



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

AUTOMATIKOS KATEDRA

Jonas Kriaučiūnas

DAŽNINĖS ELEKTROS PAVAROS TYRIMAS

**INVESTIGATION OF THE FREQUENCY CONTROLLED ELECTRIC
DRIVE**

Baigiamasis magistro darbas

Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 62401T104

Automatinių sistemų specializacija

Elektros ir elektronikos mokslų kryptis

Vilnius, 2009

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

AUTOMATIKOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

Jonas Kriaučiūnas

DAŽNINĖS ELEKTROS PAVAROS TYRIMAS

**INVESTIGATION OF THE FREQUENCY CONTROLLED ELECTRIC
DRIVE**

Baigiamasis magistro darbas

Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 62401T104

Automatinių sistemų specializacija

Elektros ir elektronikos mokslų kryptis

Vadovas prof. habil. dr. R. Rinkevičienė _____
(Parašas)

(Data)

Konsultantas doc. dr. L. Radzevičius _____
(Parašas)

(Data)

Konsultantas doc. dr. A. Kaulakienė _____
(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2009

Vilniaus Gedimino technikos
universitetas
Elektronikos fakultetas

ISBN ISSN
Egz. sk. 2
Data 2009-06-01

Automatikos ir valdymo studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Dažninės elektros pavaros tyrimas**

Autorius **Jonas Kriaučiūnas**

Vadovas prof. habil. dr. **Roma**

Kalba

☐ lietuvių
☐ užsienio

Anotacija

Baigiamajame darbe tiriamas dažninės asinchroninės pavaros greičio stebiklis ir charakteristikos.

Įvade yra išnagrinėti greičio stebiklio panaudojimo privalumai. Aptarta dažnio keitiklių svarba asinchroninių variklių valdyme.

Analitinėje dalyje nagrinėjamas dažnio keitiklių veikimo principas bei aptariamas dažninių elektros pavarų jėgos grandinių schemos. Aptariami vektorinio ir skaliarinio valdymo privalumai bei trūkumai. Pateikiami pagrindiniai greičio jutikliai bei jų trūkumai ir privalumai.

Projektinėje dalyje pateiktas asinchroninio variklio matematinis modelis nejudančioje $d^s - q^s$ koordinačių sistemoje bei dažninės pavaros skaliarinio valdymo modelis. Išnagrinėti du greičio stebiklių modeliai.

Tiriamajoje dalyje pateikti greičio stebiklių modeliai ir dinaminės charakteristikos.

Darbą sudaro 7 dalys: įvadas, analitinė dalis, projektinė dalis, tiriamoji dalis, išvados ir pasiūlymai, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 70 p. teksto be priedų, 54 pav., 3 lent., 48 bibliografiniai šaltiniai.

Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: greičio stebiklis, dažnio keitiklis, vektorinis valdymas, skaliarinis valdymas, asinchroninė pavara, dažninis valdymas, modeliavimas

Vilniaus Gediminas technical
university
Electronics faculty

ISBN ISSN
Copies No. 2
Date 2009-06-01

Automation and control study programme master thesis.

Title: **Investigation of the frequency controlled electric drive**

Author **Jonas Kriaučiūnas**

Executive prof. habil. dr. **Roma**

Thesis language

☐
☐

Lithuanian

Foreign (English)

Annotation

The final project presents the AC induction motor drive control methods and characteristics.

In the preface of this project the frequency controlled electric drives and the importance of speed observer are described.

In the analytic part frequency controlled electric drives power circuits, speed measuring and observer operational principle are described. The field oriented or vector and V/Hz or scalar control is analyzed.

In the design part the AC induction motor drive mathematical model in stationary $d^s - q^s$ reference frame is presented and AC drive scalar control method is considered. Two types of speed observer models are elaborated.

In the investigation part of the project the dynamic characteristics of frequency controlled drive and speed observers are presented.

Structure: introduction, analytical part, design part, conclusions and suggestions, references.

Keywords: speed observer, frequency inverter, field oriented control, V/Hz control, AC drive, frequency control, modelling

TURINYS

1. ĮVADAS	11
2. LITERATŪROS GREIČIO STEBIKLIŲ KLAUSIMAIŠ APŽVALGA.....	12
3. TYRIMO TIKSLAI IR UŽDAVINIAI	15
4. TEORINĖ DALIS.....	16
4.1. DAŽNIO KEITIKLIS.....	16
4.1.1. Dažnio keitiklio sandara.....	16
4.1.2. Dažninių elektros pavarų galios grandinių schemos.....	18
4.2. DAŽNINIŲ PAVARŲ VALDYMO METODAI.....	23
4.2.1. Skaliariniais metodais valdomos elektros pavaros modelis.....	23
4.2.2. Bendrieji vektorinio valdymo principai	26
4.2.3 Erdvinio vektoriaus metodas	28
4.3. GREIČIO MATAVIMO BŪDAI	30
4.3.1. Variklio greičio jutikliai.....	30
4.3.2. Tachogeneratoriai	31
4.3.3. Skaitmeniniai greičio ir padėties enkoderiai.....	34
4.3.4. Prieauginiai optiniai elektroniniai enkoderiai.....	38
4.3.5. Absoliutieji optiniai elektroniniai enkoderiai	40
4.3.6. Greičio stebikliai.....	41
5. SKALIARINIŲ BŪDU VALDOMOS PAVAROS IMITACIJOS REZULTATAI.....	49
5.1. Asinchroninio variklio modelio sudarymas	49
5.2. Skaliarinio valdymo dažninės pavaros modelis ir imitacijos rezultatai	56
5.3. Stebiklių modeliai ir imitacijos rezultatai	67
6. IŠVADOS IR PASIŪLYMAI	73
7. NAUDOTA LITERATŪRA	74
1 PRIEDAS.....	74
2 PRIEDAS.....	74
3 PRIEDAS.....	82

1. ĮVADAS

Įrengimais atliekant tam tikrus darbus, dažnai reikia reguliuoti elektros variklių greitį. Norint pakeisti nuolatinės įtampos variklių greitį, užtenka pakeisti maitinimo įtampą. Deja, gamyboje dažniausiai naudojami trifaziai varikliai, kurių maitinimo įtampa yra kintamoji. Ilgą laiką variklių greitis buvo keičiamas mechanškai: iš pradžių diržiniu, vėliau pažangesniu frikciniu variatoriumi. Tačiau šiandien naudoti mechaninį variatorių ne visada yra patogu, ypač, kad dažnai reikia keisti variklių greitį automatiškai, atsižvelgiant į įrenginio apkrovą ar panašiai. Vis dažniau naudojami dažnio keitikliai, kuriais galima ne tik tolydžiai keisti variklių greitį, bet ir programuoti variklio veikimą: atsižvelgiant į jutiklių rodmenis, jį lėtai (be smūgio) paleisti bei sustabdyti [34].

Išsivysčiusiose šalyse 60 – 70% elektros energijos sunaudoja elektros pavaros. Apie 90% pramonėje naudojamų elektros variklių yra trifaziai asinchroniniai varikliai. Jų populiarumą lemia paprasta konstrukcija, aukštas patikimumas ir žema kaina. Asinchroniniai varikliai yra plačiai naudojami siurbliuose, ventiliatoriuose, konvejeriuose, liftuose, kranuose bei įvairiuose pramoniniuose įrenginiuose.

Asinchroninio variklio sukimosi greitį lemia trifazio elektros tinklo dažnis ir variklio polių skaičius, t.y. jei variklis maitinamas iš standartinio elektros tinklo, jis sukasi beveik pastoviu greičiu. Tačiau, dažnai variklio sukimosi greitis turi būti reguliuojamas. Reguliuojamo sukimosi greičio asinchroninės pavaros leidžia valdyti technologinius procesus bei taupyti elektros energiją.

Norint reguliuoti greitį, jį būtina išmatuoti. Yra įvairių prietaisų greičiui nustatyti, pvz. tachogeneratoriai, optiniai elektroniniai enkoderiai ir t.t. Beveik visi žinomi greičio jutikliai yra mechaniniai, t.y. juose yra judančių dalių (guoliai) be to, jų duomenims surinkti į valdymo sistemą reikalingi kabeliai.

Paminėtieji trūkumai mažina sistemos patikimumą, nes esant ilgiems atstumams kabelis gali būti pažeistas bet kurioje vietoje, o gedimui pašalinti gali prireikti ne vienos valandos. Visa tai didina sistemos kainą.

Norint išvengti minėtų trūkumų būtina kurti jutiklius, kuriuose nebus judančių dalių bei nereikės ilgų kabelių juos įjungti į sistemą, tai greičio stebiklis (angl. observer). Tokiu būdu yra padidinamas sistemos patikimumas, o svarbiausia, sumažintos kaštai sąnaudos eksploatavimo priežiūrai, kas šiandien ypač aktualu.

Galima spėti, kad greičio stebiklių rinka nuolat didės. Tai lems konkurencingesnės kainos, nuolatinis jų tobulinimas, kuris išplės jų taikymo sritį ir vis didėjantis poreikis geriau valdyti technologijas ir taupyti energiją.

2. LITERATŪROS GREIČIO STEBIKLIŲ KLAUSIMAIS APŽVALGA

Rengiant šį baigiamąjį magistro darbą, buvo apžvelgta skirtingų šalių specialistų bei magistrų publikuota medžiaga dažnio keitiklių, elektros pavarų bei greičio matavimo temomis. Greičio matavimo prietaisai (jutikliai) šiuolaikinėje technikoje nėra naujiena, taigi dar aktuali tema ir mokslinės pakraipos internetinės svetainės, kur straipsnių šia tema galima rasti daug daugiau nei knygų ir informacija yra žymiai naujesnė.

2005 metais išleistoje **Algirdo Smilgevičiaus** knygoje [44] yra aptariami asinchroninių ir sinchroninių mikrovariklių elektros pavaros, jų veikimo principai, pateiktos charakteristikos. Ypač didelis dėmesys skiriamas naujausioms mikromašinoms: kintamos ir nuolatinės srovės tachogeneratoriai, sukimosi greičio ir padėties enkoderiai ir t.t. Kadangi pastaruoju metu yra sukurta daug naujos kartos mikromašinų, o informacijos apie jas lietuvių kalba praktiškai nėra, tai ši knyga yra labai naudinga.

Knygoje aptariamas tachogeneratoriaus veikimo ir konstrukcijos principas, skirtumai tarp nuolatinės ir kintamosios srovės tachogeneratorių, pateikiamos išėjimo charakteristikos, aptartos pagrindinės tachogeneratorių paklaidos, apibendrinti ir pateikti pagrindiniai kolektorinių tachogeneratorių duomenys, kuriuos pateikia gamintojas.

Taip pat aptariami tiksliam sukimosi greičio, kelio ar erdvinės padėties matavimui valdymo sistemose naudojami enkoderiai. Tai vienintelis šaltinis, kuriame pavyko rasti išsamios informacijos apie šiuos naujos kartos matavimo prietaisus. Analizuojamas optinio elektroninio enkoderio veikimo principas, jo konstrukcija. Pateikiami pagrindiniai skirtumai tarp prieauginio ir absoliutaus enkoderio. Pateikta informacija, į ką reikėtų atkreipti dėmesį renkantis, šį prietaisą.

Daug knygų apie dažninės elektros pavaras, įvairius greičio matavimo jutiklius yra parašytos užsienio kalbomis, taigi viena iš tokių išskirtinių knygų yra autoriaus **Bimal K. Bose** knyga „**Modern power Electronics and AC drivers**“ [7], kurioje yra gana detalios ir aiškios aprašyti dažninių elektros pavarų veikimo principai, charakteristikos ir pateiktos gana aiškos išvados. Taip pat aptarti skaliarinis ir vektorinis pavarų valdymo metodai pateikiant pagrindinius skirtumus, privalumus bei trūkumus. Pateiktos dažninių pavarų struktūros, pagal kurias lengva sudaryti modelius „Matlab“ programiniu paketu, todėl bet kuri iš sudarytų modelių lengvai galima išbandyti ir gauti charakteristikas. Šita knyga yra skirta ir kvalifikuotiems inžinieriams, ir universitetų studentams.

Barnes M. 2003 metų knygoje „**Practical Variable speed drives and power Electronics**“ [2] pateiktos dažninių elektros pavarų valdymo sistemos. Knygos autorius teigia, kad per paskutinį dešimtmetį savo privalumus dažninių elektros pavarų valdyme parodė mikroprocesoriniu pagrindu sukurtos ir veikiančios valdymo sistemos. Anot jo, gera valdymo sistema – tai didelio patikimumo sistemos, kai keitiklis turi užtikrinti reikiamą variklio maitinimo srovę, skirtą optimaliai momento vertei pasiekti, būtų su įmanomai mažesniais inverterio nuostoliais, lanksčia valdymo sistema kurią galima integruoti į bet kokio valdymo proceso reikalaujančią sistemą.

Taip pat, autorius trumpai apžvelgia greičio matavimo keitiklius. Nagrinėjami analoginiai greičio keitikliai bei skaitmeniniai sukieji greičio ir padėties keitikliai. Aptariamas tachogeneratoriaus veikimo principas, privalumai bei trūkumai, pateiktos išėjimo įtampos priklausomybės nuo sukimosi greičio kreivės. Plačiau aprašyti sukieji prieauginiai ir absoliutieji enkoderiai. Pateikiamas konstrukcijos, veikimo principas, aprašomas kodavimo būdas bei technologija.

Leonhard Werner knygoje „**Control of electrical drives**“ [46] aptariami kintamosios srovės elektros pavarų valdymo būdai. Pateikti pavaros valdymo metodai nuo impulsų pločio moduliavimo iki valdymo srautu arba srove. Autorius pateikia modelius bei jais gautus pereinamųjų procesų charakteristikas. Taip pat pateiktas bejutiklio valdymo „Encoderless control“ pavyzdys su valdymo modeliu, aprašymu bei eksperimentų rezultatais. Trumpai aprašytas greičio valdymas naudojant greičio ir padėties enkoderius, pateiktas signalų apdorojimo principas. Knyga parašyta gan sudėtingai, todėl daugiau skirta specialistams, negu studentams.

Cetinkunt Sabri 2007 metais parašytoje knygoje „**Mechatronics**“ [8] aptariami visų tipų jutikliai, jų konstrukcijos, veikimo principai. Tarp jų minimas tachogeneratorius su savo teigiamom ir neigiamom savybėm. Glaustai aprašomi optiniai elektroniniai jutikliai. Pagal autoriaus apskaičiavimus, apie 70% valdymo įrenginių sudaro optiniai elektroniniai padėties ir greičio jutikliai.

Taip pat autorė aprašo asinchronines pavaras, jų konstrukciją. Smulkiai, su iliustracijomis ir charakteristikomis aprašytas veikimo principas. Trumpai supažindinama su skaliariniu bei vektoriniu valdymo metodais. Knygoje gausu pavyzdžių, todėl informacija lengvai įsisavinama.

Bolton K. knygoje „**Electronic control systems in mechanical and electrical engineering**“ [6] aprašomi jutikliai ir keitikliai naudojami automatinio valdymo ir kitose sistemose. Autorius supažindina su terminologija, naudojama šių matavimo prietaisų veikimui apibūdinti. Pateikiamos statinės bei dinaminės charakteristikos. Trumpai apžvelgiami veikimo principai. Ši knyga skirta mechanikos inžinerijos, elektronikos bei kompiuterines sistemas

studijuojantiems studentams, todėl kiekvienas joje gali atrasti ne tik jau žinomus dalykus, bet ir pasisemti žinių iš kitos srities.

Yra literatūros ir lietuvių kalba, tačiau ne tiek daug, kiek kitomis užsienio kalbomis. Viena iš jų **Geleževičius V.** dar dviejų bendraautorių „**Elektros pavarų valdymo sistemos**“ knygoje [15] minima, kad pagrindinis dažninės elektros pavaros galios grandinės elementas – tai dažnio keitiklis. Dažnio keitiklis pastovaus dažnio ir pastovios amplitudės pramoninio tinklo įtampą keičia į reguliuojamo dažnio ir reguliuojamos amplitudės įtampą arba srovę, kuria yra maitinamas variklis. Dažnio keitiklis turi du valdymo kanalus – dažnio ir įtampos arba srovės.

Rinkevičienės R. ir Petrovo A. mokomojoje knygoje „**Mechatroninių sistemų modeliavimas**“ [41] nagrinėjami mechatroninių sistemų būsenų kintamųjų modeliai, būsenos lygčių sudarymas iš perdavimo funkcijos, būsenos kintamųjų grįžtamųjų ryšių projektavimas ir būsenų stebikliai.

Mechatroninėms sistemoms su asinchroniniais varikliais modeliuoti išnagrinėti asinchroninių variklių modeliai fazinėje koordinačių sistemoje ir transformuotose koordinačių sistemose, parodyta modelių sudarymo technika. Išnagrinėti dažninių elektros pavarų modelių sudarymo principai. Minima apie sinusinę impulsų pločio moduliaciją. Impulso pločio moduliacijos (IPM) valdymo modulyje priklausomai nuo iš išorės atėjusių signalų formuojami IPM signalai, kurie siunčiami į tranzistorinių raktų (pvz. IGBT) valdymo modelį, o jame suformuojama raktų valdymo įtampa.

Piotro Jenkino baigiamajame magistro darbe „**Tiesiaeigės dažninės pavaros tyrimas**“ [29] atliktas tiesiaeigės dažninės pavaros tyrimas. Išnagrinėti tiesiaeigio asinchroninio variklio ypatumai ir naudojimo sritys, padaryta dažnio keitiklių ir juose naudojamų valdymo būdų apžvalga. Išanalizuoti impulsų pločio moduliacijos realizavimo metodai, apžvelgti skaliarinio ir vektorinio valdymo metodų principai. Išnagrinėtas valdymo sistemų, naudojamų dažnio keitikliuose, veikimo principas. Sudarius du tiesiaeigės dažninės pavaros modelius: skaliarinio ir vektorinio valdymo, gautos inverterio išėjimo įtampos, TAV statoriaus srovių, galios ir linijinio greičio pereinamųjų procesų charakteristikos ir palyginti rezultatai.

Daugumoje reguliuojamų elektros pavarų naudojamas greičio grįžtamojo ryšio signalas. Jam gauti taikomi įvairūs greičio matavimo įtaisai, kurie kabeliais jungiami į pavaros valdymo schemą. Kartais jutikliai su matavimo kabeliais tampa brangiausia pavaros dalimi. Greičio grįžtamajam ryšiui gauti gali būti naudojami stebikliai (observeriai). Observeris yra programa arba modelis išskaičiuojantis variklio greičio vertę iš paprastai išmatuojamų variklio parametrų, srovės ir įtampos.

Šio darbo tikslas – sudaryti dažninės elektros pavaros greičio stebiklio modelį, palyginti greičio stebiklio apskaičiuotą greitį su sumodeliuotu.

3. TYRIMO TIKSLAI IR UŽDAVINIAI

Darbo tikslas – „MATLAB“ programiniu paketu sukurti greičio stebiklio modelį. Sudaryti dažninės asinchroninės pavaros modelį su stebikliu. Išanalizuoti stebiklio paklaidas ir taikymo sritis.

Siekiant šio tikslo, būtina išspręsti tokius klausimus:

1. Išanalizuoti dažninių pavarų valdymo metodus.
2. Sudaryti skaliariniu būdu valdomos dažninės pavaros kompiuterinį modelį.
3. Sudaryti greičio stebiklio matematinį ir kompiuterinį modelius.
4. Išanalizuoti imitacijos rezultatus ir nustatyti sukurtų stebiklių taikymo sritis.
5. Apibendrinti tyrimo rezultatus ir suformuluoti išvadas.

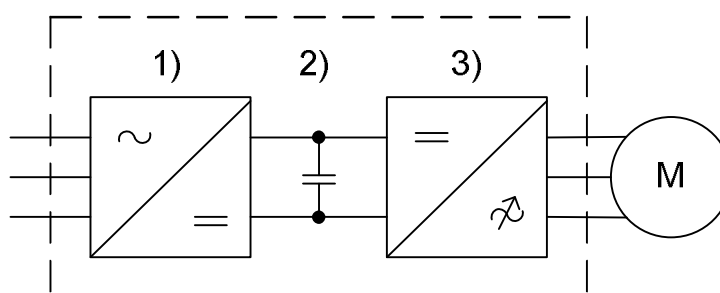
4. TEORINĖ DALIS

4.1. DAŽNIO KEITIKLIS

4.1.1. Dažnio keitiklio sandara

Kintamosios srovės variklių savybė elektrinę energiją keisti mechanine, pagrįsta elektromagnetine indukcija. Įtampa statoriaus apvijose lemia srovės ir magnetinio srauto atsiradimą. Šio srauto kryptis gali būti nustatyta dešinės rankos taisykle. Keičiant įtampos kryptį, statoriaus apvijose, gali būti keičiama variklio srauto kryptis. Trifazė maitinimo įtampa sukuria sukamąjį magnetinį srautą. Variklio rotorius seka šį srautą, susidarant nelabai dideliame slydimui. Tai – pagrindinis principas, kintamosios srovės varikliams valdyti.

Šis valdymas gali būti realizuotas naudojant dažnio keitiklį. Dažnio keitiklis keičia kintamosios srovės ir įtampos dažnį. Dažniausiai dažnio keitiklis susideda iš trijų dalių. Šiuolaikinio dažnio keitiklio struktūra pavaizduota 4.1 paveiksle. Dažnio keitiklį sudaro: 1 – lygintuvas, 2 – nuolatinės srovės (NS) grandinės filtras ir 3 – inverteris [47].



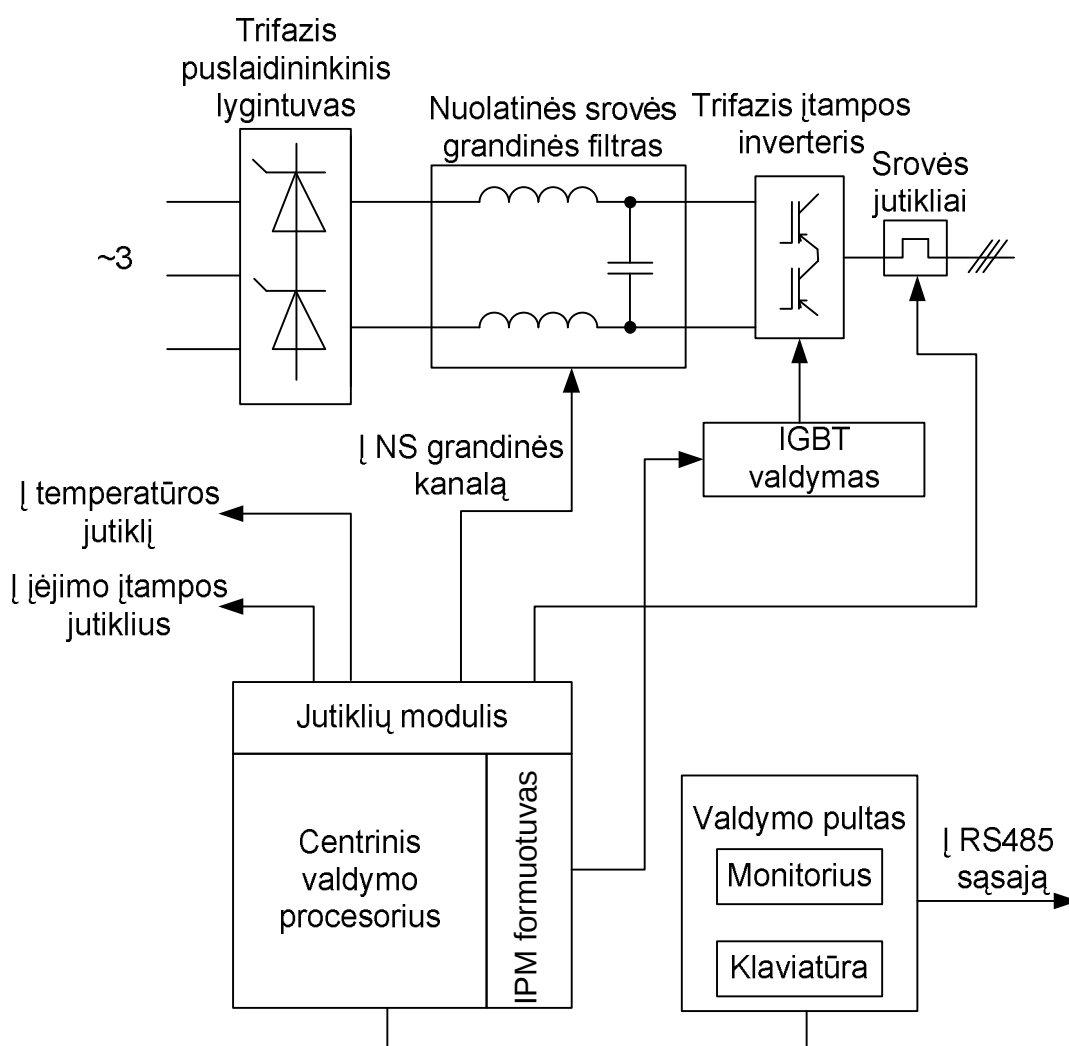
4.1 pav. Dažnio keitiklio sandara

Kaip buvo minėta anksčiau, dažnio keitiklį sudaro trys pagrindinės dalys, iš kurių didelę reikšmę turi keitiklio valdymo sistema. Struktūrinė dažnio keitiklio schema [47], pateikta 4.2 paveiksle, rodo, kad dažnio keitiklis sudarytas iš: trifazio puslaidininkinio lygintuvo, kuris išlygina tinklo įtampą; filtro, skirtą išlygintos įtampos pulsacijoms filtruoti; trifazio įtampos inverterio nuolatinei įtampai keisti į kintamąją srovės jutiklį, kuriais matuojant kiekvienos fazės variklio srovę nustatoma ne tik variklio apkrova, bet ir sudėtingesnio valdymo dažnio keitikliuose variklio srauto vektoriaus padėtis. Taip pat, be minėtų jutiklių, įeinančių į apsaugos grandinę, dažnio keitiklis turi įėjimo (maitinimo) įtampos jutiklius ir temperatūros jutiklį, kuris signalizuoja, jei per aukšta inverterio raktų temperatūra. Dažnio keitiklio valdymo sistema susideda ne tik iš daugybės jutiklių, iš kurių

nuskaityta informacija ateina į jutiklių modulį, bet ir valdymo modulį. Impulso pločio modulatorius (toliau IPM) formuoja valdymo signalus, kuriais valdomi inverterio raktai.

Vidutinių įtampų srityse (500 – 600 V ir daugiau) labiau taikomi dvipoliai tranzistoriai su izoliuota užtūra IGBT (IGBT – angl. Insulated Gate Bipolar Transistors). Šių puslaidininkinių elementų atsiradimas sukėlė žymius galios pokyčius elektronikoje.

Šiuo metu IGBT realizuoja srovės komutavimą iki 1800A, esant 4,5 kV įtampai. Šių tranzistorių persijungimo trukmė yra apie 200 – 400 ns. Atsiradus didesnei nei 1,2 kV įtampai, tinkantys IGBT tranzistoriai pakeitė anksčiau tokiose pavarose naudotus uždaruosius tiristorius GTO.



4.2 pav. Struktūrinė dažnio keitiklio schema

Visų signalų apdorojimo, taip pat valdymo signalų generavimą atlieka sudėtingas valdymo procesoriaus modulis. Dažnio keitiklis valdomas iš valdymo pulto klaviatūra, o naudotojo ir kiti

nuostačiai rodomi to paties pulto skystųjų kristalų monitoriuje. Duomenis išvesti ir priimti numatytas nuoseklus perdavimo kanalas su RS 485 sąsaja. Tokia keitiklio struktūra yra dažniausiai naudojama šiuolaikiniuose dažnio keitikliuose, tik realizuojant skirtingus valdymo kintamųjų būdus.

Trifazė impulsinė įtampa yra priemonė, kuria dažnio keitiklis valdo asinchroninį variklį. Yra du asinchroninio variklio valdymo metodai: skaliarinis ir vektorinis. Dauguma dažnio keitiklių taikymo atvejų variklio mechaninės apkrovos priklausomybė nuo sukimosi greičio yra iš anksto žinoma, o reikalavimai dinaminėms asinchroninių pavarų savybėms nėra svarbūs. Tokiais atvejais variklio valdymui pakanka skaliarinio valdymo dažnio keitiklio. Populiariausios jų panaudojimo sritys yra siurbiai, ventiliatoriai ir dalis konvejerių.

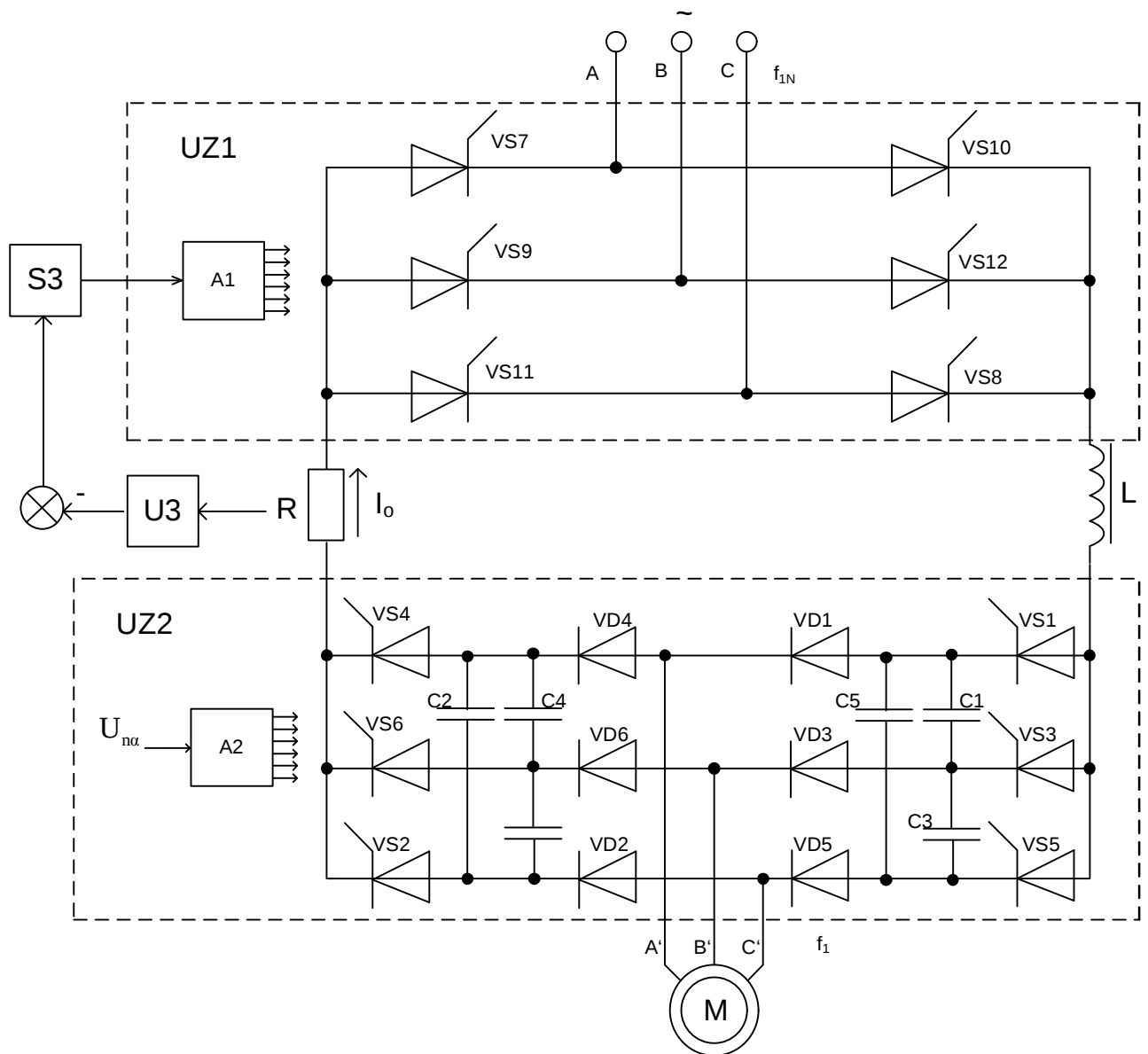
4.1.2. Dažninių elektros pavarų galios grandinių schemos

Pagrindinis dažninės elektros grandinės galios elementas – tai dažnio keitiklis. Dažnio keitiklis pastovaus dažnio ir pastovios amplitudės pramoninio tinklo įtampą keičia į reguliuojamo dažnio ir reguliuojamos amplitudės įtampą arba srovę, kuria yra maitinamas asinchroninis variklis. Dažnio keitiklis turi du valdymo kanalus – dažnio ir įtampos arba srovės, kurių dėka galima realizuoti anksčiau išnagrinėtus dažninio valdymo būdus, stabilizuojant asinchroninio variklio srautą, arba jį keičiant pageidaujamu dėsniu.

Šiuolaikinėse dažninėse pavarose naudojami statiniai tiristoriniai dažnio keitikliai. Pagal veikimo principą dažnio keitikliai skirstomi į dvi grupes: tai dažnio keitikliai su tarpine nuolatinės srovės grandimi ir tiesioginiai dažnio keitikliai (ciklokonverteriai).

Plačiau paplitę dažnio keitikliai su tarpine nuolatinės srovės grandimi. Tokį dažnio keitiklį sudaro valdomas arba nevaldomas lygintuvas, įtampos pulsacijų filtras ir autonominis įtampos arba srovės inverteris, nuolatinę įtampą arba srovę keičiantis trifazė kintamo dažnio įtampa arba srove. Naudojant įtampos inverterį, lygintuvas turi pasižymėti įtampos šaltinio savybėmis, o naudojant srovės inverterį – srovės šaltinio savybėmis. Naudojant valdomą lygintuvą, išėjimo įtampos amplitudė reguliuojama keičiant nuolatinės įtampos didumą, o jos dažnis reguliuojamas veikiant autonominio įtampos inverterio valdymo kanalą. Sudarius neigiamą išlygintos srovės grįžtamąjį ryšį, valdomajam lygintuvui galima suteikti srovės šaltinio savybes ir, panaudojus srovės inverterį, gauti reguliuojamo dažnio srovės šaltinį. Kai naudojamas nevaldomas lygintuvas, inverteriui tenka ir išėjimo įtampos dažnio, ir jos amplitudės regulatoriaus funkcijos [15].

Dažninės pavaros, sudarytos iš reguliuojamo dažnio srovės šaltinio ir asinchroninio variklio, galios grandinės schema pavaizduota 4.3 paveiksle.



4.3 pav. Dažninės pavaros su reguliuojamo dažnio srovės šaltiniu schema

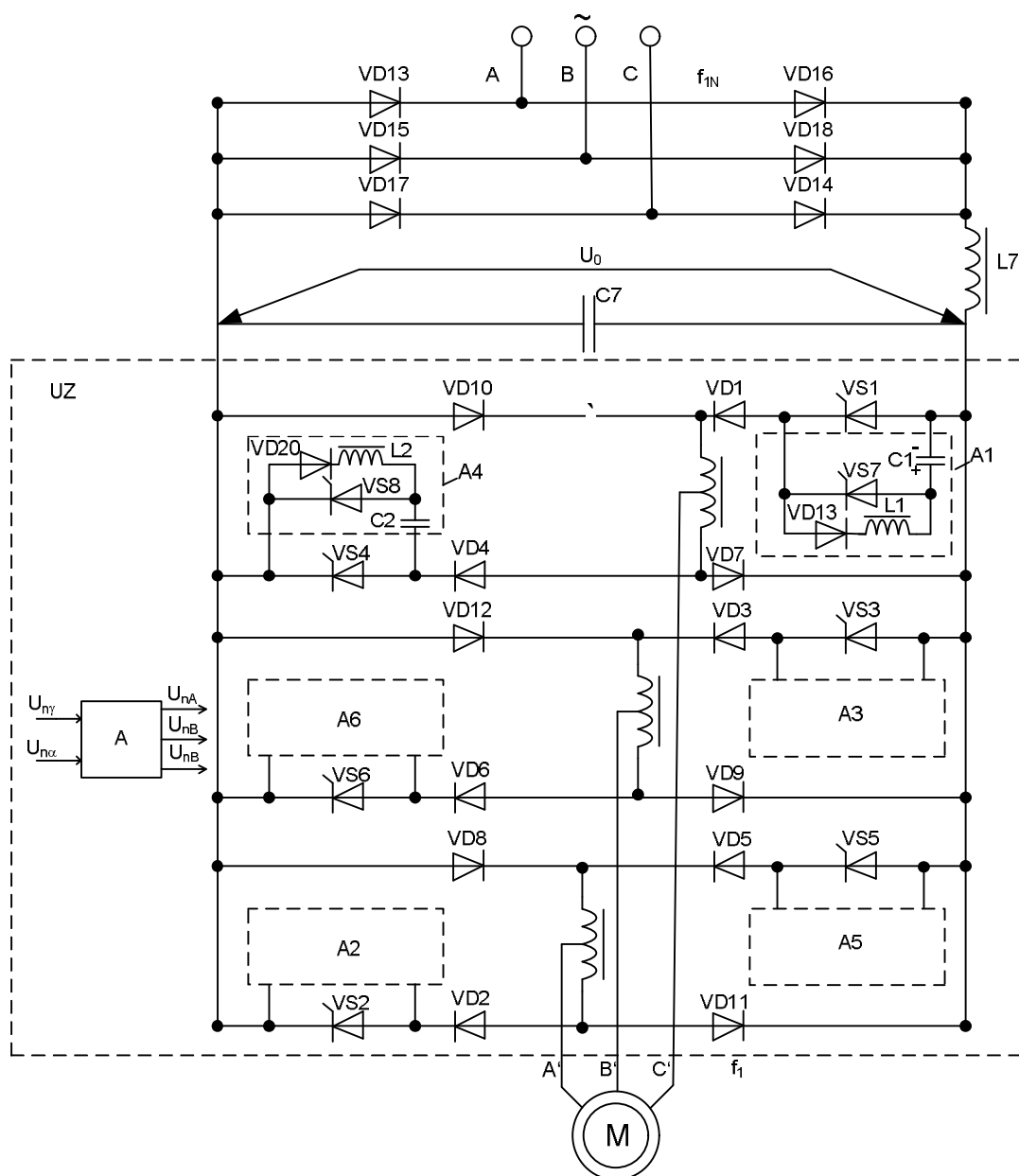
Srovės šaltinį sudaro valdomasis lygintuvas UZ1, neigiamos srovės grįžtamojo ryšio dėka veikiantis srovės stabilizatoriaus režimu. Droselis L atlieka srovės pulsacijų filtro funkcijas. Nuolatinę srovę I_0 autonominės srovės inverteris UZ2 invertuoja į reguliuojamo dažnio trifazę srovių, tekančių asinchroninio variklio statoriaus apvijomis, sistemą. Autonominis srovės inverteris yra paprastesnis už įtampos inverterį. Jam nereikalingas atgalinės srovės lygintuvas, o apkrovos grandinės induktyviąją srovės dedamąją komutavimo proceso metu kompensuoja komutuojuantys kondensatoriai. Tarkime, kad nagrinėjamu momentu įjungti tiristoriai VS1 – VS2 ir srovė teka asinchroninio variklio fazių A' ir C' apvijomis. Įjungus tiristorių VS3, kondensatorius C1 uždaro tiristorių VS1. Srovė variklio

apvijomis A' ir C' nenutrūksta, o teka tiristoriumi VS3 ir kondensatoriumi C1, kol pastarasis nepersikrauna iki priešingo ženklo įtampos, lygios linijinei įtampai U_{AC} . Didėjant kondensatoriaus C1 įtampai, variklio A' fazės srovė ima silpnėti, o šaltinio srovę pradeda perimti B' fazė taip, kad visą laiką galioja $i_A + i_B = I_o$, čia I_o – srovė nuolatinės srovės šynose. Kai srovė i_B pasidaro lygi šaltinio srovei, srovė A' fazėje nutrūksta. Tiristorių komutavimo tvarka tokia pat, kaip ir išnagrinėtame anksčiau autonominiame įtampos inverteryje [15].

Labai svarbi nagrinėjamos schemos savybė yra ta, kad joje galima rekuperuoti energiją į tinklą, nes elektros varikliui tapus energijos šaltiniu, srovės kryptis nuolatinės srovės grandinėje nekinta, o srovės reguliavimo kontūras valdomąjį lygintuvą automatiškai perveda į invertavimo režimą.

Vienas iš svarbiausių šio tipo keitiklių trūkumų yra tas, jog juos naudojant sudėtinga formuoti variklio apvijose sroves, savo forma artimas sinusinėms. Variklio srovių aukštesniosios harmonikos yra didelės ir jos sukelia momento ir greičio pulsacijas bei papildomus energijos nuostolius. Kadangi komutuojančių kondensatorių talpa priklauso nuo induktyviosios apkrovos srovės dedamosios, tai šio tipo keitiklius reikia kruopščiai suderinti su apkrova ir nenaudoti grupinėse pavarose, kai įjungiant ar išjungiant atskirus variklius, kinta apkrovos induktyvioji varža. Nagrinėjamo tipo keitikliai dažniausiai naudojami dažninėms pavaroms su vienu varikliu sudaryti.

Plataus reguliavimo diapazono dažninėms pavaroms realizuoti naudojami inverteriai su autonomiškai komutuojamais tiristoriais. Taikant autonominę tiristorių komutaciją, galima sklandžiai reguliuoti ne tik inverterio dažnį, bet ir išėjimo įtampos amplitudę, formuojant variklio fazinėse apvijose sroves, kurių forma artima sinusinei. Dažnio keitiklio su autonomiškai komutuojamais tiristoriais galios grandinės schema atvaizduota 4.4 paveiksle [15].



4.4 pav. Dažninės pavaros su automatiškai komutuojamais tiristoriais schema

Keitiklį sudaro nevaldomas lygintuvas VD13 – VD18, filtras C7 – L7 ir autonominis įtampos inverteris UZ. Inverterio galios tiristoriai VS1 – VS6 sujungti trifazio tiltelio schema ir turi autonominius komutavimo blokus A1 – A6. Komutavimo bloką, pavyzdžiui A1, sudaro komutavimo kondensatorius C1, pagalbinis tiristorius VS7, kondensatoriaus įsikrovimo grandinė VD13 – L1. Tai tipinė dvipakopė lygiagretaus tiristorių komutavimo sistema, išjungianti tiristorių VS1, kai paduodamas valdymo impulsas komutavimo tiristoriui VS7. Kad pauzės metu komutavimo kondensatorius neišsikrautų per apkrovą, naudojami atskyrimo diodai VD1 – VD6. Diodai VD7 –

VD12 sudaro atgalinės srovės tiltelį, kuriuo cirkuliuoja reaktyvioji asinchroninio variklio srovė komutavimo proceso metu, įkraudama kondensatorių C7.

Iš schemos matyti, kad kiekviena asinchroninio variklio fazė yra maitinama iš nuolatinės įtampos šaltinio per reversinį įtampos reguliatorių, sudarytą iš dviejų nereversinių impulsinių keitiklių, susidedančių iš inverterio galios tiristorių bei jų komutavimo blokų. Vienas iš šių keitiklių valdomas teigiamu, o antrasis – neigiamu nustatymo signalu. Abu keitikliai turi identiškas, tiesines valdymo charakteristikas ir suderinti taip, kad esant nustatymo signalui, pavyzdžiui, A fazės įtampos reguliatoriui $U_{nA}=0$, abu visą laiką yra išjungti, esant $U_{nA}>0$, veikia anodinės grupės keitiklis, o esant $U_{nA}<0$, veikia katodinės grupės keitiklis. Sklandžiai keičiant valdymo įtampą ($-U_{n\max} \leq U_{nA} \leq U_{n\max}$), atitinkamos variklio fazės kinta intervale – $U_{f\max} \leq U_{fA} \leq U_{f\max}$. Jei valdymo įtampą keisime harmoniniu dėsniu $U_{nA} = U_{nm} \cos \omega_0 t$, tai variklio fazės įtampa irgi kinta harmoniniu dėsniu $U_{fA} = U_{fm} \cos \omega_0 t$. Šio tipo autonominio inverterio valdymo blokas A iš dviejų valdymo signalų U_{ny} ir U_{no} turi suformuoti trifazę atitinkamo dažnio ir amplitudės sinusinių įtampų, atliekančių impulsinių keitiklių moduliuojančių signalų funkcijas, sistemą. Dėl to šio tipo dažnio keitiklius patogiau naudoti vektorinio valdymo dažninėse pavarose. Čia valdymo sistemos išėjime ir suformuojama trifazė harmoninių valdymo signalų U_{nA} , U_{nB} , U_{nC} sistema [15].

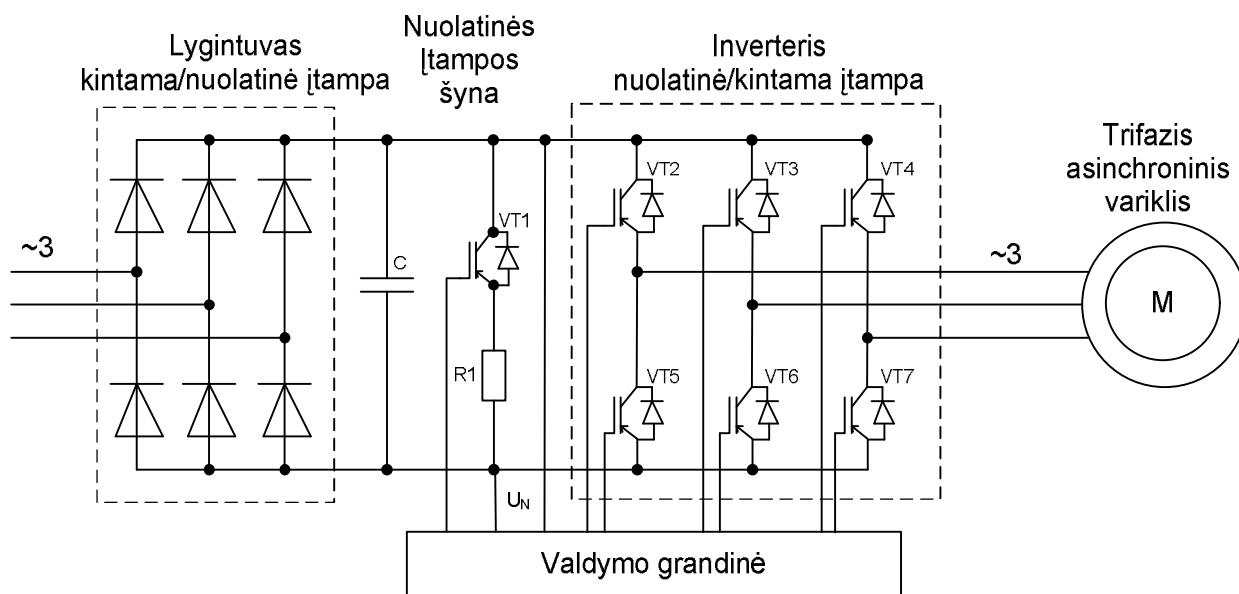
Dažnio keitikliai su autonomiškai komutuojamais tiristoriais ir impulsiniu įtampos reguliavimu turi ir kitų privalumų: naudojant nevaldomą lygintuvą, pagerėja pavaros galios koeficientas ir sumažėja žalinga keitiklio įtaka maitinančiam tinklui; komutuojant tiristorius dideliu dažniu, gerokai didesniu už variklio maitinimo įtampos dažnį, sumažėja aukštesniųjų harmonikų įtaka pavaros charakteristikoms ir jų sukeliama nuostoliai.

4.2. DAŽNINIŲ PAVARŲ VALDYMO METODAI

4.2.1. Skaliariniais metodais valdomos elektros pavaros modelis

Yra įvairių asinchroninio variklio valdymo metodų. Kaip jau buvo minėta, visi jie klasifikuojami į skaliarinius ir vektorinius. Skaliariniai grindžiami įvairiais nevektorinius variklio dydžius siejančiais sąryšiais, pvz., Kłoso formule. Vektoriniai valdymo metodai grindžiami vektorinėmis variklio lygtimis. Tačiau visų rūšių metodams bendra tai, kad vienaip ar kitaip keičiamas įtampos dažnis. Šiuo metu tam naudojami dažnio keitikliai, todėl modeliuojant valdomą variklį tenka modeliuoti mechatroninę sistemą keitiklis – variklis.

Labai apibendrintai pramoninio dažnio keitiklio galios grandinės schema pavaizduota 4.5 paveiksle. Dažnio keitiklį dažniausiai sudaro nuosekliai sujungti nevaldomas lygintuvas ir inverteris, tarp kurių jungiamas filtro kondensatorius C . Inverterį sudaro tilteline schema sujungti valdomi raktai VT2 – VT7, kurių valdymo impulsus generuoja raktų valdymo grandinė. Prie dažnio keitiklio išėjimų jungiamas asinchroninis variklis M [41].



4.5 pav. Dažnio keitiklio galios grandinė

4.5 paveiksle pateiktoje schemoje variklis neturi nulinio laido, todėl galimi variklio apvijų jungimo būdai: žvaigždinis be nulinio laido arba trikampis.

Paprastai dažnio keitikliuose kiekvienas raktas šuntuojamas priešinga kryptimi įjungtu diodu, kurio paskirtis — blokuoti raktų komutavimo metu atsiradusius viršįtampius. Minėti diodai paprastai jau būna integruoti daugelyje raktams naudojamų elementų, pvz., MOP ar IGBT tranzistoriuose.

Yra sukurta įvairių raktų VT2 – VT7 komutavimo algoritmų. Jie apžvelgiami įvairiuose literatūros šaltiniuose. Visi jie skiriasi sudėtingumu, išėjimo įtampos harmonine sudėtimi, variklio elektromagnetinio momento tolydumu ir kitomis charakteristikomis. Paprasčiausias yra vadinamasis 180° algoritmas [29]. Komutuojuant VT2 – VT7 raktus šiuo algoritmu, visas signalo periodas T skaidomas į šešias lygias dalis, kurių metu raktų padėtys būna tokios, kaip nurodyta 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė. Raktų valdymo algoritmas

El. laipsnių	0-60°	60-120°	120-180°	180-240°	240-300°	300-360°
VT2	atv.	atv.	atv.	užd.	užd.	užd.
VT5	užd.	užd.	užd.	atv.	atv.	atv.
VT3	užd.	užd.	atv.	atv.	atv.	užd.
VT6	atv.	atv.	užd.	užd.	užd.	atv.
VT4	atv.	užd.	užd.	užd.	atv.	atv.
VT7	užd.	atv.	atv.	atv.	užd.	užd.

4.1 lentelėje įrašas „atv.“ reiškia, kad atitinkamas raktas tuo momentu atviras ir atitinkama grandinė nutraukta, „užd.“ – atitinkamas raktas uždaras ir grandinė sujungta.

Raktai lentelėje sugrupuoti pagal tiltelio pečius, kuriuose jie įjungti.

Dažnio keitiklio realizuojamas algoritmas pasirenkamas atsižvelgiant į daugelį eksploatacinių pavaros savybių, pvz., leidžiamas greičio pulsacijų dydis, algoritmo paprastumas ir pan. Taikant 180° algoritmą, visas maitinimo įtampos periodas skaidomas į šešis intervalus ir kiekvieno tokio intervalo metu fazinė variklio įtampa palaikoma pastovi. Fazinių įtampų vertės kiekviename intervale pateiktos 4.2 lentelėje.

4.2 lentelė. Dažnio keitiklio tiekiamos įtamos

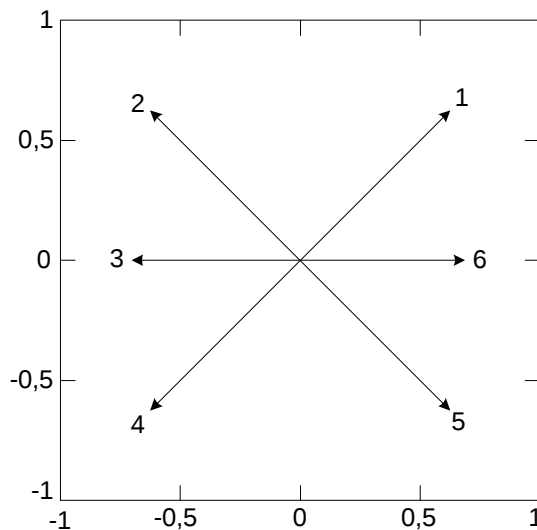
Laikas	0-T/6	T/6-T/3	T/3-T/2	T/2-2T/3	2T/3-6T/6	5T/6-T
U_A	$U_{\max}$	0	0	0	$U_{\max}$	$U_{\max}$
U_B	$U_{\max}$	$U_{\max}$	$U_{\max}$	0	0	0
U_C	0	0	$U_{\max}$	$U_{\max}$	$U_{\max}$	0
U_{qs}	$U_{\max}/3$	$U_{\max}/3$	$-2U_{\max}/3$	$-U_{\max}/3$	$U_{\max}/3$	$2U_{\max}/3$
U_{ds}	$U_{\max} / \sqrt{3}$	$U_{\max} / \sqrt{3}$	0	$-U_{\max} / \sqrt{3}$	$-U_{\max} / \sqrt{3}$	0

Reikia atkreipti dėmesį, kad naudojamas variklio modelis yra dvifazis, todėl trifazį maitinimą būtina perskaičiuoti į atitinkamą dvifazį. Tam skaičiuojamas kompleksinis statoriaus maitinimo įtamos vektorius:

$$\vec{U}_s = \frac{2}{3} \left[U_A + U_B \exp\left(j \frac{2\pi}{3}\right) + U_C \exp\left(-j \frac{2\pi}{3}\right) \right], \quad (4.1)$$

čia: U_A, U_B, U_C – momentinės fazinių įtampų vertės, V.

Kai U_A, U_B, U_C sudaro simetrinę trifazę įtampų sistemą, suma (4.1) išreiškia apie koordinačių sistemos pradžią besisukantį vektorių. Dažnio keitiklyje įtamos keičiamos diskretiškai, todėl suma (4.1) gali įgyti tik baigtinį skaičių fiksuotų verčių. Atvaizdavus minėtus vektorius kompleksinėje plokštumoje, gaunama vektorinė keitiklio įtamos diagrama. Pagal 4.2 lentelės duomenis, nubraižyta vektorinė keitiklio diagrama pateikta 4.6 paveiksle. Ties kiekvieno vektoriaus pabaiga esantis skaičius rodo, kuriam 4.2 lentelės intervalui vektorius priskirtas [41].



4.6 pav. Dažnio keitiklio formuojamos įtamos vektorinė diagrama

Apie 75 % visos elektros energijos, kurią sunaudoja elektros varikliai, tenka siurblių ir ventiliatorių pavaroms, todėl šiuo metu populiariausi yra dažnio keitikliai, skirti skaliariniam asinchroninio variklio valdymui. Studijoje, kurią atliko žurnalas „Engineering magazine“, teigiama, kad skaliarinio valdymo dažnio keitikliai pasirenkami 84 % atvejų. Trys svarbiausios savybės, kai perkant pasirenkami dažnio keitikliai, yra paprastas valdymas ir paruošimas darbui (70 % naudotojų šią savybę laiko svarbiausia); patogi naudotojo sąsaja 53 % ir kaina 50 % [7].

4.2.2. Bendrieji vektorinio valdymo principai

Šiuolaikinės vektorinio valdymo sistemos praėjo ilgą raidos kelią ir šiuo metu yra labiausiai paplitusios kintamosios srovės variklių pavarose. Šios sistemos leidžia paprastai ir efektyviai valdyti tokius sudėtingus objektus, kaip asinchroninis variklis su trumpai jungtu rotoriumi. Plečiasi šių sistemų pritaikymo sritys, vis daugiau atsisakoma automatizuotų valdymo pavarų su nuolatinės srovės varikliais. Pirmiausia, tai susiję su galios elektronikos, leidžiančios kurti patikimus ir iš dalies pigius keitikius, tobulinimu. Todėl aukštos kokybės vektorinio valdymo asinchroninė elektros pavara šiuo metu tapo techniniu standartu.

Pirmuoju vektorinio valdymo pavarų raidos etapu, kuris prasidėjo XX a. 20-ųjų, o baigėsi 40-ųjų metų pabaigoje, buvo sukurtas universalus vektorinis-matematinis modelis, kuris gavo apibendrintos elektros mašinos vardą. Šis modelis leidžia tirti elektromagnetinius procesus idealioje elektros mašinoje. Praktinis šio modelio pritaikymas buvo atidėtas keliems dešimtmečiams, nes tuo metu buvo neįmanoma realizuoti skaičiavimo technikoje. Sėkmingai taikant šį modelį matematiniai pereinamųjų procesų skaičiavimai buvo atliekami rankiniu būdu.

1971 m. F. Blaschke pasiūlė asinchroninio variklio (toliau AV) valdymo sistemos sudarymo metodą, kuriame buvo panaudotos asinchroninio variklio sistemos, orientuotos pagal rotoriaus srautą, modelis. Metodo, pavadinto vektoriniu, esmę sudaro valdymo sistemoje perdavimo funkcijų, atvirkščių perdavimo funkcijoms, kurios aprašo AV modelį, naudojimas. Tai lėmė nepriklausomųjų sistemos kintamųjų, įeinančių į elektromagnetinio momento lygtį, gavimą. Todėl šis principas siejamas su tiesioginiu momento valdymu. Be to, vektoriniame AV modelyje užduočiai supaprastinti buvo naudojama koordinačių sistema, orientuota pagal vieną iš vektorių, įeinančių į elektromagnetinio momento lygtį. Taip galima buvo supaprastinti sistemos perdavimo funkcijas ir nustatyti momentą taip, kaip jis nustatomas nuolatinės srovės varikliuose – dvejais nepriklausomais kintamaisiais.

Per praėjusius tris dešimtmečius buvo sukurta dešimtys AV vektorinio valdymo modelių variantų, realizuota šimtai įvairiausių įrenginių, paskelbta tūkstančiai straipsnių ir monografių, bet principas ir pirmas F. Blaschke metodas iki šiol dominuoja, kai reikia jį techniškai realizuoti.

Kaip žinia, elektros variklio valdymas užtikrinamas reguliuojant elektromagnetinį momentą. Tam reikia nepriklausomai valdyti vektorių, įeinančių į pasirinkto elektromagnetinio momento išraišką, koordinates. Lygties pasirinkimas sudarant valdymo sistemas turi didelę įtaką, nes daugelis kintamųjų, ypač asinchroniniame variklyje, negali būti išmatuojami. Nors ir lygties pasirinkimas turi įtakos perdavimo funkcijų sudėtingumui, bet kuriuo atveju elektromagnetinio momento lygties struktūra bus analogiška.

Modeliuojant AV ir kuriant vektorinio valdymo sistemas, bendro principo esmę sudaro koordinačių sistemos, orientuotos pasirinkto momentą nusakančio vektoriaus kryptimi, naudojimas. Šio vektoriaus projekcija į kitą koordinačių ašį ir šią projekciją atitinkanti dedamoji bus lygios nuliui. Elektromagnetinio momento išraiška formaliai gauna pavidalą, identišką nuolatinės srovės variklio momentui, kuris proporcingas inkaro srovei ir pagrindiniam magnetiniam srautui [29].

Vektoriaus, pagal kurį orientuojama koordinačių sistema, pasirinkimas yra laisvas ir nusakomas paprastumu bei AV modelio realizavimo galimybe. Pavyzdžiui, esant orientacijai pagal rotoriaus srautą ($y_{2d} = y_{2d}$; $y_{2q} = 0$) momentą galima išreikšti taip:

$$M = \frac{3}{2} z_p (\Psi_{2q} i_{2d} - \Psi_{2d} i_{2q}) = -\frac{3}{2} z_p \Psi_{2q} i_{2d} \Big|_{\Psi_{2q}=0} \quad (4.2)$$

arba

$$M = \frac{3}{2} z_p \frac{L_m}{L_2} (\Psi_{2d} i_{ld} - \Psi_{2q} i_{ld}) = -\frac{3}{2} z_p \frac{L_m}{L_2} \Psi_{2q} i_{ld} \Big|_{\Psi_{2q}=0}, \quad (4.3)$$

čia: M – momentas, z_p – polių porų skaičius, Ψ_{2d} , Ψ_{2q} – pilnutinio rotoriaus srauto projekcija į d ašį, i_{2d} , i_{2q} – rotoriaus srovės projekcija į d ašį, L_m – įmagnetinimo induktyvumas, L_2 – rotoriaus induktyvumas.

Kaip matyti iš (4.2) formulės, momento išraiška neduoda naudos valdant AV su trumpai jungtu rotoriumi, nes išraiškoje yra rotoriaus srovė, kurią neįmanoma matuoti ir valdyti. Iš išraiškos (4.3) esant pastovaus rotoriaus srauto sąlygai, galima valdyti elektromagnetinį momentą keičiant statoriaus srovės projekcijas į skersinę ašį i_{1q} .

Tokiu būdu, sudarant AV vektorinio valdymo sistemą, reikia pasirinkti vektorių, pagal kurį bus orientuota koordinačių sistema, atitinkamą momento išraišką ir nustatyti visus į išraišką įeinančius dydžius.

4.2.3 Erdvinio vektoriaus metodas

Valdant pavaras su asinchroniniais varikliais labai dažnai naudojamas vektorinio valdymo metodas ir įvairios jo modifikacijos. Viena jų – variklio valdymas srove. Vektorinis variklio valdymas labai supaprastėja valdymo (būsenos) kintamaisiais pasirinkus statoriaus sroves, o ne įtampas, nes supaprastėja variklio, kaip valdymo objekto, lygtys. Taip valdomas variklis automatinio valdymo teorijos požiūriu gali būti laikomas beinercine grandimi.

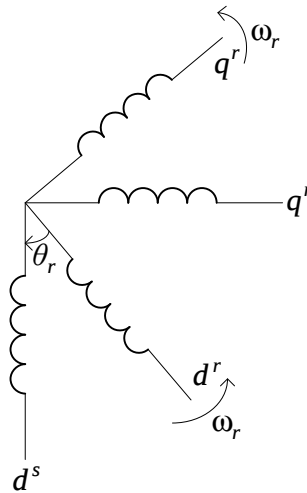
Dabartiniu metu visi modernus valdymo metodai formuojami vektorinei variklio lygčių sistemai. Taikant vektorines variklio lygtis, operuojama ne su nuolatos kintančiomis momentinėmis fizikinių dydžių, o su jų kompleksinėmis vertėmis. Tinkamai pasirinkus koordinačių sistemą, labai supaprastėja variklio matematinis aprašymas, lengviau formuojami valdymo dėsniai ir realizuojami reguliatoriai. Jei dinaminiai procesai variklyje pasibaigė, o besisukančios koordinačių sistemos q ašis sutampa su atstojamuoju rotorius srauto vektoriumi, variklio lygtys vektorių projekcijoms užrašomos taip:

$$\begin{cases} u_{qs} = i_{qs} R_s - \alpha_k \Psi_{ds}; \\ u_{ds} = i_{ds} R_s - \alpha_k \Psi_{qs}; \\ 0 = i_{dr} + (\alpha_k - \omega_r) \Psi_{qr}; \\ M_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} i_{ds} \Psi_{qm}; \\ \Psi_{qs} = L_s i_{qs}; \\ \Psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr}; \\ \Psi_{qr} = L_s i_{qs} = \Psi_{rm}, \end{cases} \quad (4.4)$$

čia: u_{qs} , u_{ds} – rotorius įtampas projekcija į d^s ašį, i_{qs} , i_{ds} – rotorius srovės projekcija į d^s ašį, R_s – statoriaus apvijos varža, α_k – koordinačių sistemos sukimosi greitis, Ψ_{ds} , Ψ_{qs} – pilnutinio rotorius srauto projekcija į d^s ašį, Ψ_{dr} , Ψ_{qr} – pilnutinio rotorius srauto projekcija į q^e ašį, M_e – elektromagnetinis momentas, p – polių porų skaičius, L_r – rotorius induktyvumas, L_s – statoriaus induktyvumas.

Iš (4.4) lygčių sistemos labai aiškiai formuluojamas vektorinio valdymo principas, t.y. variklio rotoriaus srautas vienareikšmiškai ir tiesiškai priklauso nuo statoriaus srovės q dedamosios, o variklio elektromagnetinis momentas – nuo statoriaus srovės d dedamosios ir rotoriaus srauto sandaugos. Taigi, valdant variklio statoriaus srovės vektoriaus projekcijas q ir d ašyse, valdomas elektromagnetinis momentas [43].

Bendruoju atveju kiekviena trifazė mašina gali būti pakeista ekvivalente dvifaze, kaip parodyta 4.7 paveiksle. Čia $d^s - q^s$ sudaro statoriaus apvijos koordinačių sistemą, kurios vertikalioji ašis yra d^s , o horizontalioji ašis – q^s . Rotoriaus koordinačių analogiškos ašys žymimos $d^r - q^r$. q_r yra kampas tarp vienvardžių variklio apvijų. Tačiau, naudojant šią koordinačių sistemą, laike kintančių parametrų priklausomybė nuo variklio posūkio kampo išlieka. Todėl ir variklį aprašančių lygčių sistema turi kintamus parametrus, priklausančius nuo variklio posūkio kampo, todėl ją spręsti yra sudėtinga.



4.7 pav. Ekvivalentinė dvifazė variklio schema

Pagal klasikini vektorinio valdymo principą, srovės projekcijos ašyse reguliuojamos reguliuojant statoriaus maitinimo įtampą. Be šio metodo, gali būti taikomas “srovės kanalo” metodas betarpiškai reguliuoti srovę. Taip valdomas variklis aprašomas lygtimis:

$$M_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} i_{ds} \Psi_{rm}; \quad (4.5)$$

$$\Psi_{qr} = L_m i_{qs} = \Psi_{rm}.$$

Lygčių sistema (4.5) yra daug paprastesnė nei (4.4), todėl ir ją aprašomas valdymo objektas yra paprastesnis.

Vektorinio valdymo dažnio keitiklis gali greitai ir tiksliai valdyti variklio sukimosi momentą esant įvairiems sukimosi greičiams, gali dirbti esant dideliui pagreičiui. Jis taip pat gali įsijungti, kai

variklis sukasi į bet kurią pusę. Asinchroninių variklių pavaros, valdomos vektorinio valdymo dažnio keitiklių naudojamos didelio greičio liftuose, kranuose bei laidų vyniojimo, popieriaus gamybos, plieno liejimo, plastmasės šampavimo ir kituose įrenginiuose [43].

Vektorinio valdymo dažnio keitikliai yra pakankamai populiarūs. Jie dažnai naudojami didesnės galios (>10 kW) pavarose. Dauguma firmų gamina abiejų tipų dažnio keitiklius. Žymiausi dažnio keitiklių gamintojai Europoje yra „ABB“, „Danfoss“, „Siemens“, „Lenze“, „Eurotherm“, „Telemecanique“, „Vega Drive“.

4.3. GREIČIO MATAVIMO BŪDAI

4.3.1. Variklio greičio jutikliai

Uždaroje variklio greičio ir pozicionavimo sistemose greičio ir padėties grįžtamasis ryšys su besisukančia sistema realizuojamas keitikliu, kuris mechaninį greičio ar padėties išraiškos dydį keičia į elektrinį, o pastarasis lengvai suderinamas su valdymo sistema.

Dažniausiai naudojami keitikliai:

- *Analoginis greičio keitiklis*, tai tachogeneratorius, kuris sukimosi greitį keičia į įtampą, o pastaroji yra proporcinga greičiui.
- *Skaitmeninis greičio keitiklis*, tai sukamasis prieaugio kodavimo įrenginys (angl. rotary incremental encoder), kuris greitį keičia į seriją impulsų, kurių dažnis proporcingas greičiui. Impulsai valdymo sistemai perduodami viena arba keliomis poromis ekranuotų kabelių.
- *Skaitmeniniai pozicijos keitikliai*, sukamasis absoliutusias kodavimo įrenginys (angl. rotary absolute encoder); jis poziciją keičia į bitinį kodą, kurio reikšmė atitinka kampinę padėtį. Toks kodas į valdymo sistemą perduodamas skaitmeniu būdu per įvairias komunikacines priemones.

Analoginiai greičio keitikliai keičiami skaitmeniniais, kadangi juos lengviau suderinti su šiuolaikine skaitmenine valdymo sistema [2].

Visi minėti greičio keitikliai yra mechaniniai, todėl laikui bėgant tikimybė, kad jie suges arba vis didės jų paklaida, taip pat didėja. Taip pat, tokie keitikliai nėra patikimi naudoti agresyviomis sąlygomis, nes patekę nešvarumai gali smarkiai sutrikdyti keitiklio darbą. Be to, tokiems keitikliams įjungti į sistemą reikalingi kabeliai, kurie kartais gali būti gedimo priežastimi (pvz., vizualiai nepastebimas nutrūkimas) bei didina sistemos kainą.

Norint turėti patikimą greičio jutiklį būtina ieškoti sprendimų minėtiems trūkumams pašalinti. Kaip alternatyvą minėtiems keitikliams galima naudoti greičio stebiklį (angl. speed observer).

4.3.2. Tachogeneratoriai

Tachogeneratoriais (angl. tachogenerator, tacho) vadinamos elektros mikromašinos, kurių išėjimo įtampa yra proporcinga jų sukimosi greičiui. Tachogeneratoriaus pavadinimas yra kilęs iš graikų kalbos žodžio *ταχος* (tachos), reiškiančio greitį, greitumą [44].

Tachogeneratoriai dažniausiai būna nedidelių matmenų, palyginti su variklio gabaritais, ir montuojami prie variklio veleno. Būtina atkreipti dėmesį į variklio ir tachogeneratoriaus velenų sujungimo vietos išcentravimą, kad būtų išvengta problemų ateityje atliekant techninės priežiūros darbus [2]. Tinkamai nepritaikius ir neišcentravus velenų, gali atsirasti vibracijos, dėl kurių atsiras didesnės matavimo paklaidos, taip pat sumažės šepėčių mazgo eksploatacijos trukmė.

Tachogeneratoriai naudojami:

1. Sukimosi greičiui matuoti. Sujungus tachogeneratorių su matavimo prietaisu, gaunamas sukimosi greičio matuoklis – tachometras. Matavimo prietaisas graduojamas sukimosi greičio vienetais, dažniausiai aps./min.
2. Automatinio reguliavimo ir valdymo sistemose – greičio neigiamajam grįžtamajam ryšiui sudaryti.
3. Vykdomųjų variklių rotorų virpesiams slopinti.
4. Diferencijavimo bei integravimo operacijoms vykdyti.

Kad tachogeneratoriai galėtų atlikti tokias funkcijas, jiems keliama šie reikalavimai: tiesiška ir stabili išėjimo charakteristika, didelis perdavimo koeficientas, simetriška išėjimo įtampa ir minimali nuolatinės srovės tachogeneratorių nejautrumo sritis, kuo mažesnės išėjimo įtampos pulsacijos, mažas inkaro (rotoriaus) inercijos momentas, maža elektromechaninė laiko pastovioji, maža masė ir matmenys.

Šie reikalavimai priklauso nuo tachogeneratoriaus paskirties. Jeigu tachogeneratoriai naudojami greičio grįžtamojo ryšio grandinėse arba sekimo sistemų virpesiams slopinti, ai svarbiausias rodiklis yra didelis perdavimo koeficientas (išėjimo charakteristikos statusas), o jos tiesiškumas – antraeilis dalykas. Tačiau naudojant tachogeneratorius diferencijavimo arba integravimo operacijoms vykdyti yra atvirkščiai – svarbiausias rodiklis yra išėjimo charakteristikos tiesiškumas ir jos stabilumas.

Kadangi elektros mašinose generuojamoji elektrovara yra proporcinga sukimosi greičiui, tai tachogeneratoriais gali būti įvairių tipų elektros mašinos: nuolatinės srovės, asinchroninės,

sinchroninės ir induktorinės. Automatikoje dažniausiai naudojami nuolatinės ir kintamosios srovės tachogeneratoriai [44].

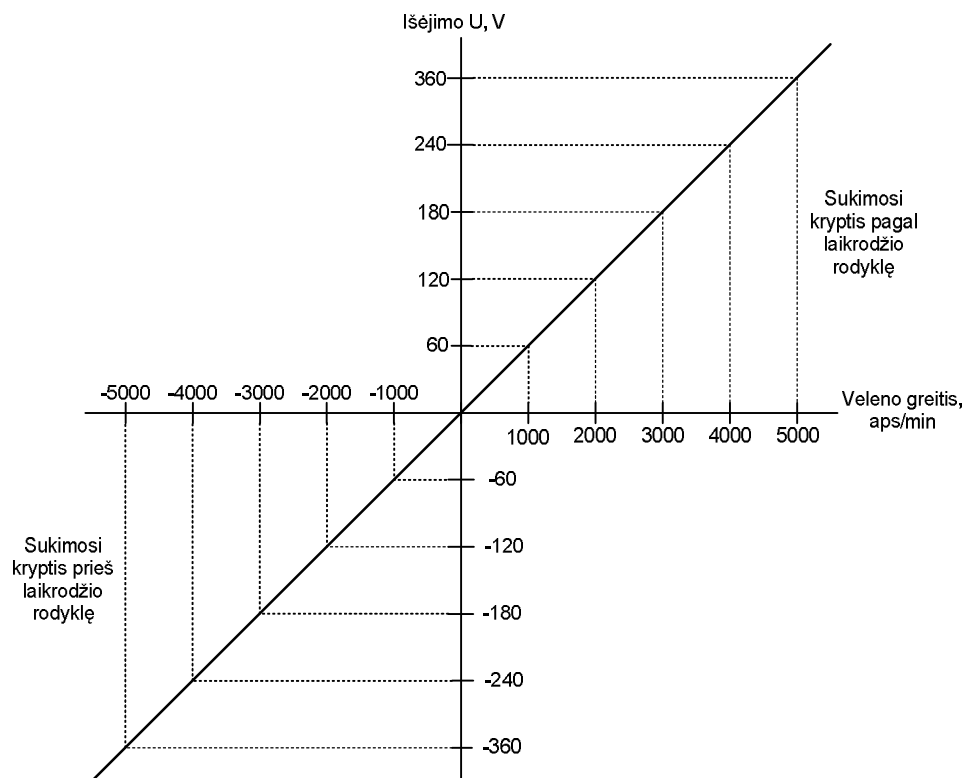
Nuolatinės srovės tachogeneratoriai yra įprastinės konstrukcijos nuolatinės srovės mašinos, kurių magnetinį srautą kuria žadinimo apvija, maitinama iš nuolatinės įtampos šaltinio, arba nuolatiniai magnetai [44]. 4.8 pav. parodytas nuolatinės srovės tachogeneratorius.



4.8 pav. Radio energy firmos nuolatinės srovės tachogeneratorius

Paminėtini kai kurie tachogeneratorių konstrukcijos ypatumai: inkaro grioveliai dažniausiai pasukami per vieną griovelio žingsnį (sumažėja magnetinio srauto pulsacija), polių ir inkaro magnetolaidžiai gaminami iš elektrotechninio plieno lakštų, didelis kolektoriaus plokštelių skaičius, specialūs šepečiai [44].

Nuolatinės srovės tachogeneratoriaus išėjime gaunama nuolatinė įtampa, kurios dydis yra tiesiogiai proporcingas variklio sukimosi greičiui, o jos poliškumas priklauso nuo sukimosi krypties. Paprastai išėjimo įtampos poliškumas išskiriamas į teigiamą, kai sukimosi kryptis sutampa su laikrodžio rodyklių sukimosi kryptimi, ir į neigiamą – kai sukimosi kryptis yra priešinga laikrodžio sukimosi kryptiai [2]. 4.9 pav. duota sukimosi krypties priklausomybė nuo išėjimo įtampos poliškumo.



4.9 pav. Dvikrypčio nuolatinės srovės tachogeneratoriaus išėjimo įtampa

Tachogeneratoriaus išėjimo įtampos vertė priklauso nuo kai kurių konstrukcijos bei technologijų ypatumų, į kuriuos reikia atsižvelgti projektuojant ir perkant tachogeneratorius konkreitiems tikslams. Tai susiję su paklaidomis, kurias galimas sumažinti arba jų išvengti, jeigu bus aiškios jų atsiradimo priežastys [44].

Pagrindinės nuolatinės srovės tachogeneratorių paklaidos:

- 1) apkrovos varžos įtaka;
- 2) tiesiškumo paklaida;
- 3) kalibravimo paklaida;
- 4) šepečių kontakto varžos įtaka;
- 5) inkaro reakcijos įtaka;
- 6) išėjimo įtampos asimetrija.

Bendruoju atveju tachogeneratorių tikslumą lemia kolektoriaus ir šepečių mazgas. Senesnio modelio tachogeneratorių kolektoriai buvo gaminami iš vario, o šepečiai iš grafito, todėl kolektoriaus paviršiuje susidarydavo vario oksido sluoksnis, kurio pereinamoji varža yra nepastovi ir negalima tiksliai nustatyti mažų sukimosi greičių, padidėja išėjimo įtampos pulsacijos.

Kintamosios srovės tachogeneratoriai yra labai panašūs į nuolatinės srovės tachogeneratorius, skirtumas tas, kad kintamos srovės tachogeneratoriaus išėjime gaunama kintama įtampa, kuri tiesiogiai proporcinga variklio sukimosi greičiui. Dažniausiai, valdymo sistemoje, kintama išėjimo įtampa yra išlyginama (angl. rectified) ir keičiama į nuolatinę įtampą. Kintamos srovės tachogeneratoriai yra netinkami įrenginiams, kurie keičia savo sukimosi kryptį, nes išlygintos įtampos poliškumas gali būti tik teigiamas arba neigiamas. Esant mažiems greičiams įtampos signalo pastebimos didelės pulsacijos, ko pasekoje kintamosios srovės transformatoriai tampa netinkami naudoti mažų greičių įrenginiuose. Dėl savo trūkumu kintamosios srovės tachogeneratoriai retai naudojami kintamo greičio įrenginiuose [2].

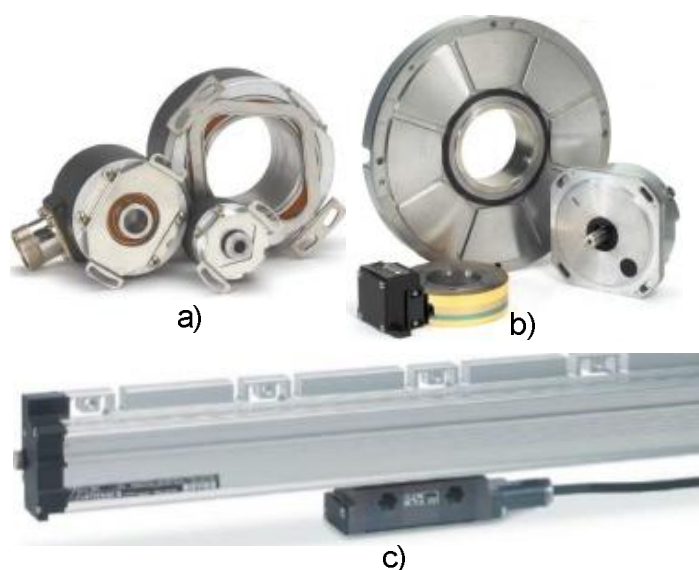
Apibendrinant galiam daryti išvadą, kad pagrindiniai tachogeneratorių trūkumai, ribojantys jų panaudojimą, būtų kolektoriaus ir šepečių mazgas bei nestabilus darbas mažų greičių diapazone.

4.3.3. Skaitmeniniai greičio ir padėties enkoderiai

Enkoderiai naudojami tokiose valdymo sistemose, kuriose reikalingas tikslus greičio, kelio ar erdvinės padėties matavimas.

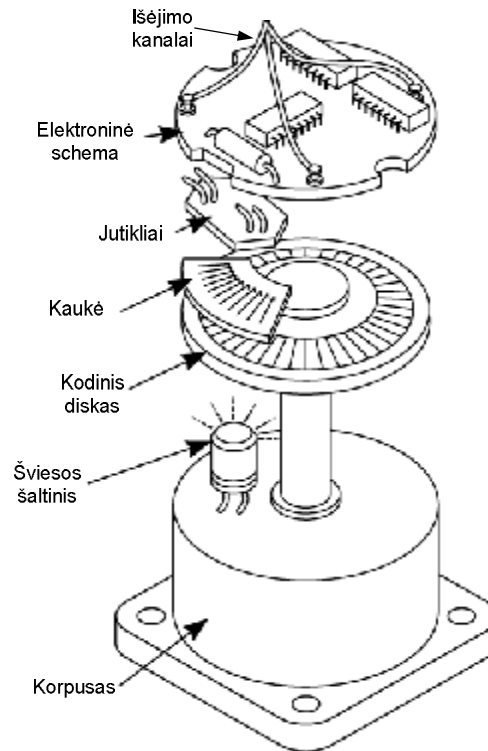
Enkoderis (angl. encoder) yra analoginis arba skaitmeninis keitiklis, kurio išėjime gaunamas analoginis signalas arba tam tikras impulsų skaičius, proporcingas sukimosi greičiui arba posūkio kampui. Pagal enkoderio informaciją variklis gali sukis nustatytu greičiu, jo velenas gali užimti tam tikrą tikslią padėtį arba sukis sinchroniškai ir sinfaziškai su kitu velenu [44].

Šiuo metu gaminami enkoderiai gali būti sukieji arba tiesiniai. Sukieji ir tiesiniai enkoderiai parodyti 4.10 paveiksle.



4.10 pav. a ir b – sukieji enkoderiai, c – tiesinis enkoderis

Optinio elektroninio enkoderio veikimo principas pateiktas 4.11 paveiksle.



4.11 pav. Optinio elektroninio enkoderio veikimo principas

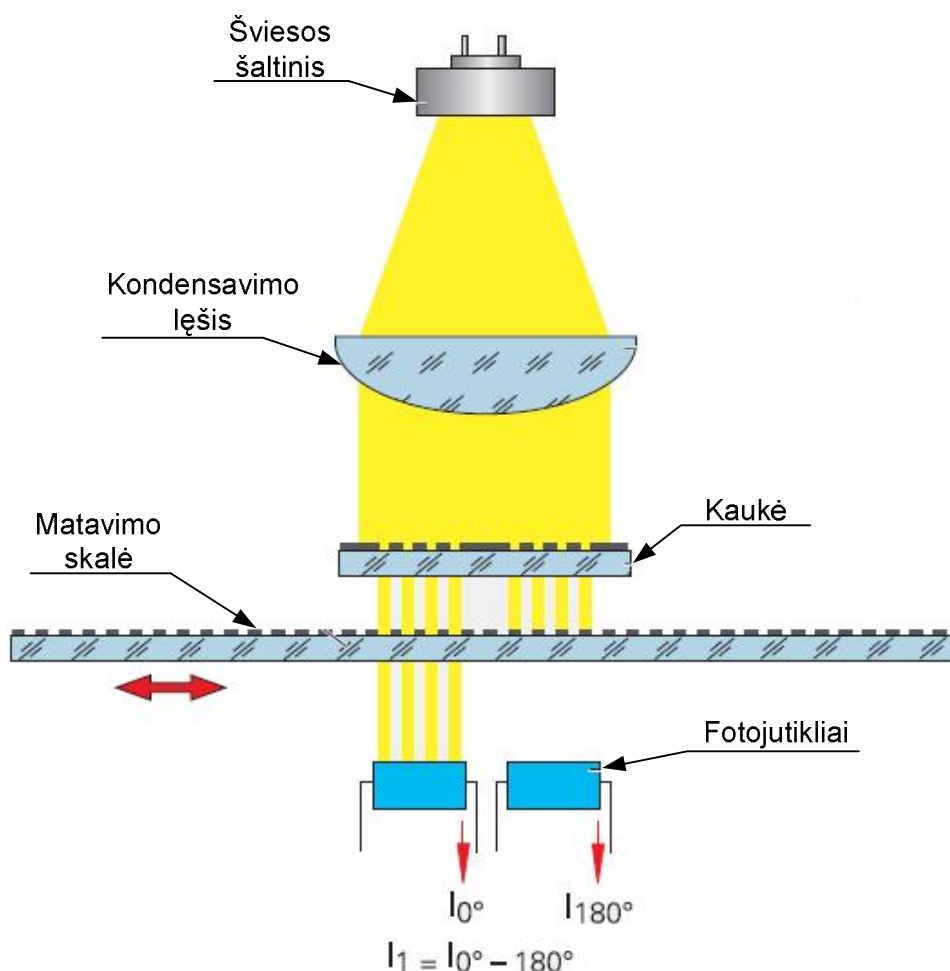
Iš pateikto paveikslo matyti, kad enkoderį sudaro: šviesos šaltinis, kodinis diskas, foto jutikliai, išėjimo kanalai (du išėjimo kanalai ir vienas atskaitos kanalas). Šviesos šaltinis – šviesos diodas (angl. LED). Kodinis diskas gaminamas iš stiklo ant kurio fotolitografiniu (angl. photolithographic) būdu sugraduojamas ir tokiu būdu gaunami laidūs ir nelaidūs šviesai tarpeliai (segmentai). Tokios technologijos dėka gaunami ypač tikslios ir identiškos gradavimo žymės. Dažniausiai naudojamas gradavimo žingsnis $4\ \mu\text{m}$ iki $50\ \mu\text{m}$ (firmos Heidenhain technologijoje). Už kodinio disko yra šviesai jautrūs jutikliai, kurie reaguoja į praėjusį pro kaukę ir kodinį diską šviesos srautą.

Optinio elektroninio enkoderio veikimas pagrįstas pagrįstas fotoelektrinio informacijos nuskaitymo principu [44].

Fotoelektrinis informacijos nuskaitymo metodas yra bekontaktis, taigi nėra sugraduotųjų dalių dėvėjimosi. Šis metodas pasižymi aukšta skiriamąja geba – aptinkamos mažesnės nei kelių mikronų pločio žymės ir generuojamas labai mažo periodo išėjimo signalas [18].

Firmos Heidenhain gaminamų sukiuosiose enkoderiuose naudojamas vaizdo gavimo (angl. imaging) skenavimo principas, t.y. dvi sugraduotos skalės (skalė, pagal kurią matuojama ir optinio prietaiso skalė) su identiškais gradavimo periodais juda viena priešais kita. Nelaidžios šviesai skalių

vietos yra padengtos atspindinčia šviesą medžiaga. Kai abiejų skalių laidūs šviesai tarpeliai sutampa, šviesos srautas pasiekia fotogalvaninius (angl. photovoltaic) jutiklius, kurie praėjusį šviesos srautą verčia į elektrinį, artimą sinusiniui signalą. Fotoelektrinio skanavimo naudojant vaizdo gavimo principą būdas parodytas 4.12 pav. [13].

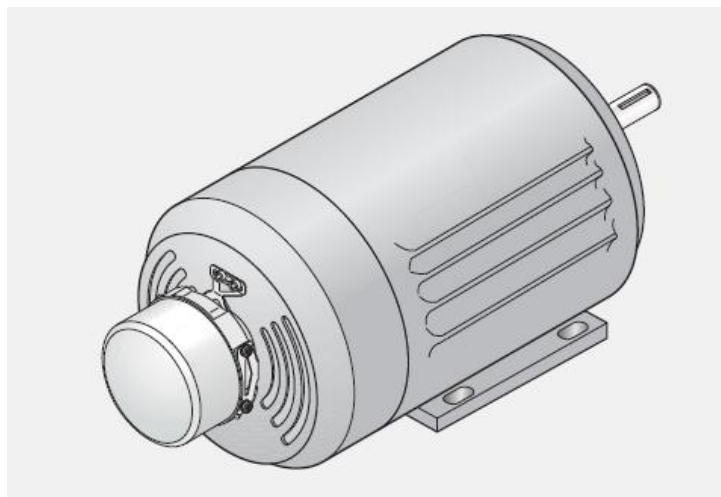
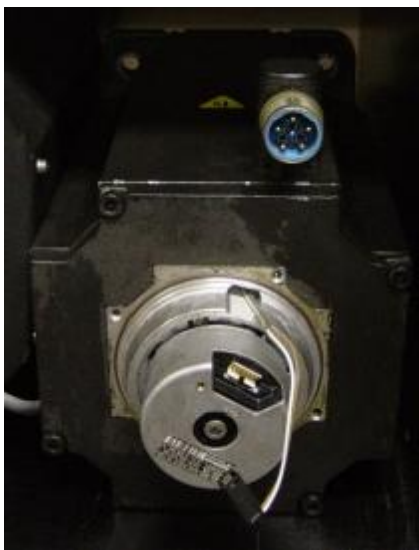


4.12 pav. Fotoelektrinis skanavimas naudojant vaizdo gavimo perduodant šviesą principą

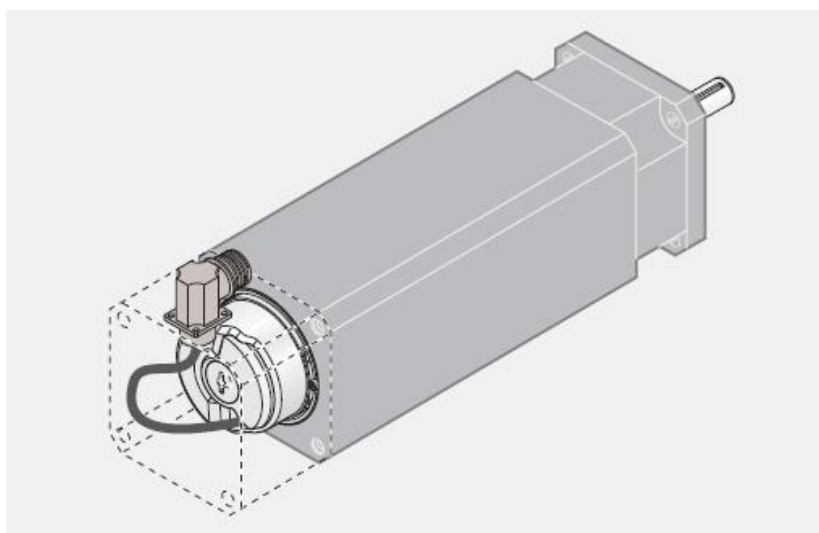
Išėjimo signalai toliau apdorojami elektroninėje schemoje iki tam tikros skaitmeninės arba analoginių signalų įtampos vertės. Signalų lygis priklauso nuo toliau naudojamos elektronikos. Taip apdoroti signalai per išėjimo grandinę perduodami skaičiavimo įtaisui [44].

Optinius elektroninius enkoderius pagal montavimo būdą galima suskirstyti į dvi grupes:

1. Įmontuojamieji.
2. Montuojami iš išorės.



4.13 pav. Montuojamas iš išorės sukusis enkoderis



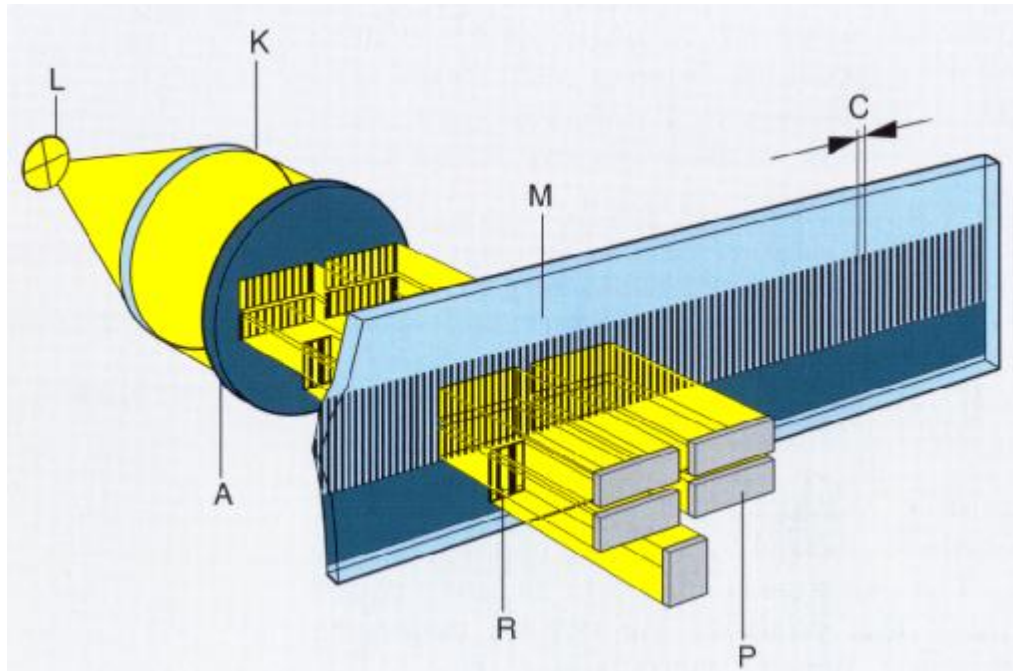
4.14 pav. Įmontuojamasis sukusis enkoderis

Varikliams su sustiprintu (angl. forced) aušinimu sukieji enkoderiai gali būti montuojami ant variklio išorės 4.13 pav. arba yra įmontuojami jo viduje 4.14 pav. Tokie enkoderiai dažnai nėra apsaugoti nuo nešvaraus oro srauto, todėl jų apsaugos klasė būna IP64 ir didesnė. Darbinė šių encoderių temperatūra dažnai viršija 100 °C [13].

Varikliuose be atskiro, papildomo aušinimo enkoderiai gali būti montuojami variklio korpuse 4.14 pav. Taip sumontuotam enkoderiui nėra keliami aukšti apsaugos klasės reikalavimai, nes nuo nešvarumų jį apsaugo variklio korpusas. Darbinė temperatūra dažnai pasiekia 100 °C, o kartais net viršija [13].

4.3.4. Priauginiai optiniai elektroniniai enkoderiai

Priauginiai enkoderiai (angl. incremental encoder) yra optiniai elektroniniai matavimo keitikliai, kurių veleno sukimosi greičio arba kampinės padėties vertė gaunama sumuojant matavimo priaugius. Jie taip pat naudojami ir atstumui matuoti 4.15 pav. [44].



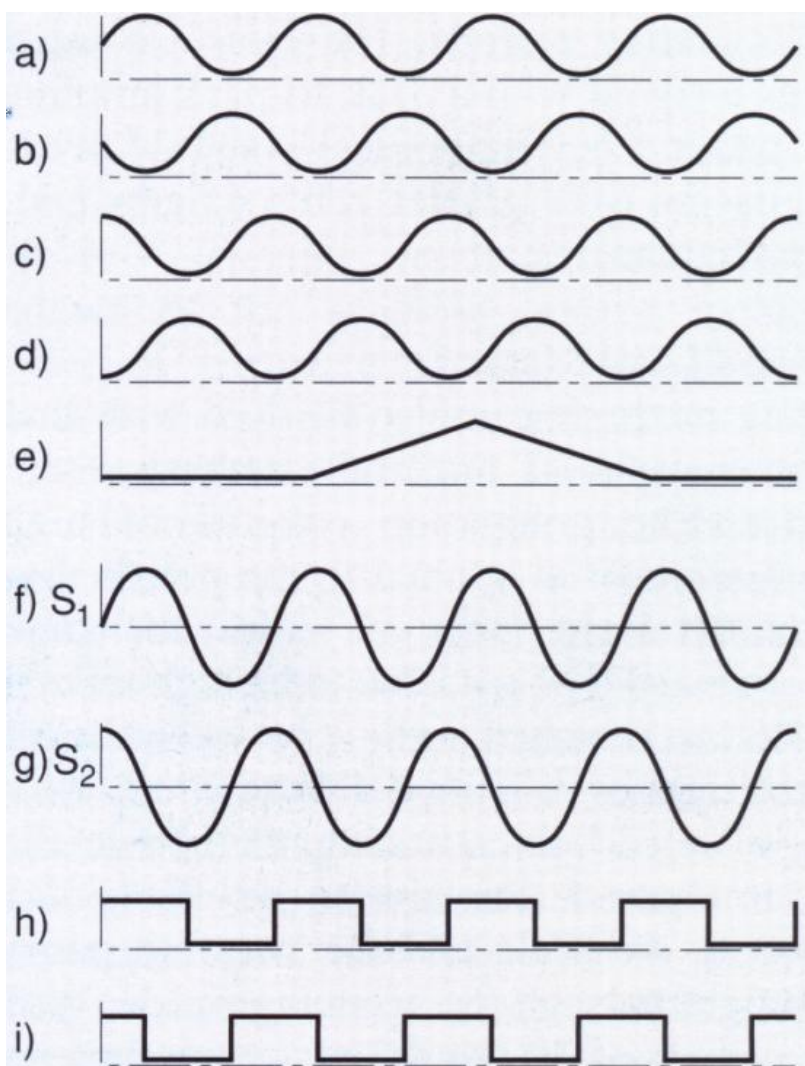
4.15 pav. Heidenhain firmos priauginio enkoderio matavimo principas (L – šviesos šaltinis, K – kondensavimo lęšis, A – kaukė, M – kodinė skalė (sukiuosiose enkoderiuose kodinis diskas), R – atskaitos žymė (angl. reference mark), P – fotojutikliai

Priauginio tipo enkoderiuose naudojamas jau ankščiau minėtas fotoelektrinis informacijos nuskaitymo metodas. Tokio enkoderio kodinį diską sudaro du takeliai, vienas skirtas matavimui (angl. incremental track), o kitame sužymėti atskaitos (angl. reference track) brūkšneliai. Kaip ankščiau minėta, brūkšneliai pažymėjimo panaudojant tikslumo technologiją, todėl gaunamų brūkšnelių briaunos yra ryškios, tai lemia takelio ir matavimo prietaiso tikslumą.

Nedideliu atstumu nuo kodinio disko yra kaukė su keturiais nuskaitymo laukais ir vienas – sinchronizavimo. Kiekvienas nuskaitymo langas skiriasi ketvirčiu gradavimo periodu (gradavimo periodas lygus $360^\circ/\text{brūkšnių}$) [44].

Visus šiuos laukus peršviečia šviesos spinduliai, kuriuos skleidžia šviesos modulis. Šviesos modulį sudaro puslaidininkinis šviesos šaltinis ir kondensavimo lęšis. Sukantis kodiniam diskui, šviesos spinduliai yra moduluojami ir jų intensyvumą matuoja šviesos jutikliai – dažniausiai fotoelementai arba fototranzistoriai [44].

Fotojutiklių (fototranzistorių) išėjime gaunami keturi matavimo signalai, kurių fazės skiriasi 90° : I_0 , I_{90} , I_{180} , I_{270} , ir vienas atskaitos signalas [13]. 4.16 pav. pateikti prieauginio enkoderio signalų pavyzdžiai.



4.16 pav. Prieauginio matavimo principas: a-d yra fotodiodų signalai, f ir g – moduluoti signalai, h ir i – skaitmeniniai signalai, e – atskaitos signalas

4.3.5. Absoliutieji optiniai elektroniniai enkoderiai

Absoliutieji enkoderiai (angl. absolute encoder) yra optiniai elektroniniai matavimo keitikliai, kuriuose veleno kampinės padėties vertė gaunama tiesioginio nuskaitymo būdu nesumuojant pavienių matavimo priaugių. Jie taip pat naudojami ir atstumui matuoti [44].

Šiuose enkoderiuose taip pat naudojamas fotoelektrinis informacijos nuskaitymas. Skirtingai nei priauginiai optiniai elektroniniai enkoderiai, kurie turi vieną matavimo takelį, absoliutieji enkoderiai 4.17 pav. turi kelis takelius su radialiais brūkšneliais. Kodiniame diske yra matavimo ir kodavimo takeliai.

Absoliutieji enkoderiai yra dviejų tipų: vienasūkliai ir daugiasūkliai.

Vienasūkliai enkoderiai (angl. single turn encoders) naudojami sistemose, kuriose matavimas vyksta vieno apsisukimo ribose. Atsižvelgiant į skilčių skaičių jie gali turėti iki 16 384 (14 bitų) pozicijų. Tai atitinka $0,022^\circ = 1,3'$ kampinę skiriamąją gebą.

Daugiasūkliai enkoderiai (angl. multiturn encoders) naudojami, kai reikia matuoti veleno kampinę padėtį ir jo apsisukimų skaičių. Gali turėti iki 8 192 (13 bitų) kampinių padėčių per vieną apsisukimą ir iki 4 096 (12 bitų) apsisukimų. Tai atitinka 33.5 milijono padėčių [44].

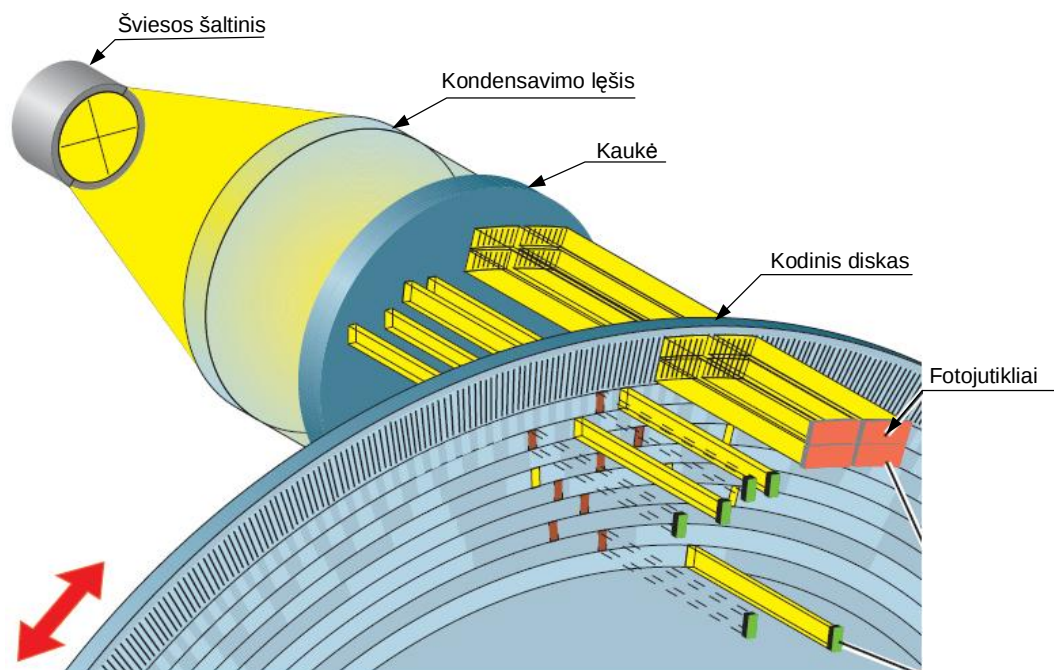
Duomenims perduoti iš enkoderio į valdiklį naudojamos įvairios sąsajos:

1. Lygiagretusis išėjimas, pasižymintis dideliu greičiu, nes kiekvienas padėties bitas perduodamas vienu metu per atskirą ryšio kanalą.

2. Sinchroninis nuoseklusis arba lygiagretusis išėjimas.

Sukiųjų keitiklių tikslumas labiausiai priklauso nuo:

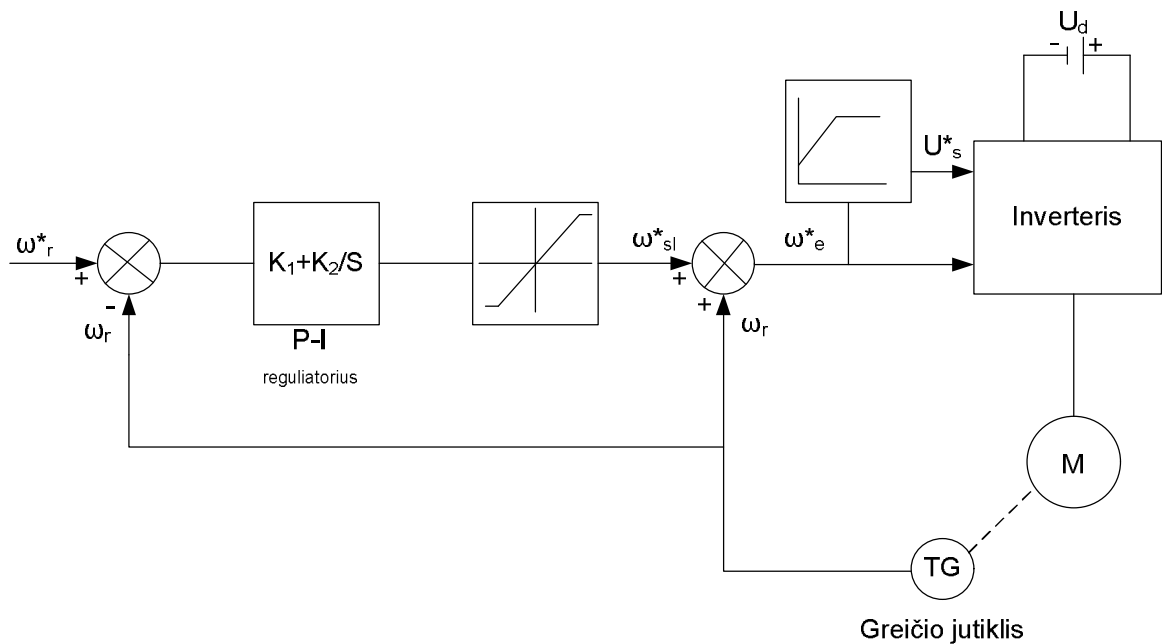
- radialiųjų brūkšnelių tolerancijos;
- disko ir guolių ekscentriškumo;
- guolių tikslumo;
- signalų apdorojimo paklaidų;
- signalų apdorojimo nuokrypių [44].



4.17 pav. Heidenhain firmos absoliučiojo enkoderio konstrukcija

4.3.6. Greičio stebikliai

Skaliarinio valdymo be greičio grįžtamo ryšio sistemos patobulinta versija yra sistema su greičio grįžtamoju ryšiu reguliuojant slydimą. Tokia sistema pateikta 4.18 paveiksle.



4.18 pav. Skaliarinio valdymo sistema su greičio grįžtamoju ryšiu ir slydimo įvertinimu

Čia greičio grįžtamojo ryšio paklaidos signalas, perėjęs proporcinį – integralinį (PI) reguliatorių ir ribotuvą suformuoja slydimo greičio signalą ω_{sl}^* . Slydimo greičio ir greičio grįžtamojo ryšio signalai yra sudedami ir tokiu būdu gaunamas statoriaus dažnis. Valdymo dažnio signalas ω_e^* taip pat sukuria V/Hz funkcinio generatoriaus įtampos valdymo signalą, kuris numato ir statoriaus žemo dažnio kompensavimą. Nuo to momento, kai slydimas tampa proporcingas sukurtam momentui, esant pastoviam srautui, schema gali būti traktuojama kaip schema be momento grįžtamojo ryšio greičio grįžtamojo ryšio viduje. Srovės grįžtamasis ryšys nenaudojamas. Palaipsniui didinant greitį, variklis laisvai įsibėga iki minimalaus slydimo, atitinkančio ribojamą statoriaus srovę ir momentą. Tada greičio nusistovėjusi vertė priklauso nuo apkrovos momento. Jei reguliuojamas greitis ω_r^* mažinamas palaipsniui, variklis pereina į generatorinį arba dinaminio stabdymo režimą ir stabdosi pastoviu neigiamu slydimo greičiu $-\omega_{sl}^*$, kaip parodyta struktūrinėje schemoje [7].

Literatūroje siūlomus asinchroninio variklio greičio apskaičiavimo metodus galima būtų suskirstyti taip:

- Slydimo apskaičiavimas.
- Tiesioginis greičio apskaičiavimas (angl. synthesis) iš būsenos lygčių.
- Modeliai prisitaikantys prie sistemų (angl. MRAS).
- Srautą sekantis greičio stebiklis (angl. Leunberger observer).
- Išplėstinis Kalmano filtras (angl. EKF).
- Griovelių harmonikos.
- Pagalbinio signalo prijungimas prie ryškiapolio rotoriaus.

Keli iš šių metodų bus aptarti.

Slydimo apskaičiavimas

Greitis gali būti apskaičiuotas iš slydimo kampinio dažnio ω_{sl} remiantis priklausomybe (4.6):

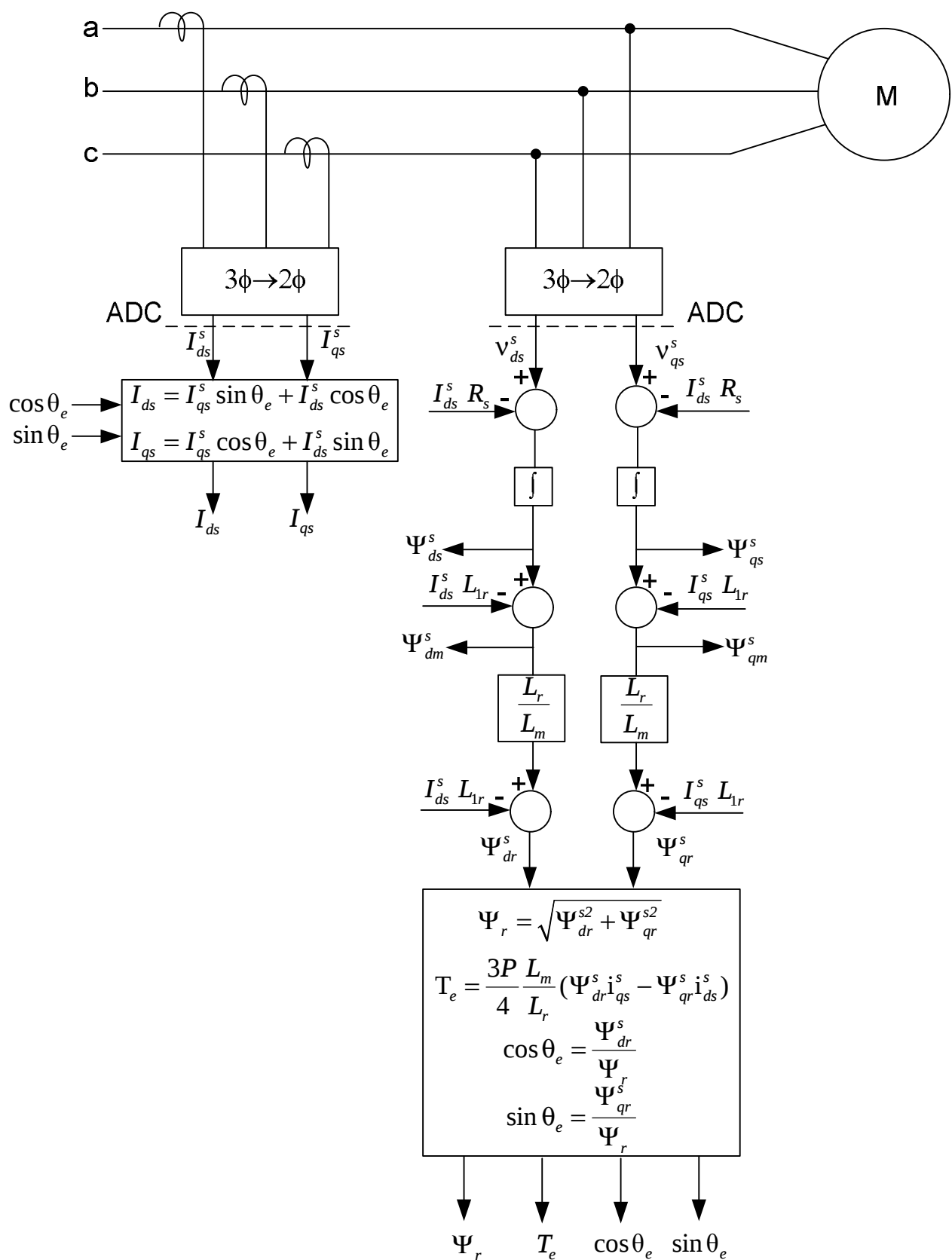
$$\omega_{sl} = \frac{(1 + \sigma T_r) L_s i_{qs}}{T_r (\Psi_{ds} - \sigma L_s i_{ds})}, \quad (4.6)$$

čia: $\sigma = \frac{1-L_m^2}{L_s L_r}$, i_{ds} , i_{qs} ir Ψ_{ds} yra parametrai atitinkantys valdymą pagal statoriaus srauto orientaciją [7]. (4.6) formulė gali būti užrašyta kintamaisiais skirtais rotorius srauto vektorinio valdymo metodui:

$$\omega_e = \frac{(v_{qs}^s - i_{qs}^s)\Psi_{ds}^s - (v_{ds}^s - i_{ds}^s)\Psi_{qs}^s}{\hat{\Psi}_s^2}. \quad (4.7)$$

čia: v_{ds}^s, v_{qs}^s – rotorius įtampos projekcija į d^s ašį, i_{ds}^s, i_{qs}^s – rotorius srovės projekcija į d^s ašį, Ψ_{ds}^s, Ψ_{qs}^s – pilnutinio rotorius srauto projekcija į d^s ašį.

Taigi greitis ω_r gali būti apskaičiuotas remiantis formulėmis (4.6) ir (4.7). Skaliariniam ir netiesioginiam vektorinio valdymo metodui signalas ω_e gali būti kaip valdymo kintamasis dydis. Taip pat šį signalą galima apskaičiuoti apdorojant signalų kreives. Didelio naudingumo koeficiento varikliams, ypač esant greičiams, artimiems sinchroniniam, apskaičiuoti kampinį slydimo dažnį yra sudėtinga, nes signalas būna silpnas ir labai priklauso nuo varikliams parametrų. Nepaisant to, taip pat yra problema su variklio įtampų integravimu 4.19 pav. esant mažiems greičiams siekiant suderinti ω_{sl} ir ω_e signalus [7].



4.19 pav. Įtampos inverterio grįžtamojo ryšio signalo apskaičiavimo struktūrinė schema

Tiesioginis greičio apskaičiavimas iš būsenos lygčių

Variklio greitį galima apskaičiuoti pasinaudojant jo judančios d^s - q^s koordinačių sistemos būsenos lygtimis. Šis metodas yra panašus į jau minėtąjį slydimo apskaičiavimo metodą. Variklio statoriaus įtampos lygtis d^s - q^s koordinačių sistemoje gali būti užrašyta taip:

$$v_{ds}^s = i_{ds}^s R_s + L_{ls} \frac{d}{dt}(i_{ds}^s) + \frac{d}{dt}(\Psi_{dm}^s). \quad (4.8)$$

Irašius $\Psi_{dr}^s = \frac{L_r}{L_m} \Psi_{dm}^s - L_{lr} i_{ds}^s$ į (4.8) gauname:

$$v_{ds}^s = \frac{L_m}{L_r} \frac{d}{dt}(\Psi_{dr}^s) + (R_s + \sigma L_s S) i_{ds}^s \quad (4.9)$$

arba

$$\frac{d}{dt}(\Psi_{dr}^s) = \frac{L_r}{L_m} (v_{ds}^s - (R_s + \sigma L_s S) i_{ds}^s), \quad (4.10)$$

čia: $\sigma = \frac{1 - L_m^2}{L_s L_r}$.

Panašiai išreiškiame ir Ψ_{qr}^s :

$$\frac{d}{dt}(\Psi_{qr}^s) = \frac{L_r}{L_m} v_{qs}^s - \frac{L_r}{L_m} (R_s + \sigma L_s S) i_{qs}^s. \quad (4.11)$$

Rotoriaus srauto išraiškos d^s - d^q koordinačių sistemoje gali būti užrašomos taip:

$$\frac{d}{dt}(\psi_{dr}^s) = \frac{L_m}{T_r} i_{ds}^s - \omega_r \psi_{qr}^s - \frac{1}{T_r} \psi_{dr}^s, \quad (4.12)$$

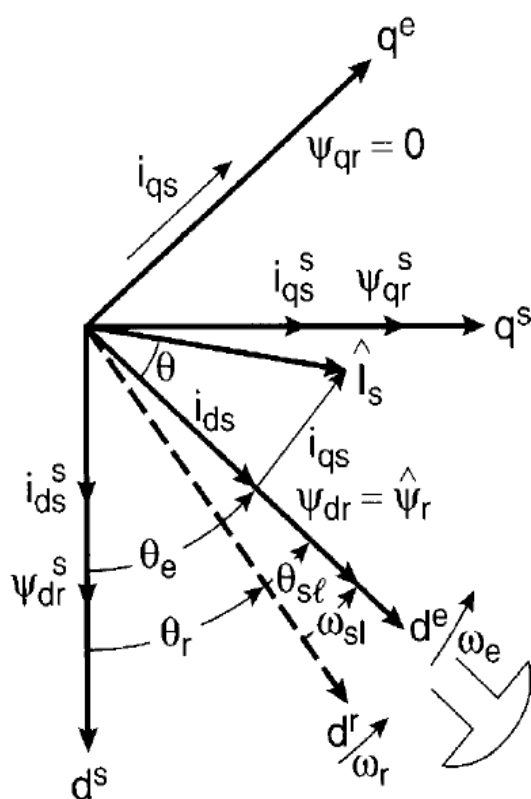
$$\frac{d}{dt}(\psi_{qr}^s) = \frac{L_m}{T_r} i_{qs}^s - \omega_r \psi_{dr}^s - \frac{1}{T_r} \psi_{qr}^s. \quad (4.13)$$

Iš netiesioginio vektorinio valdymo vektorinės diagramos 4.20 pav. galima užrašyti tokią kampo priklausomybę:

$$\theta_e = \tan^{-1} \frac{\Psi_{qr}^s}{\Psi_{dr}^s}. \quad (4.14)$$

Išdiferencijavę (4.14) lygtį gauname:

$$\frac{d\theta_e}{dt} = \frac{\Psi_{dr}^s \dot{\Psi}_{qr}^s - \Psi_{qr}^s \dot{\Psi}_{dr}^s}{\hat{\Psi}_r^2}. \quad (4.15)$$



4.20 pav. Netiesioginio vektorinio valdymo vektorine diagrama

Suprastinę išraišką ir įrašę kintamuosius, gaunamas toks greičio stebiklio matematinis modelis:

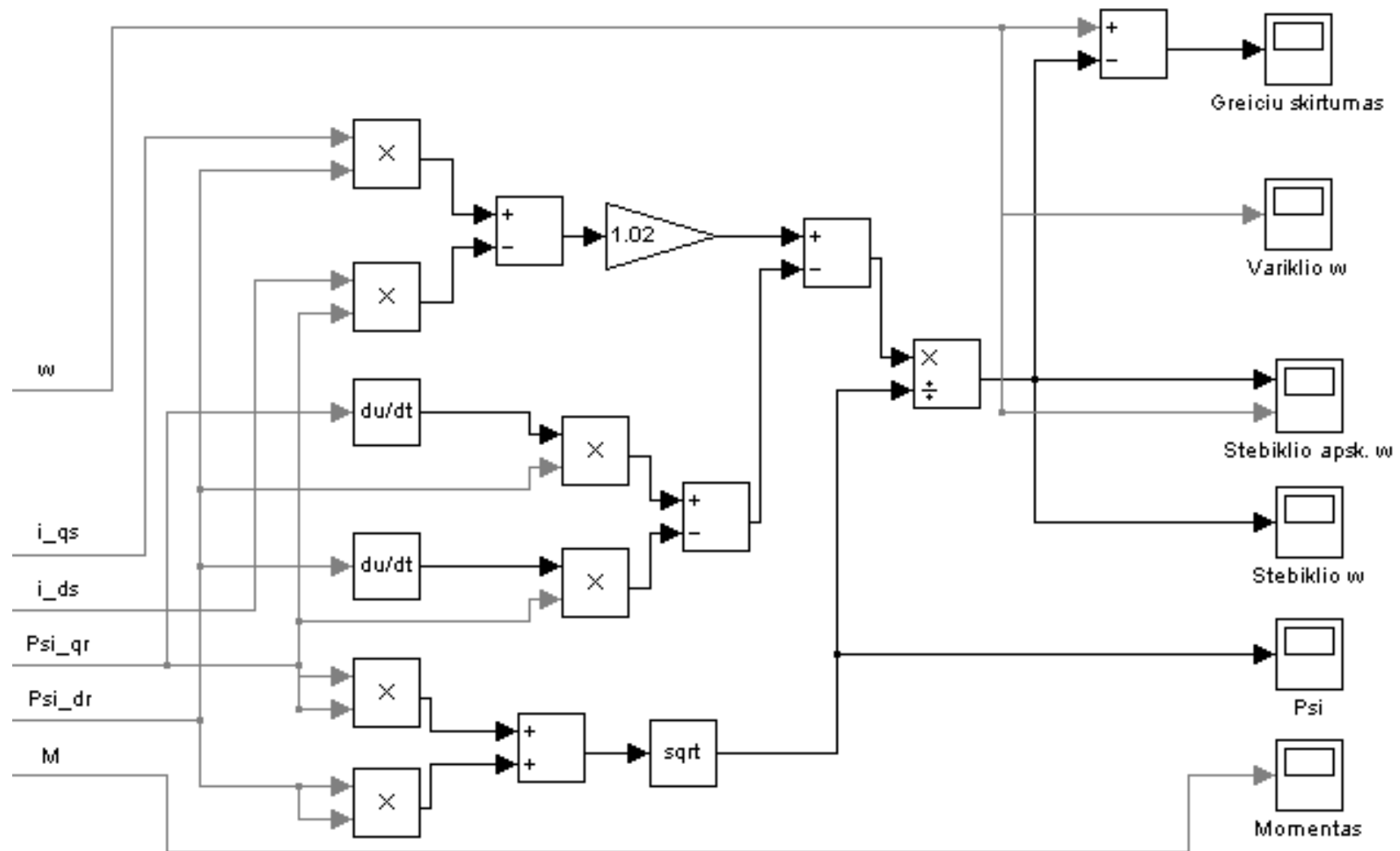
$$\omega_r = \frac{1}{\hat{\Psi}_r^2} [(\Psi_{dr}^s \Psi_{qr}^s - \Psi_{qr}^s \Psi_{dr}^s) - \frac{L_m}{T_r} (\Psi_{dr}^s i_{qs}^s - \Psi_{qr}^s i_{ds}^s)]. \quad (4.16)$$

Pagal (4.16) sudarytas kompiuterinis modelis pateiktas 4.21 paveiksle.

Pagal jį, išmatavus variklio srovės ir atlikus jų transformaciją, bei apskaičiavus srautus stacionarioje koordinačių sistemoje, galima apskaičiuoti variklio greitį.

Transformuotos variklio srovės ir srautai gali būti tiesiai paimti iš kompiuterinio variklio modelio, sudaryto stacionarioje koordinačių sistemoje.

Stebiklio imitacijos rezultatai pateikti 5.26-5.39 pav. ir 2-26 pav. 2 priede.



4.21 pav. Greičio stebiklis

4.22 paveiksle pavaizduoto greičio stebiklio projektavimui reikalingas elektrinius pereinamuosius procesus galima išreikšti naudojant kintamuosius tik sroves ir įtampas matricos forma:

$$\begin{pmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \\ u_{dr} \\ u_{qr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s + pL_s & 0 & pL_m & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 & pL_m \\ pL_m & \omega_r L_m & R_r + pL_r & \omega_r L_m \\ -\omega_r L_m & pL_m & -\omega_r L_m & R_r + pL_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{pmatrix}, \quad (4.17)$$

čia: $p = \frac{d}{dt}$.

Perrašome lygtis į standartinę formą:

$$\begin{aligned} u_{ds}^s &= (R_s + pL_s)i_{ds} + pL_m i_{dr}; \\ u_{qs}^s &= (R_s + pL_s)i_{qs} + pL_m i_{qr}; \\ u_{dr}^s &= pL_m i_{ds} + \omega_r L_m i_{qs} + (R_r + pL_r)i_{dr} + \omega_r L_r i_{qr}; \\ u_{qr}^s &= -\omega_r L_m i_{ds} + pL_m i_{qs} - \omega_r L_m i_{dr} + (R_r + pL_r)i_{qr}. \end{aligned} \quad (4.18)$$

Pagrindinė pavaros judesio lygtis siejanti variklio greitį su variklio momentu užrašoma taip:

$$M_e - M_s = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (4.19)$$

čia: J – redukuotasis inercijos momentas, M_e – variklio elektromagnetinis momentas, M_s – statinis apkrovos momentas.

Variklio sukuriamas elektromagnetinis momentas apskaičiuojamas kaip srauto ir srovės vektorių vektorinė sandauga [40]:

$$M_e = \frac{3}{2} p(\bar{\Psi}_m \bar{i}_r). \quad (4.20)$$

Ši sandauga $d^e - q^e$ koordinačių sistemoje, išreikšta srovių projekcijomis, atrodo taip:

$$M_e = \frac{3}{2} pL_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}). \quad (4.21)$$

Lygtys (4.17)-(4.19) ir (4.21) sudaro dinaminį elektromechaninių procesų variklyje modelį. Šios lygtis rodo, kad variklis yra penktosios eilės netiesinė sistema. Tokios lygčių sistemos išspręsti analitiškai negalima, todėl joms spręsti taikomi skaitiniai metodai ir sudaromi kompiuteriniai modeliai [41].

Variklio kampinį greitį apskaičiuojame taip:

$$\omega = \frac{1}{J} \int M_e dt. \quad (4.22)$$

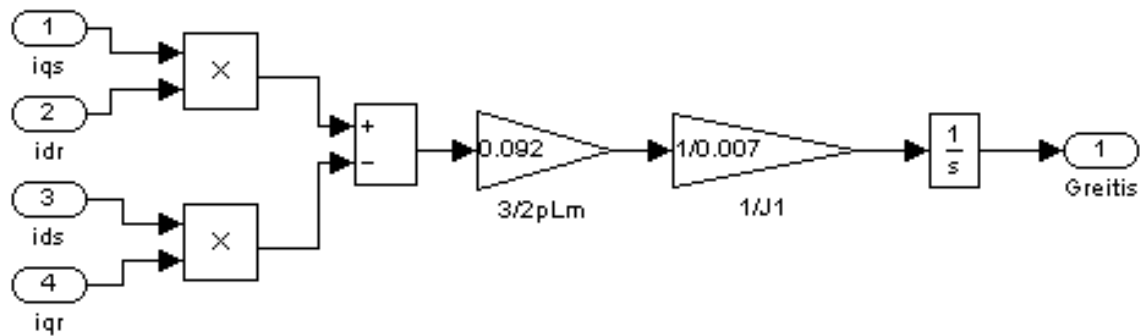
(4.22) lygtį perrašome:

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J} \frac{1}{s} M_e. \quad (4.23)$$

I (4.23) įstatę (4.21) lygtį gauname greičio stebiklio matematinį modelį:

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J} \frac{1}{s} \left(\frac{3}{2} p L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \right). \quad (4.24)$$

Pagal (4.24) lygtį sudarytas greičio stebiklio modelis pateiktas į sudarytas greičio stebiklio modelis pateiktas 4.22 pav.

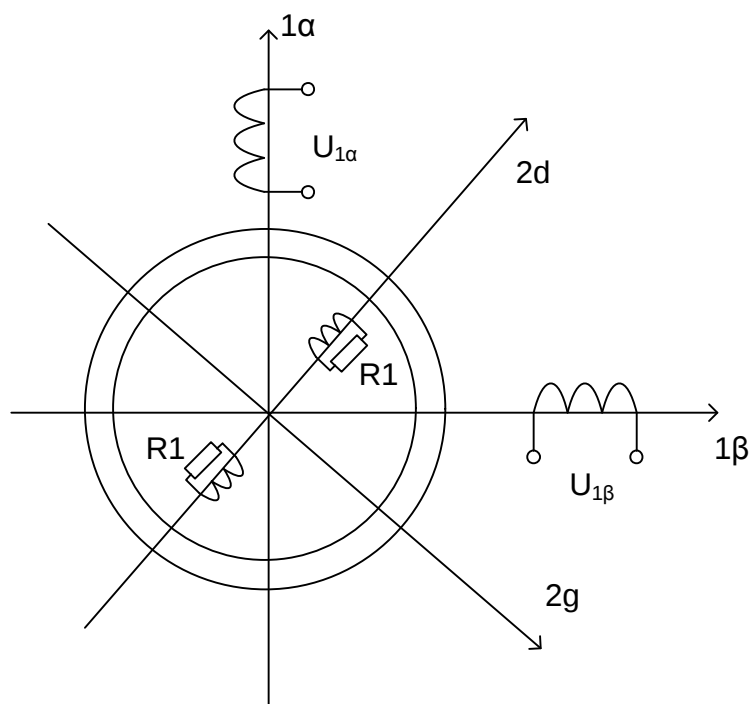


4.22 pav. Greičio stebiklis

5. SKALIARINIŲ BŪDŲ VALDOMOS PAVAROS IMITACIJOS REZULTATAI

5.1. Asinchroninio variklio modelio sudarymas

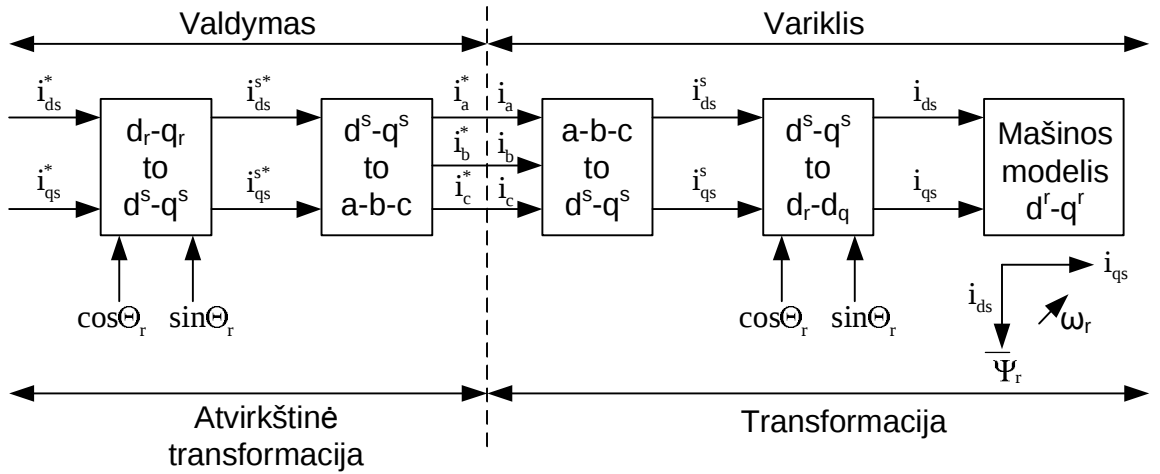
Dėl paprastos konstrukcijos asinchroniniai varikliai yra plačiai paplitę ir naudojami pramoniniuose įrenginiuose. Trifazį asinchroninį variklį atitinkantis dvifazis modelis pavaizduotas 5.1 paveiksle [48].



5.1 pav. Dvifazio asinchroninio variklio modelis

Kompiuterinis modeliavimas yra plačiai taikomas įvairiuose mokslo šakose. Kompiuterinis modeliavimas galios elektronikoje ir valdymo sistemų projektavime turi tokius privalumus, kaip grandinių išdėstymo patikrinimas, valdymo algoritmų tobulinimas, naudingumo ir eksploataavimo savybių tyrimas nenaudojant pačių įrengimų, o tik jų kompiuterinius modelius. Taigi, kol sukuriamas pats agregatas, toks kompiuterinis simulatorius padeda sutaupyti daug lėšų. Vektorinio valdymo algoritmai yra plačiai naudojami aukšto lygio pavarose siekiant tikslesnio ir jautresnio greičio reguliavimo, o taip pat norint užtikrinti aukštą naudingumo koeficientą pereinamųjų procesų metu [7, 31]. Vektorinio valdymo pavaroms esančioms pramoniniuose įrenginiuose dažnai keliamas reikalavimas yra galimybė veikti esant greičiams artimiems 0, kartu įskaitant ir paleidimo tašką. Taigi, pateikiamas asinchroninio variklio pavaros modelis yra suprojektuotas mažų greičių sričiai, kur rotorius srauto dedamosios galėtų būti lengviau suderinamos su greičio ir srovės signalais.

Asinchroninio variklio dinaminės charakteristikas yra sudėtinga atvaizduoti, nes yra sudėtingas trifazių rotorius apvijų judėjimas trifazių statoriaus apvijų atžvilgiu. Diferencialinių lygčių koeficientai keičiasi harmoniniu dėsniu kintant rotorius padėčiai q_r . Siekiant supaprastinti problemos sprendimą, bet kurį trifazį asinchroninį variklį galima atvaizduoti jam ekvivalentiniu dvifaziu varikliu, kur $d^s - q^s$ yra statoriaus ašis, o $d^r - q^r$ rotorius ašis.



5.2 pav. Trifazės sistemos keitimas į dvifazę sistemą

Kaip matome, problema supaprastėja, tačiau laike kintančių parametru problema vis dar išlieka. Parko transformacija transformuoja statoriaus kintamuosius į sinchroniniu greičiu besisukančią rotorius koordinačių sistemą. To rezultatas – laike kintančių induktyvumų įvertinimas. Kitas plačiai naudojamas transformacijos metodas yra G. Krono transformacija, ji susieja statoriaus ir rotorius kintamuosius į sinchroniškai besisukančią sistemą, kuri juda kartu su sukamuoju magnetiniu lauku. Laike kintantys induktyvumai iš asinchroninės mašinos formulių gali būti pašalinti transformuojant rotorius kintamuosius į nejudančių apvijų menamus kintamuosius. Šiuo atveju, rotorius kintamieji yra transformuojami į nejudančią statoriaus koordinačių sistemą. Šį metodą pasiūlė H. S. Stanley [31].

Asinchroninio variklio matematinis modelis nejudančioje $d^s - q^s$ koordinačių sistemoje pateiktas 5.1 formulėje [42].

Matematiškai, nejudančioje $d^s - q^s$ koordinačių sistemoje, variklio matematinį modelį aprašo lygtys:

$$\begin{cases} u_{ds}^s = i_{ds}^s R_s + \frac{d\Psi_{ds}^s}{dt}; \\ u_{qs}^s = i_{qs}^s R_s + \frac{d\Psi_{qs}^s}{dt}; \\ u_{ds}^r = i_{ds}^r R_r + \frac{d\Psi_{ds}^r}{dt} + \omega \Psi_{qs}^r; \\ u_{qs}^r = i_{qs}^r R_r + \frac{d\Psi_{qs}^r}{dt} - \omega \Psi_{ds}^r, \end{cases} \quad (5.1)$$

čia $\Psi_{ds}^s, \Psi_{qs}^s, \Psi_{ds}^r, \Psi_{qs}^r, i_{ds}^s, i_{qs}^s, i_{ds}^r, i_{qs}^r$ – statoriaus ir rotorius surišųjų srautų projekcijos ir srovių projekcijos į d^s, q^s ašis; R_s ir R_r – statoriaus ir redukuotoji rotorius aktyviosios varžos; $u_{ds}^s, u_{qs}^s, u_{ds}^r, u_{qs}^r$ – statoriaus ir rotorius įtampos. Nejudančioje koordinatinių sistemoje $u_{ds}^s = U_{l\max} \cos \omega_0 t$ ir $u_{qs}^s = U_{l\max} \sin \omega_0 t$, o $\omega_0 = 2\pi f$ – kampinis įtampos dažnis.

Modeliui sudaryti srovės reikia išreikšti srautais. Kadangi

$$i_{ds}^r = \frac{1}{L_2''} (\Psi_{ds}^r - k_1 \Psi_{ds}^s) \quad (5.2)$$

ir

$$i_{qs}^r = \frac{1}{L_2''} (\Psi_{qs}^r - k_1 \Psi_{qs}^s), \quad (5.3)$$

tai į lygtis

$$\Psi_{ds}^s = i_{ds}^s L_l + i_{ds}^r L_m \quad (5.4)$$

ir

$$\Psi_{qs}^s = i_{qs}^s L_l + i_{qs}^r L_m \quad (5.5)$$

įrašę (5.2) ir (3.3) lygtis, išreiškiame srovės i_{ds}^s ir i_{qs}^s :

$$i_{ds}^s = \left(\frac{1}{L_1} + \frac{L_m k_1}{L_1 L_2''} \right) \Psi_{ds}^s - \frac{L_m}{L_1 L_2''} \Psi_{ds}^r, \quad (5.6)$$

$$i_{qs}^s = \left(\frac{1}{L_1} + \frac{L_m k_1}{L_1 L_2''} \right) \Psi_{qs}^s - \frac{L_m}{L_1 L_2''} \Psi_{qs}^r, \quad (5.7)$$

čia: $k_1 = \frac{L_m}{L_1}, k_1 = \frac{L_m}{L_1}, L_2'' = L_{ls} + L_{lr} = L_2' - \frac{L_m^2}{L_1}$.

Lygtyse vartojami žymenys $L_1 = L_{ls} + L_m$ ir $L_2' = L_{lr} + L_m, L_2' = L_r$ – pilnutiniai ekvivalentiniai statoriaus bei rotorius fazių induktyvumai, susidedantys iš sklaidos induktyvumų L_{ls} bei L_{lr} ir įmagnetinimo induktyvumo $L_m = \frac{3}{2} L_{12}$, čia L_{12} – didžiausias induktyvumas tarp bet kurios statoriaus ir, bet kurios rotorius apvijos, kai jų ašys sutampa.

Variklio parametrai apskaičiuojami pagal katalogų arba eksperimentais gautas atstojamosios schemos varžų vertes taip:

$$\begin{aligned}
L_s &= (x_s + x_m) / \omega_e; \\
L_r &= (x_r + x_m) / \omega_e, \\
L_{12} &= x_m / \omega_e,
\end{aligned}
\tag{5.8}$$

čia: x_s – statoriaus sklaidos varža, x_r – rotoriaus sklaidos varža, x_m – įmagnetinimo kontūro induktyvioji varža, ω_e – maitinimo įtampos dažnis.

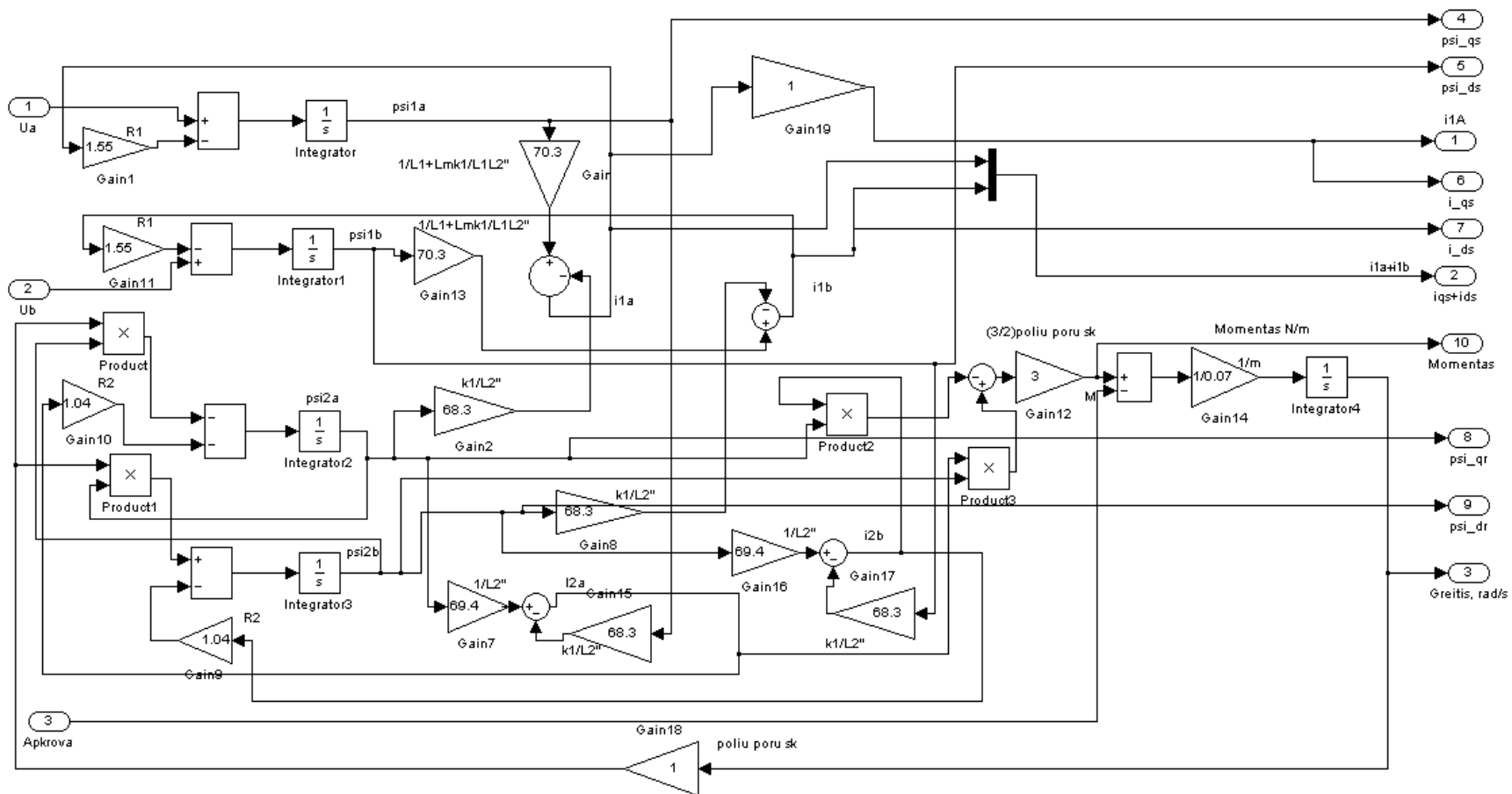
Taikant (5.1), (5.3), (5.4), (5.7), (5.8) sudarytas asinchroninio variklio matematinis modelis nejudančioje koordinačių sistemoje $d^s - q^s$:

$$\begin{aligned}
u_{ds}^s &= \left[\left(\frac{1}{L_s} + \frac{L_m k_1}{L_s L_r} \right) \Psi_{ds}^s - \frac{L_m}{L_s L_r} \Psi_{ds}^r \right] R_s + \frac{d\Psi_{ds}^s}{dt}; \\
u_{qs}^s &= \left[\left(\frac{1}{L_s} + \frac{L_m k_1}{L_s L_r} \right) \Psi_{qs}^s - \frac{L_m}{L_s L_r} \Psi_{qs}^r \right] R_s + \frac{d\Psi_{qs}^s}{dt}; \\
u_{ds}^r &= \left[\frac{1}{L_r} (\Psi_{ds}^r - k_1 \Psi_{ds}^s) \right] R_r + \frac{d\Psi_{ds}^r}{dt} + \omega_r \Psi_{qs}^s; \\
u_{qs}^r &= \left[\frac{1}{L_r} (\Psi_{qs}^r - k_1 \Psi_{qs}^s) \right] R_r + \frac{d\Psi_{qs}^r}{dt} - \omega_r \Psi_{ds}^s.
\end{aligned}
\tag{5.9}$$

Sukiojo asinchroninio variklio momentas randamas pagal (5.10) lygtį:

$$M = \frac{3}{2} p (\Psi_{ds}^s i_{ds}^s - \Psi_{qs}^s i_{qs}^s).
\tag{5.10}$$

Pagal gautas lygtis sudaromas pavaros modelis pateiktas 5.3 pav.



5.3 pav. 4 kW asinchroninio variklio matematinis modelis Matlab/Simulink aplinkoje

5.1 lentelė. Asinchroninio variklio parametrai

Parametras	Vienetai	Reikšmė
U	[V]	380
I	[A]	7,79
P	[kW]	4
n	aps./min	2890
R _s	[Ω]	1,55
R _r	[Ω]	1,04
L _s	[mH]	5,2
L _r	[mH]	9,3
L _m	[mH]	317
M _{vard.}	N·m	13,2
J	kg·m ²	0,007
ω	rad/s	314
η	%	84
cosφ	-	0,88
p	-	1

Pagrindiniai variklio modelio parametrai apskaičiuojami taip:

Įmagnetinimo grandinės induktyvumas:

$$L_m = \frac{x_\mu}{2\pi \cdot f} = \frac{99,5}{314} = 317 \text{ mH.} \quad (5.11)$$

Pilnutinis statoriaus induktyvumas:

$$L_1 = L_m + L_s = 317 + 5,2 = 322,2 \text{ mH.} \quad (5.12)$$

Pilnutinis rotoriaus grandinės redukuotasis induktyvumas:

$$L_2' = L_m + L_r = 317 + 9,3 = 326,3 \text{ mH.} \quad (5.13)$$

Pilnutinis variklio sklaidos induktyvumas:

$$L_2'' = L_s + L_r = 5,2 + 9,3 = 14,5 \text{ mH} \quad (5.14)$$

arba

$$L_2'' = L_2' - \frac{L_m^2}{L_1} = 326,3 - \frac{317^2}{322,2} = 14,4 \text{ mH.} \quad (5.15)$$

Modelio koeficientai skaičiuojami pagal formules:

$$\frac{1}{L_1} + \frac{L_m k_1}{L_1 L_2''} = \frac{1 \cdot 10^3}{322,2} + \frac{317 \cdot 0,984 \cdot 10^3}{322,2 \cdot 14,4} = 70,3; \quad (5.16)$$

$$k_1 = \frac{L_m}{L_1} = \frac{317}{322,2} = 0,984; \quad (5.17)$$

$$\frac{1}{L_2''} = \frac{1}{14,4 \times 10^{-3}} = 69,4; \quad (5.18)$$

$$\frac{L_m}{L_1 \cdot L_2''} = \frac{317}{322,2 \cdot 14,4 \cdot 10^{-3}} = 68,3; \quad (5.19)$$

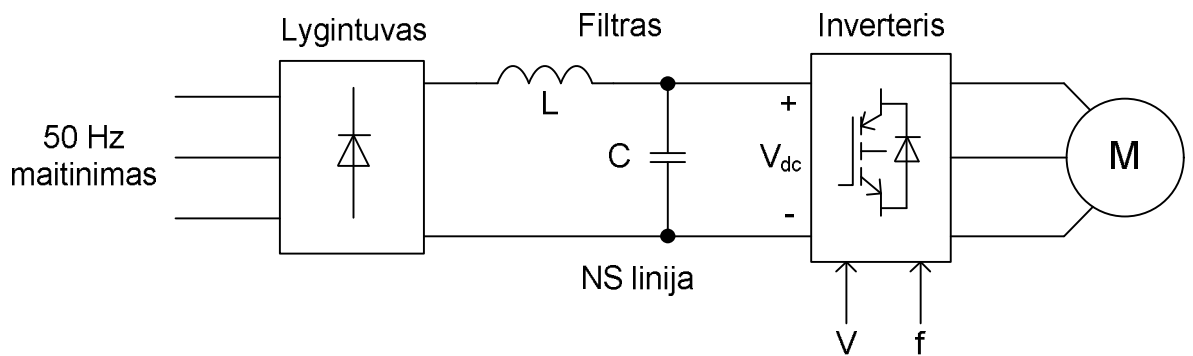
$$\frac{k_1}{L_2''} = \frac{0,984}{14,4 \times 10^{-3}} = 68,3; \quad (5.20)$$

$$M_N = \frac{P}{\omega} = \frac{4000}{314} = 12,7 \text{ N} \cdot \text{m.} \quad (5.21)$$

Apskaičiavus modelio koeficientus, rezultatai suvedami į asinchroninio variklio modelį Simulink programoje, kuris pateiktas 5.3 paveiksle.

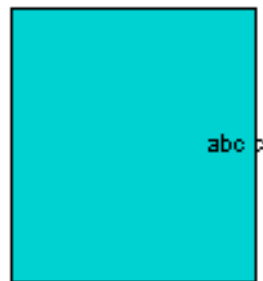
5.2. Skaliarinio valdymo dažninės pavaros modelis ir imitacijos rezultatai

Matlab programinio paketo aplinkoje sudaromas dažninės pavaros modelis, kuriame realizuotas skaliarinis valdymo metodas. Kaip buvo minėta anksčiau, šis valdymo metodas dėl jo labai paprasto realizavimo dažnai naudojamas kintamosios srovės variklio valdymui, kur nereikalaujama tikslaus greičio palaikymo. Šiuo metodu valdomieji kintamieji yra: dažnis ir įtampa. Sudaromas atvirosios sistemos supaprastintas modelis be greičio grįžtamojo ryšio ir be įtampos/dažnio pastovaus santykio palaikymo. Tokio modelio struktūrinė schema pateikta 5.4 paveiksle.



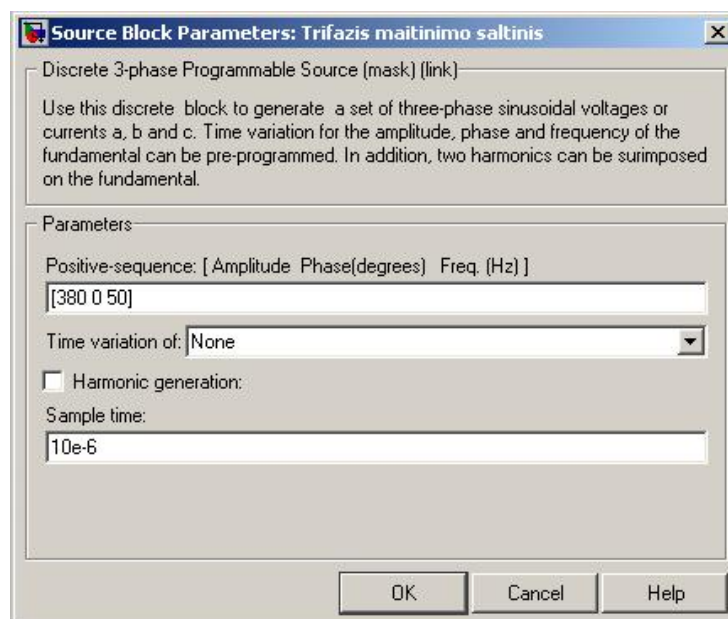
5.4 pav. Supaprastintas dažninės pavaros modelis

Sistemos maitinimui pasirenkamas trifazis įtampos šaltinis:



5.5 pav. Trifazis maitinimo šaltinis

Maitinimo bloko programiniame lange, kuris pateiktas 5.6 paveiksle, nustatoma maitinimo įtampa – 380 V ir maitinimo tinklo dažnis – 50 Hz]:

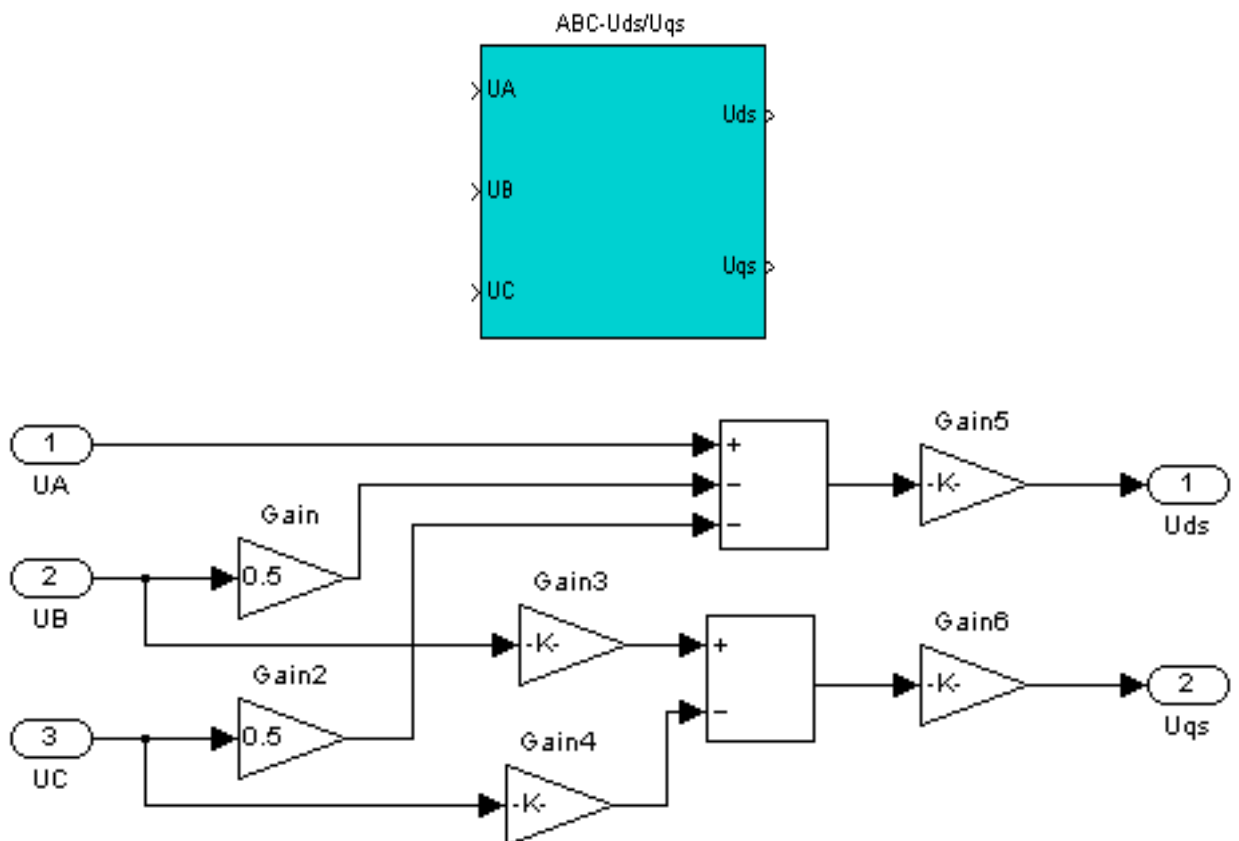


5.6 pav. Maitinimo šaltinio programinis langas

Trifazio maitinimo bloko išėjime „abc“ išduodama trifazė įtampa. Mūsų pasirinktą AV modelį tiesiogiai įjungti nepavyks, todėl būtinas papildomas koordinačių pakeitimo blokas. Šis blokas turi formuoti įtamos vektorių $d^s - q^s$ koordinačių sistemoje pagal išmatuotas trijų fazių įtampų U_A , U_B , U_C reikšmes. Pasinaudojus tiesiogine Clarko transformacija, t.y. sutapatinus $d^s - q^s$ koordinačių sistemos realiąją ašį d^s su A fazės įtamos dedamąja [15], galima užrašyti tokias trifazės įtamos transformacijos į dvifazę įtamos sistemą išraiškas:

$$\begin{cases} u_{ds} = \frac{2}{3} \left(u_A - \frac{1}{2} \cdot u_B - \frac{1}{2} \cdot u_C \right), \\ u_{qs} = \frac{2}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot u_B - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot u_C \right). \end{cases} \quad (5.22)$$

Pagal šias lygtis sudaromas koordinačių transformacijos blokas, kurio struktūrinė schema pateikta 5.7 paveiksle.



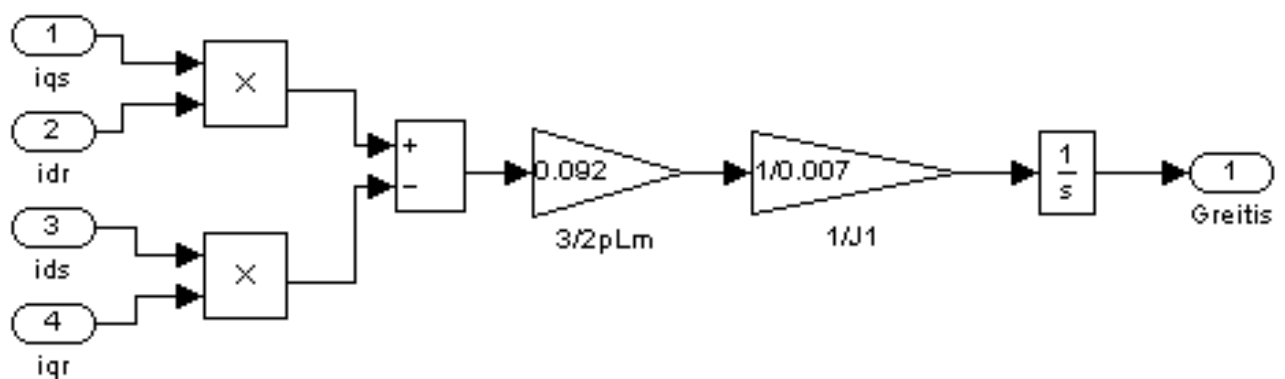
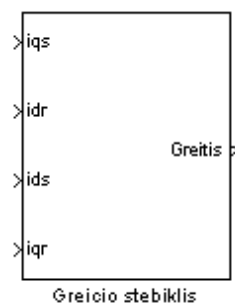
5.7 pav. Trifazės įtamos sistemos keitimo į dvifazę struktūrinė bloko (viršuje) ir principinė (apačioje) schemas

Sudaromas asinchroninio variklio modelio (5.3 pav.) blokas, kuris turi tris įėjimus: U_{ds} , U_{qs} įtampų ir apkrovos momento. Sujungus kiekvieną iš šešių išėjimų su oscilografo blokais, galima stebėti srovės, galios ir greičio pereinamuosius procesus. Bloko struktūrinė schema pavaizduota 5.8 paveiksle.



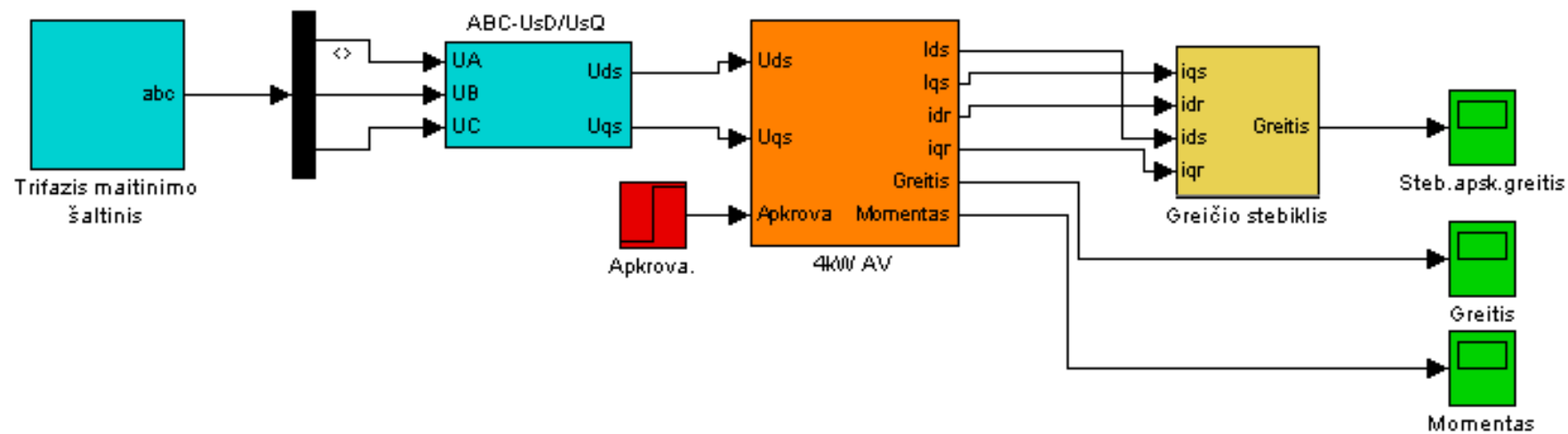
5.8 pav. AV modelio programinis blokas

Variklio greičiui apskaičiuoti suprojektuoto greičio stebiklio bloko struktūrinė ir principinė schemos pateiktos 5.9 paveiksle.



5.9 pav. Struktūrinė stebiklio bloko (viršuje) ir principinė (apačioje) schemos

Iš išvardintų blokų ir papildomai panaudojant matavimo blokus, sudaromas pavaros modelis, kuris pavaizduotas 5.10 pav.



5.10 pav. Skaliarinio valdymo dažninės pavaros kompiuterinis modelis

5.11-5.22 pav. parodyti 4 kW asinchroninio variklio, jo parametrai pateikti 5.1 lentelėje, imitacijos rezultatai. Bandymai atlikti imituojant skaliarinio valdymo principą, todėl buvo išlaikomas pastovus V/Hz santykis, proporcingai keičiant įtampą bei dažnį. 5.11-5.14 pav. pateikti variklio greičio pereinamieji procesai, kai variklis dirba neapkrautas, t.y. $M=0 \text{ N}\cdot\text{m}$. Iš pateiktų grafikų matome, kad variklis puikiai pasileidžia esant tiek mažiems, tiek dideliems dažniams. Paleidimo trukmė $\sim 1,5 \text{ s}$ esant mažiems dažniams ir $\sim 0,35 \text{ s}$ esant dideliems dažniams. Perreguliavimo praktiškai nėra, o švytavimai nedideli.

5.15-5.18 pav. pateikti variklio greičio pereinamieji procesai, kai variklis apkrautas. Apkrova įjungiamą varikliui pasileidus. Mažų dažnių diapazone aiškiai matomas apkrovos įjungimo momentas, o didelių dažnių diapazone jis ne toks pastebimas.

5.19-5.22 pav. pateikti variklio momento pereinamieji procesai. Grafikuose aiškiai matyti apkrovos įjungimo momentas. Pasibaigus pereinamajam procesui variklis stabiliai dirba su užduotąja apkrova.

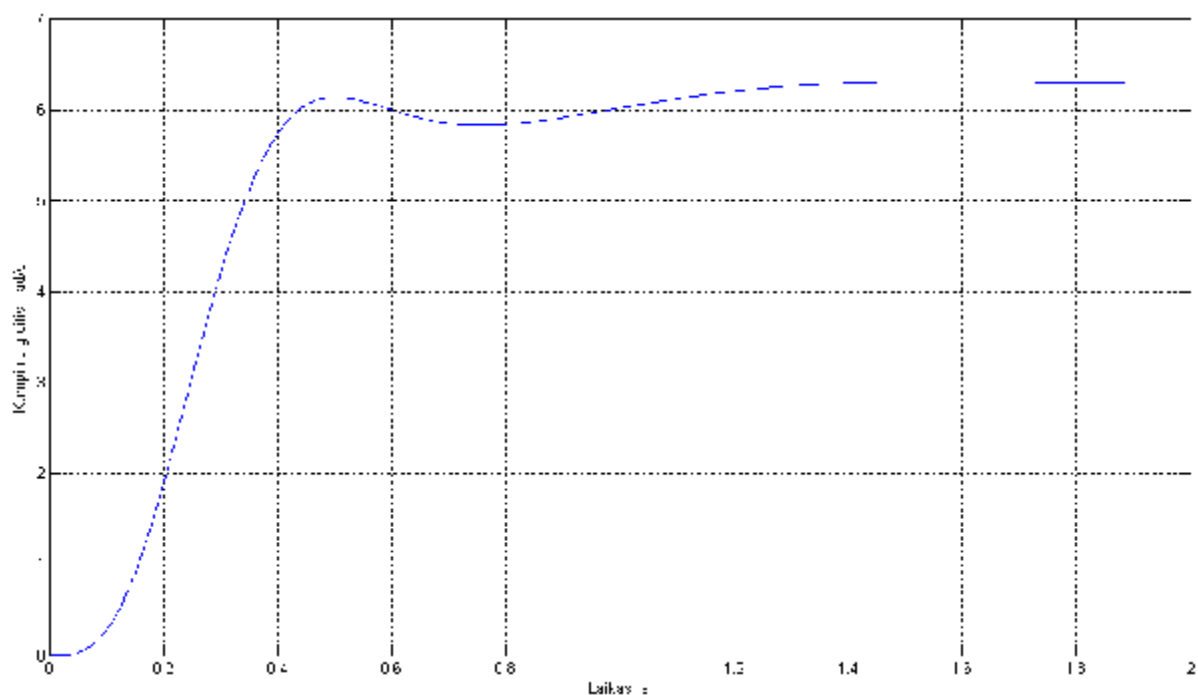
2 priede pateikti realaus 4 kW variklio bandymo rezultatai 2-26 pav.. 1 pav. pavaizduotas bandymų stendas su tiriamuoju varikliu.

Bandymo metu buvo tiriamas asinchroninio variklio elektromagnetinis paleidimo momentas. Paleidimo metu programa Drive Monitore pasirinkome parametą r0080 – faktinis paleidimo momentas. Nustatėme dažnį lygų 50 Hz. Kiekvienas bandymas buvo atliekamas esant skirtingai apkrovai. Naudojome skaliarinio valdymo metodą.

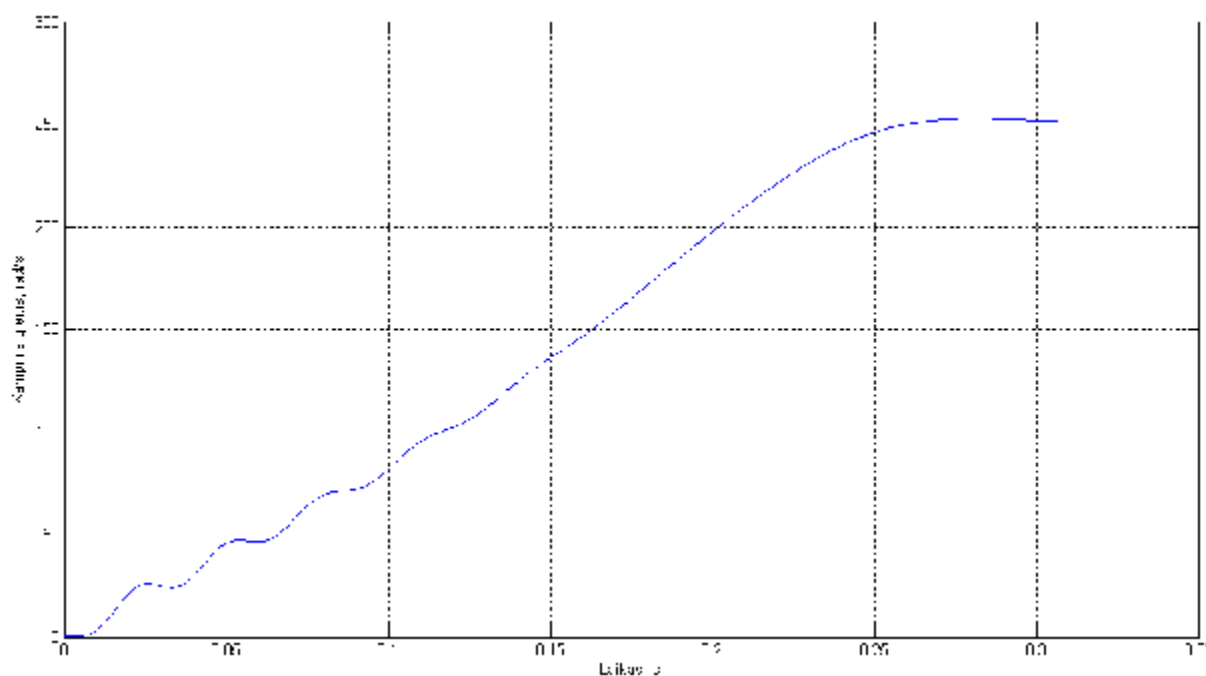
Eksperimentinių grafikų laiko ašyse viena stambi padala atitinka 0,1 s, o 1 V lygus $3,7 \text{ N}\cdot\text{m}$.

Eksperimentiniai pavaros tyrimai rodo, kad esant 30 Hz maitinimo dažniui, realiai išmatuotas greitis yra 183 rad/s. Greičio stebikliu apskaičiuota greičio vertė yra 188 rad/s, 3 priedas 5 pav., stebiklio paklaida – 2,7 %.

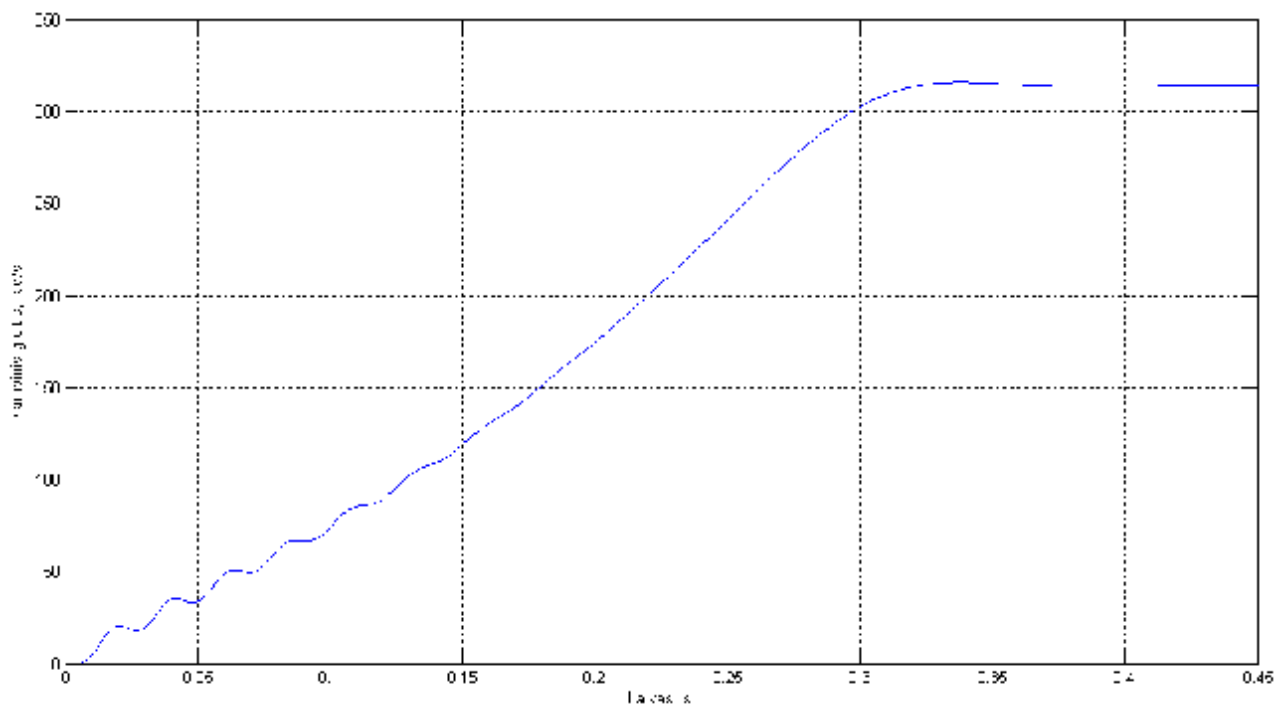
Skaliarinio valdymo pavaros imitacijos rezultatai, kai apkrova 0 N·m, esant skirtingiems dažniams pateikti 5.11-5.22 pav. ir 2 priede.



5.11 pav. Variklio greičio pereinamasis procesas, kai $U=7,6$ V, kai $f=1$ Hz

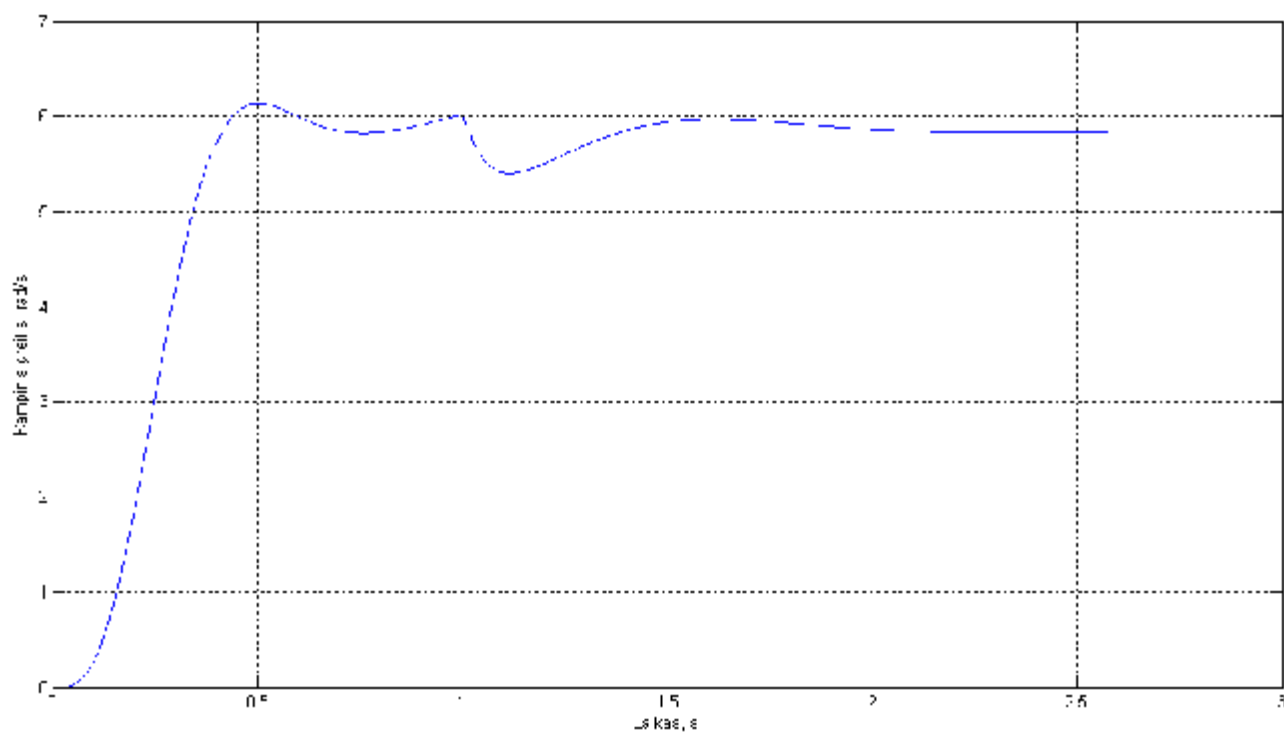


5.13 pav. Variklio greičio pereinamasis procesas, kai $U=304$ V, $f=40$ Hz

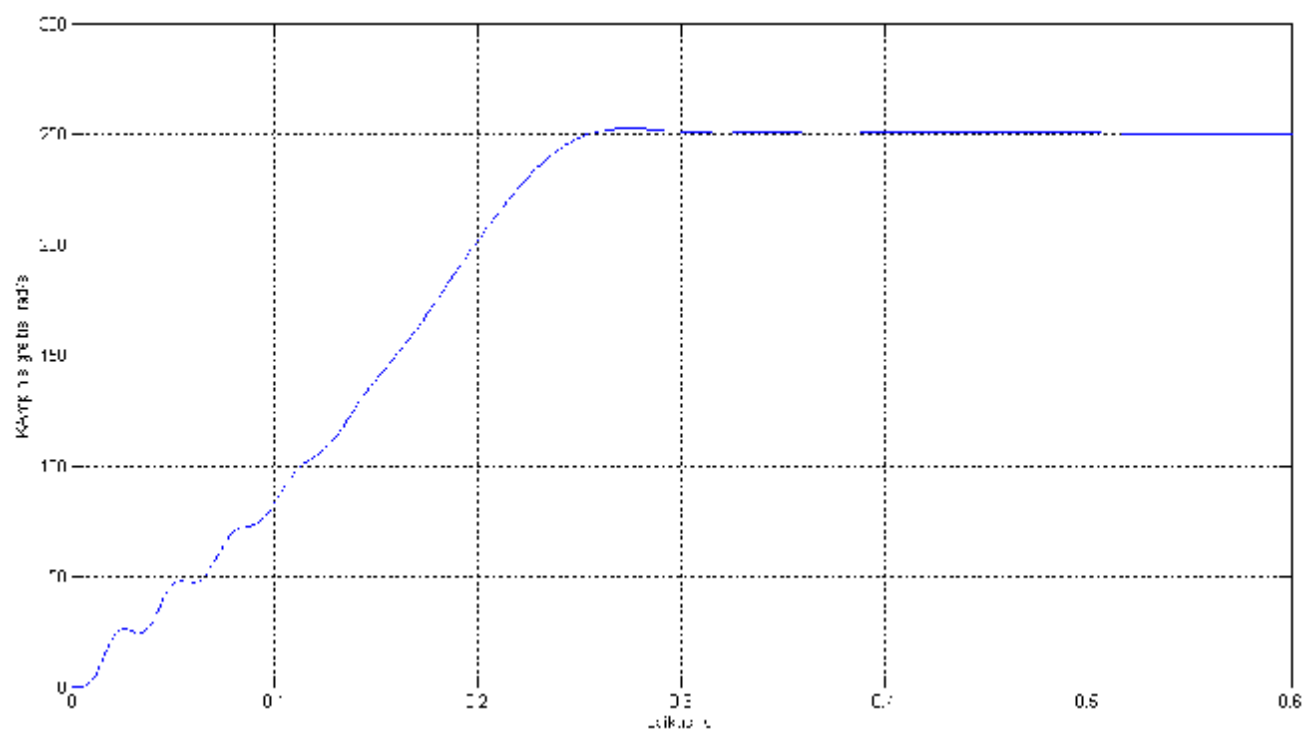


5.14 pav. Variklio greičio pereinamasis procesas, kai $U=380V$, $f=50\text{ Hz}$

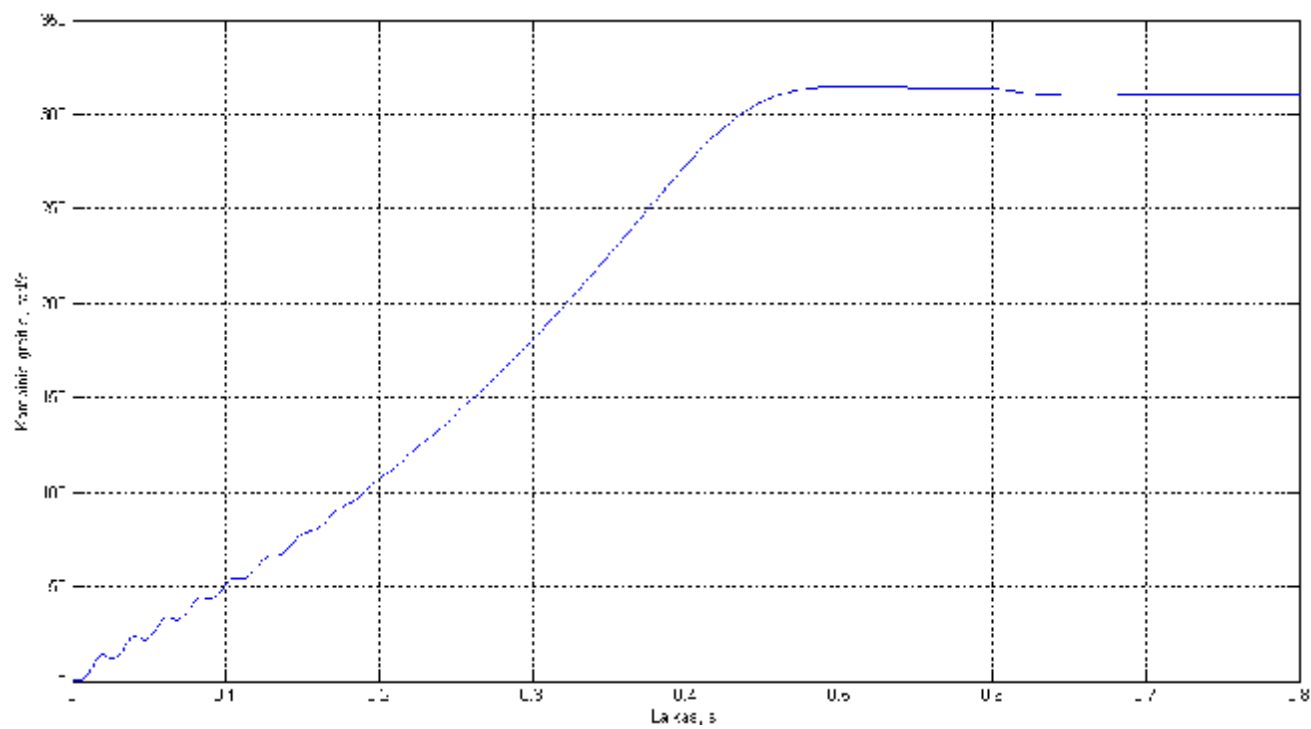
Variklio imitacijos rezultatai su apkrova:



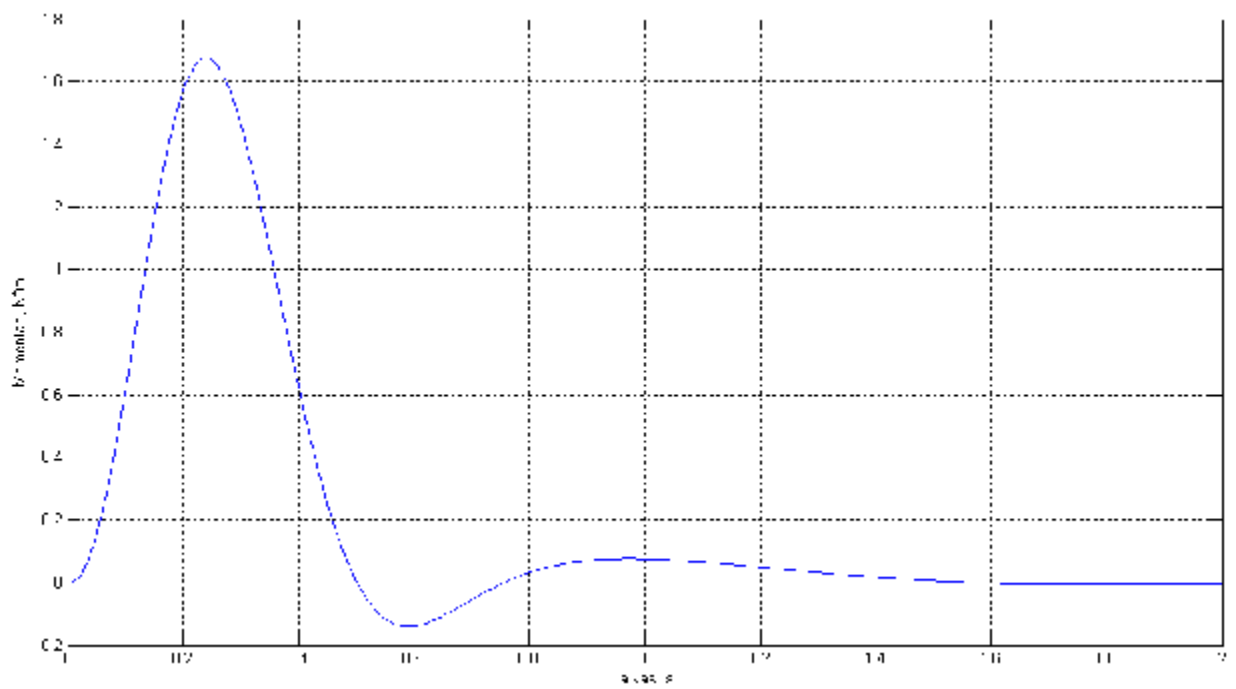
5.15 pav. Variklio greičio pereinamasis procesas, kai $U=7,6\text{ V}$, $f=1\text{ Hz}$, $M=1\text{ N}\cdot\text{m}$



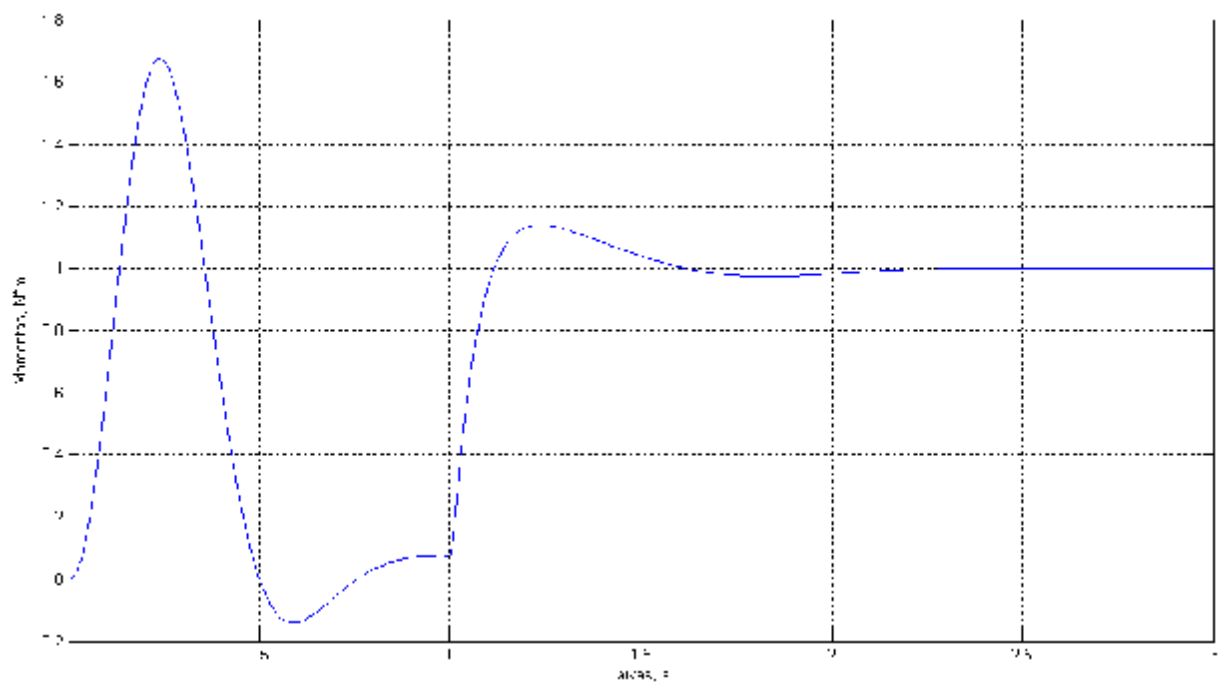
5.17 pav. Variklio greičio pereinamasis procesas, kai $U=304V$, $f=40$ Hz, $M=5$ N·m



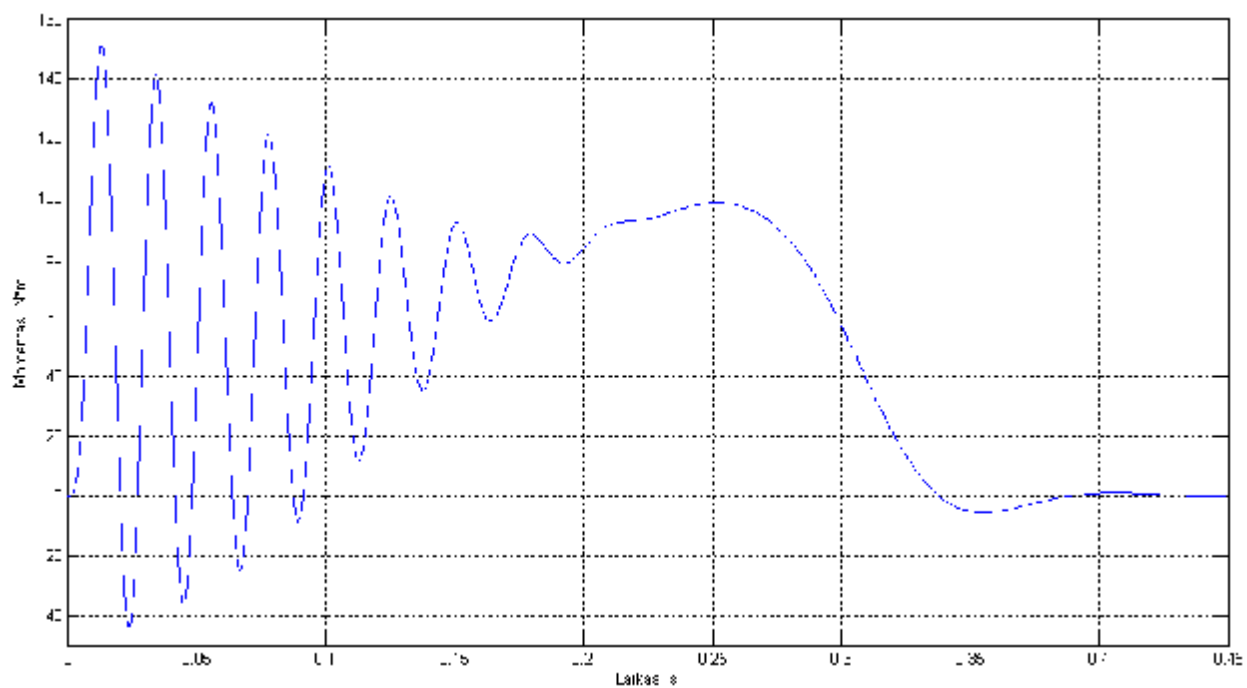
5.18 pav. Variklio greičio pereinamasis procesas, kai $U=380V$, $f=50$ Hz, $M=10$ N·m



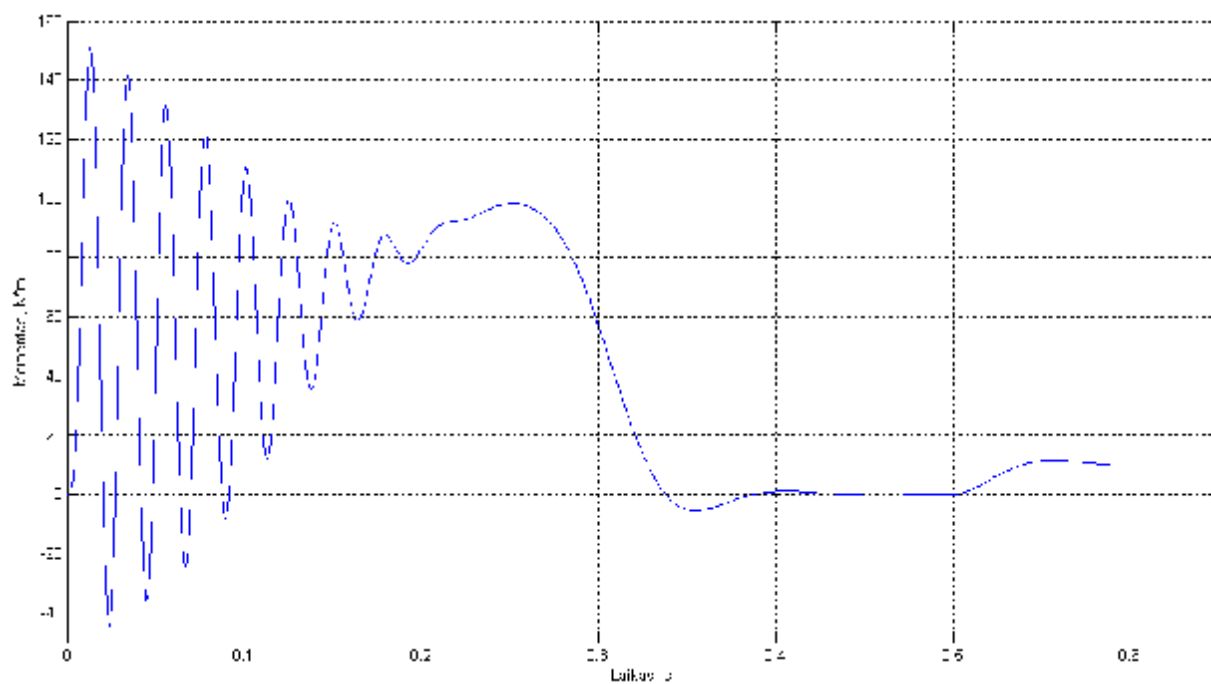
5.19 pav. Momento pereinamasis procesas, kai $U=7,6$ V, $f=1$ Hz, $M=0$ N·m



5.20 pav. Momento pereinamasis procesas, kai $U=7,6$ V, $f=1$ Hz, $M=1$ N·m



5.21 pav. Momento pereinamasis procesas, kai $U=380$ V, $f=50$ Hz, $M=0$ N·m

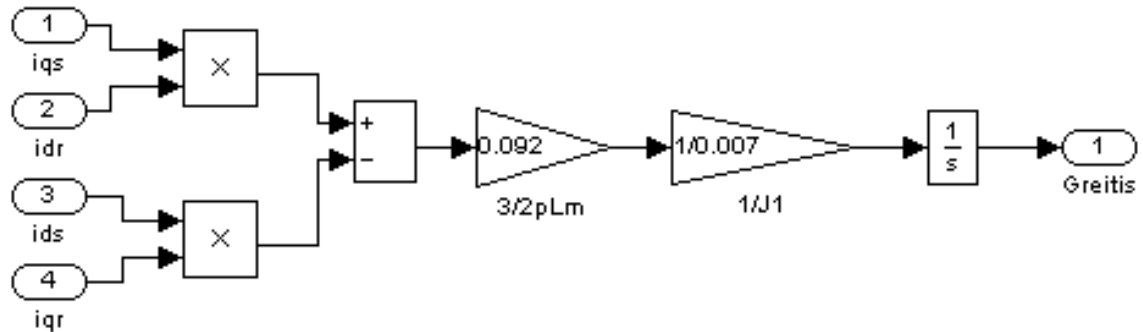


5.22 pav. Momento pereinamasis procesas, kai $U=380$ V, $f=50$ Hz, $M=10$ N·m

Eksperimento metu gauti variklio pereinamieji procesai pateikti 2 priede.

5.3. Stebiklių modeliai ir imitacijos rezultatai

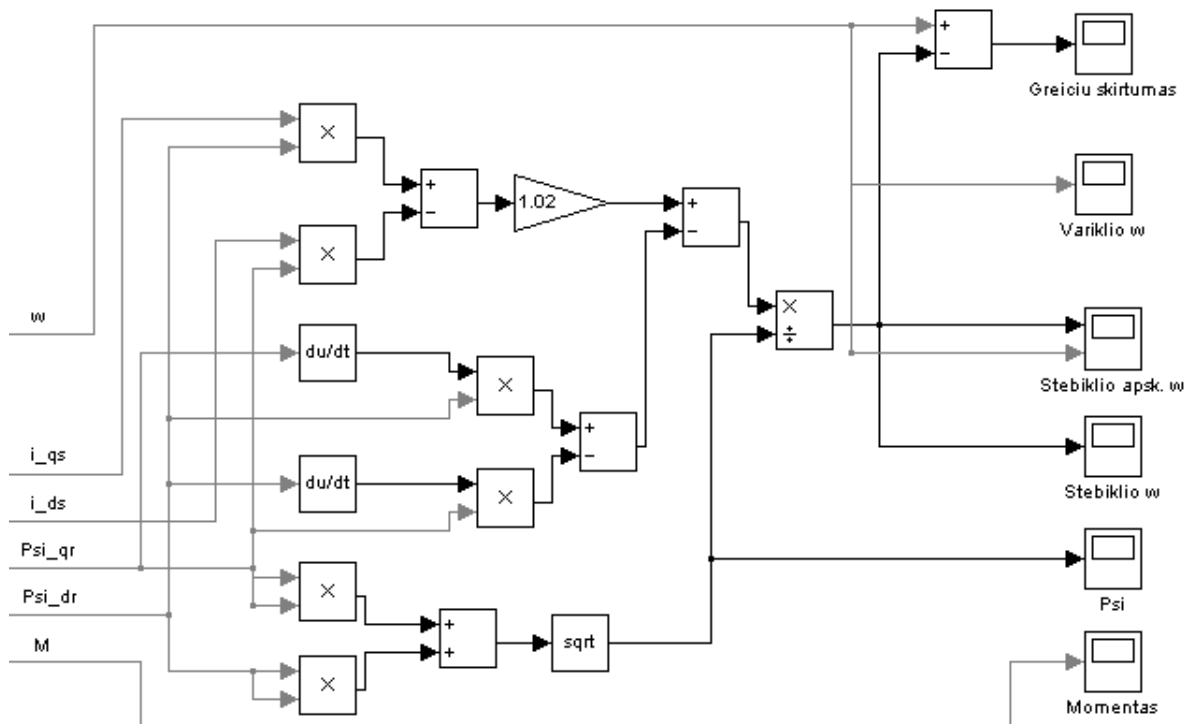
Elementaraus greičio stebiklio modelis pateiktas 5.24 pav.



5.24 pav. Kompiuterinis greičio stebiklio modelis išreikštas per sroves

Šio stebiklio imitacijos rezultatai pateikti 5.21-5.26 pav. ir 3 priede.

Greičio stebiklio modelis sudarytas pagal variklio būsenos lygtis, yra pateiktas 5.25 pav.



5.25 pav. Kompiuterinis greičio stebiklio modelis išreikštas per srautus

Stebiklio imitacijos rezultatai pateikti 5.32-5.39 pav. ir 3 priede.

Bandymo metu buvo tiriami greičio stebiklio parodymai. Siekta nustatyti kaip jis reaguoja į kintantį variklio greitį.

5.26-5.27 pav. ir 3 priede 1-2 pav. pateikti variklio greičio pereinamieji procesai be apkrovos, apskaičiuoti greičio stebikliu, pateiktu 5.24 pav. Iš gautų rezultatų matyti, kad elementarus stebiklis gerai veikia tiek mažų, tiek didelių dažnių diapazonuose.

Palyginus 5.11-5.14 pav. ir 5.26-5.27 pav. bei 3 priede 1-2 pav. matyti, kad stebiklio apskaičiuotasis greitis ir tiesiogiai išmatuotas variklio greitis – beveik identiški. 5.28 pav. ir 3 priede 3 pav. pateiktos charakteristikos, kai variklis dirba su nedidele apkrova ($0,5 \text{ N}\cdot\text{m}$). Šiuo atveju matyti, kad stebiklio apskaičiuoti pereinamieji procesai be apkrovos ir su apkrova nesutampa, paklaida yra didesnė už leistiną. Todėl, galime daryti išvadą, kad elementarus greičio stebiklis tinka matuoti greičiams esant tik nedidelėms, iki $1 \text{ N}\cdot\text{m}$, apkrovoms.

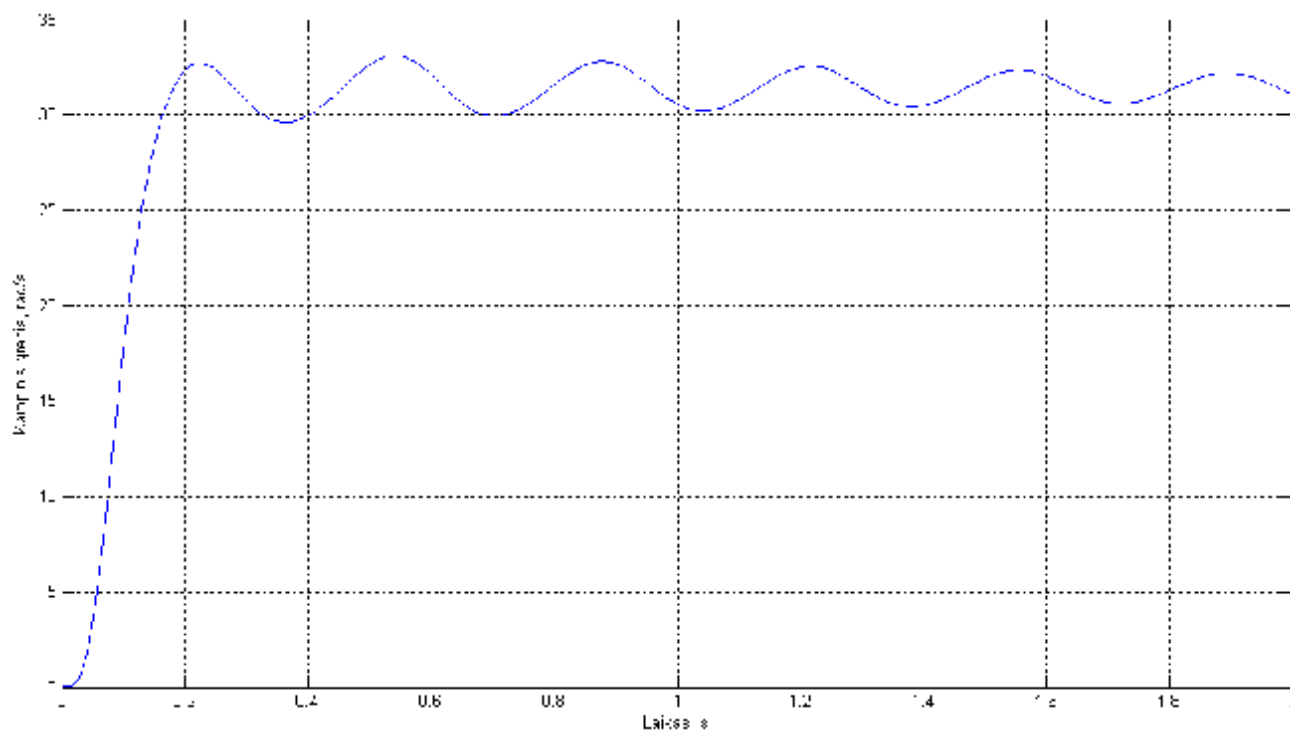
5.29-5.32 pav. pateikti variklio greičio pereinamieji procesai, apskaičiuoti greičio stebikliu sudarytu pagal variklio būsenos kintamųjų lygtis.

5.29-5.30 pav. ir 3 priede 4-6 pav. pateiktos greičio pereinamųjų procesų charakteristikos, kai variklis neapkrautas ($0 \text{ N}\cdot\text{m}$), o 5.31-5.32 pav. ir 3 priede 7-8 pav. – su apkrova.

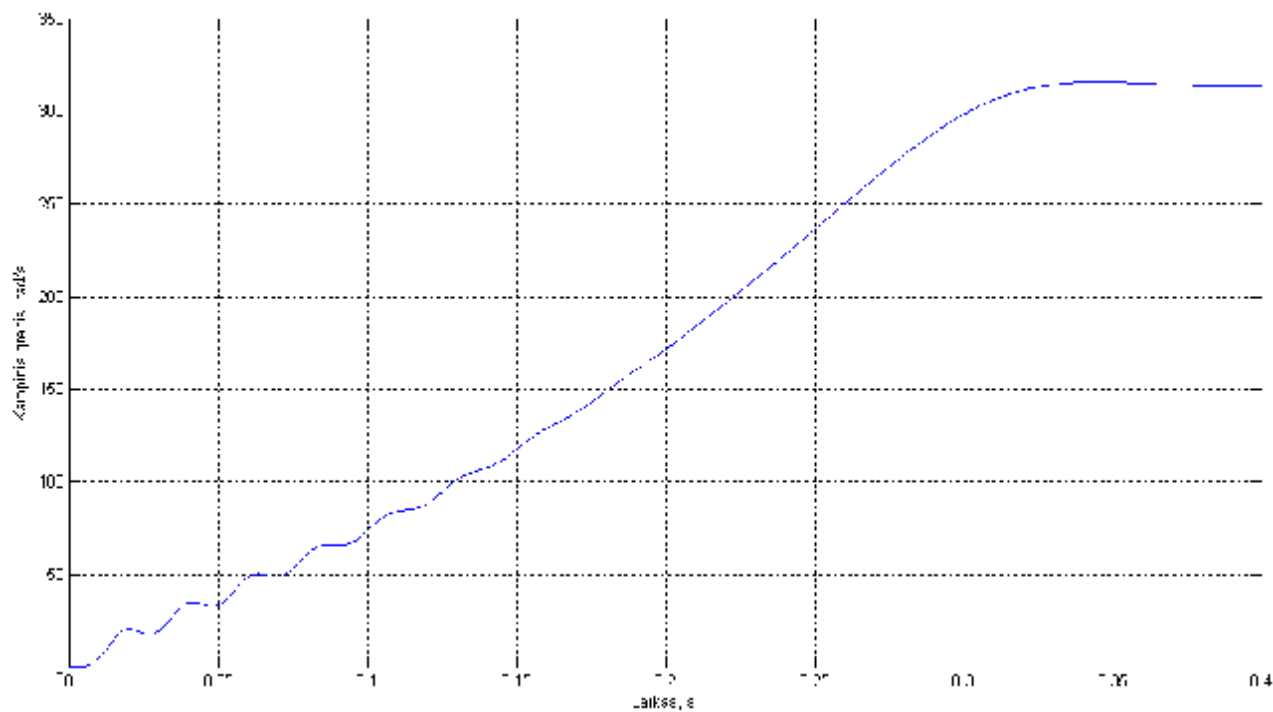
Palyginus su anksčiau minėto stebiklio gautais duomenimis, galima daryti išvadą, kad 5.25 pav. pavaizduotas greičio stebiklis ne taip tiksliai veikia mažų dažnių diapazone, kaip stebiklis pateiktas 5.24 pav. Tačiau, 5.25 pav. pateiktas greičio stebiklis puikiai tinka matuoti greičiui ne tik esant tuščiosios veikos režimui arba minimaliai apkrovai, bet puikiai veikia esant apkrovai, artimai vardinei.

Stebiklis, sudarytas pagal būsenos kintamųjų lygtis, turi mažą paklaidą, iki 0,5% esant nusistovėjusiam procesui. Nusistovėjusio režimo greičio paklaida esant mažiems greičiams, yra didelė, ji siekia iki 10 %.

Imitacijos rezultatai gauti stebikliu pavaizduotu 5.24 paveiksle:

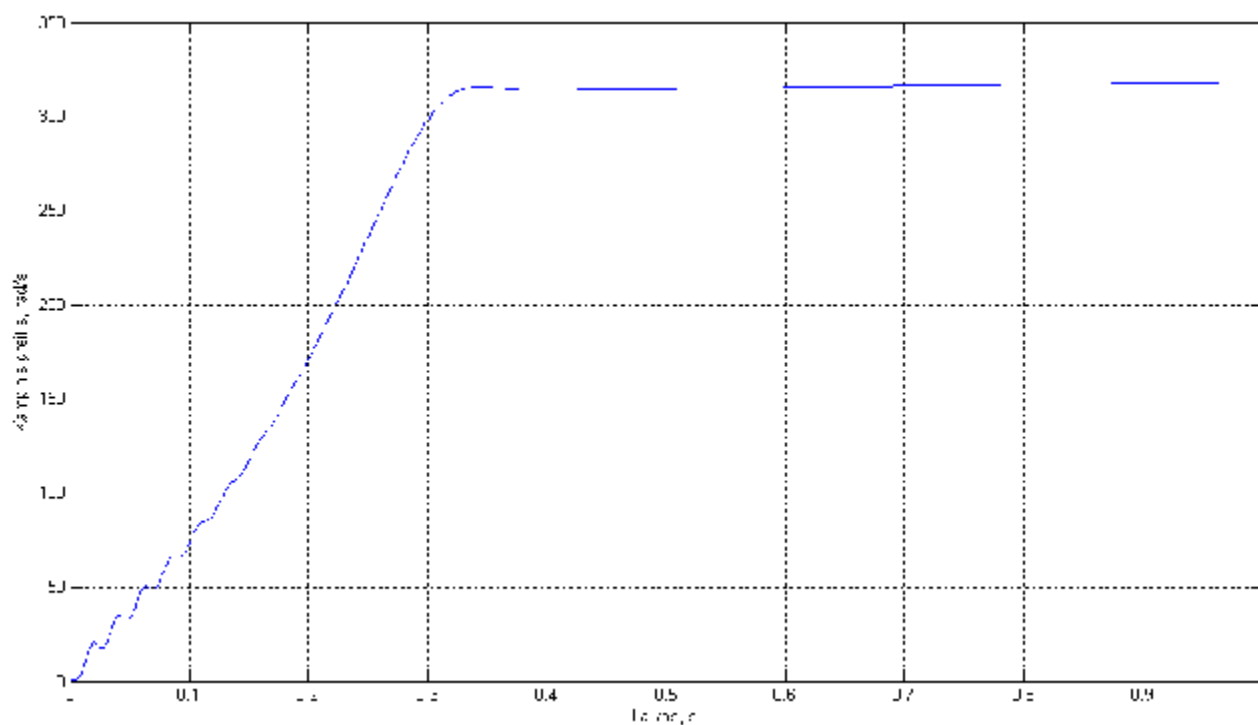


5.26 pav. Stebiklio apskaičiuotas greičio pereinamasis procesas, kai $U=38$ V, $f=5$ Hz, $M=0$ N·m

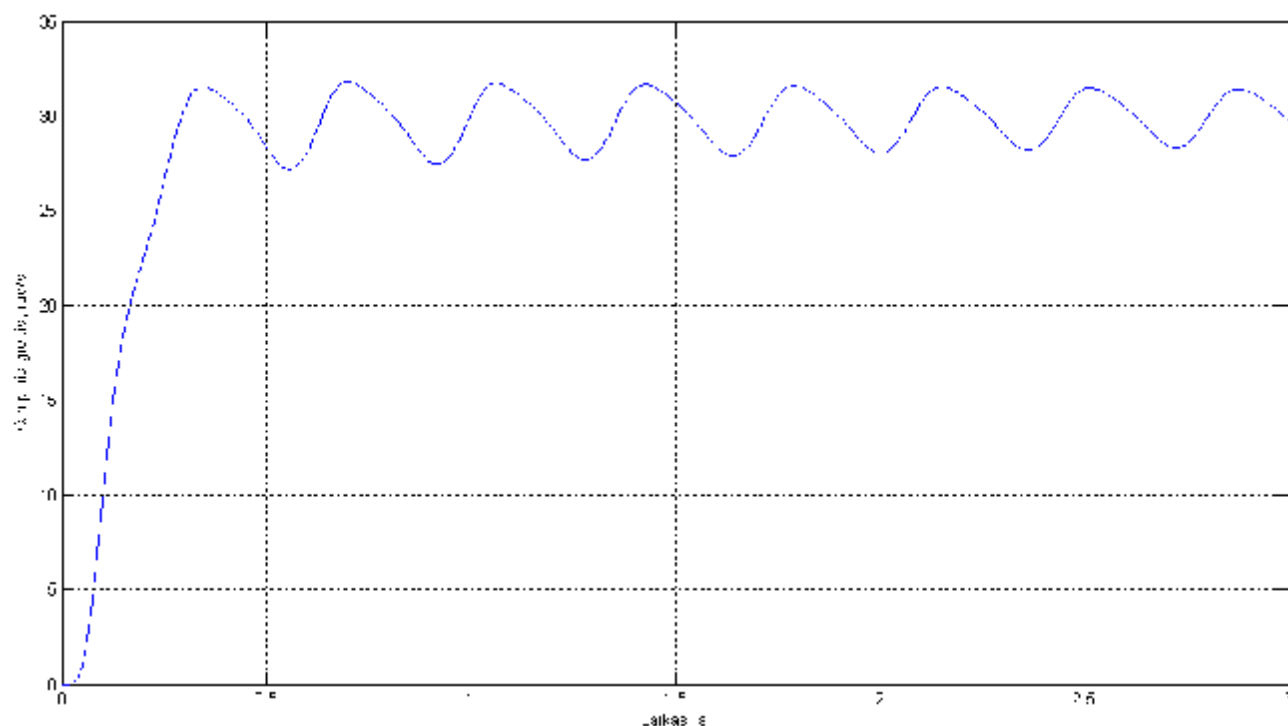


5.27 pav. Stebiklio apskaičiuotas greičio pereinamasis procesas, kai $U=380$ V, $f=50$ Hz, $M=0$ N·m

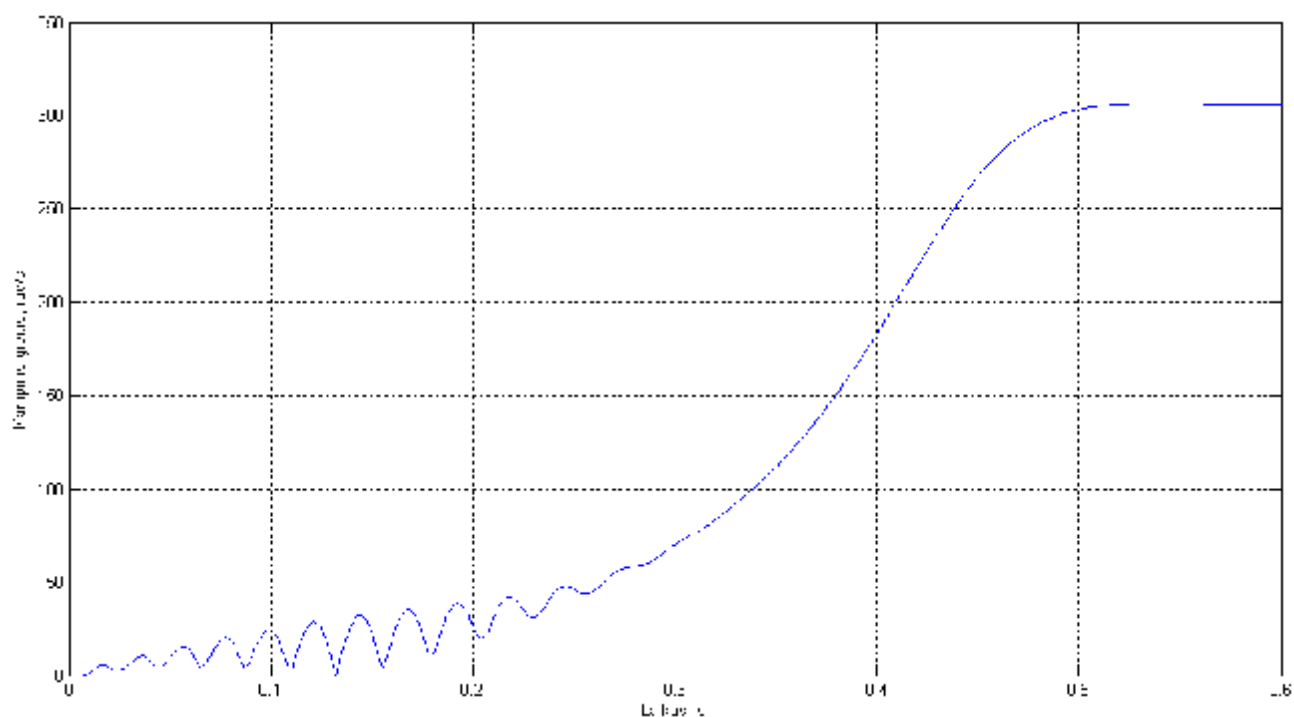
Su apkrova:



5.28 pav. Stebiklio apskaičiuotas greičio pereinamasis procesas, kai $U=380$ V, $f=50$ Hz, $M=0,5$ N·m
Imitacijos rezultatai gauti stebikliu pavaizduotu 5.25 paveiksle:

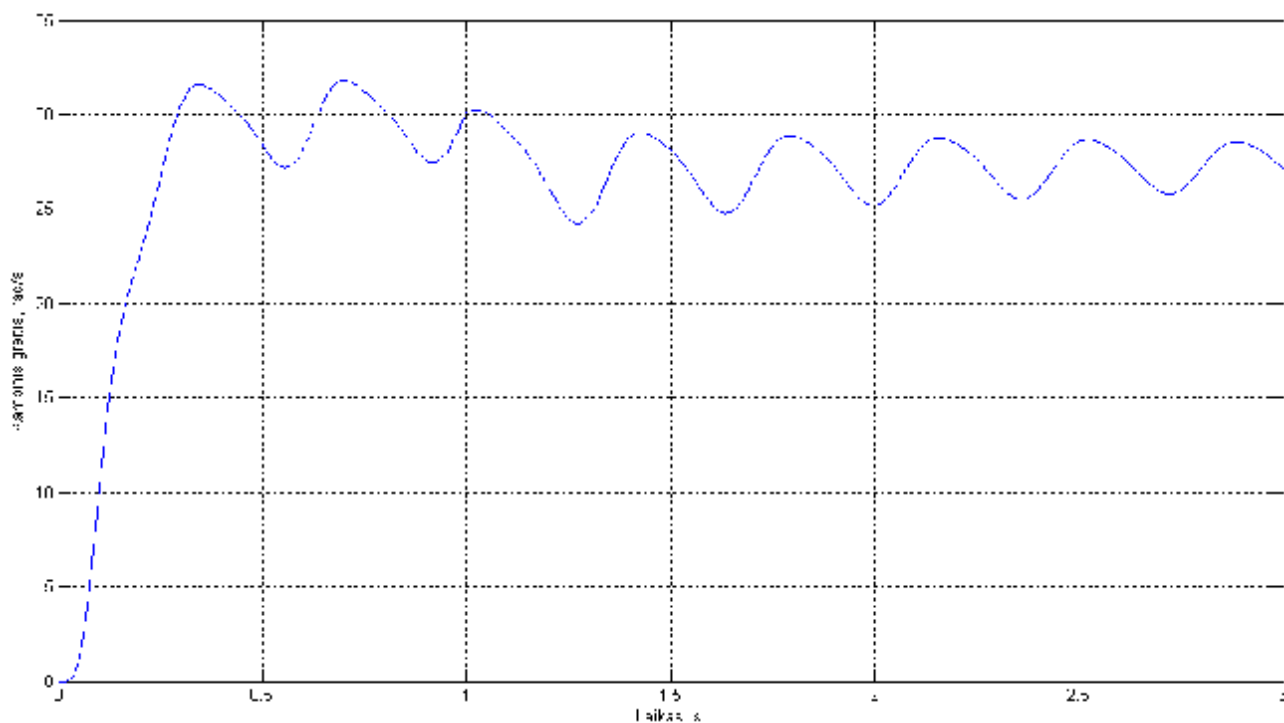


5.29 pav. Stebiklio apskaičiuotas greičio pereinamasis procesas, kai $U=38$ V, $f=5$ Hz, $M=0$ N·m

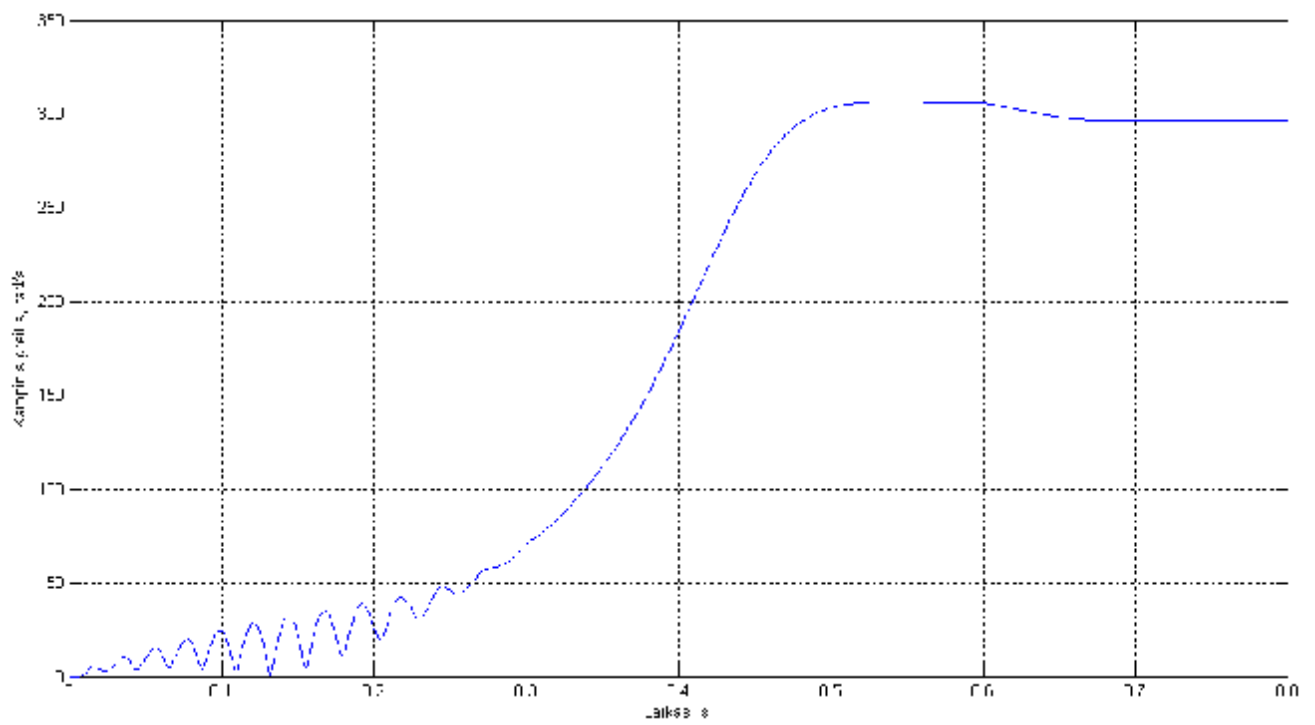


5.30 pav. Stebiklio apskaičiuotas greičio pereinamasis procesas, kai $U=380$ V, $f=50$ Hz, $M=0$ N·m

Su apkrova:



5.31 pav. Stebiklio apskaičiuotas greičio pereinamasis procesas, kai $U=38$ V, $f=5$ Hz, $M=3$ N·m



5.32 pav. Stebiklio apskaičiuotas greičio pereinamasis procesas, kai $U=380$ V, $f=50$ Hz, $M=10$ N·m

6. IŠVADOS IR PASIŪLYMAI

1. Baigiamajame darbe sudarytas skaliarinio valdymo dažninės asinchroninės pavaros kompiuterinis modelis. Ištirtos pavaros momento ir kampinio greičio dinaminės charakteristikos, kintant dažniui ir įtampai bei apkrovai.
2. Esant dažnių diapazonui nuo 1 iki 10 Hz, variklio paleidimas apytikriai trunka 0,2 s. Švytavimai nuslopsta apytikriai per 2 s.
3. Didėjant dažniui, pereinamieji procesai vyksta žymiai greičiau ir jų trukmė apytikriai 0,3 s.
4. Nustatyta, kad pavarą apkrovus vardine apkrova, greitis sumažėja 1,6 %.
5. Mažesniai greičio nuokrypiui gauti turi būti naudojama uždaroji sistema su greičio grįžtamuju ryšiu.
6. Suprojektuotas ir ištirtas dažninės pavaros elementarus greičio stebiklis tiksliai apskaičiuoja variklio sukimosi greitį tiek esant mažiems, tiek dideliems greičiams.
7. Greičio stebiklis patogus naudoti ir praktiškai, ekonomiškai, nes nėra kabelių, reikalingų jutiklio prijungimui prie valdymo ir informacijos surinkimo sistemos, tai atitinkamai mažėja jo savikaina, palyginti su įprastais greičio matavimo prietaisais. Kadangi greičio stebiklyje nėra jokių mechaninių, judančių dalių, tai tikimybė, kad jis suges žymiai sumažėja.
8. Greitis apskaičiuotas elementariu greičio stebikliu, esant tuščiosios veikos režimui, be paklaidos atitinka variklio greitį. Esant apkrovai iki 1 N·m stebiklio apskaičiuoto variklio greičio paklaida neviršija 1%.
9. Elementarusis stebiklis tinkamas naudoti nedidelių iki 1 N·m apkrovų diapazone, nes toliau didinant apkrovą, paklaida ženkliai didėja.
10. Stebiklis, sudarytas pagal asinchroninio variklio būsenos lygtis, tiksliai matuoja nusistovėjusio režimo greitį ir tiksliai seka greičio pokyčius, atsirandančius dėl momento kitimo.
11. Stebiklis, sudarytas pagal būsenos kintamųjų lygtis, turi mažą paklaidą didelių dažnių diapazone. Nusistovėjusio režimo paklaida siekia iki 3% tik pasibaigus procesui. Paleidimo metu stebiklio paklaida, esant mažiems greičiams siekia iki 38 %.
12. Pavaros greitis išmatuotas eksperimento metu, esant 30 Hz maitinimo dažniui, ir stebiklio, sudaryto pagal būsenos kintamųjų lygtis, apskaičiuotas greitis skiriasi 1,6 %.
13. Siūlyčiau tokį greičio stebiklį naudoti visose skaliarinio valdymo sistemose, nes sumažėtų sistemos kaina, o kartu padidėtų patikimumas.

7. NAUDOTA LITERATŪRA

1. Automatika ir elektrotechnika [žiūrėta 2009-03]. Prieiga per internetą: <http://www.siemens.lt>
2. Barnes M. Practical Variable speed drives and power electronics. Great Britain, 2003.
3. Barzdžiukienė L.D., Celešienė V., Kaulakienė A. Baigiamasis studijų darbas. Kalbininkų patarimai: teorija ir tvarkyba. Vilnius: Technika, 2004. 103 p.
4. Barzdžiukienė L. D., Celiešienė V., Kaulakienė A.. Baigiamasis studijų darbas. Kalbininkų patarimai: teorija ir tvarkyba. 2-asis pataisytas ir papildytas leidimas. Vilnius: Technika, 2005. 148 p.
5. Bishop R.H Mechatronic system control, logic, and data aquisition (2nd Editon). The university of Texas at Austin U.S.A., 2008.
6. Bolton W. Mechatronics. Electronic control systems in mechanical and electrical engineering (3rd edition). England, 2003. 567p.
7. Bose Bimal K. Modern Power Electronics and AC drives. New Jersey: Prentice Hall PTR, 2002. 738 p.
8. Centinkunt Sabri Mechatronics. University of Illinois at Chicago. 2007. 615 p.
9. Dabartinės lietuvių kalbos žodynas [žiūrėta 2009-03]. Prieiga per internetą: <http://www.autoinfo.lt/webdic/>
10. Elektrotechnikos terminų žodynas. – Kaunas.: Technologija, 1999. – 871 p.
11. Elektrotechnikos terminų žodynas: ADIAFORA [kompaktinis diskas]. Kauno technologijos universitetas. 2001.
12. Enciklopedija [žiūrėta 2009-03]. Prieiga per internetą: http://en.wikipedia.org/wiki/Stepper_motor
13. Ernst Alfons Digital linear and angular metrology. Position feedback for machine manufacture and electronics industry. Vokietija, 2002.
14. Field Orientated Control of 3-Phase AC-Motors. Texas Instruments. February 1998 [žiūrėta 2008-04]. Prieiga per internetą: www.ti.com.
15. Geleževičius V., Kriščiūnas K., Kubilius V. Elektros pavarų valdymo sistemos. Vilnius: Mokslas, 1990. 357p.
16. Gerdžiūnas P., Plakys V. Bendrieji akademinių darbų įforminimo reikalavimai. Vilnius: Technika, 2005. 75 p.
17. Heidenhain firmos gaminių katalogas. Vokietija, 2006.
18. Heidenhain firmos sukiųjų enkoderių katalogas. Vokietija, 2006.

19. Heidenhain firmos tiesinių enkoderių skirtų skaitmeniniu būdu valdomiems įrenginiams katalogas. Vokietija, 2005.
20. Heidenhain firmos kampui kampui matuoti skirtų enkoderių katalogas. Vokietija, 2006.
21. Informacija apie optinius elektroninius greičio jutiklius [žiūrėta 2008-11]. Prieiga per internetą: http://www.engnetglobal.com/images/companies/E/ENC002_main.gif
22. Informacija apie optinius elektroninius greičio jutiklius [žiūrėta 2008-11]. Prieiga per internetą: <http://www.newport.com/servicesupport/Tutorials/images2/diag1b.gif>
23. Informacija apie tachogeneratorius [žiūrėta 2008-11]. Prieiga per internetą: <http://www.transdrive.co.uk/images/tachogenerators/rdc210.jpg>
24. Informacija apie tachogeneratorius [žiūrėta 2008-11]. Prieiga per internetą: <http://www.wisegeek.com/what-is-a-tachometer.htm>
25. Informacija apie įvairias elektros grandines [žiūrėta 2009-02]. Prieiga per internetą: http://www.allaboutcircuits.com/vol_1/chpt_9/4.html
26. Įvairių tipų sukiųjų ir tiesinių optinių elektroninių jutiklių gamintojas [žiūrėta 2009-02]. Prieiga per internetą: <http://www.heidenhain.com>
27. Įvairūs straipsniai susiję su dažninėmis pavaromis [žiūrėta 2009-04]. Prieiga per internetą: <http://www.ab.com/drives/techpapers/PWMDrives01.pdf>
28. Įvairūs pavyzdžiai ir kita informacija dirbant su „MATLAB“ programiniu paketu [žiūrėta: 2009-04]. Prieiga per internetą: <http://www.mathworks.com/>
29. Jenkins P. Tiesiaieigės dažninės pavaros tyrimas. Baigiamasis magistro darbas. Vilnius, 2004.
30. Kuo B.C., Golnaraghi F. Automatic control systems. 8th edition.– John Wiley & sons, Inc., 2002.
31. Lai Jih-Shen, Bose Bimal K. A PC-based simulation and DSP-based of an improved high frequency resonant DC link inverter induction motor drive. IEEE Conf. pp, 882-888 p., 1990.
32. Masteika R.K. Elektros pavaros: teorija, schemas, projektavimas, uždaviniai, pavyzdžiai. Kaunas, 2002. 125 p.
33. Montanari Marcello Speed-sensorless control of induction motors: trends and perspectives. Bologna.
34. Pavaros ir automatizavimo elementai [žiūrėta 2009-05]. Prieiga per internetą: <http://www.pakmarkas.lt>
35. Petrovas A. Trifazių asinchroninių variklių dinaminiai modeliai. Daktaro disertacija. Vilnius, 2007.

36. Poška A. ir kt. Automatikos terminų žodynas (lietuvių, vokiečių, anglų, prancūzų, rusų kalbų). Vilnius: Technika. 2004, 715 p.
37. Pulse Width Modulation (PWM) Basics [žiūrėta 2009-02]. Prieiga per internetą: www.powerdesigners.com
38. Pustaladininkų fizikos instituto Mikroelektronikos laboratorija [žiūrėta 2008-05]. Prieiga per internetą: <http://neris.mii.lt/mt/straipsniai/200611/daz.doc>
39. Radzevičius L. Elektros inžinerijos magistrantūros studijų tiriamieji ir baigiamieji darbai. Vilnius: Technika, 2009.
40. Reljič Dejan D., Ostojič Darko B., Vasič Veran V. Simple speed sensorless control of induction motor drive. Belgrade, 2006.
41. Rinkevičienė R., Petrovas A. Mechatroninių sistemų modeliavimas. Mokomoji knyga. Vilnius: Leidykla. 2007 156 psl.
42. Rinkevičienė R., Lissauskas S. Tiesiaiegių mechatroninių sistemų modeliai. Vilnius: Technika, 2003.
43. Rudinskij V. Dažnio keitiklio tyrimas. Baigiamasis magistro darbas. Vilnius, 2008.
44. Smilgevičius A. Automatikos mikromašinos. Vilnius: Technika, 2005.
45. Vas P. Artificial-Intelligence-Based elctrical Maschines and Drives, 1999. 625 p.
46. Warner Leonhard Control of electrical deives (3rd Editon). Vokietija, 2001. 460 p.
47. Приобразобатели частоты для частотхо-регулируемого асинхронного электропривода. Электротекст [žiūrėta 2008-04]. Prieiga per internetą: www.etx.ru
48. Чилтикин Г. М., Ключев В. И., Сандлер А. С. Теория автоматизированного злектропривода. Москва: Знергия, 1979.