varikliniame režime gerėja. Todėl galima daryti išvadą, kad greitaeigių asinchroninių variklių mechaninės charakteristikos varikliniame režime priklauso

nuo polių porų skaičiaus ir jam didėjant charakteristikos mažiau nuožulnesnės. Tačiau paleidimo momentu, esant polių porų skaičiui $p = 6$, paleidimo jėga yra didžiausia.

Pateiktose mechaninėse charakteristikose (žr. 5.1.4 pav. IV kvadrantas) matyti, kad stabdymo efektyvumo atžvilgiu greitaigių TAV efektyvesnis stabdymas priešinio jungimo režime yra, kai $p = 6$.

Kaip vaizduoja 5.1.4 pav. pateiktos TAV mechaninės charakteristikos rekuperacinio stabdymo režime (žr. 5.1.4 pav. II kvadrantas) efektyvesnis stabdymas yra tada, kai $p = 6$.

Pagal atliktų tyrimų rezultatus galima teigti, kad kai polių skaičius yra didinamas ($p = 6, 8, 10, 12$) TAV veikiančio priešinio jungimo režime, charakteristikos praktiškai yra artimos viena kitai ir stabdymo efektyvumas, didinant polių porų skaičių, yra nėra žymus.

Iš 5.1.5 pav. pateiktų kreivių matyti, kad kai keičiant induktoriaus plotį $2c$, varikliniame režime greitaigių TAV mechaninės charakteristikos sutampa ir tik skiriasi paleidimo momentu. Didinant induktoriaus plotį, dėl didėjančios indukuotos srovės antriniame elemente, TAV mechaninės charakteristikos gerėja.

Kaip vaizduoja 5.1.5 pav. pateiktos kreivės (žr. 5.1.5 pav. IV kvadrantas) stabdymo atžvilgiu, TAV veikiančiam priešinio jungimo režime, efektyvesnis stabdymas yra, esant didesniai induktoriaus ploiui $2c = 0,606$ m. Rekuperacinio stabdymo metu (žr. 5.1.5.pav. II kvadrantas) efektyvumo atžvilgiu, efektyvesnis stabdymas pasireiškia greitaigiams TAV, esant mažesniai induktoriaus ploiui.

Skaičiavimo rezultatai rodo (žr. 5.1.6 pav.), kad, keičiant apvijų skaičių w_1 , TAV mechaninių charakteristikų pobūdis panašus kaip ir gautiems rezultatams, keičiant induktoriaus plotį $2c$ (žr. 5.1.5 pav.). Pagal gautus rezultatus galima daryti išvadą, didinant apvijų skaičių w_1 , mechaninės charakteristikos gerėja ir mechaninės charakteristikos priklauso nuo apvijų skaičiaus.

Kaip matyti iš 5.1.6 pav. rezultatų, priešinio jungimo režime (žr. 5.1.6 pav. IV kvadrantas) stabdymas pasiekia didžiausią efektyvumą, tuomet, kai $w_1 = 1560$, o ne efektyvus stabdymas, kai $w_1 = 960$. Rekuperacinio stabdymo metu (žr. 5.1.6 pav. II kvadrantas), efektyvesnis greitaigio TAV stabdymas tais atvejais, kai $w_1 = 960$.

Pagal tyrimo rezultatus galima daryti apibendrintą išvadą, kad, kai apvijų skaičius didinamas $w_1 = 960, 1160, 1360, 1560$ TAV veikiančio varikliniame režime, mechaninės charakteristikos praktiškai yra artimos viena kitai ir skiriasi tik paleidimo momentu, kai $s = 1$. Stabdant rekuperaciniu būdu efektyvesniu stabdymu tampa TAV su mažesniu w_1 .

6. TYRIMO REZULTATŲ APIBENDRINIMAS

6.1. Išvados

1. Tyrimo metu baigiamajame magistro darbe apžvelgti ir išnagrinėti TAV konstrukciniai ypatumai, TAV variklių savybės, TAV kokybės rodikliai ir tiesiaeigių asinchroninių variklių stabdymo būdai. Pateikti greitaegių ir lėtaegių TAV esminiai skirtumai.
2. Programiniu paketu *MathCAD 2001 Professional* sudarytas ir ištirtas matematinis modelis, greitaegio TAV stabdymo efektyvumui ištirti.
3. Darbo metu buvo atliktas elektros pavaros su tiesiaeigiu asinchroniniu varikliu tyrimas, keičiant, eksperimentiniu būdu, TAV konstrukcinius parametrus (Reynoldso skaičių ε_0 , neferomagnetinį sluoksnį Δ_1 , oro tarpo dydį δ_1 , polių porų skaičių p , induktoriaus plotį $2c$, apvijų skaičių w_1) ir buvo gautos statinės TAV jėgos, veikiančios išilgai x koordinatės, priklausomybės nuo slydimo.
4. Ištirta, kad greitaegio tiesiaeigio asinchroninio variklio varikliniame režime tikslinga parinkti tokius parametrus, kad Reynoldso skaičius būtų gerokai didesnis, tačiau tokiais atvejais stabdymo efektyvumas bus mažesnis, negu TAV su mažesniu ε_0 .
5. Tyrimai rodo, kad didinant neferomagnetinį sluoksnį Δ_1 , TAV mechaninės charakteristikos didėja, dėl stiprėjančio magnetinio srauto antriniame elemente. Nustatyta, kad stabdymo efektyvumo atžvilgiu, efektyvesnis stabdymas priešinio jungimo režime greitaegių TAV yra, kai $\Delta_1 = 0,02$ m.
6. Didėjant oro tarpui δ_1 , TAV veikiančiam varikliniame režime mechaninės charakteristikos sutampa ir tik yra skirtingos paleidimo momentu, kai $s = 1$. Stabdant tiek priešinio jungimo, tiek rekuperaciniu būdu. Mechaninių charakteristikų efektyvumas ypač pasireiškia, kai oro tarpas $\delta_1 = 0,005$ m.
7. Eksperimentiškai keičiant induktoriaus plotį $2c$, iš pateiktų charakteristikų matyti, kad efektyviausias priešinio jungimo stabdymas, kai $2c = 0,606$ m.
8. Greitaegių asinchroninių variklių mechaninės charakteristikos varikliniame režime priklauso nuo polių porų skaičiaus. Jam didėjant charakteristikos gerėja. Paleidimo momentu, apkrova yra didžiausia, kai $p = 12$. Tačiau variklio efektyviausias stabdymas priešinio jungimo stabdymo atveju, kai $p = 6$.

6.2. Rekomendacijos ir pasiūlymai

Tolesni didelių greičių tiesiaeigių asinchroninių variklių tyrimai gali būti orientuoti ne į dinaminių ar statinių charakteristikų taikymą vienoms ar kitoms sistemoms, o daugiau praktinį pritaikymą naujose konkrečiose sistemose, atsižvelgiant į TAV stabdymo efektyvumą.

Tiesiaeigių asinchroninių variklių teorijai ir praktiniam taikymui svarbu žinoti, kokią įtaką stabdymo charakteristikoms turi TAV konstrukcijos ypatumai, kuris stabdymo režimas duoda didžiausią efektyvumą. Rekuperacinio stabdymo taikymą kol kas riboja realus poreikis ir sudėtinga bei brangi techninė įranga. Šis stabdymo būdas yra perspektyvus greitaigėse pavarose. Todėl šiuo metu labai plačiai naudojamas greitaigio transporto ir raketų katapultavimo sistemose.

Greitaigių tiesiaeigių variklių energetiniai ir ekonominiai nuostoliai nėra dideli, todėl šie varikliai racionaliausiai išnaudojami dirbant sistemai ilgalaikiu režimu. Tačiau tokie TAV turi ir trūkumų: dideli gabaritai, sudėtinga maitinimo šaltinių sistema, esant dideliems greičiams, atsiranda papildomas triukšmas ir vibracijos.

Tyrimo metu buvo nagrinėti įvairios tiesiaeigių asinchroninių variklių konstrukcijų modeliai, gautos jų statinės charakteristikos. Galima teigti, kad efektyviausias stabdymo būdas, esant pastoviam oro tarpui, kai TAV konstrukcija yra mažiausio storio antriniu elementu iš vientiso vario (jo magnetinė skvarba μ mažiausia, o elektrinis laidis γ - didžiausias), o oro tarpai nedideli.

Dabartinis didelių greičių elektros pavarų su TAV variklių tyrimo tikslas yra ne tik diegti tiesiaeigius asinchroninius variklius esamose sistemose, bet ir kurti efektyvesnes sistemas. Norimam TAV efektyvumui pasiekti esamose sistemose, reikalingas optimalus TAV konstrukcinių parametrų parinkimas, modernių, kompiuterizuotų technologinių įrenginių pritaikymas ir racionaliai išnaudotos TAV naudingos savybės.

7. LITERATŪRA IR KITI ŠALTINIAI

1. Smilgevičius A. Automatikos mikromašinos. Vilnius: Technika. 2005. 343 p.
2. Radzevičius L. Tiesinių elektros pavarų naudojimas ir tolesnio jų taikymo Respublikos liaudies ūkyje perspektyvos. Analitinė apžvalga. Vilnius: Lietuvos mokslinės techninės informacijos ir techninės ekonominės analizės mokslinio tyrimo institutas (LIMTI), 1982. 42 p.
3. Lisauskas S. Tiesiaiegių asinchroninių variklių nesimetrinių režimų tyrimas. Daktaro disertacija. Kaunas, 2007-01-11. 25 p.
4. Rinkevičienė R., Lisauskas S., Dinaminiai tiesiaiegių pavarų stabdymo režimai. Elektronika ir elektrotechnika. Kaunas: Technologija, 2005 Nr. 4(60). P. 37-40.
5. Radzevičius L., Matkevičius E. Tiesiaiegio asinchroninio variklio charakteristikų tyrimas. Kaunas: Technologija, 2007. – Nr. 6(78). P. 9-12.
6. Smilgevičius A. Tiesiaiegių elektros variklių tyrimai Lietuvoje. Elektra ir elektronika. Kaunas: Technologija, 2004. Nr. 1(50). P. 22-27.
7. Rinkevičienė R., Poška A. J., Smilgevičius A. Tiesiaiegės mechatroninėse sistemos. Teorija ir taikymas. Monografija. Vilnius: Technika, 2006. 224 p.
8. Smilgevičius A. Tiesiaiegių asinchroninių variklių stabdymo tyrimai Lietuvoje. Elektra ir elektronika. Kaunas: Technologija, 2005. Nr. 1(57). P. 42 – 47.
9. Rinkevičienė R., Petrovas A. Mechatroninių sistemų modeliavimas. Mokomoji knyga. Vilnius: Technika. 2007. 156 p.
10. Smilgevičius A. Tiesiaiegių asinchroninių variklių stabdymas. Vilnius: Technika, 1992. 56 p.
11. Bendorius R. A., Karpinskas S. A. Rinktiniai fizikos praktikumo klausimai. Mokomoji knyga. Vilnius: Technika, 2006. 102 p.
12. Nasar, Seyd A., Bolea I., Linear Electric Motors, Prentice Hall, New Jersey, 1987. 488 p.
13. Donald. C Byers. The Linear Induction Motor in Transit, A system View. International conference on Automated People Movers, Paris, France. 1996. 288 p.
14. Rinkevičienė R., Lisauskas S. Tiesiaiegių mechatroninių sistemų modeliai. Elektronika ir Elektrotechnika. 2003, Nr. 4 (46) 6 p.
15. International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives [žiūrėta 2008-04-15]. Prieiga per internetą: <http://www.maglev.com>

16. Linear Motors Installation and Operating Manual. BALDOR ELECTRIC COMPANY [žiūrėta 2008-02-03]. Prieiga per internetą: <http://www.baldor.com>.
17. Gieras J.F. Linear Induction Drives, Clarendon Press, Oxford, 1994, 354 p.
18. High Performance Control of Induction Motor Drives. Bilman K. Bose, Life Fellow, IEEE Department of Electrical Engineering the University of Tennessee, USA [žiūrėta 2008-05-02]. Prieiga per internetą: <http://www.ece.utk.edu>.
19. Magnetic properties of materials [žiūrėta 2008-05-02]. Prieiga per internetą: <http://info.ee.surrey.ac.uk>
20. Laisvoji enciklopedija: Wikipedia [žiūrėta 2008-05-02]. Prieiga per internetą: <http://lt.wikipedia.org>
21. Alma Paukštienė, Birutė Ragalytė, Jurgita Lieponienė. Išmokime dirbti MathCad. Vilnius: Ciklonas, 2006, 72 p.
22. MathCad Resource Center [žiūrėta 2008-05-05]. Prieiga per internetą: <http://www.mathcad.com>.
23. Ямамура С. Теория линейных асинхронных двигателейю. Ленинград энергоатомиздат Ленинградское отделение 1983 m. 179 p.
24. Barzdžiukienė L.D., Celeškienė V., Kiaulakienė A. Baigiamasis studijų darbas. Kalbininkų patarimai: teorija ir tvarkyba. Vilnius: Technika, 2004. 123 p.
25. Elektrotechnikos terminų žodynas. Kaunas: Technologija, 1999. 871 p.