VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
AUTOMATIKOS KATEDRA

Vaida Butavičiūtė

VENTILIATORINIŲ DAŽNINIŲ PAVARŲ MODELIAVIMAS
MODELLING OF FREQUENCY CONTROL DRIVES WITH FAN LOAD

Baigiamasis magistro darbas

Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 621H62001
Mechatroninių sistemų automatikos specializacija
Elektronikos ir elektros inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2013

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
AUTOMATIKOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

_____
(Parašas)

doc. dr. Zita Savickienė
(Vardas, pavardė)

_____
(Data)

Vaida Butavičiūtė

VENTILIATORINIŲ DAŽNINIŲ PAVARŲ MODELIAVIMAS
MODELLING OF FREQUENCY CONTROL DRIVES WITH FAN LOAD

Baigiamasis magistro darbas

Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 621H62001
Mechatroninių sistemų automatikos specializacija
Elektronikos ir elektros inžinerijos studijų kryptis

Vadovas	prof. habil. dr. Roma Rinkevičienė (Pedag. vardas, vardas, pavardė)	_____ (Parašas)	_____ (Data)
Konsultantas	dr. doc. Dainius Udris (Pedag. vardas, vardas, pavardė)	_____ (Parašas)	_____ (Data)
Konsultantas	dr. doc. Andrius Petrovas (Pedag. vardas, vardas, pavardė)	_____ (Parašas)	_____ (Data)
Lietuvių kalbos konsultantas	lekt. Vaida Buivydienė (Pedag. vardas, vardas, pavardė)	_____ (Parašas)	_____ (Data)

Vilnius, 2013

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Elektronikos fakultetas
Automatikos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk. .....
Data .....-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Automatikos** programos baigiamasis darbas 4

Pavadinimas **Ventiliatorinių dažninių pavarų modeliavimas**

Autorius **Vaida Butavičiūtė**

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

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame darbe tiriamos ventiliatorinės dažninės pavaros ir tokių pavarų charakteristikos.

Teorinėje dalyje išnagrinėti dažninės asinchroninės pavaros ypatumai, naudojimo sritys. Pateikta dažnio keitiklių bei jų valdymo būdų apžvalga. Išanalizuoti skaliarinio ir vektorinio valdymo metodų principai, jų privalumai ir trūkumai. Atlikta trumpa greičio reguliatorių apžvalga.

Tiriamojoje dalyje sudarytas dažninės pavaros skaliarinio valdymo kompiuterinis modelis nejudančioje koordinačių sistemoje, išanalizuoti imitacijos rezultatai. Taip pat parinkta dažninės pavaros vektorinio valdymo funkcinė schema bei sudarytas kompiuterinis modelis, gauti ir palyginti pereinamieji vyksmai.

Magistro darbas baigiamas tyrimo išvadomis ir pasiūlymais.

Darbą sudaro 8 dalys: įvadas, žymėjimai, literatūros šaltinių analizė, darbo tikslas bei uždaviniai, teorinė dalis, tiriamoji dalis, išvados ir pasiūlymai, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 86 p. teksto be priedų, 86 pav., 1 lent., 31 bibliografinis šaltinis.

Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai

Dažninė pavara, vektorinis valdymas, skaliarinis valdymas, modeliavimas, ventiliatorinė apkrova

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Electronics
Department of Automation

ISBN ISSN
Copies No. .....
Date .....-.....-.....

Master Degree Studies **Automation** study programme Final Work 4

Title **Modelling of Frequency Control Drives with Fan Load**

Author **Vaida Butavičiūtė**

Academic supervisor **Prof Dr Habil Roma Rinkevičienė**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

The final master degree thesis presents frequency controlled drive with fan load simulation model and characteristics.

In the theoretical part of this master thesis advantages of frequency control drives and areas of its application are described. Frequency converters and their control methods are discussed Advantages and disadvantages of V/Hz or scalar and field oriented or vector control is analyzed. Speed controllers are described.

In the research part Simulink model of frequency controlled drive with fan load controlled by the scalar method in stationary reference frame is developed and simulation results are analyzed. Functional scheme of frequency contolled drive with fan load controlled by the vector or field-oriented method is choosen and Simulink model is investigated. Dynamic characteristics are presented and compared.

Thesis is closed with conclusions and proposals.

Structure: introduction, list of symbols, literature review, the study aims and objectives, the theoretical part, research part, conclusions and proposals, references.

Thesis consist of: 86 p. text without appendixes, 86 pictures, 1 tables, 31 bibliographical entries.

Appendixes included.

Keywords

Frequency control drive, vector or field-oriented control, scalar or V/Hz control, modelling, fan load

TURINYS

SIMBOLIAI IR SANTRUMPOS 8
ĮVADAS 11
1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ ANALIZĖ 13
2. DARBO TIKSLAS IR UŽDAVINIAI 17
3. TEORINĖ DALIS 18
3.1. DAŽNIO KEITIKLIŲ APŽVALGA 18
3.1.1. Valdymo būdų apžvalga 21
3.2. DAŽNINIO VALDYMO KINTAMOSIOS SROVĖS ASINCHRONINĖS PAVAROS. 25
3.3. DAŽNINIŲ PAVARŲ VALDYMO METODAI 27
3.3.1. Pagrindiniai skaliarinio valdymo metodo principai 28
3.3.2. Apkrovų pobūdžiai 32
3.3.3. Bendrieji vektorinio valdymo principai 33
3.3.4. Vektorinis asinchroninių elektros pavarų valdymo metodas 35
3.4. REGULIATORIŲ APŽVALGA 44
4. TIRIAMOJI DALIS 46
4.1. PROJEKTINIŲ SPRENDIMŲ PAGRINDIMAS 46
4.2. SKALIARINIO VALDYMO DAŽNINĖS PAVAROS MODELIS IR IMITACIJOS REZULTATAI 46
4.3. VEKTORINIO VALDYMO DAŽNINĖS PAVAROS FUNKCINĖS SCHEMOS PARINKIMAS 64
4.4. VEKTORINIO VALDYMO DAŽNINĖS PAVAROS MODELIS IR IMITACIJOS REZULTATAI 65
4.5. VEKTORINIO VALDYMO DAŽNINĖS ASINCHRONINĖS PAVAROS SU ŠUOLINE APKROVA GREIČIO IR MOMENTO PEREINAMIEJI VYKSMAI 83
IŠVADOS 84
LITERATŪRA 85

SIMBOLIAI IR SANTRUMPOS

$d^e - q^e$ – sinchroniniu greičiu judanti koordinačių sistema;

$d^r - q^r$ – ašys, susietos su rotoriumi;

$d^s - q^s$ – stacionarioji koordinačių sistema (α, β koordinačių sistema);

f_i – dažnis keitiklio išėjime;

f_t – tinklo dažnis;

f_s – elektrinis dažnis;

i_{dr}^s – rotoriaus srovės projekcija į d^s ašį;

i_{ds}^s – statoriaus srovės projekcija į d^s ašį;

i_{qr}^s – rotoriaus srovės projekcija į q^s ašį;

i_{qs}^s – rotoriaus srovės projekcija į q^s ašį;

i_{qr} – rotoriaus srovės projekcija į q^e ašį;

i_{qs} – statoriaus srovės projekcija į q^e ašį;

i_{dr} – rotoriaus srovės projekcija į q^e ašį;

i_{ds} – statoriaus srovės projekcija į q^e ašį;

i_{ds}^* ir i_{qs}^* – statoriaus srovės realioji ir menamoji dalys;

$i_{1\alpha}, i_{1\beta}, i_{2\alpha}, i_{2\beta}$ - statoriaus ir rotoriaus surištųjų srovių projekcijos į α, β ašis;

I_a – inkaro srovė;

I_f – žadinimo srovė;

I_m – įmagnetinimo reaktyvioji srovė;

I_r – rotoriaus srovė;

I_s – statoriaus srovė;

J – pavaros inercijos momentas;

k – apkrovos koeficientas;

$K_t^{'}$ – kiekvienai mašinai pastovus koeficientas;

L_{LS} – statoriaus sklaidos induktyvumas;

L_{LR} – rotoriaus sklaidos induktyvumas;

L_m – įmagnetinimo grandinės induktyvumas;

L_1 – pilnutinis statoriaus induktyvumas;

$L_2^{'}$ – pilnutinis rotoriaus grandinės redukuotasis induktyvumas;

$L_2^{''}$ – pilnutinis variklio induktyvumas;

M_{st} – statinis pasipriešinimo momentas;

M_e – sukimo elektromagnetinis momentas;

R_1 – statoriaus varža;

R_2 – rotoriaus varža;

$R_1^{'}, R_2^{'}$ – statoriaus ir redukuotoji aktyviosios varžos;

R_s – statoriaus varža;

P – nominali variklio galia W;

U_s – statoriaus įtampa;

$u_{1\alpha}, u_{1\beta}, u_{2\alpha}^{'}, u_{2\beta}^{'}$ – statoriaus ir rotoriaus įtampos;

u_{dr}^{s} – rotoriaus įtampos projekcija į d^s ašį;

u_{qr}^{s} – rotoriaus įtampos projekcija į q^s ašį;

u_{ds}^{s} – statoriaus įtampos projekcija į d^s ašį;

u_{qs}^{s} – statoriaus įtampos projekcija į q^s ašį;

u_{qr} – rotoriaus srovės projekcija į q^e ašį;

u_{qs} – statoriaus srovės projekcija į q^e ašį;

u_{dr} – rotoriaus srovės projekcija į q^e ašį;

u_{ds} – statoriaus srovės projekcija į q^e ašį;

θ^* – kampas;

θ_{sl} – slydimo kampas;

σ_r – rotoriaus sklaidos faktorius;

Ψ_a – inkaro žadinimo srautas;

Ψ_f – žadinimo srautas;

Ψ_r – pilnutinis rotoriaus srautas;

Ψ_r^* – nuostato pilnutinis rotoriaus srautas;

Ψ_s – pilnutinis statoriaus srautas;

ψ_{dr}^s – pilnutinio rotoriaus srauto projekcija į d^s ašį;

ψ_{ds}^s – pilnutinio statoriaus srauto projekcija į d^s ašį;

ψ_{qr}^s – pilnutinio rotoriaus srauto projekcija į q^s ašį;

ψ_{qs}^s – pilnutinio statoriaus srauto projekcija į q^s ašį;

ψ_m – srautas oro tarpe;

$\Psi_{1\alpha}, \Psi_{1\beta}, \Psi_{2\alpha}, \Psi_{2\beta}$ - statoriaus ir rotoriaus surištųjų srautų projekcijos į α, β ašis;

ω_r – rotoriaus kampinis sukimosi greitis, rad/s;

ω^* – kampinis greitis, rad/s;

ω_r^* – nustatytas rotoriaus sukimosi greitis, rad/s;

ω_{sl} – rotoriaus slydimo kampinis greitis, rad/s;

ω_0 – sinchroninis greitis rad/s;

s – slydimas;

τ_r – rotoriaus laiko pastovioji;

$X_{s\sigma}$, $X_{r\sigma}$ – statoriaus ir rotoriaus sklaidos varžos;

X_s – statoriaus reaktyvioji varža;

X_r – rotoriaus reaktyvioji varža;

X_r – abipusio induktyvumo reaktyvioji varža

x_μ – įmagnetinimo grandinės varža;

v – antrinio elemento greitis;

D – dažnio reguliavimo diapozonas;

DK – dažnio keitiklis;

DR – dažnio reguliatorius;

DTC – tiesioginis momento valdymas;

IN – intensyvumo nustatiklis;

IPM – impulsų pločio moduliacija;

ĮR – įtampos reguliatorius;

FK – funkcinis keitiklis;

M – asinchroninis variklis;

TG – tachogeneratorius.

ĮVADAS

Išsivysčiusiose šalyse 60 – 70 % elektros energijos sunaudoja elektros pavaros. Elektros pavara yra elektromechaninis įtaisas, skirtas darbo procesams elektrifikuoti bei automatizuoti; ją sudaro keitiklis, elektros variklis ir perdavimo bei valdymo įtaisai. Perdavimo įtaiso energija tiesiogiai perduodama gamybos mechanizmo darbo organui. Elektros pavara keičia elektros energiją į mechaninę (arba atvirkščiai) ir pagal gamybos mechanizavimo darbo organo technologinį režimą elektriškai valdo šios energijos srautą. Elektros pavarose naudojami tolydinio ir žingsninio, sukamojo arba slenkamojo judesio nuolatinės ir kintamosios srovės varikliai. Kintamosios srovės varikliai gali būti asinchroniniai ir sinchroniniai. Labai dažnai pagal pasirinktą elektros variklį yra suteikiamas pavadinimas visai pavarai.

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.

Siekiant optimizuoti procesus, vis dažniau iškyla sklandaus mechanizmų greičio reguliavimo problema ir vis daugiau mechanizmų iš nereguliuojamų kategorijos priskiriama reguliuojamų kategorijai. Pramonėje vis daugiau reikia reguliuojamų pavarų, o didinti nuolatinės srovės variklių gamybos apimtį kintamosios srovės variklių sąskaita yra neracionalu, todėl būtina kurti kintamosios srovės reguliuojamąsias pavaras [9].

Kintamosios srovės reguliuojamosiose pavarose variklių greitis reguliuojamas šiais pagrindiniais būdais: dažniniu, parametriniu ir pakopiniu. Pagrindinis, populiariausias ir optimaliausias kintamosios srovės variklio greičio valdymo būdas – variklis su dažnine pavara. Optimalus vien dėl to, kad palyginant su įprastiniais valdymo būdais, kur elektriniai ir mechaniniai mazgai dažniausiai perkami atskirai, bendros išlaidos gaunamos mažesnės. Be to, mechaninės dalys greit dyla, o tai tiesiogiai veikia eksploatacijos išlaidas. Dėl to bendra įrenginio kaina didėja dvigubai. Mechaniniam valdymui reikia daug energijos, o kintamosios srovės dažninė pavara faktiškai taupo ją.

Šiuo metu yra sukurta nemažai valdymo sistemų, realizuojančių įvairius dažninio valdymo metodus. Paprasčiausia ir ekonominiu požiūriu pigiausia yra kintamosios srovės asinchroninių variklių skaliarinio valdymo sistema (įtampos ir dažnio kintamųjų valdymas), kuri gali būti taikoma ten, kur griežtai nereikalaujama aukšto lygio tikslumo. Techniškai sudėtingiausia yra vektorinio valdymo sistema, įgalinanti nepriklausomai valdyti asinchroninio variklio srovę ir

srautą veikiant statiniu bei dinaminiu režimais, taip pat gauti valdymo charakteristikas, artimas nuolatinės srovės elektros pavarų valdymo charakteristikoms [14].

Vienas veiksmingiausių dažninių elektros pavarų tyrimo būdų yra jų skaitmeninių kompiuterinių modelių sudarymas naudojant juos pereinamųjų vyksmų tyrimui. Modeliavimo ir imitavimo panaudojimas inžinerinėje praktikoje leidžia kokybiškai ir greitai projektuoti sudėtingas sistemas. Iš imitacinių modelių gaunama įvairi informacija apie sistemos kintamuosius, sistemoje vykstančius procesus jai veikiant įvairiausiomis sąlygomis, taip pat gaunamos pavaros dinaminės charakteristikos. Imitacija padeda analizuoti sistemą teoriškai, todėl išvengiama nesklandumų ar klaidų, sudarant sistemą praktiškai. Todėl kuriant dažninių pavarų prototipus, skirtus nesudėtingų ventiliatorinių ir siurblinių automatizavimo uždaviniams spręsti, būtina atlikti sistemos, veikiančios įvairiomis reguliavimo ir trukdžių sąlygomis, tyrimus [2].

Šiame baigiamajame magistro darbe yra modeliuojama kintamosios srovės dažninė pavara, analizuojami ir sprendžiami tokios pavaros valdymo metodai bei gebėjimas veikti, esant ventiliatorinei apkrovai. Darbas pradedamas literatūros šaltinių analize.

Teorinėje darbo dalyje yra nagrinėjami dažnio keitiklių privalumai bei jų valdymo būdai. Aptariamos dažninio valdymo kintamosios srovės asinchroninės pavaros bei pagrindiniai dažninių pavarų valdymo metodai: skaliarinis ir vektorinis. Išdėstomi jų privalumai ir trūkumai. Aptariami greičio reguliatoriai.

Tiriamojoje dalyje sudaromas dažninės pavaros skaliarinio valdymo matematinis modelis bei tiriami pereinamieji vyksmai be ventiliatorinės apkrovos ir su apkrova. Po to atliekamas uždarosios dažninės vektoriškai valdomos pavaros tyrimas. Gauti pereinamieji vyksmai, sistemai dirbant su ventiliatorine apkrova ir be jos. Rezultatai palyginami. Suformuluojamos išvados bei pateikiami pasiūlymai.

1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ ANALIZĖ

Rengiant šį baigiamąjį magistrinį darbą, buvo apžvelgta Lietuvos bei užsienio specialistų publikuota mokslinės-mokomosios literatūros medžiaga. Tema „Ventiliatorinių dažninių pavarų modeliavimas“ literatūros lietuvių kalba yra nėra daug. Daugiau informacijos šia tema galima rasti anglų kalba. Taip pat informacijos galima rasti mokslinės pakraipos internetinėse svetainėse, kur informacija yra žymiai naujesnė. Bet kuriuo atveju tai tik parodo, kad tema yra įdomi bei aktuali ir verta plėtoti bei tirti toliau.

Kadangi baigiamojo darbo tema „Ventiliatorinių dažninių pavarų modeliavimas“ ieškota informacijos apie dažnines pavaras bei jų valdymą. Pirmiausia analizuota lietuvių autorių medžiaga. Viena iš tokių knygų Romualdo Konstantino Masteikos 2002 metais išleista knyga „Elektros pavaros“ [17]. Šioje knygoje pagrindinis dėmesys skiriamas elektros pavarų mechanikai, energetikai ir nuolatinės bei kintamosios srovės elektros pavarų teorijai, elektros schemoms, jų elementų skaičiavimui ir parinkimui, greičio ir mechaninių charakteristikų nustatymui, sprendžiant atskirus uždavinius ar atliekant kursinį projektą.

Knygoje gausu informacijos apie dažninio valdymo kintamosios srovės asinchronines pavaras. Pateikiami bendrieji principai, aptariamos dažnio keitiklių schemos.

Taip pat buvo ieškota informacijos apie mechatroninų sistemų modeliavimą. 2008 metais išleista Viliaus Antano Geleževičiaus knyga „Mechatroninės sistemos“ [10] puikiai atskleidžia mechatroninių sistemų modeliavimo ypatumus. Vadovėlio tikslas – pateikti sistemingų žinių apie mechatroninių sistemų sandarą, jų funkcines grandis bei tarpusavio sąveiką. Vadovėlio medžiaga suskirstyta į penkias dalis.

Svarbiausia ir pagrindinė knygos dalis, kuri labiausiai orientuota į baigiamąjį darbą yra ketvirtoji dalis – „Reguliatoriai ir valdymas“. Šiame skyriuje aptariami mechatroninės sistemos momento valdymo ypatumai, asinchroninių variklių momento valdymo būdas: vektorinis asinchroninių variklių dažninio valdymo principas, kuris yra pagrįstas daugiafazių kintamosios srovės variklių apvijų atstojamųjų įtampų, srovių, srautų erdvine vektorine interpretacija. Pateikiamos funkcinė vektorinio srovės valdymo asinchroninėje dažninėje pavaroje sistemos schema, asinchroninio variklio vektorinio valdymo sistemos momento trakto atstojamoji struktūrinė schema bei pagrindinės formulės, leidžiančios suskaičiuoti visus reikiamus parametrus, reikalingus reguliatoriaus parinkimui bei pagrindinės schemos modeliavimui. Taigi

išnagrinėjus mechatroninės sistemos funkcinių grupių elementus ir jų paskirtį, charakteristikas bei taikymo ypatumus aprėpiama mechatroninės sistemos visuma.

Romos Rinkevičienės ir Andriaus Petrovo 2008 metais išleistoje knygoje „Mechatroninių sistemų modeliavimas“ [24] išdėstyti sistemos būsenų kintamųjų modelių sudarymo pagrindai.

Ketvirtajame skyriuje kalbama apie mechatroninių sistemų su asinchroniniais varikliais modelius. Nagrinėjamos asinchroninio variklio koordinačių transformacijos, variklio modelių sudarymas koordinačių sistemoje, judančioje sinchroniniu greičiu ir tvirtai susietoje su statoriumi koordinačių sistemoje. Asinchroninio variklio dinamika aprašoma netiesinėmis diferencialinėmis lygtimis su harmoniniu dėsniu kintančiais koeficientais, priklausančiais nuo variklio posūkio kampo. Tokios lygtys analitiškai neišsprendžiamos ir jų kompiuterinį modelį sudaryti yra gana sunku. Uždaviniui supaprastinti taikomi koordinačių transformacijos metodai, eliminuojantys harmoniniu dėsniu kintančius parametrus.

Penktajame skyriuje nagrinėjama kompiuterinių modelių sudarymo technika, o šeštajame skyriuje pateikiami dažnio keitiklių modeliai ir dažninių pavarų imitacijos rezultatai.

Vyginto Batkausko daktaro disertacijoje „Dažninių elektros pavarų dinaminiai modeliai“ [2] atliktas kintamosios srovės dažninės elektros pavaros tyrimas.

Disertacijoje nagrinėjami kintamosios srovės dažninių elektros pavarų dinaminiai modeliai ir pereinamųjų vyksmų imitacijos rezultatai. Ištirti pavarų pereinamieji vyksmai, taikant skirtingus valdymo algoritmus ir variklių parametrus. Sudaryti elektros pavarų, valdomų specializuotais dažnio keitikliais, kompiuteriniai modeliai. Darbo rezultatai pritaikyti kuriant dažnio keitiklių prototipus ir dažnines pavaras.

Andriaus Petrovo daktaro disertacijoje „Trifazių asinchroninių variklių dinaminiai modeliai“ [19] atliktas trifazio asinchroninio variklio tyrimas.

Šios daktaro disertacijos tikslas buvo sudaryti trifazio asinchroninio variklio matematinį modelį, kuris ne tik adekvačiai aprašytų nesimetriškų asinchroninių variklių dinamiką, bet ir kurio greitaveika būtų didesnė už universalaus elektrodinaminio modelio greitaveiką, šį modelį pritaikyti įvairiems variklio apvijų jungimo būdams, jo pagrindu sudaryti kompiuterinius modelius dažniu valdomiems asinchroniniams varikliams tirti.

Darbe išnagrinėti asinchroninio variklio modeliai: T ekvivalentinė schema, transformuotų koordinačių modelis, elektrodinaminis variklio modelis ir kt., aprašytos bendrosios asinchroninio variklio lygtys, variklio lygtys transformuotoje koordinačių sistemoje, aptartas erdvinio vektoriaus metodas ir jo taikymas. Atlikta dažniausiai naudojamų asinchroninio variklio modelių apžvalga rodo, kad tik transformuotų koordinačių ir elektrodinaminis variklio modeliai tinkami dinaminių procesų asinchroniniame variklyje tyrimams.

Kitame skyriuje aptariami asinchroninio variklio kompiuteriniai modeliai, aprašomi modelio parametrų skaičiavimo būdai, taikant skaitinius ir kitus metodus, aptariami tokių metodų privalumai bei trūkumai.

Rašant teorinę dalį buvo remtasi užsienio autorių literatūra. Viena iš tokių knygų yra autoriaus Bimal Kumar Bose – „Modern power Electronics and AC drivers“ [4], kurioje gana detaliai ir aiškiai aprašyti dažninių pavarų veikimo principai, charakteristikos ir pateiktos gana aiškios 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 kurį iš sudarytų modelių lengvai galima išbandyti ir gauti charakteristikas. Ši knyga skirta ir kvalifikuotiems inžinieriams, ir universitetų studentams.

Malcom Barnes 2003 metais išleistoje knygoje „Practical Variable Speed Drives and Power Electronics“ [3] 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 valdymo srovę, skirtą optimaliai momento vertei pasiekti, su įmanomai mažesniais inverterio nuostoliais, lanksčia valdymo sistema, kurią galima integruoti į bet kokio valdymo proceso reikalaujančią sistemą.

K. Bolton knygoje „Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engeneering“ [5] aprašomi jutikliai ir keitikliai naudojami automatinio valdymo ir kitose sistemose. Autorius supažindina su terminologija, naudojama šių matavimo prietaisų veikimui apibūdinti. Pateikiamios statinės ir dinaminės charakteristikos. Trumpai apžvelgiami veikimo principai. Ši knyga skirta mechanikos inžinerijos, elektronikos bei kompiuterines sistemas studijuojantiems studentams, todėl kiekvienas joje gali atrasti jau žinomos informacijos ar pasisemti naujos.

Modeliuojant dažninę pavarą su ventiliatorine apkrova, buvo analizuojami moksliniai straipsniai. Analizuoti tokie straipsniai:

R. Rinkevičienės, V. Batkausko parašytame moksliname straipsnyje „Modelling and Investigation of Vector Controlled Induction Drive“ [25] trumpai aptariamos asinchroninių pavarų taikymo sritys bei privalumai. Aptariami vektorinio valdymo būdo privalumai: teigiama, kad vektorinio valdymo algoritmai, plačiai naudojami aukštos kokybės pavarose, pasižymi tikslumu bei greičio reguliavimu, užtikrina optimalų efektyvumą bei pereinamųjų vyksmų operacijas. Autoriai siūlo asinchroninės pavaros modelį, dirbantį mažų greičių diapazone, kur rotoriaus srauto sudedamosios dalys gali būti sintezuojamos, naudojant srovės ir greičio signalus.

Straipsnyje pateikti vektoriniu būdu valdomo asinchroninio variklio modeliavimo rezultatai. Jie lyginami su skaliariniu būdu valdomo asinchroninio variklio modeliavimo rezultatais. Pavaros greitis reguliuojamas statoriaus srovės dedamąja, proporcinga sukimo momentui, palaikant srauto srovės dedamąją pastovią. Nustatytoji srovės dedamosios, proporcingos momentui, vertė palaikoma naudojant PI valdiklį. Išvesta asinchroninio variklio diferencialinių lygčių sistema, kuria remiantis sudarytas variklio modelis *Simulink* programoje. Variklio modelis sudarytas nejudamoje koordinačių sistemoje. Pateikiami dviejų tipų pavarų modelių imitavimo rezultatai; palygintas skaliarinis ir vektorinis pavaros valdymas.

R. Rinkevičienės ir A. Petrovo straipsnio „Modelling of Frequency Controlled Induction Drive with Ventilator Type Load“ [27] tikslas – sukurti dažninės pavaros su ventiliatorine apkrova kompiuterinį modelį bei ištirti pereinamuosius procesus.

Siurblių, ventiliatorių, pūtimo įrenginių elektros pavarose naudojama daug asinchroninių elektros variklių. Šie įrenginiai sukuria ventiliatorinę apkrovą. Variklio, dažnio keitiklio ir apkrovos dinaminėms charakteristikoms tirti buvo sudarytas dažninės pavaros sklandaus paleidimo *Simulink* modelis. Imitacijos rezultatai buvo palyginti su gana gerai sutampančiais eksperimentiniais rezultatais. Buvo gauti tokie rezultatai: vidutinė neapkrauto variklio sukuriamo momento vertė sklandaus paleidimo metu, esant nustatytam pagreičiui 600 aps/min/s, neviršija nominaliosios vertės. Pavaros su ventiliatorine apkrova momentas, esant nustatytam pagreičiui 600 aps/min/s, paleidimo metu neviršija nominaliosios momento ir srovės verčių. Didėjant apkrovai, momentas didėja ir įgauna nusistovėjusią vertę. Statinė greičio paklaida siekia 10 %. Greičiui tiksliau nustatyti reikia naudoti uždarąją greičio reguliavimo sistemą arba vektorinio valdymo būdus.

A. Petrovo, S. Lisausko, R. Rinkevičienės straipsnyje „System for Measuring Speed of Induction Motor“ [20] aprašyta asinchroninio variklio greičio ir srovės pereinamųjų procesų matavimo įranga. Eksperimentiškai gauti variklio, paleidžiamo tuščiąja veika, srovės ir greičio pereinamieji procesai. Eksperimentiškai gauti rezultatai palyginami su gautais imitavimo rezultatais. Palyginimo rezultatai naudojami asinchroninio variklio modelio adekvatumui nustatyti. Nustatyta, kad, paleidžiant variklį, pagal nominaliajam darbo režimui apskaičiuotus jo parametrus sudarytas modelis pradžioje neduoda tikslių greičio pereinamojo proceso rezultatų.

2. DARBO TIKSLAS IR UŽDAVINIAI

Darbo tikslas – *Matlab* programiniu paketu sudaryti ventiliatorinės dažninės pavaros modelį bei ištirti dinamines charakteristikas.

Norint pasiekti šį tikslą, keliami uždaviniai:

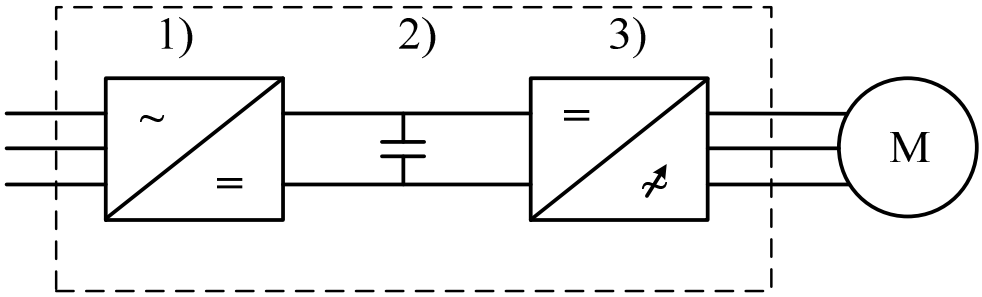
1. Apžvelgti dažnio keitiklių bei jų valdymo metodus.
2. Išanalizuoti dažninių pavarų valdymo metodus, jų privalumus ir trūkumus.
3. Apžvelgti reguliatorius.
4. Sudaryti skaliarinės dažninės pavaros imitacinį modelį.
5. Sudaryti sistemos funkcinę schemą.
6. Sudaryti vektorinės dažninės pavaros imitacinį modelį.
7. Atlikti modelių parametrų skaičiavimus.
8. Išanalizuoti imitacijos rezultatus ir nustatyti sistemos taikymo sritis.
9. Apibendrinti tyrimo rezultatus ir suformuluoti išvadas.

3. TEORINĖ DALIS

3.1. DAŽNIO KEITIKLIŲ APŽVALGA

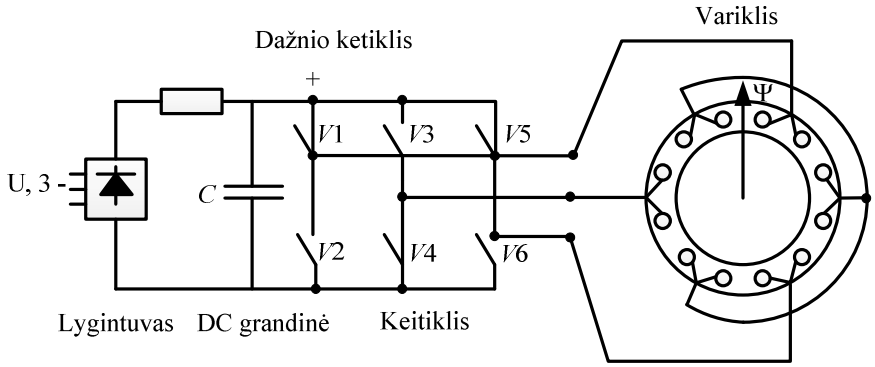
Kintamosios srovės variklių savybė leidžia elektrinę energiją keisti mechanine pagrįsta elektromagnetine indukcija. Įtampa statoriaus apvijose nusako srovės ir magnetinio srauto atsiradimą. Šio srauto kryptis gali būti nustatyta dešinės rankos taisykle (nuo statoriaus srovės). Keičiant įtampos kryptį statoriaus apvijose tuo gali būti keičiama srauto kryptis. Keičiant įtampos kryptį visose variklio statoriaus fazinėse apvijose tam tikra tvarka variklio magnetinis srautas pradeda suktis. Variklio rotorius seka šį srautą (sukasi) su nedideliu slydimu. Tai – pagrindinis principas, naudojamas kintamosios srovės variklių valdymui [14].

Šis valdymas gali būti realizuotas naudojant dažnio keitiklį. Dažnio keitiklis keičia kintamosios srovės ir įtampos dažnį. Dažniausiai dažnio keitiklis susideda iš trijų dalių: 1 – lygintuvo, 2 – nuolatinės srovės (NS) grandinės filtro, 3 – inverterio. Šiuolaikinio dažnio keitiklio struktūra pavaizduota 3.1 paveiksle.



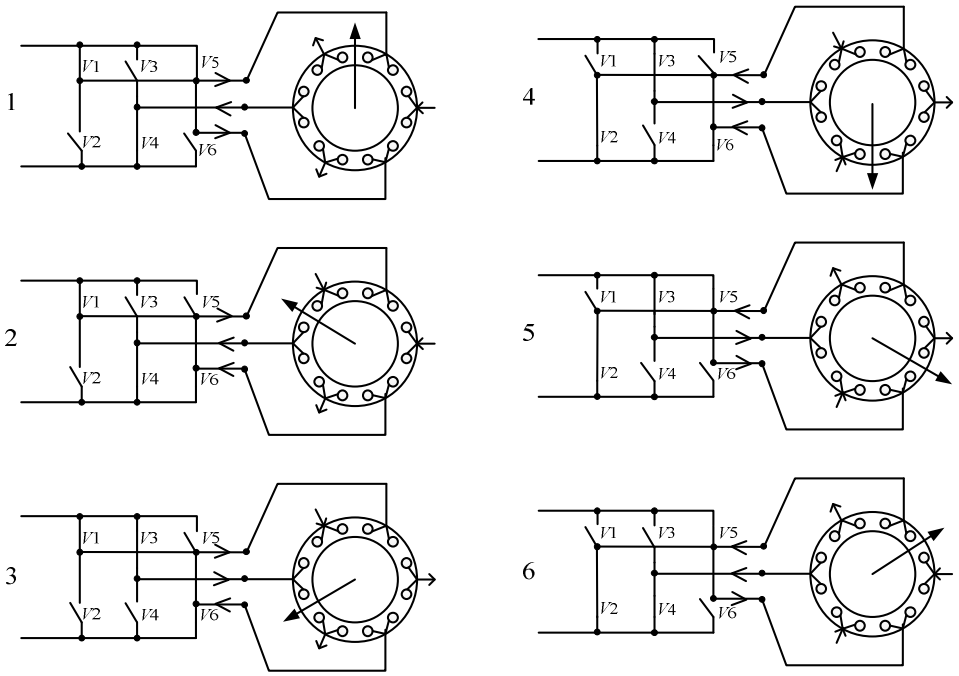
3.1 pav. Dažnio keitiklio sandara

Reguliari trifazė srovė tiekiama į lygintuvo dalį, kuri paverčia srovę į nuolatinę. Nuolatinė įtampa paduodama į nuolatinės srovės (NS) grandinę, kuri filtruoja pulsuojančią įtampą. Keitiklis tam tikra tvarka sujungia kiekvieną variklio apvijos fazę su neigiamu arba su teigiamu NS grandinės dydžiu. Srautas, pavaizduotas 3.2 pav., gaunamas uždarant raktus V1, V4 ir V5. Tam, kad srautas pasisuktų 60° prieš laikrodžio rodyklę, reikia uždaryti komutatorių V6, o V5 būtinai atidaryti, nes priešingu atveju gautųsi trumpas jungimas.



3.2 pav. Magnetinio srauto modeliavimas dažnio keitikliu

Keitiklis turi aštuonias skirtingas perjungimo padėtis. Dvejose padėtyse įtampa yra nulinė, t. y. kai visos fazės sujungtos su ta pačia NS grandinės linija, neigiama arba teigiama. Likusiose šešiose perjungimo padėtyse variklio statoriaus apvijose gaunama įtampa, kuri kuria magnetinį srautą. 3.3 pav. rodo šias šešias perjungimo padėtis ir srauto kryptis, kurios gaunamos kiekvienu atveju variklio apvijose.

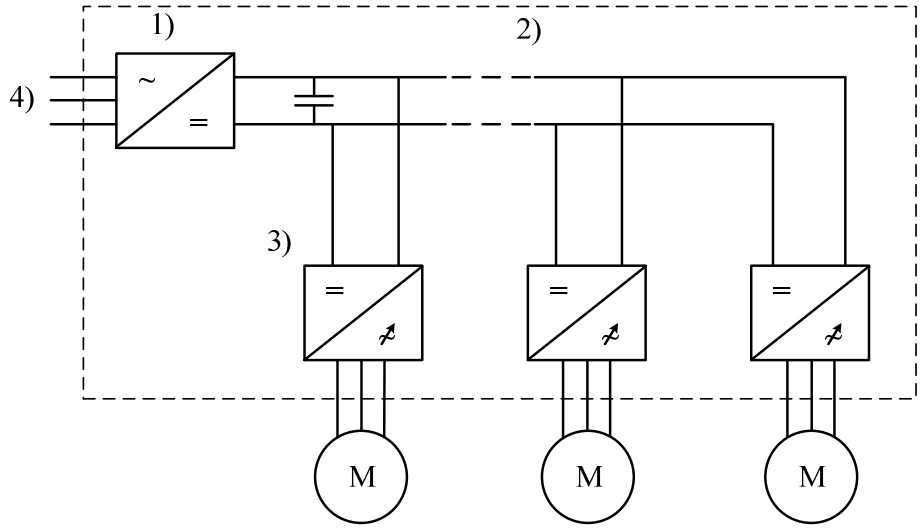


3.3 pav. Srauto kryptis, gaunamos šešiose perjungimo padėtyse

Praktikoje šis valdymas yra daug sudėtingesnis negu parodytame pavyzdyje, nes magnetinis srautas rotoriuje generuoja sroves, kurios apsunkina situaciją. Išoriniai trikdžiai, tokie kaip temperatūra arba kintama apkrova, gali taip pat sukelti valdyme sunkumų. Bet šiuolaikinės technologijos puikiai ir efektyviai išsprendžia visus valdymo sunkumus. Naudojant kintamo

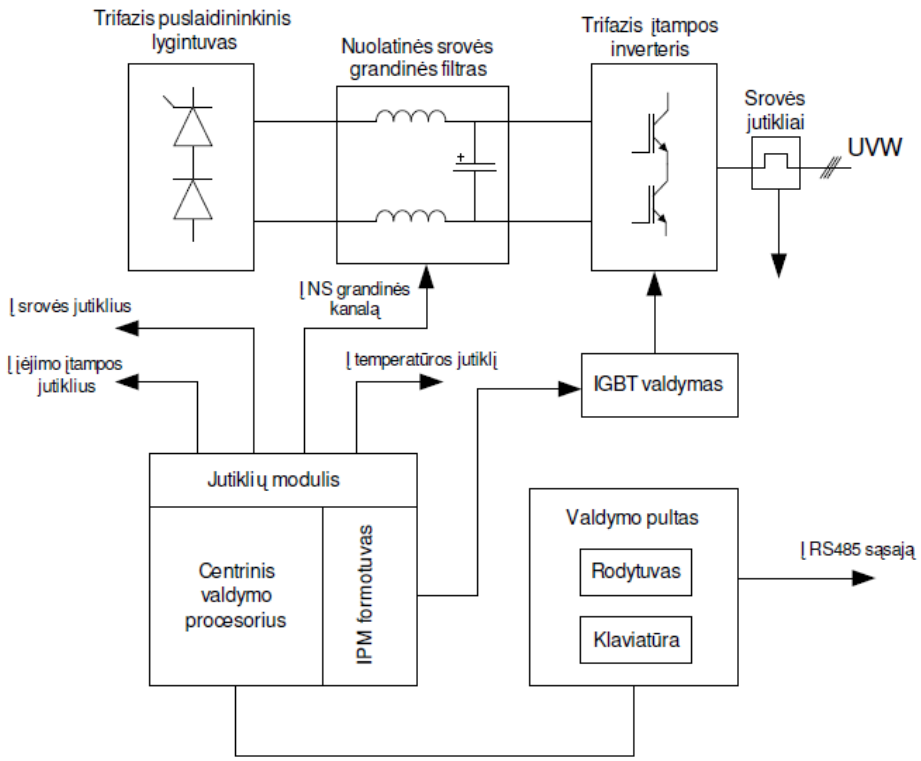
greičio pavaras su dažnio keitikliu, išsprendžiamos elektros energijos taupymo problemos, nes variklis nenaudoja daugiau energijos negu nustatyta. Be to, šis valdymas turi išskirtinių savybių ir teikia galimybę nenutrūkstamam valdymui.

Automatinėse sistemose su daug pavarų gali būti panaudotas kitokio tipo dažnio keitiklis (daugiakanalis), šio atveju 3.4 pav. dažnio keitiklio 3-oji dalis – inverteriai surišti su bendra nuolatinės srovės (NS) linija. Daugiakanalės pavaros sistemą sudaro: 1 – atskira maitinimo sekcija, 2 – bendra NS linija, 3 – pavaros sekcija (inverteris), 4 – maitinimas.



3.4 pav. Daugiakanalės pavaros sistema

Kaip buvo minėta, dažnio keitiklis susideda iš trijų pagrindinių dalių, be kurių didelę reikšmę turi keitiklio valdymo sistema. 3.5 pav. pavaizduota struktūrinė dažnio keitiklio schema. Šis dažnio keitiklis sudarytas iš trifazio puslaidininkinio lygintuvo, kuris išlygina tinklo įtampą; filtro, skirto išlygintos įtampos pulsacijoms filtruoti; trifazio įtampos inverterio nuolatinei įtampai keisti į kintamąją; srovės jutiklių, kuriais matuojant kiekvienos fazės variklio srovę, nustatomas ne tik variklio apkrovimas, bet ir sudėtingesnio valdymo dažnio keitikliuose nustatomas variklio srauto vektoriaus padėtis. Taip pat be minėtų jutiklių, įeinančių į apsaugos grandinę, dažnio keitiklis turi įėjimo (maitinimo) įtampos jutiklius ir temperatūros jutiklį, kuris atsižvelgiant į aplinkos poveikį, kai kaista inverterio grandinės puslaidininkiniai raktai, neleidžia jiems perkaisti. Dažnio keitiklio valdymo sistema susideda ne tik iš daugybės jutiklių, iš kurių nuskaityta informacija ateina į jutiklių modulį, bet ir valdymo modulius. Impulso pločio moduliacijos (IPM) valdymo modulyje priklausant nuo iš išorės atėjusių signalų formuojami IPM signalai, kurie siunčiami į tranzistorinių raktų (pvz. IGBT) valdymo modelį, o jame suformuojama raktų valdymo įtampa.



3.5 pav. Dažnio keitiklio struktūrinė schema

Visų signalų apdorojimą, taip pat valdymo signalų generavimą, priklausantį nuo gautos jutiklio bloko ir iš valdymo pulto įvestos per klaviatūrą informacijos, vykdo sudėtingas valdymo procesoriaus modulis. Dažnio keitiklis valdomas iš valdymo pulto klaviatūra, o vartotojo ir kiti nustatymai rodomi į to paties pulto skystąjį kristalą rodytuve. Duomenų išvedimui ir priėmimui numatytas nuoseklus perdavimo kanalas su RS485 sąsaja. Tokia keitiklio struktūra yra dažniausiai naudojama šiuolaikiniuose dažnio keitikliuose, tik su skirtingais valdymo kintamųjų būdų realizavimu [14].

3.1.1. Valdymo būdų apžvalga

Dabartiniuose dažnio keitikliuose naudojami trys pagrindiniai valdymo būdai [30]:

1. Dažninis valdymas naudojant impulsų pločio moduliaciją (IPM).
2. Magnetinio srauto vektorinis valdymas su IPM.
3. Tiesioginis momento valdymas (DTC).

1. Dažninio valdymo ypatumai:

- Kintamųjų valdymas – įtampa ir dažnis.
- Kintamosios srovės modeliavimas naudojant moduliatorių.
- Srautas užtikrinamas pastoviu V/f santykiu.
- Atvirojo kontūro pavara.
- Apkrova nustato sukimo momento lygį.

Skirtingai nuo nuolatinės srovės pavarų, kintamosios srovės pavarų dažninio valdymo technologija naudoja parametrus, sugeneruotus variklio išorėje kaip kintamųjų, įtampos ir dažnio, valdymui. Įtampos ir dažnio santykis vedamas į moduliatorių, kuris moduliuoja kintamosios srovės sinusoidę ir maitina variklio statoriaus apvijas. Ši technologija pavadinta impulso pločio moduliacija (IPM). Diodų lygintuvas ir tarpinė NS grandinė užtikrina pastovią įtampą. Keitiklis valdo variklį IPM formos impulsais, nusakančiais įtampą ir dažnį. Išskirtinai nuo kitų, šis metodas nenaudoja grįžtamojo ryšio įrenginio, kuris nustato variklio veleno greitį arba padėtį ir duoda signalą į valdymo kontūrą. Tokia pavaros sistema, t. y. be grįžtamojo ryšio, pavadinta atvirojo kontūro pavara.

Privalumai:

- Žema kaina.
- Nereikia grįžtamojo ryšio įrenginių – sistemos paprastumas.
- Kadangi nėra jokio grįžtamojo ryšio įrenginių, valdymo būdas teikia pigią, paprastą ir ekonominį sprendimą kintamosios srovės asinchroninių variklių valdyme. Šis pavarų tipas tinka pritaikymams, kur nereikalaujama aukšto lygio tikslumo, pavyzdžiui siurbliams, ventiliatoriams.

Trūkumai:

- Nenaudojama lauko orientacija.
- Ignoruojama variklio būsena.
- Nevaldomas sukimo momentas.
- Naudojamas delsimo moduliatorius.

Ši technika žinoma kaip skaliarinio valdymo, o variklio lauko orientacija nenaudojama. Dažnis ir įtampa – pagrindiniai valdymo kintamieji, kuriais maitinamos statoriaus apvijos. Rotoriaus būsena ignoruojama, reiškia joks greitis ar padėties signalas nenuimamas. Todėl sukimo momentas valdomas be jokio tikslumo lygio. Be to ši technika naudoja moduliatorių, kuris uždelsia ryšį tarp gaunamų įtampos ir dažnio signalų ir reikalingų variklio reagavimui signalų.

2. Srauto vektorinio valdymo ypatumai:

- Lauko orientacijos valdymas – imituoja NS pavarą.
- Modeliuojamos variklio elektrinės charakteristikos –“Variklio modelis“.
- Pavara yra uždarojo kontūro.
- Sukimo momentas valdomas netiesiogiai.

Norint imituoti magnetines nuolatinės srovės variklio veikimo sąlygas, t.y. vykdyti lauko orientacijos procesą, vektorinio valdymo pavarai reikia nustatyti erdvinę kampinę rotoriaus srauto padėtį KS variklio viduje. Srauto vektoriaus IPM pavarų magnetinio lauko orientacija realizuota elektroniniu būdu, greičiau ir tiksliau negu mechaninis komutatorius su šepečiais nuolatinės srovės variklio atveju. Pirmiausia, gaunama informacija nuo impulsinio greičio keitiklio apie rotoriaus būseną ir kampinę padėtį statoriaus atžvilgiu. Pavara, kuri naudoja koduojančius greičio įrenginius, minima kaip „uždarojo kontūro pavara“. Taip pat elektrinės variklio charakteristikos matematiškai skaičiuojamos procesoriais naudojant proceso duomenis.

Elektroninis magnetinio srauto reguliatorius kuria elektrinius dydžius: įtampą, srovę ir dažnį, kurie ir yra valdymo kintamieji, ir maitina per moduliatorių KS asinchroninį variklį. Todėl sukimo momento valdymas – netiesioginis.

Privalumai:

- Geras sukimo momento palaikymas.
- Tikslus greičio reguliavimas.
- Visas sukimo momentas esant nuliniam greičiui.
- Charakteristikos artimos NS pavaroms.

Magnetinio srauto vektoriaus valdymas realizuoja visų sukimo momentą esant labai mažam greičiui, kas priartina šias pavaras prie NS pavarų.

Trūkumai:

- Reikalingas grįžtamasis ryšis;
- Brangu;
- Reikalingas moduliatorius.

Norint pasiekti aukštą sukimo momento ir greičio reguliavimo tikslumą, reikalingas grįžtamojo ryšio įrenginys. Dėl to įrenginys brangsta ir tradicinio asinchroninio variklio valdymas pasidaro sunkesnis. Be to naudojamas moduliatorius, kuris uždelsia ryšį tarp gaunamų įtampos ir dažnio signalų bei reikalingų variklio reagavimui signalų. Nors variklio konstrukcija mechaniškai paprasta, pavara elektriškai kompleksiška.

3. Tiesioginio momento valdymo ypatumai

Tiesioginiam variklio sukimo momento nustatymui naudojant išskirtinę DTC technologiją magnetinio lauko orientacijos valdymas realizuotas be grįžtamojo ryšio. Čia valdymo kintamieji – variklio sukimo momentas ir variklio magnetinimo srautas. DTC valdyme nėra jokio moduliatoriaus ir be to, nereikalingas greičio grįžtamojo ryšio jutikliai: tachometrai arba koduojantys įrenginiai. DTC valdymas naudoja patį greičiausią skaitmeninį signalą, apdorojant technines priemones ir daug tobulesnį matematinį variklio modelį. Rezultatas – pavara su momento reakcija, kuri yra tipiškai 10 kartų greitesnė už bet kokią kitą nuolatinės ar kintamosios srovės pavarą. Greičio dinaminis tikslumas bus 8 kartus geresnis negu bet kokioje atvirojo kontūro KS pavaroje, kuri sutapatinama su NS pavara su grįžtamuoju ryšiu. DTC produkcijos sukurta pirma universali pavara su NS ar KS išpildymo galimybe.

Privalumai:

- Geresnė produkto kokybė gali būti pasiekiama su pagerintu greičio tikslumu ir daug greitesniu sukimo momento valdymu.
- Pavara neturi brangių grįžtamojo ryšio įrenginių.
- Viena pavara, turinti galimybę apjungti visas pritaikymo galimybes: NS, KS ar servo-sistemose.
- Pavaros darbo aplinka skleidžia mažiau triukšmų.
- Sukimo momento reakcija, t. y. kaip greitai variklis gali pasiekti tiksliai nustatytą greičio dydį, kai naudojamas tipinis sukimo momento žingsnis. DTC pavarai tipinė sukimo momento reakcija yra nuo 1 iki 2 ms. Vektorinio valdymo ir nuolatinės srovės pavarose su greičio jutikliais reakcija yra 10-20 ms. O atvirojo kontūro dažnio IPM pavaros turi daug didesnius reagavimo laikus (100 ms).
- Tikslus sukimo momento valdymas prie žemo dažnio. DTC pavarose greitis gali būti valdomas dažniais, žemesniais negu 0,5 Hz ir palaikomas 100 % nominalus momentas.
- Sukimo momento stabilumas, t. y. kaip gerai pavara palaiko išėjimo momento dydį esant vienodai momento santykio komandai. DTC be greičio jutiklių gali užtikrinti nuo 1 iki 2 % momento stabilumą nuo nominalaus visame greičio diapazone. Tai yra pusė to, ką gali atvirojo kontūro KS pavaros ir lygu uždarojo kontūro KS ir NS pavarų galimybėms.
- Variklio statinio greičio tikslumas, t. y. paklaida tarp santykinio greičio ir esamos reikšmės esant visai apkrovai. DTC pavarai greičio tikslumas – 10 % asinchroninio rotoriaus slydimo, kuris esant 11 kW varikliui duoda 0,3 % statinio

greičio tikslumą, prie 110 kW – tikslumas 0,1 % be grįžtamojo ryšio. Tai tenkina 95 % pramoninių pavarų pritaikymo galimybes. Nagrinėjant dažninio IPM valdymo pavaras tipinis statinio greičio tikslumas nuo 1 iki 3 %. Taigi tobulinimo atžvilgiu DTC technologija ženkliai padidino galimybes, kurios leidžia naudojant greičio koduojantį įrenginį su 1024 impulsais per apsisukimą pasiekti greičio tikslumą iki 0,01 %.

- Dinaminio greičio tikslumas, t. y. greičio nuokrypų integralas laike, kai pridėtas nominalus sukimo momentas. DTC dinaminio greičio tikslumas atvirojoje sistemoje tarp 0,3 ir 0,4 %. Tai priklauso nuo reguliatoriaus stiprinimo koeficiento, kuris gali būti nustatytas pagal proceso reikalavimus. Kitose KS pavarose su atviruoju kontūru dinaminis tikslumas 8 kartus mažesnis ir praktiškai siekia apie 3 % s. Jei mes be DTC pavaros naudojam dar greičio koduojantį įrenginį, dinaminis greičio tikslumas bus 0,1 % s, kuris atitinka servopavarų charakteristikas.

Aprūpinant standartinius pritaikymus naujais ekonominiais efektais DTC gali suteikti visų šių reikalavimų sprendimus. Vienintelis, turbūt, trūkumas – aukšta pavaros kaina [30].

3.2. DAŽNINIO VALDYMO KINTAMOSIOS SROVĖS ASINCHRONINĖS PAVAROS

Šiuo metu vienas iš asinchroninio variklio sukimosi greičio reguliavimo būdų yra jo maitinimo įtampos dažnio f keitimas. Asinchroniniai varikliai (AV) maitinami iš specialių dažnio keitiklių (DK). Dabartiniu metu naudojami tranzistoriniai ir tiristoriniai DK.

Dažnis f_i keitiklio išėjime gali būti: mažesnis už tinklo dažnį f_t, o būtent $f_i = (5 \div 50)$ Hz; ar didesnis už jį, kai $f_i = (50 \div 100; 200; 400; 1200 \div 4000)$ Hz.

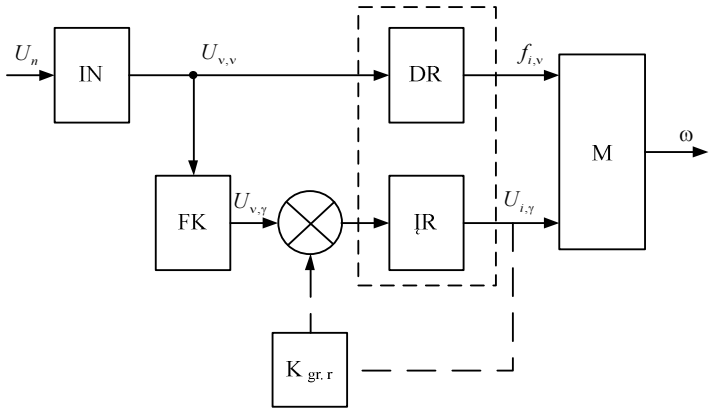
Ribinį sukimosi dažnio reguliavimo diapazoną nustato:

1. reikalingas charakteristikų statizmas;
2. AV leidžiama perkrova, kuri turi būti ne mažesnė nei vardinė.

Reguliuojant sukimosi dažnį AV gali dirbti atvirose arba uždarose dažnio reguliavimo sistemose [17].

Atvirose dažninio valdymo sistemose (3.6 pav.) būdingas kietasis ryšys tarp dažnio reguliatoriaus. DR ir įtampos reguliatorius ĮR, kuris gaunamas su funkciniu keitikliu FK ir užtikrina reikalingą statoriaus įtampos kitimą (priklausomai nuo dažnio). Šios sistemos gali turėti vidinį įtampos stabilizacijos kontūrą (parodyta punktyru). Jis kompensuoja įtampos kritimus DK

ir tinklo įtampos svyravimus. Atvirose sistemose leidžiama perkrova užtikrinama tik ribotam dažnio reguliavimo diapazonui, priklausančiam nuo apkrovos pobūdžio.



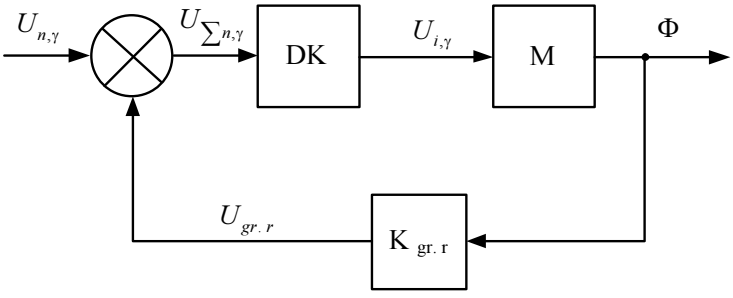
3.6 pav. Dažninio valdymo atviros sistemos funkcinė schema:

Reguliuojant dažnį žemiau tinklo dažnio f_t , galimas sukimosi dažnio reguliavimo diapazonas, kai reikalingas mechaninių charakteristikų statizmas yra apie 10%: pavaroms su pastoviu apkrovos momentu (M_{ap} = const.) $D \le (1,5 \div 3):1$; pavaroms su ventiliatorine charakteristika $D \le (10 \div 25):1$.

Reguliuojant dažnį virš tinklo dažnio f_t galimas sukimosi dažnio reguliavimo diapazonas $D \le (1,5 \div 2):1$.

Reguliavimo diapazoną galime padidinti, naudojant ***uždaraąsias reguliavimo sistemas*** su grįžtamaisiais ryšiais. Visiems darbo režimams ir dažnio reguliavimo diapazonams tinka srauto grįžtamasis ryšys. Jo trūkumas – sunku išmatuoti efektinę srauto reikšmę.

Uždarosios sistemos su srauto grįžtamuoju ryšiu funkcinė schema pateikta 3.7 paveiksle [17].



3.7 pav. Funkcinė uždaros sistemos srauto stabilizacijos schema

Papildomus grįžtamuosius ryšius rekomenduojama naudoti tik AV dirbant variklio režimu. Dirbant kitais režimais reikės keisti stiprinimo koeficientą pereinant iš variklio į stabdymo režimą, kad būtų galima išvengti nekontroliuojamo magnetinės sistemos prisotinimo. Kai negalima naudoti srauto grįžtamojo ryšio AV dirbant tik variklio režimu, reikia naudoti greičio grįžtamąjį ryšį. Apkrovos srovės grįžtamasis ryšys rekomenduojamas naudoti tik tada, kai negalima ar nenorima naudoti tachogeneratorių.

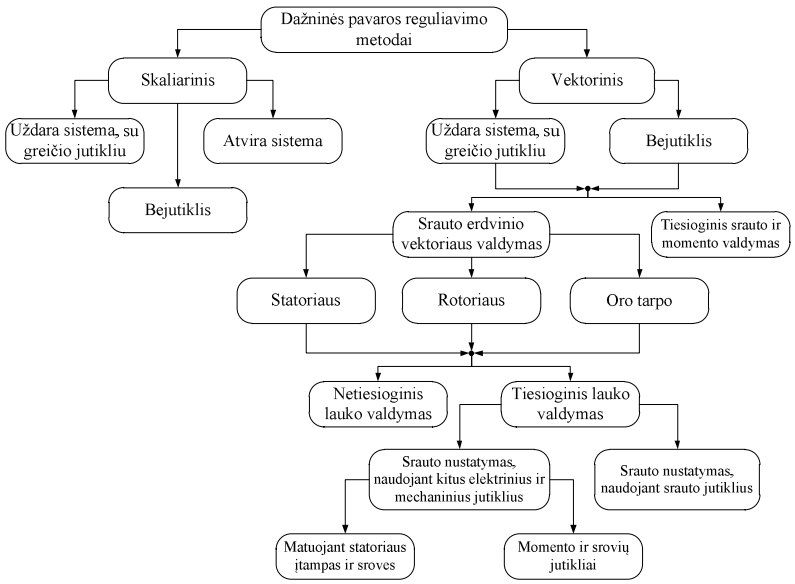
Paprastai naudojamos šios dažninio valdymo uždarosios sistemos: stabilizuojant greitį be srauto stabilizacijos; stabilizuojant srautą ir greitį; stabilizuojant momentą (srautą arba statoriaus srovę bei absoliutų slydimą); reguliuojant srautą pagal apkrovą ir stabilizuojant absoliutų slydimą; reguliuojant srautą pagal apkrovą be absoliutaus slydimo stabilizavimo; optimalios ir kvazioptimalios su kintamąja struktūra. Norint pasiekti didesnį greičio reguliavimo diapazoną, reikia naudoti dažnines AV pavaras su impulso pločio moduliacija [17].

3.3. DAŽNINIŲ PAVARŲ VALDYMO METODAI

Kintamosios srovės valdomose elektros pavarose varikliu greitis reguliuojamas šiais pagrindiniais budais: dažniniu, parametriniu ir pakopiniu.

Perspektyviausios yra dažninės kintamosios srovės elektros pavaros, kurioms naudojami asinchroniniai arba sinchroniniai kintamosios srovės varikliai. Šių pavarų charakteristikos yra artimiausios nuolatinės srovės pavarų, valdomu reguliuojant inkaro įtampą, charakteristikoms.

Dažninių elektros pavarų reguliavimo metodų klasifikacija pateikta 3.8 paveiksle [16].

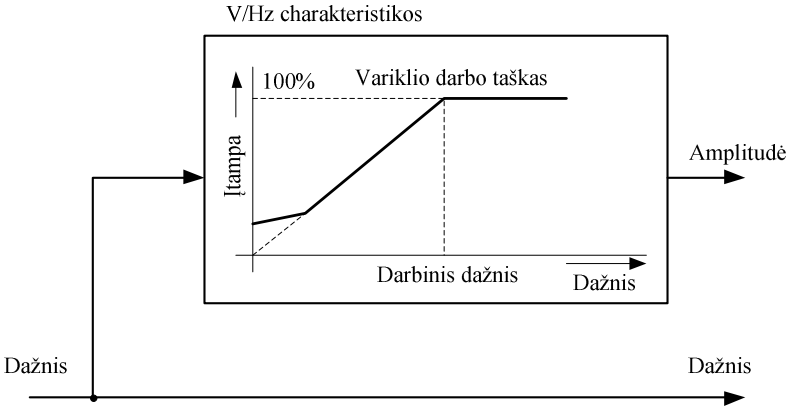


3.8 pav. Dažninių pavarų reguliavimo metodų klasifikacija

3.3.1. Pagrindiniai skaliarinio valdymo metodo principai

Įvairiuose procesuose, kur nereikalingas tikslus variklio greičio reguliavimas ir palaikymas, dažniausiai naudojami paprasti dažnio keitikliai su realizuotu skaliariniu kintamųjų valdymu. Vienas iš populiariausių skaliarinio valdymo metodų yra vadinamas V/Hz (įtampos/dažnio) metodas. Šiuo metodu valdomi kintamųjų: dažnio ir įtampos (ar srovės) dydžiai. Šis skaliarinio valdymo metodas naudojamas kintamosios srovės variklio greičio valdymui dėl jo labai paprasto realizavimo. Be to, V/Hz metode nebūtinas greičio grįžtamasis ryšys.

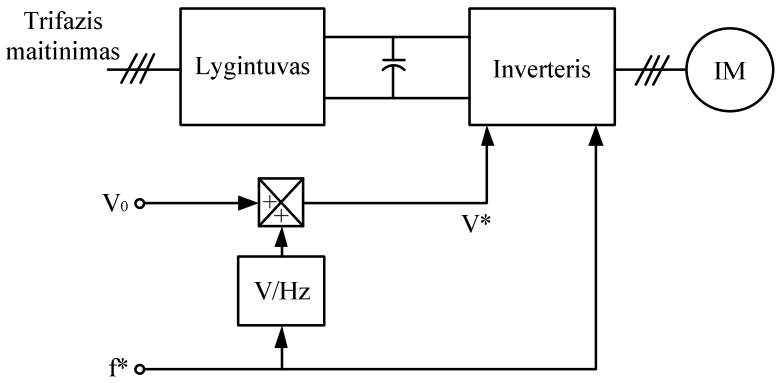
Šio metodo principas – išlaikyti tarp statoriaus ir rotoriaus pastovų srautą, taip padidinamas efektyvumas paleidimo metu [3]. Nusistovėjusiame variklio veikimo režime srautas oro tarpe apytiksliai lygus santykiui V_s/f_s. (V_s – variklio fazinės įtampos amplitudė; o f_s – elektrinis dažnis, kuriuo maitinamas variklis). Šio metodo valdymo sistema pateikta 3.9 pav.



3.9 pav. V/Hz valdymo metodas

Charakteristika aprašoma darbiniu variklio tašku, žemiau kurio dėl pastovaus Vs/fs santykio variklis veikia esant optimaliam žadinimui. Aukščiau šio taško naudojamas variklis lieka iki galo nesužadintas dėl įtampos stokos nuolatinės srovės linijoje. Kai dažnis mažėja iki žemo greičio srities, artimos nuliui, dėl įtampos kritimo statoriaus varžoje įtampa mažėja ir gali tapti lygi nuliui. Todėl naudojama papildoma įtampa U_0 skirta statoriaus varžos įveikimui, kad nulinio greičio srityje būtų gaunamas pilnas momentas. Dažnio keitikliuose naudojamas fazės srovės grįžtamasis ryšis tam, kad padidėjus momentui būtų padidinta U_0 įtampa. Nusistovėjusio režimo metu pradėjus didinti dažnį gali pasireikšti momento trūkčiojimas ir variklio veikimas taps nestabilus. Toks pats veikimas pasireikš mažinant dažnį. Todėl variklio greitėjimo ir lėtėjimo metu dažnis turi sekti greitį taip, kad slydimas neleistų padidėti momento trūkčiojimams.

Atviroji (be greičio grįžtamojo ryšio) skaliarinio valdymo sistema parodyta 3.10 pav. [16].



3.10 pav. Atviroji skaliarinio valdymo sistema

Pavaros charakteristikų pagerinimui buvo pasiūlyta V/Hz metodo uždarojo kontūro sistema. Šioje sistemoje greičio jutiklis matuoja variklio veleno greitį, o sistema įvertina jį, t. y. esamas greičio signalas lyginamas su reikiamu ir skirtumas paduodamas į PI pagrindu realizuotą greičio reguliatorių, kuris generuoja signalą reikalingam variklio dažniui. Daugumoje pavarų naudojamas uždarojo kontūro V/Hz sistema dėl paprasto ir santykinai gero greičio reguliavimo, bet, aišku, charakteristikos neprilyginamos servopavaroms su dinaminiais momento ir greičio pokyčiais.

Pagrindiniai skaliarinio valdymo metodo principai [16]:

1. Kai palaikomas pastovus maitinimo įtampos ir dažnio santykis.
2. Kai palaikomas pastovus statoriaus srovės ir slydimo dažnio santykis.
3. Nepriklausomas sukimo momento ir rotoriaus srauto valdymas.

Palaikomas pastovus maitinimo įtampos ir dažnio santykis

Palaikant pastovų įtampos ir dažnio santykį ($U_f = const$), oro tarpe galima palaikyti pastovų magnetinį srautą. Statoriaus įtampa ir sukimo elektromagnetinis momentas išreiškiamas:

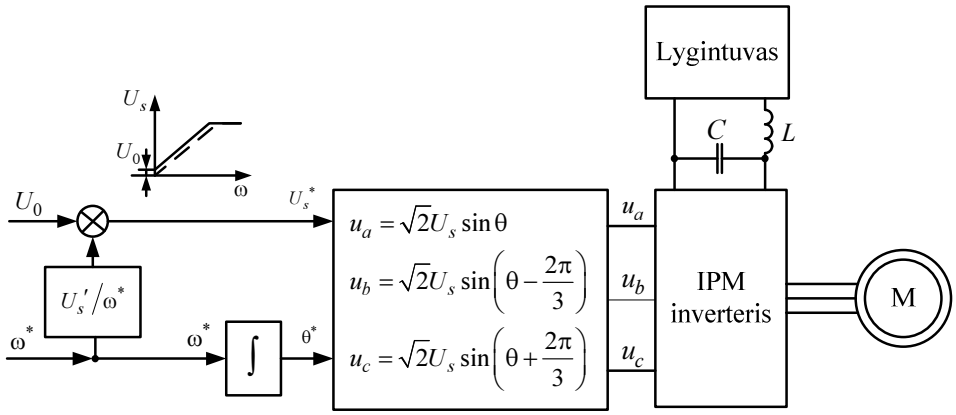
$$U_s = I_m \sqrt{R_s^2 + \left(\omega_e L_m^2\right) + \left(\frac{\omega_{sl} R_s}{\omega_e R_r}\right)^2}; \tag{3.1}$$

$$M_e = 3\left[\frac{p}{2}\right]\frac{R_r}{s\omega_e}\frac{U_s^2}{\left[\left(R_s + R_r / s\right)^2 + \omega_e^2 (L_{ls} + L_{lr})^2\right]}. \tag{3.2}$$

Tipinė atvira skaliarinio valdymo sistemos schema pateikta 3.11 paveiksle [16]. Galios dalį sudaro lygintuvas ir inverteris, ω^* – sukimo greičio nuostato signalas, (galime jį laikyti rotoriaus sukimosi greičiu ω_r, jei paneigiame rotoriaus slydimo sukimosi greitį ω_{sl}), U_0 – papildoma įtampa, kuri leidžia gauti pakankamą momentą esant mažiems greičiams.

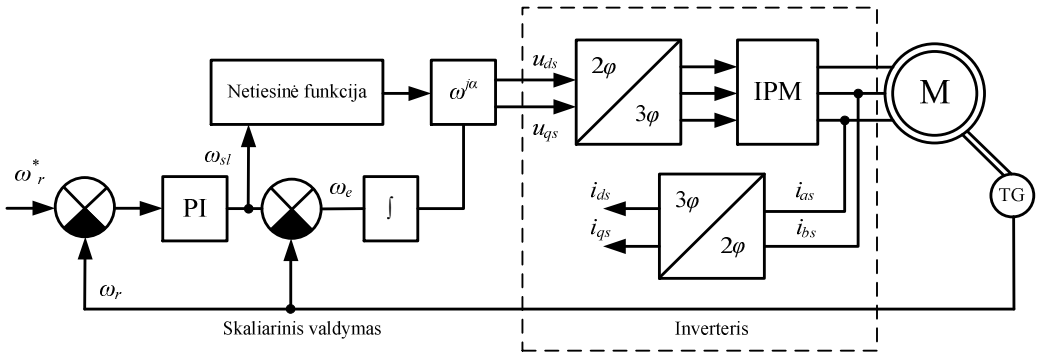
Kampinis greitis ω^* yra integruojamas, o gautas kampas θ^* ir įtampa U_s^* naudojant paveiksle parodytas formules paverčiami trifaze įtampų sistema.

Tokios sistemos dažniausiai naudojamos pompose ar ventiliatoriuose, kur tikslumas nėra labai svarbu. Padidėjus apkrovos momentui sumažės pavaros greitis, nes čia nėra greičio grįžtamojo ryšio. Sukimo momentas ir srautas yra glaudžiai susiję su statoriaus srovės verte ir jai bent kiek pasikeitus pasikeičia ir srauto dydis, o tai turi įtakos lėtai sistemos sukimo momento reakcijai.



3.11 pav. Atvira skaliarinio valdymo sistema, kai $U_f = const$

Tipinė skaliarinio valdymo sistemos schema su greičio signalo grįžtamuoju ryšiu pateikta 3.12 paveiksle. Greičio reguliavimui naudojamas PI reguliatorius. Greičio matavimui galima naudoti tachogeneratorių arba enkoderį.



3.12 pav. Uždara skaliarinio valdymo schema, kai $U_f = const$

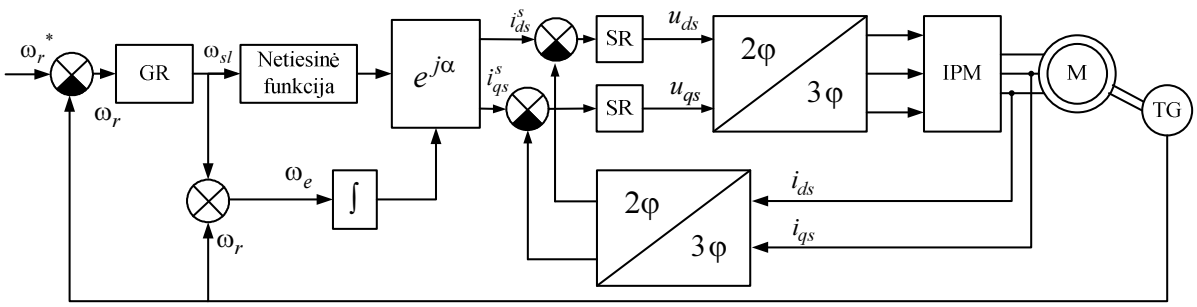
Palaikomas pastovus statoriaus srovės ir slydimo dažnio santykis

Santykis tarp statoriaus srovės ir slydimo greičio ω_{sl} išreiškiamas formule [3]:

$$I_s = I_m \frac{\omega_{sl}\left(\frac{\sigma_r}{1+\sigma_r}\right)\tau_r + 1}{1+\omega_{sl}\tau_r}, \tag{3.3}$$

čia: τ_r – rotoriaus laiko pastovioji; σ_r – rotoriaus sklaidos faktorius.

Srautą oro tarpe yra įmanoma išlaikyti pastovų, valdant statoriaus srovės vertę. Tokios pavaros schema parodyta 3.13 paveiksle [3].



3.13 pav. Skaliarinis valdymo metodas, kai $I_s / s = const$

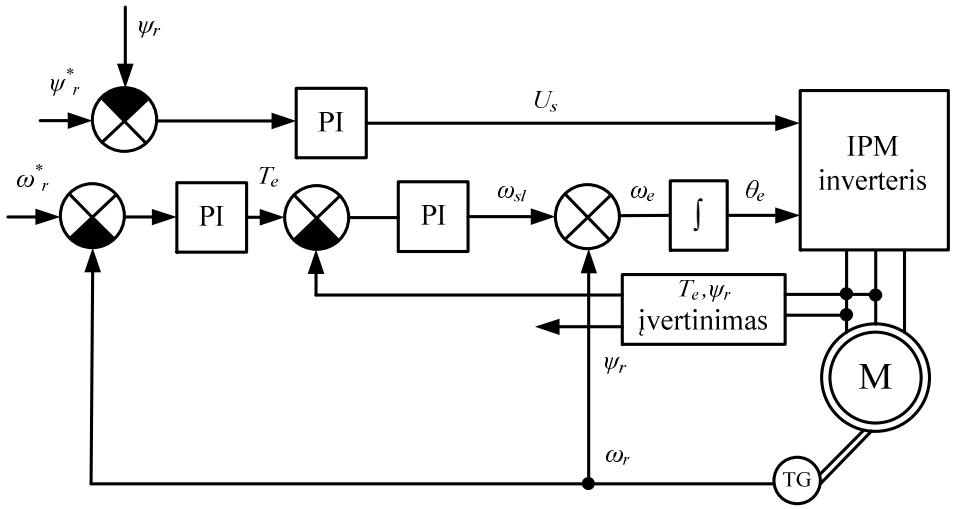
Šis valdymo metodas gali apriboti sukimo momentą ir srovę, tačiau ryšys tarp srauto ir sukimo momento išlieka labai glaudus, taip veikdamas lėtą sistemos reakciją.

Nepriklausomas sukimo momento ir rotoriaus srauto valdymas

Tais atvejais, kai didinamas srautas, variklis įsisotina. Šiai problemai išvengti naudojamas nepriklausomas momento ir srauto valdymo algoritmas pateiktas 3.14 paveiksle [3]. Akimirkinės statoriaus srauto ir sukimo momento vertės apskaičiuojamos pagal matuojamas įtampas ir sroves. Tinkamai parenkant tranzistorių raktų būsenas galima tiesiogiai ir nepriklausomai valdyti sukimo momentą ir srautą. Nepriklausomas momento ir srauto reguliavimo algoritmas yra kur kas paprastesnis nei vektorinio valdymo metodas, nes nereikalauja koordinačių transformacijų iš stacionarios i sinchroniškai besisukančią sistemą.

Be to, nenaudojamas impulsų pločio moduliatorius ir mechaniniai veleno padėties jutikliai. Šis reguliavimo metodas veikia *d – q* su statoriumi susietoje stacionarioje koordinačių sistemoje. Didelis šio reguliavimo metodo privalumas yra tai, kad formuojant impulsines išėjimo įtampas,

galima pasiekti greitą sukimo momento atsaką į apkrovą, sumažinti inverterio raktų persijungimo dažnį ir artimą sinusinei pirmosios harmonikos formą.



3.14 pav. Nepriklausomas momento ir srauto valdymas

Visuose skaliarinio valdymo būduose galima panaudoti standartinius PI reguliatorius. Momento reguliatoriaus išėjimo signalas yra slydimo dažnis, kuris turi buti apribotas, atsižvelgiant į didžiausia momentą. Taikant skaliarinį valdymą, nusistovėjusi greičio reikšmė randama iš mechaninės charakteristikos ir nedaug skiriasi nuo nuostato, tačiau įrenginiuose, kuriuose reikalinga tiksli pavaros dinamika, šie reguliatoriai nerekomenduojami.

3.3.2. Apkrovų pobūdžiai

Pastoviam sukimo momentui palaikyti, variklyje reikia išlaikyti pastovų magnetinį srautą oro tarpe, kuris proporcingas statoriaus apvijų srovei I_s, kuri yra įmagnetinimo reaktyviosios I_m ir aktyviosios I_r srovių vektorių suma [2]. Rotoriaus srovė išreiškiama:

$$I_r(s) = \frac{U_s}{\sqrt{R_r^2 + (X_{s\sigma} + X_{r\sigma})^2}}; \tag{3.4}$$

čia I_r – rotoriaus srovė; U_s – statoriaus maitinimo įtampa; $X_{s\sigma}, X_{r\sigma}$ – statoriaus ir rotoriaus sklaidos varža; *s* – slydimas.

Aktyvioji rotoriaus srovės dedamoji kurianti rotoriaus sukimo momentą priklauso nuo mechaninės rotoriaus apkrovos ir yra proporcinga slydimui. Padidėjus apkrovai padidėja ir

slydimo greitis. Veikiant varikliui tuščiąja veika sumažėja slydimas, o tuo pačiu ir srovės vertė. Ši srovė tiesiogiai proporcinga statoriaus įtampai.

Praktikoje dažniausiai sutinkami šie statinės apkrovos variantai: kai sukimo momentas pastovus, kai galia išlieka pastovi ir veikiant ventiliatorinei apkrovai.

Taigi esant statinei veleno apkrovai $M_{st} = const$, turi būti išlaikyta sąlyga:

$$\frac{U_s}{f} = const; \tag{3.5}$$

t. y. esant pastoviam statiniam apkrovos momentui, maitinimo šaltinio įtampos amplitudės dydis turi keistis proporcingai jo dažniui. Toks reguliavimas vadinamas tiesiniu. Siekiant išlaikyti pastovią galią naudojamas toks įtampos reguliavimo dėsnis:

$$\frac{U_s}{\sqrt{f}} = const. \tag{3.6}$$

Esant pastoviai apkrovos galiai, maitinimo šaltinio įtampos amplitudė yra tiesiai proporcinga kvadratinei šakniai iš maitinimo tinklo dažnio.

Esant ventiliatorinei apkrovai, maitinimo šaltinio įtampos amplitudė turi būti atvirkščiai proporcinga maitinimo tinklo dažnio kvadratui:

$$\frac{U_s}{f^2} = const. \tag{3.7}$$

Šis dėsnis vadinamas kvadratinio valdymo dėsniu.

3.3.3. 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 keitiklius, 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 realizuotis 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 monografijų, 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 srovė variklio momentui, kuris proporcingas inkaro srovei ir pagrindiniam magnetiniam srautui.

Vektoriaus, pagal kurį orientuojama koordinačių sistema, pasirinkimas yra laisvas ir nusakomas paprastumu bei AV modelio realizavimo galimybe [16].

3.3.4. Vektorinis asinchroninių elektros pavarų valdymo metodas

Trifaziame variklyje, veikiančiame varikliniu režimu, fazinės srovės valdomos taip, kad sukurtų sukamąjį magnetinį lauką ir rotorius suktųsi ta pačia kryptimi kaip ir laukas. Tuomet tinkamai valdant statoriaus sroves, t. y. valdant abiejų srovės dedamųjų amplitudes transformuotoje koordinačių sistemoje, sudaromas vektorius, kuris seka statoriaus ir rotoriaus magnetinius laukus viso sukimosi metu. Toks valdymas vadinamas erdviniu srovės vektoriaus valdymu [13].

Vektorinė dažninė pavara veikia kaip nepriklausomo žadinimo nuolatinės srovės pavara. Ši analogija parodyta 3.15 ir 3.16 paveiksle [2].

Paneigus inkaro reakciją ir įsisotinimą nuolatinės srovės mašinos kuriamą momentą galime užrašyti:

$$M_e = K_t^{'} I_f I_a; \tag{3.8}$$

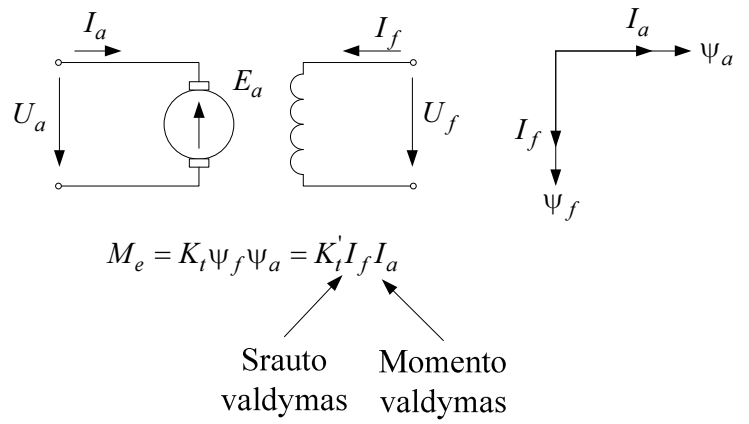
čia $K_t^{'}$ – kiekvienai mašinai pastovus koeficientas, I_f – žadinimo srovė, I_a - inkaro srovė.

Nuolatinės srovės mašinos konstrukcija yra tokia, kad žadinimo srautas Ψ_f, kuriamas žadinimo srovės I_f yra statmenas inkaro srovės I_a kuriamam srautui Ψ_a. Vektoriai I_a ir I_f yra statmeni vienas kitam (atsieti), todėl keičiant srovę I_a valdomas variklio momentas M_e, tačiau tai nekeičia žadinimo srauto Ψ_f, kuris išlieka pastovus. Inkaro žadinimo srautas Ψ_a taip pat nepriklauso nuo valdomo žadinimo srauto Ψ_f.

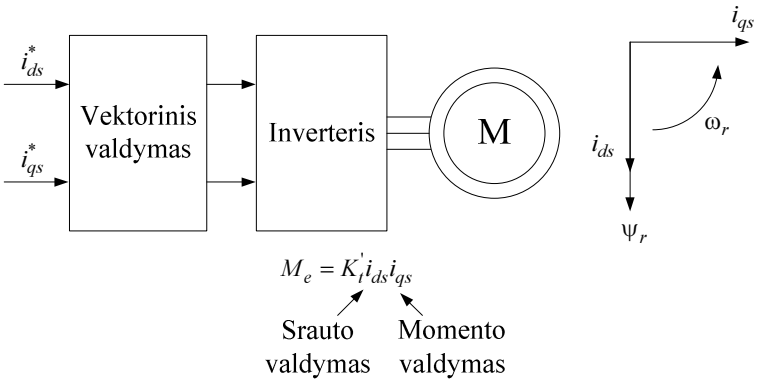
Asinchroninės mašinos valdymas nagrinėjamas sinchroniniu greičiu besisukančioje koordinačių sistemoje ($d^e - q^e$), kurioje sinusiniai dydžiai pasikeičia į nuolatinius. 4.15 paveiksle parodyta asinchroninė pavara su dviem valdymo įėjimais i_{ds}^* ir i_{qs}^*, tai yra statoriaus srovės realioji ir menamoji dalys. Vektoriniu būdu valdant pavarą i_{ds} atitinka nuolatinės srovės pavaros žadinimo srovę I_f, o i_{qs} inkaro srovę I_a. Kuriamą elektromagnetinį momentą galime užrašyti:

$$M_e = K_t^{'} i_{ds} i_{qs}. \tag{3.9}$$

Vektorinio valdymo metu srovės i_{ds} vektorius atitinka rotoriaus srauto vektorių Ψ_r, o i_{ds} vektorius yra statmenas i_{qs} srovės vektoriui, kaip parodyta 3.15 paveiksle.



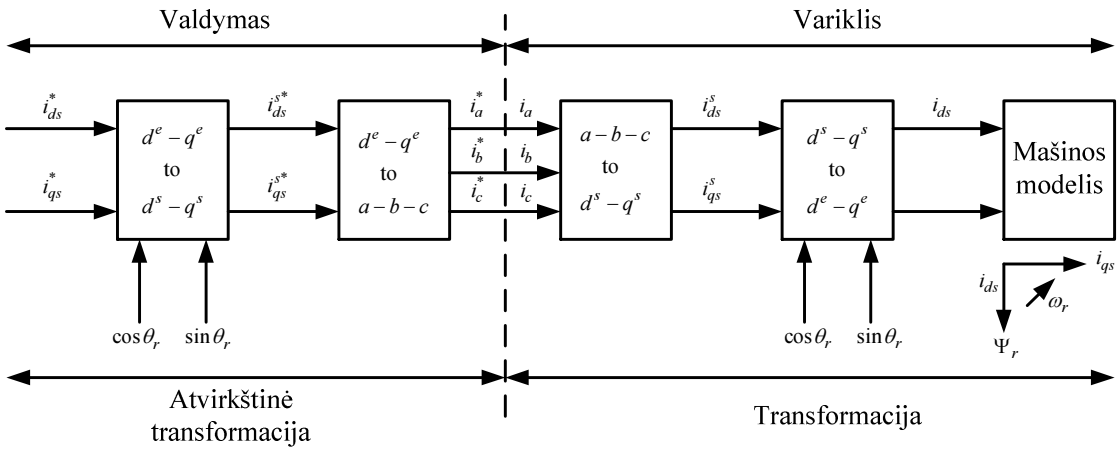
3.15 pav. Nepriklausomo žadinimo nuolatinės srovės pavara



3.16 pav. Vektorinė dažninė pavara

Varikliui valdyti pakanka tik dviejų srovių dedamųjų. Viena srovės dedamoji i_{ds} yra išilginė ir susieta tiktai su statoriaus magnetiniu srautu. Tai yra srovė, kuri kuria magnetinį lauką, ir veikdama asinchroninio variklio rotorių, priverčia jį pasisukti ta pačia kryptimi. Jeigu valdymui būtų naudojama tik ši srovė, tai judesys būtų žingsninis ir jį butų galima valdyti, keičiant statoriaus srauto padėtį viso apsisukimo metu [2].

Vektorinio pavaros valdymo principą galima paaiškinti, remiantis 3.17 paveikslu [3]. Čia variklio modelis atvaizduotas sinchroniškai besisukančioje koordinačių sistemoje. Inverteris, kuris šiame paveiksle nepavaizduotas, generuoja sroves i_a, i_b, i_c. Šios srovių vertės transformuojamos į dvifazės stacionarios koordinačių sistemos kintamuosius $d^s - q^s$ ir toliau transformuojamos į sinchroniniu greičiu besisukančios koordinačių sistemos $d^e - q^e$ kintamuosius, ir atvirkščiai. Atlikus pastarąsias variklio srovių transformacijas, gaunamos stacionarios koordinačių sistemos $i_{ds} - i_{qs}$ srovių vertės.



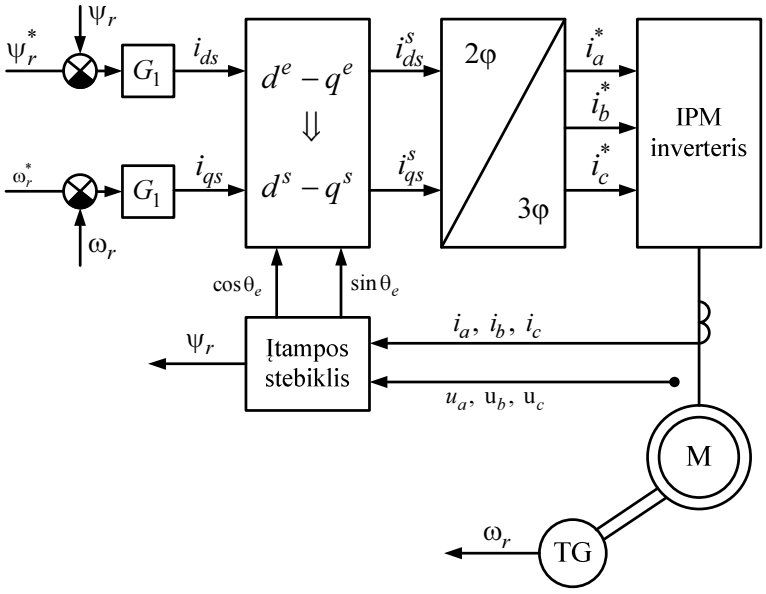
3.17 pav. Trifazės sistemos keitimas į dvifazę sistemą

Yra žinomi du pagrindiniai vektorinio valdymo metodai. Vienas jų vadinamas tiesioginio arba grįžtamojo ryšio vektorinio valdymo metodu, kuri aprašė F. Blaschke (Blaschke 1972). Antrasis yra netiesioginio valdymo metodas, kuri atrado Hasse (Hasse 1969).

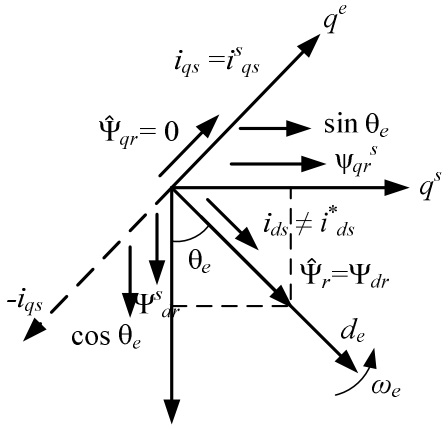
Pagrindinis šių metodu skirtumas yra bazinių vektorių $\cos\theta_e$ ir $\sin\theta_e$ formavimo budai valdymo signalams formuoti. Srovės komponentės i_{ds} kryptis gali buti sutapdinama su rotoriaus srautu ψ_r, srautu oro tarpe ψ_m arba statoriaus srautu ψ_s.

Tiesioginis rotoriaus srauto erdvinio vektoriaus valdymas

Tiesioginio rotoriaus srauto erdvinio vektoriaus valdymo algoritmo struktūrinė schema pateikta 3.18 paveiksle [3]. Vektorių diagrama, rodanti rotoriaus srauto padėtį, pateikta 3.19 paveiksle. Srauto ψ^s_{dr} ir ψ^s_{qr} signalai apskaičiuojami iš pavaros įtampų ir srovių verčių pritaikant įtampos stebiklį. Srauto reguliavimo kontūras padidina reguliavimo tikslumą. Srovės dedamąją, kuriančią srautą, generuoja greičio kontūras su įtampos ribotuvu.



3.18 pav. Rotoriaus srauto erdvinio vektoriaus valdymo struktūrinė schema



3.19 pav. $d^s - q^s$ ir $d^e - q^e$ vektorių diagrama rotoriaus srauto padėties atžvilgiu

Iš 3.19 paveikslo galima užrašyti:

$$\psi_{dr}^s = \hat{\psi}_r \cos\theta_e; \tag{3.10}$$

$$\psi_{qr}^s = \hat{\psi}_r \sin\theta_e; \tag{3.11}$$

arba

$$\cos\theta_e = \frac{\psi_{dr}^s}{\hat{\psi}_r}. \tag{3.12}$$

Srauto amplitudė užrašoma:

$$\hat{\psi}_r = \sqrt{{\psi^s_{dr}}^2 + {\psi^s_{qr}}^2}. \tag{3.13}$$

Reguliuojant pavaras šiuo metodu, pereinamųjų vyksmu sparta bus artima nuolatinės srovės pavaroms, todėl kad momentas, valdomas srovės i_{qs} dedamąja, nepriklauso nuo srauto. Vektorinės dažninės pavaros valdymo spartumą riboja delsa inverteryje ir lėtas skaitmeniniu signalu apdorojimas. Esant mažiems dažniams, statoriaus įtampos dedamosios u^s_{ds} ir u^s_{qs} yra labai mažos, todėl šį metodą, kai greitis artimas nuliui, pavarai valdyti nerekomenduojama naudoti.

Kaip jau buvo minėta, pavaros valdymo tikslumą ir apskaičiuotų parametrų vertes veikia statoriaus varžos R_s dydis ir induktyvumų L_{ls}, L_{lr}, L_m kitimas. Esant mažiems greičiams rekomenduojama naudoti srovės stebiklio modelį, kuris tiksliau nustato rotoriaus srauto dedamąją. Rotoriaus srauto išraiškos $d^s - q^s$ sistemoje išreiškiamos lygtimis:

$$\frac{d\psi^s_{dr}}{dt} + R_r i^s_{dr} + \omega_r \psi^s_{qr} = 0; \tag{3.14}$$

$$\frac{d\psi^s_{qr}}{dt} + R_r i^s_{qr} - \omega_r \psi^s_{dr} = 0; \tag{3.15}$$

Pridėjus papildomus narius $(L_m R_r / L_r) i^s_{ds}$ ir $(L_m R_r / L_r) i^s_{qs}$ abiejose formulių (3.14) ir (3.15) pusėse, gaunama:

$$\frac{d\psi^s_{dr}}{dt} + \frac{R_r}{L_r}(L_m i^s_{ds} + L_r i^s_{dr}) + \omega_r \psi^s_{qr} = \frac{L_m R_r}{L_r} i^s_{ds}; \tag{3.16}$$

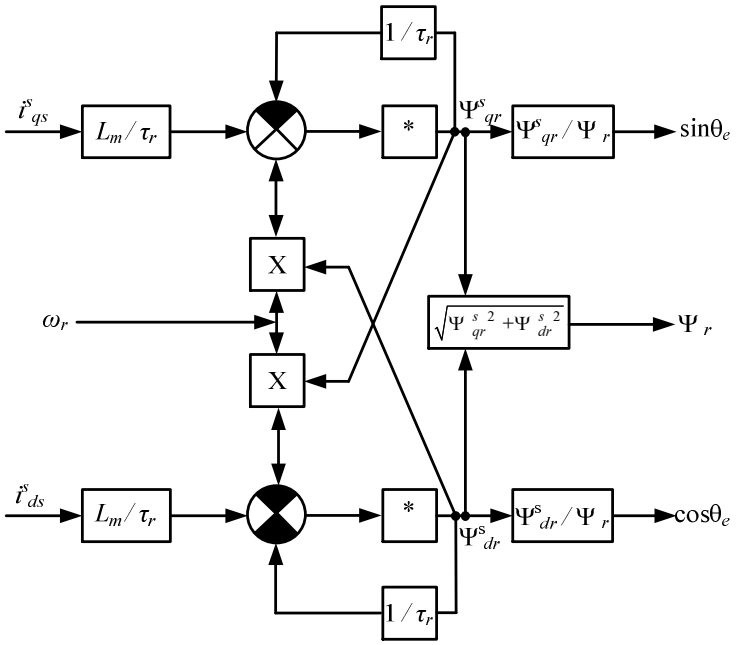
$$\frac{d\psi^s_{qr}}{dt} + \frac{R_r}{L_r}(L_m i^s_{qs} + L_r i^s_{qr}) - \omega_r \psi^s_{dr} = \frac{L_m R_r}{L_r} i^s_{qs}. \tag{3.17}$$

Įvertinus lygtis (3.16), (3.17) ir supaprastinus, gaunama rotoriaus srautų kaip statoriaus srovių ir greičio funkcijų išraiškos:

$$\frac{d\psi^s_{dr}}{dt} = \frac{L_m}{\tau} i^s_{ds} - \omega_r \psi^s_{qr} - \frac{1}{\tau}\psi^s_{dr}; \tag{3.18}$$

$$\frac{d\psi^s_{qr}}{dt} = \frac{L_m}{\tau_r} i^s_{qs} + \omega_r \psi^s_{dr} - \frac{1}{\tau_r}\psi^s_{qr}. \tag{3.19}$$

Srautų įvertinimo modelis sudarytas remiantis (3.18) ir (3.19) formulėmis, jas pirmasis suformulavo F. Blaschke. Bet kuriam dažniui tinkamas srovės modelis, sudarytas pagal F. Blaschkės formules, pateiktas 3.20 paveiksle [16].



3.20 pav. Blaschkės srovės modelis

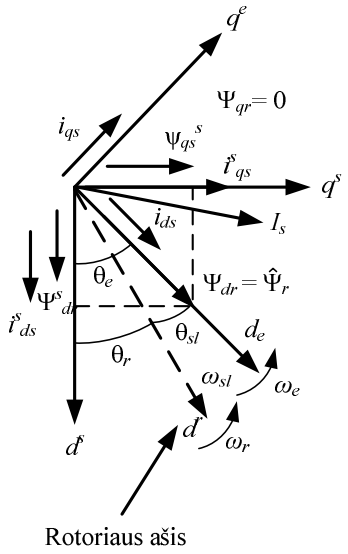
Naudojant šį srovių modelį srautui nustatyti reikalingas greičio jutiklis. Šio metodo privalumas yra tas, kad tikslus pavaros greičio valdymas gali buti ir esant dažniui, artimam nuliui. Tačiau dėl įšilimo rotoriaus varžos kitimas gali siekti iki 50 %, todėl sumažėja pavaros parametrų nustatymo tikslumas [16].

Netiesioginis rotoriaus srauto erdvinio vektoriaus valdymas

Didelio susidomėjimo susilaukė netiesioginio vektorinio valdymo metodas, kuris dažnai naudojamas pramonės įrenginiuose. Šio metodo veikimo principas gali buti paaiškintas, remiantis 3.21 paveiksle [16] pateikta erdvinių vektorių diagrama. Čia $d^s - q^s$ ašys yra tvirtai susietos su statoriumi, bet $d^r - q^r$ ašys, susietos su rotoriumi, sukasi greičiu ω^r, kaip pavaizduota paveiksle. Sinchroniškai besisukančios ašys $d^e - q^e$ juda aplenkdamos $d^r - q^r$ ašis kampu θ_{sl} atitinkančiu slydimo dažnį ω_{sl}. Iš pateiktos vektorių diagramos matosi, kad statoriaus srauto dedamąją i_{ds} sutapatinus su d^e ašimi o srovės momento i_{qs} dedamąją, sutapatinus su q^e ašimi, jas galima valdyti atskirai, kadangi i_{ds} dedamoji kuria srautą, kuris

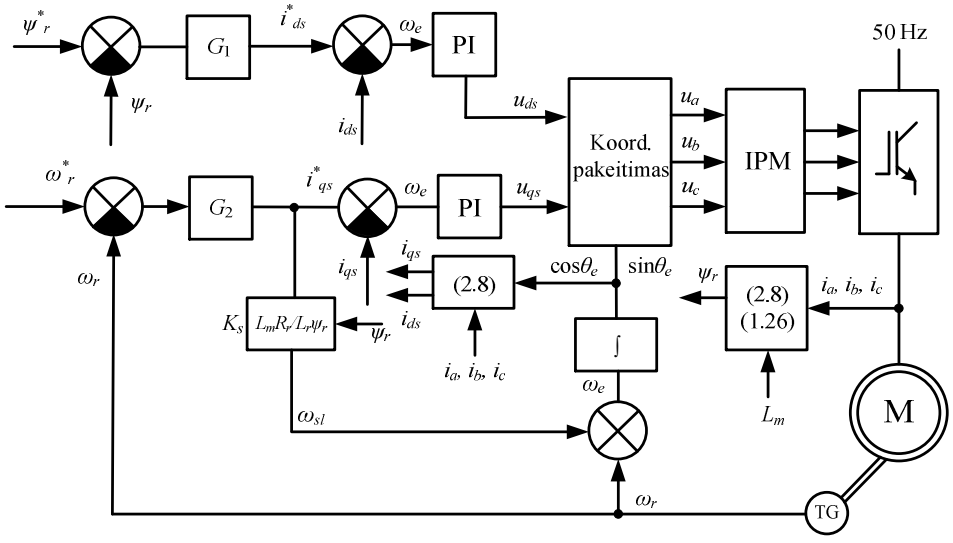
paprastai palaikomas pastovus, o nuo i_{qs} dedamosios priklauso variklio momentas. Todėl kampą θ^e galime užrašyti:

$$\theta_e = \int \omega_e dt = \int (\omega_r + \omega_{sl}) dt = \theta_r + \theta_{sl}. \qquad (3.20)$$



3.21 pav. Netiesioginio vektorinio pavaros valdymo metodo vektorių diagrama

Netiesioginio erdvinio vektoriaus rotoriaus srauto valdymo schema pateikta 3.22 paveiksle [16]. Į K_s bloką įeina visi variklio parametrai, nuo kuriu priklauso variklio būsena. Greičio valdymo grandinė generuoja momento srovės dedamoji i_{qs}, o tuo metu srovės dedamoji i_{ds}, nuo kurios priklauso rotoriaus srautas, randama iš išraiškos:



3.22 pav. Netiesioginis erdvinio vektoriaus rotoriaus srauto valdymas

Siekiant suprastinti sistema, i_{ds}^{*} laikoma pastovia. Abipusio induktyvumo pokyčiai proceso metu gali sukelti kuriamo srauto vektoriaus kampo kitimą. Vektorių dydžių priklausomybės pavaizduotos 3.21 paveiksle. Valdant pavarą vektoriniu valdymo metodu, variklio greitis valdomas nenukrypstant nuo 2 % greičio nuostato, tačiau srovės modelis gali veikti nuo nulinio greičio [16].

Tiesioginis statoriaus srauto erdvinio vektoriaus valdymas

Taikant statoriaus srauto erdvinio vektoriaus valdymo metodą, rotoriaus srauto pokytis, atsiradęs dėl statoriaus varžos R_s kitimo, įvertinamas tiksliau. Tačiau srauto ir momento valdymo kanalai nėra atsieti ir todėl pakeitus srautą keičiasi ir momentą kurianti srovės komponentė [2].

Reguliavimo principai sudaryti pagal formules, užrašytas $d^e - q^e$ sinchroniškai besisukančioje koordinačių sistemoje

Statoriaus srautų išraiškos $d^e - q^e$ koordinačių sistemoje:

$$\psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr}; \tag{3.21}$$

$$\psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr}; \tag{3.22}$$

arba

$$i_{dr} = \frac{\psi_{ds}}{L_m} - \frac{L_s}{L_m} i_{ds}; \tag{3.23}$$

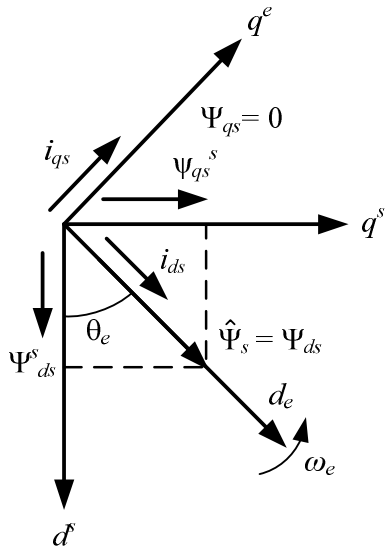
$$i_{qr} = \frac{\psi_{qs}}{L_m} - \frac{L_s}{L_m} i_{qs}. \tag{3.24}$$

Įrašius gautas (3.21), (3.22) išraiškas į (3.23) ir (3.24) gauname:

$$\psi_{dr} = \frac{L_r}{L_m}\psi_{ds} + \left(L_m - \frac{L_s L_r}{L_m} \right) i_{ds}; \tag{3.25}$$

$$\psi_{qr} = \frac{L_r}{L_m}\psi_{qs} + \left(L_m - \frac{L_s L_r}{L_m} \right) i_{qs}. \tag{3.26}$$

Išraiškos (3.25) ir (3.26) suriša statoriaus ir rotoriaus srautus su statoriaus srovėmis. Statoriaus srauto erdvinio vektoriaus valdymo vektorių diagrama parodyta 3.23 paveiksle. Iš jo matome, kad $\psi_{qs} = 0,\ \psi_{ds} = \hat{\psi}_s$.



3.23 pav. Statoriaus srauto erdvinių vektorių diagrama

Rotoriaus slydimo kampinis sukimo greitis:

$$\omega_{sl} = \frac{(1+\sigma s\tau_r)L_s i_{qs}}{\tau_r(\psi_{ds} - \sigma L_s i_{ds})}; \tag{3.27}$$

o srovė randama taip:

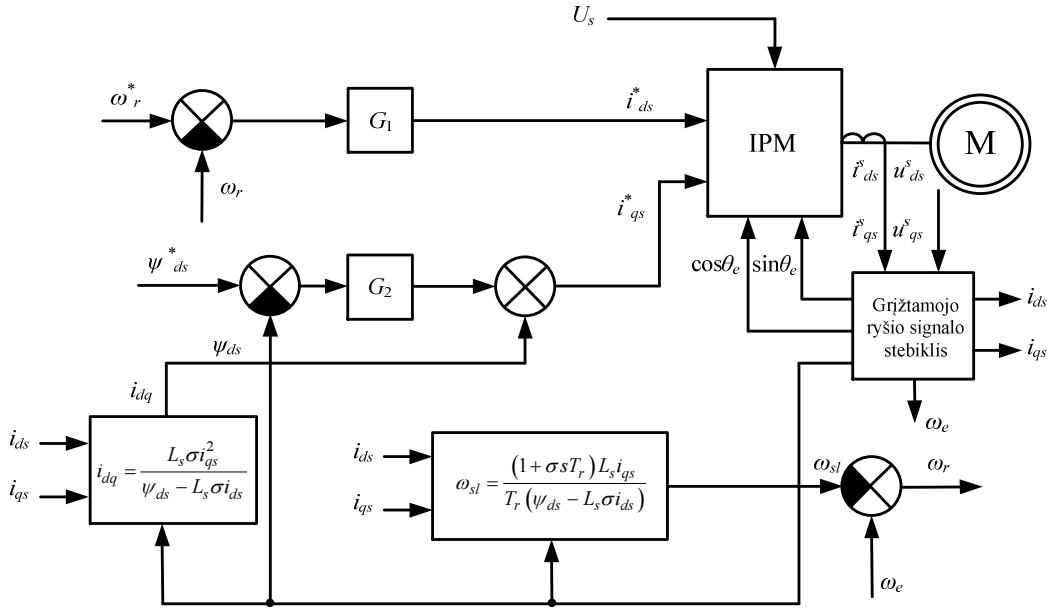
$$i_{dq} = \frac{\sigma L_s i_{qs}^2}{(\psi_{ds} - \sigma L_s i_{ds})}. \tag{3.28}$$

Lygtis (3.28) rodo, kad i_{dq} yra i_{qs} , i_{ds}, ψ_{ds} funkcija.

Bendra kuriamo momento išraiška užrašyta (3.29), o esant vektoriniam valdymui $\psi_{qs} = 0$:

$$M_e = \frac{3}{2}\left(\frac{p}{2}\right)\psi_{ds} i_{qs}. \tag{3.29}$$

3.24 paveiksle pateikta statoriaus srauto erdvinio vektoriaus valdymo funkcinė schema [2].



3.24 pav. Statoriaus srauto erdvinio vektoriaus valdymo funkcinė schema

Pastebėta, kad srovės i_{ds} tikslumas labai priklauso nuo variklio parametru kitimo, naudojant grįžtamąjį ryšį, tačiau į jį galima neatsižvelgti. Nepaisant šio trūkumo, valdymas turi privalumų, nes statoriaus srauto erdvinio vektoriaus signalas gaunamas integruojant įtampą, o modelyje lieka priklausomybė nuo statoriaus varžos, kuri lengvai gali buti kompensuojama. Variklio rotoriaus kampinis sukimosi greitis ω_r apskaičiuojamas iš kampinio sukimosi greičio ω_e atėmus rotoriaus kampinį slydimo sukimosi greitį ω_{sl} apskaičiuotą pagal (3.27) [2].

3.4. REGULIATORIŲ APŽVALGA

Reguliatorius arba kompensatorius – automatinio valdymo teorijoje valdymo sistemos dalis, tiesiogiai arba netiesiogiai stebinti valdomą objektą ir generuojanti valdymo signalus.

Paprastai reguliatoriai dirba neigiamojo grįžtamojo ryšio principu, kad kompensuotų išorinius trikdžius ir palaikytų sistemą pageidaujamoje būsenoje. Tačiau kartais naudojamas ir tiesioginis ryšys, kai valdymo signalai generuojami nepriklausomai nuo valdomo objekto būklės.

Pagrindine sąlyga, parenkant reguliatorių, yra reguliavimo kokybė, lemianti technologinio režimo tikslumą, kurį palaiko automatikos įtaisai, o taip pat ekonominis efektyvumas. Reguliatoriaus parinkimas suprantamas kaip reguliavimo dėsnio ir atitinkamo reguliatoriaus tipo parinkimas. Kad reguliavimo procesas įgautų pageidaujamą pobūdį, būtina užtikrinti atitinkamas

reguliavimo sistemos dinamines savybes. Kadangi reguliavimo objekto dinaminių savybių neįmanoma keisti, tai norimą reguliavimo kokybę galima pasiekti tik parenkant tinkamą reguliavimo dėsnį [1].

Pirmiausia būtina nustatyti kokiai grupei turi priklausyti parenkamas reguliatorius. Tai galima padaryti apytikriai aproksimavus reguliavimo objektą aperiodine grandimi su vėlavimu ir turint T_a ir τ_a. Čia τ_a objektą aproksimuojančios perdavimo funkcijos vėlavimas, T_a – laiko pastovioji.

- Kai $\tau_a / T_a \leq 0{,}2$, parenkamas relinio veikimo reguliatorius.
- Kai $0{,}2 < \tau_a / T_a \leq 1{,}0$, parenkamas tolydžiojo veikimo reguliatorius.
- Kai $\tau_a / T_a > 1{,}0$, parenkamas impulsinio veikimo reguliatorius.

Toliau galima parinkti reguliavimo dėsnį. Dvipoziciniai reguliatoriai (įjungta - išjungta) parenkami tuomet, kai objektui būdingas mažas vėlavimas τ_a, mažai kintanti arba pastovi apkrova. Mažu laikomas τ_a, jeigu $\tau_a < 0{,}2\ T_a$.

- I reguliatoriai naudojami tik su statiniais objektais, kuriems būdingas nedidelis vėlavimas, lėtai kintanti apkrova. Geriausi rezultatai gaunami, kai objekto vėlavimas $\tau_a \leq 0{,}1\ T_a$.
- P reguliatoriai parenkami tuomet, kai objektui būdingas nedidelis vėlavimas τ_a ir apkrova nedaug svyruoja. Jeigu apkrova labai svyruoja, gaunama didelė statinė paklaida.
- PI reguliatoriai naudojami tuomet, kai P reguliatoriai negali užtikrinti reikiamo sistemos valdymo tikslumo, kai objektui būdingas bet koks vėlavimas, tačiau apkrova kinta lėtai.
- PID reguliatorius parenkamas, kai objektui būdingas didelis vėlavimas $\tau_a / T_a > 1{,}0$, dideli ir staigūs apkrovos pokyčiai, kai be didelio sistemos valdymo T_a tikslumo dar reikia pasiekti didelę uždarosios sistemos reakcijos spartą.
- PD reguliatorius naudojamas vietoj PID, jeigu leidžiamas statinė paklaida ir jeigu objektui būdingas didelis vėlavimas ir nedideli apkrovos svyravimai.

4. TIRIAMOJI DALIS

4.1. PROJEKTINIŲ SPRENDIMŲ PAGRINDIMAS

Vienas veiksmingiausių dažninių elektros pavarų tyrimo būdų yra jų skaitmeninių kompiuterinių modelių sudarymas, naudojant juos pereinamųjų vyksmų tyrimui. Dažnio keitiklių kūrimas ir optimizavimas vyksta veikiant trukdžiams, kurie atsiranda dėl matavimo sistemos specifinių savybių, nežinomų faktorių įtakos objekto funkcionavimo rodikliams ar dėl kitų priežasčių. Todėl kuriant dažninių pavarų prototipus, skirtus nesudėtingų ventiliatorinių ir siurblinių automatizavimo uždaviniams spręsti, būtina atlikti sistemos, veikiančios įvairiomis reguliavimo ir trukdžių sąlygomis, tyrimus [2].

Taigi baigiamojo darbo tiriamojoje dalyje analizuojamas ir sprendžiamas kintamosios srovės dažninių pavarų modelių kūrimas. Norint atskleisti pagrindinius privalumus ir trūkumus, įvertinti sistemų gebėjimą veikti be apkrovos ir su ventiliatorine apkrova buvo sudarytas NS dažninės pavaros kompiuterinis modelis, valdomas skaliariniu metodu, esant ventiliatorinei apkrovai ir be jos. Ištirti pereinamieji vyksmai. Taip pat sudarytas NS dažninės pavaros modelis, valdomas vektoriniu metodu, esant ventiliatorinei apkrovai ir be jos bei ištirti pereinamieji vyksmai.

4.2. SKALIARINIO VALDYMO DAŽNINĖS PAVAROS MODELIS IR IMITACIJOS REZULTATAI

Asinchronio variklio modeliui sudaryti nejudančioje koordinačių sistemoje α-β, imamos dvifazės asinchroninės mašinos lygtys:

$$\begin{cases} u_{1\alpha} = i_{1\alpha} R_1 + \dfrac{d\Psi_{1\alpha}}{dt}; \\ u_{1\beta} = i_{1\beta} R_1 + \dfrac{d\Psi_{1\beta}}{dt}; \\ u'_{2\alpha} = i'_{2\alpha} R'_2 + \dfrac{d\Psi_{2\alpha}}{dt} + \omega \cdot \Psi_{2\alpha}; \\ u'_{2\beta} = i'_{2\beta} R'_2 + \dfrac{d\Psi_{2\beta}}{dt} + \omega \cdot \Psi_{2\beta}; \end{cases} \tag{4.1}$$

čia: $\Psi_{1\alpha}, \Psi_{1\beta}, \Psi_{2\alpha}, \Psi_{2\beta}, i_{1\alpha}, i_{1\beta}, i_{2\alpha}, i_{2\beta}$ – statoriaus ir rotoriaus surištųjų srautų projekcijos ir srovių projekcijos į α, β ašis;

$R_1, R_2^{'}$ – statoriaus ir redukuotoji aktyviosios varžos; v – antrinio elemento greitis;

$u_{1\alpha}, u_{1\beta}, u_{2\alpha}^{'}, u_{2\beta}^{'}$ – statoriaus ir rotoriaus įtampos;

$\omega_0 = 2\pi f$ – kampinis įtampos dažnis.

Nejudančioje koordinačių sistemoje $u_{1\alpha} = U_{1\max}\cos\omega_0 t$ ir $u_{1\beta} = U_{1\max}\sin\omega_0 t$, o modeliui sudaryti lygtyse sroves reikia išreikšti srautais. Kadangi:

$$i_{2\alpha}^{'} = \frac{1}{L_2^{"}}\left(\Psi_{2\alpha} - k_1\Psi_{1\alpha}\right); \tag{4.2}$$

ir

$$i_{2\beta}^{'} = \frac{1}{L_2^{"}}\left(\Psi_{2\beta} - k_1\Psi_{1\beta}\right); \tag{4.3}$$

tai lygtis

$$\Psi_{1\alpha} = i_{1\alpha}L_1 + i_{2\alpha}^{'}L_m; \tag{4.4}$$

ir

$$\Psi_{1\beta} = i_{1\beta}L_1 + i_{2\beta}^{'}L_m. \tag{4.5}$$

Įrašę (4.2) ir (4.3) lygtis, išreiškiame sroves $i_{1\alpha}, i_{1\beta}$:

$$i_{1\alpha} = \left(\frac{1}{L_1} + \frac{L_m k_1}{L_1 L_2^{"}}\right)\Psi_{1\alpha} - \frac{L_m}{L_1 L_2^{"}}\Psi_{2\alpha}; \tag{4.6}$$

$$i_{1\beta} = \left(\frac{1}{L_1} + \frac{L_m k_1}{L_1 L_2^{"}}\right)\Psi_{1\beta} - \frac{L_m}{L_1 L_2^{"}}\Psi_{2\beta}; \tag{4.7}$$

čia $k_1 = \frac{L_m}{L_1}, L_2^{"} = L_{1\sigma} + L_{2\sigma}^{'} = L_2^{'} - \frac{L_m^2}{L_1}$.

Lygtyse vartojami žymėjimai $L_1 = L_{1\sigma} + L_m$ ir $L_2^{"} = L_{2\sigma}^{'} + L_m$ – pilnutiniai ekvivalentiniai statoriaus bei rotoriaus fazių induktyvumai, susidedantys iš sklaidos induktyvumų $L_{1\sigma}$ bei $L_{2\sigma}^{'}$ ir įmagnetinimo induktyvumo $L_m = \frac{3}{2}L_{12}$; čia L_{12} – didžiausias induktyvumas tarp bet kurios statoriaus ir bet kurios rotoriaus apvijos, kai jų ašys sutampa.

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

$$\begin{cases} L_1 = \left(x_1 + x_\mu\right)/\omega_{0el}; \\ L_2 = \left(x_2^{'} + x_\mu\right)/\omega_{0el}; \\ L_{12} = x_\mu/\omega_{0el}. \end{cases} \tag{4.8}$$

$$\begin{cases} u_{1\alpha} = \left[\left(\frac{1}{L_1} + \frac{L_m k_1}{L_1 L_2^{''}}\right)\Psi_{1\alpha} - \frac{L_m}{L_1 L_2^{''}}\Psi_{2\alpha}\right]R_1 + \frac{d\Psi_{1\alpha}}{dt}; \\ u_{1\beta} = \left[\left(\frac{1}{L_1} + \frac{L_m k_1}{L_1 L_2^{''}}\right)\Psi_{1\beta} - \frac{L_m}{L_1 L_2^{''}}\Psi_{2\beta}\right]R_1 + \frac{d\Psi_{1\beta}}{dt}; \\ u_{2\alpha}^{'} = \left[\frac{1}{L_2^{''}}\left(\Psi_{2\alpha} - k_1\Psi_{1\alpha}\right)\right]R_2^{'} + \frac{d\Psi_{2\alpha}}{dt} - \omega\cdot\Psi_{2\alpha}; \\ u_{2\beta}^{'} = \left[\frac{1}{L_2^{''}}\left(\Psi_{2\beta} - k_1\Psi_{1\beta}\right)\right]R_2^{'} + \frac{d\Psi_{2\beta}}{dt} + \omega\cdot\Psi_{2\beta}. \end{cases} \tag{4.9}$$

Sukiojo asinchroninio variklio momentas randamas iš lygčių:

$$M = \frac{3}{2}p\left(\Psi_{1\alpha}i_{1\beta} - \Psi_{1\beta}i_{1\alpha}\right); \tag{4.10}$$

arba

$$M = \frac{3}{2}p\left(\Psi_{2\beta}i_{2\alpha} - \Psi_{2\alpha}i_{2\beta}\right). \tag{4.11}$$

Šios lygtys papildomos pavaros judesio lygtimi:

$$M_{em} - M_{st} = J\frac{d\omega}{dt}; \tag{4.12}$$

čia: M_{em} ir M_{st} - variklio sukuriamas ir statinis pasipriešinimo momentai;

J – pavaros inercijos momentas; ω – variklio kampinis sukimosi greitis.

Pagal (4.2), (4.3), (4.10), (4.11) lygtis sudaromas asinchroninės pavaros modelis [25].

1. **Lentelė**. Asinchroninio variklio parametrai

Matavimo simbolis	U	P	n	R_s	L_s	R_R	L_R
Matavimo vienetas	[V]	[kW]	[aps/min]	[Ω]	[mH]	[Ω]	[mH]
Vertė	380	3	1500	2,60	6,54	1,70	11,47

Asinchroninio variklio duomenys santykiniais vienetais:

$x_{\mu}^{'} = 3,4$;

$x_1^{'} = 0,057$;

$x_2^{'} = 0,100$;

$r_1^{'} = 0,072$;

$r_2^{'} = 0,047$;

Pagal pateiktas formules apskaičiuojame varžų reikšmes omais.

Statoriaus sklaidos varža:

$$x_1 = \frac{x_1^{'} \cdot U_{1f}}{I_{1N.f}} = \frac{0,057 \cdot 220}{6,1} = 2,055\ \Omega. \tag{4.13}$$

Rotoriaus sklaidos varža:

$$x_2 = \frac{x_2^{'} \cdot U_{1f}}{I_{1N.f}} = \frac{0,1 \cdot 220}{6,1} = 3,60\ \Omega. \tag{4.14}$$

Statoriaus sklaidos induktyvumas:

$$L_{LS} = \frac{x_1}{2\pi \cdot f} = \frac{2,055}{314} = 6,54\ \text{mH}. \tag{4.15}$$

Rotoriaus sklaidos induktyvumas:

$$L_{LR} = \frac{x_2}{2\pi \cdot f} = \frac{3,60}{314} = 11,47 \text{ mH}. \quad (4.16)$$

Statoriaus varža:

$$R_1 = \frac{r_1^{'} \cdot U_{1f}}{I_{1N.f}} = \frac{0,072 \cdot 220}{6,1} = 2,6 \ \Omega. \quad (4.17)$$

Rotoriaus varža:

$$R_2 = \frac{r_2^{'} \cdot U_{1f}}{I_{1N.f}} = \frac{0,047 \cdot 220}{6,1} = 1,7 \ \Omega. \quad (4.18)$$

Inkaro srovė:

$$I_{1N.f} = \frac{P_{2N}}{3U_{1f} \cdot \eta \cdot \cos\varphi} = \frac{3}{3 \cdot 220 \cdot 0,845 \cdot 0,88} = 6,1 \text{ A}. \quad (4.19)$$

Įmagnetinimo grandinės varža:

$$x_\mu = x_\mu^{'} + x_\mu^{''}$$

$$x_\mu^{''} = \frac{2x_1^{'} \cdot x_\mu^{'}}{x_\mu^{'} + \sqrt{\left(x_\mu^{'}\right)^2 + 4x_1^{'} \cdot x_\mu^{'}}} = 0,056; \quad (4.20)$$

$$x_\mu = x_\mu^{'} + x_\mu^{''} = 3,4 + 0,056 = 3,456; \quad (4.21)$$

$$x_\mu = \frac{x_\mu \cdot U_{1f}}{I_{1n.f}} = \frac{3,456 \cdot 220}{6,1} = 124,6 \ \Omega. \quad (4.22)$$

Įmagnetinimo grandinės induktyvumas:

$$L_m = \frac{x_\mu}{2\pi \cdot f} = \frac{124,6}{314} = 396,8 \text{ mH}. \quad (4.23)$$

Pilnutiniai ekvivalentiniai statoriaus ir rotoriaus fazių induktyvumai:

Pilnutinis statoriaus induktyvumas:

$$L_1 = L_m + L_{LS} = 396,8 + 6,54 = 403,35 \text{ mH}. \quad (4.24)$$

Pilnutinis rotoriaus grandinės redukuotasis induktyvumas:

$$L_2^{'} = L_m + L_{LR} = 396,8 + 11,47 = 408,27 \text{ mH}. \quad (4.25)$$

Pilnutinis variklio induktyvumas:

$$L_2^{''} = L_{LS} + L_{LR} = 6,54 + 11,47 = 18,01 \text{ mH}; \quad (4.26)$$

arba:

$$L_2^{''} = L_2^{'} - \frac{L_m^2}{L_1} = 408,27 - \frac{396,8^2}{403,35} = 17,91 \text{ mH}. \quad (4.27)$$

Modelio koeficientai skaičiuojami pagal formules:

$$\frac{1}{L_1} + \frac{L_m \cdot k_1}{L_1 \cdot L_2^{''}} = \frac{1 \cdot 10^3}{403,35} + \frac{396,8 \cdot 0,984 \cdot 10^3}{403,35 \cdot 17,91} = 56,5; \quad (4.28)$$

$$k_1 = \frac{L_m}{L_1} = \frac{396,8}{403,35} = 0,984; \quad (4.29)$$

$$\frac{L_m}{L_1 \cdot L_2^{''}} = \frac{396,8}{403,35 \cdot 17,91 \cdot 10^{-3}} = 54,9; \quad (4.30)$$

$$\frac{1}{L_2^{''}} = \frac{1}{17,91 \cdot 10^{-3}} = 55,83; \quad (4.31)$$

$$\frac{k_1}{L_2^{''}} = \frac{0,984}{17,91 \cdot 10^{-3}} = 54,94. \quad (4.32)$$

Apkrovos koeficiento skaičiavimas

Jei variklis valdo siurblį ar ventiliatorių, reikalinga ventiliatorinė apkrova. Tada apkrovos momentas yra proporcingas greičio kvadratui:

$$M_a = k \cdot \omega^2. \quad (4.33)$$

Nominalus pavaros momentas apskaičiuojamas:

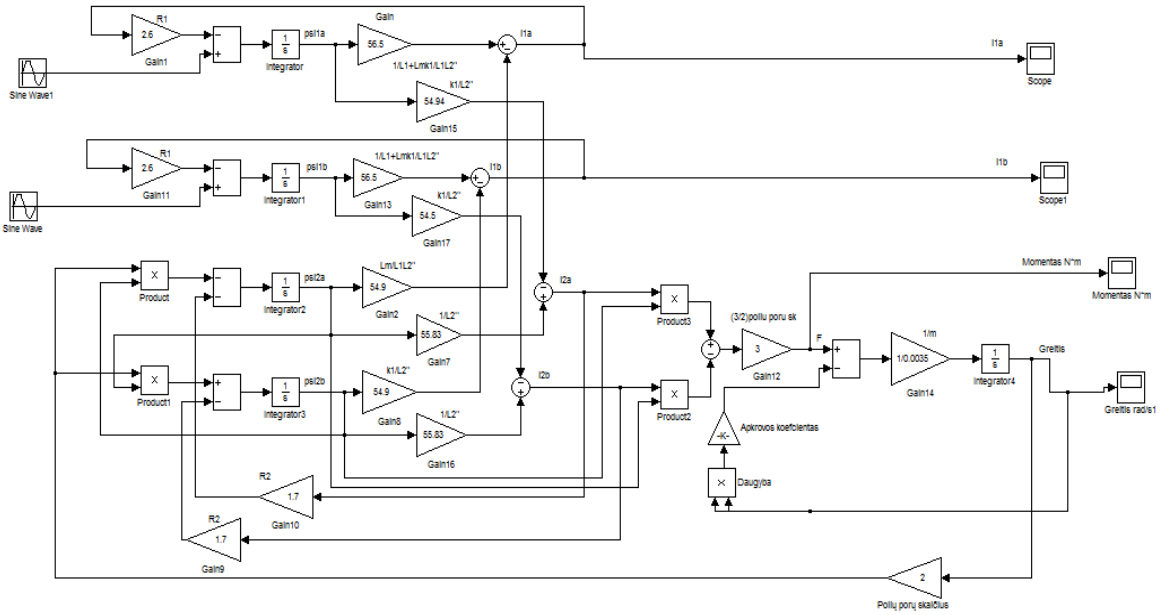
$$M_{nom} = \frac{P}{\omega_0}; \tag{4.34}$$

čia P – nominali variklio galia W; ω_0 - sinchroninis greitis rad/s.

Koeficientas k yra apskaičiuojamas iš formulės:

$$k = \frac{M_{nom}}{\omega_0^2} = \frac{9,55}{314^2} = 0,000096 = 0,96 \cdot 10^{-4}. \tag{4.35}$$

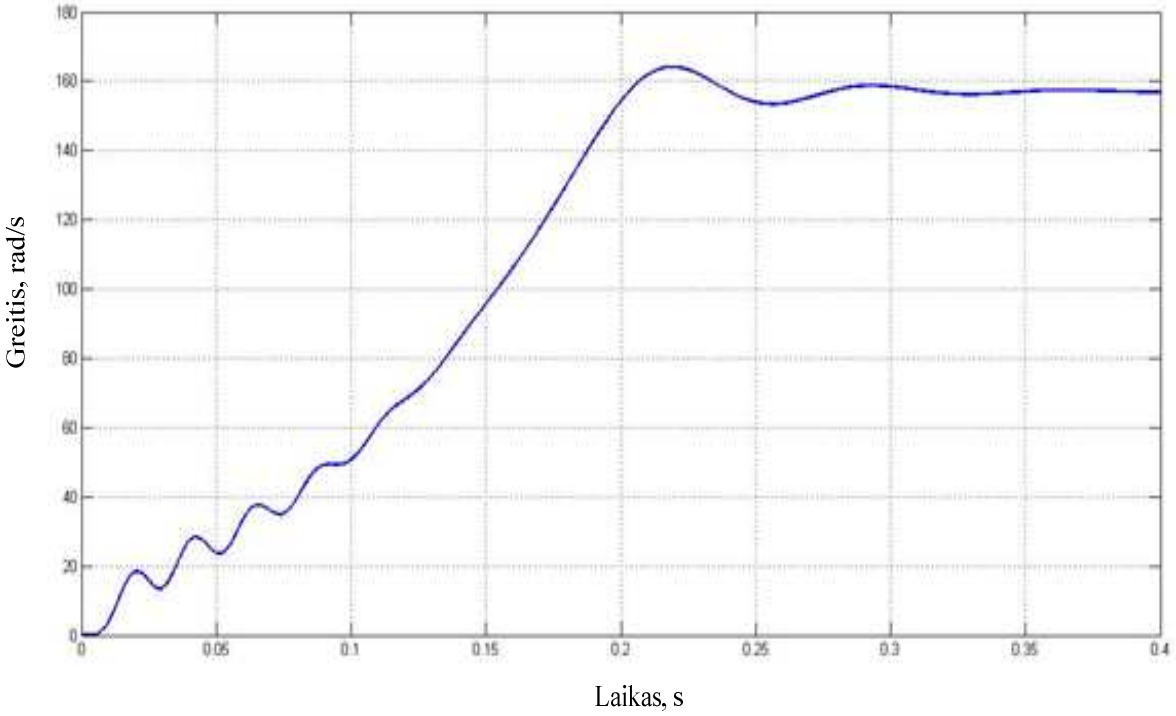
Apskaičiavus reikiamas reikšmes, rezultatai suvedami į asinchroninio variklio modelį Matlab *Simulink* programoje (4.1 pav).



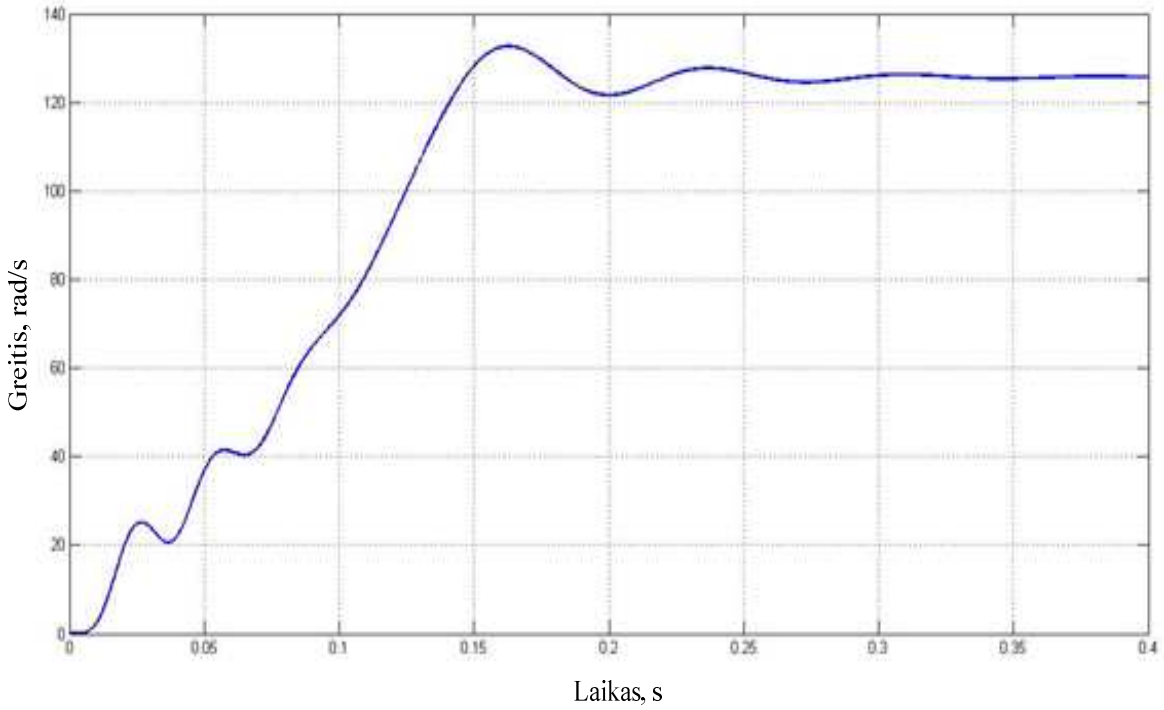
4.1 pav. Asinchroninės dažninės pavaros kompiuterinis modelis

Gauti pereinamieji vyksmai

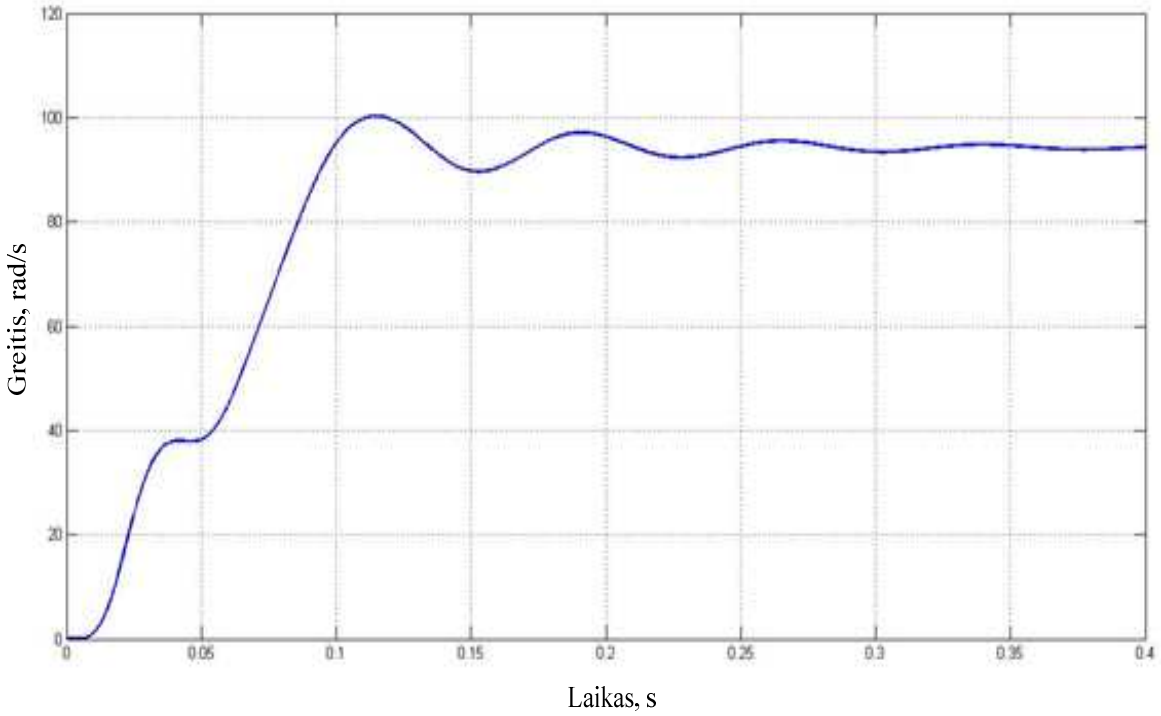
1. Be ventiliatorinės apkrovos



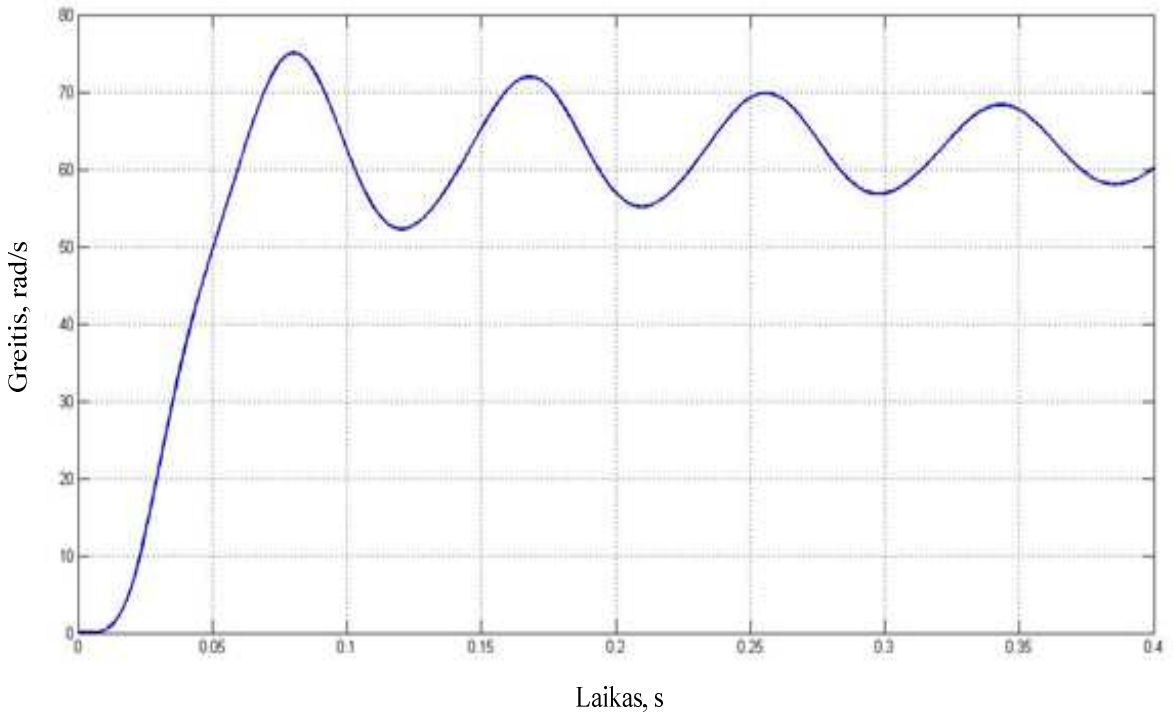
4.2 pav. Variklio greičio pereinamasis vyksmas, kai f = 50 Hz, U = 380 V



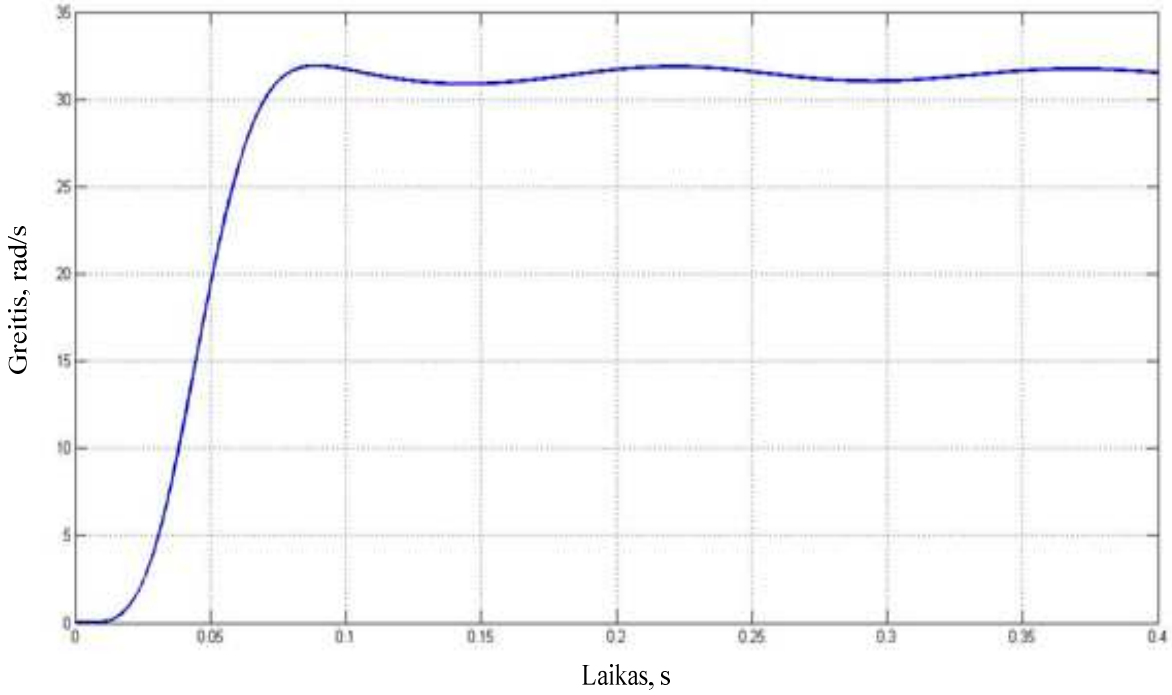
4.3 pav. Variklio greičio pereinamasis vyksmas, kai f = 40 Hz, U = 304 V



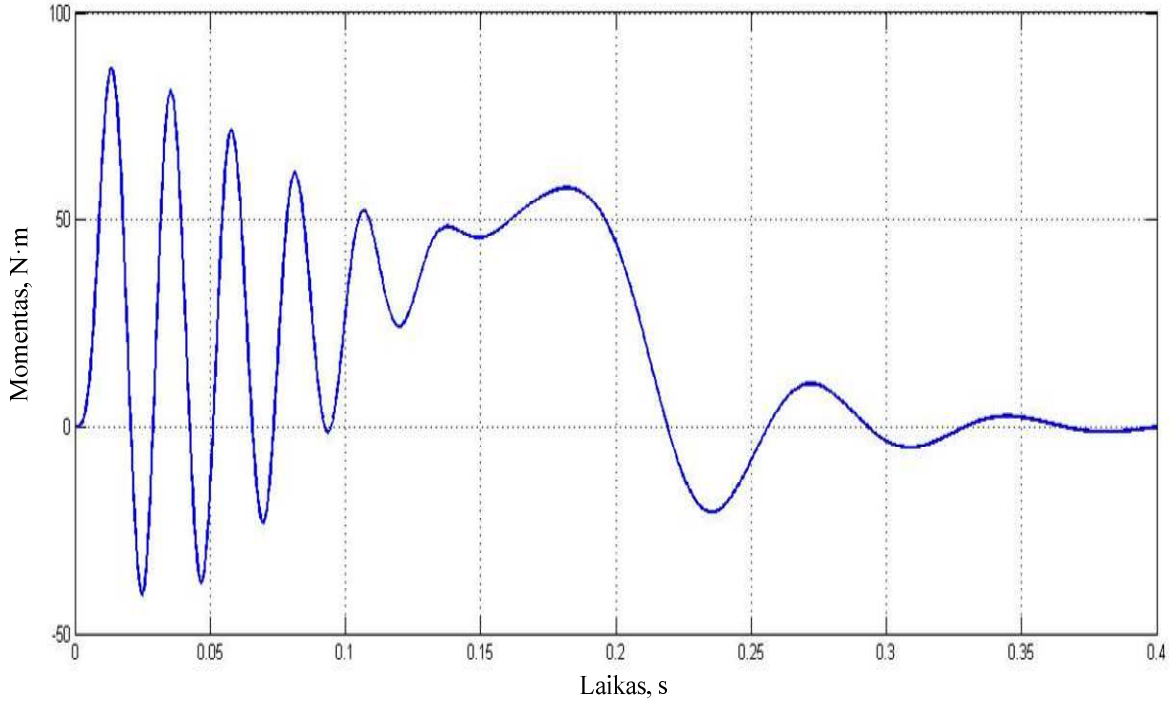
4.4 pav. Variklio greičio pereinamasis vyksmas, kai f = 30 Hz, U = 228 V



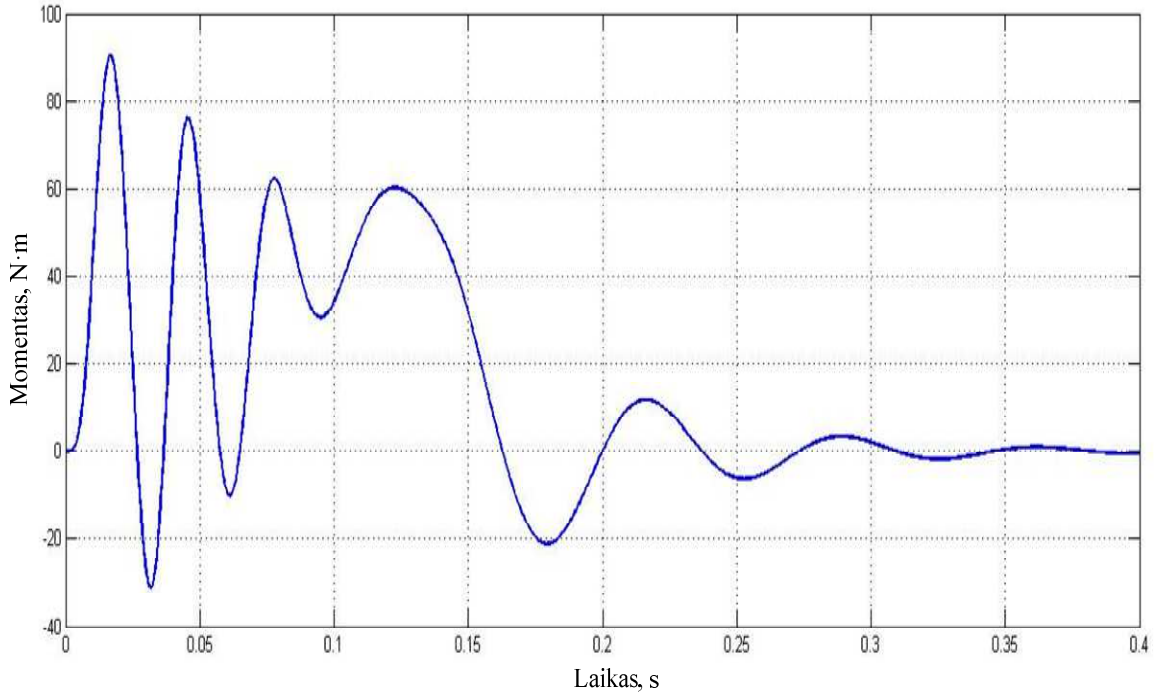
4.5 pav. Variklio greičio pereinamasis vyksmas, kai f = 20 Hz, U = 152 V



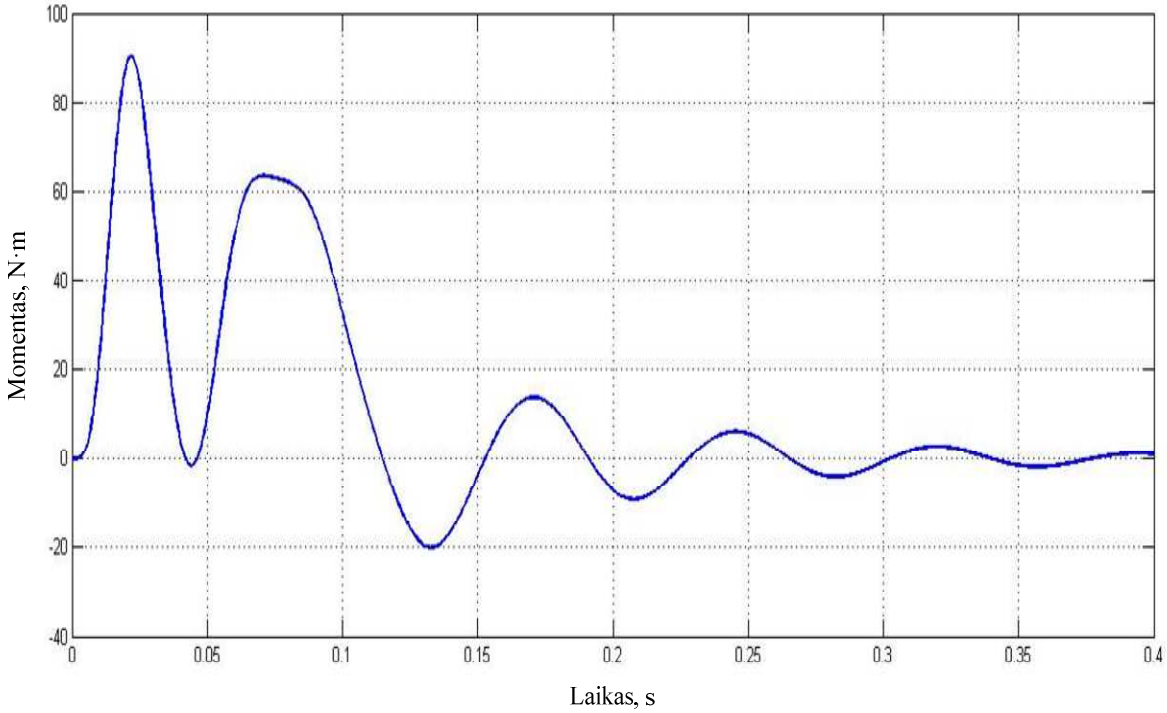
4.6 pav. Variklio greičio pereinamasis vyksmas, kai f = 10 Hz, U = 76 V



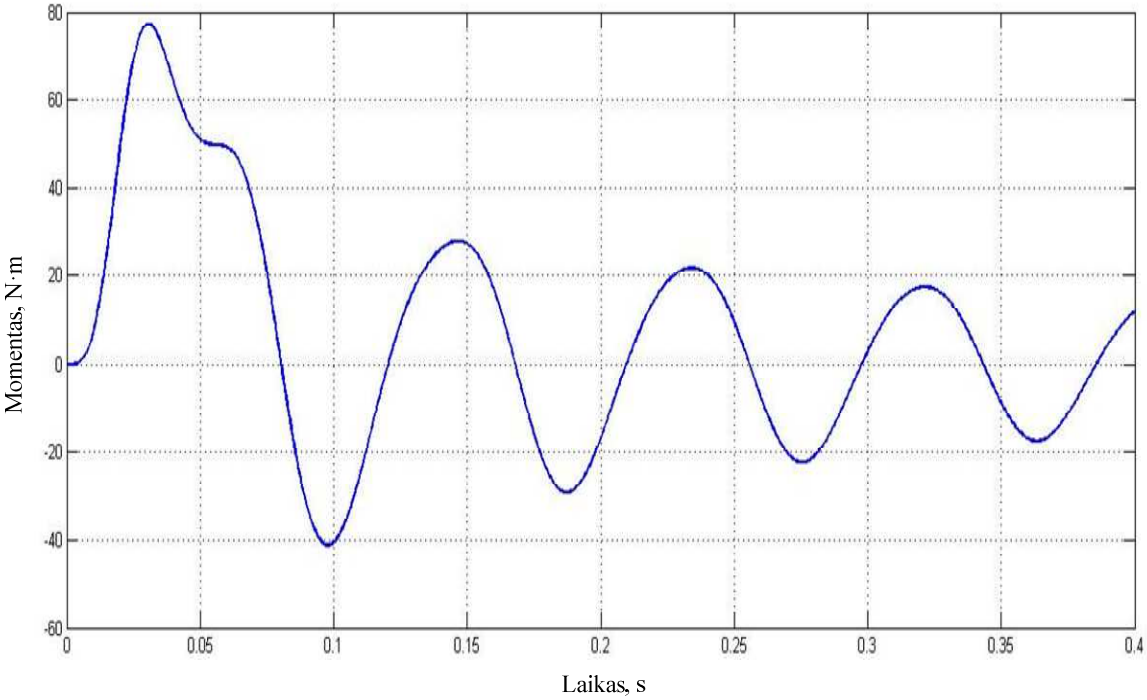
4.7 pav. Momento pereinamasis vyksmas, kai f = 50 Hz, U = 380V



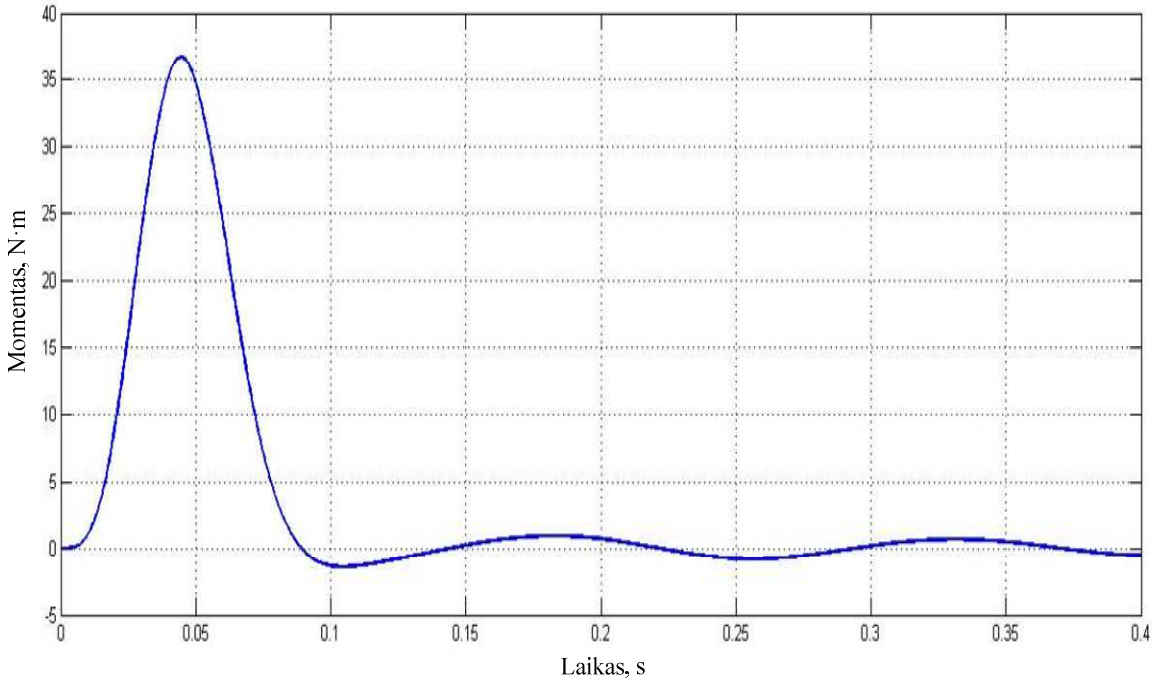
4.8 pav. Momento pereinamasis vyksmas, kai f = 40 Hz, U = 304 V



4.9 pav. Momento pereinamasis vyksmas, kai f = 30 Hz, U = 228V

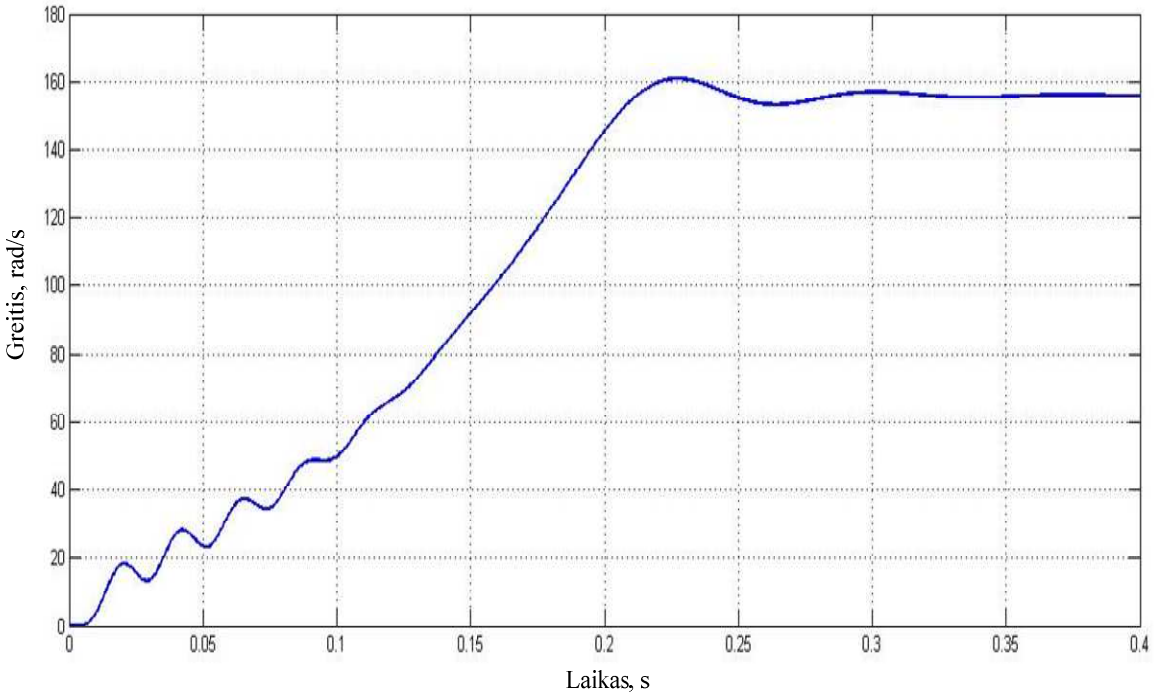


4.10 pav. Momento pereinamasis vyksmas, kai f = 20 Hz, U = 152 V

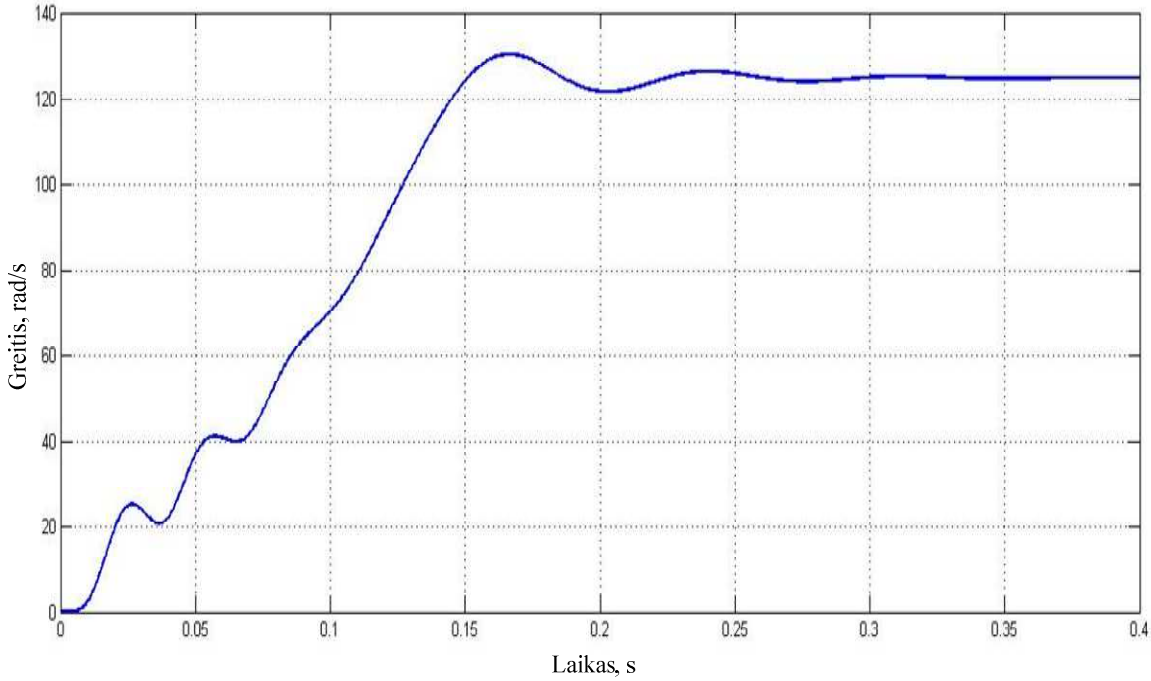


4.11 pav. Momento pereinamasis vyksmas, kai f = 10 Hz, U = 76 V

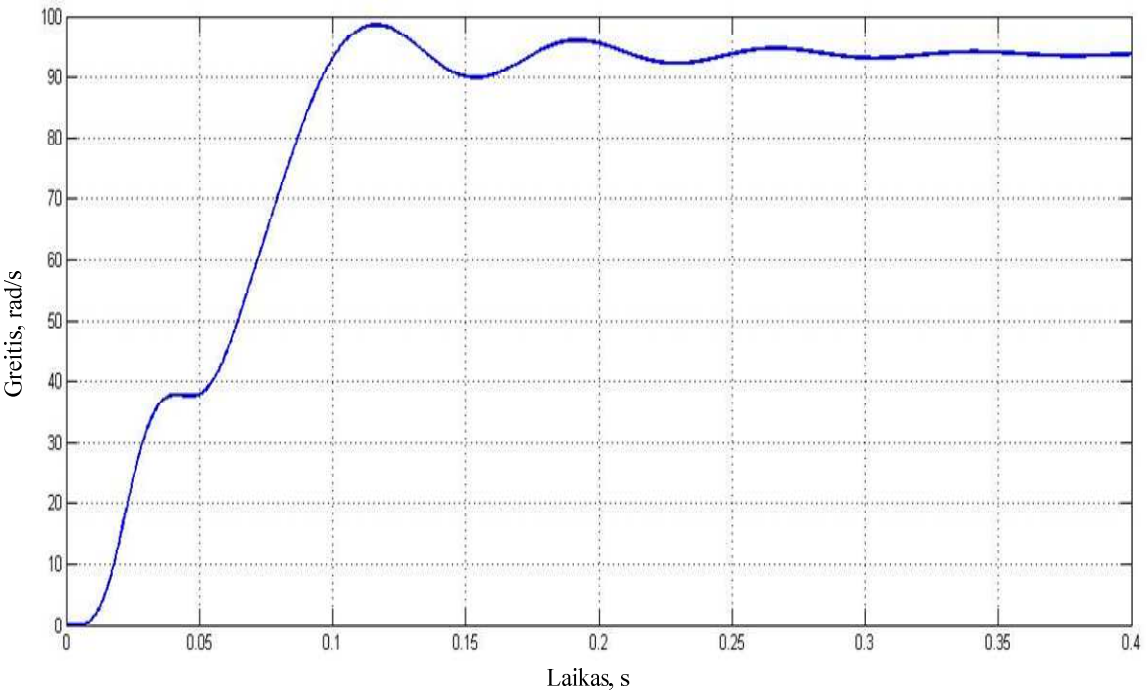
2. Su ventiliatorine apkrova



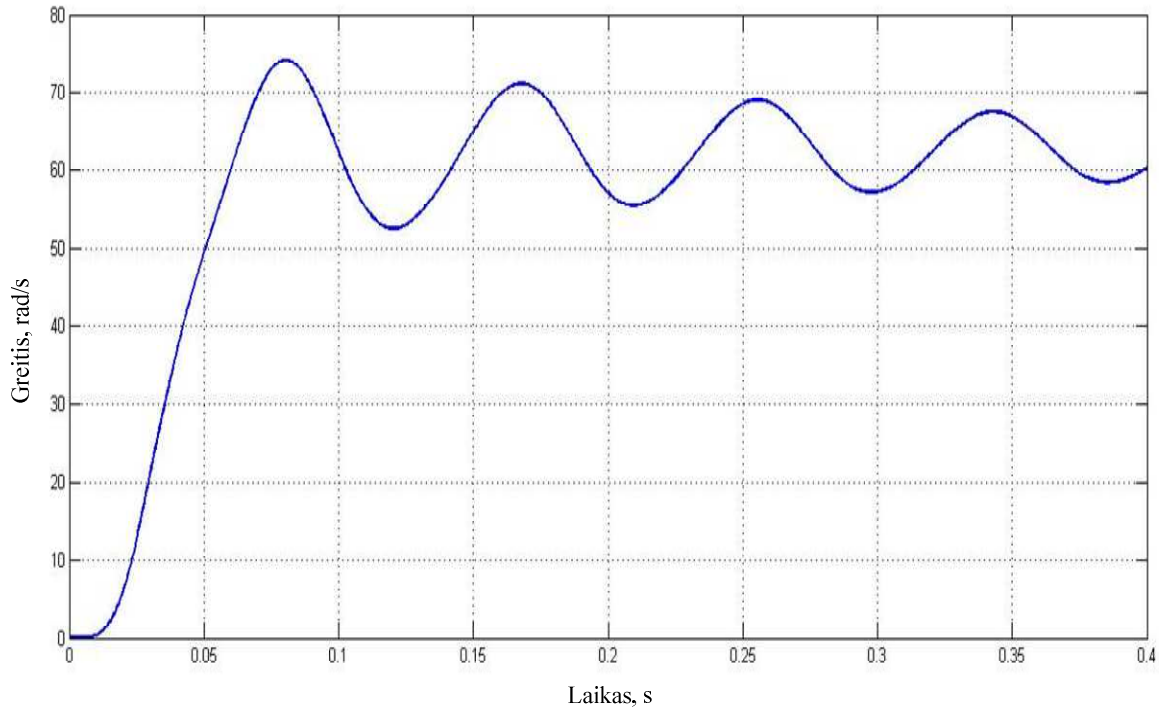
4.12 pav. Variklio greičio pereinamasis vyksmas, kai f = 50 Hz, U = 380 V



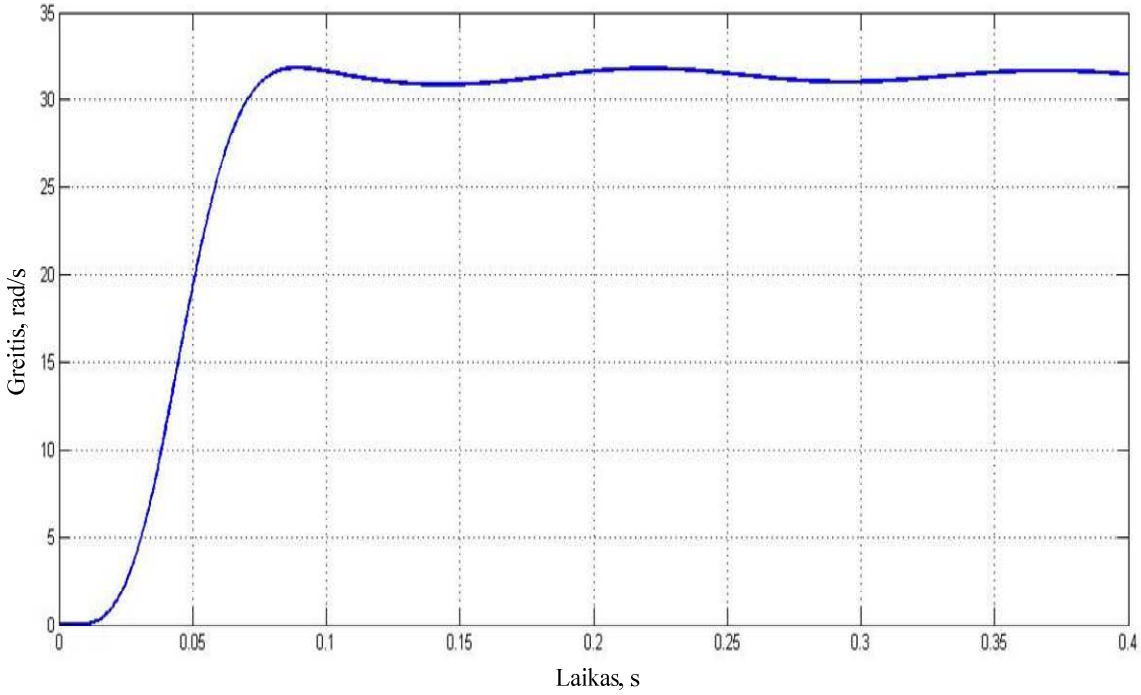
4.13 pav. Variklio greičio pereinamasis vyksmas, kai f = 40 Hz, U = 304 V



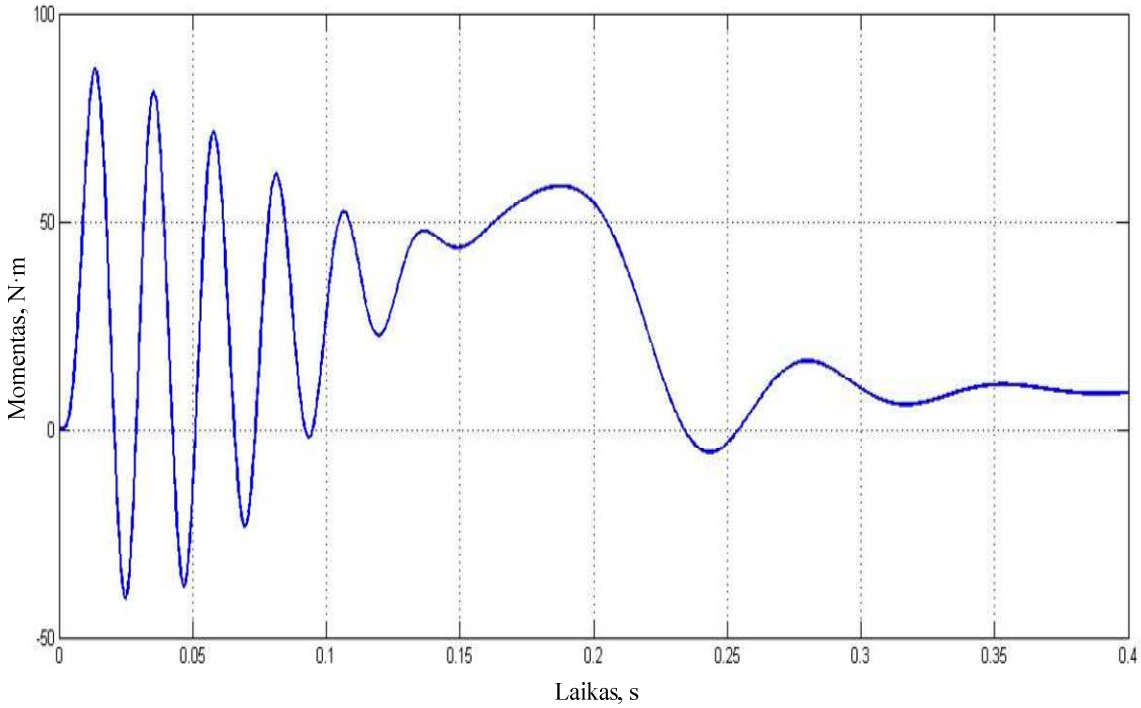
4.14 pav. Variklio greičio pereinamasis vyksmas, kai f = 30 Hz, U = 228 V



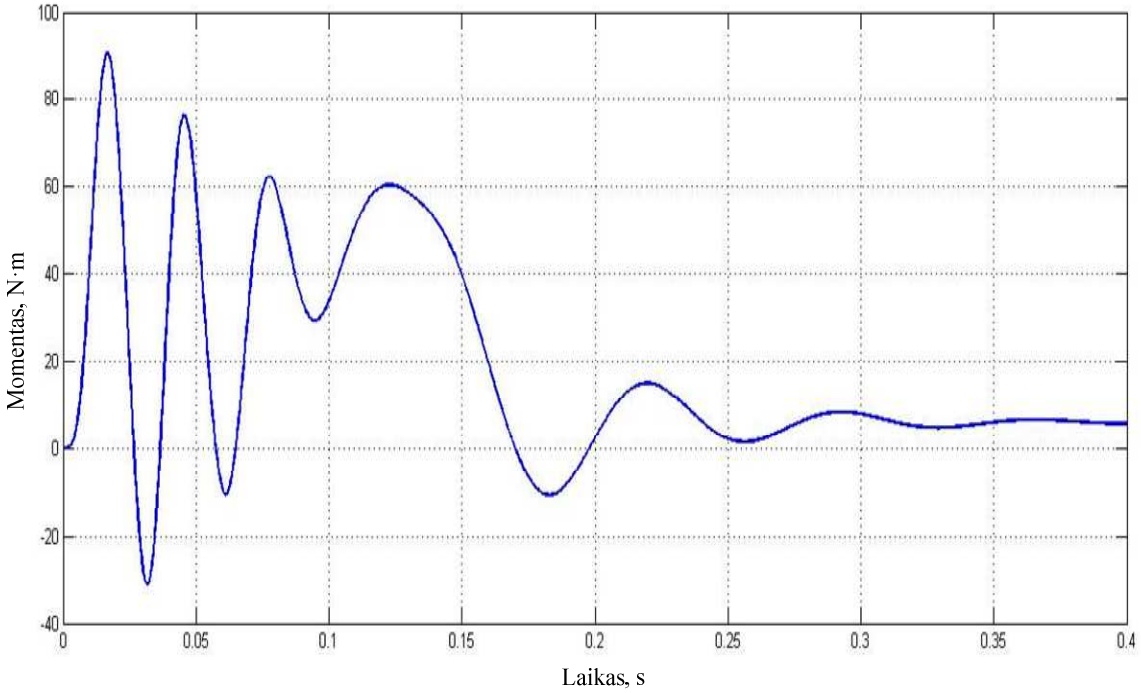
4.15 pav. Variklio greičio pereinamasis vyksmas, kai f = 20 Hz, U = 152 V



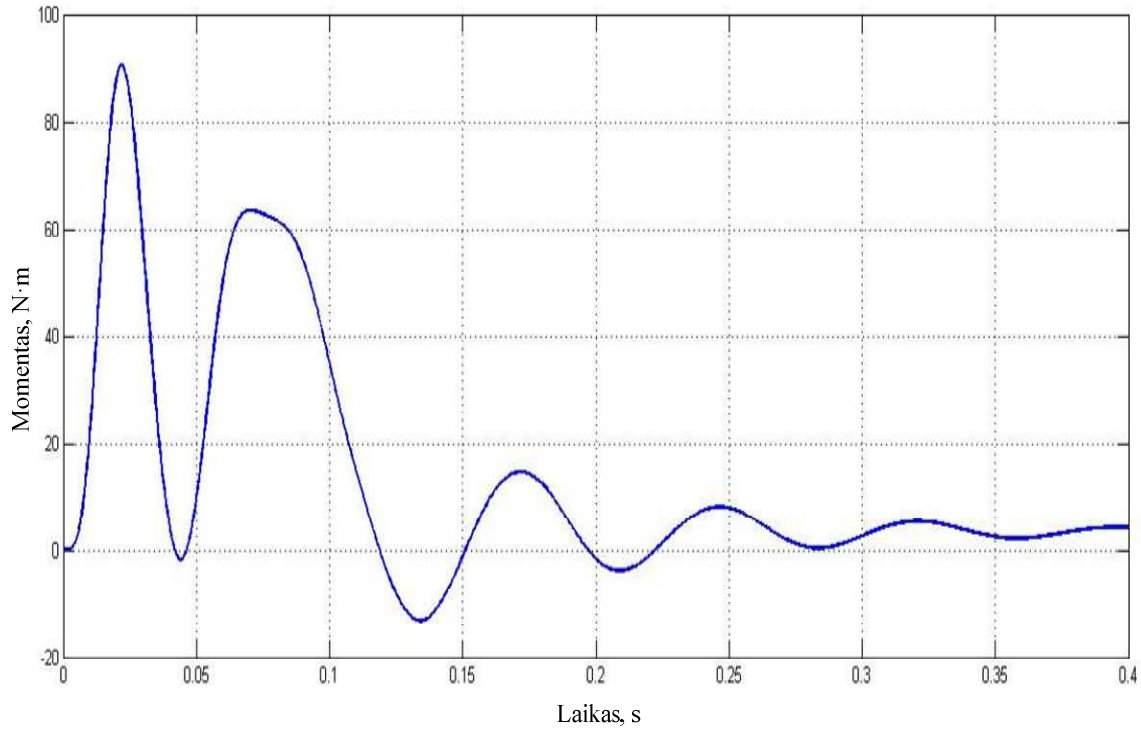
4.16 pav. Variklio greičio pereinamasis vyksmas, kai $f = 10$ Hz, $U = 76$ V



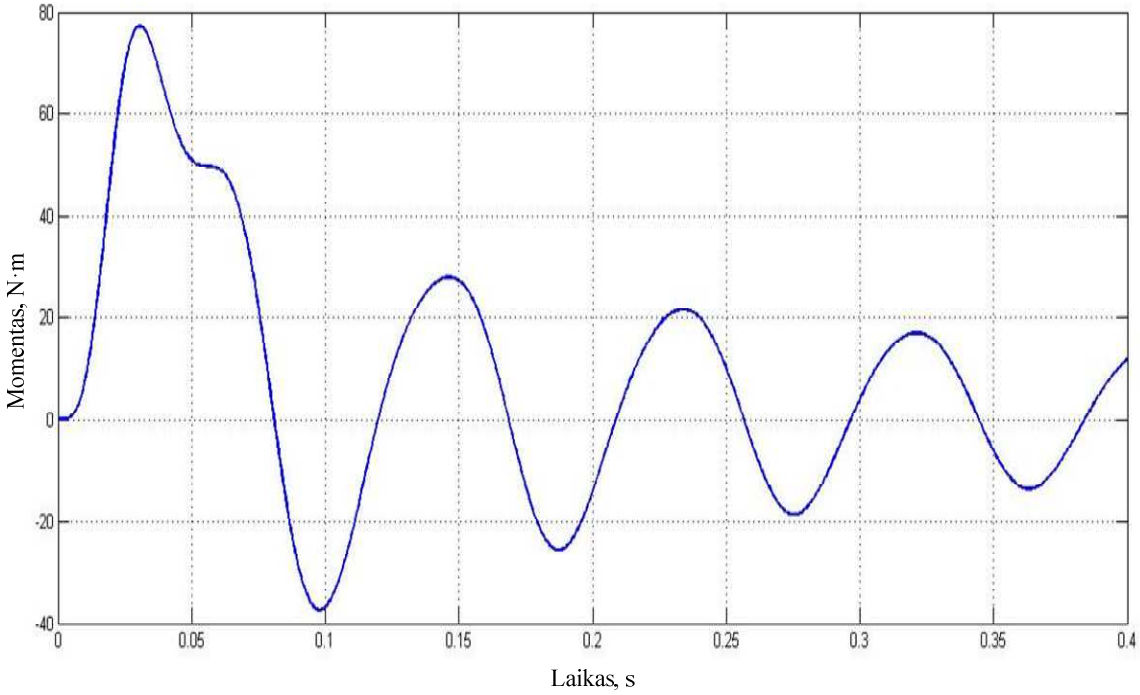
4.17 pav. Momento pereinamasis vyksmas, kai $f = 50$ Hz, $U = 380$ V



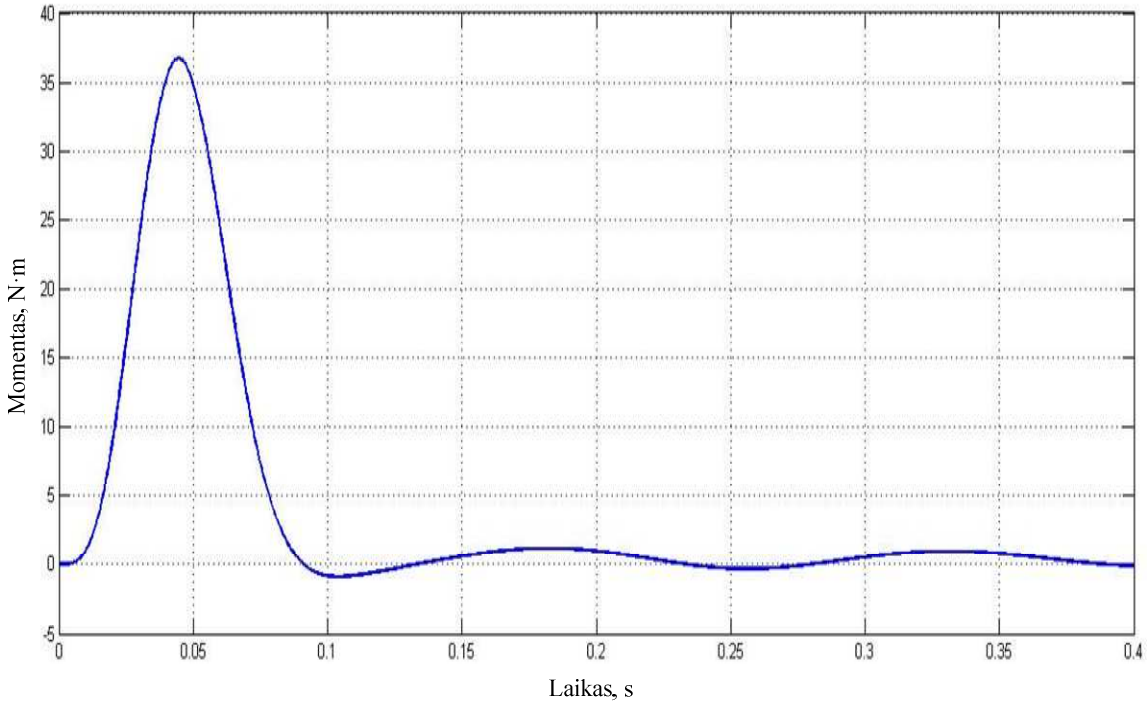
4.18 pav. Momento pereinamasis vyksmas, kai f = 40 Hz, U = 304 V



4.19 pav. Momento pereinamasis vyksmas, kai f = 30 Hz, U = 228 V



4.20 pav. Momento pereinamasis vyksmas, kai f = 20 Hz, U = 152 V



4.21 pav. Momento pereinamasis vyksmas, kai f = 10 Hz, U = 76 V

4.2-4.21 pav. parodyti 3 kW asinchroninio variklio, kurio duomenys pateikti 1 lentelėje, imitacijos rezultatai, esant 50 Hz, 40 Hz, 30 Hz, 20 Hz, 10 Hz dažniams. Bandymai atlikti imituojant skaliarinio valdymo principą, todėl buvo išlaikomas pastovus V/Hz santykis, proporcingai keičiant įtampą ir dažnį.

Norint išvengti greičio švytavimų, variklio redukuotasis inercijos momentas patrigubintas, nei nurodyta kataloguose. Tai gerai tinka varikliams, veikiantiems realiuose technologiniuose įrenginiuose. Matome, kad, paleidžiant variklį, momentas stipriai švytuoja, įgaudamas net neigiamas vertes. Laikui bėgant, momento vertė artėja prie nusistovėjusios vertės. Variklio greičio dinamika kartoja momento kreivę: esant didesniam momentui, variklio greitis auga sparčiau, momentui mažėjant, augimas sulėtėja ir galiausiai momentui nusistovėjus, greitis taip pat įgauna nusistovėjusią vertę, pvz.: esant 50 Hz dažniui, greitis įgauna 157 rad/s nusistovėjusią vertę, nes sumodeliuotas dviejų polių porų variklis.

4.2-4.11 pav. pateikti greičio ir momento pereinamieji vyksmai, kai variklis dirba neapkrautas.

1. Esant 50 Hz dažniui maksimali greičio vertė pasiekiama per 0,21 s ir siekia 165 rad/s. Mažinant dažnį, maksimali greičio vertė pasiekiama greičiau: per 0,21 s esant 50 Hz dažniui ir per 0,08 s esant 10 Hz dažniui.

2. Esant 50 Hz dažniui pereinamojo vyksmo trukmė yra apie 0,26 s. Atitinkamai mažinant dažnį nuo 50 Hz iki 10 Hz pereinamojo vyksmo trukmė sumažėja nuo 0,26 s iki 0,08 s.

3. Esant 50 Hz dažniui greitis svyruoja, nukrypdamas nuo nusistovėjusio – ± 5 %, 10 Hz dažniui – ± 2 %.

4. Momento pereinamųjų vyksmų analizė rodo, kad mažinant dažnį, momento svyravimai mažėja. Esant 50 Hz dažniui maksimali momento reikšmė siekia 86 N·m, 10 Hz dažniui – 36, 5 N·m. Pereinamojo vyksmo trukmė sumažėja nuo 0,4 s iki 0,15 s.

4.12-4.21 pav. pateikti greičio ir momento pereinamieji vyksmai, kai variklis dirba apkrautas ventiliatorine apkrova.

1. Esant 50 Hz dažniui maksimali greičio vertė pasiekiama per 0,21 s ir siekia 161 rad/s. Mažinant dažnį, maksimali greičio vertė pasiekiama greičiau: per 0,21 s esant 50 Hz dažniui ir per 0,08 s esant 10 Hz dažniui.

2. Esant 50 Hz dažniui pereinamojo vyksmo trukmė yra apie 0,26 s. Atitinkamai mažinant dažnį nuo 50 Hz iki 10 Hz pereinamojo vyksmo trukmė sumažėja nuo 0,26 s iki 0,08 s.

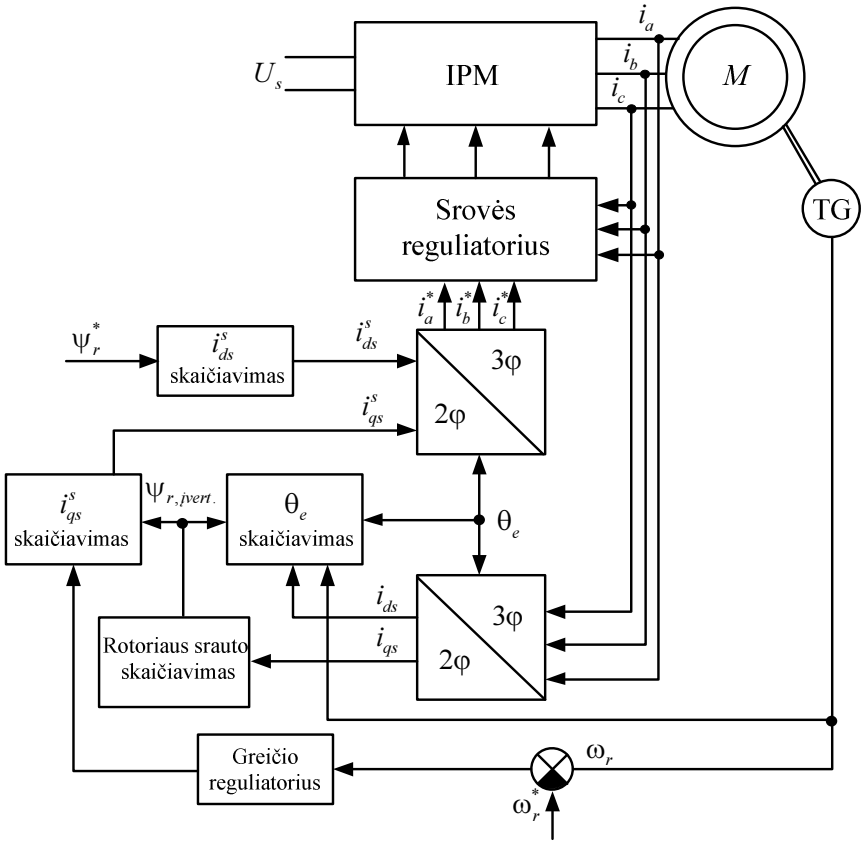
3. Esant 50 Hz dažniui greitis svyruoja, nukrypdamas nuo nusistovėjusio – ± 2,5 %, esant 10 Hz dažniui – ± 1 %.

4. Pateikti momento pereinamieji vyksmai rodo, kad mažinant dažnį, momento svyravimai mažėja. Maksimali momento reikšmė sumažėja nuo 86 iki 36,5 N·m. Pereinamojo vyksmo trukmė sumažėja nuo 0,4 s iki 0,15 s.

5. Variklio greitis ir momentas nusistovi ties nominaliąja verte, taip kaip buvo apskaičiuota sudarant modelį.

4.3. VEKTORINIO VALDYMO DAŽNINĖS PAVAROS FUNKCINĖS SCHEMOS PARINKIMAS

Norint ištirti vektorinio valdymo sistemos veikimą pirmiausia buvo parinkta funkcinė valdymo schema (4.22 pav.) [2].



4.22 pav. Netiesioginio vektorinio valdymo funkcinė schema

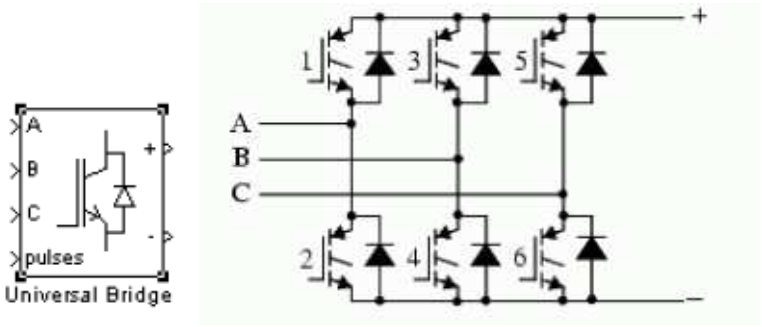
4.22 pav. pateiktas asinchroninio variklio kaip netiesinės sistemos modelis ir vektorinio valdymo sistemos modelis, kai momentas reguliuojamas statoriaus srovės i_{qs} dedamąja. Šioje sistemoje valdymo poveikiai formuojami koordinačių sistemoje, besisukančioje sukamojo magnetinio lauko greičiu, o pavaros parametrai matuojami ir reguliuojami statinėje su statoriumi susietoje koordinačių sistemoje. Tokioje sistemoje reikalingi specialūs moduliai, leidžiantys perskaičiuoti valdymo parametrus iš vienos koordinačių sistemos į kitą. Šioje schemoje erdvinio vektoriaus padėties kampas θ_e gaunamas netiesiogiai, t. y. apskaičiuojant jį iš rotoriaus greičio ir rotoriaus slydimo kampinio sukimosi greičio. Vektorinio valdymo pavara su įtampos inverteriu tiksliai palaiko greitį, kai jo pradinė vertė viršija 2% nominaliąją. Modelis užtikrina tikslų pavaros greičio palaikymą visame greičio reguliavimo diapazone, kintant apkrovai.

4.4.VEKTORINIO VALDYMO DAŽNINĖS PAVAROS MODELIS IR IMITACIJOS REZULTATAI

„Matlab“ programinio paketo aplinkoje buvo sudarytas ventiliatorinės dažninės pavaros modelis, kuriame realizuotas vektorinis valdymo metodas.

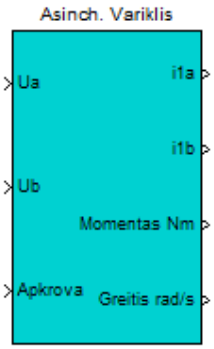
Norint išvengti maitinimo šaltinio ir lygintuvo išlygintos įtampos pulsacijų ir kitų parametrų įtakos modeliavimo rezultatams, modelis sudarytas supaprastint dažnines pavaros modelį, kur variklis maitinamas autonominiu inverteriu [15].

„Matlab“ elementų bibliotekoje pasirenkame universalaus puslaidininkinio keitiklio bloką, kuris sudarytas IGBT bipoliarinių tranzistorių su šuntuojančiais diodais pagrindu. Tokio keitiklio schema pavaizduota 4.23 pav.



4.23 pav. IGBT keitiklio schema

Sudaromas tiesiaeigio asinchroninio variklio modelio (4.24 pav.) blokas, kuris turi tris įėjimus: U_A, U_B įtampą ir apkrovos momento. Sujungus kiekvieną iš keturių išėjimų su oscilografo blokais, galima stebėti momento bei greičio pereinamuosius procesus. Bloko struktūrinė schema pavaizduota 4.24 pav.



4.24 pav. AV modelio programinis blokas

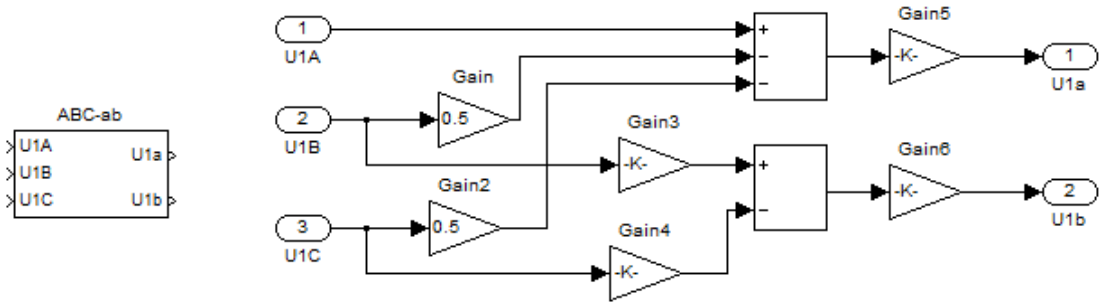
Kadangi pasirinkome trifazio inverterio modelį, jo išėjimuose A, B, ir C išduodama trifazė įtampa. Pasirinkto AV modelio tiesiogiai pajungti nepavyks, todėl būtinas papildomas

koordinačių pakeitimo blokas. Šis blokas turi formuoti įtampos vektorių α, β koordinačių sistemoje pagal išmatuotas trijų fazių įtampų U_{1A}, U_{1B} ir U_{1C} reikšmes.

Pasinaudoję tiesiogine Clark'o transformacija, t. y. sutapatinę α, β koordinačių sistemos realiąją ašį α su A fazės įtampos dedamąja, galima užrašyti:

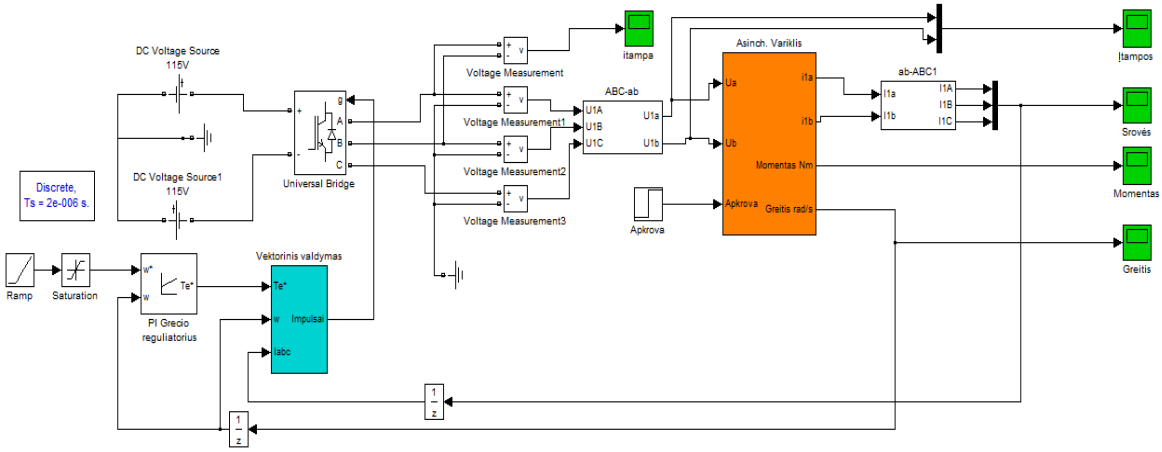
$$\begin{cases} u_{i\alpha} == \frac{2}{3}\left(u_{1A} - \frac{1}{2}u_{1B} - \frac{1}{2}u_{1C} \right) \\ u_{i\beta} == \frac{2}{3}\left(\frac{\sqrt{3}}{2}u_{1B} - \frac{\sqrt{3}}{2}u_{1C} \right) \end{cases} \tag{4.35}$$

Pagal šias lygtis sudaromas koordinačių pakeitimo blokas, kurio struktūrinė schema pateikta 4.25 pav.

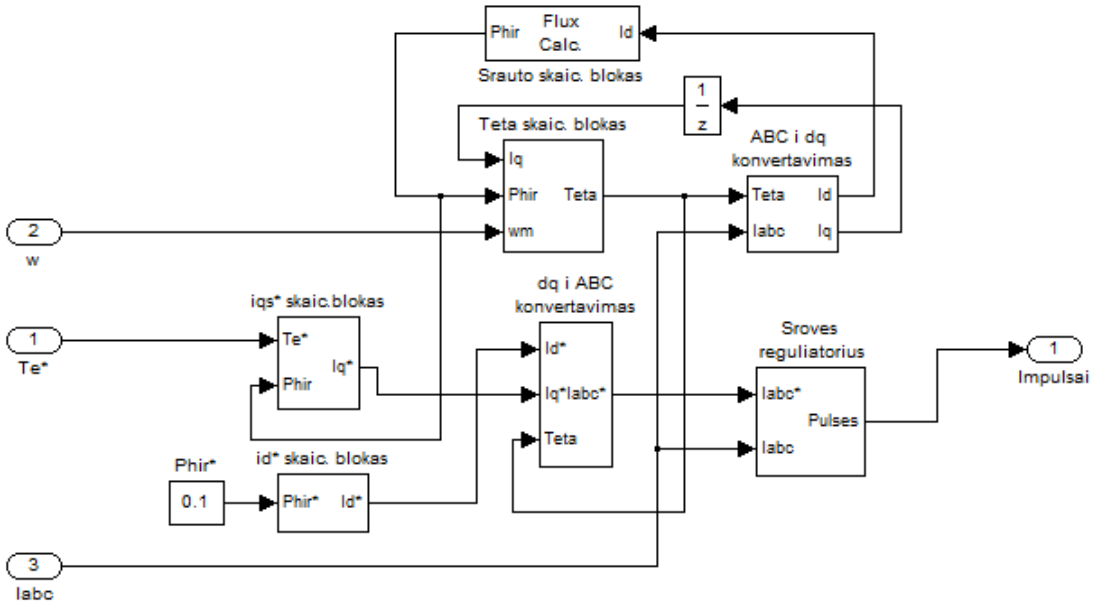


4.25 pav. Koordinačių pakeitimo blokas

Toliau remiantis išnagrinėta teorija sudarysime dažninės pavaros kompiuterinį modelį, kuriame būtų realizuotas lauko orientacijos arba vektorinio valdymo metodas (4.26 pav.). Modelio sudarymui pasinaudosime apžvelgtais valdymo principais, kai *d-q* koordinačių sistemos orientacija pagal rotoriaus srauto vektorių naudojama variklio momento ir srauto atskyrimui valdyme. Sudarome netiesioginio vektorinio valdymo sistemos modelį, kuriame rotoriaus (antrinio elemento) srauto vektoriaus padėties kampas Θ_e gaunamas netiesiogiai, t.y. iš antrinio elemento greičio ir slydimo dažnio. Kadangi esant vektorinio valdymo įtampos modeliui pavara gali gerai veikti tik virš 2 % nuo pradinio greičio zonoje, sudarysime srovės modelį, kuris užtikrina tikslų reguliavimą esant labai mažam greičiui. Šiame modelyje srautas gali būti paprastai valdomas atvirajame kontūre kaip i_{ds} funkcija, todėl modeliavimo supaprastinimui sudaromas vektorinio valdymo modelis tik su greičio reguliavimo kontūru, o srautas palaikomas pastovus.

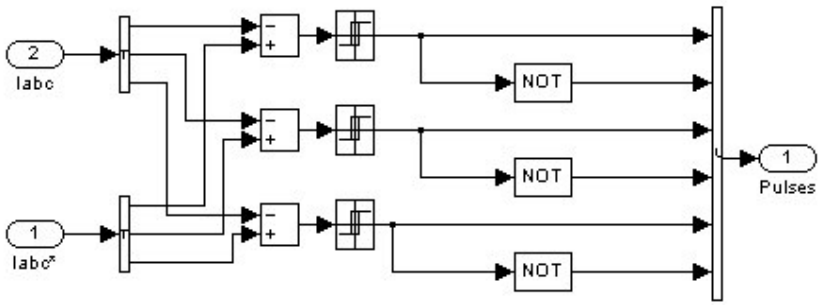


4.26 pav. Vektorinio valdymo sistemos kompiuterinis modelis



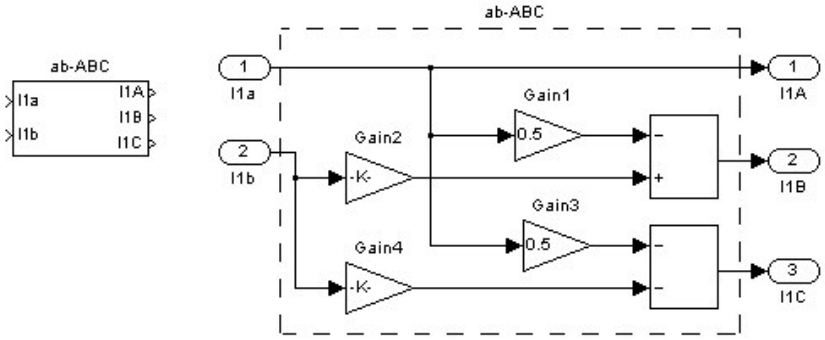
4.27 pav. Vektorinio valdymo bloko struktūrinė schema

Inverteris valdomas srovės reguliatoriumi, kuris sudarytas iš trijų relinių histerezės principu veikiančių elementų. Srovės reguliatoriaus struktūrinė schema pateikta 4.28 pav.



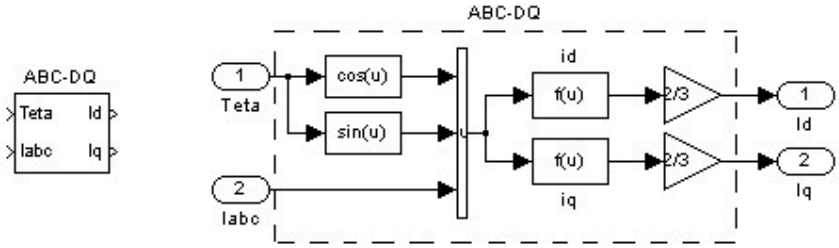
4.28 pav. Srovės reguliatoriaus struktūrinė schema

Sudaryto AV modelio bloke (4.24 pav.) išduodama dvifazė srovė, todėl norint paduoti ją į srovės reguliatoriaus įėjimą reikalingas koordinačių transformavimas. Panaudojant atvirkštinę Clark‘o transformaciją, kur pereinama iš dvifazės koordinačių sistemos α-β prie trifazės A, B, C, sudaromas koordinačių pakeitimo blokas, kurio struktūrinė schema pateikta 4.29 pav.



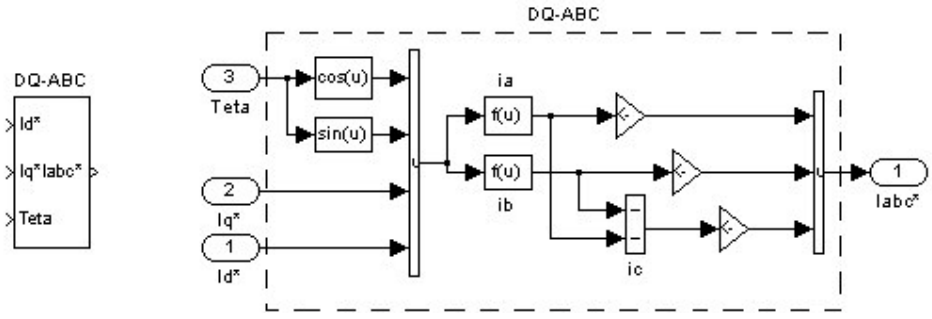
4.29 pav. α, β– *a, b, c* koordinačių pakeitimo bloko struktūrinė schema

Kadangi valdymas vyksta *d-q* koordinačių sistemoje, norint iš trifazės srovės sistemos gauti i_{ds} ir i_{dq} dedamąsias, reikia atlikti koordinačių transformavimą. Pasinaudojus tiesiogine Clark‘o ir Park‘o transformacijomis sudarome koordinačių pakeitimo bloką, kurio struktūrinė schema pateikta 4.30 pav.



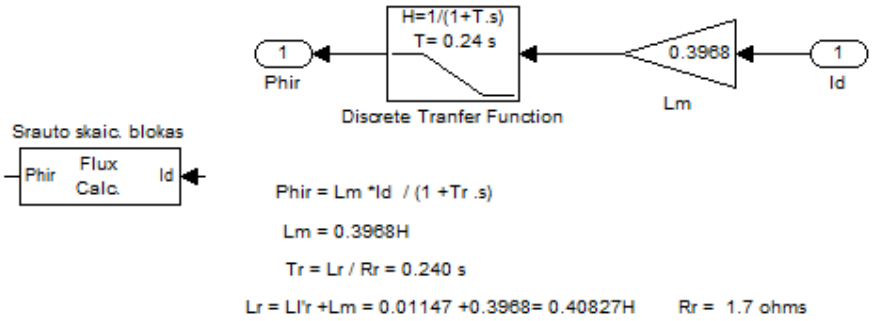
4.30 pav. *a, b, c – d,*q koordinačių pakeitimo bloko struktūrinė schema

Taikant atvirkštinę transformaciją sudaromas koordinačių pakeitimo blokas, kurio schema pateikta 4.31 pav.



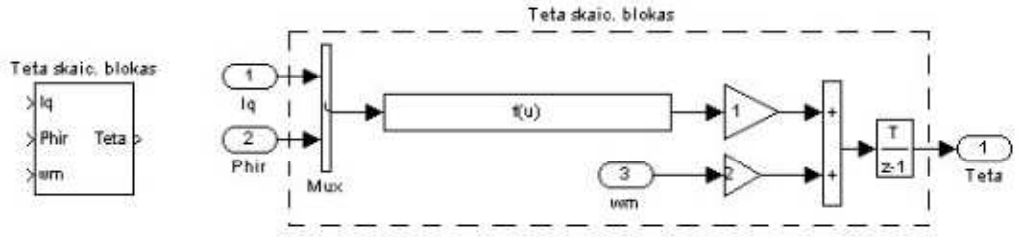
4.31 pav. *d,q – a, b, c* koordinačių pakeitimo bloko struktūrinė schema

Sudaromas rotoriaus (antrinio elemento) srauto skaičiavimo blokas, kuris pateiktas 4.32 pav.



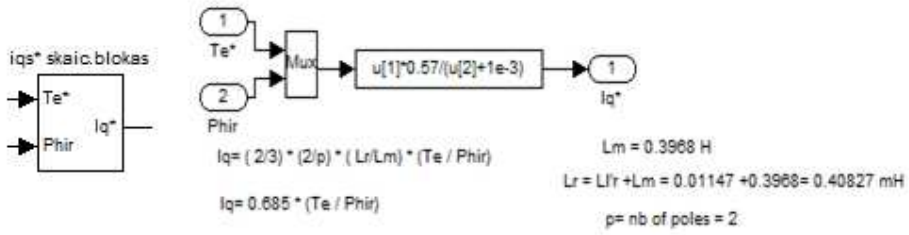
4.32 pav. Srauto skaičiavimo bloko struktūrinė schema

Toliau sudaromas antrinio elemento srauto padėties kampo skaičiavimo blokas. Bloko struktūrinė schema pavaizduota 4.33 pav.



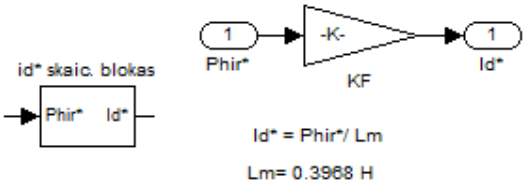
4.343 pav. Antrinio elemento srauto padėties kampo skaičiavimo bloko struktūrinė schema

Srovės vektoriaus i_{qs} dedamosios skaičiavimui pagal formulę sudaromas blokas, kuris pavaizduotas 4.34 pav.



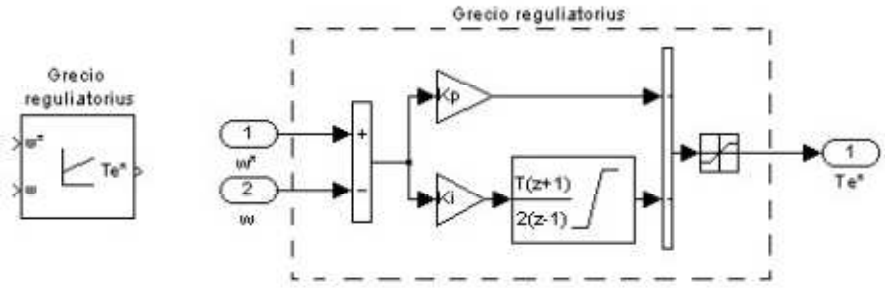
4.34 pav. *iqs* skaičiavimo bloko struktūrinė schema

Sudaromas i_{ds} dedamosios skaičiavimo blokas (4.35 pav.)



4.35 pav. *ids* skaičiavimo bloko struktūrinė schema

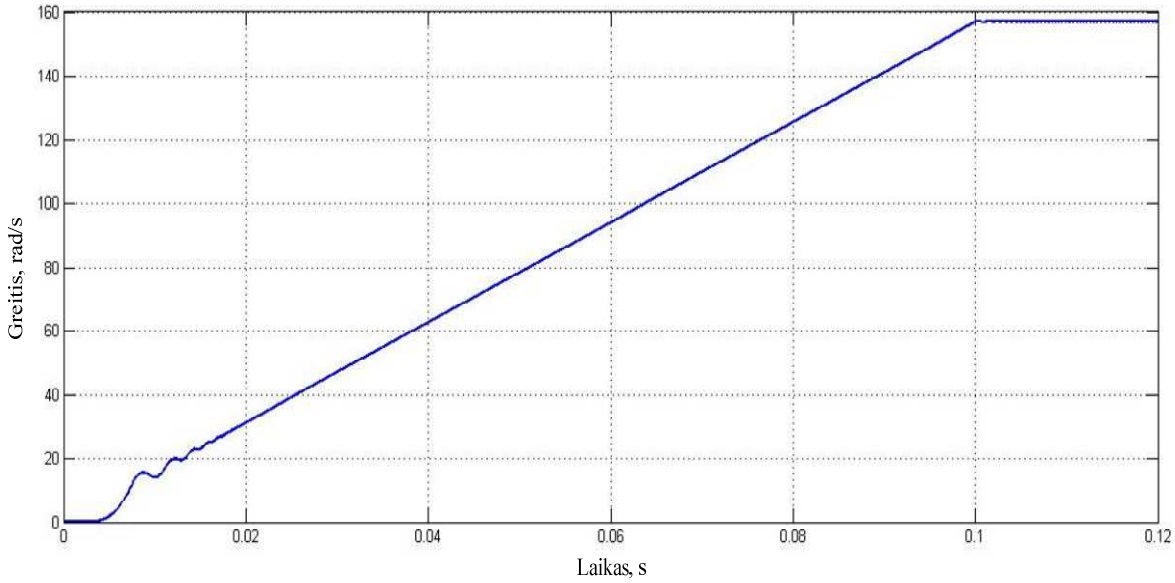
PI greičio reguliatoriaus bloko struktūrinė schema pateikta 4.36 pav.



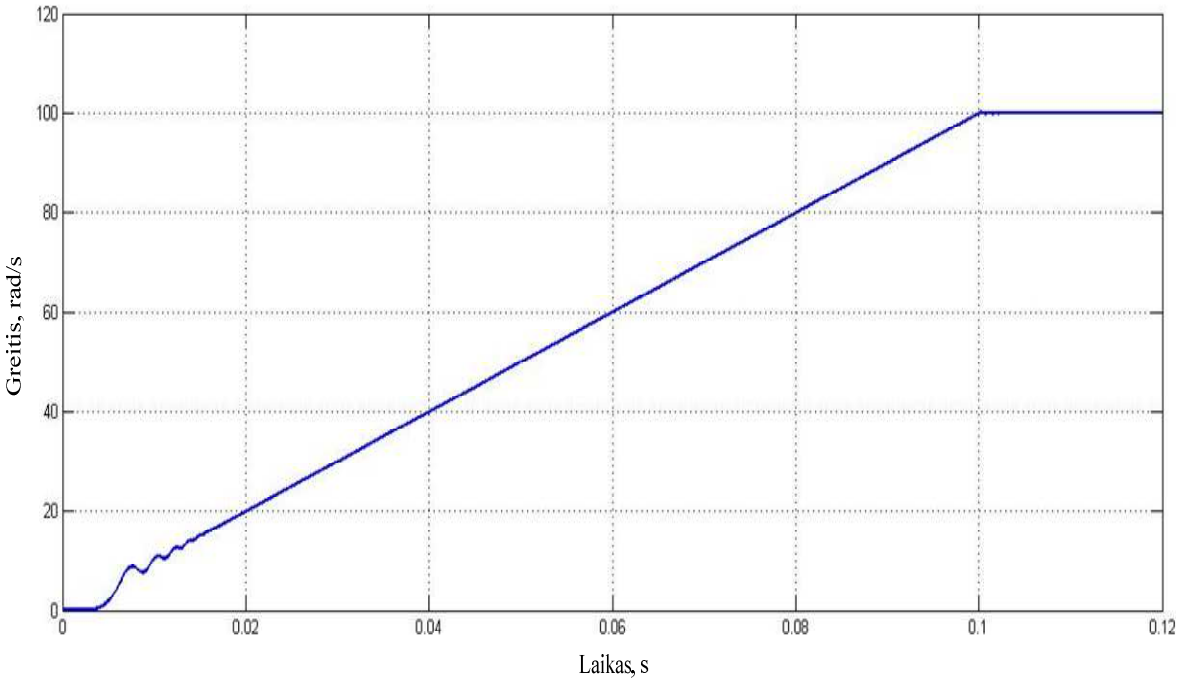
4.36 pav. PI greičio reguliatoriaus bloko struktūrinė schema

Prijungus prie sudaryto asinchroninio vektorinio valdymo dažninės pavaros modelio (4.26 pav.) stebėjimui pasirinktų išėjimų oscilografo blokus, gauname pereinamojo proceso charakteristikas.

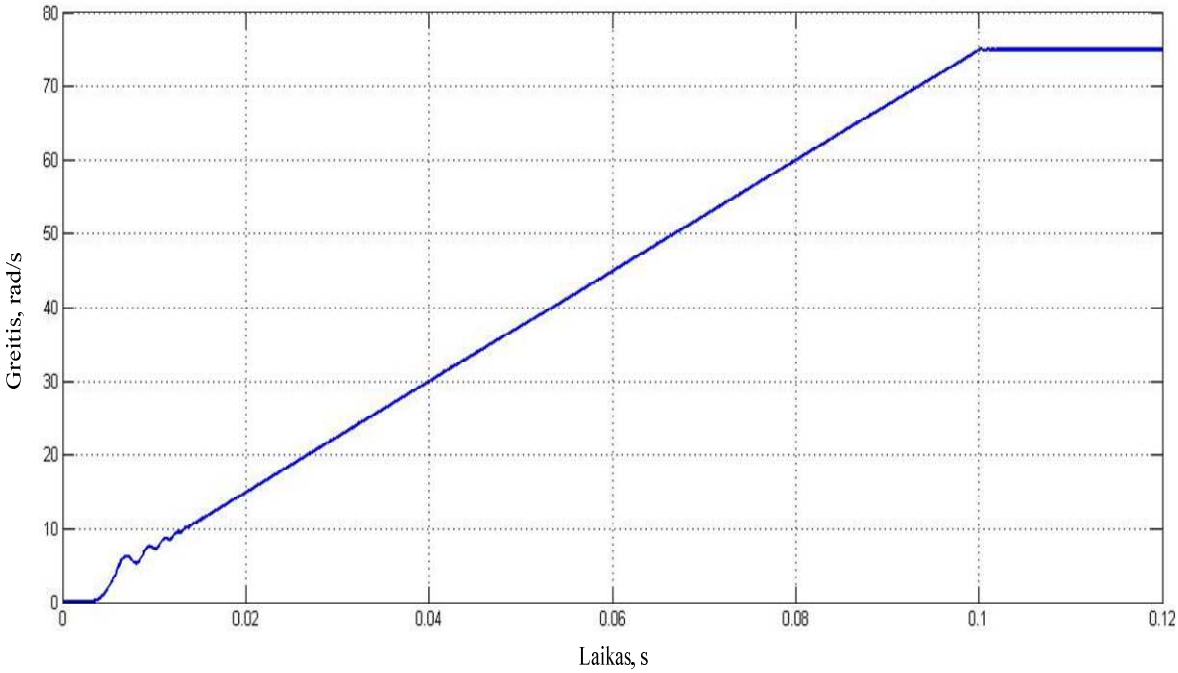
1. Be ventiliatorinės apkrovos



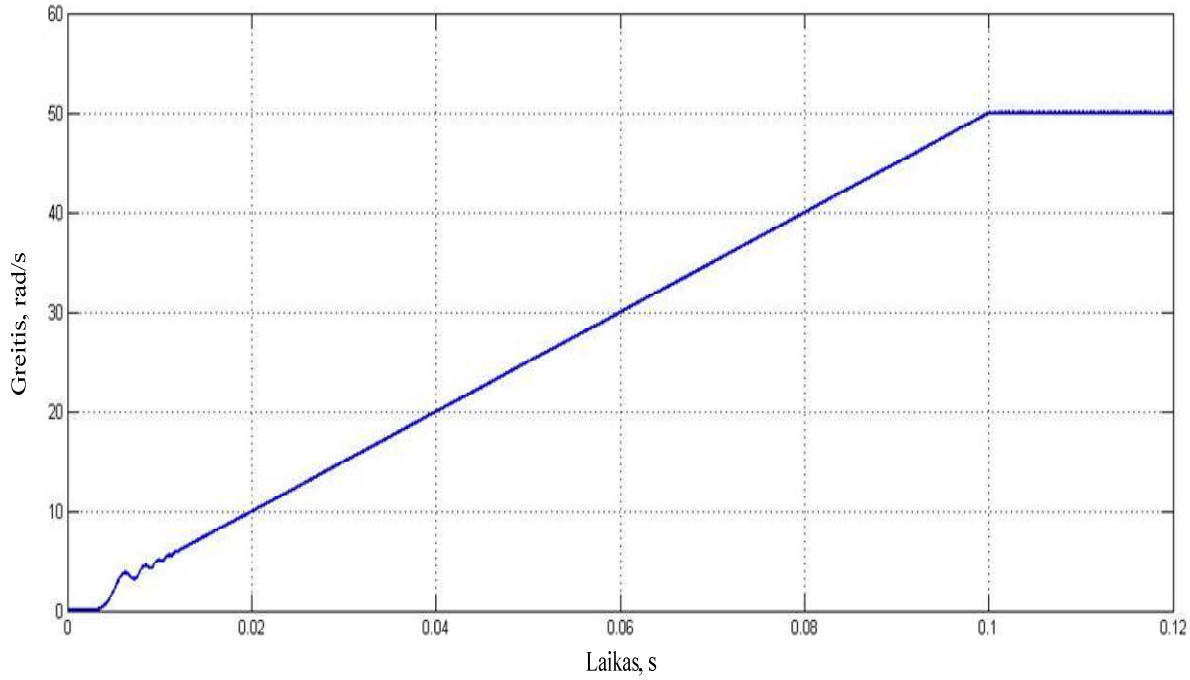
4.37 pav. Greičio pereinamasis procesas, esant 157 rad/s nuostatos signalui



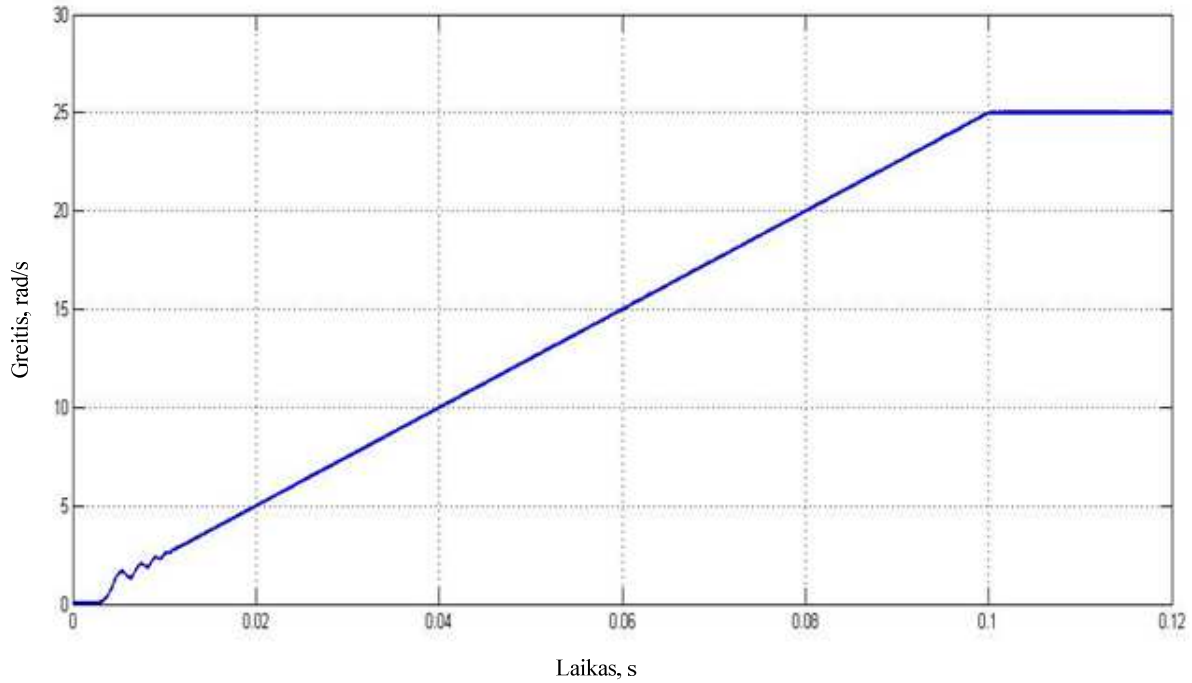
4.38 pav. Greičio pereinamasis vyksmas, esant 100 rad/s nuostatos signalui



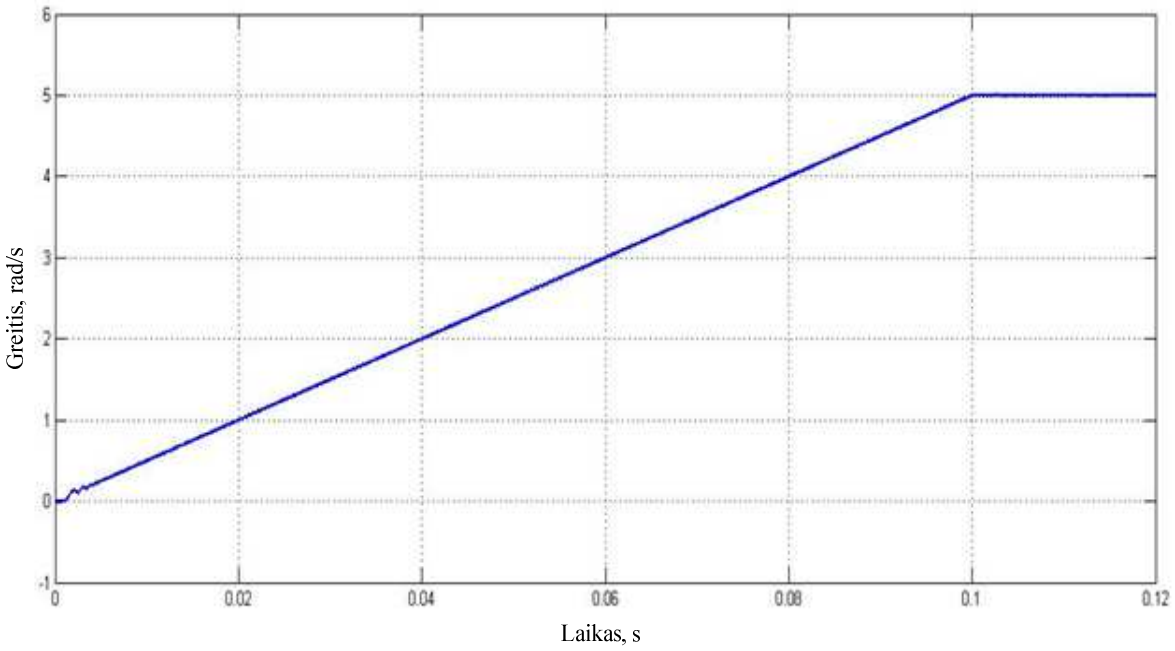
4.39 pav. Greičio pereinamasis vyksmas, esant 75 rad/s nuostatos signalui



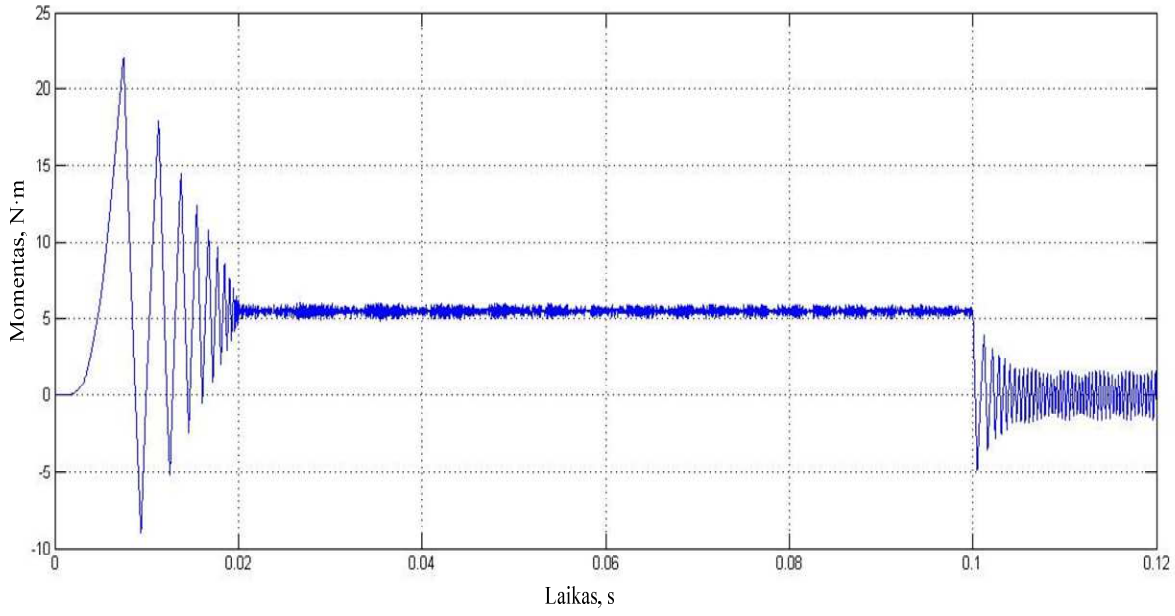
4.40 pav. Greičio pereinamasis vyksmas, esant 50 rad/s nuostatos signalui



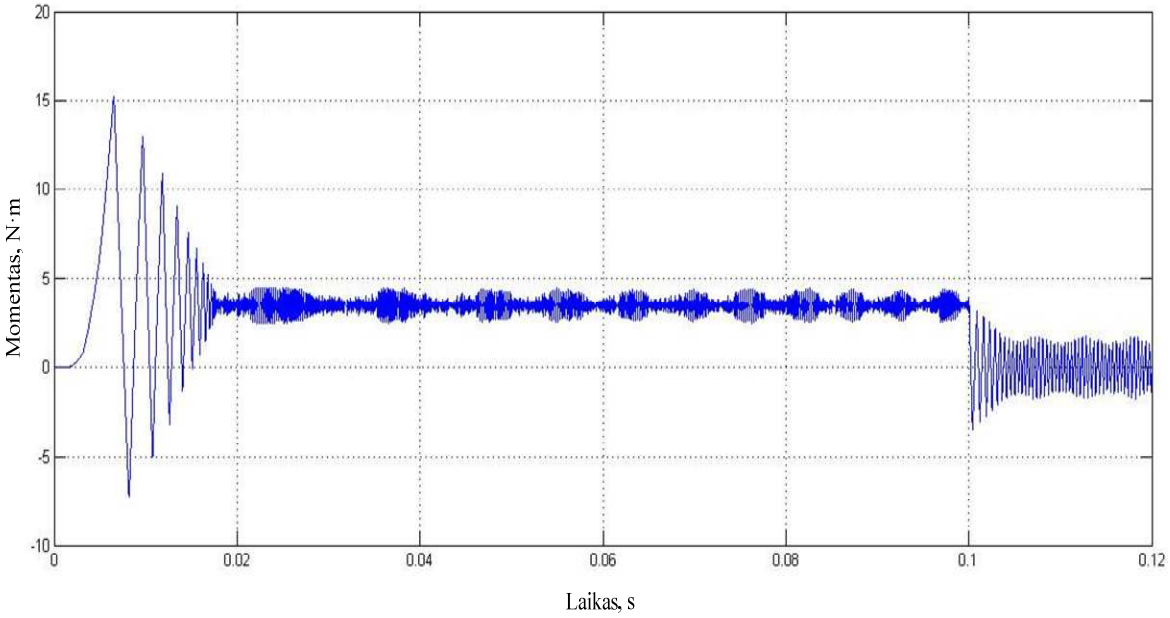
4.41 pav. Greičio pereinamasis vyksmas, esant 25 rad/s nuostatos signalui



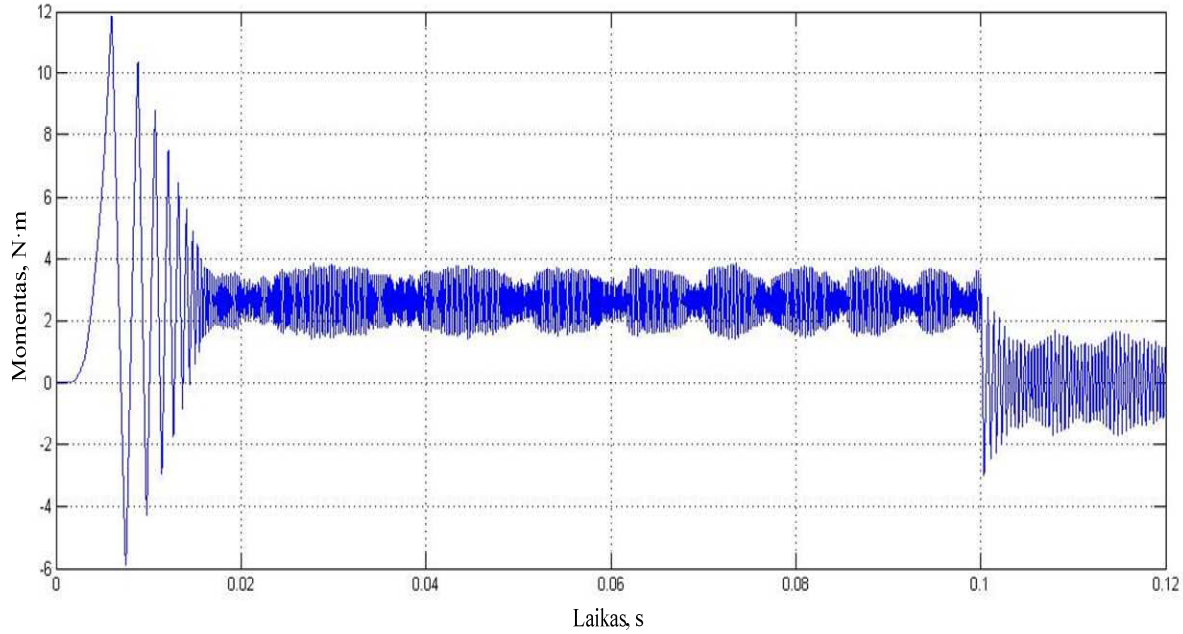
4.42 pav. Greičio pereinamasis vyksmas, esant 5 rad/s nuostatos signalui



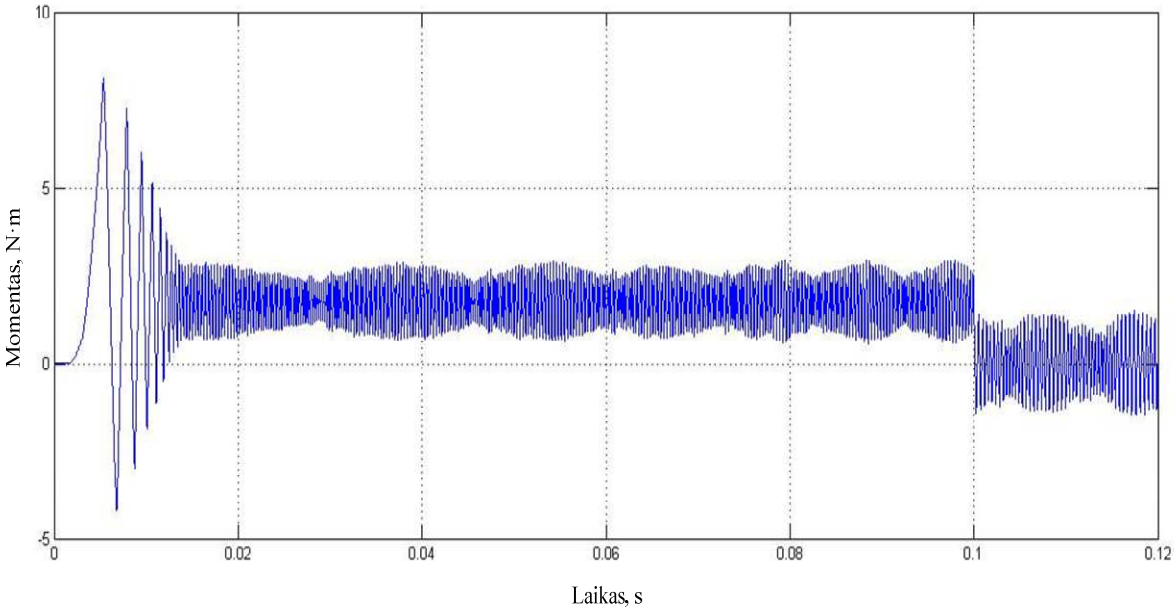
4.43 pav. Momento pereinamasis vyksmas, esant 157 rad/s nuostatos signalui



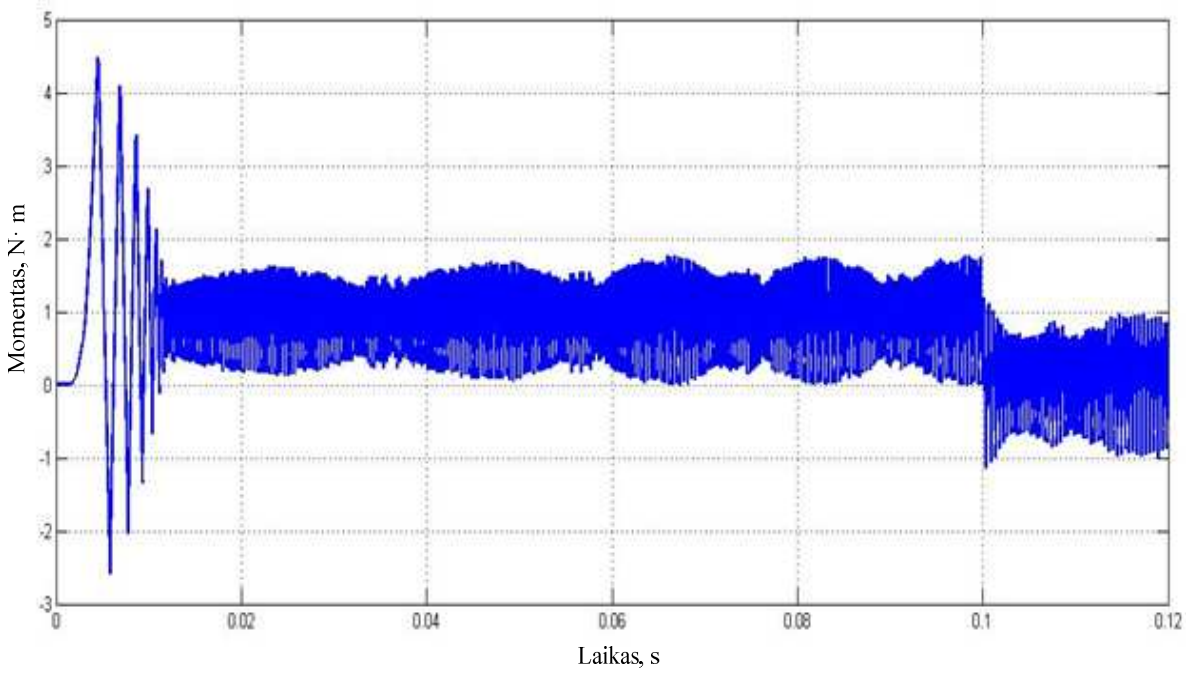
4.44 pav. Momento pereinamasis vyksmas, esant 100 rad/s nuostatos signalui



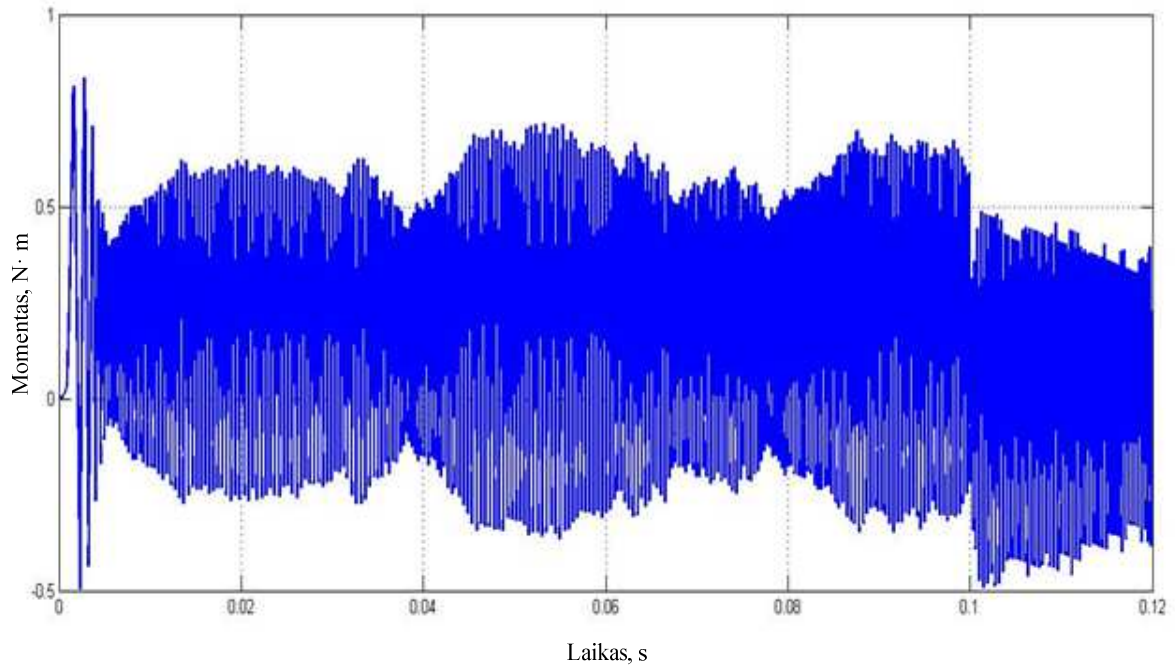
4.45 pav. Momento pereinamasis vyksmas, esant 75 rad/s nuostatos signalui



4.46 pav. Momento pereinamasis vyksmas, esant 50 rad/s nuostatos signalui

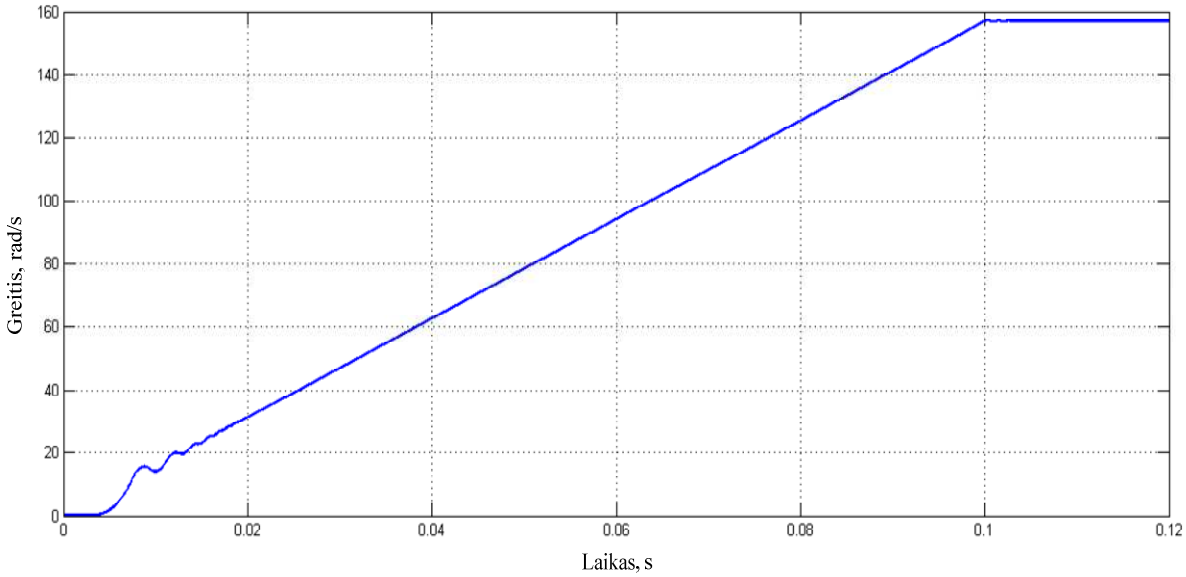


4.47 pav. Momento pereinamasis vyksmas, esant 25 rad/s nuostatos signalui

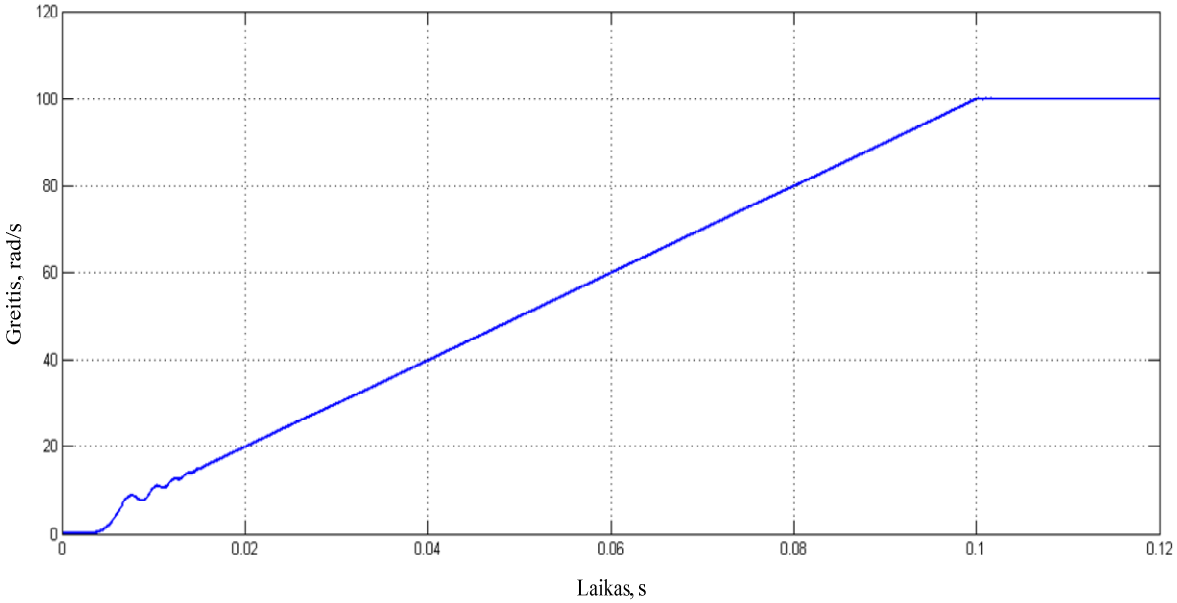


4.48 pav. Momento pereinamasis vyksmas, esant 5 rad/s nuostatos signalui

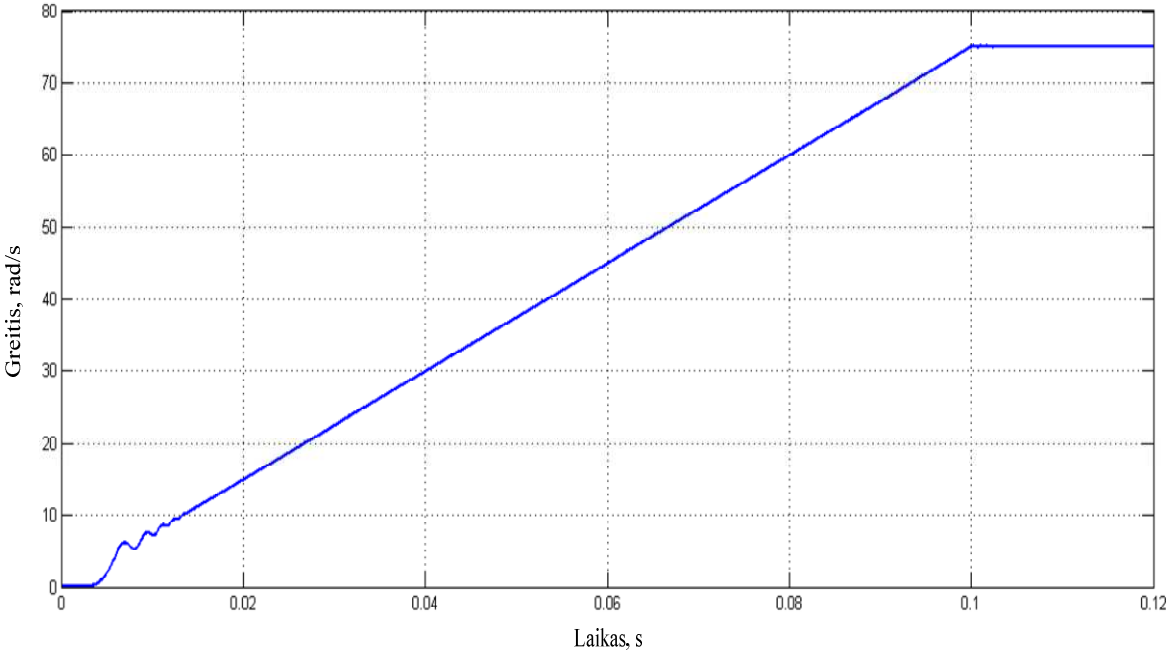
2. Su ventiliatorine apkrova



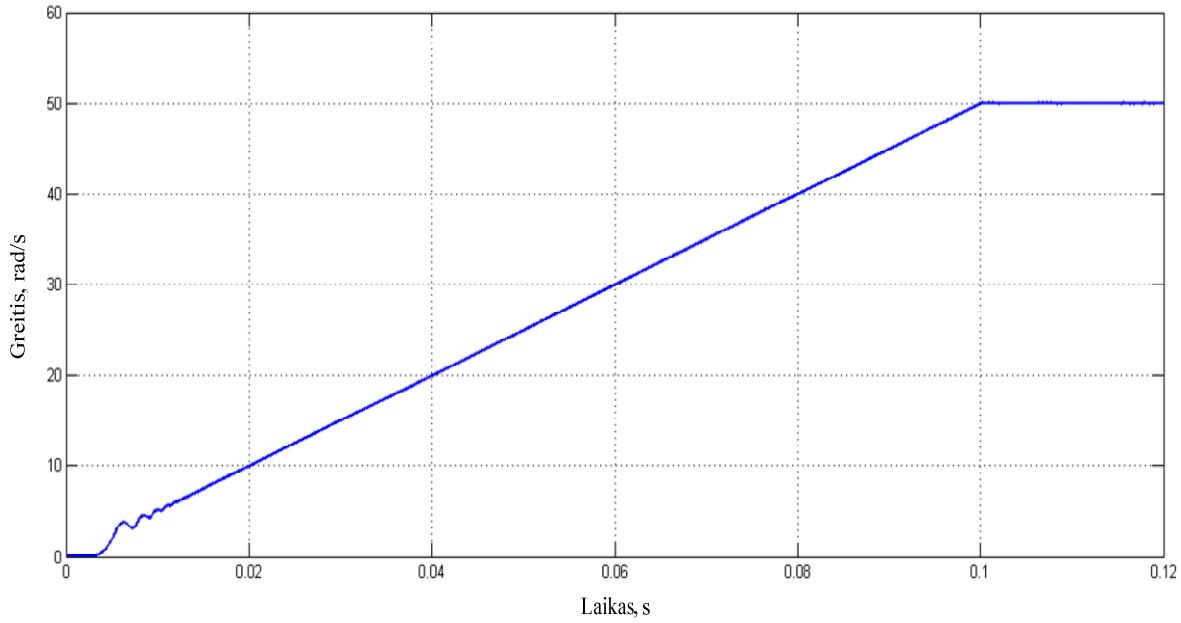
4.49 pav. Greičio pereinamasis vyksmas, esant 157 rad/s nuostatos signalui



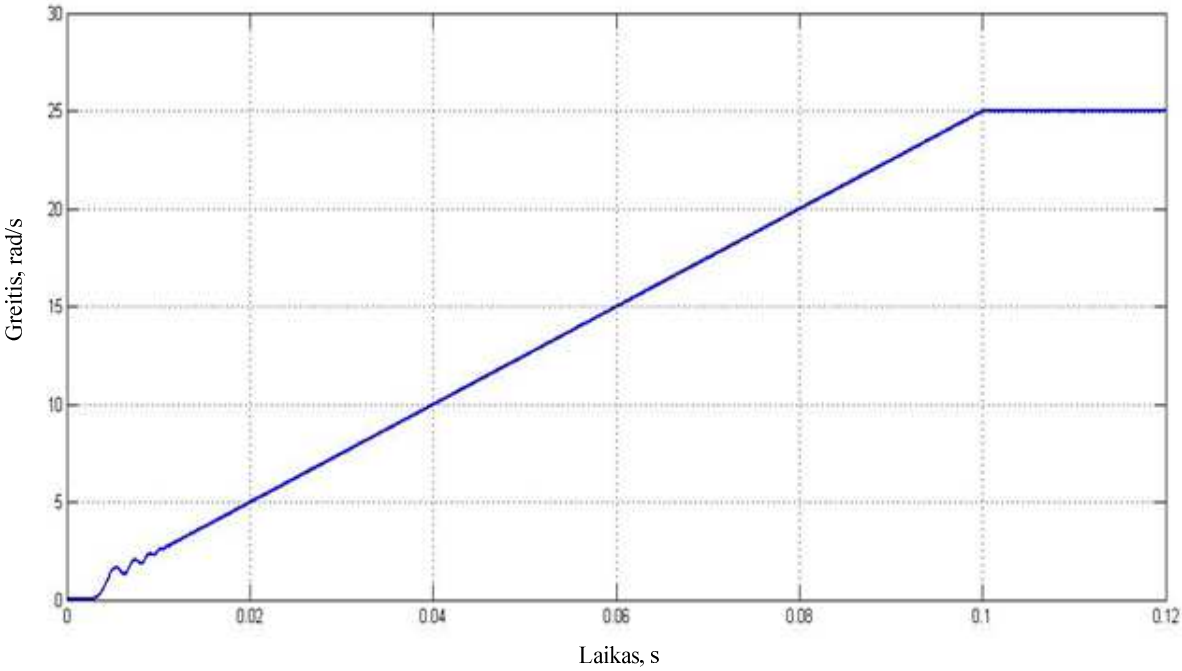
4.50 pav. Greičio pereinamasis vyksmas, esant 100 rad/s nuostatos signalui



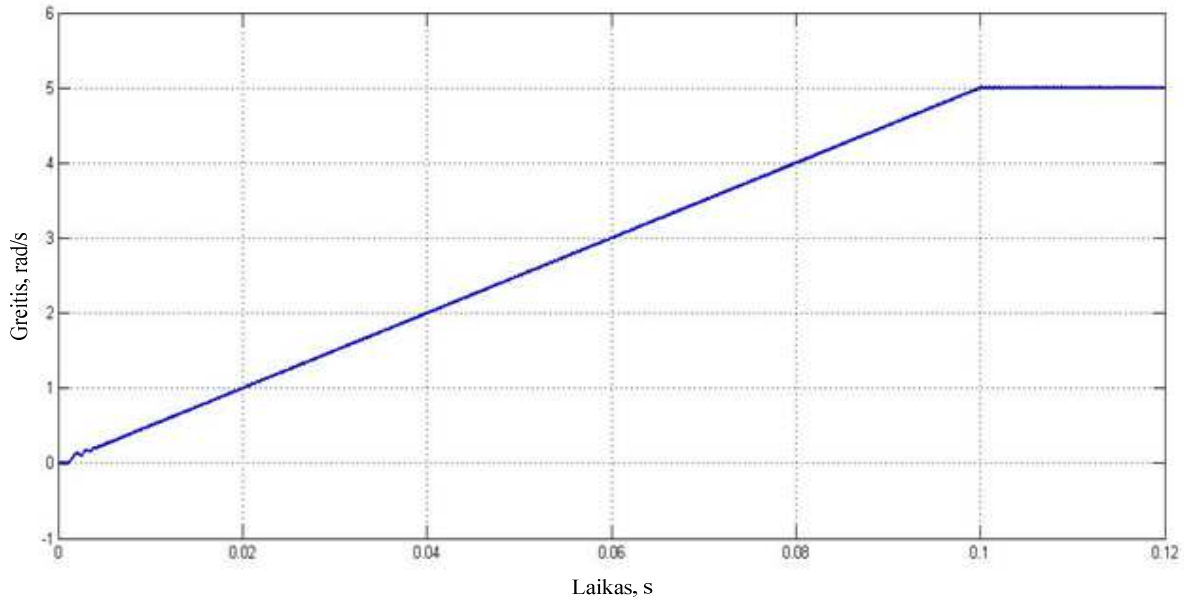
4.51 pav. Greičio pereinamasis vyksmas, esant 75 rad/s nuostatos signalui



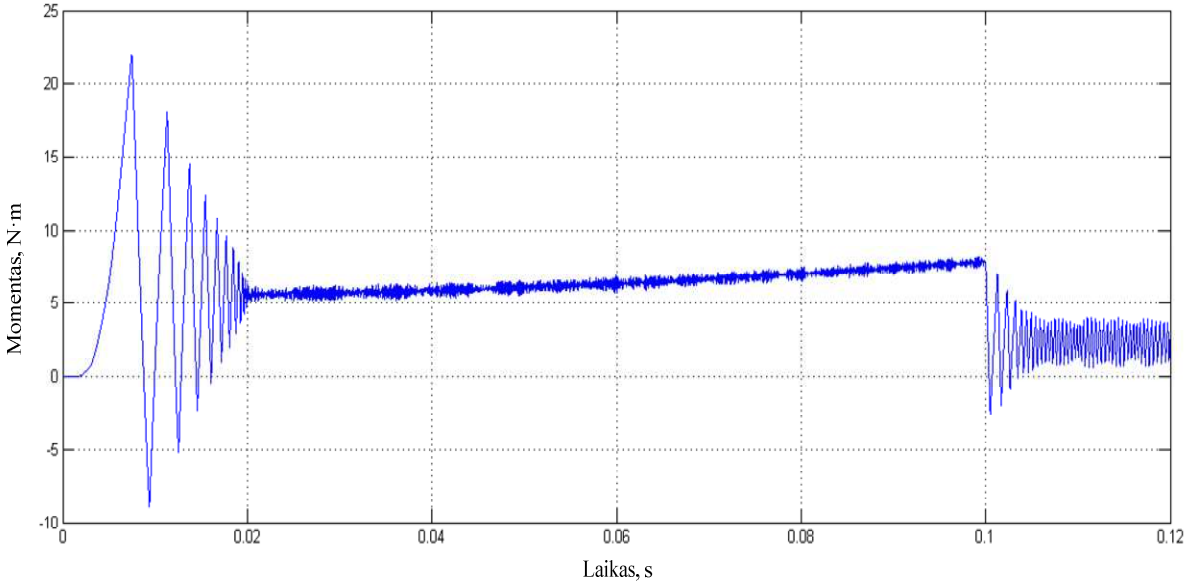
4.52 pav. Greičio pereinamasis vyksmas, esant 50 rad/s nuostatos signalui



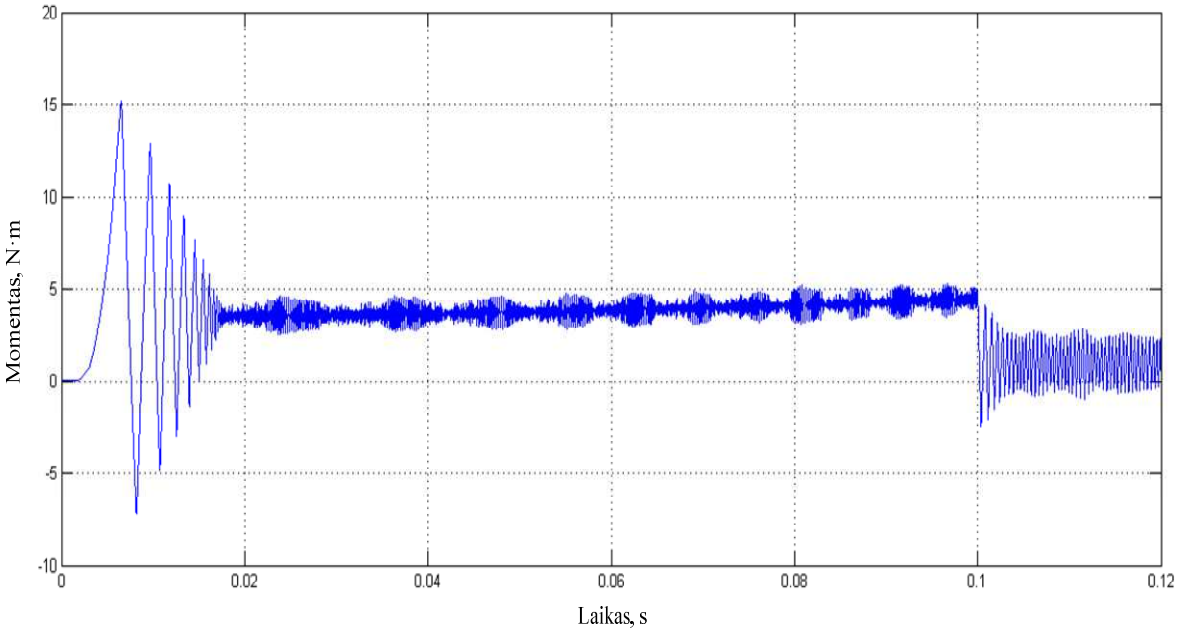
4.53 pav. Greičio pereinamasis vyksmas, esant 25 rad/s nuostatos signalui



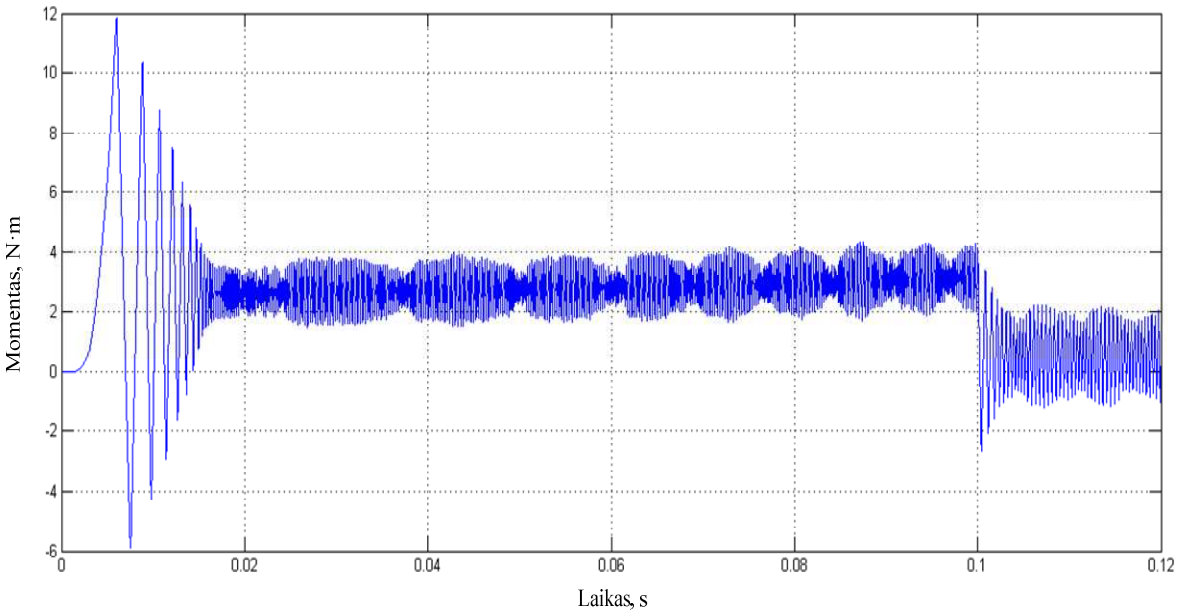
4.54 pav. Greičio pereinamasis vyksmas, esant 5 rad/s nuostatos signalui



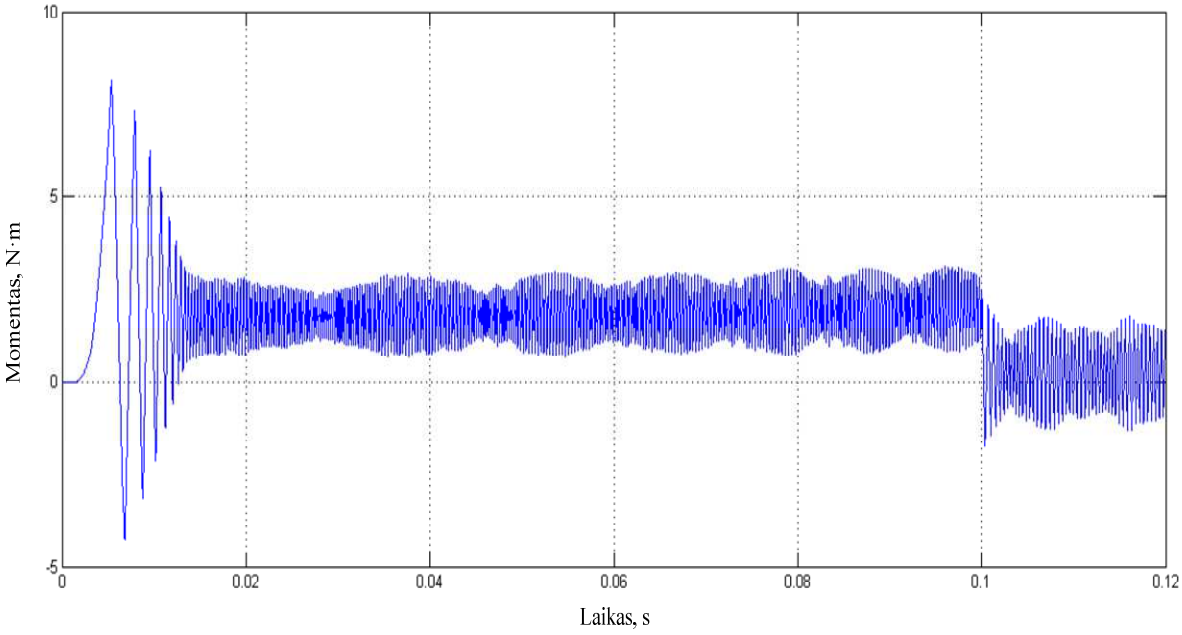
4.55 pav. Momento pereinamasis vyksmas, esant 157 rad/s nuostatos signalui



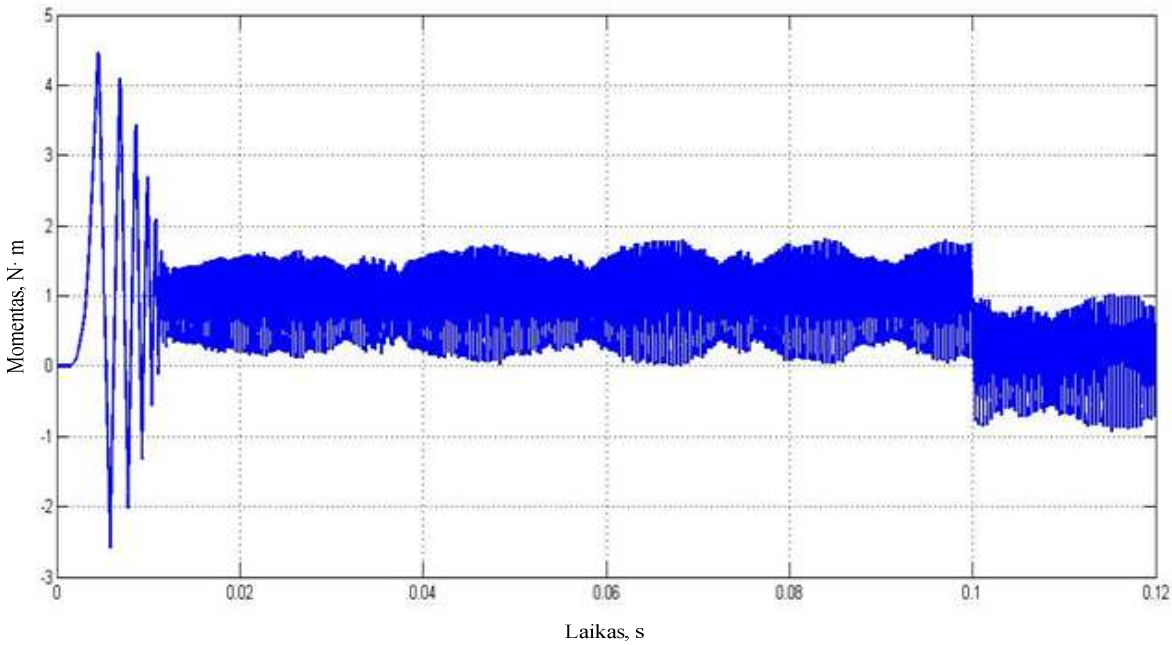
4.56 pav. Momento pereinamasis vyksmas, esant 100 rad/s nuostatos signalui



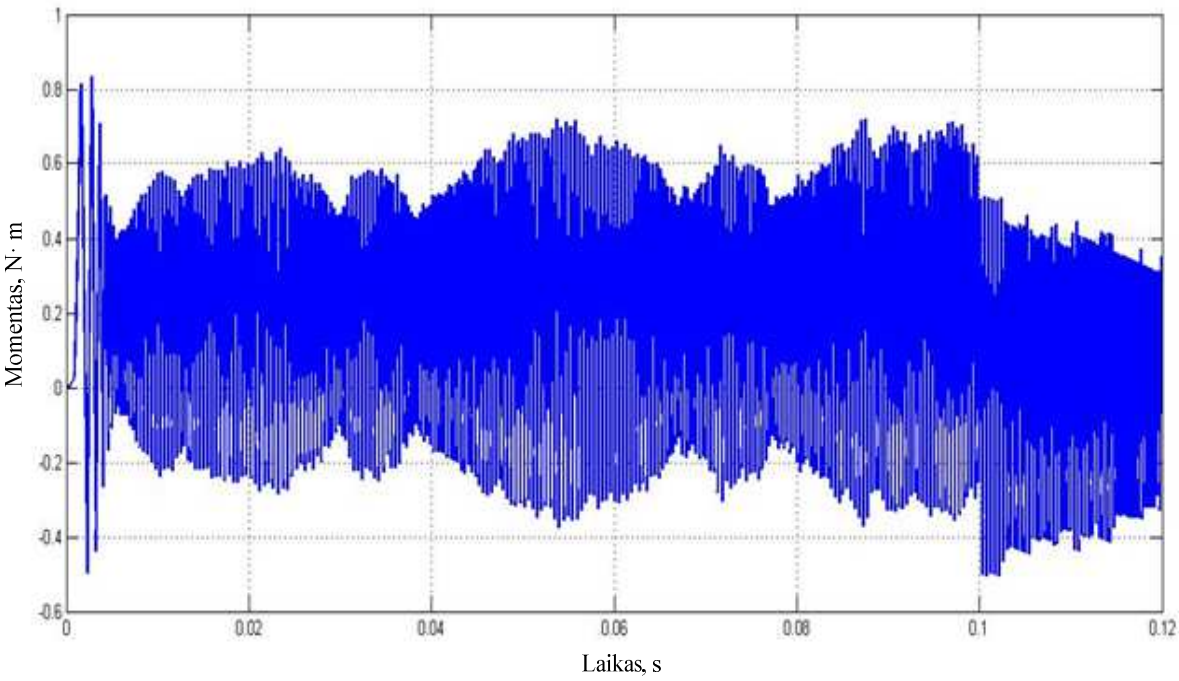
4.57 pav. Momento pereinamasis vyksmas, esant 75 rad/s nuostatos signalui



4.58 pav. Momento pereinamasis vyksmas, esant 50 rad/s nuostatos signalui



4.59 pav. Momento pereinamasis vyksmas, esant 25 rad/s nuostatos signalui



4.60 pav. Momento pereinamasis vyksmas, esant 5 rad/s nuostatos signalui

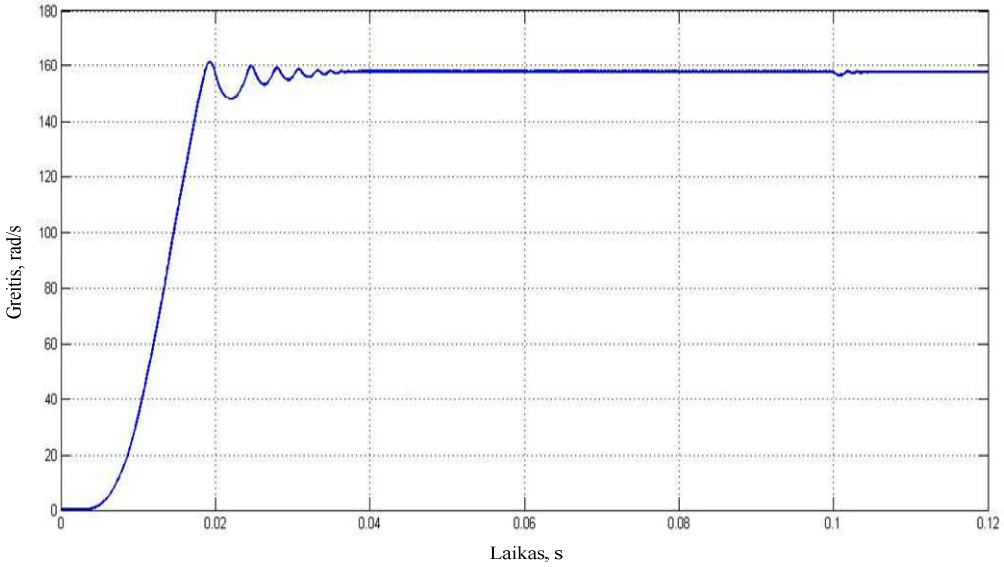
4.37-4.60 pav. pavaizduota 3 kW asinchroninio variklio, kurio duomenys pateikti 1 lentelėje, imitacijos rezultatai, esant 157 rad/s, 100 rad/s, 75 rad/s, 50 rad/s, 25 rad/s ir 5 rad/s greičio nuostatams. Sistema valdoma vektoriniu būdu.

4.37-4.48 pav. pateikti greičio ir momento pereinamieji vyksmai, kai variklis dirba neapkrautas. Iš pateiktų grafikų matyti, kad variklis pasileidžia esant tiek mažiems, tiek dideliems greičiams. Paleidžiant variklį greičio pereinamieji vyksmai pradžioje minimaliai švytuoja, per 0,1 s pasiekia nustatytą reikšmę ir nusistovi.

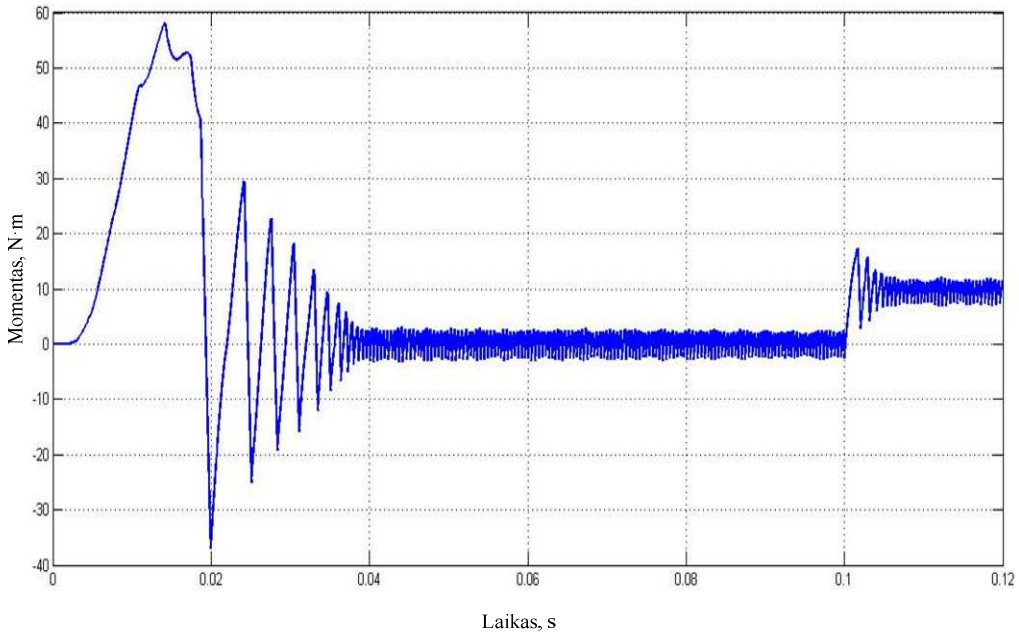
Momento pereinamieji vyksmai rodo, kad paleidžiant variklį momentas stipriai švytuoja, įgaudamas net neigiamas vertes. Laikui bėgant, momento vertė artėja prie nusistovėjusios vertės. Kuo mažesnis greičio nuostatas, tuo didesni švytavimai.

4.49-4.60 pav. pateikti greičio ir momento pereinamieji vyksmai, kai variklis dirba apkrautas ventiliatorine apkrova. Ventiliatorinė apkrova šiuo atveju turi nežymią įtaką variklio greičiui: variklio greitis sumažėja apie 0,02 %.

4.5. VEKTORINIO VALDYMO DAŽNINĖS ASINCHRONINĖS PAVAROS SU ŠUOLINE APKROVA GREIČIO IR MOMENTO PEREINAMIEJI VYKSMAI



4.61 pav. Greičio pereinamasis vyksmas, esant 157 rad/s nuostatos signalui



4.62 pav. Momento pereinamasis vyksmas, esant 157 rad/s nuostatos signalui

Paleidus variklį ir po 0,1 s apkrovus šuoline apkrova, greitis nuo nusistovėjusios vertės sumažėja apie 1,5 rad/s, t. y. apie 1 %, šiek tiek pašvytuoja ir grįžta į nusistovėjusį režimą. Tuo tarpu momento reikšmė pasiekia nominalią vertę ir nusistovi. Vektorinis valdymas užtikrina stabilų pavaros darbą, net ir staigiai apkrovus pavarą.

IŠVADOS

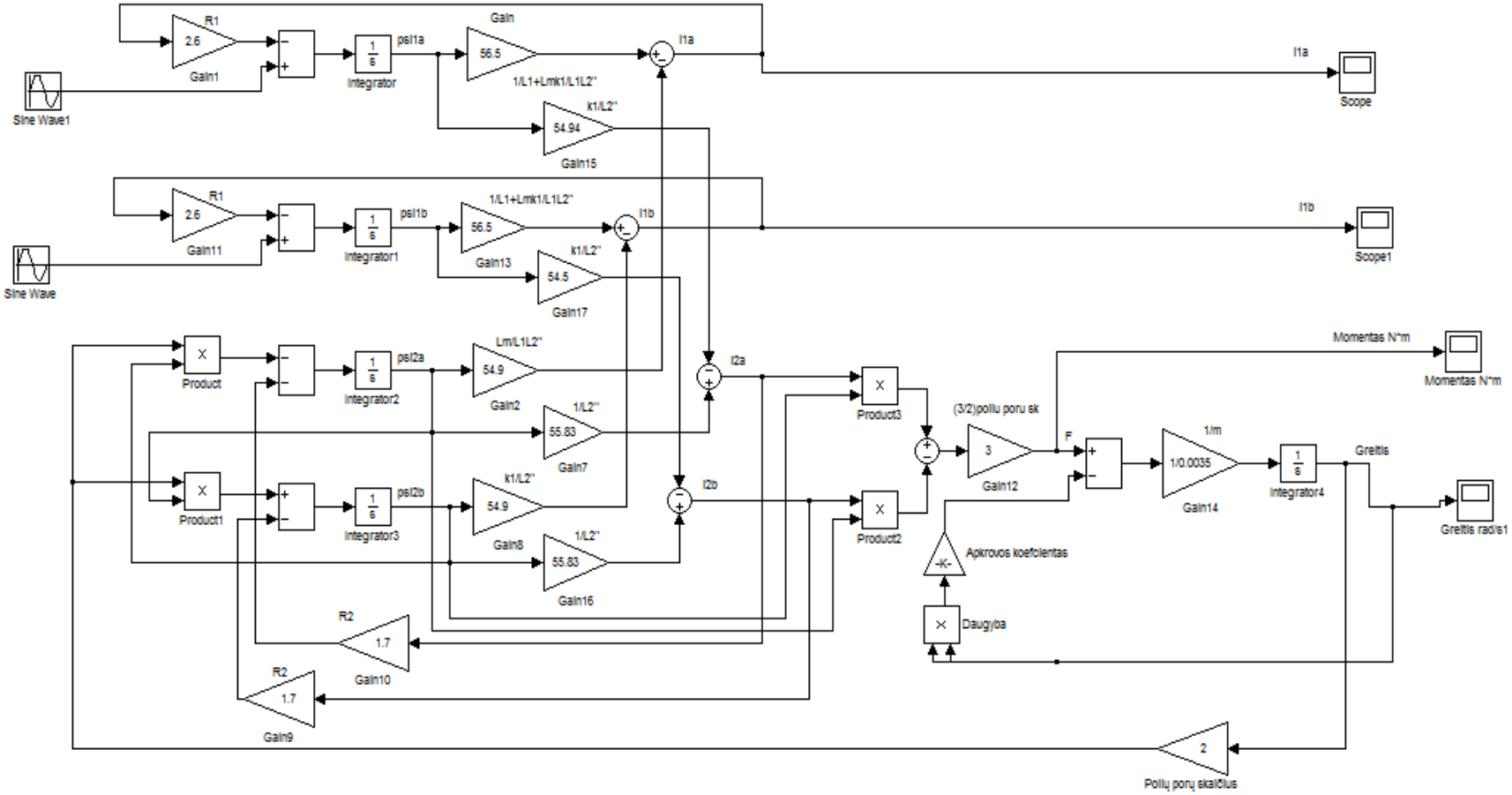
1. Baigiamajame darbe sudarytas skaliarinio ir vektorinio valdymo dažninės asinchroninės pavaros kompiuterinis modelis. Ištirtos kampinio greičio ir momento dinaminės charakteristikos, kai pavara dirba su ventiliatorine apkrova ir be jos.
2. Sudarytas dažninės sistemos skaliarinio valdymo kompiuterinis modelis, išlaikant pastovų V/Hz santykį, proporcingai keičiant įtampą bei dažnį. Imitacijos rezultatai rodo, kad esant dideliems greičiams pereinamojo vyksmo trukmė yra apie 0,26 s. Greičiui mažėjant, paleidimo trukmė sumažėja iki 0,08 s. Apkrovus variklį ventiliatorine apkrova, pavaros greitis sumažėja 1 %, greičio svyravimai sumažėja nuo ±5 % iki ±2 %.
3. Sudarytas vektorinio valdymo, pagrįsto asinchroninio variklio statoriaus srovės dedamųjų reguliavimu, *Matlab Simulink* modelis. Pateikiami ir palyginami modelio imitacijos rezultatai su ventiliatorine apkrova ir be apkrovos.
4. Esant vektoriniam valdymui, variklio pereinamieji vyksmai atitinka užduotus kokybės reikalavimus. Paleidžiant variklį greičio pereinamieji vyksmai pradžioje minimaliai švytuoja, per 0,1 s pasiekia nustatytą reikšmę ir nusistovi ties nominaliąja verte.
5. Apkrovus variklį ventiliatorine apkrova, pavaros greitis sumažėja 0,02 %.
6. Vektoriniam valdymui naudojamas PI reguliatorius tiksliai palaiko užduotą greitį nusistovėjusio režimo metu ir užtikrina dinaminį greičio tikslumą.
7. Naudojant skaliarinio valdymo modelį, pavaros pereinamieji vyksmai dažnių diapazone, pradedant nuo 10 Hz ir žemesniame, yra švytuojantys. Vektorinio valdymo modelis užtikrina pavaros darbą tiek didelių, tiek mažų greičių diapazone.
8. Skaliarinio valdymo metodas dažniausiai taikomas ventiliatorinėms siurblių pavaroms, kur tikslus greičio reguliavimas nėra reikalaujamas. Skaliarinio valdymo greičio paklaida siekia 1 %, tuo tarpu vektorinis valdymas užtikrina didelį reguliavimo tikslumą – 0,02 %.
9. Vektorinio valdymo greičio pereinamojo proceso trukmė apie šešis kartus trumpesnė už skaliarinio valdymo.
10. Vektorinis dažninės pavaros valdymas leidžia sutrumpinti variklio įgreitėjimo laiką ir apriboti didžiausią momento vertę. Modelis skirtas tirti darbo režimus, analizuoti variklio pereinamuosius vyksmus, esant įvairioms apkrovoms.

LITERATŪRA

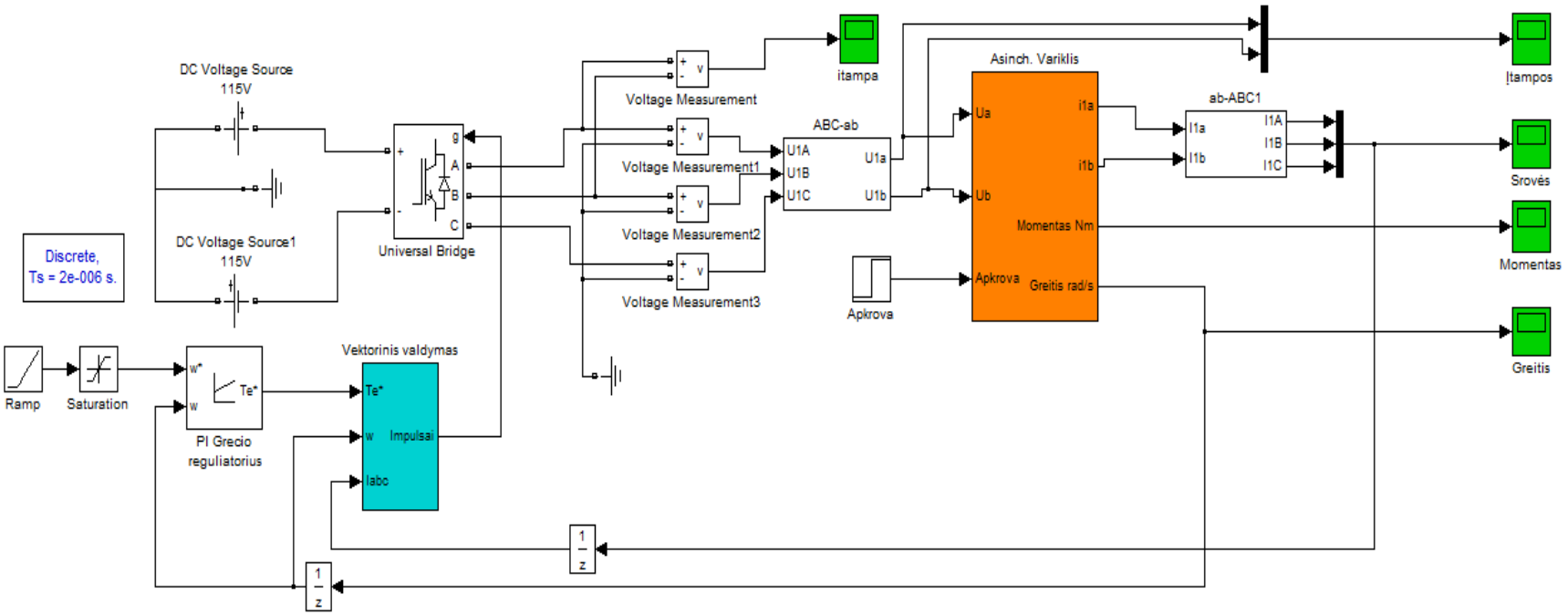
1. ALEKSA V., GALVANAUSKAS V. Technologinių procesų automatizavimas ir valdymas. Vadovėlis. Kaunas: Technologija 2008. 95 p.
2. BATKAUSKAS V. Dažninių elektros pavarų dinaminiai modeliai. Daktaro disertacija Technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija (01T). Vilnius: Technika, 2010, 110 p.
3. BARNES M. Practical Variable Speed Drives and Power Electronics. Great Britain, 2003. 299 p.
4. BIMAL K. BOSE. Modern Power Electronics and AC Drives. New Jersey: Prentice Hall PTR, 2002. – P. 738.
5. BOLTON K. Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engeneering. (3rd edition). England, 2003. 567p.
6. DAUNORAS J. Dinaminių sistemų modeliavimas naudojant *Matlab/Simulink*. – Kaunas: Technologija, 2001. 74 p.
7. Field Orientated Control of 3-Phase AC-Motors. Texas Instruments. February 1998 [žiūrėta 2013-02-18]. Prieiga per internetą: www.ti.com.
8. GELEŽEVIČIUS V. A., KAULAKIENĖ A., Marcinkevičius S., POCIUS R., POŠKA A.J., RINKEVIČIENĖ R., SAVICKIENĖ Z.; SLIVINSKAS K. (vyr. red. A. J. POŠKA). Automatikos terminų žodynas. Vilnius: Technika, 2004. 716 p.
9. GELEŽEVIČIUS V. A., KRIŠČIŪNAS K., KUBILIUS V. Elektros pavarų valdymo sistemos. Vilnius: Mokslas, 1990. 358 p.
10. GELEŽEVIČIUS V. A. Mechatroninės sistemos. Vilnius: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 2008. 219 p.
11. GERDŽIŪNAS P., PLAKYS V. Bendrieji akademiniu darbų įforminimo reikalavimai. Vilnius: Technika, 2005. 75 p.
12. GIČAN V., AUGUSTAITIS V. K. Poligrafinių mechatroninių sistemų modeliavimas. Vilnius: Technika, 2011. 261 p.
13. Introduction to Space Vector Modulation using NEC's 8-bit Motor Control Microcontrollers, 2003 [žiūrėta 2012-11-02]. Prieiga per internetą: www.ee.nec.de.
14. JENKINAS P. Tiesiaeigės dažninės pavaros tyrimas. Baigiamasis magistro darbas. 2004. 94 p.
15. JURAITIS S. Dvimasės elektromechaninės sistemos pereinamųjų vyksmų tyrimas. Daktaro disertacija. Technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija (01T). Vilnius: Technika. 2012. 142 p.

16. LISAUSKAS S. Šiuolaikinės elektros pavaros. Mokomoji knyga. Vilnius: Technika. 2012. 121 p.
17. MASTEIKA R. K. Elektros pavaros. Kaunas: Technologija, 2002. 125 p.
18. MUKULIS R. J. Elektrotechnikos terminų žodynas: 11 530 terminu: lietuvių k., vokiečių k., anglų k., prancūzų k., rusų k. Kaunas: Technologija, 1999. 871 p.
19. PETROVAS A. Trifazių asinchroninių variklių dinaminiai modeliai. Daktaro disertacija. Technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija (01T). Vilnius: Technika, 2007, 103 p.
20. PETROVAS A., LISAUSKAS S., RINKEVIČIENĖ R. System of measuring speed of induction motor. Elektronika ir elektrotechnika. ISSN 1392-1215, No. 5 (101), p. 27-30.
21. PETROVAS A., LISAUSKAS S., BATKAUSKAS V., BAŠKYS A. Variable speed drive supplied by the voltage formed using special purpose algorithm. . Elektronika ir elektrotechnika. ISSN 1392-1215, 2008, No. 7 (87), p. 53-56
22. POŠKA A. ir kt. Automatikos terminų žodynas (lietuvių, vokiečių, anglų, prancūzų, rusų kalbų). Vilnius: Technika. 2004, 715 p.
23. RADZEVIČIUS L. Elektros inžinerijos magistrantūros studijų tiriamieji ir baigiamieji darbai. Vilnius: Technika, 2009. 66 p.
24. RINKEVIČIENĖ R., PETROVAS A. Mechatroninių sistemų modeliavimas. Vilnius: Vilniaus pedagoginio universiteto modeliavimas, 2008. 165 psl.
25. RINKEVIČIENĖ R., BATKAUSKAS V. Modeling and investigation of vector controlled induction drive // Electronics and Electrical Engineering. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2008. – No.1(81). – P. 53–56.
26. RINKEVIČIENĖ R., PETROVAS A. Modelling AC induction drive in Pspice. Elektronika ir elektrotechnika. Kaunas: Technologija. ISSN 1392-1215, 2007, No. 1 (73), p. 29-32.
27. RINKEVIČIENĖ R., PETROVAS A. Modelling of frequency controlled induction drive with ventilator type load.. Elektronika ir elektrotechnika. Kaunas: Technologija. ISSN 1392-1215, 2009, No. 6 (94), p. 69-72.
28. RINKEVIČIENĖ R., LISAUSKAS S. Tiesiaeigių mechatroninių sistemų modeliai. Vilnius: Technika, 2003.
29. SMILGEVIČIUS A. Automatikos mikromašinos. Vilnius: Technika, 2005. 343 p.
30. Technical guide to variable speed drives. ABB 2002 [žiūrėta 2013-01-29]. Prieiga per internetą: http://www.ab.com/support/abdrives/documentation/fb/1024.pdf
31. TRINKŪNAITĖ I. Bejutiklės asinchroninės pavaros modeliavimas. Baigiamasis magistro darbas. 2011. 88 p.

PRIEDAI



4.1 pav. Asinchroninės dažninės pavaros kompiuterinis modelis



4.26 pav. Vektorinio valdymo sistemos kompiuterinis modelis