

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Sigitas JURAITIS

DVIMASĖS ELEKTROMECHANINĖS SISTEMOS PEREINAMŲJŲ VYKSMŲ TYRIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS INŽINERIJA (01T)



LEIDYKLA

Vilnius TECHNIKA 2012

Disertacija rengta 2008–2012 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Roma RINKEVIČIENĖ (Vilnius Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2012-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-457-140-4

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2012

© Sigitas, Juraitis, 2012

sigitas.juraitis@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Sigitas JURAITIS

RESEARCH OF TRANSIENT PROCESSES IN ELECTROMECHANICAL TWO-MASS SYSTEM

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING (01T)



LEIDYKLA

Vilnius TECHNIKA 2012

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2008–2012.

Scientific Supervisor

Prof Dr Habil Roma RINKEVIČIENĖ (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

Santrauka

Disertacijoje nagrinėjamos dvimasės elektromechaninės sistemos, sudaromi kompiuteriniai imitaciniai modeliai, pristatomi nevaldomų ir valdomų dvimasių elektromechaninių sistemų tyrimai, atlikti pritaikius skirtingus valdymo dėsnius. Toliau tekste pristatomas dvimasės elektromechaninės sistemos eksperimentinio stendo konstravimas bei pateikiami gauti pereinamųjų vyksmų rezultatai.

Disertaciją sudaro įvadas, keturi pagrindiniai skyriai, išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai.

Įvadiniamе skyriuje pateikiama tiriamoji problema, darbo aktualumas, tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai, tyrimų objektas, darbo tikslas ir uždaviniai. Įvado pabaigoje pristatomos autoriaus paskelbtos publikacijos disertacijos tema ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra.

Pirmajame skyriuje pateikiama literatūros analizė ir redukuotos vienmasės sistemos bei tampriosios dvimasės sistemos su laisvumu matematinis aprašymas. Toliau tekste pateikiami asinchroninių variklių skirtingose koordinačių sistemose matematiniai modeliai, aprašomi vektorinio ir neraiškiosios logikos reguliatoriaus valdymo principai. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje aprašomi: sudaryti asinchroninių variklių imitaciniai modeliai, dvimasės sistemos modelis su variklio teorine momento kitimo laike išraiška, vektorinio valdymo ir neraiškiosios logikos reguliatoriaus imitaciniai modeliai. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados.

Trečiajame skyriuje pristatomi dvimasės elektromechaninės sistemos imitaciniai modeliai su asinchroniniu varikliu, valdomu vektoriniu būdu ir neraiškiosios logikos reguliatoriumi, aprašomi imitaciniai bandymai, atlikti keičiant sistemos parametrus ir apkrovą, analizuojami gauti greičio ir momento pereinamieji vyksmai. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados.

Ketvirtajame skyriuje aprašomi: eksperimentinio stendo konstravimas, specialaus greičio matavimo prietaiso kūrimas, atlikti tyrimai su skirtingomis apkrovomis, gauti greičio ir momento pereinamieji vyksmai. Lyginant eksperimentinius rezultatus su imitaciniais, atliekama imitacinių rezultatų adekvatumo patikra.

Disertacijos tema paskelbti devyni moksliniai straipsniai. Šeši – periodiniuose recenzuojamuose mokslo leidiniuose: du – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *Thomson Reuters Web of Science* duomenų bazę; keturi – recenzuojamoje tarptautinės konferencijos medžiagoje. Trys – kitose tarptautinių ir respublikinių konferencijų medžiagose. Disertacijos tema perskaityti devyni pranešimai Lietuvos ir kitų šalių konferencijose.

Abstract

The dissertation analyzes two-mass electromechanical systems, computer simulation models are formed. Study uncontrolled and controlled two-mass electromechanical systems by applying different control methods. Experimental stand design of two mass electromechanical system are described. Presented results of the transition responses.

The thesis layout consists of introduction chapter, four main chapters, conclusions and bibliography chapter.

The introduction reveals the investigated problem, importance of the work and the object of research as well as describes the purpose and tasks of the paper, research methodology, scientific novelty, the practical significance of results examined in the paper and defended statements. The introduction ends in presenting the author's publications on the subject of the defended dissertation, offering the material of made presentations in conferences and defining the structure of the dissertation.

The first chapter revises used literature. The reduced one-mass system and elastic system with clearance mathematical description are presented. Mathematical models of induction motors in different coordinate system are presented. Describe the vector and fuzzy logic control method. At the end of the chapter, conclusions are drawn and the tasks for the dissertation are reconsidered.

In the second chapter formed simulation models of induction motor, model of two-mass system with the theoretical expression in time of induction motor torque. Simulation models of vector control and fuzzy logic controller are presented. At the end of the chapter, conclusions are drawn.

In the third chapter compose two-mass electromechanical system models with induction motors models, with vector control and fuzzy logic controller models. Simulation test by changing the system parameters and load are carried out. Transition responses of speed and torque are presented. At the end of the chapter, conclusions are drawn.

The fourth chapter describes the experimental stand design, special speed measuring device creation. Described studies with different loads, step responses of speed and torque are presented. Comparing the experimental and simulation results, the adequacy of simulation results are verification.

The results of the work were presented in nine scientific articles: two articles published in journals quoted in *Thomson Reuters Web of Science* databases, four articles in referred international conference materials and three in other conference materials. Nine reports were presented on the subject in conferences at national and international level.

Simboliai ir santrumpos

Simboliai

- a – neraiškiosios logikos regulatoriaus nustatymo signalas;
- $a-b-c$ – stacionarioji koordinačių sistema;
- C_{12} – masių jungties redukuotas ekvivalentinis standumas;
- $\cos\varphi$ – variklio naudingumo faktorius;
- d^e-q^e – sinchroniniu greičiu judanti dvifazė koordinačių sistema;
- d^s-q^s – stacionarioji dvifazė koordinačių sistema;
- de – neraiškiosios logikos regulatoriaus paklaidos pokyčio signalas;
- dz – nejautrumo zona (angl. *death zone* – dz);
- $e(t)$ – neraiškiosios logikos regulatoriaus greičio paklaidos signalas;
- F – mechanizmo vykdyklį veikianti jėga;
- F_m – mechanizmo vykdyklės apkrovos jėga;

f	– momento matuoklio impulsų dažnis;
f_{dk}	– dažnio keitiklio išėjimo įtampos dažnis;
f_s	– momento matuoklio impulsų dažnis, kai variklis sukasi sinchroniniu greičiu;
f_{maks}	– momento matuoklio didžiausias impulsų dažnis;
I	– maitinimo nominalioji srovė;
$I_{iš.}$	– dažnio keitiklio nominalioji išėjimo srovė;
i_A	– A fazės statoriaus srovės momentinė vertė;
i_B	– B fazės statoriaus srovės momentinė vertė;
i_C	– C fazės statoriaus srovės momentinė vertė;
i_a	– A fazės rotorius srovės momentinė vertė;
i_b	– B fazės rotorius srovės momentinė vertė;
i_c	– C fazės rotorius srovės momentinė vertė;
i_{dr}^s	– rotorius srovės projekcija į d^s ašį;
i_{ds}^s	– statoriaus srovės projekcija į d^s ašį;
i_{qr}^s	– rotorius srovės projekcija į q^s ašį;
i_{qs}^s	– statoriaus srovės projekcija į q^s ašį;
i_{dr}^e	– rotorius srovės projekcija į d^e ašį;
i_{ds}^e	– statoriaus srovės projekcija į d^e ašį;
i_{qr}^e	– rotorius srovės projekcija į q^e ašį;
i_{qs}^e	– statoriaus srovės projekcija į q^e ašį;
i_r	– reduktoriaus perdavimo santykis;
i_{ri}	– tarp veleno ir i-jo sukiojo elemento reduktorių perdavimo santykis;
$y(t)$	– neraiškiosios logikos reguliatoriaus išėjimo signalas;
J	– variklio rotorius inercijos momentas;
J_r	– ekvivalentinis variklio velenui redukuotas inercijos momentas;

J_i	– i-jo sukiojo elemento inercijos momentas;
J_1	– su variklio rotorium sujungtų elementų inercijos momentas;
J_2	– su mechanizmo vykdikliu sujungtų elementų inercijos momentas;
J_{pr}	– pradinis kinematinės grandinės inercijos momentas;
J_{Σ}	– kinematinės grandinės inercijos momentų suma;
k_d	– dinaminis koeficientas;
L_A	– A fazės statoriaus apvijos savasis induktyvumas;
L_B	– B fazės statoriaus apvijos savasis induktyvumas;
L_C	– C fazės statoriaus apvijos savasis induktyvumas;
L_a	– A fazės rotorius apvijos savasis induktyvumas;
L_b	– B fazės rotorius apvijos savasis induktyvumas;
L_c	– C fazės rotorius apvijos savasis induktyvumas;
L_m	– abipusis statoriaus ir rotorius apvijų induktyvumas;
L_r	– pilnutinis rotorius apvijų induktyvumas;
L_s	– pilnutinis statoriaus apvijų induktyvumas;
L_{lr}	– rotorius apvijų sklaidos induktyvumas;
L_{ls}	– statoriaus apvijų sklaidos induktyvumas;
L_{lv}	– pilnutinis variklio sklaidos induktyvumas;
L_{sr}	– didžiausias induktyvumas tarp statoriaus ir rotorius apvijos;
m	– elemento, judančio slenkamuoju judėjimu, masė;
m_j	– j-jo elemento, judančio slenkamuoju judėjimu, masė;
m_2	– cilindro masė;
M_R	– skirtingų rotorius apvijų fazinių apvijų abipusis induktyvumas;
M_S	– skirtingų statoriaus apvijų fazinių apvijų abipusis induktyvumas;
M_{SR}	– statoriaus ir rotorius fazinių apvijų abipusis induktyvumas;
n	– variklio sukimosi dažnis apsisukimais per minutę;

n_A	– momento matuoklio impulsų kiekis per apsisukimą;
n_s	– variklio sinchroninis greitis apsisukimais per minutę;
p	– variklio polių porų skaičius;
P_e	– elektrinė nominalioji galia;
P_m	– mechanizmo vykdyklio galia;
P_s	– variklio veleno galia;
ΔP	– mechaninių grandžių galios nuostoliai;
ΔP_{tr}	– mechanizmo trinties energija;
R_A	– A fazės statoriaus apvijos aktyvioji varža;
R_B	– B fazės statoriaus apvijos aktyvioji varža;
R_C	– C fazės statoriaus apvijos aktyvioji varža;
R_a	– A fazės rotoriaus apvijos aktyvioji varža;
R_b	– B fazės rotoriaus apvijos aktyvioji varža;
R_c	– C fazės rotoriaus apvijos aktyvioji varža;
R_s	– aktyvioji statoriaus varža;
R_{st}	– dažnio keitiklio stabdžio varža;
R_r	– rotoriaus apvijos redukuota aktyvioji varža;
$R_{skr.}$	– skriejiko spindulys;
R_2	– cilindro spindulys;
s	– Laplaso operatorius;
S_c	– plokštumos svorio centro plotas;
T	– variklio momentas;
T_e	– asinchroninio variklio elektromagnetinis momentas;
T_e^*	– greičio regulatoriaus formuojamas momento signalas;
T_d	– dinaminis apkrovos momentas;
T_s	– pasipriešinimo arba statinis momentas, redukuotas variklio velenui;

T_{st}	– statinis apkrovos momentas;
T_m	– vykdyklio apkrovos momentas;
T_n	– redukuotasis vykdyklio momentas;
T_{tr}	– mechaninių grandžių redukuotas atstojamasis trinties momentas;
T_{st1}	– pirmosios masės apkrovos momentas;
T_{st2}	– antrosios masės apkrovos momentas;
T_1	– pirmosios masės momentas;
T_2	– antrosios masės momentas;
T_{12}	– tampriosios sąveikos momentas;
T_{maks}	– didžiausias apkrovos momentas;
T_{stmaks}	– didžiausias statinis mechanizmo apkrovos momentas;
ΔT_1	– pirmosios masės momentų suma;
ΔT_2	– antrosios masės momentų suma;
T_i	– i-sis sukimo ašį veikiantis momentas;
T_{12vid}	– vidutinė tampriosios sąveikos mechaninės dalies elementų apkrova;
T_{12maks}	– didžiausia tampriosios sąveikos mechaninės dalies elementų apkrova;
T_{tr0}, b	– cilindrinio perdavimo mechanizmo trinties koeficientai;
U	– maitinimo nominalioji įtampa;
U_{lm}	– tinklo fazinės įtampos amplitudinė vertė;
$U_{iš.}$	– greičio matavimo prietaiso išėjimo įtampa;
u_A	– A fazės statoriaus fazinės įtampos momentinė vertė;
u_B	– B fazės statoriaus fazinės įtampos momentinė vertė;
u_C	– C fazės statoriaus fazinės įtampos momentinė vertė;
u_a	– A fazės rotoriaus fazinės įtampos momentinė vertė;
u_b	– B fazės rotoriaus fazinės įtampos momentinė vertė;
u_c	– C fazės rotoriaus fazinės įtampos momentinė vertė;

- u_C – defuzifikacijos rezultatas;
- u_{dr}^s – rotoriaus įtampos projekcija į d^s ašį;
- u_{ds}^s – statoriaus įtampos projekcija į d^s ašį;
- u_{qr}^s – rotoriaus įtampos projekcija į q^s ašį;
- u_{qs}^s – statoriaus įtampos projekcija į q^s ašį;
- u_{dr} – rotoriaus įtampos projekcija į d^e ašį;
- u_{ds} – statoriaus įtampos projekcija į d^e ašį;
- u_{qr} – rotoriaus įtampos projekcija į q^e ašį;
- u_{qs} – statoriaus įtampos projekcija į q^e ašį;
- u_{0s}^s – statoriaus įtampos nulinės eilės dedamoji;
- v_m – darbo organo linijinis greitis;
- W_1, W_2, W_3 – perdavimo funkcijos;
- W_m – visose variklio apvijose sukaupta magnetinio lauko energija;
- x_m – įmagnetinimo kontūro induktyvioji varža;
- x_s – statoriaus apvijos pilnutinė induktyvioji varža;
- x_r – rotoriaus apvijos pilnutinė redukuotoji induktyvioji varža;
- x_{lr} – rotoriaus redukuotoji induktyviosios sklaidos varžos;
- x_{ls} – statoriaus redukuotoji induktyviosios sklaidos varžos;
- γ – tinklo įtampos fazė įjungimo metu;
- ε – kampinis pagreitis;
- ε_{vid} – vidutinis mechanizmo kampinis pagreitis;
- ε_{maks} – didžiausias kampinis pagreitis;
- η – pavaros mechaninės dalies naudingumo faktorius;
- θ_e – synchroniniu greičiu judančios koordinačių sistemos kampas;
- ρ – apkrovos jėgos redukavimo variklio velenui spindulys;

ρ_j	– j-jo elemento, judančio slenkamuju judėjimu, redukavimo spindulys;
τ_r	– rotoriaus laiko pastovioji;
φ	– variklio rotoriaus posūkio kampas;
φ_1	– pirmosios masės posūkio kampas;
φ_2	– antrosios masės posūkio kampas;
$\Delta\varphi$	– masių posūkio kampų suma;
$\varphi_{skr.}$	– skriejiko posūkio kampas;
Ψ_A	– A fazės statoriaus pilnutinis magnetinis srautas;
Ψ_B	– B fazės statoriaus pilnutinis magnetinis srautas;
Ψ_C	– C fazės statoriaus pilnutinis magnetinis srautas;
Ψ_a	– A fazės rotoriaus pilnutinis magnetinis srautas;
Ψ_b	– B fazės rotoriaus pilnutinis magnetinis srautas;
Ψ_c	– C fazės rotoriaus pilnutinis magnetinis srautas;
Ψ_r	– pilnutinis rotoriaus srautas;
Ψ_r^*	– nuostato pilnutinis rotoriaus srautas;
Ψ_s	– pilnutinis statoriaus srautas;
Ψ_m	– pilnutinis srautas oro tarpe;
$\Psi_{r,vert.}$	– apskaičiuotas rotoriaus apvijų 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_{qr}^e	– pilnutinio rotoriaus srauto projekcija į q^e ašį;
Ψ_{qs}^e	– pilnutinio statoriaus srauto projekcija į q^e ašį;

Ψ_{dr}	– pilnutinio rotoriaus srauto projekcija į d^e ašį;
Ψ_{ds}	– pilnutinio statoriaus srauto projekcija į d^e ašį;
Ψ_{qm}	– pilnutinio srauto oro tarpe projekcija į q^e ašį;
Ψ_{dm}	– pilnutinio srauto oro tarpe projekcija į d^e ašį;
ω	– variklio veleno (rotoriaus) kampinis greitis;
ω^*	– greičio nuostato vertė;
ω_m	– vykdiklio kampinis greitis;
ω_r	– vienos polių poros asinchroninio variklio greitis (variklio elektrinis greitis);
ω_s	– sinchroninis variklio greitis;
ω_1	– pirmosios masės kampinis greitis;
ω_2	– antrosios masės kampinis greitis;
ω_{pr}	– pradinis kinematinės grandinės kampinis greitis;
$\Delta\omega$	– dvimės sistemos kampinių greičių suma;
ω_e	– maitinimo įtampos kampinis dažnis arba sukamojo magnetinio lauko kampinis greitis;
$\omega_{sl.}$	– rotoriaus slydimo kampinis greitis;
$\Delta\omega_{sl.}$	– pavaros rotoriaus slydimo greičio pokytis.

Santrumpos

IGBT	– bipoliarinis tranzistorius izoliuota užtvara (angl. <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>);
PD	– proporcinis diferencialinis valdymas;
PID	– proporcinis integralinis- diferencialinis valdymas;
PI	– proporcinis integralinis valdymas;
TTL	– loginis signalas tranzistorius – tranzistorius (angl. <i>Transistor-Transistor Logic</i>).

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	2
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai	5
Darbo rezultatų aprobavimas.....	5
Disertacijos struktūra.....	6
1. VIENMASĖS IR TAMPRIOSIOS DVIMASĖS SISTEMOS.....	7
1.1. Vienmasės elektromechaninės sistemos matematinis modelio aprašymas.....	7
1.2. Dvimasės tampriosios sistemos matematinis modelis	12
1.3. Asinchroninių variklių matematiniai modeliai	24
1.4. Asinchroninio variklio vektorinio ir neraiškiosios logikos reguliatoriaus valdymo principai	36
1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	44
2. VALDOMŲ ASINCHRONINIŲ VARIKLIŲ IMITACINIAI MODELIAI.....	45
2.1. Dvimasės sistemos imitacinis modelis su teoriniu variklio momento kitimu....	45

2.2. Asinchroninio variklio imitaciniai modeliai.....	48
2.3. Asinchroninio variklio su vektoriniu valdymu imitacinis modelis.....	54
2.4. Asinchroninio variklio su neraiškiosios logikos reguliatoriumi imitacinis modelis.....	57
2.5. Antrojo skyriaus išvados	61
3. IMITACINIAI MODELIAI IR DINAMINIAI PEREINAMIEJI VYKSMAI	63
3.1. Tampriosios dvimasės sistemos su galimu laisvumu modelio sudarymas ir pereinamųjų vyksmų imitacija.....	64
3.2. Vektorinio valdymo dvimasės elektromechaninės sistemos tyrimas.....	74
3.3. Dvimasės elektromechaninės sistemos su neraiškiosios logikos valdymu modelio sudarymas ir pereinamųjų vyksmų imitacija.....	79
3.4. Trečiojo skyriaus išvados	92
4. TYRIMO REZULTATŲ PATIKRA IR TAIKYMAS	95
4.1. Bandymų stendo aprašymas	95
4.2. Greičio matavimo prietaiso konstravimas	99
4.3. Eksperimentinės dinaminės charakteristikos	102
4.4. Ketvirtojo skyriaus išvados	111
BENDROSIOS IŠVADOS	113
LITERATŪROS SĄRAŠAS	115
AUTORIAUS PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	121

Contents

INTRODUCTION	1
The investigated problem	1
Importance of the thesis	2
The object of research	2
The goal of the thesis	3
The task of the thesis	3
Research methodology	3
Importance of scientific novelty	4
Practical significance of achieved results	4
The defended statements	5
Approval of the results	5
Dissertation structure	6
1. SINGLE-MASS AND ELASTIC TWO-MASS SYSTEMS	7
1.1. Mathematical description of the one-mass electromechanical system	7
1.2. Mathematical model of elastic two-mass system	12
1.3. Mathematical models of induction motors	24
1.4. Control principles of vector and fuzzy logic controller in induction motor	36
1.5. Conclusions of the chapter 1 and allocating tasks for the dissertation	44
2. SIMULATION MODELS OF CONTROLLED INDUCTION MOTORS	45
2.1. Simulation model of two-mass system with theoretical step response of induction motor torque.....	45

2.2. Simulation models of induction motor	48
2.3. Simulation model of induction motor with vector control	54
2.4. Simulation model of induction motor with fuzzy logic controller	57
2.5. Conclusions of the chapter 2	61
3. SIMULATION MODELS AND DYNAMIC TRANSIENT PROCESSES	63
3.1. Developing model of elastic two-mass system with the potential clearance and simulation of transient processes	64
3.2. Research of vector control in two-mass electromechanical system	74
3.3. Developing model of two-mass system with fuzzy logic controller and simulation of transient processes	79
3.4. Conclusions of the chapter 3	92
4. VERIFICATION AND APPLICATION OF RESEARCH RESULTS	95
4.1. Description of experimental stand	95
4.2. Creation of speed measuring device	99
4.3. Experimental dynamic characteristics	102
4.4. Conclusions of the chapter 4	111
GENERAL CONCLUSIONS	113
REFERENCES	115
LIST OF THE AUTHOR'S SCIENTIFIC PUBLICATIONS ON THE TOPIC OF DISSERTATION	121

Išvadas

Problemos formulavimas

Elektros pavarų mechaninė dalis susideda iš kelių grandžių ir sudaro sudėtingą sistemą. Dvimasę sistemą sudaro du grandies elementai, turintys sąlyginai didelę masę ir tarpusavyje sujungti standžiąja jungtimi, kuri apibūdinama standumu ir kurioje gali būti laisvumas. Netiesinės dvimasės sistemos aprašomos sudėtingomis, sunkiai išsprendžiamomis diferencialinėmis lygtimis, todėl tokias sistemas tikslinga tirti imitaciniu ir eksperimentiniu metodu.

Vienas veiksmingiausių dvimasių elektromechaninių sistemų tyrimo būdų – jų skaitmeninių kompiuterinių modelių sudarymas ir šių modelių naudojimas pereinamiesiems vyksmams tirti. Projektuojamų dvimasių sistemų parametrai parenkami atsižvelgiant į sistemos veikimą, apkrovos charakteristikas, taip pat į nežinomų faktorių galimai daromą įtaką. Todėl kuriant dvimases elektromechanines sistemas patogu sudaryti kompiuterinius imitacinius modelius, juos ištirti ir optimaliai parinkti sistemos parametrus, atitinkančius esančias ar galimas sistemos apkrovos charakteristikas. Modelių sudarymas leidžia išsiaiškinti daromą dvimasės elektromechaninės sistemos įtaką sistemos kuriamam momentui bei greičiui.

Dėl sistemos parametrų atsirandančios neigiamos dvimasių sistemų savybės, jei parametrų negalima parinkti kitokių, kompensuojamos parinkus valdymo metodą. Valdomų sistemų modeliavimas leidžia optimaliai parinkti reikiamus reguliatorių parametrus. Visa tai leidžia suprojektuoti ir sukonstruoti valdomas dvimases sistemas su optimaliomis savybėmis ir išvengti prototipų gamybos.

Darbo aktualumas

Pramonėje ar galutinėje produkcijoje dažnai naudojamos sukiųjų sistemų pavaros su asinchroniniais varikliais. Dėl projektuojamų sukiųjų sistemų struktūros, atskirų elementų masių, jungčių standumų susiduriama su sunkiai išsprendžiamais uždaviniais. Dabartinėje metodikoje dažnai naudojamas masių transformacijos metodas, supaprastinantis sistemą iki vienmasės arba paneigiantis kitų masių, jungčių daromą įtaką. Tačiau tiksliose sistemose, ypač turinčiose dideles mases ar jungčių tamprumus, to daryti negalima. Tokias sistemas reikia nagrinėti kaip dvimases ar daugiamases, arba sudėtingesnę sistemą supaprastinti iki dvimases.

Projektuojant sistemą dažnai sunku apskaičiuoti jai daromą įtaką ar numatyti sistemos parametrų daromą įtaką pereinamiesiems vyksmams ir gauti pageidaujamą išėjimo tikslumą. Dėl to mokslininkai daugelį problemų, susijusių su dvimasių sistemų tyrimais ir tobulinimu, sprendžia naudodami kompiuterinę analizę. Paplitę komerciniai programiniai paketai (pvz. *Matlab*[®] *Simulink*[®]), sudaryti baigtinių elementų pagrindu, padeda spręsti daugelį inžinerinių uždavinių. Šiame darbe sudaryti dvimasių elektromechaninių sistemų imitaciniai modeliai, skirti dinaminių vyksmų tyrimams ir skaičiavimams, padės mokslininkams tirti valdomas dvimases elektromechanines sistemas. Šio mokslinio darbo rezultatai yra naudingi projektuojant dvimases elektromechanines sistemas ar sudėtingas sistemas: remiantis tyrimo išvadomis galima analizuoti dvimases ar iki dvimasių supaprastintas sudėtingas sistemas.

Tyrimų objektas

Tyrimų objektas – valdomos dvimases elektromechaninės sistemos imitaciniai ir eksperimentiniai pereinamieji vyksmai.

Darbo tikslas

Išsikeltas darbo tikslas – ištirti sudarytų dvimasės elektromechaninės sistemos su nevaldomu, vektoriniu būdu valdomu ir neraiškosios logikos reguliatoriumi valdomu asinchroniniu varikliu imitacinių modelių pereinamuosius vyksmus, palyginti gautus imitacijų rezultatus su eksperimentiniais.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti keliami tokie uždaviniai:

1. Sudaryti tampriosios dvimasės elektromechaninės sistemos su laisvumu imitacinį modelį.
2. Sudaryti dvimasės elektromechaninės sistemos su asinchroniniu varikliu imitacinį modelį.
3. Sudaryti dvimasės elektromechaninės sistemos vektorinio valdymo modelį.
4. Sudaryti dvimasės elektromechaninės sistemos su neraiškosios logikos reguliatoriumi modelį.
5. Sukonstruoti dvimasės elektromechaninės sistemos su asinchroniniu varikliu eksperimentinį standą ir sukurti greičio matavimo prietaisą, skirtą dinaminiams elektromechaninės sistemos vyksmams tirti. Atlikti gautų eksperimentinių rezultatų analizę ir patikrinti imitacinių modelių adekvatumą.

Tyrimų metodika

Darbe naudojami analiziniai, skaitmeniniai ir eksperimentinio tyrimo bei neraiškosios logikos metodai, objektinis kompiuterinių modelių sudarymas ir imitacijos. Imitaciniai modeliai sudaryti *Matlab*[®] *Simulink*[®] aplinkoje. Eksperimentiniai tyrimai atlikti Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektronikos fakultete Automatikos katedroje sukonstruotu modeliu.

Darbo mokslinis naujumas

Sprendžiant darbo uždavinius gauti šie elektros ir elektronikos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Sudaryti nauji dvimasės elektromechaninės sistemos imitaciniai modeliai su mechaninės dalies standumu ir laisvumu, valdomi asinchroniniu varikliu.
2. Sudarytas naujas dvimasės elektromechaninės sistemos su vektoriniu būdu valdomu asinchroniniu varikliu imitacinis modelis, leidžiantis atlikti sistemos dinaminių vyksmų analizę, įvertinti pirmosios ir antrosios masės kampinio greičio ir momento pereinamuosius vyksmus, priklausomybę nuo apkrovos momento.
3. Sudarytas naujas dvimasės elektromechaninės sistemos su neraiškiosios logikos reguliatoriumi valdomu asinchroniniu varikliu imitacinis modelis, leidžiantis tirti tiek pirmosios, tiek antrosios masės kampinio greičio ir momento pereinamuosius vyksmus, jų priklausomybę nuo elektromechaninių sistemos parametrų ir apkrovos.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Remiantis šio mokslinio darbo tyrimų rezultatais gali būti projektuojamos dvimasės elektromechaninės sistemos: imitacijos metu nustatomos antrosios masės, jungties tamprumas, galimas laisvumas, apkrovos daroma įtaka, ir parenkami optimalūs sistemos parametrai. Remiantis gautais rezultatais galima parinkti projektuojamos automatinės valdymo sistemos reguliavimo metodą: kitimo dėsnius, valdymo poveikius, valdymo įtaisų parametrus, kai yra nežinomos atsitiktinių sistemą veikiančių apkrovų charakteristikos.

Sudarytus modelius galima nesunkiai tobulinti, derinti, keisti, pritaikyti skirtingiems ar daliniams uždaviniams, su kuriais susiduriama kuriant dvimasės elektromechanines sistemas, spręsti.

Remiantis tyrimų rezultatais ir pritaikius skirtingas apkrovos charakteristikas ištirti sukonstruotos dvimasės elektromechaninės sistemos greičio ir momento pereinamieji vyksmai.

Tyrimams atlikti buvo sukonstruotas greičio matavimo prietaisas, naudojantis standartinio momento matuoklio generuojamus impulsus, turintis tiesinę greičio ir impulsų dažnio priklausomybę. Sukurtą įrangą planuojama naudoti Vilniaus Gedimino technikos universiteto Automatikos katedros rengiamų mokymo programų praktinių užsiėmimų metu.

Ginamieji teiginiai

1. Sukurti asinchroniniu varikliu valdomų tampriųjų dvimasių elektromechaninių sistemų su laisvumu imitaciniai modeliai leidžia tirti dinaminius vyksmus, keičiant sistemos parametrus ar apkrovą.
2. Sukurtas dvimasės elektromechaninės sistemos su vektoriniu būdu valdomu asinchroniniu varikliu modelis leidžia sumažinti momento ir greičio svyravimus, iki 4 kartų sumažinti didžiausią variklio momentą, iki 5 kartų sutrumpinti pereinamojo vyksmo trukmę, sumažinti nusistovėjusio greičio paklaidą.
3. Sukurtas dvimasės elektromechaninės sistemos su neraiškiosios logikos regulatoriumi modelis leidžia iki 40 % sumažinti didžiausią variklio momentą, iki 2 kartų sutrumpinti pereinamojo vyksmo trukmę, sumažinti nusistovėjusio greičio paklaidą bei stabilizuoti antrosios masės greitį; sistemoje su dideliu tamprumu leidžia iki 2,5 karto sumažinti momento pereinamųjų vyksmų švytavių amplitudę.

Darbo rezultatų aprobavimas

Tyrimai atlikti Vilniaus Gedimino technikos universitete. Disertacijos tema atspausdinti devyni moksliniai straipsniai. Šeši – periodiniuose recenzuojamuose mokslo leidiniuose: du – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *Thomson Reuters Web of Science* duomenų bazę; keturi – recenzuojamoje tarptautinės konferencijos medžiagoje. Trys – kitose tarptautinių ir respublikinių konferencijų medžiagose.

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai pristatyti devyniose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijose *Mokslas – Lietuvos ateitis* 2008, 2009 m., įvykusiose Vilniuje.
- Tarptautinėse konferencijose *Doctoral school of energy and geo-technology* 2009, 2011 m., įvykusiose Kuressaare mieste, Estijoje.
- Tarptautinėse konferencijose *Elektros ir valdymo technologijos* 2009, 2010, 2011 m., įvykusiose Kaune.
- Tarptautinėse konferencijose *Elektronika* 2010, 2011, įvykusiose Kaune ir Vilniuje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, rezultatų apibendrinimas, literatūros ir publikacijų disertacijos tema sąrašas.

Disertacijoje yra 141 puslapis teksto, 85 paveikslai, 6 lentelės ir 135 numeruotos formulės. Rašant disertaciją remtasi 87 literatūros šaltiniais.

Vienmasės ir tampriosios dvimasės sistemos

Šiame skyriuje pateikiama vienmasės ir dvimasės sistemos samprata, aprašoma redukuota vienmasė sistema, pateikiamas matematinis modelis. Toliau tekste aprašoma dvimasė sistema su tampria masių jungtimi ir laisvumu, pateikiamos mechaninės dalies principinės ir funkcinės schemos, matematinės priklausomybės, judesio lygtys. Taip pat čia pateikiamas tampriosios sąveikos momento kitimo grafikas, pateikiama laisvumo priklausomybė nuo kampo.

1.1. Vienmasės elektromechaninės sistemos matematinis modelio aprašymas

Elektromechaninę sistemą, kaip tyrimų objektą, sudaro elektrinė ir mechaninė dalys. Elektrinei daliai priklauso elektromechaninis energijos keitiklis ir valdymo sistema, o mechaninei daliai – visos tarpusavyje susijusios judančios elektros pavaros ir mechanizmo masės.

Mechaninės dalies judesio dėsnius nagrinėja teorinė mechanika, mechanizmų ir mašinų teorija, elektromechaninio keitiklio procesus – elektros mašinų teorija, o valdymo sistemos analizės ir sintezės metodus – automatinio

valdymo teorija. Elektros pavarų teorija nagrinėja šių trijų dalių tarpusavio sąveiką vieningoje sistemoje.

Elektros pavaros mechaninė dalis susideda iš kelių grandžių ir gali sudaryti labai sudėtingą kinematinę grandinę su daugeliu judančių elementų.

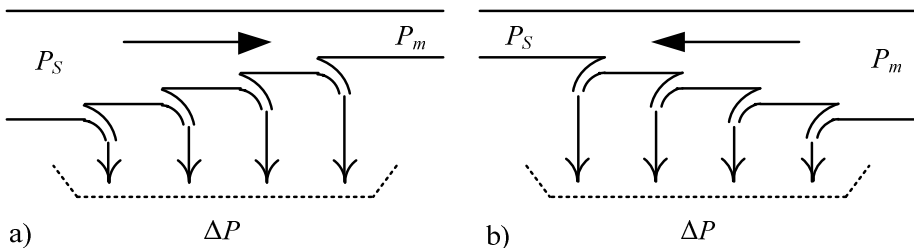
Vienmasę elektromechaninę sistemą galima nagrinėti taip lyg mechaninę grandį sudarytų absoliučiai standūs, nesideformuojantys ir be oro tarpų elementai. Tuo atveju vieno elemento judėjimas visiškai apibūdina likusiųjų elementų judėjimą, t. y. pavaros kinematinės grandinės visų grandžių judėjimo dėsnių funkcinės priklausomybės yra proporcingos, ir todėl, žinant vieno elemento judėjimą, pagal iš anksto žinomą priklausomybę galima rasti bet kurio elemento judėjimą. Taigi elektros pavaros judėjimą galima apibūdinti vieno mechaninio elemento, kurio atžvilgiu redukuoti visi išoriniai momentai ir jėgos, taip pat mechaninių grandžių masės, judėjimu. Paprastai tokiu elementu parenkamas variklio velenas.

Gamybos mašinos vykdyklio apkrovos jėga ir momentas redukuojamas naudojant pavaros mechaninės dalies galios balanso lygtis.

Iš galios srautų diagramos, pateiktos 1.1 paveiksle a, galima teigti, jog perduodant energiją tiesiogine kryptimi:

$$P_s = P_m + \Delta P, \quad (1.1)$$

čia $P_s = T_s \omega$ – variklio veleno galia; P_m – vykdyklio galia; ΔP – mechaninių grandžių galios nuostoliai; ω – variklio veleno kampinis greitis; T_s – redukuotas statinis pasipriešinimo momentas.



1.1 pav. Elektros pavaros mechaninės dalies perduodami galios srautai: a – tiesiogine kryptimi; b – atvirkštine kryptimi

Fig. 1.1. Power flow of electric drive mechanical part: a – direct way, b – inverse way

Jeigu žinomas pavaros mechaninės dalies naudingumo faktorius η , tai (1.1) lygtį galima perrašyti:

$$P_s = \frac{P_m}{\eta}. \quad (1.2)$$

Jeigu vykdiklio judėjimas sukamasis:

$$P_m = T_m \omega_m, \quad (1.3)$$

čia T_m – vykdiklio apkrovos momentas; ω_m – vykdiklio kampinis greitis.

Tuomet:

$$T_s \omega = \frac{T_m \omega_m}{\eta}, \quad (1.4)$$

iš čia:

$$T_s = \frac{T_m}{i_r \eta}, \quad (1.5)$$

čia $i_r = \omega / \omega_m$ – reduktoriaus perdavimo santykis.

Jei vykdiklio judėjimas slenkamasis, tuomet:

$$P_m = F_m v_m, \quad (1.6)$$

čia F_m – vykdiklio apkrovos jėga; v_m – vykdiklio linijinis greitis.

Tuomet:

$$T_s \omega = \frac{F_m v_m}{\eta}, \quad (1.7)$$

arba:

$$T_s = \frac{F_m \rho}{\eta}, \quad (1.8)$$

čia $\rho = v / m$ – apkrovos jėgos redukavimo variklio velenui spindulys.

Iš galios srautų diagramos, pateiktos 1.1 paveiksle b, galima teigti, jog perduodant energiją iš variklio vykdikliui:

$$P_s = P_m - \Delta P, \quad (1.9)$$

ir, esant duotajam naudingumo faktoriui, galių balansą galima užrašyti:

$$P_s = P_m \eta, \quad (1.10)$$

tuomet, kai vykdiklio judėjimas sukamasis:

$$T_s = \frac{T_m \eta}{i_r}, \quad (1.11)$$

o kai slenkamasis:

$$T_s = F_m \rho \eta. \quad (1.12)$$

Gautose formulėse dydis T_s vadinamas pasipriešinimo arba statiniu momentu redukuotu variklio velenui.

i_r ir ρ vertės randamos iš keitimo mechanizmų konstrukcinių parametrų. Pavyzdžiui, krumpliaračių poros perdavimo santykis lygus jų krumplių skaičių santykiui, o diržinės pavaros – skriemulių skersmenų santykiui. Skriemulių ir būgnų redukavimo spindulys ρ lygus jų konstrukciniams spinduliams, skriejiko-švaistiklio mechanizmo, kai $R_{skr.} \ll l_s$, tuomet:

$$\rho \approx R_{skr.} \sin \varphi_{skr.}, \quad (1.13)$$

čia $\varphi_{skr.}$ – skriejiko posūkio kampas.

Mechaninių grandžių masių ir inercijos momentų redukavimo variklio velenui prasmė yra tokia: tos masės ir momentai pakeičiami vienu ekvivalentiniu variklio veleno inercijos momentu J_r . Esant tokiai redukavimo sąlygai, ekvivalentinio inercijos momento kinetinė energija lygi pavaros mechaninės dalies visų judamų elementų kinetinių energijų sumai:

$$J_r \frac{\omega^2}{2} = J \frac{\omega^2}{2} + \sum_{i=1}^n J_i \frac{\omega_i^2}{2} + \sum_{j=1}^q m_j \frac{v_j^2}{2}. \quad (1.14)$$

Iš čia:

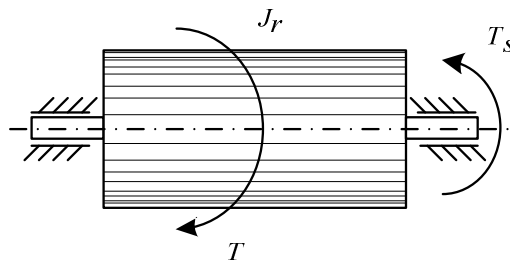
$$J_r = J + \sum_{i=1}^n \frac{J_i}{i_{ri}^2} + \sum_{j=1}^q m_j \rho_j^2, \quad (1.15)$$

čia J – variklio rotoriaus inercijos momentas; J_i – i-jo sukiojo elemento inercijos momentas; m_j – j-jo elemento, judančio slenkamuoju judėjimu, masė; $i_{ri} = \omega / \omega_i$ – reduktorių, esančių tarp variklio veleno ir i-jo sukiojo elemento, perdavimo santykis; $\rho_j = v_j / \omega$ – j-jo elemento, judančio slenkamuoju judėjimu, redukavimo spindulys.

Ekvivalentinis inercijos momentas J_r yra redukuotas veleno atžvilgiu. Pavaros mechaninės dalies sukiojo elemento pavyzdžiu gali būti sujungimo sankabos, stabdymo skriemuliai, būgnai, ekskavatorių ir kranų sukamosios platformos. Prie slenkamuoju judėjimu judančių elementų galima priskirti

kranų tiltus, vežimėlius ir keliamus krovinius, sekcijas, kėlimo kranus, konvejerių krovinius, skriejiko-šliaužiklio mechanizmo šliaužiklį ir pan.

Iš (1.5), (1.8), (1.11), (1.12), (1.15) lygčių matoma, jog bendruoju atveju elektros pavaros kinematiškai sudėtinga mechaninė dalis pakeičiama ekvivalentine arba redukuotąja mechanine grandimi, kuri pateikta 1.2 paveiksle. Tai variklio greičiu besisukantis apie savo ašį kietas kūnas, kurio inercijos momentas J_r ir kurį nuolat veikia variklio momentas T ir statinis momentas T_s . Šis paprastas elektros pavaros mechaninės dalies modelis, kurį sudaro vienos masės sistema, tinka tik idealioms mechaninėms grandims, t. y. nesideformuojančioms ir be laisvumo. Tačiau šis modelis taikytinas dažnai ir realioms mechaninėms grandims, pasižyminčioms nedideliu mechanizmų tamprumu ir turinčioms nedidelius laisvumus.



1.2 pav. Elektros pavaros redukuotoji mechaninė grandis

Fig. 1.2. Reduced mechanical unit of electric drive

Kartais tenka nustatyti gamybos mašinos vykdyklio judėjimo dėsnį. Tokie uždaviniai būdingi kėlimo-transportavimo mašinų slenkamuoju judesiu judantiems vykdykliai. Šiuo atveju variklio sukuriamas momentas veikia vykdyklį jėga F . Redukavimo formulės (1.8) ir (1.12) tinka, tiksliai jas reikia išreikšti jėgos F atžvilgiu, kai variklis perduoda energiją vykdykliui:

$$F = \frac{T\eta}{\rho}, \quad (1.16)$$

ir kai vykdyklis perduoda energiją varikliui:

$$F = \frac{T}{\rho\eta}. \quad (1.17)$$

Taip pat redukuojamos smagračių masės, t. y. jos pakeičiamos viena atstojamąja vykdyklio mase m , kuri randama iš pavaros mechaninės dalies kinetinės energijos balanso:

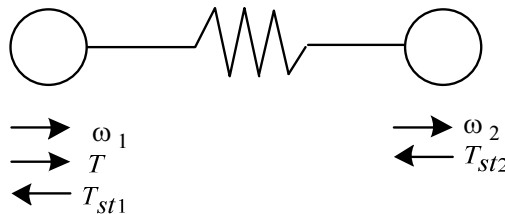
$$m = \frac{J_r}{\rho^2} = m_m + \sum_{i=1}^n \frac{J_i}{\rho_i^2} + \frac{J}{\rho^2}, \quad (1.18)$$

čia $\rho = v_m/\omega$; $\rho_i = v_{m_i}/\omega_i$.

Taip redukuota mechaninė grandis nagrinėjamoju atveju atitinka slenkančiąją masę m , kurią veikia dvi jėgos F ir F_m (Smilgevičius 1989).

1.2. Dvimasės tampriosios sistemos matematinis modelis

Dvimasę mechaninę sistemą apibūdina su variklio rotorium sujungtų elementų suminis redukuotas inercijos momentas J_1 , su mechanizmo vykdykliu sujungtų elementų suminis redukuotas inercijos momentas J_2 , tamprusis ryšys tarp šių masių charakterizuojamas redukuotu ekvivalentiniu standumu C_{12} , variklio veleno apkrovos momentas T_{st1} , ir mechanizmo pasipriešinimo momentas T_{st2} . Dvimasę mechaninę sistemą pavaizduota 1.3 paveiksle.



1.3 pav. Dvimasės mechaninės sistemos schema

Fig. 1.3. Diagram of two-mass mechanical system

Tokia sistema yra patogi nagrinėti tampriuosius mechaninius ryšius, dėl jų atsirandančius svyravimus ir dinamines apkrovas. Kai tamprųjų ryšių įtaka yra nedidelė ir ją galima paneigti, mechaninę elektros pavaros dalį atitinka standžioji mechaninė grandis. Tada reali mechaninė dalis pakeičiama ekvivalentiška mase, su inercijos momentu. Ją veikia variklio elektromagnetinis momentas ir suminis redukuotas apkrovos momentas. Apkrovos momentą sudaro visos mechaninę dalį veikiančios jėgos (Ключев 1985).

Nagrinėjant elektros pavarų judėjimą, tenka ieškoti daug įvairių mechaninių dydžių, pavyzdžiui: kelio bei posūkio kampo, greičio ir pagreičio, jėgų bei momentų, kurie sukelia judėjimą ir lemia jo pobūdį. Nustatant pavaros judėjimo matematinę išraišką, viena iš dviejų galimų variklio sukimosi kryptių laikoma teigiama. Pasirinktoji kryptis yra teigiama visiems dydžiams, apibūdinantiems

nagrinėjamąjį judėjimą: posūkio kampui, kampiniam greičiui bei pagreičiui, taip pat variklio momentui. Tai nereiškia, jog teigiamą kampo vertę turi būtinai atitikti teigiamas greitis, arba teigiamą greičio vertę – teigiamas pagreitis arba teigiamas variklio momentas. Greičiai gali būti tiek teigiami, tiek ir neigiami, esant bet kuriam pagreičio arba variklio momento ženklui. Svarbu, kad būtų vieninga dydžių, apibūdinančių judėjimą, atskaitymo teigiama kryptis. Taigi, jeigu tam tikrame laiko intervale variklio greičio ir momento kryptys sutampa, t. y. momentas ir greitis vienodo ženklo, tai, vadinasi, darbą atlieka variklis, kuris ir išvysto tą momentą. Priešingu atveju, kai momento ir greičio ženklai skirtingi, variklis, sukurdamas tą momentą, vartoja mechaninę energiją.

Elektros pavaros judėjimą apibūdina du veikiantys momentai: variklio momentas ir pasipriešinimo momentas. Pasipriešinimo momentas gali būti reaktyvusis ir aktyvusis, priklausomai nuo priežasties kuri jį sukėlė.

Reaktyvusis pasipriešinimo momentas atsiranda tik esant judėjimui – tai mechaninės grandies reakcija. Šį momentą sukuria besipriešinančios judėjimui aplinkos reakcijos jėgos. Tai, pavyzdžiui, sukiųjų elementų trinties momentai, momentai, veikiantys metalo apdirbimo staklių vykdiklį, ventiliatorių, išcentrinį siurblių menčių momentai ir pan. Reaktyvusis momentas visuomet priešinasi judėjimui, t. y. jo ženklas priešingas greičio ženklui. Pasikeitus sukimosi kryptiai, pasipriešinimo momentas taip pat keičia ženklą. Elementas, kuris sukuria reaktyvųjį momentą, gali tik vartoti energiją. Aktyvusis pasipriešinimo momentas nepriklauso nuo pavaros judėjimo, jį sukuria pašaliniai mechaninės energijos šaltiniai. Tai, pavyzdžiui, momentas, kurį sąlygoja vertikaliai keliamo krovinio masė, vėjo sukuriamas momentas. Aktyviojo momento kryptis nepriklauso nuo sukimosi krypties, t. y. aktyviojo momento ženklas nesusijęs su kampinio greičio ženklu. Pasikeitus sukimosi kryptiai, momento ženklas nepasikeičia. Šaltinis, kuriantis aktyvųjį momentą, gali ir vartoti, ir atiduoti energiją.

Pagal pagrindinį sukiojo kūno dinamikos dėsnį, momentų, veikiančių sukimosi ašį, vektorinė suma lygi judesio kiekio momento išvestinei:

$$\sum_{i=1}^n T_i = \frac{d(J\omega)}{dt}. \quad (1.19)$$

Sprendžiant elektros pavarų uždavinius pagal judėjimo lygtį (1.19), dažniausiai analizuojamas variklio rotoriaus judesys. Tuomet ekvivalentinis momentas, veikiantis rotorių, lygus variklio ir pasipriešinimo momentų vektorinei sumai. Atskirais atvejais tiek variklio, tiek ir pasipriešinimo momentas gali veikti rotoriaus sukimosi kryptimi arba priešintis tam judėjimui. Tačiau visais atvejais, sprendžiant elektros pavarų uždavinius, reikia rasti minėtas ekvivalentinio momento dedamąsias, nežiūrint kokio pobūdžio yra tie momentai. Paprastai pasipriešinimo momentas būna duotas iš anksto, o

variklio momentas randamas skaičiuojant; jis glaudžiai susijęs su apvijų srovėmis, kurios apibūdina variklio įšilimą.

Elektros pavarų sistemų elektros mašinos daugiausia dirba varikliniu režimu. Tada pasipriešinimo momentas yra stabdantis rotoriaus judėjimo atžvilgiu ir priešinasi variklio momentui. Todėl laikoma, kad pasipriešinimo momento teigiama kryptis yra priešinga variklio momento teigiamai kryptčiai, ir (1.19) lygtis perrašoma:

$$T - T_s = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.20)$$

Pastarojoje lygtyje momentai yra ne vektoriai, bet skaliariniai dydžiai, nes abu jie veikia vienos ir tos pačios sukimosi ašies atžvilgiu.

Lygties (1.20) dešinioji pusė vadinama dinaminio momentu T_d :

$$T_d = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.21)$$

Iš (1.21) išplaukia, jog dinaminio momento kryptis visuomet sutampa su elektros pavaros pagreičio kryptimi.

Galimi trys elektros pavaros veikimo režimai, žiūrint koks dinaminio momento ženklas:

1. $T_d > 0$, t. y. $d\omega/dt > 0$, greitėjimas, kai $\omega > 0$; stabdymas, kai $\omega < 0$.
2. $T_d < 0$, t. y. $d\omega/dt < 0$, stabdymas, kai $\omega > 0$; greitėjimas, kai $\omega < 0$.
3. $T_d = 0$, t. y. $d\omega/dt = 0$, nusistovėjęs režimas, t.y. $\omega = \text{const}$.

Variklio momentas nėra pastovus dydis, bet paprastai vieno kintamojo, o kai kuriais atvejais ir kelių kintamųjų funkcija, kuri pateikiama analiziškai arba grafiškai. Pasipriešinimo momentas taip pat gali būti greičio, kelio, laiko ar kito kintamojo funkcija. Lygtyje (1.20) įrašius momentų T ir T_s funkcijas, bendruoju atveju gaunama netiesinė diferencialinė lygtis.

Pastaroji diferencialinė judėjimo lygtis teisinga tik tuo atveju, kai sukiosios masės inercijos spindulys yra pastovus. Kai kuriais atvejais, pavyzdžiui, esant skriejiko-švaistiklio mechanizmui, pavaros kinematinės grandinės inercijos spindulys yra periodinė posūkio kampo funkcija. Tokiais atvejais galima naudoti integralinę judėjimo lygtį, kuri pagrįsta sistemos kinetinės energijos balansu:

$$\int_0^t P_d dt = J \frac{\omega^2}{2} - J_{pr} \frac{\omega_{pr}^2}{2}, \quad (1.21)$$

čia $J\omega^2/2$ – pavaros kinetinė energija nagrinėjamuoju laiko momentu; $J_{pr}\omega_{pr}^2/2$ – pavaros kinetinės energijos pradinė reikšmė.

Išdiferencijavus (1.21) lygtį laiko atžvilgiu ir laikant, kad J yra posūkio kampo φ funkcija, gaunama:

$$P_d = \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt} + J\omega \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.22)$$

Kadangi $P_d = T_d \omega$, tai, laikant posūkio kampą argumentu, gaunama tokia judėjimo lygtis:

$$T_d = \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\varphi} + J\omega \frac{d\omega}{d\varphi}. \quad (1.23)$$

Iš (1.5), (1.8), (1.11) ir (1.12) išraiškų apskaičiuotos T_s vertės yra teisingos (praktiškai pakankamu tikslumu), esant didelėms, artimoms nominaliosioms, apkrovoms, t. y. kai perdavimo nuostoliai yra gerokai mažesni nei apkrovos galia. Esant mažoms apkrovoms, kai $\eta \rightarrow 0$, minėtos išraiškos T_s rasti netinka. Ypač svarbu yra tiksliai apskaičiuoti trinties momentą sudėtingos kinematinės grandinės elektros pavarose su reduktoriumi, kurio didelis perdavimo santykis, nes trinties nuostoliai tuomet sudaro pagrindinę variklio apkrovos dalį.

Norint tiksliau apskaičiuoti pasipriešinimo momentą, reikia įvertinti ir trinties momento dedamąją. Iš (1.1) ir (1.9) gaunama:

$$P_s = P_m \pm \Delta P_{tr}. \quad (1.24)$$

Pastarosios išraiškos abi puses padalijus iš variklio kampinio greičio ω , randama pasipriešinimo momento išraiška:

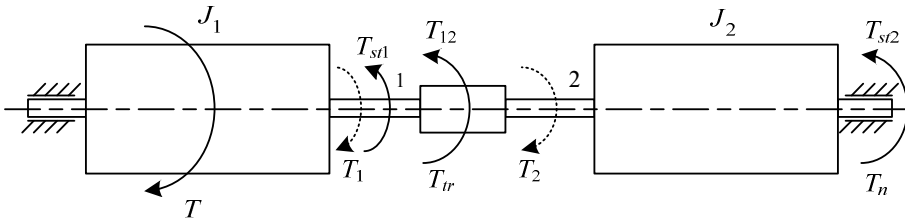
$$T_s = T_n \pm T_{tr}, \quad (1.25)$$

čia $T_n = T_m / i_r$ – naudingasis momentas, t. y. redukuotasis vykdyklio momentas; T_{tr} – mechaninių grandžių redukuotas atstojamasis trinties momentas.

Kai energija perduodama iš variklio vykdykliui, (1.25) išraiškoje momentai T_n ir T_{tr} sudedami aritmetiškai, o jei energijos perdavimo kryptis priešinga – apskaičiuojamas tų momentų modulių skirtumas. Bendroju atveju trinties momentas yra sudėtinga kampinio greičio ir perduodamo momento funkcija. T_{tr} reikšmė labai keičiasi pavaros paleidimo metu. Teoriškai apskaičiuoti pradinę trinties momento reikšmę sunku, nes ji labai priklauso nuo kinematinės grandinės konstrukcijos bei eksploatavimo sąlygų, todėl paprastai nustatoma eksperimentiškai. T_{tr} priklausomybė nuo kampinio greičio apibūdinama klampiosios trinties dedamąja, pavyzdžiui, variklio ventiliaciniais nuostoliais,

guolių, krumpliaračių sukimosi nuostoliais ir pan. Trinties momentas T_{tr} taip pat priklauso nuo mechaninės grandies perduodamo momento, kuriam didėjant, didėja ir T_{tr} .

Pereinamojo vyksmo metu reduktoriumi perduodamas momentas priklauso nuo dinaminio momentų $J \frac{d\omega}{dt}$, todėl elektros pavaros mechaninis modelis, kurį sudaro vienas sukusis kūnas (1.3 pav.), nėra visiškai teisingas. Tokiu atveju pavaros mechaninės dalies modelį geriau atvaizduoti trimis grandimis, kurių momentai ir inercijos momentai redukuoti variklio greičiui ir atvaizduoti 1.4 paveiksle.



1.4 pav. Elektros pavaros dviejų masių mechaninė grandis, kai įvertintas reduktoriaus trinties momentas

Fig. 1.4. Mechanical chain of two-mass electric drive with consideration of gearbox friction torque

Esant tiesioginiui energijos krypčiai:

$$T_2 = T_n + J_2 \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.26)$$

Įvertinus trinties ir reduktoriaus perdavimo momentus, galima užrašyti:

$$T_s = T_n(1+b) + T_{tr0} + bJ_2 \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.27)$$

čia b , T_{tr0} – cilindrinio perdavimo mechanizmo trinties koeficientai.

Pastarąją T_s išraišką įrašę į (1.20) judėjimo lygtį, gaunama:

$$T - (1+b)T_n - T_{tr0} = [J_1 + (1+b)J_2] \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.28)$$

Esant atvirkštinei energijos krypčiai:

$$T_1 = T - J_1 \frac{d\omega}{dt}, \quad (1.29)$$

$$T_s = T_n - T_{tr0} - b \left(T - J_1 \frac{d\omega}{dt} \right), \quad (1.30)$$

elektros pavaros judėjimo lygtis:

$$T - \frac{T_n - T_{tr0}}{1+b} = \left(J_1 + \frac{J_2}{1+b} \right) \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.31)$$

Iš gautųjų (1.28) ir (1.31) judėjimo lygčių daroma išvada, jog pereinamojo vyksmo metu trinties bei perduodamo momento tiesinė priklausomybė ekvivalentiška elektros pavaros atstojamojo energijos momento tam tikram padidėjimui, esant tiesioginei mechaninės energijos kryptiai ir inercijos momento sumažėjimui, kai energija perduodama priešinga kryptimi.

Dvimašę mechaninę sistemą (1.4 pav.) apibūdina pagrindinės lygtys:

$$\begin{cases} T - T_{st1} - T_{12} = J_1 \frac{d\omega_1}{dt}, \\ -T_{st2} + T_{12} = J_2 \frac{d\omega_2}{dt}. \end{cases} \quad (1.32)$$

Tampriosios sąveikos momentas:

$$T_{12} = C_{12} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2). \quad (1.33)$$

Diferencijuojant (1.33) pagal laiką, gaunama:

$$\frac{dT_{12}}{dt} = C_{12} \cdot \left(\frac{d\varphi_1}{dt} - \frac{d\varphi_2}{dt} \right) = C_{12} \cdot (\omega_1 - \omega_2). \quad (1.34)$$

Pakeitus $\frac{d}{dt}$ operatoriumi s , lygtys užrašomos operatorine forma:

$$\begin{cases} T - T_{st1} - T_{12} = J_1 s \omega_1, \\ -T_{st2} + T_{12} = J_2 s \omega_2, \\ s T_{12} = C_{12} (\omega_1 - \omega_2). \end{cases} \quad (1.35)$$

Iš lygčių sistemos (1.35) randamos šios perdavimo funkcijos:

$$a) \quad W_1(s) = \frac{\omega_1(s)}{\Delta T_1(s)} = \frac{1}{J_1 s}, \quad (1.36)$$

$$\Delta T_1(s) = T - T_{12} - T_{st1}, \quad (1.37)$$

$$\text{b)} \quad W_2(s) = \frac{T_{12}(s)}{\Delta\omega(s)} = \frac{C_{12}}{s}, \quad (1.38)$$

$$\Delta\omega(s) = \omega_1 - \omega_2, \quad (1.39)$$

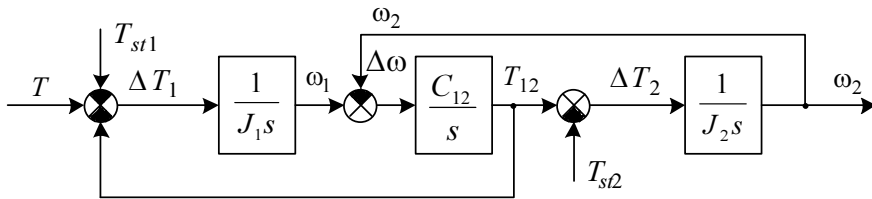
$$\text{c)} \quad W_3(s) = \frac{\omega_2(s)}{\Delta T_2(s)} = \frac{1}{J_2 s}, \quad (1.40)$$

$$\Delta T_2(s) = T_{12} - T_{st2}. \quad (1.41)$$

Sistemos, aprašomos (1.36-1.41) lygtimis, struktūrinė schema sudaroma taip: pirmiausiai pažymimas valdymo poveikis T , jis sumuojamas su $-T_{12}$ bei $-T_{st1}$ ir sudaro sumavimo tašką, už kurio yra ΔT_1 lygtis (1.37). Ryšį tarp įėjimo dydžio ΔT_1 ir ω_1 duoda pirmosios masės, šiuo atveju variklio, perdavimo funkcija $W_1(s)$. Toliau ω_1 sumuojasi su $-\omega_2$ ir gaunama antrosios grandies išėjimo dydžio $\Delta\omega$ lygtis (1.39). Antroji grandis atitinka tamprųjų mechaninių ryši, kurio išėjimas yra T_{12} . Šis dydis sudaro grįžtamąjį ryšį ir sumuojasi įėjime su $-T_{st1}$ ir T . Tačiau tas pats T_{12} turi sumuotis su $-T_{st2}$. Tai trečiosios grandies įėjimas ΔT_2 lygtis (1.41), o išėjimas ω_2 . Šį dydį susumavus su ω_1 , gaunama nagrinėjamos sistemos struktūrinė schema, kuri pavaizduota 1.5 paveiksle (Ключев 1985, Smilgevičius 1989).

Elektros pavarų judesio lygties dešinėje pusėje yra veikiančių sistemoje inercijos jėgų momentai. Jie priklauso nuo masių pagreičio ir vadinami dinaminiais momentais:

$$T_d = J_i \frac{d\omega_i}{dt}. \quad (1.42)$$



1.5 pav. Dvimasės sistemos mechaninės dalies struktūrinė schema

Fig. 1.5. Structural diagram of mechanical part of two-mass

Išspendus standžiosios mechaninės grandies judesio lygtį gaunama suminė dinaminė elektros pavaros apkrova, kuri yra lygi veikiančių sistemoje statinių pasipriešinimo momentų algebrinei sumai:

$$T_d = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = T - T_s. \quad (1.43)$$

Dinaminis momentas yra svarbi elektros pavaros apkrovos dedamoji. Jo ženklas, sistemos greičiui didėjant, sutampa su kampinio greičio ženklu, o greičiui mažėjant, yra priešingo ženklo. Vadinasi, pirmuoju atveju jis yra stabdantis momentas, ir variklis turi atlikti darbą, kad sukauptų reikiamą greitėjimui kinetinės energijos kiekį. Kai sistemos greitis mažėja, dinaminis momentas palaiko buvusį greitį ir tampa varančiuoju momentu. Atsiradusi kinetinė energija sunaudojama pasipriešinimo momentui įveikti, kuris šiuo atveju yra stabdantis.

Skaiciuojant konkrečių vykdančiųjų mašinų elektros pavaras, yra užduodamas paleidimo laikas arba leidžiamas pagreitis ϵ . Didžiausią apkrovą sudaro didžiausias statinis mechanizmo pasipriešinimo momentas ir didžiausias reikalingas dinaminis momentas:

$$T_{maks} = T_{stmaks} + J_{\Sigma} \cdot \epsilon_{maks}. \quad (1.44)$$

Tuo pačiu nustatoma ir didžiausia variklio elektromagnetinio momento vertė:

$$T = T_{maks}. \quad (1.45)$$

Šis didžiausias momentas apkrauna variklį tik dinaminių vyksmų metu, kai kinta greitis. Vadinasi, tai yra trumpalaikis perkrovos momentas. Trumpalaikės variklių perkrovas riboja nuolatinės srovės mašinoms leidžiama srovė pagal komutacijos sąlygas, o asinchroniniams varikliams – didžiausias momentas.

Paleidimo metu, dalis dinaminio momento sunaudojama rotorui įsukti, o kita dalis per mechanines grandis veikia mechanizmą. Vadinasi, paleidžiant mechanizmą dinaminė apkrova padidina mechaninių grandžių apkrovą mechanizmo dinaminio momento dydžiu $J_2 \cdot \epsilon_{vid}$:

$$T_{12} = J_2 \cdot \epsilon_{vid} + T_s. \quad (1.46)$$

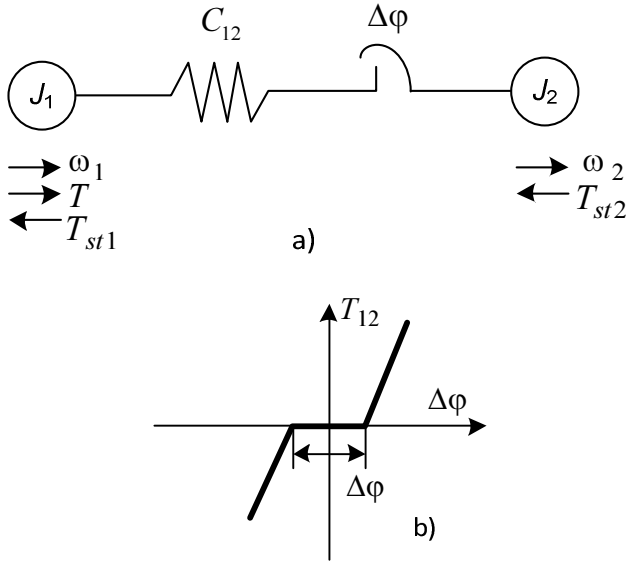
Kai $J_2 > J_1$, pagrindinę mechaninių grandžių apkrovą sudaro statinis apkrovos momentas. Jeigu $J_2 \gg J_1$, mechaninių grandžių apkrova gali labai padidėti.

Padidintą apkrovą dinaminių vyksmų metu gauna ir visi kinematinės schemos elementai. Apribojus didžiausią apkrovą ir sumažinus švytuojančio pobūdžio apkrovas, kurios atsiranda dėl tampriųjų ryšių, labai padidėja elektros pavarų mechaninės dalies patikimumas ir patvarumas.

Dinaminės apkrovos gali labai padidėti, jeigu mechaninėje pavaros dalyje

yra elementų, turinčių laisvumus.

Dvimasės mechaninės dalies su kinematinio laisvumu schema parodyta 1.6 paveiksle a. Dėl oro tarpo priklausomybė $T_{12} = f(\Delta\varphi)$ yra netiesinė, kuri pateikta 1.6 paveiksle b (Smilgevičius 1989).



1.6 pav. Dvimasė elektromechaninė sistema: a – dvimasės mechaninės dalies su laisvumu schema; b – priklausomybė $T_{12} = f(\Delta\varphi)$

Fig. 1.6. Two-mass electromechanical system: a – diagram of two-mass mechanical part with clearance; b – dependence $T_{12} = f(\Delta\varphi)$

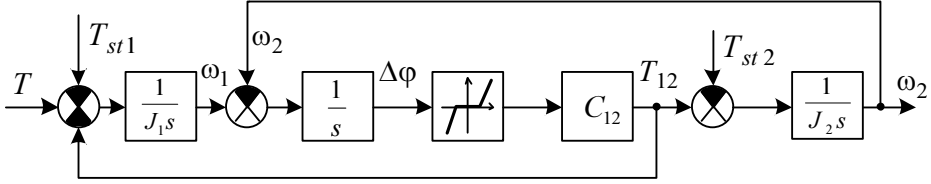
Šios sistemos judesio lygtys operatorinėje formoje:

$$\begin{cases} T - T_{12} - T_{st1} = J_1 s \omega_1, \\ T_{12} - T_{st2} = J_2 s \omega_2, \\ T_{12} = C_{12} \left(\varphi_1 - \varphi_2 - \frac{\Delta\varphi}{2} \right), \quad \text{kai } |\varphi_1 - \varphi_2| > \frac{\Delta\varphi}{2}, \\ T_{12} = 0 \quad \text{kai } |\varphi_1 - \varphi_2| \leq \frac{\Delta\varphi}{2}. \end{cases} \quad (1.47)$$

Pagal šią lygčių sistemą sudaryta struktūrinė mechaninės dalies schema, parodyta 1.7 paveiksle (Schonfeld 1995, Smilgevičius 1989).

Iš lygčių sistemos matyti, kad kol yra laisvumas, abi sistemos masės juda

nepriklausomai viena nuo kitos.



1.7 pav. Mechaninės dalies su laisvumu struktūrinė schema

Fig. 1.7. Structural diagram of mechanical part with clearance

Paleidžiant pavarą, apkrautą reaktyvaus pobūdžio momentu, galime išskirti tris paleidimo etapus.

Pirmajame paleidimo etape $T_{12}=0$ ir antrosios masės greitis ω_2 lygus nuliui. Pirmosios masės greitis staigiai didėja, nes variklio momentas M yra daug didesnis už T_{st1} . Toliau prasideda antrasis etapas. Laisvumo jau nebėra, bet ω_2 tebelieka lygus nuliui, kol didėjantis momentas T_{12} pasidarys didesnis už T_{st2} . Per šį laiką, kol T_{12} padidėja nuo 0 iki T_{st2} , greitis ω_1 dar padidėja iki ω_{1pr} . Esant šiam greičiui, pradeda judėti antroji masė, sukurianti dinaminę apkrovą. Trečiajam etapui, kai $|\varphi_1 - \varphi_2| > 0$, galioja šios lygtys:

$$\begin{cases} T - T_{12} - T_{st1} = J_1 \frac{d\omega_1}{dt}, \\ T_{12} - T_{st2} = J_2 \frac{d\omega_2}{dt}, \\ \frac{d^2 T_{12}}{dt^2} = C_{12} \left(\frac{d\omega_1}{dt} + \frac{d\omega_2}{dt} \right). \end{cases} \quad (1.48)$$

Iš šių lygčių galima gauti T_{12} sprendinį laiko atžvilgiu. Pirmoji lygtis dauginama iš $\frac{C_{12}}{J_1}$, o antroji iš $\frac{C_{12}}{J_2}$:

$$\begin{cases} (T - T_{12} - T_{st1}) \frac{C_{12}}{J_1} = C_{12} \frac{d\omega_1}{dt}, \\ (T_{12} - T_{st2}) \frac{C_{12}}{J_2} = C_{12} \frac{d\omega_2}{dt}. \end{cases} \quad (1.49)$$

Toliau iš pirmosios lygties atimama antroji:

$$(T - T_{12} - T_{st1}) \frac{C_{12}}{J_1} - (T_{12} - T_{st2}) \frac{C_{12}}{J_2} = C_{12} \left(\frac{d\omega_1}{dt} - \frac{d\omega_2}{dt} \right). \quad (1.50)$$

Dešinioji gautos lygties pusė, atsižvelgiant į trečiąją (1.48) lygtį, yra lygi $\frac{d^2 T_{12}}{dt^2}$. Gautoji lygtis pertvarkoma į šią lygtį:

$$(T_1 - T_{st1}) \frac{C_{12}}{J_1} - T_{12} \left(\frac{1}{J_1} + \frac{1}{J_2} \right) + T_{st2} \cdot \frac{C_{12}}{J_2} = \frac{d^2 T_{12}}{dt^2}. \quad (1.51)$$

Kairėje pusėje pridedamas ir atimamas narys $T_{st2} \cdot \frac{C_{12}}{J_1}$:

$$\begin{aligned} & \frac{(T_1 - T_{st1} - T_{st2})}{J_1} - T_{12} \left(\frac{J_1 + J_2}{J_1 \cdot J_2} \right) + T_{st2} \cdot \frac{C_{12}}{J_1} - T_{st2} \cdot \frac{C_{12}}{J_1} = \frac{d^2 T_{12}}{dt^2}, \\ & \frac{T_1 - T_{st1} - T_{st2}}{J_1 + J_2} - \frac{J_1 + J_2}{J_1 \cdot J_2} \cdot J_2 \cdot C_{12} + T_{st2} \cdot \frac{J_1 + J_2}{J_1 \cdot J_2} \cdot C_{12} = \\ & = \frac{d^2 T_{12}}{dt^2} + T_{12} \cdot \frac{J_1 + J_2}{J_1 \cdot J_2} \cdot C_{12}. \end{aligned} \quad (1.52)$$

Pažymėjus:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{vid} &= \frac{T_1 - T_{st1} - T_{st2}}{J_1 + J_2}, \\ \Omega_{12}^2 &= \frac{J_1 + J_2}{J_1 \cdot J_2} \cdot C_{12}. \end{aligned} \quad (1.53)$$

Tada:

$$\varepsilon_{vid} \cdot J_2 \cdot \Omega_{12}^2 + T_{12} \cdot \Omega_{12}^2 = \frac{d^2 T_{12}}{dt^2} + T_{12} \cdot \Omega_{12}^2. \quad (1.54)$$

Gaunama antrosios eilės diferencialinė lygtis:

$$\frac{1}{\Omega_{12}^2} \cdot \frac{d^2 T_{12}}{dt^2} + T_{12} = J_2 \cdot \varepsilon_{vid} + T_{st2}. \quad (1.55)$$

Bendrasis šios lygties sprendinys:

$$T_{12} = J_2 \varepsilon_{vid} + T_{st2} + A \cos \Omega_{12} t + B \sin \Omega_{12} t. \quad (1.56)$$

Lygties sprendinio ieškoma esant šioms pradinėms sąlygoms:

$$t = 0, \quad (T_{12})_0 = T_{st2}, \quad \left(\frac{dT_{12}}{dt} \right)_0 = C_{12}(\omega_1 - \omega_2) = 0, \quad (1.57)$$

$$T_{st2} = J_2 \cdot \varepsilon_{vid} + T_{st2} + A.$$

(1.55) lygtis diferencijuojama:

$$\frac{dT_{12}}{dt} = -A\Omega_{12} \cdot \sin \Omega_{12}t + B\Omega_{12} \cos \Omega_{12}t, \quad (1.58)$$

Irašoma kita pradinė sąlyga:

$$0 = B \cdot \Omega_{12}. \quad (1.59)$$

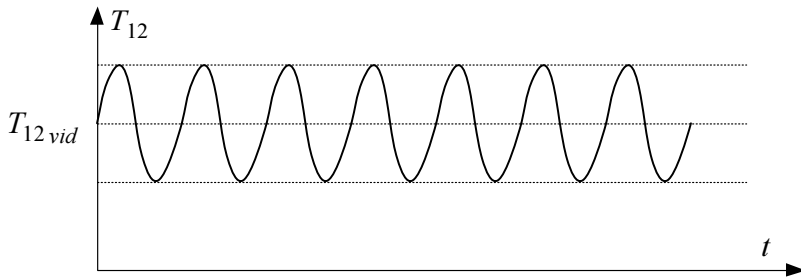
Gaunamos integravimo konstantos:

$$A = -J_2 \varepsilon_{vid}; \quad B = 0. \quad (1.60)$$

Diferencialinės lygties (1.56) sprendinys:

$$\begin{aligned} T_{12} &= J_2 \varepsilon_{vid} + T_{st2} - J_2 \varepsilon_{vid} \cdot \cos \Omega_{12}t, \\ T_{12} &= T_{st2} + J_2 \cdot \varepsilon_{vid} (1 - \cos \Omega_{12}t). \end{aligned} \quad (1.61)$$

Tampriosios sąveikos momentų kitimo grafikas parodytas 1.8 paveiksle.



1.8 pav. Tampriosios sąveikos momento kitimo grafikas

Fig. 1.8. Diagram of elastic reaction torque

Jeigu mechaninis ryšys būtų absoliučiai standus:

$$T_{12} = T_{st2} + J_2 \varepsilon_{vid}, \quad (1.62)$$

T_{12vid} yra vidutinė tampriosios sąveikos mechaninės dalies elementų apkrova. Palyginus (1.61) ir (1.62) matoma, kad galima atsižvelgti tik į vidutinius greičio, pagreičio ir apkrovos momento dydžius. Baigtinis mechaninių ryšių standumas

duoda kintamąją momento dedamąją ($\cos\Omega_{12}t$), kuri gali padidinti vidutinę momento vertę iki T_{12maks} :

$$T_{12maks} = T_{st2} + 2J_2\varepsilon_{vid}. \quad (1.63)$$

Įvertinus didžiausio ir vidutinio momentų santykį, gaunamas dinaminis koeficientas:

$$k_d = \frac{T_{12maks}}{T_{12vid}} = \frac{T_{12} + 2J_2\varepsilon_{vid}}{T_{12} + J_2\varepsilon_{vid}}. \quad (1.64)$$

Mechanizmuose su didele inercija dinaminės apkrovos gali padidėti iki $k_d = 2$ (Smilgevičius 1989).

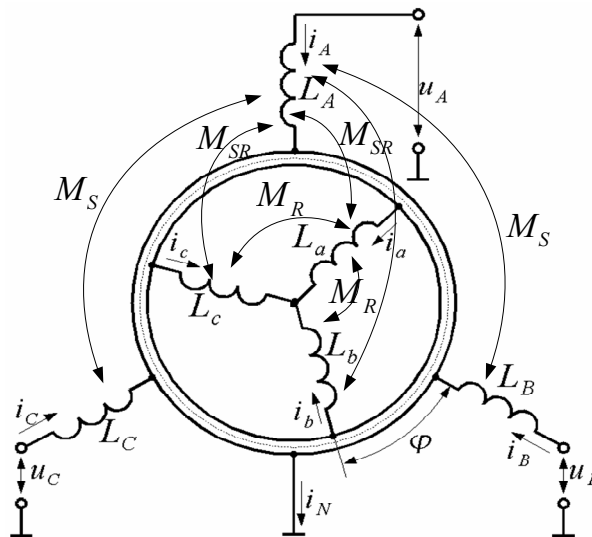
Projektuojant pavaras reikia nustatyti reikiamus valdymo dėsningumus, kad laisvumai mažėtų tolygiai ir dinaminės apkrovos būtų sumažintos iki leistinų dydžių. Tai nulemia pavaros struktūrą bei parametrus. Dvimasėse elektromechaninėse sistemose didelę įtaką turi grandies tamprumas ir laisvumas. Šie reiškiniai yra pavojingi pavaroms, todėl būtina juos gerai išnagrinėti. Atlikus literatūros apžvalgą, galima daryti išvadą, kad tamprumo ir laisvumo fizikinė prigimtis juose apibūdinta išsamiai, tačiau trūksta šių reiškinų daromos įtakos pavaros pereinamiesiems vyksmams analizės. Antrame skyriuje bus nagrinėjami dinaminiai vyksmai ir grandies laisvumo jiems daroma įtaka.

Lygčių (1.35) ir (1.48) sprendimas arba kompiuterinių modelių sudarymas pagal 1.5 paveiksle ir 1.7 paveiksle pateiktas struktūrines schemas, galimas tik žinant variklio sukuriama momento T priklausomybę nuo jo greičio ω . Todėl elektromechaninei dvimasei sistemai tirti reikia sudaryti asinchroninio variklio modelį, išanalizuoti perspektyvius variklio valdymo būdus, tinkančius dvimasei sistemai.

1.3. Asinchroninių variklių matematiniai modeliai

Elektros variklis yra pagrindinis bet kurios elektromechaninės sistemos pagrindinis elementas. Laikant elektros variklį elektromechaninės (mechatroninės) sistemos elementu, variklio rotorius inercija ir veleno nuostolių trintis priskiriama mechaninei sistemos daliai, o variklio sukuriamas elektromagnetinis momentas ir jo kampinis greitis laikomas mechaniniais kintamaisiais.

1.9 paveiksle schemiškai parodytos asinchroninio variklio apvijos ir fazinių apvijų elektromagnetiniai ryšiai (Rinkevičienė, Petrovas 2008).



1.9 pav. Trifazio asinchroninio variklio apvių schema
 Fig. 1.9. Three-phase induction motor winding scheme

Trifazio asinchroninio variklio statoriuje ir rotoriuje yra suklota po tris fazines apvijas. Kiekviena statoriaus fazinė apvija, pvz., fazės A, yra charakterizuojama nuosavuoju induktyvumu, atitinkančiu elektrovaros jėgą, kurią indukuoja ta fazinė apvija i_A tekanti srovė, tarpusavio induktyvumais tarp kitų dviejų statoriaus apvių M_S , taip pat tarpusavio induktyvumais tarp šios statoriaus apvijos ir kiekvienos rotoriaus apvijos M_{SR} . Simetrinės elektros mašinos atveju visų statoriaus fazinių apvių nuosavieji induktyvumai L_A, L_B, L_C lygūs, visų statoriaus apvių tarpusavio induktyvumai M_S lygūs, taip pat tarpusavio induktyvumai M_{SR} tarp statoriaus ir rotoriaus apvių yra lygūs. Rotoriaus apvių tarpusavio induktyvumai taip pat imami lygūs. Statoriaus ir rotoriaus savieji induktyvumai nepriklauso nuo rotoriaus posūkio kampo, kaip ir statoriaus apvių abipusiai induktyvumai bei rotoriaus apvių abipusiai induktyvumai. Tačiau statoriaus ir rotoriaus apvių abipusiai induktyvumai priklauso nuo rotoriaus posūkio kampo.

Įtampų balanso lygtys trifazio asinchroninio variklio statoriaus apvijoms užrašomos:

$$\begin{cases} u_A = \frac{d\Psi_A}{dt} + R_A i_A, \\ u_B = \frac{d\Psi_B}{dt} + R_B i_B, \\ u_C = \frac{d\Psi_C}{dt} + R_C i_C. \end{cases} \quad (1.64)$$

Analogiškai jos užrašomos ir rotorius apvijoms:

$$\begin{cases} u_a = \frac{d\Psi_a}{dt} + R_a i_a, \\ u_b = \frac{d\Psi_b}{dt} + R_b i_b, \\ u_c = \frac{d\Psi_c}{dt} + R_c i_c. \end{cases} \quad (1.65)$$

čia $u_A, u_B, u_C, u_a, u_b, u_c$ – statoriaus ir rotorius fazinių įtampų momentinės vertės; $\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C, \Psi_a, \Psi_b, \Psi_c$ – statoriaus ir rotorius pilnutiniai magnetiniai srautai; $R_A, R_B, R_C, R_a, R_b, R_c$ – statoriaus ir rotorius fazinių apvijų aktyviosios varžos; $i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c$ – statoriaus ir rotorius fazinių srovių momentinės vertės.

Asinchroninio variklio statoriaus pilnutiniai srautai aprašomi lygčių sistema:

$$\begin{cases} \Psi_A = L_A i_A + M_S(i_B + i_C) + M_{SR} i_a \cos \varphi + \\ \quad + M_{SR} [i_b \cos(\varphi + 120^\circ) + i_c \cos(\varphi + 120^\circ)], \\ \Psi_B = L_B i_B + M_S(i_A + i_C) + M_{SR} i_b \cos \varphi + \\ \quad + M_{SR} [i_a \cos(\varphi + 120^\circ) + i_c \cos(\varphi + 120^\circ)], \\ \Psi_C = L_C i_C + M_S(i_A + i_B) + M_{SR} i_c \cos \varphi + \\ \quad + M_{SR} [i_b \cos(\varphi + 120^\circ) + i_a \cos(\varphi + 120^\circ)]. \end{cases} \quad (1.66)$$

Analogiškai užrašomos pilnutinių srautų lygtys ir rotoriumi:

$$\begin{cases} \Psi_a = L_a i_a + M_R (i_b + i_c) + M_{SR} i_A \cos \varphi + \\ \quad + M_{SR} [i_B \cos(\varphi + 120^\circ) + i_C \cos(\varphi + 120^\circ)], \\ \Psi_b = L_b i_b + M_R (i_a + i_c) + M_{SR} i_B \cos \varphi + \\ \quad + M_{SR} [i_A \cos(\varphi + 120^\circ) + i_C \cos(\varphi + 120^\circ)], \\ \Psi_c = L_c i_c + M_R (i_a + i_b) + M_{SR} i_C \cos \varphi + \\ \quad + M_{SR} [i_B \cos(\varphi + 120^\circ) + i_A \cos(\varphi + 120^\circ)]. \end{cases} \quad (1.67)$$

čia M_{SR} – statoriaus ir rotoriaus fazinių apvijų abipusis induktyvumas, kai apvijų ašys sutampa; M_S (M_R) – skirtingų statoriaus (rotoriaus) apvijų fazinių apvijų abipusis induktyvumas; L_A , L_B , L_C – statoriaus apvijų savieji induktyvumai; L_a , L_b , L_c – rotoriaus apvijų savieji induktyvumai; φ – rotoriaus posūkio kampas tarp rotoriaus ir statoriaus ričių ašių išreiškiamas elektriniais laipsniais.

Asinchroninio variklio kuriamas elektromagnetinis momentas apskaičiuojamas:

$$T_e = p \frac{\partial W_m}{\partial \varphi} = \frac{p \partial (\Psi_A i_A + \Psi_B i_B + \Psi_C i_C)}{\partial \varphi} + \frac{p \partial (\Psi_a i_a + \Psi_b i_b + \Psi_c i_c)}{\partial \varphi}, \quad (1.68)$$

čia W_m – visose variklio apvijosose sukaupta magnetinio lauko energija; p – polių porų skaičius.

(1.68) lygtis rodo, kad elektromagnetinis momentas išreiškiamas apvijų pilnutinių srautų ir tose apvijosose tekančių srovių sandaugų dalinių išvestinių pagal posūkio kampą suma.

Mechaninis rotoriaus judesys aprašomas pagrindine judesio lygtimi:

$$T_e - T_{st} = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (1.69)$$

čia T_e , T_{st} – variklio sukuriamas elektromagnetinis momentas ir statinis apkrovos momentas; ω – rotoriaus greitis.

Rotoriaus posūkio kampas φ randamas iš lygties:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega. \quad (1.70)$$

(1.64–1.67) lygtys aprašo elektrinius ir elektromechaninius procesus pavarose su asinchroniniu varikliu ir sudaro tokios pavaros lygčių sistemą. (1.66) ir (1.67) lygtys turi harmoniškai kintančius koeficientus, o (1.68) lygtis yra

netiesinė, nes pilnutinių srautų ir srovių sandaugos kiekvienai fazei išreiškiamos trigonometrinėmis funkcijomis, todėl variklį aprašanti diferencialinių lygčių sistema analitiškai neišsprendžiama, ir tenka taikyti skaitmeninius diferencialinių lygčių sprendimo metodus. Net ir taikant šiuos metodus, tai padaryti nėra lengva ir reikia daug kompiuterio darbo laiko.

Galimi du pavaros lygčių sprendimo būdai: *Simulink*[®] sistemoje sudaryti variklio lygtis sprendžiantį modelį ir *Matlab*[®] programavimo kalba parašyti variklio lygtis sprendžiančią programą. Abu šie būdai turi savų privalumų ir trūkumų ir yra beveik lygiaverčiai. Asinchroninio variklio lygčių fazinėje koordinačių sistemoje sprendimas yra plačiau nagrinėtas šaltiniuose (Baškys *et al* 2006; Rinkevičienė, Petrovas 2004; Rinkevičienė, Petrovas 2005).

Asinchroninio variklio dinamines charakteristikas modeliuoti yra sudėtinga, nes reikia atsižvelgti į trifazių rotorius apvių judėjimą trifazių statoriaus apvių atžvilgiu. Diferencialinių lygčių koeficientai keičiasi harmoniniu dėsniu kintant rotorius kampui. Siekiant supaprastinti problemos sprendimą, bet kurį trifazį, asinchroninį variklį galima pakeisti jam ekvivalenčiu dvifaziu varikliu (Batkauskas 2010).

R. H. Parkas transformavo statoriaus kintamuosius į sinchroniniu greičiu judančią koordinačių sistemą, susietą su rotoriumi. Jis parodė, kad laike kintantys induktyvumai, atsiradę dėl apvių judėjimo viena kitos atžvilgiu, o kartu ir elektrinės grandinės su kintamomis induktyviosiomis varžomis, gali būti eliminuoti.

Transformuotų koordinačių modelis yra bene plačiausiai naudojamas asinchroninių variklių tyrimams. Jis gaunamas iš asinchroninio variklio diferencialinių lygčių, eliminavus harmoniškai kintančius koeficientus (Bose 2002; Lisauskas 2006; Rinkevičienė *et al* 2003).

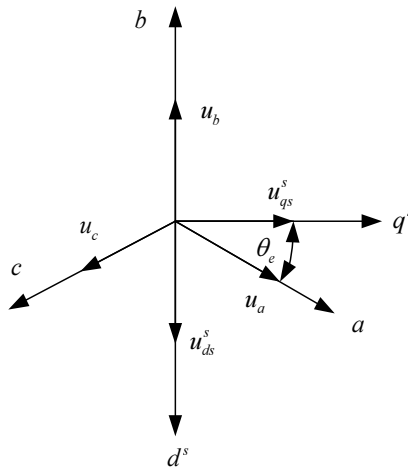
Vėliau (Stanley 1930) įrodė, kad laike kintantys induktyvumai, atsiradę dėl apvių judėjimo, gali būti eliminuoti, transformuojant rotorius kintamuosius į kintamuosius, susietus su fiktyviomis statoriaus apvijomis. Minėtame šaltinyje stacionarioji koordinačių sistema tvirtai susieta su rotoriumi. Kai kur ji vadinama $d^s - q^s$ koordinačių sistema. Vėliau H. Kronas pasiūlė statoriaus ir rotorius kintamuosius transformuoti į koordinačių sistemą, kuri juda sukamojo magnetinio lauko greičiu $d^e - q^e$. Šios abi transformacijos yra labai svarbios, ir jos bus nagrinėjamos plačiau. Vėliau D. S. Beretonas pasiūlė dar vieną transformaciją: statoriaus kintamuosius transformuoti į besisukančią koordinačių sistemą, kuri tvirtai susieta su rotoriumi, t. y. rotorius greičiu besisukančią sistemą.

Koordinačių transformavimo tikslas – supaprastinti duotąjį dinaminį procesą matematinį modelį. Jį taikant panaikinama apvių induktyvumų ir abipusių induktyvumų priklausomybė nuo sukiojo variklio rotorius posūkio kampo ir

atsiranda galimybė operuoti ne sinuso dėsnio kintančiais kintamaisiais, bet jų amplitudėmis. Koordinačių transformacija gerokai palengvina dinaminių procesų nagrinėjimą.

Asinchroninio variklio modelis su statoriumi tvirtai susietoje koordinačių sistemoje

Koordinačių transformacija pagrįsta elektros mašinų kintamųjų akimirkinių verčių pateikimu vektorių pavidalu. 1.10 paveiksle pateikta stacionariosios koordinačių sistemos $a-b-c$ kintamųjų transformavimo į dvifazės stacionariosios sistemos kintamuosius $d^s - q^s$ vektorių diagrama (Bose 2002).



1.10 pav. Koordinačių sistemos $a-b-c$ transformacija į $d^s - q^s$

Fig. 1.10. Phasor diagram of coordinate transformation from $a-b-c$ to $d^s - q^s$

Tarp a ir q^s ašies yra kampas θ_e , kaip parodyta 1.10 paveiksle, įtampos u_{qs}^s ir u_{ds}^s gali būti perskaičiuotos į $a-b-c$ ašių dedamąsias ir gali būti atvaizduotos matricine forma:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \sin \theta_e & 1 \\ \cos(\theta_e - 120^\circ) & \sin(\theta_e - 120^\circ) & 1 \\ \cos(\theta_e + 120^\circ) & \sin(\theta_e + 120^\circ) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{qs}^s \\ u_{ds}^s \\ u_{0s}^s \end{bmatrix}, \quad (1.71)$$

arba invertuota išraiška:

$$\begin{bmatrix} u_{qs}^s \\ u_{ds}^s \\ u_{0s}^s \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \cos(\theta_e - 120^\circ) & \cos(\theta_e + 120^\circ) \\ \sin \theta_e & \sin(\theta_e - 120^\circ) & \sin(\theta_e + 120^\circ) \\ 0,5 & 0,5 & 0,5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}, \quad (1.72)$$

čia u_{0s}^s – nulinės eilės dedamoji, kuri gali būti nevaizduojama.

Šiuo atveju sistemos kintamieji yra įtampos, srovės ir pilnutiniai srautai, kurie gali būti transformuojami pagal analogiškas išraiškas. Supaprastinimui kampas $\theta_e = 0$, tuomet q^s ašis sutampa su a ašimi. Praktikoje labiausiai paplitęs atvejis, kai trifazė mašina yra simetrinė, jos apvijos sujungtos žvaigždė ir kintamieji tenkina sąlygą:

$$u_a + u_b + u_c = 0. \quad (1.73)$$

Įvertinus (1.72) ir (1.73), pertvarkoma:

$$\begin{cases} u_a = u_{qs}^s, \\ u_b = -\frac{1}{2}u_{qs}^s - \frac{\sqrt{3}}{2}u_{ds}^s, \\ u_c = -\frac{1}{2}u_{qs}^s + \frac{\sqrt{3}}{2}u_{ds}^s. \end{cases} \quad (1.74)$$

Analogiškai gaunamos atvirkštinio transformavimo formulės:

$$\begin{cases} u_{qs}^s = \frac{2}{3}u_a - \frac{1}{3}u_b - \frac{1}{3}u_c, \\ u_{ds}^s = -\frac{1}{\sqrt{3}}u_b + \frac{1}{\sqrt{3}}u_c. \end{cases} \quad (1.75)$$

Modeliui sudaryti su statoriumi susijetoje koordinačių sistemoje $d^s - q^s$ imamos dvifazės asinchroninės mašinos lygtys (Krono formulės):

$$\begin{cases} u_{qs}^s = R_s i_{qs}^s + \frac{d}{dt} \Psi_{qs}^s, \\ u_{ds}^s = R_s i_{ds}^s + \frac{d}{dt} \Psi_{ds}^s, \\ 0 = R_r i_{qr}^s + \frac{d}{dt} \Psi_{qr}^s - \omega \Psi_{dr}^s, \\ 0 = R_r i_{dr}^s + \frac{d}{dt} \Psi_{dr}^s - \omega \Psi_{qr}^s. \end{cases} \quad (1.76)$$

čia R_s – statoriaus aktyvioji varža; R_r – rotorius aktyvioji varža.

Variklio modeliui sudaryti į lygčių sistemą reikia įrašyti statoriaus ir rotorius sroves, įeinančias į (1.76) formulę. Srovių dedamosios q^s ir d^s gaunamos remiantis pagrindinėmis srautų priklausomybėmis:

$$\Psi_{qs}^s = L_{ls} i_{qs}^s + L_m (i_{qs}^s + i_{qr}^s) = L_s i_{qs}^s + L_m i_{qr}^s, \quad (1.77)$$

$$\Psi_{qr}^s = L_{lr} i_{qr}^s + L_m (i_{qs}^s + i_{qr}^s) = L_r i_{qr}^s + L_m i_{qs}^s, \quad (1.78)$$

$$\Psi_{ds}^s = L_{ls} i_{ds}^s + L_m (i_{ds}^s + i_{dr}^s) = L_s i_{ds}^s + L_m i_{dr}^s, \quad (1.79)$$

$$\Psi_{dr}^s = L_{lr} i_{dr}^s + L_m (i_{ds}^s + i_{dr}^s) = L_r i_{dr}^s + L_m i_{ds}^s. \quad (1.80)$$

čia $L_s = L_{ls} + L_m$ ir $L_r = L_{lr} + L_m$ – pilnutiniai ekvivalentiniai statoriaus ir rotorius apvijų induktyvumai, susidedantys iš sklaidos induktyvumų L_{ls} bei L_{lr} ir abipusio induktyvumo $L_m = \frac{3}{2} \cdot L_{sr}$; čia L_{sr} – didžiausias induktyvumas tarp bet kurios statoriaus ir bet kurios rotorius apvijos, kai jų ašys sutampa.

Apskaičiavus statoriaus ir rotorius sroves, jos įrašomos į (1.76) lygčių sistemą ir gaunama diferencialinių lygčių sistema (1.81).

Tvirtai su statoriumi susietoje koordinatinių sistemoje variklio maitinimo įtampų dedamosios kinta kosinuso ir sinuso dėsniais $u_{qs}^s = U_m \sin \omega_e t$ ir $u_{ds}^s = -U_m \sin \omega_e t$ (Bose 2002).

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d}{dt} \Psi_{qs}^s &= u_{qs}^s - R_s \left(\frac{1}{L_s} + \frac{L_m^2}{(L_r L_s - L_m^2) L_s} \right) \cdot \Psi_{qs}^s + \frac{R_s L_m}{(L_r L_s - L_m^2)} \Psi_{qr}^s, \\ \frac{d}{dt} \Psi_{ds}^s &= u_{ds}^s - R_s \left(\frac{1}{L_s} + \frac{L_m^2}{(L_r L_s - L_m^2) L_s} \right) \cdot \Psi_{ds}^s + \frac{R_s L_m}{(L_r L_s - L_m^2)} \Psi_{dr}^s, \\ \frac{d}{dt} \Psi_{qr}^s &= -\frac{R_r L_s \Psi_{qr}^s}{L_r L_s - L_m^2} + \frac{R_r L_m}{L_r L_s - L_m^2} \Psi_{qs}^s - \omega \Psi_{dr}^s, \\ \frac{d}{dt} \Psi_{dr}^s &= -\frac{R_r L_s \Psi_{dr}^s}{L_r L_s - L_m^2} + \frac{R_r L_m}{L_r L_s - L_m^2} \Psi_{ds}^s + \omega \Psi_{qr}^s. \end{aligned} \right. \quad (1.81)$$

Asinchroninio variklio elektromagnetinis momentas randamas:

$$T_e = \frac{p L_m}{L_s L_r - L_m^2} \cdot (\Psi_{qs}^s \Psi_{dr}^s - \Psi_{ds}^s \Psi_{qr}^s) \quad (1.82)$$

Sudarant variklio modelį, (1.81) ir (1.82) lygtys papildomos pavaros judesio lygtimi:

$$T_e - T_{st} = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.83)$$

čia T_{st} – statinis pasipriešinimo momentas; J – variklio rotoriaus inercijos momentas; ω – variklio kampinis sukimosi greitis.

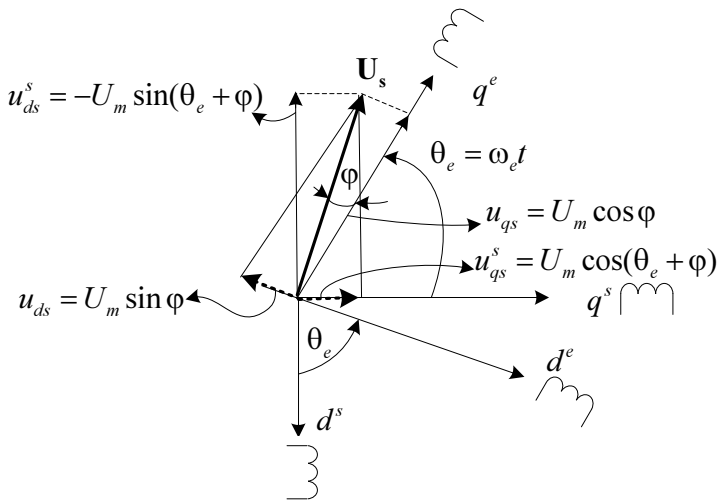
Lygtys (1.81), (1.82) ir sudaro dažniausiai literatūroje sutinkamą asinchroninio variklio modelį transformuotoje koordinačių sistemoje. Jį sudarant buvo atsiribota nuo natūralių statoriaus ir rotoriaus koordinačių sistemų ir visi dydžiai užrašyti naujoje, dvifazėje su statoriumi susietoje koordinačių sistemoje.

Asinchroninio variklio modelis sinchroniniu greičiu besisukančioje koordinačių sistemoje

Sinchroniškai besisukančios koordinačių sistemos ašys $d^e - q^e$ sukasi sinchroniniu greičiu ω_e . Jų posūkio kampas $\theta_e = \omega_e t$ kinta $d^s - q^s$ koordinačių atžvilgiu. Įtampos $d^s - q^s$ ašyse gali būti perskaiciuojamos į $d^e - q^e$ koordinačių sistemą remiantis išraiškomis:

$$\begin{cases} u_{qs} = u_{qs}^s \cos \theta_e - u_{ds}^s \sin \theta_e, \\ u_{ds} = u_{qs}^s \sin \theta_e + u_{ds}^s \cos \theta_e. \end{cases} \quad (1.84)$$

Trumpinant kintamųjų žymėjimus sinchroniniu greičiu besisukančioje koordinačių sistemoje, indeksas e laipsnio rodiklyje yra praleidžiamas. Ryšys tarp koordinačių sistemų pateiktas 1.11 paveiksle (Bose 2002; Rinkevičienė, Petrovas 2008).



1.11 pav. Ryšiai tarp koordinačių sistemų
Fig 1.11. Relations between reference frames

Šioje koordinačių sistemoje asinchroninio variklio dinaminį modelį aprašo Krono lygtys. Dvifazės mašinos visi statoriaus ir rotoriaus kintamieji transformuojami į sinchroniniu greičiu besisukančią koordinačių sistemą $d^e - q^e$. Statoriaus įtampų balansas aprašomas konvertuotomis į besisukančią koordinačių sistemą lygtimis:

$$u_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \Psi_{qs} + \omega_e \Psi_{ds}, \quad (1.85)$$

$$u_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \Psi_{ds} - \omega_e \Psi_{qs}. \quad (1.86)$$

(1.85) ir (1.86) lyčių visi kintamieji yra užrašyti besisukančioje koordinačių sistemoje. Paskutiniai du nariai šiose lygtyse yra greičio elektrovaros,

atsiradusios dėl koordinačių sukimosi. Todėl, kai $\omega_e = 0$, (1.85) ir (1.86) lygtys atitinka stacionariosios koordinačių sistemos lygtis. Surištieji srautai indukuoja apvijos išdėstytose d^e ir q^e ašyse elektrovaras, besiskiriančias $\frac{\pi}{2}$ kampų.

Realiai rotorius juda greičiu ω_r , todėl $d-q$ ašys, tvirtai susietos su rotoriumi, juda $\omega_e - \omega_r$ greičiu besisukančių koordinačių ašių atžvilgiu. Todėl besisukančioje $d^e - q^e$ koordinačių sistemoje rotoriaus lygtys užrašomos:

$$u_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \Psi_{qr} + (\omega_e - \omega_r) \Psi_{dr}, \quad (1.87)$$

$$u_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \Psi_{dr} - (\omega_e - \omega_r) \Psi_{qr}. \quad (1.88)$$

Surištieji srautai gali būti užrašyti:

$$\Psi_{qs} = L_{ls} i_{qs} + L_m (i_{qs} + i_{qr}), \quad (1.89)$$

$$\Psi_{qr} = L_{lr} i_{qr} + L_m (i_{qs} + i_{qr}), \quad (1.90)$$

$$\Psi_{qm} = L_m (i_{qs} + i_{qr}), \quad (1.91)$$

$$\Psi_{ds} = L_{ls} i_{ds} + L_m (i_{ds} + i_{dr}), \quad (1.92)$$

$$\Psi_{dr} = L_{lr} i_{dr} + L_m (i_{ds} + i_{dr}), \quad (1.93)$$

$$\Psi_{dm} = L_m (i_{ds} + i_{dr}). \quad (1.94)$$

Išrašius šias (1.89) – (1.94) lygtis į (1.85) – (1.86) ir (1.87) – (1.88) lygtis, elektrinius pereinamuosius procesus galima išreikšti naudojant kintamuosius tik sroves ir įtampas matricos forma:

$$\begin{bmatrix} u_{qs} \\ u_{ds} \\ u_{qr} \\ u_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + sL_s & \omega_e L_s & sL_m & \omega_e L_m \\ -\omega_e L_s & R_s + sL_s & -\omega_e L_m & sL_m \\ sL_m & (\omega_e - \omega_r) L_m & R_r + sL_r & (\omega_e - \omega_r) L_r \\ -(\omega_e - \omega_r) L_m & sL_m & -(\omega_e - \omega_r) L_r & R_r + sL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix}, \quad (1.95)$$

čia s – Laplaso operatorius.

Paprastai variklio greitis nėra pastovus. Pagrindinė pavaros judesio lygtis jį sieja su variklio momentu:

$$T_e - T_s = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (1.96)$$

čia T_e – variklio elektromagnetinis momentas; J – rotoriaus inercijos momentas.

I lygtis (1.85) ir (1.86) įrašant srovių išraiškas iš (1.89–1.94), jas galima išreikšti tik srautais, eliminuojant sroves. Jei būsenos kintamaisiais pasirenkami surištieji srautai, tuomet, sutvarkius koeficientus, asinchroninio variklio įtampų balanso lygtys besisukančioje koordinačių sistemoje perrašomos:

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_{qs}}{dt} &= U_{lm} \cos \gamma - \omega_e \alpha'_s \Psi_{qs} + \omega_e \alpha'_s K_r \Psi_{qr} + \omega_e \Psi_{ds}, \\ \frac{d\Psi_{ds}}{dt} &= U_{lm} \sin \gamma - \omega_e \alpha'_s \Psi_{ds} + \omega_e \alpha'_s K_r \Psi_{dr} - \omega_e \Psi_{qs}, \\ \frac{d\Psi_{qr}}{dt} &= -\omega_e \alpha'_r \Psi_{qr} + \omega_e \alpha'_r K_s \Psi_{qs} + (\omega_e - \omega_r) \Psi_{dr}, \\ \frac{d\Psi_{dr}}{dt} &= -\omega_e \alpha'_r \Psi_{dr} + \omega_e \alpha'_r K_s \Psi_{ds} - (\omega_e - \omega_r) \Psi_{qr}. \end{aligned} \quad (1.97)$$

čia Ψ_{qs}, Ψ_{ds} – pilnutinio statoriaus srauto projekcijos į q, d ašis; Ψ_{qr}, Ψ_{dr} – pilnutinio rotoriaus srauto projekcijos į d, q ašis; U_{lm} – tinklo fazinės įtamos amplitudinė vertė; γ – tinklo įtamos fazė įjungimo metu; ω_e – variklio maitinimo įtamos kampinis dažnis, lygus $\omega_e = 2\pi f$; ω_r – vienos polių poros asinchroninio variklio greitis (variklio elektrinis greitis); lygčių koeficientai apskaičiuojami iš variklio parametrų: $\alpha_s = \frac{R_s}{x_s}$; $\alpha_r = \frac{R_r}{x_s}$; $\sigma = 1 - \frac{x_m^2}{x_r x_m}$;

$K_s = \frac{x_m}{x_s}$; $K_r = \frac{x_m}{x_r}$; $\alpha'_r = \frac{\alpha_r}{\sigma}$; $\alpha'_s = \frac{\alpha_s}{\sigma}$. Kiti vartojami žymenys: x_m – įmagnetinimo kontūro induktyvioji varža; $x_s = x_m + x_{ls}$ – statoriaus apvijų pilnutinė induktyvioji varža; $x_r = x_m + x_{lr}$ – rotoriaus apvijų pilnutinė redukuotoji induktyvioji varža; R_s – aktyvioji statoriaus varža; R_r – rotoriaus apvijų redukuota aktyvioji varža; x_{ls}, x_{lr} – statoriaus ir rotoriaus redukuotosios induktyviosios sklaidos varžos.

Kartu su (1.97) lygčių sistema, variklio momentui T_e apskaičiuoti patogiau naudoti lygtį:

$$T_e = \frac{2}{3} p \frac{\omega_e K_r}{\sigma x_s} (\Psi_{qr} \Psi_{ds} - \Psi_{qs} \Psi_{dr}). \quad (1.98)$$

Pavaros dinamikai tirti lygčių sistema (1.97) papildoma pavaros judesio lygtimi:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (T_e - T_s), \quad (1.99)$$

čia T_e ir T_s – variklio sukuriamas ir statinis apkrovos momentai; J – pavaros inercijos momentas; ω – variklio kampinis sukimosi greitis.

Lygtys (1.97), (1.98) ir sudaro dažniausiai literatūroje sutinkamą asinchroninio variklio modelį sinchroniniu greičiu besisukančioje transformuotoje koordinačių sistemoje (Rinkevičienė, Petrovas 2008).

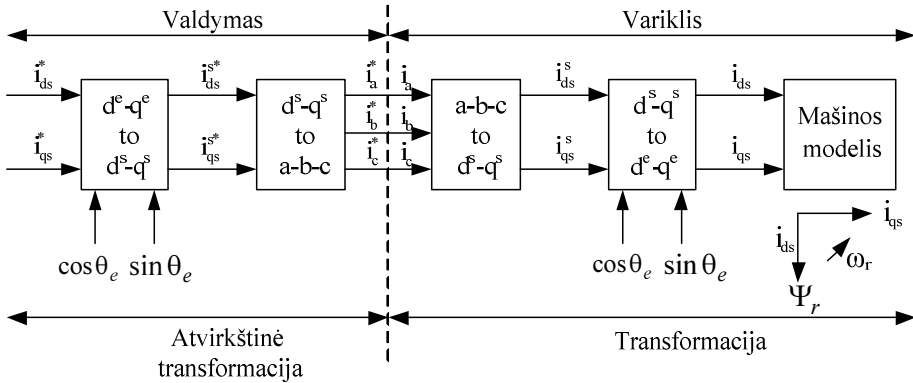
1.4. Asinchroninio variklio vektorinio ir neraiškiosios logikos regulatoriaus valdymo principai

Valdant trifazį variklį vektoriniu būdu fazinės srovės jame valdomos taip, kad sužadintų 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 erdvinio srovės vektoriaus valdymu (Wang 2010).

Varikliui valdyti pakanka tik dviejų srovių dedamųjų. Viena srovės dedamoji i_d yra išilginė ir susieta tiksliai su statoriaus magnetiniu srautu. Tai yra srovė, kuri kuria magnetinį lauką ir, veikdama asinchroninio variklio rotorį, priverčia jį pasisukti ta pačia kryptimi. Jeigu valdymui būtų naudojama tik ši srovė, tai judesys būtų žingsninis ir jį būtų galima valdyti, keičiant statoriaus srauto padėtį viso apsisukimo metu.

Vektorinio pavaros valdymo principą galima paaiškinti, remiantis 1.5 paveikslu (Bose 2002). Čia variklio modelis atvaizduotas sinchroniškai besisukančioje koordinačių sistemoje. Keitiklis, kuris šiame paveiksle nepavaizduotas, generuoja sroves i_a, i_b, i_c . Šios srovių vertės transformuojamos į dvifazės stacionarios koordinačių sistemos $d^s - q^s$ srovių vertes i_{ds}^s ir i_{qs}^s , šie kintamieji toliau transformuojami į sinchroniniu greičiu besisukančios koordinačių sistemos $d^e - q^e$ kintamuosius, gaunamos i_{ds} ir i_{qs} srovių vertės.

Srovės i_{ds} vektorius atitinka rotoriaus srauto vektorių Ψ_r , o i_{qs} vektorius yra statmenas i_{ds} srovei vertei, kaip pavaizduotas 1.12 paveiksle.



1.12 pav. Trifazės sistemos keitimas į dvifazę sistemą

Fig. 1.12. Three phase reference frame conversion into two reference frame

Yra žinomi du pagrindiniai vektorinio valdymo metodai. Vienas jų vadinamas tiesioginio arba grįžtamojo ryšio vektorinio valdymo metodu, kurį aprašė F. Blaschke (Blaschke 1972). Antrasis yra netiesioginio valdymo metodas, kurį atrado Hasse (Hasse 1969). Pagrindinis šių metodų skirtumas yra valdymo signalams formuoti taikomi skirtingi bazinių vektorių $\cos\theta_e$ ir $\sin\theta_e$ formavimo būdai. Srovės komponentės i_{ds} kryptis gali būti sutapdinama su rotoriaus srautu Ψ_r , srautu oro tarpe Ψ_m ar statoriaus srautu Ψ_s .

Dvimasėms elektromechaninėms sistemoms tirti pasirenkamas netiesioginio valdymo metodas. Remiantis literatūra (Ogasawara *et al* 1988; Boldea *et al* 1992; Tajima, Hori 1993; Batkauskas 2010), netiesioginio vektorinio valdymo sistemos modelyje rotoriaus srauto erdvinio vektoriaus padėties kampas θ_e gaunamas netiesiogiai, t. y. apskaičiuojant jį iš rotoriaus greičio ir rotoriaus slydimo kampinio sukimosi greičio. Šioje sistemoje valdymo poveikiai formuojami sukamojo magnetinio lauko greičiu besisukančioje koordinačių sistemoje, o pavaros parametrai matuojami ir reguliuojami statinėje su statoriumi susietoje koordinačių sistemoje. Tokioje sistemoje reikalingi specialūs moduliai, leidžiantys perskaičiuoti valdymo vienos koordinačių sistemos parametrus į kitą. Valdymo parametrų perskaičiavimas atliekamas remiantis, Klarko ir R. H. Parko tiesioginėmis ir atvirkštinėmis transformacijomis. Vektorinio valdymo modelio parametrai gaunami, matuojant statoriaus srovių vertes ir perskaičiuojant jas į $d^s - q^s$ koordinačių sistemą:

$$\begin{cases} i_{ds}^s = \frac{2}{3} \cdot \left(i_a - \frac{1}{2}i_b - \frac{1}{2}i_c \right), \\ i_{qs}^s = \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{2}i_b - \frac{\sqrt{3}}{2}i_c \right). \end{cases} \quad (1.100)$$

čia i_{ds}^s, i_{qs}^s – srovės vektoriaus projekcijos $d^s - q^s$ koordinačių sistemoje;

i_a, i_b, i_c – išmatuotos statoriaus srovių vertės.

Toliau statoriaus srovių projekcijos perskaičiuojamos į sinchroniškai besisukančią $d^e - q^e$ koordinačių sistemą:

$$\begin{cases} i_{ds} = i_{qs}^s \cos \theta_e + i_{ds}^s \sin \theta_e, \\ i_{qs} = i_{ds}^s \cos \theta_e - i_{qs}^s \sin \theta_e. \end{cases} \quad (1.101)$$

čia i_{ds}, i_{qs} – srovės vektoriaus projekcijos sinchroniškai besisukančioje $d^e - q^e$ koordinačių sistemoje; $\theta_e = \omega_e t$ – variklio rotorius srauto erdvinio vektoriaus kampas fiksuotoje $d^s - q^s$ koordinačių sistemoje.

Šiame modelyje magnetinio srauto valdymui taikoma atviroji sistema, srautas formuojamas kaip i_{ds} funkcija, todėl vektorinio valdymo modelis supaprastėja ir sudaromas tik su greičio reguliavimo kontūru, o statoriaus srautas lieka pastovus.

Sudarant vektorinio valdymo modelį panaudojamas greičio regulatoriaus formuojamas momento signalas T_e^* , pagal jį skaičiuojama statoriaus srovės dedamoji i_{qs} :

$$i_{qs} = \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{p}{2} \right) \cdot \frac{L_r}{L_m} \cdot \frac{T_e^*}{\Psi_{r, \text{vert.}}}, \quad (1.102)$$

čia $\Psi_{r, \text{vert.}}$ – apskaičiuotas rotorius apvijų srautas.

Rotoriaus srautas apskaičiuojamas:

$$\Psi_{r, \text{vert.}} = \frac{L_m i_{ds}}{1 + \tau_r s}, \quad (1.103)$$

čia $\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$ – rotoriaus laiko pastovioji.

Statoriaus srovės dedamoji i_{ds} :

$$i_{ds} = \frac{\Psi_r^*}{L_m}. \quad (1.104)$$

Rotoriaus srauto padėties kampas θ_e , reikalingas koordinačių transformacijai, apskaičiuojamas:

$$\theta_e = \int \omega_e dt = \int (\omega_r + \omega_{sl.}) dt. \quad (1.105)$$

Rotoriaus slydimo kampinis sukimosi greitis skaičiuojamas iš statoriaus srovės dedamosios i_{qs} ir variklio parametrų:

$$\omega_{sl.} = \frac{L_m}{\Psi_{r,vert.}} \cdot \frac{R_r}{L_r} \cdot i_{qs}. \quad (1.106)$$

Srovės vektoriaus dedamosios i_{ds}^s ir i_{qs}^s perskaičiuojamos į trifazės srovės sistemos dedamąsias i_a^*, i_b^*, i_c^* , kurios naudojamos srovės reguliatoriaus įėjime. Lyginant šiuos signalus su išmatuotomis statoriaus srovėmis, generuojami keitiklio valdymo signalai.

Neraiškiosios logikos reguliatoriaus valdymo principas

Neraiškioji logika (angl. Fuzzy logic), atsirado kaip vienas iš patogiausių būdų kurti ir valdyti sudėtingus technologinius procesus. Neraiškūs valdymo metodai paremti neraiškiomis aibėmis bei veiksmiais su jomis. Taikomos dvi raiškių procesų valdymo neraiškios sistemos: Mamdani ir Sugeno.

Neraiškioji raiškių procesų valdymo sistema atlieka šias pagrindines operacijas:

1) raiškius įėjimų dydžius transformuoja į neraiškiasias aibes (fuzifikacijos operacija),

2) pagal įėjimų dydžių neraiškiasias aibes, remiantis tam tikromis taisyklėmis, daromos išvados, kurių rezultatas yra neraiškioji aibė ir atitinkama jos priklausomumo funkcija (inferencijos operacija),

3) pagal išėjimų priklausomumo funkcijas apskaičiuoja raiškių išėjimų dydžių vertes (defuzifikacijos operacija).

Pati fuzifikacijos operacija abiejose neraiškiosiose sistemose atliekama tokiu būdu:

- 1) raiškūs jėgimų dydžiai transformuojami į lingvistinius kintamuosius;
- 2) panaudojant parinktas priklausomybės funkcijas, suformuojamos atitinkamos neraiškiosios aibės kiekvienam jėgimo kintamajam. Priklausomybės funkcijos gali būti labai skirtingo pavidalo – trikampio, trapecijos, S raidės formos ir pan. Nuo priklausomumo funkcijų pavidalo tam tikru mastu priklauso visos neraiškiosios sistemos savybės.

Neraiškiosios sistemos išvados arba sprendimai (inferencija) remiasi neraiškiaja logika, kuri yra panaši į raiškiają logiką. Jos taisyklių bazę sudaro tokio pavidalo taisyklės: *jeigu e_1 yra E_1 ir e_2 yra E_2 ir ... ir e_n yra E_n , tuomet u_1 yra U_1 , ..., u_m yra U_m* . Čia: $e_1, e_2, \dots, e_n, u_1, \dots, u_m$ yra atitinkamų jėgimų ir išėjimų lingvistiniai kintamieji, o $E_1, \dots, E_n, U_1, \dots, U_m$ yra atitinkamų lingvistinių kintamųjų neraiškiosios reikšmės. Taisyklėse gali būti naudojamos taip pat loginės operacijos *arba* ir *ne*. Operacija *ir* (aibių sąjunga) dažniausiai realizuojama naudojant *min* („minimizavimo“) funkciją, operacija *arba* (aibių sankirta) – naudojant *max* („maksimizavimo“) funkciją, o operacija *ne* a (aibės paneigimas) – naudojant *1-a*.

Dviejų jėgimų kintamųjų atveju, kai kiekvienas jėgimo kintamasis gali įgauti tris lingvistines vertes, pvz. *neigiama* (NG), *nulinė* (NU) ir *teigiama* (TG), o išėjimo lingvistinis kintamasis – lingvistines vertes *mažas* (M) ir *didelis* (D). Sudėtingų objektų neraiškaus valdymo sistemose gali būti naudinga ir tokia taisyklė: *jeigu paklaida e yra NU ir de/dt yra NU ir e yra mažėjanti, tuomet nedaryti nieko*. Kitais būdais įgyvendinti panašų valdymo dėsni būtų sunku. Mamdani tipo sistemos išvada yra neraiškioji, kurios neraiškiasias aibes daro iš jėgimo neraiškiųjų aibių agregavimo operatorius, t. y. visų taisyklių loginių teiginių darinys į Mamdani neraiškiają išvadą, o pastaroji yra defuzifikuojama į raiškų dydį. Šį išvadų darymo metodą 1975 m. pasiūlė E. H. Mamdani. Sugeno išvada taip pat yra neraiškioji, kurioje kiekvienos taisyklės teiginys yra visų jėgimų tiesinis darinys, o išėjimas yra visų taisyklių teiginių tiesinis darinys. Šį metodą 1985 m. pasiūlė M. Sugenas. Pagrindinis Sugeno ir Mamdani išvados skirtumas yra tas, kad Sugeno išvados priklausomumo funkcijos yra arba tiesinės jėgimų priklausomumo funkcijų atžvilgiu arba pastovios. Sugeno neraiškioji sistema yra kompaktiškesnė ir skaičiavimo prasme efektyvesnė už Mamdani sistemą, ji gerai tinka adaptyviems modeliams sudaryti ir netiesinėms sistemoms modeliuoti. Mamdani sistema turi kitų privalumų. Ji yra labiau intuityvi, geriau tinka žmogaus teikiamiems duomenims, plačiai taikoma praktikoje (Nemura 2007).

Sprendinys arba išvada (inferencija) gaunama išėjimo lingvistinių kintamųjų priklausomumo funkcijų pavidalo. Konkretiems, t. y. raiškiems išėjimo dydžiams gauti Mamdani neraiškioji sistema paprastai naudoja svorio centro

(angl. centroid) arba „maksimumo“ vidurio metodus. Svorio centro metodas yra labiausiai paplitęs raiškaus sprendinio apskaičiavimo metodas. Čia sprendinys yra išėjimo neraiškosios aibės priklausomumo funkcijos svorio centras. „Maksimumo“ vidurio metodas taip pat dažnai taikomas praktikoje dėl paprastesnio skaičiavimo. Sugenas neraiškiose sistemose naudoja pasvertų vidurkių ir pasvertų sumų metodus.

Remiantis pateiktais neraiškosios logikos valdymo principais ir literatūra, sudaromas uždarnosios asinchroninio variklio *fuzzy* greičio regulatoriaus modelis. Regulatorius turi du įėjimus, vieną išėjimą ir susideda iš keturių pagrindinių pakopų: fuzifikacijos, implikacijos, agregacijos ir defuzifikacijos. Pirmosios pakopos – fuzifikacijos – metu yra nustatomi įėjimo signalai – greičio paklaida e , gaunama iš nustatyto ir matuojamo greičio signalų skirtumo, ir paklaidos pokytis de . Išvadų aparatas atlieka implikacijos ir agregacijos funkcijas bei nustato sudėtinę neraiškiją išėjimo vertę pagal taisyklių bazėje esančias lingvistines taisykles. Taisyklių bazė sudaryta remiantis gautais ir pritaikytais nagrinėjamai elektros pavaros sistemai tyrinėjimų rezultatais ir susideda iš $JEI - TAI$ lingvistinių taisyklių. Išėjimo lingvistinis kintamasis yra pavaros rotoriaus slydimo greičio pokytis $V_{\omega_{sl}}$. Įėjimo ir išėjimo lingvistiniams kintamiesiems yra suformuotos lingvistinės vertės – priklausomybės funkcijos. Regulatoriaus veikimas aprašomas taikant šias lingvistines taisykles:

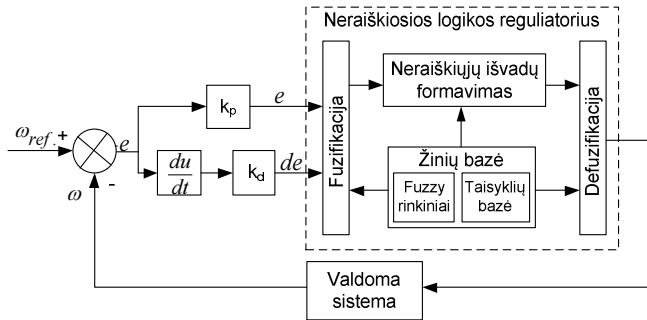
1. Jei valdymo paklaida yra neigiama, tuomet variklio greitį reikia labai sumažinti.
2. Jei valdymo paklaida yra artima nuliui ir paklaidos kitimo greitis yra teigiamas, tuomet variklio greitį reikia sumažinti nedaug.
3. Jei valdymo paklaida yra lygi nuliui, tuomet variklio greičio keisti nereikia.
4. Jei valdymo paklaida yra lygi nuliui ir paklaidos kitimo greitis yra neigiamas, tuomet variklio greitį reikia padidinti nedaug.
5. Jei valdymo paklaida yra teigiama, tuomet variklio greitį reikia labai padidinti.

Greičio reguliavimui gali būti naudojami įvairūs tipiniai PD, PID, PI arba dirbtiniu intelektu pagrįsti greičio regulatoriai. Norint suprasti reguliavimo principą, pasirenkamas vienas iš regulatorių – PD. Naudojamas sandaugos implikacijos metodas modifikuoja neraiškiasias aibes. Tuomet modifikuotos neraiškosios aibės yra sujungiamos į vieną sudėtinę išėjimo neraiškiją aibę. Galiausiai sudėtinė išėjimo neraiškioji aibė yra defuzifikuojama (*išsprendžiama*) į konkrečią PD valdymo dėsnio paklaidą $\Delta\omega_{sl}$.

Bendruoju atveju pavaros rotoriaus slydimo greičio pokytis, naudojant *fuzzy* PD regulatorių, išreiškiamas:

$$\Delta\omega_{sl} = K_p \cdot e(t) + K_D \cdot \frac{de(t)}{dt}. \quad (1.107)$$

Neraiškiosios logikos valdymo įtaiso su PD reguliatoriumi struktūrinė schema pavaizduota 1.13 paveiksle (Chen 2001).



1.13 pav. Neraiškiosios logikos įtaiso struktūrinė schema

Fig. 1.13. Structure of Fuzzy logic controller

Fuzzy logikos reguliatorių sudaro trys pagrindiniai blokai: fuzifikacijos, loginio išėjimo formavimo ir defuzifikacijos blokai.

Fuzifikacijos bloke įėjimo lingvistiniai kintamieji, tokie kaip sistemos paklaida e , paklaidos kitimo greitis (pirmoji paklaidos išvestinė) de charakterizuojami lingvistiniais dydžiais. Lingvistiniai dydžiai aprašomi taip: neigiamas didelis (NL), neigiamas mažas (NS), nulinis (ZE), teigiamas mažas (PS), teigiamas didelis (PL). Šie lingvistiniai dydžiai priskiriami aibėms ir gali turėti skaitinę reikšmę nuo 0 iki 1. Loginio išėjimo formavimo bloke remiantis duomenų matrica (taisyklių bazė) sudaroma lingvistinių taisyklių 1.1 lentelė.

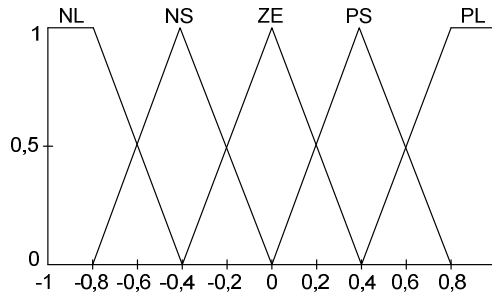
1.1 lentelė. Lingvistinių taisyklių lentelė

Table 1.1. Linguistic Rule Table

e kintamieji	NL	NS	ZE	PS	PL
de kintamieji	Lingvistiniai dydžiai				
NL	ZE	PL	ZE	PL	ZE
NS	NS	ZE	ZE	PL	ZE
ZE	NS	NL	ZE	PL	PS
PS	ZE	NL	PL	ZE	PS
PL	ZE	NL	PS	NL	ZE

Aibių skaičius kiekvienai lingvistinei kintamajai pasirenkamas vienodas. Tokiu būdu kiekvienai įėjimo kintamajai priskiriamos priklausomumo aibės

(nerišlieji poaibiai), charakterizuojantys kiekvieną konkrečią lingvistinę kintamąją. Kadangi priklausomumo funkcijos perdengia vieną kitą, tai vienai tai pačiai įėjimo kintamajai atitinka keletas priklausomumo verčių. Tai galima matyti iš įėjimų funkcijų priklausomybės, pavaizduotos 1.13 paveiksle.



1.13 pav. Įėjimų e ir de kintamųjų ryšių funkcijos

Fig. 1.13. Membership functions for input variables e and de

Defuzifikacijos bloke gauta priklausomumo funkcija reguliuojamam objektui valdyti paverčiama į skaitinę vertę. Dažniausiai skaitinė vertė nustatoma „svorio centro“ metodu, apibrėžiant pasirinktą figūrą plokštumoje. Bendroji formulė svorio centro plokštumos plotui apskaičiuoti:

$$S_C = S(u_C, \mu_C). \quad (1.108)$$

Kitimo funkcija $\mu_C(u)$ kinta nuo u kintamojo kitimo intervale nuo $u = U_1$ iki $u = U_2$, tuomet svorio centro formulė:

$$u_C = \frac{\int_{U_1}^{U_2} u \mu_C(u) du}{\int_{U_1}^{U_2} \mu_C(u) du}. \quad (1.109)$$

Ploto svorio centras vadinamas ploto „centroidu“, kintamasis u_C – defuzifikacijos rezultatu (Гостев 2008).

Sudarant neraiškiųjų reguliatorių, naudojama *Matlab*[®] inžinerinė ir matematinė programa *Fuzzy Logic Toolbox*, skirta neraiškiųjų sistemų projektavimui ir modeliavimui. *Fuzzy Logic Toolbox* palaiko visus neraiškiųjų reguliatorių kūrimo etapus, t.y. projektavimą, modeliavimą, tyrinėjimą ir diegimą realiu laiku.

1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

Atlikus literatūros apžvalgą nustatyta, kad joje nepakankamai dėmesio skirta valdomoms sudėtingesnėms elektromechaninėms sistemoms. Svarbiausios išvados, naudingos sprendžiant įvade suformuluotus uždavinius:

1. Literatūroje aprašyti vienmasių ir dvimasių sistemų matematiniai modeliai, masių transformacijos principas, išnagrinėta dvimasių sistemų tamprumo ir laisvumo daroma įtaka sistemai nusistovėjusių režimų metu, tačiau nepakankamai ištirti dvimasių sistemų dinaminiai vyksmai.
2. Literatūroje aprašyti asinchroninių variklių matematiniai modeliai ir jų sudarymo metodika yra tinkami tolimesniems dvimasių sistemų modelių sudarymams ir tyrimams. Dvimasė sistema su asinchroniniu varikliu, pritaikius statoriaus srauto vektoriaus valdymo metodą, nėra pakankamai ištirta.
3. Sparčiai populiarėja sistemų su neraiškiosios logikos reguliatoriais valdymo būdas, tačiau jis nėra taikytas tirti tampriosiąsias dvimases sistemas.
4. Eksperimentinis tyrimas išlieka aktualus sudarant naujus modelius ir nustatant jų adekvatumą.

Remiantis aukščiau pateiktomis išvadomis formuluojami pagrindiniai darbo uždaviniai:

1. Sudaryti dvimasės sistemos su mechaninės dalies tamprumu ir laisvumu imitacinį modelį.
2. Sudaryti dvimasės sistemos imitacinį modelį su teorine pirmosios masės momento kitimo laike išraiška.
3. Sudaryti dvimasės elektromechaninės sistemos vektorinio valdymo modelį.
4. Sudaryti dvimasės elektromechaninės sistemos su neraiškiosios logikos reguliatoriumi modelį.
5. Sukonstruoti dvimasės elektromechaninės sistemos su asinchroniniu varikliu eksperimentinį standą, sukurti greičio matavimo prietaisą skirtą dinaminiam elektromechaninės sistemos vyksmams tirti. Atlikti gautų eksperimentinių rezultatų analizę ir patikrinti imitacinių modelių adekvatumą.

Valdomų asinchroninių variklių imitaciniai modeliai

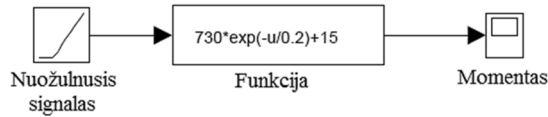
Šiame skyriuje sudaromas dvimasės sistemos su supaprastinto variklio, kuris turi teorinę momento kitimo laike išraišką, imitacinis modelis, gaunami imitaciniai rezultatai. Sudaromi asinchroninio variklio imitaciniai modeliai tvirtai su statoriumi susietoje ir sinchroniniu greičiu besisukančioje koordinačių sistemose, skirtos dinaminėms, greičio ir momento charakteristikoms tirti. Sudaromi variklio vektorinio ir neraiškiosios logikos valdymo imitaciniai modeliai. Pateikiami abiejų variklių imitacinių modelių greičio ir momento pereinamieji vyksmai nevaldomose ir su greičio reguliatoriais sistemose.

Skyriaus tematika paskelbti 4 autoriaus straipsniai (Juraitis 2008; Juraitis *et al* 2009; Juraitis *et al* 2010; Juraitis *et al* 2011).

2.1. Dvimasės sistemos imitacinis modelis su teoriniu variklio momento kitimu

Sudaromas modelis kompiuterine programa *Matlab*[®] *Simulink*[®] kurio signalas yra panašus į variklio momento signalą. Šį modelį galima įsivaizduoti kaip supaprastintą variklio modelį, kuris turi teorinę variklio momento kitimo

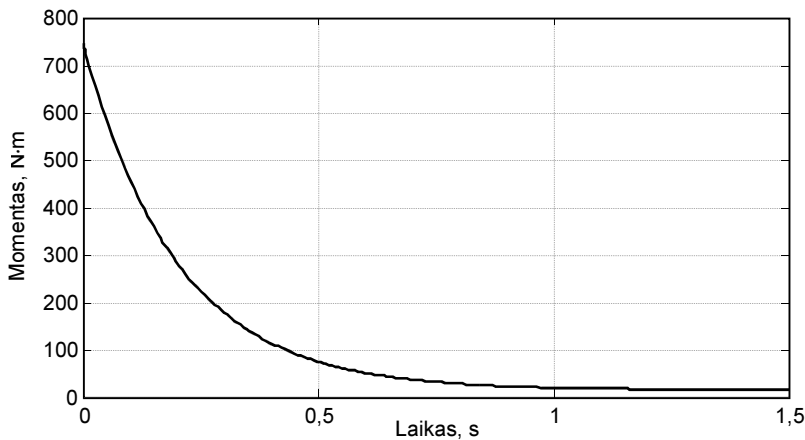
laike išraišką. Teorinio variklio momento signalo modelis pavaizduotas 2.1 paveiksle.



2.1 pav. Teorinio variklio momento signalo modelis

Fig. 2.1. Theoretical model of induction drive torque signal

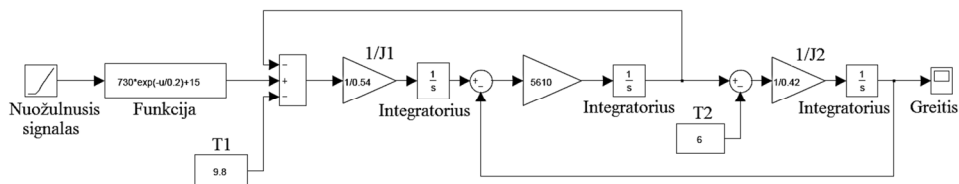
Šis modelis sudaromas tam, kad, paveikus dvimasę elektromechaninę sistemą minėtu signalu, gaunamas pereinamasis vyksmas artimas tikrosios dvimasės elektromechaninės sistemos pereinamajam vyksmui. Teorinio momento signalo imitacinė charakteristika pateikta 2.2 paveiksle.



2.2 pav. Teorinio momento signalas

Fig. 2.2. Theoretical signal of torque

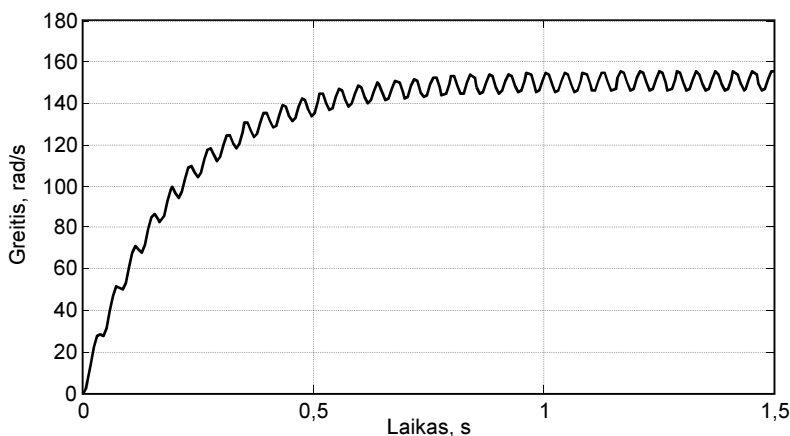
Pagal 1.2 poskyryje išnagrinėtą ir 1.5 paveiksle pateiktą tampriosios dvimasės sistemos mechaninės dalies schemą, sudaromas imitacinis dvimasės elektromechaninės sistemos modelis ir, kaip valdymo poveikio signalas, prie jo prijungiamas teorinio variklio modelio signalo modelis. Šis modelis pateiktas 2.3 paveiksle.



2.3 pav. Dvimasės sistemos su supaprastintu variklio modelis

Fig. 2.3. Model of two-mass system with a simplified model of induction drive

Dvimasės sistemos su supaprastintu varikliu imitacijos rezultatai pateikti 2.4 paveiksle.



2.4 pav. Dvimasės sistemos su supaprastintu variklio modeliu greičio pereinamasis vyksmas

Fig. 2.4. Step response of speed of two-mass system with a simplified model of induction drive

2.4 paveikslas vaizduoja teorinį dvimasės elektromechaninės sistemos greičio pereinamąjį vyksmą. Kreivėje matyti negęstantys greičio virpesiai, kurie atsiranda dėl masių jungtyje esamo tamprumo. Šis supaprastintas variklio modelis kartu su dvimasės sistemos modeliu leidžia įsitikinti dvimasės sistemos daroma įtaka ir parodo problemos aktualumą, kad būtina įvertinti sistemos parametrus ir verta atlikti tyrimus.

2.2. Asinchroninio variklio imitaciniai modeliai

Imitaciniai modeliai sudaromi naudojant kompiuterinę programos paketą *Matlab® Simulink®*. Remiantis 1.3 poskyryje aprašytais matematiniais modeliais, imitaciniai modeliai sudaromi skirtingose koordinatinių sistemose.

Pirmiausia sudaromas asinchroninio variklio modelis su statoriumi tvirtai susietoje koordinatinių sistemoje. Variklio pagrindiniai parametrai pateikti 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Modeliuojamo variklio parametrai

Table 2.1. Parameters of simulated motor

Parametras	U , V	P_s , kW	I , A	ω , rad/s	T , N·m	P , vnt.	$\cos\varphi$
Vertė	230	1,1	3,56	157	7,0	2	0,81
Parametras	J , kg·m ²		R_s , Ω	L_{ls} , mH	R_r , Ω	L_{lr} , mH	L_m , mH
Vertė	0,00262		2,56	4,8	1,43	4,97	150

Imitacinis modelis sudaromas remiantis (1.81) ir (1.82) lygtimis. Norint sudaryti imitacinį modelį, reikia apskaičiuoti modelio koeficientus.

Apskaičiuojamas pilnutinis statoriaus induktyvumas:

$$L_s = L_m + L_{ls} = 150 + 4,8 = 154,8 \text{ mH}, \quad (2.1)$$

pilnutinis rotoriaus grandinės redukuotasis induktyvumas:

$$L_r = L_m + L_{lr} = 150 + 4,97 = 154,97 \text{ mH}, \quad (2.2)$$

pilnutinis variklio sklaidos induktyvumas:

$$L_{lv} = L_r - \frac{L_m^2}{L_s} = 154,97 - \frac{150^2}{154,8} = 9,62 \text{ mH}, \quad (2.3)$$

kiti reikalingi koeficientai:

$$k_1 = \frac{L_m}{L_s} = \frac{150}{154,8} = 0,968, \quad (2.4)$$

$$\frac{1}{L_s} + \frac{L_m \cdot k_1}{L_s \cdot L_{lv}} = \frac{1}{154,8 \cdot 10^{-3}} + \frac{150 \cdot 10^{-3} \cdot 0,968}{154,8 \cdot 10^{-3} \cdot 9,62 \cdot 10^{-3}} = 104, \quad (2.5)$$

$$\frac{1}{L_{lv}} = \frac{1}{9,62 \cdot 10^{-3}} = 104, \quad (2.6)$$

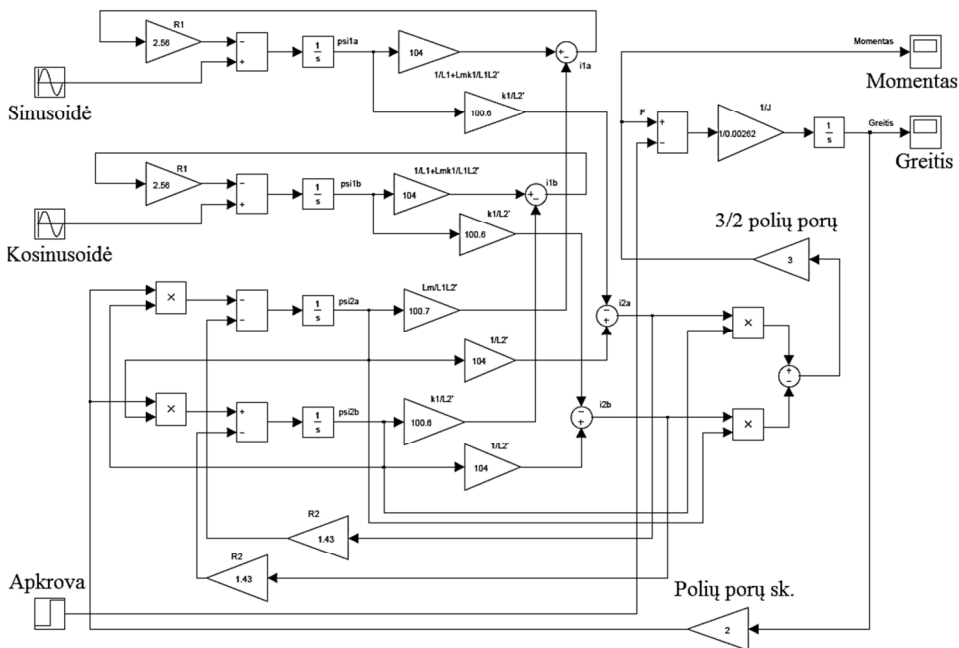
$$\frac{L_m}{L_s \cdot L_{lv}} = \frac{150}{154,8 \cdot 9,62 \cdot 10^{-3}} = 100,7, \quad (2.7)$$

$$\frac{k_1}{L_{lv}} = \frac{0,968}{9,62 \cdot 10^{-3}} = 100,6, \quad (2.8)$$

$$\frac{3}{2} p = \frac{3}{2} \cdot 2 = 3, \quad (2.9)$$

$$\frac{1}{L_{lv}} = \frac{1}{9,62 \cdot 10^{-3}} = 104. \quad (2.10)$$

Remiantis apskaičiuotais koeficientais, sudarytas asinchroninės pavaros modelis *Matlab*[®] *Simulink*[®] aplinkoje. Šis modelis pateiktas 2.5 paveiksle.

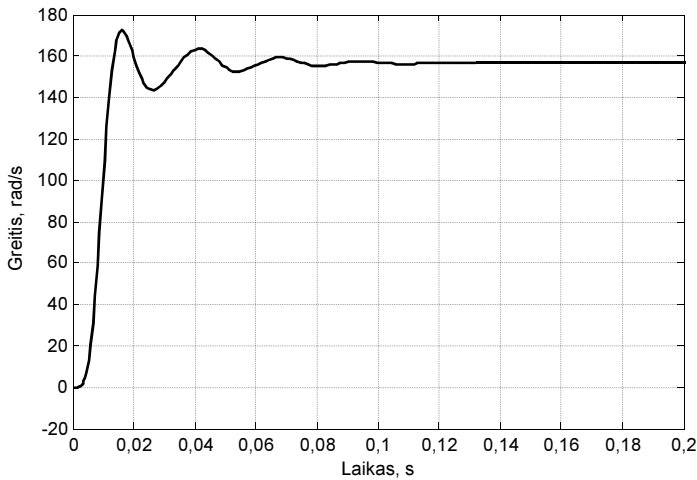


2.5 pav. Asinchroninio variklio modelis stacionarioje koordinatų sistemoje
Fig. 2.5. *Simulink*[®] model of induction drive in a stationary coordinate system

Modelis yra universalus, nes sudarytas *Matlab*[®] *Simulink*[®] programa. Jis gali būti lengvai keičiamas ar modifikuojamas ir pritaikomas sudėtingiems uždaviniams spręsti. Šis modelis puikiai tinka tampriosioms dvimasėms

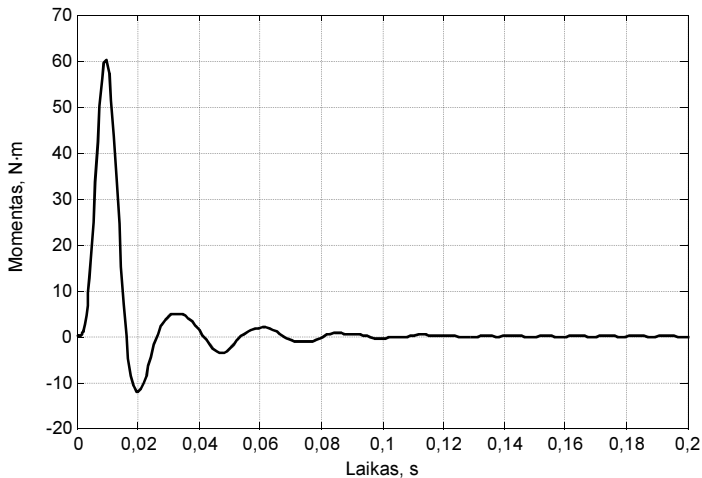
sistemoms su galimu laisvumu tirti, taip pat su vektoriniu valdymu, turinčiu PI reguliatorių.

Atlikus imitacinį bandymą, gaunamos greičio ir momento pereinamojo vyksmo kreivė, pavaizduotos 2.6 ir 2.7 paveiksluose.



2.6 pav. Variklio greičio pereinamasis vyksmas

Fig. 2.6. Response of speed of induction motor



2.7 pav. Variklio momento pereinamasis vyksmas

Fig. 2.7. Response of torque of induction motor

Iš grafikų matyti, kad greitis ir momentas įjungimo metu yra švytuojamojo pobūdžio, pereinamieji vyksmai nusistovi po apytiksliai 0,1 sekundės, greičio didžiausios vertės viršija nominaliąsias 11,5 %, momento didžiausios vertės viršija nominaliąsias 6,5 karto.

Kitas imitacinis modelis sudaromas sinchroniniu greičiu besisukančioje koordinačių sistemoje. Matematinis modelis buvo pateiktas 1.3 poskyryje. Imitacinis modelis sudaromas tam pačiam varikliui kaip anksčiau sudarytas modelis ir kurio pagrindiniai parametrai pateikti 2.1 lentelėje. Remiantis (1.97) išraiška, galima rašyti:

$$\begin{aligned}
 u_{qs} &= \frac{R_s \cdot L_r}{L_s \cdot L_r - M_{SR}^2} \cdot \Psi_{qs} - \frac{R_s \cdot M_{SR}}{L_s \cdot L_r - M_{SR}^2} \cdot \Psi_{qr} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt}, \\
 u_{ds} &= \frac{R_s \cdot L_r}{L_s \cdot L_r - M_{SR}^2} \cdot \Psi_{ds} - \frac{R_s \cdot M_{SR}}{L_s \cdot L_r - M_{SR}^2} \cdot \Psi_{dr} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt}, \\
 u_{qr} &= \frac{R_r \cdot L_s}{L_s \cdot L_r - M_{SR}^2} \cdot \Psi_{qr} - \frac{R_r \cdot M_{SR}}{L_s \cdot L_r - M_{SR}^2} \cdot \Psi_{qs} + \frac{d\Psi_{qr}}{dt} + \Psi_{dr} \cdot \omega, \\
 u_{dr} &= \frac{R_r \cdot L_s}{L_s \cdot L_r - M_{SR}^2} \cdot \Psi_{dr} - \frac{R_r \cdot M_{SR}}{L_s \cdot L_r - M_{SR}^2} \cdot \Psi_{ds} + \frac{d\Psi_{dr}}{dt} + \Psi_{qr} \cdot \omega, \\
 T_e &= \frac{p \cdot M_{SR}}{L_s \cdot L_r - M_{SR}^2} \cdot (\Psi_{ds} \cdot \Psi_{qr} - \Psi_{qs} \cdot \Psi_{dr}), \\
 \omega &= \frac{1}{J} \int T_e dt.
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

čia $L_s = L_m + L_{ls}$, $L_r = L_m + L_{lr}$, $M_{SR} = L_m$, asinchroniniam varikliui su trumpai jungtu rotoriumi $u_{qr} = u_{dr} = 0$.

Išraiškai (2.11) apskaičiuojami visi koeficientai esantys prie kintamųjų:

$$\frac{R_s \cdot L_r}{L_s \cdot L_r - M_{SR}^2} = \frac{2,56 \cdot (150 + 4,97) \cdot 10^{-3}}{((150 + 4,8) \cdot (150 + 4,97) - 150) \cdot 10^{-6}} = 266,4, \tag{2.12}$$

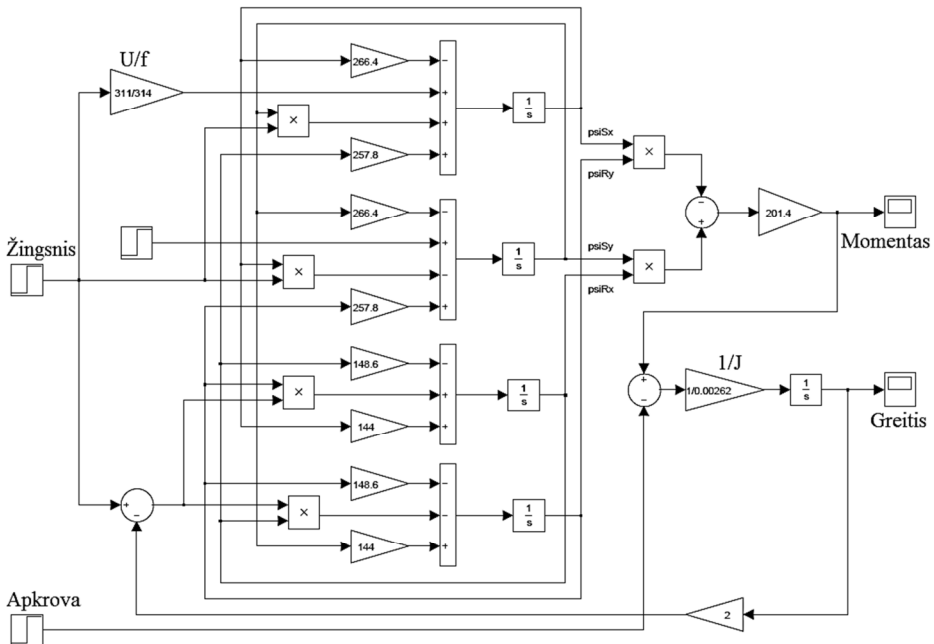
$$\frac{R_s \cdot M_{SR}}{L_s \cdot L_r - M_{SR}^2} = \frac{2,56 \cdot 150 \cdot 10^{-3}}{((150 + 4,8) \cdot (150 + 4,97) - 150) \cdot 10^{-6}} = 257,8, \tag{2.13}$$

$$\frac{R_r \cdot L_s}{L_s \cdot L_r - M_{SR}^2} = \frac{1,43 \cdot (150 + 4,8) \cdot 10^{-3}}{((150 + 4,8) \cdot (150 + 4,97) - 150) \cdot 10^{-6}} = 148,6, \tag{2.14}$$

$$\frac{R_r \cdot M_{SR}}{L_s \cdot L_r - M_{SR}^2} = \frac{1,43 \cdot 150 \cdot 10^{-3}}{((150 + 4,8) \cdot (150 + 4,97) - 150) \cdot 10^{-6}} = 144, \quad (2.15)$$

$$p \cdot \frac{M_{SR}}{L_s \cdot L_r - M_{SR}^2} = \frac{2 \cdot 150 \cdot 10^{-3}}{((150 + 4,8) \cdot (150 + 4,97) - 150) \cdot 10^{-6}} = 201,4, \quad (2.16)$$

Remiantis apskaičiuotais koeficientais ir (2.11) lygtimi, sudarytas asinchroninės pavaros imitacinis modelis *Matlab*[®] *Simulink*[®] aplinkoje, pateiktas 2.8 paveiksle.

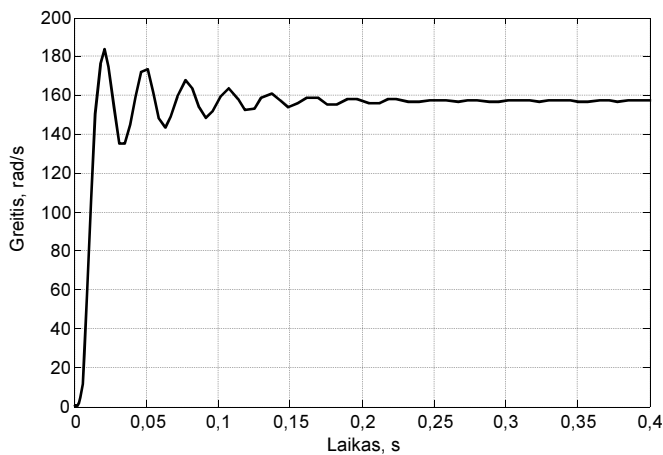


2.8 pav. Asinchroninio variklio modelis synchroniniu greičiu besisukančioje koordinatinių sistemoje

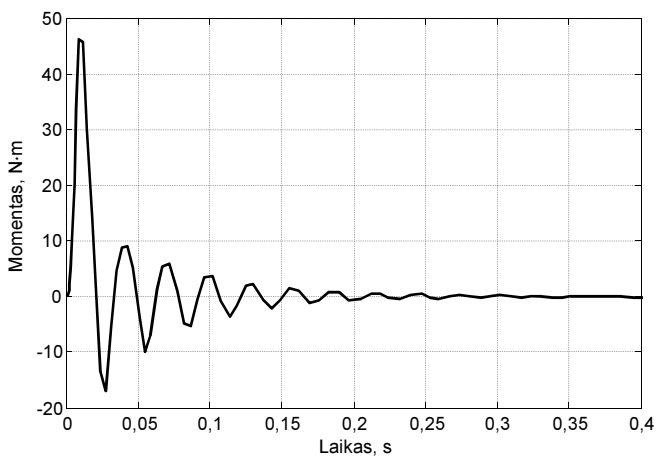
Fig. 2.8. *Simulink*[®] model of induction drive in the synchronous reference frame

Gautas modelis yra universalus, kadangi sudarytas *Matlab*[®] *Simulink*[®] programa. Jis gali būti lengvai keičiamas ar modifikuojamas ir pritaikomas sudėtingiems uždaviniams spręsti. Šis modelis patogus naudoti tirti pavaras su neraiškiosios logikos reguliatoriais, kadangi įėjimo signalas yra elektrinio lauko sukimosi dažnis.

Atlikus bandymą, gaunamos greičio ir momento pereinamojo vyksmo kreivės, pavaizduotos 2.9 ir 2.10 paveiksluose.



2.9 pav. Neapkrauto variklio greičio pereinamasis vyksmas
Fig. 2.9. Step response of speed of induction motor at no-load



2.10 pav. Neapkrauto variklio momento pereinamasis vyksmas
Fig. 2.10. Step response of torque of induction motor at no-load

Iš kreivių matyti, kad pereinamojo vyksmo metu kreivės yra švytuojamojo pobūdžio, greičio didžiausios vertės viršija nominaliąsias 18 %, momento didžiausios vertės viršija nominaliąsias 8,5 karto.

2.3. Asinchroninio variklio su vektoriniu valdymu imitacinis modelis

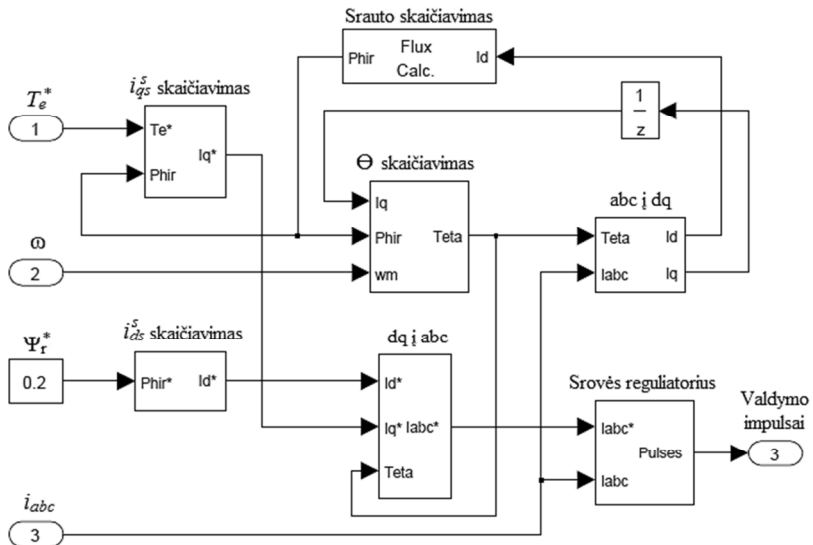
Remiantis vektorinio valdymo principu, pateiktu 1.4 poskyryje, sudaromas vektorinio valdymo imitacinis modelis. Modelis susideda iš atskirų blokų, atliekančių tam tikras funkcijas. Pasirinktas netiesioginio valdymo metodas, kuriame rotoriaus srauto erdvinio vektoriaus padėties kampas θ_e gaunamas netiesiogiai, t. y. apskaičiuojant jį iš rotoriaus greičio ir rotoriaus slydimo kampinio greičio. Siekiant supaprastinti sistemą, sudarytas vektorinio valdymo modelis tik su greičio reguliavimo kontūru, o statoriaus srautas palaikomas pastovus, taip pat i_{ds}^* laikoma pastovia.

Pagal formules (1.102) ir (1.104) sudaromos posistemės statoriaus srovės dedamosioms skaičiuoti, kur rotoriaus srautas apskaičiuojamas posisteme, sudaryta pagal (1.103) formulę. Rotoriaus srauto padėties kampo θ_e skaičiavimo blokas sudarytas pagal (1.105) formulę. 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. Sudaromos srovių konvertavimo posistemės pagal (1.100) ir (1.101) išraiškas.

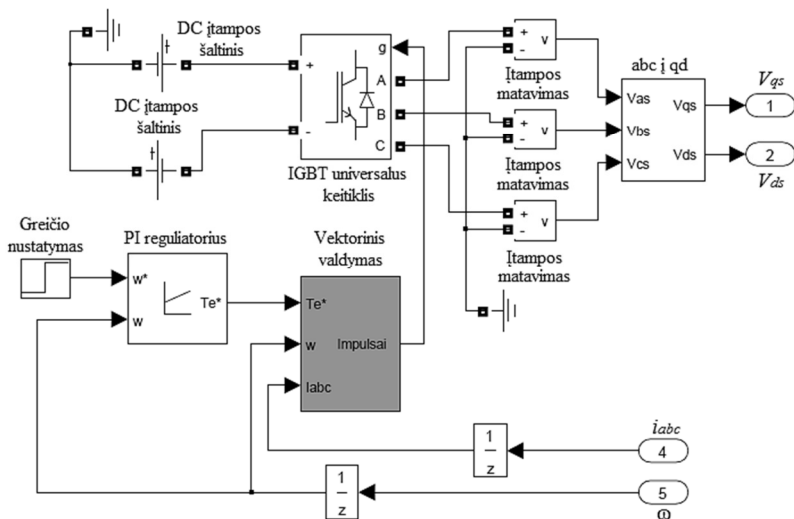
Naudojant srovės regulatoriaus bloką, palyginus srovių dedamąsias, formuojami reguliavimo impulsai. Skaičiavimams panaudojus reikiamus variklio parametrus, sudaromas vektorinio valdymo sistemos modelis, pateiktas 2.11 paveiksle.

Sudarius vektorinio valdymo modelį, sudaromas asinchroninio variklio reguliavimo blokas, palaikantis pastovų nuostato greitį. Sistemoje naudojamas PI regulatorius siekiant tiksliai palaikyti nustatytą greitį nusistovėjusio režimo metu ir užtikrinti gerą dinaminį greičio tikslumą.

Vektorinio valdymo greičio palaikymo modelis sudarytas iš PI regulatoriaus, įtampos šaltinio, IGBT (angl. *Insulated Gate Bipolar Transistor*) keitiklio ir įtampos matavimo blokų. Variklis maitinamas iš įtampos keitiklio. Variklio greitis palyginamas su greičio nuostatu ω^* ir greičio paklaida, apdorota greičio reguliatoriuje, sukuria reikiamą T_e^* signalą vektorinio valdymo blokui. Bendras vektorinio valdymo modelis su greičio palaikymu pavaizduotas 2.12 paveiksle.



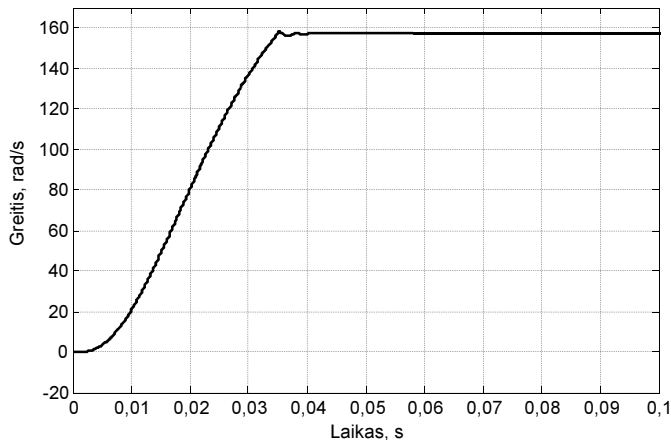
2.11 pav. Sistemos vektorinio valdymo dalies struktūrinė schema
Fig. 2.11. Block diagram of vector control part



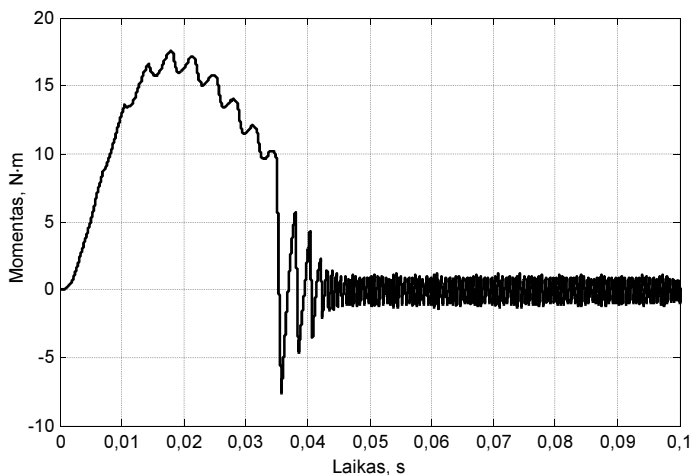
2.12 pav. Greičio reguliavimo modelis su vektorinio valdymo bloku
Fig. 2.12. Model of speed control system with vector control

Šis reguliatorius prijungiamas prie variklio modelio, sudaryto stacionarioje koordinatinių sistemoje. Variklio modelis pateiktas 2.5 paveiksle. Greičio

nustatymo bloke nustatomas sinchroninis variklio greitis, parenkami PI reguliatoriaus parametrai. Gauti imitacinio bandymo greičio ir momento pereinamieji vyksmai pateikti 2.13 ir 2.14 paveiksluose.



2.13 pav. Variklio su vektoriniu valdymu greičio pereinamasis vyksmas
Fig. 2.13. Step response of speed of induction motor with vector control



2.14 pav. Variklio su vektoriniu valdymu momento pereinamasis vyksmas
Fig. 2.14. Step response of torque of induction motor with vector control

Remiantis grafikais galima teigti, kad į variklio modelį įtraukus vektorinio valdymo bloką, pereinamųjų vyksmų dinaminės charakteristikos pagerėjo. Be to,

pereinamojo vyksmo laikas sutrumpėjo iki 0,04 s, taip pat nėra greičio švytavimų. Iš momento pereinamojo vyksmo matyti, kad didžiausias momentas sumažėjo 70 %, tai turi teigiamą įtaką pavaros veikimui.

Iš pereinamųjų vyksmų matyti, kad vektorinio reguliatoriaus imitacinis modelis sukonstruotas teisingai, parinkti geri parametrai ir modelis tinka tolimesniems dvimasių elektromechaninių sistemų tyrimams.

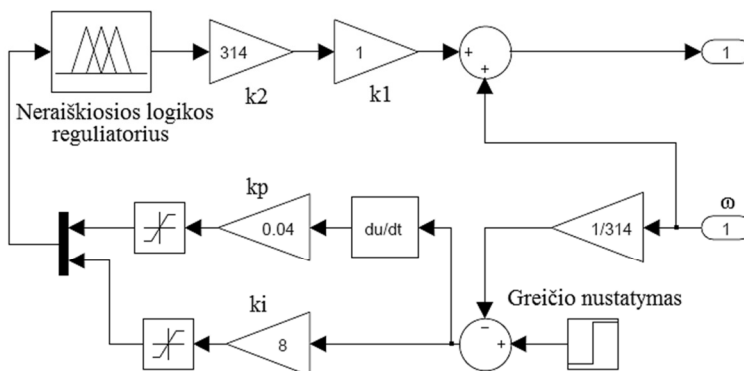
2.4. Asinchroninio variklio su neraiškiosios logikos reguliatoriumi imitacinis modelis

1.4 poskyryje išnagrinėti neraiškiosios logikos valdymo principai. Imitacinio modelio sudarymui pasirenkamas *Sugeno* tipo reguliatorius, kuris turi du įėjimus ir vieną išėjimą, aprašomus formulėmis:

$$\begin{aligned} e(t) &= a - y(t), \\ de &= \dot{a} - \dot{y}(t), \end{aligned} \quad (2.17)$$

čia $e(t)$ – greičio paklaidos signalas; a – nuostato signalas; $y(t)$ – išėjimo signalas; de – paklaidos pokyčio signalas.

Pagal 1.13 paveiksle pateiktą struktūrinę schemą, naudojantis *Matlab*[®] *Simulink*[®] programiniu paketu, sudaromas *Sugeno* tipo neraiškiojo greičio reguliatoriaus imitacinis modelis. Modelis pateiktas 2.15 paveiksle.



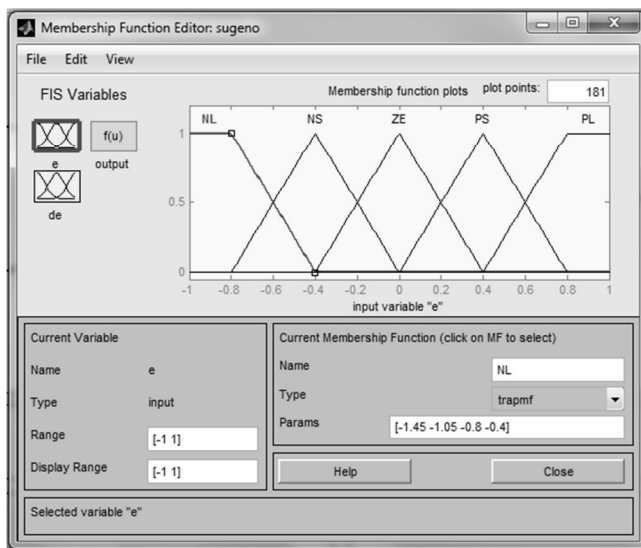
2.15 pav. Variklio greičio valdymo modelis su neraiškiosios logikos reguliatoriumi
Fig. 2.15. Model of motor speed control system with fuzzy logic controller

Simulink[®] aplinkoje sudaromos įėjimų e ir de kintamųjų funkcijų priklausomybės, jos yra identiškos. 2.16 paveiksle pavaizduota e kintamųjų priklausomybės.

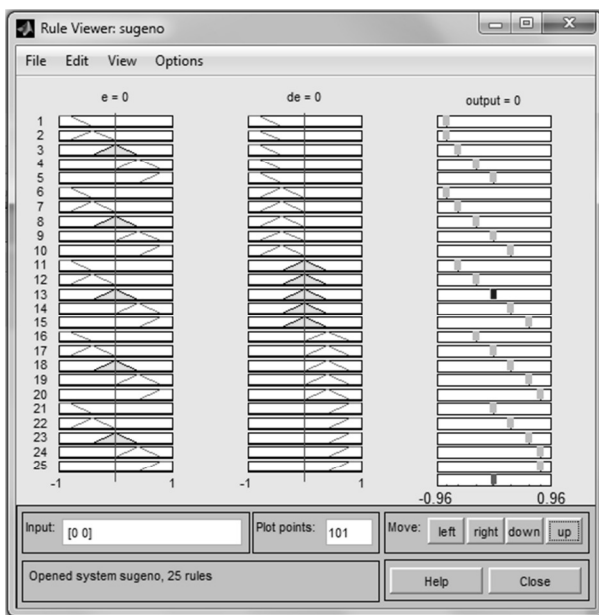
Šioje aplinkoje taip pat sudaromos dvidešimt penkios lingvistinės taisyklės pagal 1.1 lentelę. Kiekviena taisyklė, priklausomai nuo priklausomybės funkcijos, pereina laipsniškai prie kitos taisyklės, dėl to vienu metu gali veikti kelios taisyklės. Taisyklių priklausomybės pavaizduotos 2.17 paveiksle. Paveiksle matyti du kintamųjų įėjimai ir nuo jų priklausantis išėjimas. Šiame taisyklių lange galima išbandyti taisyklių veikimą, įvedant pageidaujamus kintamuosius ar nurodant veikimo tašką iš karto matomas išėjimas.

Sudaryto neraiškosios logikos regulatoriaus išėjimo kintamojo priklausomybės funkcijos yra neraiškosios aibės. Neraiškosios logikos reguliavimo paviršius, siejantis greičio valdymo poveikį, paklaidą ir paklaidos išvestinę, pavaizduotas 2.18 paveiksle.

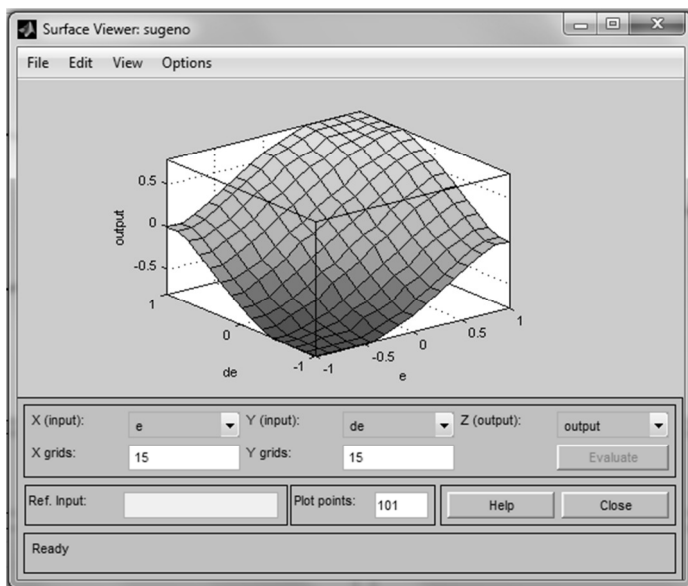
Sudarytas neraiškosios logikos reguliatorius prijungiamas prie variklio modelio, sudaryto sinchroniniu greičiu besisukančioje koordinačių sistemoje. Variklio modelis pateiktas 2.8 paveiksle. Greičio nustatymo bloke nustatomas variklio palaikymo sinchroninis greitis. Gauti imitaciniai greičio ir momento pereinamieji vyksmai pavaizduoti 2.19 ir 2.20 paveiksluose.



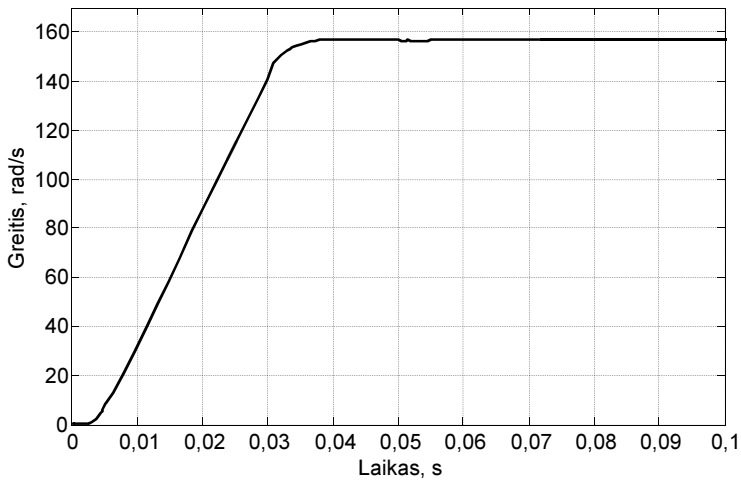
2.16 pav. Įėjimo e kintamųjų funkcijų priklausomybės
Fig. 2.16. Dependence of functions of input e variables



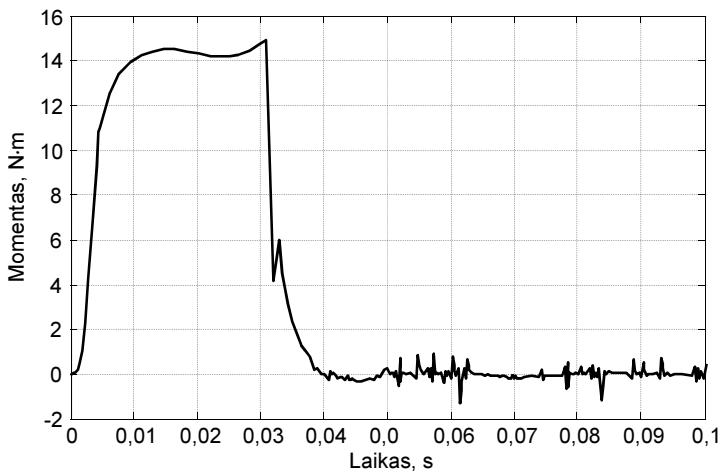
2.17 pav. Lingvistinių taisyklių priklausomybės
Fig. 2.17. Dependence of linguistic rules



2.18 pav. Neraiškiosios logikos reguliavimo paviršius
Fig. 2.18. Control surface of Fuzzy logic



2.19 pav. Variklio su neraiškiosios logikos valdymu greičio pereinamasis vyksmas
Fig. 2.19. Step response of speed of induction motor with *Fuzzy* logic control



2.20 pav. Variklio su neraiškiuoju valdymu momento pereinamasis vyksmas
Fig. 2.20. Step response of torque of induction motor with *Fuzzy* logic control

Iš grafikų matyti, kad į variklio valdymo modelį įtraukus neraiškiosios logikos valdymo bloką, pereinamųjų vyksmų dinaminės charakteristikos pagerėjo. Be to, sutrumpėjo pereinamojo vyksmo laikas, taip pat nėra greičio švytavimų. Iš momento pereinamojo vyksmo matyti, kad pasiekiamas 19,5 %

mažesnis didžiausias momentas, tai sumažina momento smūgius ir paleidimo sroves.

Iš pereinamųjų vyksmų matyti, kad neraiškiosios logikos regulatoriaus imitacinis modelis sukonstruotas teisingai, tinkamai sudarytos lingvistinės taisyklės, priklausomybių funkcijos, parinkti geri parametrai – modelis tinkamas tolimesniems dvimasių elektromechaninių sistemų tyrimams.

2.5. Antrojo skyriaus išvados

1. Sudarytas dvimasis elektromechaninės sistemos modelis su supaprastinta variklio teorine momento kitimo laike išraiška. Imitaciniai rezultatai parodė dėl antrosios masės daromos įtakos atsirandančius švytavimus. Įsitikinta būtinybe įvertinti sistemos parametrus ir poreikiu atlikti tolimesnius tyrimus.
2. Sudarius variklių modelius stacionarioje ir besisukančioje koordinačių sistemose gauti greičio ir momento pereinamieji vyksmai. Iš jų matyti, kad pereinamojo vyksmo metu kreivės yra švytuojamojo pobūdžio, greičio didžiausios vertės viršija nominaliąsias 11,5–18 %, momento didžiausios vertės viršija nominaliąsias 6,5–8,5 karto, tai gali turėti neigiamą įtaką projektuojamoms sistemoms.
3. Sudarius vektorinio ir neraiškiosios logikos reguliatorių modelius ir sujungus juos su variklių modeliais gauti greičio ir momento pereinamieji vyksmai. Abiem atvejais dinaminės charakteristikos yra labai panašios, nors panaudoti skirtingi variklių modeliai.
4. Valdomų sistemų pereinamojo vyksmo trukmė sutrumpėjo lyginant su nevaldomomis sistemomis ir yra apytiksliai 0,04 s.
5. Panaudojus vektorinį valdymą, pereinamieji vyksmai gaunami be švytavimų, didžiausia momento vertė 70 % sumažėjo lyginant su nevaldomo variklio pereinamuoju vyksmu.
6. Panaudojus neraiškiosios logikos reguliatorių, pereinamieji vyksmai gaunami be švytavimų, 19,5 % sumažėjo didžiausia momento vertė lyginant su pereinamuoju vyksmu esant vektoriniam valdymui.
7. Išbandžius variklių greičio valdymo imitacinius modelius, daroma išvada, kad modeliai palaiko nustatytą greitį, sutrumpina pereinamojo vyksmo trukmę ir juos galima naudoti toliau tirti imitacinius dvimasių elektromechaninių sistemų modelius.

Imitaciniai modeliai ir dinaminiai pereinamieji vyksmai

Šiame skyriuje sudaromi dvimasės elektromechaninės sistemos modeliai, tiriama masių jungčių tamprumo ir laisvumo daroma įtaka pavaros greičio ir momento pereinamiesiems vyksmas. Tyrime pritaikomas vektorinis ir neraiškiosios logikos valdymo metodas, sudaromi valdomų sistemų modeliai. Bandymams naudojami skirtingi asinchroninių variklių modeliai. Bandymai atliekami esant skirtingoms apkrovoms, keičiant greičio nuostatas. Taip pat tekste analizuojami valdomų sistemų pranašumai, lyginami valdomų ir nevaldomų sistemų gauti rezultatai. Šio tyrimo tikslas – dvimasėms elektromechaninėms sistemoms pritaikyti skirtingus reguliatorius, taip siekiant pagerinti pereinamųjų vyksmų kokybės rodiklius, stabilizuoti pavarų veikimą įjungimo metu ir kintant veikimo sąlygoms. Skyriaus tematika paskelbti 8 autoriaus straipsniai (Juraitis *et al* 2009; Juraitis 2010; Juraitis *et al* 2010; Juraitis *et al* 2011; Kriaučiūnas *et al* 2011; Kriaučiūnas, Juraitis 2011).

3.1. Tampriosios dvimasės sistemos su galimu laisvumu modelio sudarymas ir pereinamųjų vyksmų imitacija

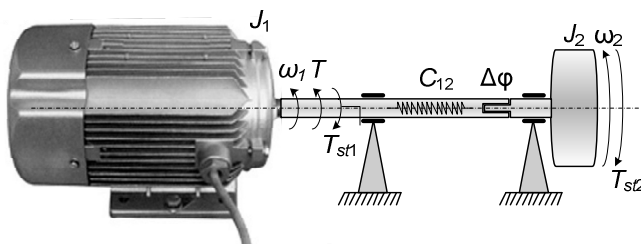
Tamprioji dvimasė elektromechaninė sistema su laisvumu aprašyta 1.2 poskyryje. Pateikiamos pagrindinės dvimasės sistemos judesio lygtys:

$$\begin{cases} T - T_{st1} - T_{12} = J_1 s \omega_1, \\ -T_{st2} + T_{12} = J_2 s \omega_2, \\ s T_{12} = C_{12} (\omega_1 - \omega_2). \end{cases} \quad (3.1)$$

Perdavimo elemente gali atsirasti laisvumas. Dėl oro tarpo laisvume priklausomybė $T_{12} = f(\Delta\varphi)$ yra netiesinė. Sistemos judesio lygtis, atsižvelgus į kinematinį laisvumą:

$$\begin{cases} T - T_{12} - T_{st1} = J_1 s \omega_1, \\ T_{12} - T_{st2} = J_2 s \omega_2, \\ T_{12} = C_{12} \left(\varphi_1 - \varphi_2 - \frac{\Delta\varphi}{2} \right), \quad \text{kai } |\varphi_1 - \varphi_2| > \frac{\Delta\varphi}{2}, \\ T_{12} = 0 \quad \text{kai } |\varphi_1 - \varphi_2| \leq \frac{\Delta\varphi}{2}. \end{cases} \quad (3.2)$$

Iš lygčių sistemos matyti, kad, kol yra laisvumas, abi sistemos masės juda nepriklausomai viena nuo kitos.



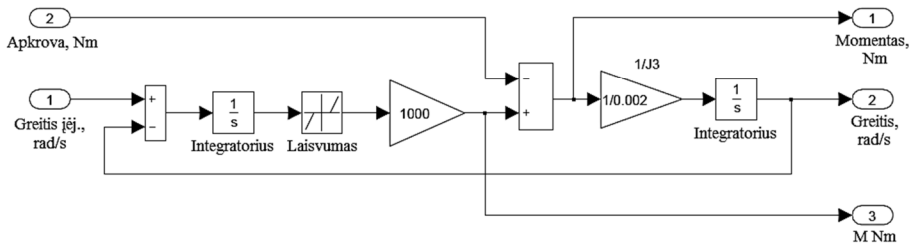
3.1 pav. Dvimasės sistemos mechaninės dalies su laisvumu schema

Fig. 3.1. View of two-mass system with clearance

Dvimasės sistemos mechaninės dalies su kinematinio laisvumu schema parodyta 3.1 paveiksle. Elektromechaninis energijos keitiklis nagrinėjamu atveju yra asinchroninis variklis, aprašomas netiesinėmis diferencialinėmis

lygtimis. Šios lygtys sudaro variklio matematinį modelį ir yra plačiau aprašytos 1.3 poskyryje.

Remiantis pateiktomis matematinėmis lygtimis ir 1.2 poskyryje išnagrinėtais šaltiniais, sudaromas antrosios masės *Matlab*[®] *Simulink*[®] modelis. Antrosios masės modelis pavaizduotas 3.2 paveiksle.



3.2 pav. Antrosios masės modelis
Fig. 3.2. Model of the second mass

Atroji masė pasirenkama laisvai. Nagrinėjamu atveju tai cilindro formos kūnas, kuris galėtų būti kitos elektros mašinos rotorius, prie veleno pritvirtintas išilgai masės centro (3.1 pav.). Jo inercijos momentas apskaičiuojamas:

$$J_2 = \frac{m_2 \cdot R_2^2}{2} = \frac{2 \cdot 0,05^2}{2} = 0,0025 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, \quad (3.3)$$

čia m_2 – cilindro masė; R_2 – cilindro spindulys.

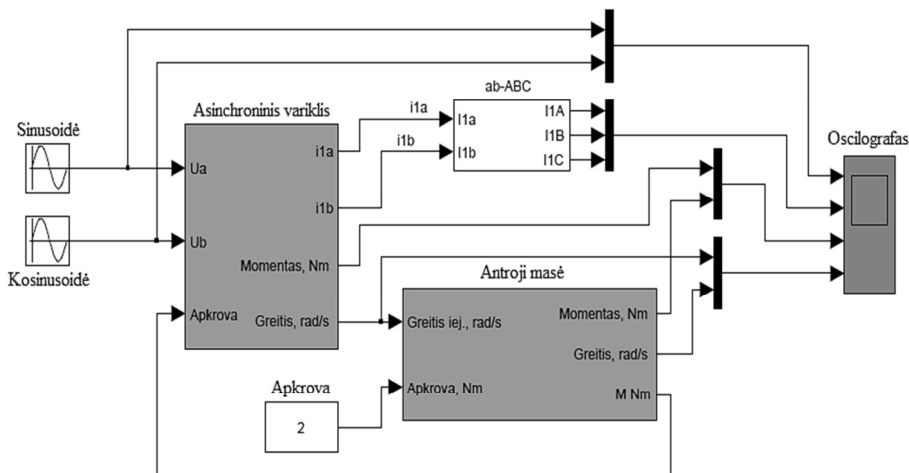
Pasirenkamas veleno standumas, apibūdinamas koeficientu C_{12} ir priklausantis nuo veleno charakteristikos. Nagrinėjamas atvejis, kai $C_{12}=500 \text{ N} \cdot \text{m/rad}$.

Remiantis 2.1 poskyryje pateiktu asinchroninio variklio modeliu su satoriumi tvirtai susietoje koordinačių sistemoje, kurio parametrai pateikti 2.1 lentelėje, ir 3.2 paveiksle pateiktu antrosios masės modeliu, sudaromas bendras sistemos modelis, pavaizduotas 3.3 paveiksle.

Nagrinėjamos sistemos pereinamieji vyksmai imituojami naudojant *Matlab*[®] *Simulink*[®] programų paketą.

Pirmųjų tyrimų gauti rezultatai lyginami su vienmasės sistemos rezultatais, t.y. variklio be apkrovos, tai padeda geriau suprasti nagrinėjamų parametų daromą įtaką, kurią sudaro antroji masė ir jos apkrova. Laisvumas apibūdinamas laiko tarpu, po kurio pirmoji masė, nagrinėjamu atveju variklis, pradeda veikti antrąją masę. Modelyje laisvumas nustatomas netiesiniame elemente nustatant

„nejautrumo zoną“ (angl. *death zone*), kuriai esant išėjimas yra nulinis. Nagrinėjamu atveju laisvumas yra nuo -0,2 iki 0,2.



3.3 pav. Bendros dvimasės elektromechaninės sistemos modelis

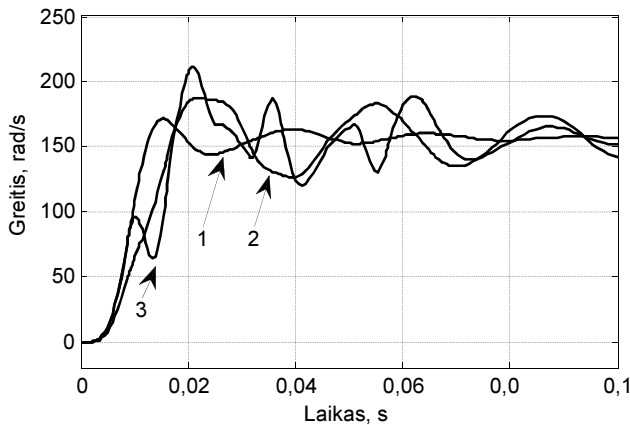
Fig. 3.3. Overall model of the two-mass electromechanical

3.4 paveiksle lyginami variklio greičių pereinamieji vyksmai sistemoje esant tik tamprumui, tamprumui ir laisvumui su neapkrauto variklio greičio pereinamuoju vyksmu.

Iš kreivių matyti, kad variklio greitis, esant tik tamprumui (3.4 pav. 2), paleidimo metu atsilieka nuo neapkrauto variklio greičio. Tai lemia antrosios masės sukuriamas pasipriešinimo momentas. Velenas išjudina antrąją masę, tačiau, šiuo atveju, variklio didžiausias greitis pasiekiamas didesnis nei neapkrauto variklio. Tai atsitinka todėl, kad antrosios masės inercijos momentas įsuka variklį. Taip pat kreivėje matomi kur kas didesni švytavimai. Tai atsitinka dėl veleno tamprumo. Jis, sukantis varikliui ir jam veikiant antrąją masę, deformuojasi susisukdamas, taip savyje sukaupdamas energiją ir vėlindamas antros masės įtaką sukelia švytavimus.

Nagrinėjant 3.4 paveiksle 3 kreivę, kai sistemai daroma tamprumo ir laisvumo įtaka, matyti, kad pradžioje variklio greitis išlieka toks pat kaip neapkrauto variklio. Antroji masė variklį pradeda veikti tik po laisvumo, kuris išreiškiamas laiko tarpu. Praėjus laisvumo laikui, deformuojama masių jungtis. Tačiau tamprumo jėga išjudina antrąją masę, taip sukeldama variklio greičio spartų kritimą. Toliau variklis sparčiai išsuka antrąją masę, nes šiuo atveju antroji masė pradeda veikti ne nuo nulinio variklio greičio, o jau nuo besisukančio variklio greičio. Dėl to, veleno tamprumo sukaupta jėga ir inercijos

momentas dar labiau įsuka variklio veleną, lyginant su neapkrautu varikliu. Šiuo pereinamuoju vyksmu greitis nusistovi dar ilgiau, nes čia veikia ne tik pasikartojanti veleno tamprumo įtaka, tačiau ir pasikartojanti laisvumo įtaka. Iš tyrimo matyti, kad, įsijungus antrajai masei, variklio greitis staiga sumažėja, taip gaudamas didelį smūgį, kuris gali pakenkti mechaninėms grandims. Tokia situacija elektromechaninėse sistemose yra nepageidautina.

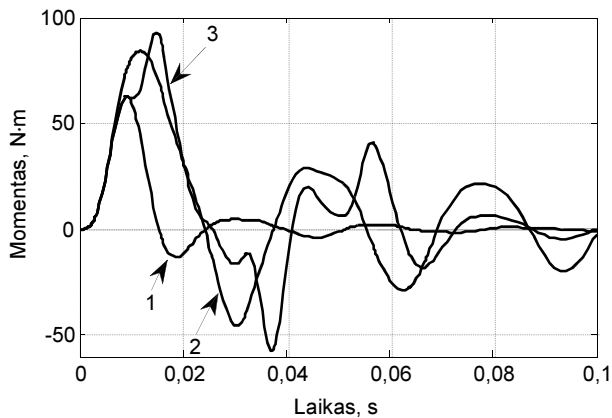


3.4 pav. Variklio greičių pereinamieji vyksmai esant skirtingoms apkrovoms: 1 – be apkrovos; 2 – apkrauto antrąja mase su jungtyje esančiu tamprumu; 3 – apkrauto antrąja mase su jungtyje esančiu tamprumu ir laisvumu

Fig. 3.4. Speed responses of induction motor at different load: 1 – without load; 2 – with second mass and elasticity of coupling; 3 – with second mass and elasticity and clearance of coupling

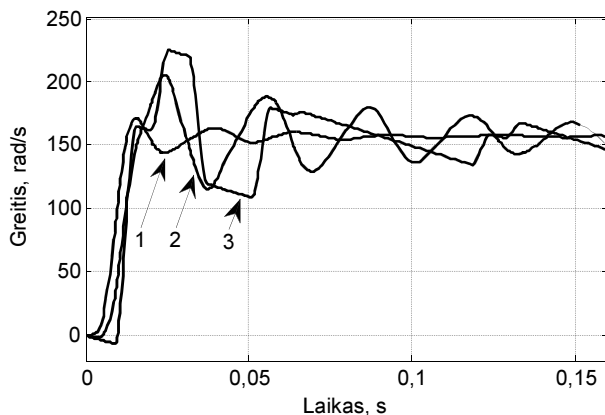
3.5 paveiksle pavaizduoti variklio momento pereinamieji vyksmai esant skirtingoms apkrovoms, palyginamos sistemų su tamprumu, tamprumu ir laisvumu pereinamųjų vyksmų kreivės su neapkrauto variklio pereinamojo vyksmo kreive. Lyginant 3.5 ir 3.4 paveikslus, matyti, kad variklio momento pokytis (didėjimas arba mažėjimas) sukelia to paties pobūdžio greičio pokytį. Pereinamųjų vyksmų, kai yra laisvumas ir tamprumas, didžiausias momentas pasiekiamas didesnis nei neapkrauto variklio: 9 % esant tik tamprumui ir 26,5 % esant tamprumui ir laisvumui. To priežastis yra veleno standumas, laisvumas ir variklio inercija.

3.6 paveiksle lyginami dvimasės sistemos išėjimo greičio pereinamieji vyksmai su neapkrauto variklio greičio pereinamuoju vyksmu. Šis palyginimas padeda geriau įsivaizduoti, kokią įtaką sistemoje turi papildomos grandys, jų inercijos momentai, esantys tamprumai ir laisvumai. Iš kreivių matyti, kad abiem atvejais (velenas su tamprumu ir velenas su tamprumu ir laisvumu) variklio greitis atsilieka nuo neapkrauto variklio greičio.



3.5 pav. Variklio momentų pereinamieji vyksmai esant skirtingoms apkrovoms: 1 – be apkrovos; 2 – apkrauto antrąja mase su jungtyje esančiu tamprumu; 3 – apkrauto antrąja mase su jungtyje esančiu tamprumu ir laisvumu

Fig. 3.5. Torque responses of induction motor at different load: 1 – without load; 2 – with second mass and elasticity of coupling; 3 – with second mass and elasticity and clearance of coupling



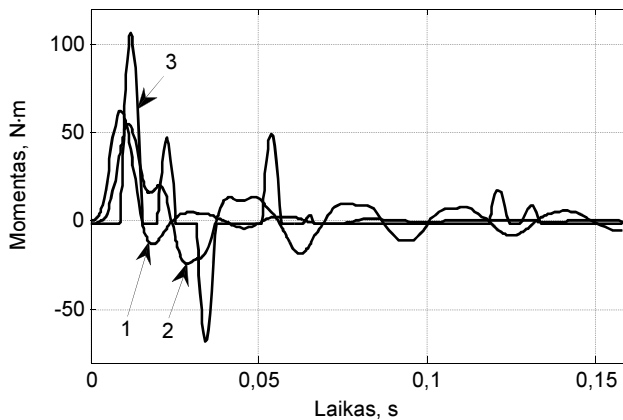
3.6 pav. Dvimasės sistemos greičio pereinamųjų vyksmų palyginimas: 1 – variklio kampinis greitis (vienmasė sistema); 2 – sistemos su baigtiniu veleno standumu išėjimo kampinis greitis; 3 – sistemos su baigtiniu veleno standumu ir laisvumu kampinis greitis

Fig. 3.6. Comparison of speed responses of two-mass system: 1 – speed of induction motor (single mass system); 2 – speed of the system output with finite shaft elasticity; 3 – speed of the system output with finite shaft elasticity and clearance

Dėl tamprumo, laisvumo ir inercijos momento įtakos greitis pasiekia 32,5 % didesnę didžiausią vertę nei neapkrauto variklio. Todėl, projektuojant sistemas, būtina mažinti greičio perreguliavimą. Kreivėje, kai velenas turi tamprumą ir laisvumą (3.6 pav. 3), matomi staigūs greičio pokyčiai, tai atsitinka dėl pasikartojančios laisvumo įtakos. Laisvumas yra netiesinis elementas, turintis nejautrumo zoną. Joje antroji masė neveikiama pirmosios ir juda dėl inercijos momento, tačiau, pasibaigus laisvumui, greičių skirtumas gali būti didelis, tai ir lemia staigų kitimą. Laisvumas ir tamprumas daro didelę įtaką pereinamojo vyksmo trukmei, ją pailgina tris kartus.

3.7 paveiksle palyginti dvimasis sistemos momentų pereinamieji vyksmai. Sistemoje su tamprumu ir laisvumu stebimi momentų šuoliai pereinamojo vyksmo metu. Jie staigūs ir ženkliai didesni už neapkrauto variklio didžiausią sukuriamą momentą. Tai daro neigiamą įtaką visai sistemai. Momentas sistemoje tik su tamprumu yra labiau švytuojamojo pobūdžio, jis nėra toks pavojingas kaip laisvumo daroma įtaka, tačiau taip pat yra nepageidautinas.

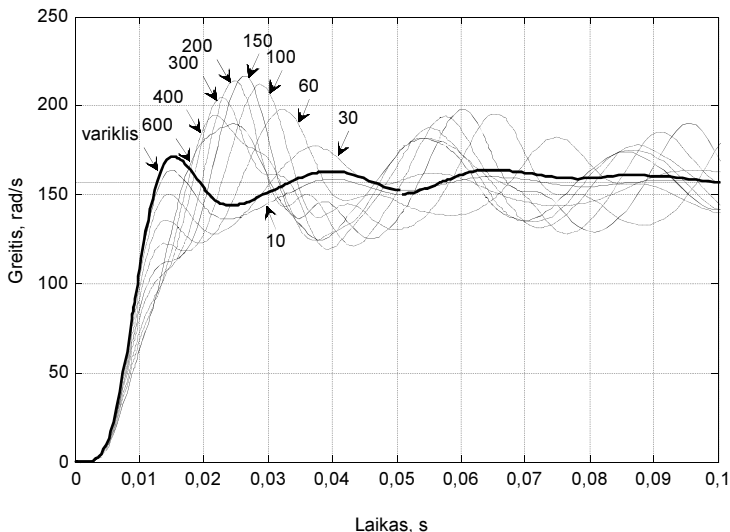
Norint detaliau išnagrinėti tamprumo ir laisvumo daromą įtaką dvimasei sistemai, buvo atlikti bandymai esant skirtingoms tamprumo vėrtėms. Tyrimo eigoje gauti rezultatai lyginami su vienasės sistemos rezultatais, t. y. variklio be apkrovos.



3.7 pav. Dvimasės sistemos momentų pereinamųjų vyksmų palyginimas: 1 – variklio momentas (vienmasė sistema); 2 – sistemos su baigtiniu veleno standumu momentas; 3 – sistemos su baigtiniu veleno standumu ir laisvumu momentas

Fig. 3.7. Comparison of torque responses of two-mass system: 1 – torque of induction motor (single mass system); 2 – torque of the system with finite shaft elasticity; 3 – torque of the system output with finite shaft elasticity and clearance

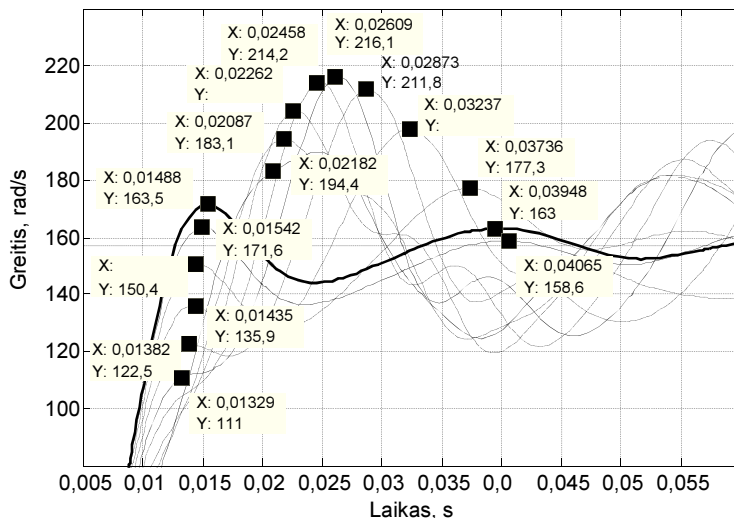
3.8 paveiksle lyginami variklio greičių pereinamieji vyksmai esant skirtingoms tamprumo vėrtėms. Tamprumas pasirenkamas laisvai, siekiant nustatyti įvairius galimus variantus.



3.8 pav. Variklio greičių pereinamieji vyksmai esant skirtingoms tamprumo vėrtėms
Fig. 3.8. Speed responses of induction motor with diferent connection elasticity

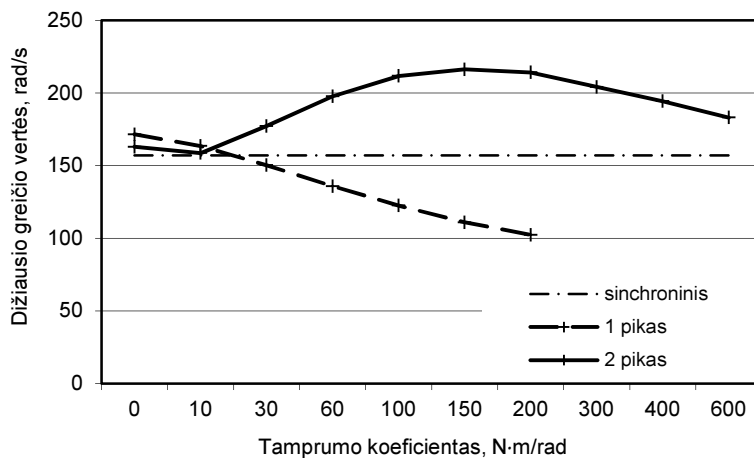
Iš kreivių matyti, kad variklio greitis, esant skirtingoms tamprumo vėrtėms, kinta skirtingai. Greitis paleidimo metu atsilieka nuo neapkrauto variklio. Tai lemia antrosios masės sukiamas pasipriešinimo momentas. Velenas išjudina antrąją masę, tačiau, šiuo atveju, variklio didžiausias greitis pasiekiamas didesnis nei neapkrauto variklio. Tai atsitinka todėl, kad antrosios masės inercijos momentas įsuka variklį. Taip pat pereinamojo vyksmo kreivėje matomi kur kas didesni švytavimai. Tai atsitinka dėl veleno tamprumo. Jis, sukantis varikliui ir veikiant jam antrąją masę, deformuojasi susisukdamas, taip savyje sukaupdamas energiją ir pavėlindamas antros masės daromą įtaką – tai vėliau lemia švytavimus. Variklio didžiausio greičio vėrtės, esant skirtingoms tamprumo vėrtėms, pateiktos 3.9 paveiksle. Jame pateiktos pirmojo ir antrojo periodo didžiausios vėrtės, jos palyginamos su sinchroniniu variklio greičiu.

Pirmojo ir antrojo greičio periodo didžiausių vėrcių priklausomybė, esant skirtingoms tamprumo vėrtėms, pavaizduota 3.10 paveiksle. Taškas, kai tamprumas lygus nuliui, atitinka neapkrautą variklį (vienmasę sistemą).



3.9 pav. Variklio didžiausios greičio vertės taškai pereinuosiuose vyksmuose esant skirtingoms tamprumo vėrtėms

Fig. 3.9. Points of maximum speed value of motor at step response with different elasticity values

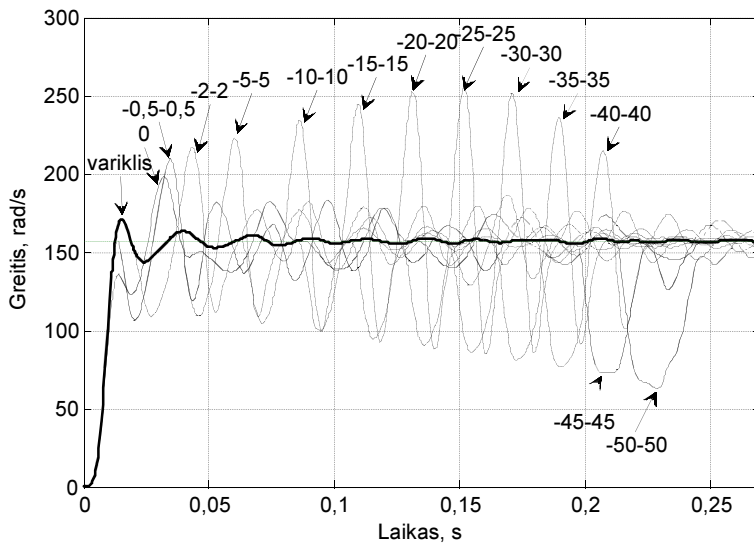


3.10 pav. Variklio didžiausių greičio vėrtės priklausomybė nuo skirtingų tamprumo vėrcių

Fig. 3.10. Dependence of maximum speed value of motor at different elasticity value

3.9 ir 3.10 paveiksluose matoma, kad didėjant tamprumo vertei, pirmojo periodo didžiausios greičio vertės mažėja kol visai susilygina su variklio sinchroniniu greičiu. Antrasis periodas pradžioje mažėja, po to didėja, pasiekdamas didžiausią galimą vertę, 37 % viršijančią nominalųjį variklio greitį, po to pradeda vėl mažėti. Iš kreivių matyti, kad esant tamprumui $C_{12}=150 \text{ N}\cdot\text{m/rad}$, pasiekiamas didžiausias variklio greitis. Šis režimas yra mažiausiai pageidautinas, kadangi dideli greičių svyravimai sistemoje yra nepageidautini. Kitu atveju, kai tamprumas yra nedidelis, didžiausias greitis yra mažesnis nei visiškai standžioje sistemoje. Šis režimas gali būti pageidautinas ir sukuriamas norint specialiai sumažinti variklio paleidimo metu sukuriamą didelį variklio greičio smūgį. Iš kreivių matyti, kad didėjant tamprumui, variklio didžiausias greitis pasiekiamas greičiau, švytavimų periodas dažnėja ir ilgėja pereinamojo vyksmo trukmė.

3.11 paveiksle parodyti greičio pereinamieji vyksmai esant tamprumo vertei $C_{12}=60 \text{ N}\cdot\text{m/rad}$ ir skirtingoms laisvumo vėrtėms. Norint geriau ištirti laisvumo daromą įtaką variklio greičio pereinamajam vyksmui, laisvumo vėrtės pasirenkamos laisvai.



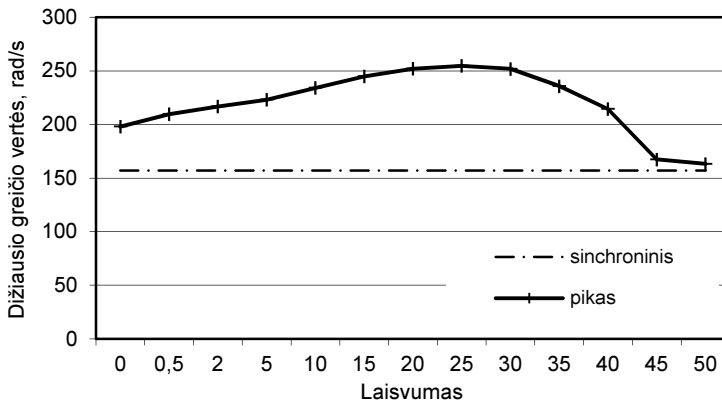
3.11 pav. Variklio didžiausios greičio vėrtės pereinamuosiuose vyksmuose esant skirtingoms laisvumo vėrtėms

Fig. 3.11. Speed of maximum value of motor at responce with diferent clearence value

Pirmoji kreivė su užrašu „variklis“ yra vienmasės sistemos pereinamasis vyksmas, antroji, su užrašu $dz=0$ – dvimasis sistema su nagrinėjamu tamprumu

be laisvumo. Kitos kreivės su didinamu laisvumu, kurio vertė užrašyta prie atitinkamos kreivės. Užrašas *dz* reiškia „nejautrumo zona“ (angl. *death zone*).

Taip kaip anksčiau pateiktame 3.9 paveiksle išrenkami didžiausi greičių taškai ir sudaroma priklausomybė esant skirtingoms laisvumo vertėms. Priklausomybė parodyta 3.12 paveiksle.



3.12 pav. Variklio didžiausių greičio verčių priklausomybė nuo laisvumo

Fig. 3.12. Dependence of maximum value of motor speed at diferent clearance value

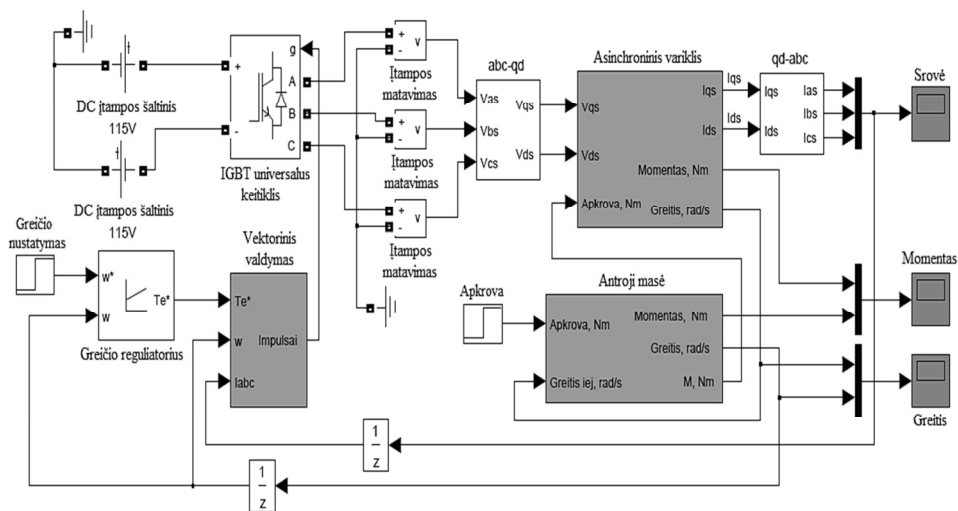
Nagrinėjant 3.11 paveikslą kai sistemai daroma tamprumo ir laisvumo įtaka, matyti, kad pradžioje variklio greitis išlieka toks pat kaip neapkrauto variklio. Antroji masė variklį pradeda veikti tik po laisvumo, kuris išreiškiamas laiko tarpu. Praėjus laisvumo laikui, deformuojama masių jungtis, jėga išjudina antrąją masę, taip sukeldama variklio greičio spartų kritimą. Toliau variklis sparčiai išsuka antrąją masę, nes šiuo atveju antroji masė pradeda veikti ne nuo nulinio variklio greičio, o jau nuo beįsisukančio variklio. Dėl to veleno tamprumo sukaupta jėga ir inercijos momentas dar labiau įsuka variklio veleną lyginant su neapkrautu varikliu. Šiuo pereinamuoju vyksmu greitis nusistovi dar ilgiau, nes čia veikia ne tik pasikartojanti veleno tamprumo įtaka, tačiau ir pasikartojanti laisvumo įtaka. Iš tyrimo matyti, kad įsijungus antrajai masei, variklio greitis staiga krenta į sąlyginai mažą vertę, taip gaudamas didelį smūgį, kuris gali pakenkti mechaninėms grandims. Tokia situacija elektromechaninėse sistemose yra nepageidautina.

Lyginant kreives esant skirtingoms laisvumo vertėms matyti, kad atsiradęs net nedidelis laisvumas sistemoje daro įtaką greičio padidėjimui ir didžiausia greičio vertė didėja kuo didesnis yra laisvumas. Lyginant 3.11 ir 3.12 paveikslus matoma, kad didžiausia greičio vertė pasiekama esant laisvumui nuo -25 iki 25

ir apie 62,5 % viršija nominaliąją vertę, vėliau ji staiga krinta. Dar didinant laisvumą, didžiausia greičio vertė pasiekama sąlyginai maža ir tik po antrojo periodo. Po šio periodo didžiausia greičio vertė yra apie 5 % didesnė už nominaliąją. Taip yra todėl, kad antroji masė įjungžiama beveik nusistovėjęs variklio greičiui. Todėl, jei reikalinga technologinio proceso metu įjungti antrąją masę prie įsisukusio variklio, geriausia tai daryti nusistovėjęs variklio greičiui, taip išvengiama didelės greičio amplitudės.

3.2. Vektorinio valdymo dvimasės elektromechaninės sistemos tyrimas

Asinchroninio variklio vektorinio valdymo metodas aprašytas 1.4 poskyryje. Vektoriniam valdymui panaudotos statoriaus srovės dedamosios ir variklio veleno greičio vertės. Greičio valdymas yra formuojamas statoriaus srovės komponente i_{qs} . Siekiant supaprastinti vektorinį valdymą, rotoriaus magnetinio srauto srovės komponentė pasirenkama pastovi.

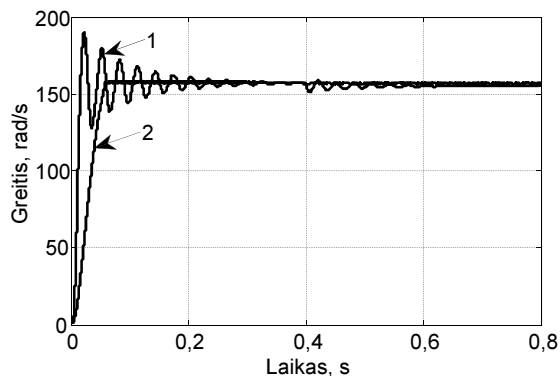


3.13 pav. Dvimasė elektromechaninė sistema su PI vektoriniu valdymu
Fig. 3.13. Two-mass electromechanical system with PI vector controller

Panaudojus 2.2 poskyryje pateiktą *Simulink*[®] vektorinio valdymo modelį ir 3.1 poskyryje tyrimams naudotą dvimasę elektromechaninį modelį, sudaromas bendras valdomosios sistemos modelis. Jo *Simulink*[®] modelis pateiktas 3.13 paveiksle.

Bendroji sistema turi greičio ir apkrovos nustatymo blokus. Keičiant jų vertes bus atliekamas tyrimas. Vektorinis blokas, palaikydamas nustatytą greitį, formuoja valdymo impulsus IGBT (angl. *Insulated Gate Bipolar Transistor*) keitikliui. Tyrimui naudojamas valdymo metodas reikalauja pakankamai standžios masių jungties, todėl pasirenkamas didelis masių jungiamojo veleno tamprumo koeficientas, lygus $1 \cdot 10^5 \text{ N} \cdot \text{m/rad}$.

Norint įsitikinti vektorinio reguliatoriaus veikimu ir pranašumu palyginus nevaldomą ir valdomą sistemas, pirmieji bandymai atliekami su valdoma ir nevaldoma dvimase elektromechanine sistema. Jos modelis pateiktas 3.3 paveiksle. Abi sistemos apkraunamos nominalia variklio apkrova, kuomet greitis yra nusistovėjęs. Nominali variklio apkrova paimama iš variklio duomenų 2.1 lentelės ir yra lygi $7 \text{ N} \cdot \text{m}$. Abiem atvejais sistemos pradeda veikti be apkrovos, ir po $0,4 \text{ s}$ įjungiama apkrova. Nustatoma nominalioji greičio vertė, lygi 157 rad/s . Greičių pereinamųjų vyksmų palyginimas pateiktas 3.14 paveiksle.



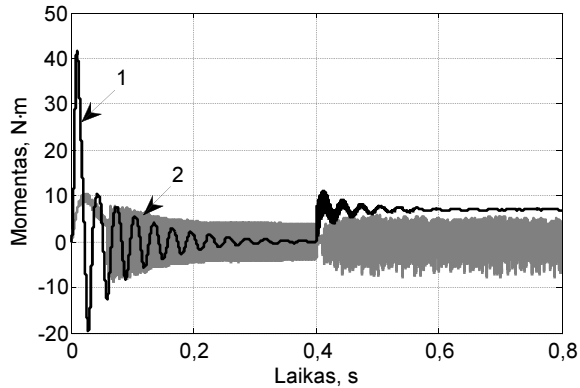
3.14 pav. Dvimasės elektromechaninės sistemos apkrautos $7 \text{ N} \cdot \text{m}$ greičių pereinamųjų vyksmų palyginimas: 1 – nevaldoma sistema; 2 – sistema su PI vektoriniu valdymu

Fig. 3.14. Comparison of speed responses of two-mass electromechanical system at load torque $7 \text{ N} \cdot \text{m}$: 1 – open loop system; 2 – vector control with PI controller

3.14 paveiksle matoma, kad valdomos sistemos greičio pereinamojo vyksmo laikas yra apytiksliai $0,06 \text{ s}$ ir yra 5 kartus mažesnis už nevaldomos sistemos. Po nominaliosios apkrovos įjungimo greitis liko nepakitęs, tai rodo gerą PI vektorinio reguliatoriaus veikimą. Tuo metu, nevaldomos sistemos greičio pereinamojo vyksmo laikas žymiai ilgesnis, atsiranda greičio svyravimai ir jo greičio sumažėjimas po apkrovos įjungimo.

Momentų pereinamųjų vyksmų palyginimas pateiktas 3.15 paveiksle. Grafikuose matoma, kad nevaldomos sistemos momento didžiausia vertė 4 kartus viršija valdomos sistemos didžiausią vertę, tai sukuria greičio

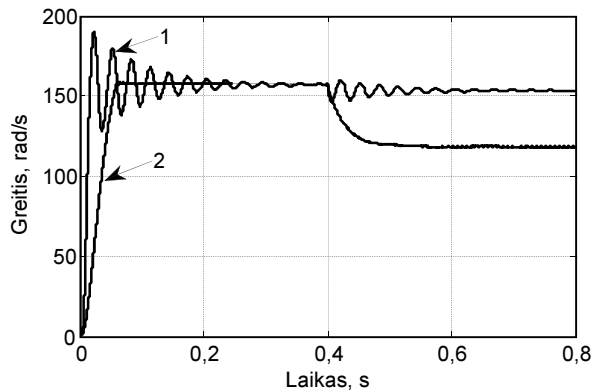
švytavimams. Panašūs rezultatai gaunami po apkrovos įjungimo. Sukuriamas variklio momentas apskaičiuojamas kaip srautų ir srovių sandauga, dėl to atsiradusių aukštesnių harmonikų atsiranda momento virpesiai, tačiau neapkrauto režimo vidutinė momento vertė lygi nuliui.



3.15 pav. Dvimasės elektromechaninės sistemos apkrautos 7 N·m momentu pereinamųjų vyksmų palyginimas: 1 – nevaldoma sistema; 2 – sistema su PI vektoriniu valdymu

Fig. 3.15. Comparison of torque responses of two-mass electromechanical system at load torque 7 N·m: 1 – open loop system; 2 – closed loop system with PI controller

Greičio pereinamasis vyksmas su dvigubai didesne apkrova nei nominalioji pateiktas 3.16 paveiksle.

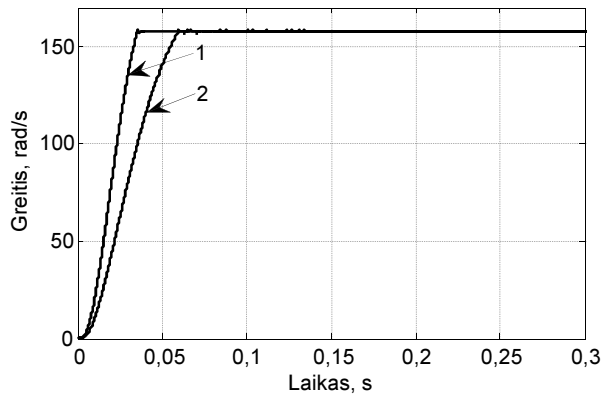


3.16 pav. Dvimasės elektromechaninės sistemos, apkrautos 14 N·m, greičių pereinamųjų vyksmų palyginimas: 1 – sistema be valdymo; 2 – sistema su PI vektoriniu valdymu

Fig. 3.16. Comparison of speed responses of two-mass electromechanical system at load torque is 14 N·m: 1 – open loop system; 2 – closed loop system with PI controller

14 N·m lygi apkrova įjungama po 0,4 s, kai greitis yra nusistovėjęs. Pereinamojo vyksmo pradžia yra analogiška pateiktai 3.14 paveiksle, tai atitinka neapkrautą režimą. Po apkrovos įjungimo greitis staiga krinta, valdomoji sistema nesugeba palaikyti nustatytos vertės. Tai atsitinka todėl, kad įjungta apkrova yra daug didesnė nei nominalioji. Tuo metu nevaldomoje sistemoje greičio sumažėjimas yra mažesnis, tai galima paaiškinti tuo, kad naudojami skirtingi maitinimo šaltiniai modeliuose. Greičio švytavimai yra didesni nei gauti prieš tai bandymo metu (rezultatai pateikti 3.14 paveiksle). Valdomoje sistemoje apkrovos padidėjimas neturėjo įtakos greičio švytavimams.

Kiti bandymai skirti analizuoti detalesnę apkrovos įtaką valdomai sistemai. 3.17 paveiksle pateiktas atlikto bandymo su neapkrauta vienmase sistema (varikliu) ir neapkrauta dvimase sistema greičių pereinamųjų vyksmų palyginimas.



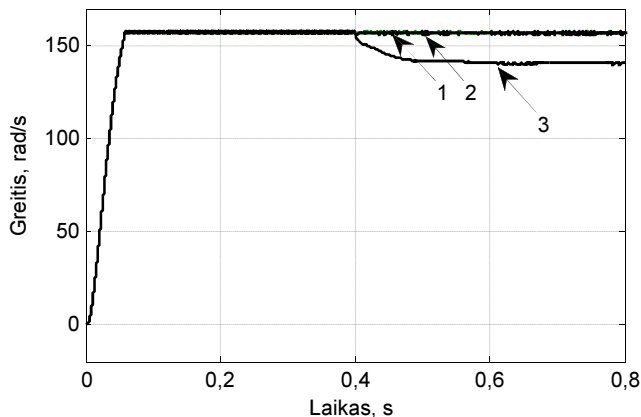
3.17 pav. Vektorinio valdymo su PI reguliatoriumi greičių pereinamųjų vyksmų palyginimas: 1 – vienmasė sistema (variklis); 2 – neapkrauta dvimase sistema

Fig. 3.17. Comparison of speed responses of vector control system with PI controller: 1 – single mass system (motor); 2 – two-mass system with no load

3.17 paveiksle matoma, kad vienmasės sistemos greitis pasiekia nominaliąją vertę ir nusistovi greičiau nei dvimasis sistemos, tai lemia antrosios masės sukurta inercija. Grafikuose taip pat matoma, kad dvimasis sistemos greitis nusistovi per 0,06 s, nėra greičio švytavimų ir palaikoma nominalioji jo vertė.

Kitas bandymas atliekamas esant skirtingoms apkrovoms, kai apkrova įjungama po 0,4 s, t.y. nusistovėjus greičiui, su mažesne nei nominalia, nominalia, didesne nei nominalia apkrova. 3.18 paveiksle pateikti šio bandymo rezultatai. Remiantis kreivėmis matoma, kad pradžioje sistema veikia neapkrautu režimu, o po nustatyto laiko tarpo sistema yra apkraunama. Esant pirmoms dviem apkrovoms, po apkrovos įjungimo greitis nepakito, valdymo

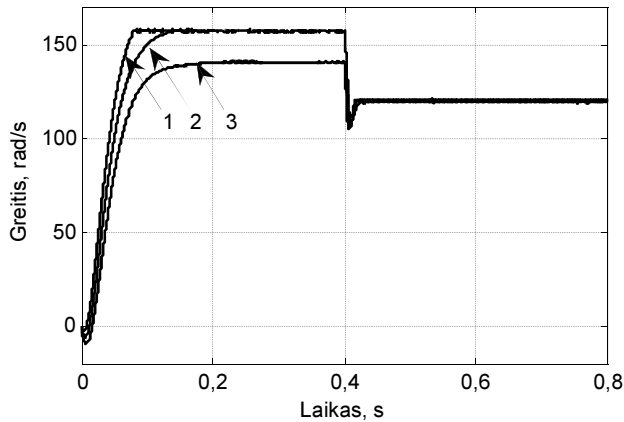
sistema kompensavo apkrovos poveikį ir palaikė nustatytą greitį. Trečiuoju atveju, kai apkrova didesnė už nominaliąją, sistema nesugebėjo palaikyti nustatyto greičio ir jo nusistojusi vertė yra 10% mažesnė už nustatytąją. Šis valdymo metodas netinka palaikyti nominaliam variklio greičiui esant didesnei apkrovai už nominaliąją. Visais trimis atvejais apkrova nesukėlė sistemos greičio virpesių, po apkrovos įjungimo greičiai liko nepakitę arba tolygiai sumažėjo iki galimo didžiausio greičio esant tokiai apkrovai. Kuo didesnė apkrova už nominaliąją apkrovą, tuo nusistovėjęs sistemos greitis bus mažesnis.



3.18 pav. Skirtingai apkrautų sistemų su vektoriniu valdymu greičių pereinamųjų vyksmų palyginimas: 1 – apkrauta 4 N·m momentu; 2 – apkrauta 7 N·m momentu; 3 – apkrauta 10 N·m momentu

Fig. 3.18. Comparison of speed responses of vector control system at diferent load: 1 – load with 4 N·m torque; 2 – load with 7 N·m torque; 3 – load with 10 N·m torque

Kitas bandymas atliekamas esant skirtingoms apkrovoms, kai apkrovos momentas sistemą veikia nuo pereinamojo vyksmo pradžios. Po 0,4 s pakeičiama palaikomo greičio vertė, ji nustatoma iš nominalios į 120 rad/s. Šio bandymo pereinamieji vyksmai palyginti ir pateikti 3.19 paveiksle. Iš pirmos kreivių dalies matyti, kad esant mažesnei apkrovai, sistema nustatytą greitį pasiekia greičiau, o kai apkrova viršija nominaliąją, sistema greičio nepasiekia. Kuo apkrova mažesnė už nominaliąją, tuo nominalusis greitis pasiekiamas greičiau. Esant bet kokiai apkrovai paleidimo metu, greitis neviršija nominaliosios greičio vertės. Po greičio pakeitimo, sistemų greičiai staiga krinta į žemesnę nei nustatyta vertė, po to, veikiant sistemos valdymui, pasiekiamas naujai nustatytas greitis, jis tolygiai palaikomas.



3.19 pav. Skirtingai apkrautų sistemų su vektoriniu valdymu greičių pereinamųjų vyksmų palyginimas: 1 – apkrauta 4 N·m momentu; 2 – apkrauta 7 N·m momentu; 3 – apkrauta 10 N·m momentu

Fig. 3.19. Comparison of speed responses of vector control system at different load: 1 – load with 4 N·m torque; 2 – load with 7 N·m torque; 3 – load with 10 N·m torque

Šiuo atveju, esant visoms trimis skirtingoms apkrovoms, sistema sugeba palaikyti naujai nustatytą greitį todėl, kad sumažinus greitį galima didesnė apkrova.

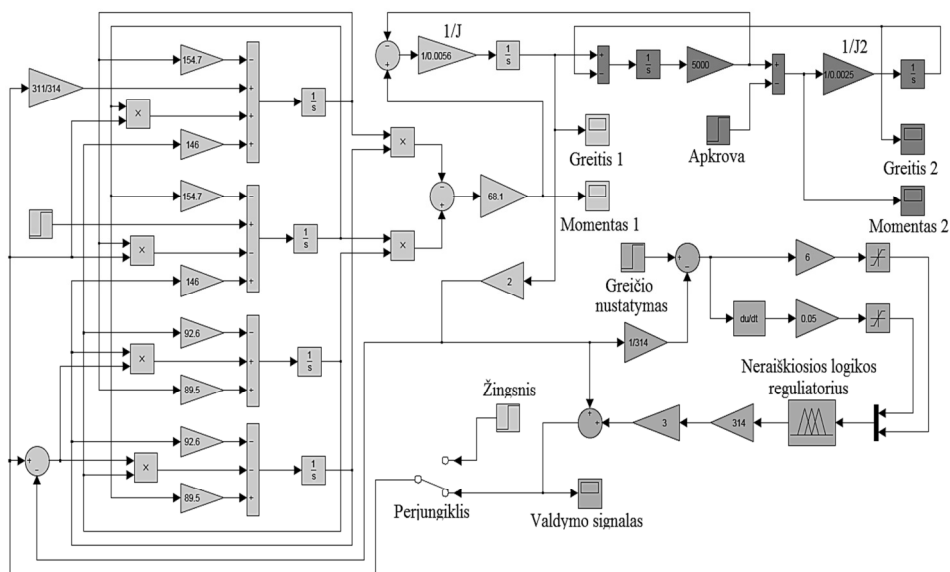
3.3. Dvimasės elektromechaninės sistemos su neraiškiosios logikos valdymu modelio sudarymas ir pereinamųjų vyksmų imitacija

Neraiškiosios logikos valdymo principas aprašytas 1.4 poskyryje, 2.3 poskyryje sudarytas ir pateiktas imitacinis modelis. Vadovaujantis pateiktu *Simulink*[®] modeliu ir parinkus reikiamus koeficientus, sudaromas bendras imitacinis modelis. Šiam tyrimui naudojamas kitas asinchroninio variklio modelis nei anksčiau nagrinėtuose poskyriuose. Naudojamas sinchroniniu greičiu besisukančioje koordinatinių ašyse aprašytas modelis, pateiktas 2.4 paveiksle. Vadovaujantis 2.1 poskyryje pateikta asinchroninių variklių modelių sudarymo metodika, apskaičiuojami reikiami modelio parametrai. Naujo variklio pagrindiniai parametrai pateikti 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Modeliuojamo variklio parametrai**Table 3.1.** Parameters of simulated motor

Parametras	U, V	P, kW	I, A	ω , rad/s	T, N·m	P _p , vnt.	cosφ
Vertė	400	2,2	5,02	157	14	2	0,83
Parametras	J, kg·m ²		R _S , Ω	L _S , mH	R _R , Ω	L _R , mH	L _m , mH
Vertė	0,0056		4,29	313,9	2,63	321,4	303,3

Naudojamas 3.1 poskyryje aprašytas ir 3.2 paveiksle pateiktas antrosios masės modelis. Sudarytas bendras kompiuterinis modelis pavaizduotas 3.20 paveiksle.



3.20 pav. Dvimasės elektromechaninės sistemos modelis su nerašiosios logikos valdikliu

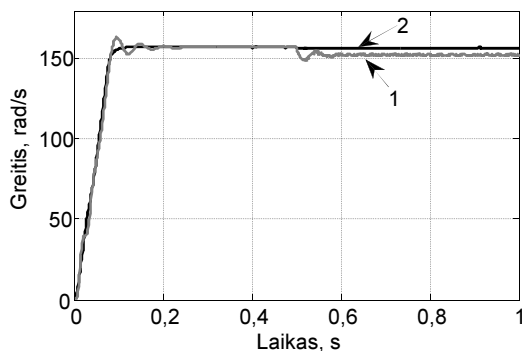
Fig. 3.20. Model of two-mass electromechanical system with fuzzy controller

Sudarytas modelis turi greičio ir apkrovos momento nustatymo blokus, kuriuos tyrimo metu galima keisti. Pasirenkamas antrosios masės jungties standumas, lygus 5000 N·m/rad, ir inercijos momentas, lygus 0,015 kg·m².

Norint įsitikinti reguliatoriaus veikimu, pirmųjų atliktų bandymų rezultatai palyginami su nereguliuojamos sistemos bandymo rezultatais. Valdomojoje sistemoje greitis nustatomas į variklio nominaliąją greičio vertę. Visų bandymų

metu po 0,5 s įjungiamo apkrova, lygi 6 N·m. Fuzzy logikos valdiklis generuoja valdymo signalą varikliui.

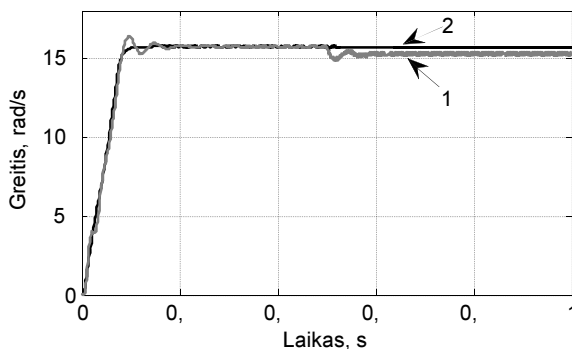
3.21 paveiksle pateikiamas nevaldomos sistemos ir sistemos su neraiškiuoju reguliatoriumi variklių greičių pereinamųjų vyksmų palyginimas. Grafike matoma, kad nevaldomos sistemos greitis pradžioje švytuoja. Po apkrovos įjungimo jis sumažėja žemiau nominaliosios vertės. Tuo metu valdomoje sistemoje greitis pasiekiamas be švytavimų, pereinamojo vyksmo trukmė sumažėja 2 kartus ir po apkrovos jis lieka beveik nepakitęs.



3.21 pav. Dvimasės sistemos asinchroninio variklio greičio pereinamųjų vyksmų palyginimas: 1 – nevaldomos sistemos; 2 – sistemos su neraiškiuoju valdymu

Fig. 3.21. Comparison of speed values of induction motor in two-mass system:
1 – non-controlled system; 2 – system with fuzzy control

3.22 paveiksle pateikti antrosios masės greičio pereinamieji vyksmai.

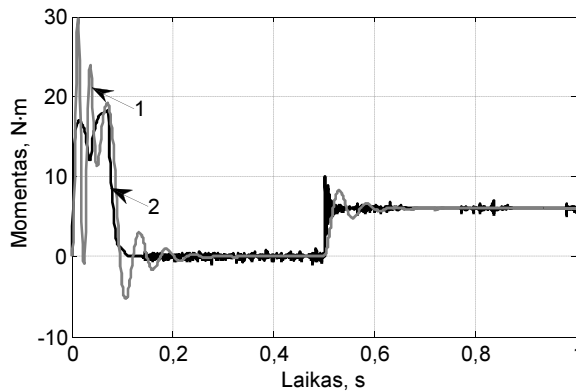


3.22 pav. Dvimasės sistemos antrosios masės greičio pereinamųjų vyksmų palyginimas:
1 – nevaldomos sistemos; 2 – sistemos su neraiškiuoju valdymu

Fig. 3.22. Comparison of speed values of second mass in two-mass system:
1 – non-controlled system; 2 – system with fuzzy control

Pereinamųjų vyksmų kitimo pobūdis panašus į variklio pereinamuosius vyksmus, tik šiuo atveju nevaldomoje sistemoje galima stebėti papildomus greičio švytavimus atsiradusius dėl standumo. Šiuo atveju neraiškiosios logikos reguliatorius taip pat palaiko pastovų antrosios masės nustatytą greitį, nepaisant to, kad modelyje panaudotas grįžtamasis ryšys, proporcingas variklio greičiui.

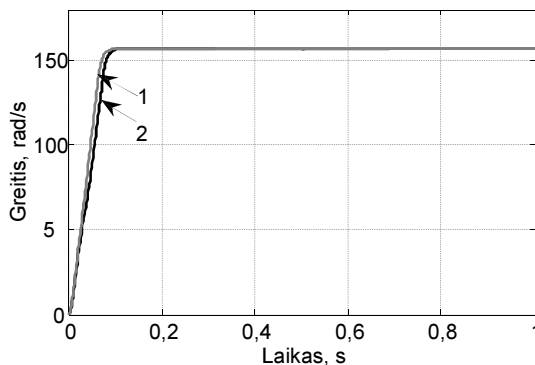
3.23 paveikslas vaizduoja nevaldomos ir valdomos sistemos variklio momentų palyginimą. Iš grafikų matyti, kad valdomos sistemos variklio įjungimo metu didžiausias momento šuolis 40 % mažesnis nei nevaldomos sistemos, taip pat turi mažesnius periodinius švytavimus.



3.23 pav. Dvimasės sistemos asinchroninio variklio momento pereinamųjų vyksmų palyginimas: 1 – nevaldomos sistemos; 2 – sistemos su neraiškiuoju valdymu

Fig. 3.23. Comparison of torque value of induction motor in two-mass system:

1 – non-controlled system; 2 – system with fuzzy control

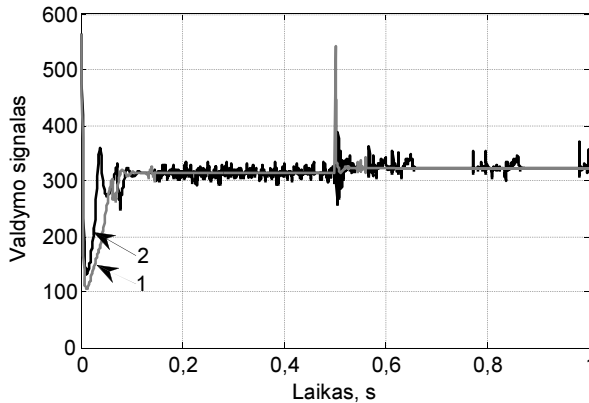


3.24 pav. Asinchroninio variklio greičio pereinamųjų vyksmų palyginimas sistemoje su neraiškiosios logikos valdymu: 1 – vienasės sistemos; 2 – dvimasės sistemos

Fig. 3.24. Comparison of speed values of induction motor of fuzzy controlled system:

1 – single-mass system; 2 – two-mass system

Analizuojant neraiškiosios logikos regulatoriaus veikimą, 3.24 paveiksle palyginami vienmasės (variklio) ir dvimasės sistemos greičių pereinamieji vyksmai. 3.25 paveiksle pavaizduotas šiuo bandymu reguliatoriaus formuotas valdymo signalas. Iš paveikslų matyti, kad turint labai panašų rezultatą – palaikomą greitį, reguliatorius formuoja skirtingus valdymo signalus.

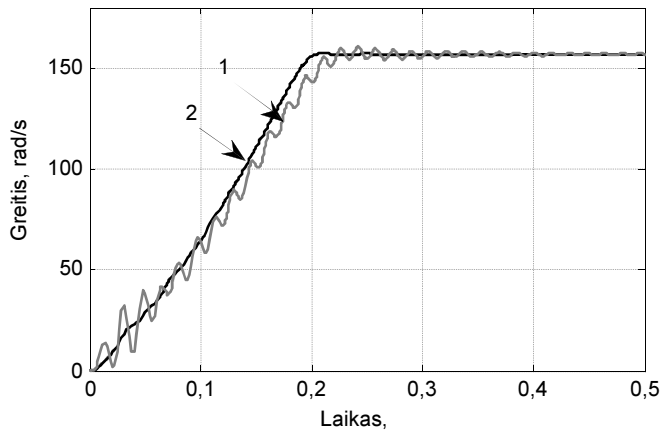


3.25 pav. Asinchroninio variklio valdymo signalų palyginimas sistemoje su neraiškiosios logikos valdymu: 1 – vienmasės sistemos; 2 – dvimasės sistemos
Fig. 3.25. Comparison of control signal of induction motor in fuzzy control system: 1 – single-mass system; 2 – two-mass system

Kiti bandymai atliekami siekiant ištirti reguliatoriaus veikimą dvimasėje sistemoje su didesniu veleno tamprumu. Greitis nekeičiamas ir nustatytas lygus variklio nominaliajam. Šis tyrimas nagrinėja pereinamuosius vyksmus pavaros įjungimo metu. Pasirenkamas nedidelis antrosios masės standumas, lygus $600 \text{ N} \cdot \text{m/rad}$.

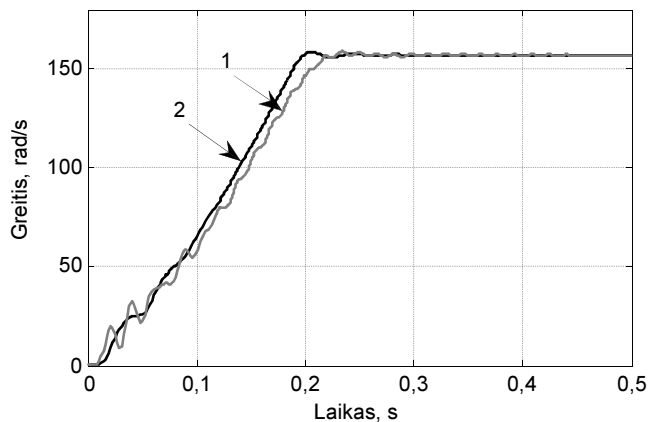
3.26 paveiksle pateikiami nevaldomos ir fuzzy logikos valdomos dvimasės sistemos asinchroninio variklio imitacijos rezultatai. Iš grafiko matyti, kad nevaldomos sistemos greitis švytuoja, tuo tarpu valdomoje sistemoje greitis pasiekiamas be švytavimų. Švytavimai atsiranda dėl masių sujungimo mažo standumo.

3.27 paveikslas vaizduoja antrosios masės greičio pereinamuosius vyksmus. Pereinamųjų vyksmų kitimo pobūdis panašus į variklio pereinamuosius vyksmus, tik šiuo atveju nevaldomoje sistemoje galima stebėti mažesnius švytavimus. Šiuo atveju neraiškūs reguliatorius taip pat palaiko pastovų nustatytą antrosios masės greitį, nepaisant to, kad modelyje panaudotas variklio greičio grįžtamasis ryšys.



3.26 pav. Dvimasės sistemos asinchroninio variklio greičio pereinamųjų vyksmų palyginimas: 1 – nevaldomos sistemos; 2 – sistemos su neraiškiuoju valdymu

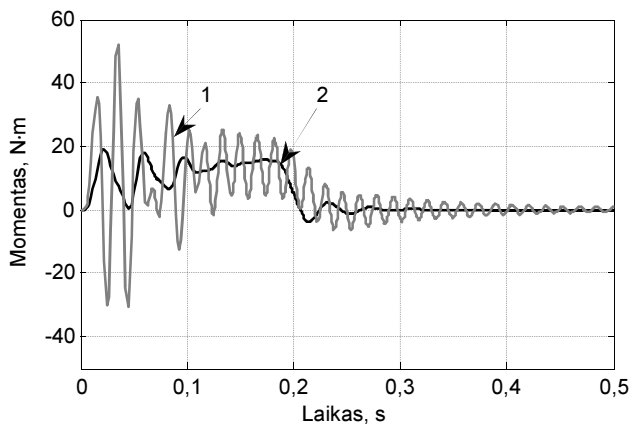
Fig. 3.26. Comparison of speed values of induction motor in two-mass system:
1 – non-controlled system; 2 – system with fuzzy control



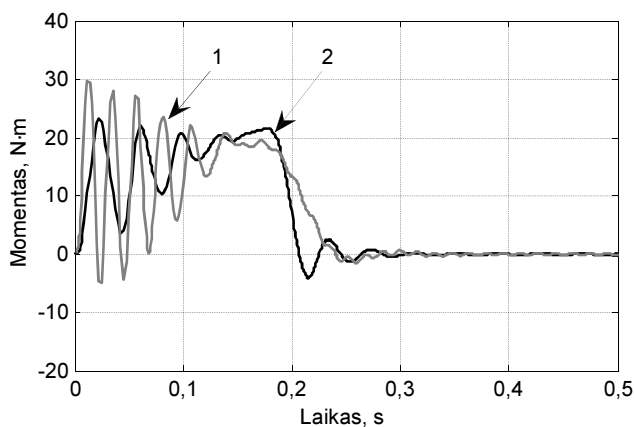
3.27 pav. Dvimasės sistemos antrosios masės greičio pereinamųjų vyksmų palyginimas: 1 – nevaldomos sistemos; 2 – sistemos su neraiškiuoju valdymu

Fig. 3.27. Comparison of speed values of second mass in two-mass system:
1 – non-controlled system; 2 – system with fuzzy control

3.28 paveiksle pateiktas nevaldomos ir valdomos sistemos variklio momentų palyginimas. 3.29 paveiksle pavaizduotas antrosios masės momentų palyginimas.



3.28 pav. Dvimasės sistemos asinchroninio variklio momento pereinamųjų vyksmų palyginimas: 1 – nevaldomos sistemos; 2 – sistemos su neraiškiuoju valdymu
Fig. 3.28. Comparison of torque value of induction motor in two-mass system:
 1 – non-controlled system; 2 – system with fuzzy control

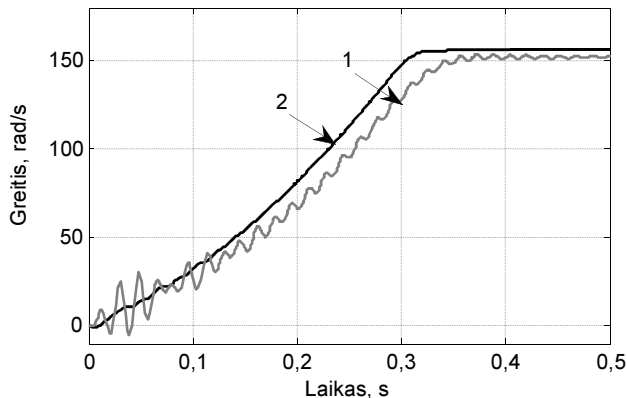


3.29 pav. Dvimasės sistemos antrosios masės momento pereinamųjų vyksmų palyginimas: 1 – nevaldomos sistemos; 2 – sistemos su neraiškiuoju valdymu
Fig. 3.29. Comparison of torque value of second mass in two-mass system:
 1 – non-controlled system; 2 – system with fuzzy control

Grafikuose matoma, kad valdomos sistemos variklio įjungimo metu momento šuoliai 2,5 karto mažesni nei nevaldomos sistemos. Taip pat turi mažesnius svyravimus. Nevaldomos ir valdomos sistemos momentai mažiau

skiriasi tarpusavyje nei variklio. Taip yra dėl masių tamprumo, kuris slopina variklio momento šuolius ir jie neperduodami antrosios masės išėjime.

Kiti bandymai atliekami antrąją masę apkrovus 6 N·m apkrova. Variklio greičio pereinamieji vyksmai pavaizduoti 3.30 paveiksle.

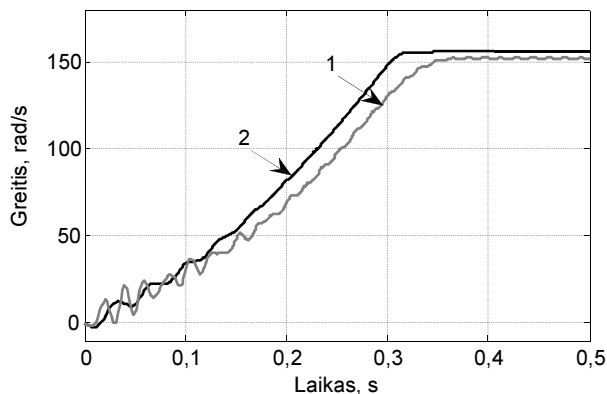


3.30 pav. Dvimasės sistemos asinchroninio variklio greičio pereinamųjų vyksmų palyginimas: 1 – nevaldomos sistemos; 2 – sistemos su neraiškiuoju valdymu

Fig. 3.30. Comparison of speed values of induction motor in two-mass system:

1 – non-controlled system; 2 – system with fuzzy control

3.31 paveiksle lyginami antrosios masės greičiai. Greičių charakteris yra labai panašus į variklio, tik nevaldomoje sistemoje dėl masių jungties tamprumo ir apkrovos momento yra mažesni švytavimai.



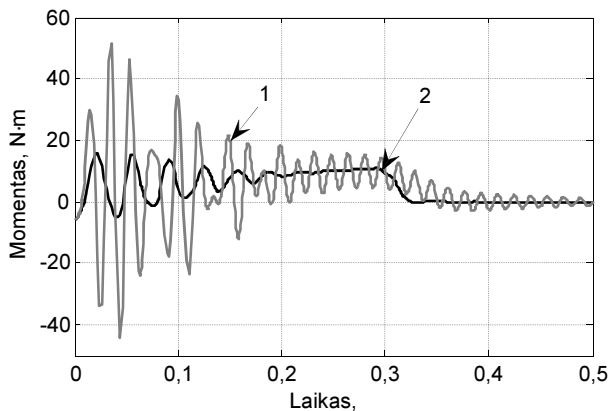
3.31 pav. Dvimasės sistemos antrosios masės greičio pereinamųjų vyksmų palyginimas:

1 – nevaldomos sistemos; 2 – sistemos su neraiškiuoju valdymu

Fig. 3.31. Comparison of speed values of second mass in two-mass system:

1 – non-controlled system; 2 – system with fuzzy control

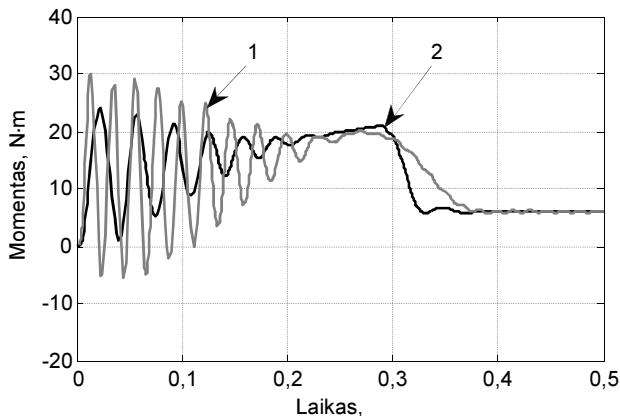
3.32 paveiksle lyginami apkrautos nevaldomos ir valdomos sistemos variklio momentai.



3.32 pav. Dvimasės sistemos asinchroninio variklio momento pereinamųjų vyksmų palyginimas: 1 – nevaldomos sistemos; 2 – sistemos su neraiškiuoju valdymu

Fig. 3.32. Comparison of torque value of induction motor in two-mass system:
1 – non-controlled system; 2 – system with fuzzy control

3.33 paveiksle lyginami apkrautos nevaldomos ir valdomos sistemos antrosios masės momentai.

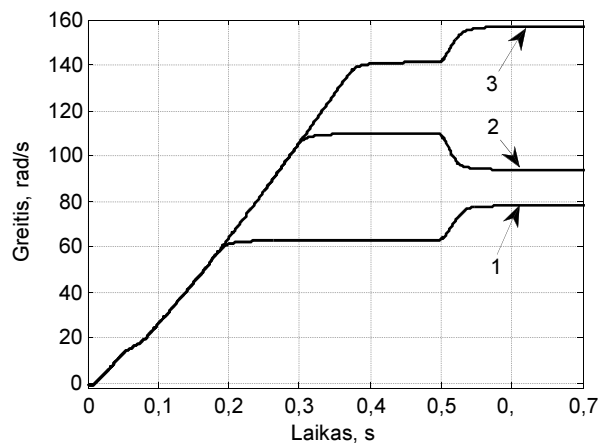


3.33 pav. Dvimasės sistemos antrosios masės momento pereinamųjų vyksmų palyginimas: 1 – nevaldomos sistemos; 2 – sistemos su neraiškiuoju valdymu

Fig. 3.33. Comparison of torque value of second mass in two-mass system:
1 – non-controlled system; 2 – system with fuzzy control

Atlikus grafikų analizę matoma, kad apkrautos sistemos, lyginant su neapkrautos, pereinamojo vyksmo laikas pailgėjo 55 %. Nevaldomoje sistemoje dėl apkrovos variklio greitis yra 3,8 % mažesnis už nustatytąjį, pereinamojo vyksmo pradžioje yra dideli greičio švytavimai. Remiantis 3.32 paveiklo grafikais matoma, kad nevaldomos sistemos variklio momento gėstantys periodiniai švytavimai trunka 2,5 karto ilgiau ir didžiausia momento vertė 2,8 karto didesnė nei valdomos sistemos. Valdomoje sistemoje greičio pereinamasis vyksmas trunka 11,4 % trumpiau nei nevaldomoje, taip pat nėra greičio švytavimų. Sistemos su neraiškosios logikos reguliatoriumi pereinamųjų vyksmų trukmės, didžiausios vertės ir gėstančių periodinių švytavimų kokybės rodikliai yra geresni.

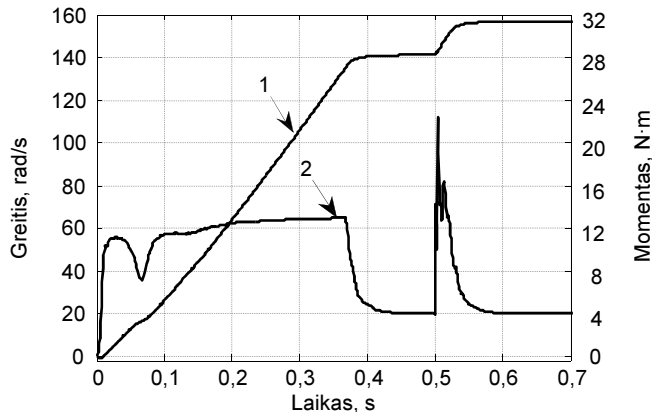
Kiti bandymai atliekami siekiant geriau suprasti valdomos sistemos veikimą keičiant greičio nuostatas. Bandymo metu įjungiamas sistemos modelis su apkrova, lygia 7 N·m, po 0,5 s pakeičiama greičio nuostata. Modelyje greičio nuostata galima nuo 0 iki 1, čia 1 atitinka variklio sinchroninį greitį ω_s . Vienu metu bandymas atliekamas su trimis modeliais, kurių greičiai skirtingi. Kreivės palyginamos, gautos perinamųjų vyksmų kreivės pavaizduotos 3.34 paveiksle. Iš kreivių matyti, kad tiek paleidimo metu, tiek keičiant greitį, didinant ir mažinant, esant skirtingai pradinei nuostatai, greičio švytavimai nepasireiškia, sistema sklandžiai pereina prie naujų nuostatų.



3.34 pav. Dvimasės sistemos variklio greičio pereinamieji vyksmai: 1 – kai pradinis greitis $0,4\omega_s$, po pakeitimo $0,5\omega_s$; 2 – kai pradinis greitis $0,7\omega_s$, po pakeitimo $0,6\omega_s$; 3 – kai pradinis greitis $0,9\omega_s$, po pakeitimo ω_s

Fig. 3.34. Speed values of induction motor in two-mass system: 1 – when start-up speed is $0,4\omega_s$, after change $0,5\omega_s$; 2 – when start-up speed is $0,7\omega_s$, after change $0,6\omega_s$; 3 – when start-up speed is $0,9\omega_s$, after change ω_s

Kitame paveiksle greičio pereinamasis vyksmas lyginamas su momento pereinamuoju vyksmu. Palyginimas pavaizduotas 3.35 paveiksle.



3.35 pav. Dvimasės sistemos variklio greičio ir momento pereinamųjų vyksmų palyginimas, kai pradinis greitis $0,9\omega_s$, po pakeitimo ω_s :

1 – greičio pereinamasis vyksmas; 2 – momento pereinamasis vyksmas.

Fig. 3.35. Comparison of speed and torque values of induction motor in two-mass system, when start-up speed is $0,9\omega_s$, after change is ω_s :

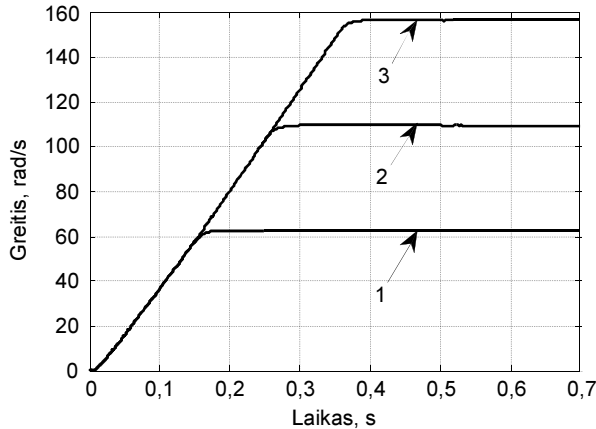
1 – the response of speed; 2 – the response of torque.

Iš palyginimo matyti, kad pradiniu metu momentas staiga pakyla ir išlieka kol nepasiekiamas nustatytas greitis, paskui jis mažėja ir įgauna naują vertę, momentą kurio reikia antrosios masės apkrovai įveikti. Pasikeitus greičio nuostatai, momentas staiga kyla, pasiekiamą naują greičio vertę ir momentas grįžta į pradinę vertę.

Kitas bandymas atliekamas įjungiant tris neapkrautus dvimasės sistemos modelius su skirtingais greičio nuostatais. Po 0,5 s visiems modeliams įjungiamą apkrova, lygi 7 N·m. Bandymų rezultatas pateiktas 3.36 paveiksle. Iš kreivių matyti, kad visais trimis atvejais apkrovos įjungimas didelės įtakos neturėjo. Nustatytas greitis išliko pastovus. Kitas palyginimas, pavaizduotas 3.37 paveiksle, rodo greičio ir momento palyginimą, kai nustatytas sistemos greitis lygus ω_s . Iš palyginimo matyti, kad momentas išlieka pastovus varikliui greitėjant, pasiekus nustatytą vertę, sumažėja iki nulio, o po apkrovos įjungimo pasiekia vertę, reikalingą apkrovos ir antrosios masės sukeltam momentui įveikti.

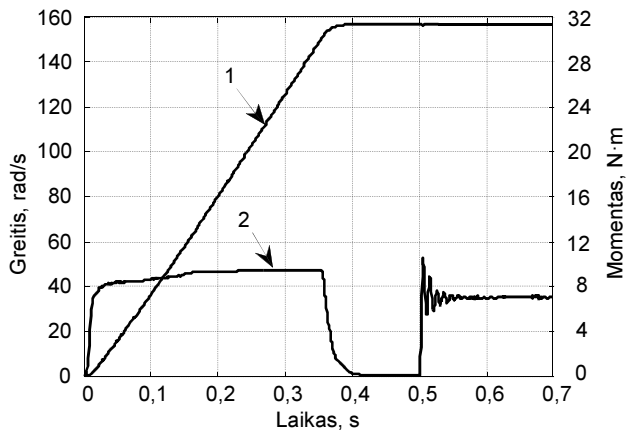
Lyginami variklio ir antrosios masės greičio pereinamieji vyksmai. Tai vaizduoja 3.38 paveikslas. Paveiksle matoma, kad kreivės identiškos ir

praktiškai susilieja į vieną. Vadinasi, antrosios masės inercijos momentas neturi įtakos nusistovėjusiai greičio vertei.



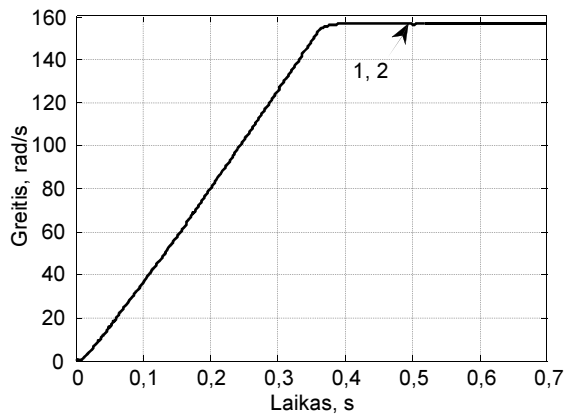
3.36 pav. Dvimasės sistemos variklio greičio pereinamieji vyksmai: 1 – kai nustatytas greitis $0,4\omega_s$; 2 – kai nustatytas greitis $0,7\omega_s$; 3 – kai nustatytas greitis ω_s

Fig. 3.36. Responses of speed of induction motor in two-mass system: 1 – when speed setpoint is $0,4\omega_s$; 2 – when speed setpoint is $0,7\omega_s$; 3 – when speed setpoint is ω_s



3.37 pav. Dvimasės sistemos variklio greičio ir momento pereinamųjų vyksmų palyginimas, kai nustatytas greitis yra ω_s : 1 – greičio pereinamasis vyksmas; 2 – momento pereinamasis vyksmas

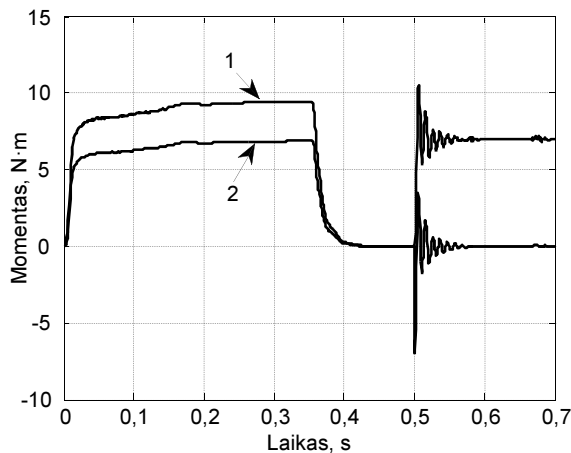
Fig. 3.37. Comparison of speed and torque values of induction motor, when speed setpoint is ω_s : 1 – the response of speed; 2 – the response of torque



3.38 pav. Dvimasės sistemos variklio ir antrosios masės greičio pereinamųjų vyksmų palyginimas, kai nustatytas greitis yra ω_s : 1 – variklio pereinamasis vyksmas; 2 – antrosios masės pereinamasis vyksmas

Fig. 3.38. Comparison of speed values of induction motor and second mass in two-mass system, at speed setpoint is ω_s :
1 – the response of induction motor; 2 – the response of second mass

3.39 paveiksle pavaizduotas variklio ir antrosios masės dinaminių momentų palyginimas.



3.39 pav. Dvimasės sistemos variklio ir antrosios masės momentų pereinamųjų vyksmų palyginimas, kai nustatytas greitis yra ω_s : 1 – variklio pereinamasis vyksmas; 2 – antrosios masės pereinamasis vyksmas

Fig. 3.39. Comparison of torque values of induction motor and second mass in two-mass system, when speed setpoint is ω_s : 1 – the response of induction motor; 2 – the response of second mass

Remiantis paveikslu matoma, kad variklio momentas pereinamojo vyksmo metu yra 35,7 % didesnis, nes reikia įveikti antrosios masės inercijos momentą. Po apkrovos įjungimo momento švytavimų laikas yra trumpas, kuris lygus 0,06 s, todėl neturi didelės įtakos palaikomam greičiui. Variklio momentas nusistovi ties verte reikalinga apkrovos momentui įveikti.

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Sudarytas ir ištirtas dvimasės elektromechaninės sistemos imitacinis modelis. Jis rodo, kad baigtinis standis sukelia dvimasės sistemos sukimosi greičio virpesius, kurių amplitudė ir pereinamojo vyksmo trukmė priklauso nuo tamprumo dydžio. Sistemos vykdančiojo veleno greičio dinaminis vyksmas prasideda, kai variklio elektromagnetinis momentas pasidaro didesnis už sistemos veleno tamprųjį momentą, kuris ir sudaro dinaminę apkrovą. Tamprumas mechaninių grandžių jungtyje sumažina didžiausią sistemos momento vertę, tai gali būti naudojama siekiant sušvelninti įrenginio paleidimą.
2. Sistemos su laisvumu pradžioje greičio pereinamasis vyksmas atitinka neapkrautos sistemos kitimą. Dėl laisvumo išėjimo veleno greitis atsilieka nuo variklio veleno greičio. Išėjimo veleno sukimosi greičio delsa yra tuo didesnė, kuo didesnis laisvumas. Laisvumas dvimasėje elektromechaninėje sistemoje sukelia dinامينius momentus, kurie didėja, didėjant laisvumo trukmei. Didžiausio greičio vertė didėja proporcingai laisvumui ir, esant laisvumui nuo -25 iki 25, 62,5 %, viršija nominaliąją vertę. Esant dideliui laisvumui, kuomet antroji masė pradeda veikti nusistovėjus variklio greičiui, didžiausias greitis pereinamajame vyksme yra nežymus ir apie 5 % didesnis už nominalųjį.
3. Pereinamųjų vyksmų, kai laisvumas yra nuo -0,2 iki 0,2 ir tamprumas $C_{12}=500 \text{ N}\cdot\text{m/rad}$, didžiausias momentas pasiekiamas didesnis nei neapkrauto variklio: 9 % esant tik tamprumui ir 26,5 % esant tamprumui ir laisvumui. Dvimasės sistemos veleno išėjimo greitis dėl tamprumo, laisvumo ir inercijos momento įtakos pasiekia 32,5 % didesnę didžiausią vertę nei neapkrauto variklio. Esant standumui $C_{12}=150 \text{ N}\cdot\text{m/rad}$, pasiekiamas didžiausias variklio greičio šuolis. Jis atsirado dėl jungties tamprumo, 37 % viršijusio nominalųjį variklio greitį.
4. Sudarytas dvimasis elektromechaninis imitacinis modelis su vektoriniu valdymu, sutrumpinantis sistemos greičio pereinamąjį vyksmą iki 0,06 s, be periodinių švytavimų ir greičio šuolių. Vektorinis valdymas ženkliai pagerina pereinamuosius vyksmus lyginant juos su nevaldomomis

sistemomis, pereinamojo vyksmo trukmė sumažėja iki 5 kartų. Valdomoje sistemoje didžiausias pasiekiamas momentas yra iki 4 kartų mažesnis, lyginant su nevaldoma sistema.

5. Kai palaikomo greičio nuostata yra lygi sinchroniniam greičiui, ir apkrova įjungiama kuomet sistemos greitis nusistovėjęs, greitis lieka nepakitęs, jei apkrova neviršija nominaliosios vertės. Jei apkrova yra didesnė nei nominalioji vertė, greitis sumažėja, tačiau gali būti palaikomas pastovus, jei greitis nustatytas mažesnis už sinchroninį greitį. Įjungimo metu, kuomet dvimasė sistema yra apkrauta, pereinamojo vyksmo trukmė priklauso nuo apkrovos: apkrovai didėjant, trukmė ilgėja.
6. Sudarytas dvimasės elektromechaninės sistemos imitacinis modelis su neraiškiuoju regulatoriumi, palaikančiu greičio pereinamuosius vyksmus be periodinių švytavimų ir greičio šuolių kintant apkrovai. Lyginant su nevaldoma sistema, greičio pereinamasis vyksmas trunka iki 2 kartų trumpiau. Valdomos sistemos greitis, įjungus apkrovą, lieka nepakitęs. Neraiškūs valdymas dvimasėse sistemose leidžia pasiekti tokius greičio pereinamuosius vyksmus, kuriems apkrova beveik neturi įtakos. Nors valdymui panaudotas variklio greičio grįžtamasis signalas, tačiau ir antrosios masės išėjimo greitis yra be periodinių švytavimų ir greičio šuolių. Dvimasė sistema su neraiškia logika gerai tinka greičio tiek pirmosios, tiek antrosios masės palaikymui. Esant apkrautai sistemai ir pakeitus palaikomo greičio nuostatą, pereinamieji vyksmai sklandžiai pereina prie naujos vertės, nėra greičio švytavimų.
7. Sistemoje su neraiškia logika variklio didžiausias momentas yra 40% mažesnis nei nevaldomoje sistemoje. Sistemoje su dideliu tamprumu momento pereinamųjų vyksmų švytavimų amplitudę iki 2,5 karto mažesnė. Neraiškiosios logikos valdymas gerai tinka dvimasėms sistemoms su mažu veleno standumu tirti, parinktas valdymo principas kompensuoja dėl tamprumo atsirandančius švytavimus.

Tyrimo rezultatų patikra ir taikymas

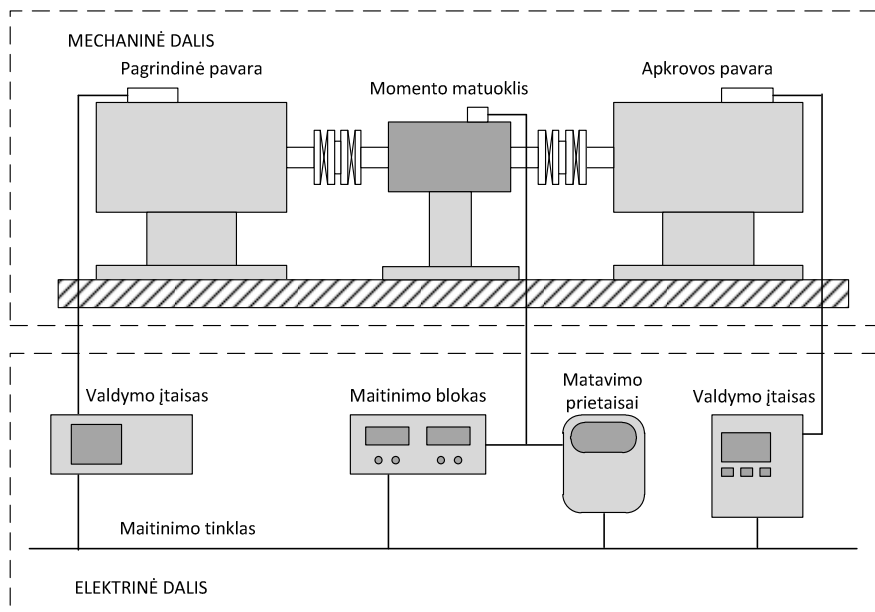
Skyriuje aprašomas dvimasės elektromechaninės sistemos eksperimentinio stendo konstravimas, pateikiama jo principinė elektrinė schema, parenkami matavimo prietaisai, greičio matavimui konstruojamas specialus prietaisas. Eksperimentinių tyrimų tikslas – gauti variklio, kaip pirmosios masės, greičio ir momento pereinamuosius vyksmus esant skirtingai antrosios masės apkrovai, išanalizuoti dinامينius vyksmus ir palyginti su teorinių tyrimų rezultatais. Skyriaus tematika paskelbtas 1 autoriaus straipsnis (Juraitis *et al* 2011).

4.1. Bandymų stendo aprašymas

Stendas konstruojamas taip, kad sudarytų dvimasę elektromechaninę sistemą ir būtų galima eksperimentiškai išmatuoti pirmosios masės greičio bei momento pereinamuosius vyksmus, keisti apkrovą.

Remiantis kituose skyriuose pateikta analize, dvimasę sistemą sudaro du besisukantys kūnai sujungti velenu, kuris turi savo tamprumą ir galimą laisvumą. Konstruojamas stendas susideda iš mechaninės ir elektrinės dalies. Mechaninę dvimasės eksperimentinės sistemos dalį sudaro du besisukantys kūnai, tarpusavyje sujungti specialiais įtaisais. Elektrinę dalį sudaro maitinimo,

stabdymo ir matavimo prietaisais. Stendo principinė schema pavaizduota 4.1 paveiksle.



4.1 pav. Dvimasės sistemos eksperimentinio stendo principinė schema

Fig. 4.1. Principal scheme of two-mass system experimental stand

Kompiuterinėse imitacijose pirmoji masė buvo asinchroninis variklis, todėl tikslinga ir eksperimentiniame stende naudoti asinchroninį variklį, trumpai jungtu rotoriumi. Pirmosios masės apkrovai sudaryti pasirenkamas analogiškas asinchroninis variklis. Abiejų variklių pagrindiniai parametrai pateikti 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė. Tyrimų stendo variklių parametrai

Table 4.1. Parameters of motor of investigation stand

Pavadinimas	SIEMENS 1LA7096-4AA10							
Parametras	U , V	P_s , kW	I , A	ω , aps/min	T , N·m	p , vnt.	$\cos \varphi$	J , kg·m ²
Vertė	400	1,5	3,45	1420	2,4	2	0,81	0,0033

Antroji masė apibūdinama antrojo variklio rotoriaus inercijos momentu. Tačiau, tiriant sistemą, reikia sudaryti skirtingas apkrovas. Dėl to prie antrojo variklio prijungtas dažnio keitiklis suderinamas taip, kad antrąjį variklį sukėtų į

priešingą pusę negu pagrindinis variklis. Taip, keičiant dažnio keitiklio nustatymo dažnį, galima keisti apkrovą pirmajam varikliui. Dažnio keitiklio pagrindiniai parametrai pateikti 4.2 lentelėje.

4.2 lentelė. Stabdymui naudojamo dažnio keitiklio parametrai

Table 4.2. Parameters of frequency inverter of brake system

Pavadinimas	SIEMENS Micromaster Vector					Stabdis		
Parametras	U , V	P_e , kW	I , A	$I_{i\bar{s}}$, A	f_{dk} , Hz	P_e , W	R_{st} , Ω	U , Vdc
Vertė	400	3,0	11,1	7,7	0-650	150	200	900

Norint išmatuoti momentą ir greitį, tarp variklių sumontuojamas momento matuoklis, kurio pagrindiniai parametrai pateikti 4.3 lentelėje. Momento matuoklis turi analoginį išėjimo signalą, proporcingą matuojamam momentui, todėl prijungus oscilografą galima gauti pereinamojo vyksmo kreivę. Momento matuoklis taip pat turi impulsinį išėjimo signalą, kurio dažnis proporcingas sukimosi dažniui. Matuojant impulsų dažnį sunku spręsti apie variklio greičio pereinamuosius vyksmus, todėl papildomai sukonstruojamas dažnio-įtampos keitiklis, kurio konstravimas bus aprašytas kitame poskyryje. Matuojant keitiklio išėjimo įtampą galima gauti greičio pereinamuosius vyksmus.

4.3 lentelė. Momento matuoklio parametrai

Table 4.3. Parameters of torque sensor

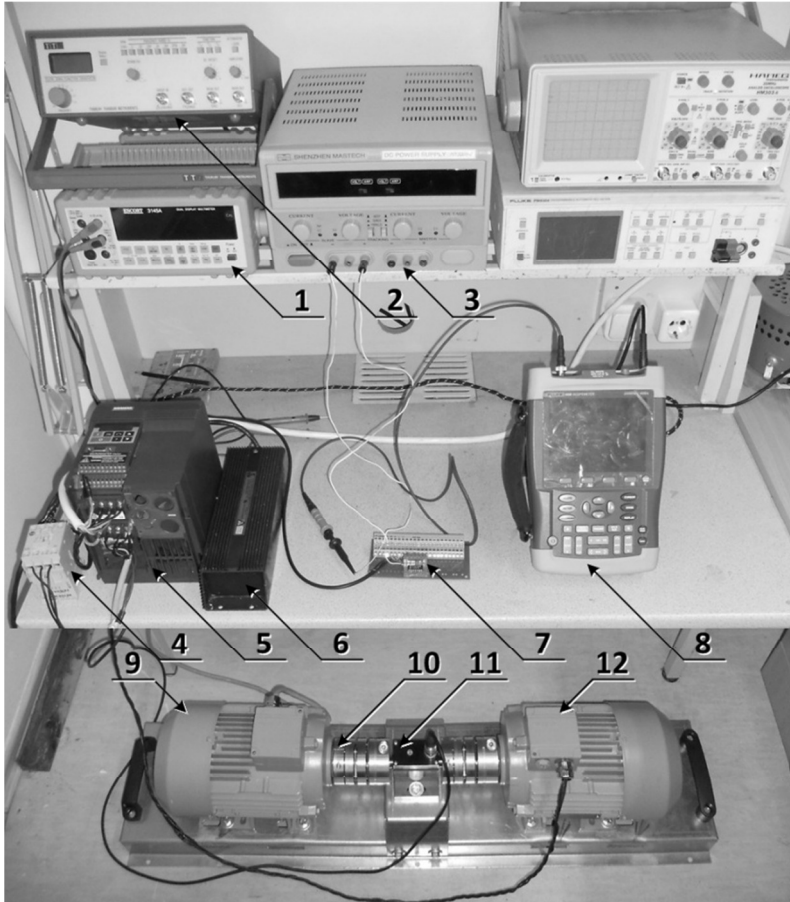
Pavadinimas	Lorenz Messtechnik DR-2212	
Tikslumo klasė	% v. E. - f. s.	0,1
Pakartojamumas (DIN 1319)	%	$\pm 0,02$
Maitinimo įtampa	V DC	12 ... 28
Išėjimo signalas	mA	0 ... ± 5 V
Temperatūros diapazonas	$^{\circ}\text{C}$	+5 ... +45
Matavimo diapazonas	N·m	20
Kampo valdymo 360 impulsų per apsisukimą, 2 takeliai perstumti 90°	CH A  CH B 	CW-sukimas
Kampo impulsų išėjimo signalas	V DC	0 ... ± 10

Kadangi sunku sumontuoti abu variklius ir momento matuoklį taip, kad jų velenų ašys būtų vienoje tiesėje, momento matuoklio ir variklių velenai sujungiami dvigubo jungimo precizinėmis movomis. Naudojamos movos turi mažą tamprumą, o laisvumą galima visai paneigti.

Atskirą eksperimentinio stendo dalį sudaro universalus maitinimo šaltinis ir matavimo prietaisai. Maitinimo šaltinis aprūpina energija momento matuoklį ir

greičio matavimo prietaisą. Pereinamieji vyksmai matuojami elektroniniu oscilografu „Fluke 199B“.

Sumontuotas bandomasis stendas parodytas 4.2 paveiksle.



4.2 pav. Dvimasės sistemos eksperimentinio stendo vaizdas

Fig. 4.1. View of two-mass system experimental stand

čia 1 – multimetras; 2 – dažninis impulsų generatorius; 3 – maitinimo įtampos šaltinis; 4 – kontaktorius; 5 – dažnio keitiklis; 6 – stabdymo varža; 7 – greičio matavimo prietaisas; 8 – oscilografas „Fluke 199B“; 9 – pagrindinis variklis – pirmoji masė; 10 – dvigubo jungimo movos; 11 – momento matuoklis; 12 – apkrovos variklis – antroji masė.

4.2. Greičio matavimo prietaiso konstravimas

Greičiui matuoti naudojamas vienas iš momento matuoklio kampo TTL (angl. *Transistor-Transistor Logic*) signalų, pasirenkamas A signalas. Iš momento matuoklio aprašymo žinoma, kad velenui apsisukus vieną kartą, suformuojami 360 impulsų. Norint matuoti greitį, reikia sukonstruoti signalų keitiklį, dažnį keičiantį į įtampą. Tam naudojama speciali mikroschema LM2907N.

Kai yra žinomas variklio sinchroninis greitis ir impulsų kiekis per apsisukimą, paskaičiuojamas impulsų dažnis varikliui sukantis sinchroniniu greičiu:

$$f_s = \frac{n_s}{60} \cdot n_A = \frac{1500}{60} \cdot 360 = 9000 \text{ Hz}, \quad (4.1)$$

čia f_s – dažnis, kai variklis sukasi sinchroniniu greičiu; n_s – variklio sinchroninis greitis apsisukimais per minutę; n_A – kanalo A impulsų kiekis per apsisukimą.

Projektuojant reikia įvertinti, kad pereinamojo vyksmo metu ar atliekant sudėtingesnius bandymus galimas variklio pagreitis, todėl reikalinga išėjimo signalo atsarga, kad būtų galima matuoti didesnę už sinchroninį greitį. Priimama, kad pakankama atsarga bus pusantro karto padidinus sinchroninį dažnį. Naudojamos mikroschemos maitinimo įtampa yra $V_{cc}=15 \text{ V}$. Remiantis mikroschemos aprašymu, žinoma, kad didžiausias išėjimo signalas taip pat gali būti $V_{maks}=15 \text{ V}$. Didžiausias matuojamas dažnis f_{maks} apskaičiuojamas pagal pageidaujamą atsargos vertę sinchroniniam dažniui:

$$f_{maks} = 1,5 \cdot f_s = 1,5 \cdot 9000 = 13500 \text{ Hz}, \quad (4.2)$$

Keitiklio plokštė sukonstruojama pagal schemą, parodytą 4.3 paveiksle.

Parenkant kondensatorių $C1$ ir varžą $R1$, suderinama mikroschema reikiamam dažniui. Remiantis mikroschemos aprašyme pateiktomis rekomendacijomis, pasirenkamas kondensatoriaus nominalas $C1=0,1 \text{ nF}$. Pagal pateiktą formulę apskaičiuojama varžos vertė pageidaujamam dažniui matuoti:

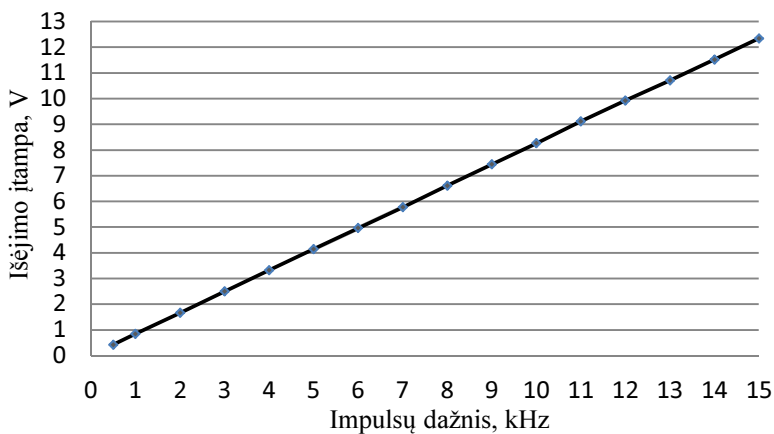
$$R1 = \frac{1}{f_{maks} \cdot C1} = \frac{1}{13500 \cdot 1 \cdot 10^{-10}} = 740 \text{ k}\Omega, \quad (4.3)$$

Elementai $R3$ ir $C3$ naudojami įėjimo signalo trikdžiams filtruoti. Elementais $R4$, $R5$ nustatomas mikroschemos komparatoriaus įtampos lygis, kuriam esant identifikuojamas įėjimo impulsas.

4.3 lentelė. Greičio matavimo prietaiso bandymų rezultatų lentelė**Table 4.3.** The table of test results of speed measuring device

Parametras	f , kHz	$U_{i\dot{s.}}$, V	ω , rad/s	n , aps/min	f , kHz	$U_{i\dot{s.}}$, V	ω , rad/s	n , aps/min
Vertė	0,5	0,42	8,7	83,3	8	6,61	139,6	1333,3
	1	0,84	17,4	166,7	9	7,44	157,0	1500,0
	2	1,66	34,9	333,3	10	8,26	174,4	1666,7
	3	2,49	52,3	500,0	11	9,11	191,9	1833,3
	4	3,32	69,8	666,7	12	9,92	209,3	2000,0
	5	4,14	87,2	833,3	13	10,7	226,8	2166,7
	6	4,96	104,7	1000,0	14	11,52	244,2	2333,3
	7	5,77	122,1	1166,7	15	12,34	261,7	2500,0

čia f – momento matuoklio išėjimo dažnis; $U_{i\dot{s.}}$ – keitiklio išėjimo įtampa;
 ω – kampinis greitis; n – sukimosi dažnis apsisukimais per minutę.

**4.4 pav.** Greičio matavimo prietaiso charakteristika**Fig. 4.4.** Characteristic of speed measuring device

Iš gautų rezultatų matyti, kad didžiausias matuojamas dažnis yra didesnis nei planuota. Matuojamas greitis skaičiuojamas pagal pateiktą išmatuotą įtampą priklausomybę nuo dažnio. Norimame dažnių diapazone išėjimas yra tiesinis, todėl keitiklis tinkamas matuoti greitį bandymų stende.

4.3. Eksperimentinės dinaminės charakteristikos

Mokslinio darbo metu atlikti tyrimai eksperimentiniu stendu. Kaip buvo minėta, pirmasis (pagrindinis) variklis jungiamas tiesiai į elektros tinklą. Tiriamasis variklis jungiamas kontaktoriumi, kad būtų užtikrintas greitas įjungimas. Prie antrojo variklio prijungtas dažnio keitiklis su stabdymo rezistoriumi. Antrasis variklis suderintas taip, kad suktųsi į priešingą pusę negu pirmasis variklis. Dažnio keitikliu nustatoma skirtinga įtampos dažnio vertė, taip keičiamas sukuriamas apkrovos momentas.

Pirmaisiais bandymais tiriami pagrindinio variklio įjungimo pereinamieji vyksmai. Šiuo atveju antrasis variklis jau sukasi dažnio keitikliu nustatytu pastoviu greičiu priešinga kryptimi nei pradės suktis įjungiamas pirmasis variklis. Atliekami keli bandymai su skirtingu antrojo variklio greičiu. Greitis keičiamas dažnio keitikliu nustatant tokius įtampos dažnius: 0 Hz, 10 Hz, 20 Hz, 30 Hz. Nustatyti dažniai atitinka 0 N·m, 2,2 N·m, 5,3 N·m, 7 N·m apkrovą. Bandymas, kai antrojo variklio įtampos dažnis lygus 0 Hz, yra neapkrautos dvimės sistemos bandymas. Šiuo atveju pereinamajam vyksmui įtakos turi tik antrosios masės inercijos momentas. Bandymų metu gaunamos momento ir greičio matuoklių išėjimų įtampų charakteristikos. Pasinaudojus oscilografo kompiuteriniu programiniu paketu, bandymų grafikai pakeičiami į laike išmatuotų atskirų taškų vertes.

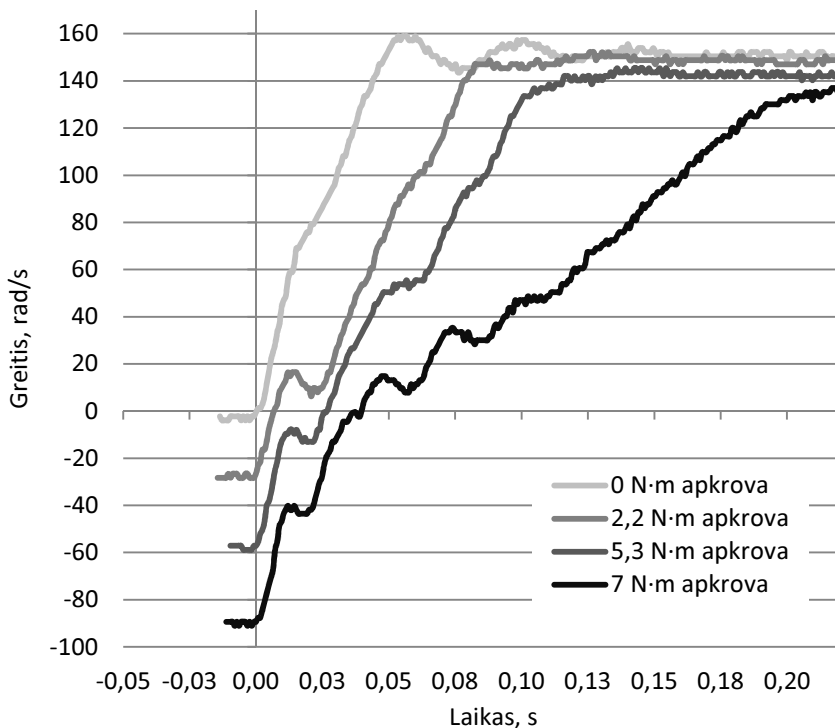
Momento matuoklio išėjimo įtampa išreiškiama niutonais į metrą. Remiantis 4.3 lentele, žinoma, kad matuoklio matavimo diapazonas yra 20 N·m, tai atitinka didžiausią išėjimo įtampą 5 V. Kiekvieną įtampos charakteristikos taško vertę padalinus iš didžiausios galimos išėjimo įtampos ir padauginus iš matavimo diapazono vertės, gaunama išraiška niutonais į metrą. Turimi greičio matavimų duomenys išreikšti variklio greičiui proporcinga įtampa. Pagal (4.4) lygtį, duomenys perskaičiuojami radianais per sekundę. Pasinaudojus programiniu paketu *Microsoft® Excel®*, nubraižomi grafikai.

Palyginti greičio pereinamieji vyksmai pavaizduoti 4.5 paveiksle.

Analizuojant kreives matyti, kad įjungimo metu pradinis antrosios masės (antrojo variklio) greitis yra nusistovėjęs. Reikia pastebėti, kad greičio matavimo prietaisas nėra pritaikytas nustatyti sukimosi kryptį, todėl greitis visuomet gaunamas teigiamas. Remiantis pereinamųjų vyksmų korektiškumu, antrojo variklio greitis užrašomas su neigiamu ženklu.

Pagrindinio variklio įjungimo metu matoma, kaip pradėdama stabdyti antroji masė kol pasiekiamas nulis. Tuomet pasikeičia sukimosi kryptis ir pradeda dominuoti pirmasis variklis. Gautą kreivę, kai apkrova yra 0 N·m, palyginus su 3.1 poskyryje gautomis imitacijų kreivėmis ir atsižvelgus į greičio kitimo charakterį, matomas didelis panašumas su vienas sistemos imitaciniais rezultatais, ypač nusistovėjus greičiui. Eksperimento metu gautoje

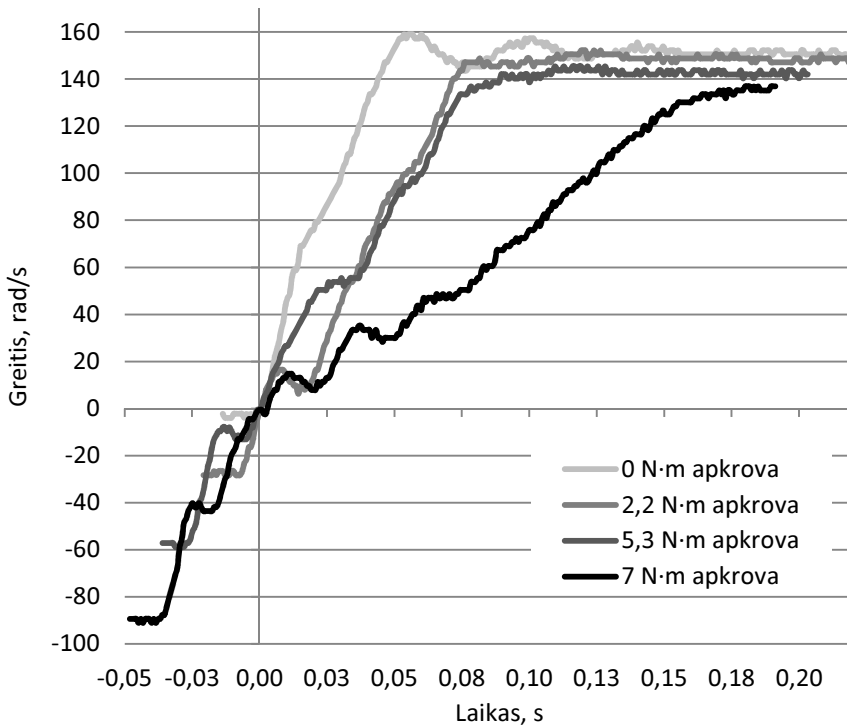
variklio greičio pereinamojo vyksmo kreivėje matomas švytavimas. Dėl jo pereinamasis vyksmas panašus į imitacijomis gautą tampriosios dvimasis sistemos greičio pereinamąjį vyksmą. Šį panašumą lemia dvimasis sistemos masių jungties tamprumas. Naudojamos precizinės movos su mažu tamprumu ir laisvumu, todėl šie švytavimai yra maži.



4.5 pav. Dvimasis sistemos variklio greičio eksperimentinių pereinamųjų vyksmų palyginimas esant skirtingoms apkrovoms

Fig. 4.5. Comparison of speed values of induction motor in experimental two-mass system with different load

Analizuojant apkrovos įtaką greičio pereinamajam vyksmui, verta tas pačias kreives palyginti laiko atskaitos metu, pagrindiniam varikliui pradėjus sukintis nustatyta kryptimi. Taip paprasčiau lyginti su imitaciniais rezultatais, kadangi imitacijų metu pereinamasis vyksmas prasidėdavo nuo nulinės reikšmės koordinatų sistemoje. Šis palyginimas pateiktas 4.6 paveiksle.

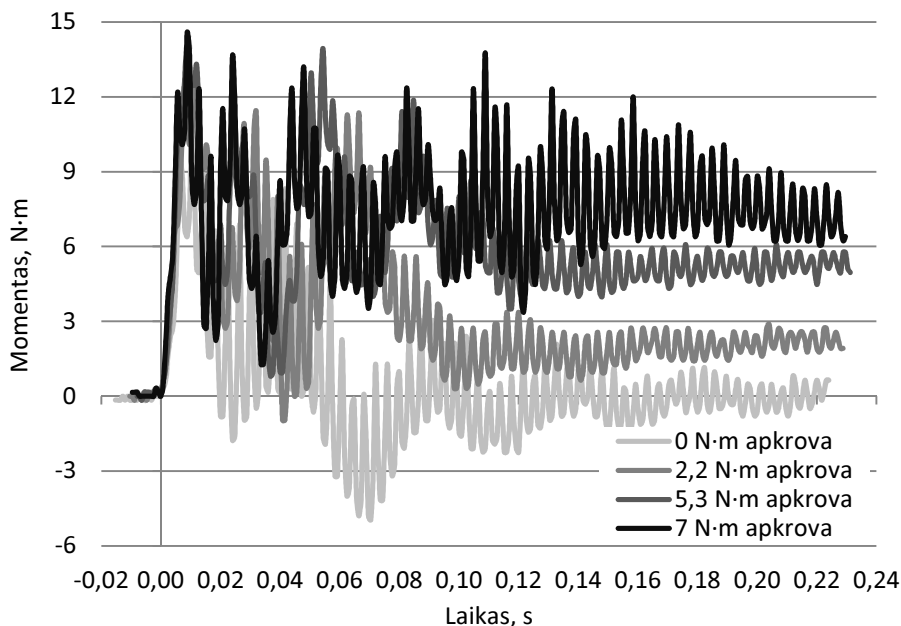


4.6 pav. Dvimasės sistemos variklio greičio eksperimentinių pereinamųjų vyksmų palyginimas esant skirtingoms apkrovoms

Fig. 4.6. Comparison of speed values of induction motor in experimental two-mass system with different load

Remiantis šiuo palyginimu, matoma, kad didinant apkrovą ilgėja pereinamasis laikas, kuris, esant didžiausiai apkrovai, lygus 0,19 s. Didinant apkrovą, mažėja pasiekiamas greitis, kurio vertė, esant didžiausiai apkrovai, 7,4 % mažesnė už asinchroninį greitį. Įjungimo metu didėja švytavimai, tačiau, pasiekus nominalųjį greitį, švytavimai sumažėja. Bandymu, kai apkrova lygi 0 N·m, greičio vertė 6,8 % viršija asinchroninį greitį. Ši įtaka buvo pastebėta atliekant imitacinius bandymus 3.2 poskyryje. Tai galimai atsitinka dėl masių jungties tamprumo. Antroji masė yra variklio apkrova, todėl keičiant apkrovą, gauname režimą, kuriame esamas tamprumas turi švytavimų mažinimo efektą.

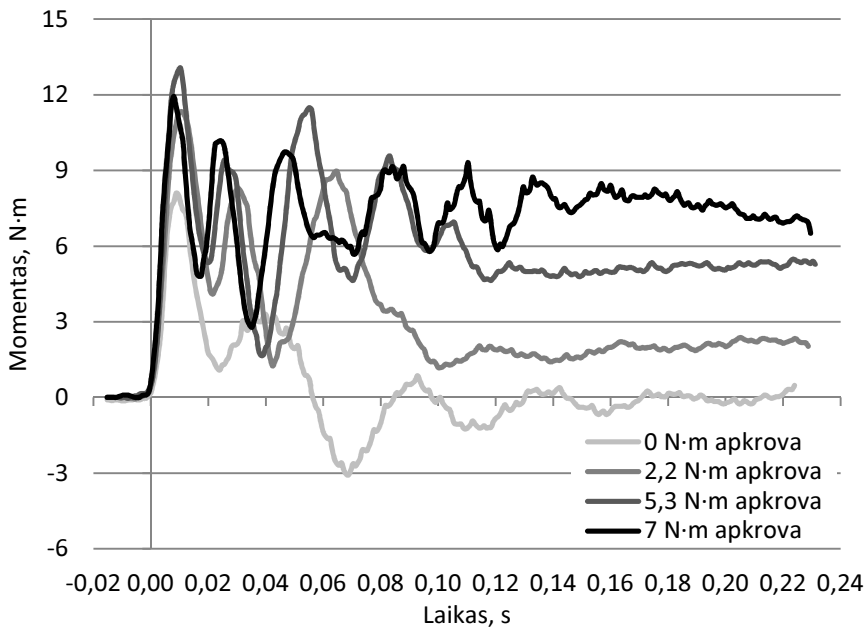
Momento pereinamųjų vyksmų palyginimas, esant toms pačioms apkrovoms, pavaizduotas 4.7 paveiksle.



4.7 pav. Dvimasės sistemos variklio momento eksperimentinių pereinamųjų vyksmų palyginimas esant skirtingoms apkrovoms

Fig. 4.7. Comparison of torque values of induction motor in experimental two-mass system with different load

Lyginant momento pereinamųjų vyksmų kreives, matoma, kad pasibaigus bandymui, kai apkrova lygi $0 \text{ N}\cdot\text{m}$, momento pereinamasis vyksmas priartėja prie nulio. Kitų bandymų metu momentas nusistovi ties apkrovos momento verte. Esant kitoms apkrovoms, pereinamojo vyksmo metu matomi ilgesni gęstantys periodiniai švytavimai, nors didžiausia vertė daug nesiskiria. Eksperimento metu gautos momento kreivės, dėl dažnio keitiklio skleidžiamų trikdžių, turi aukštadažnių impulsų dedamąsias, kurios nebuvo gautos imitacijų metu. Eksperimentinėse kreivėse jos matomos periodiniais švytavimais. Norint tiksliau palyginti gautus rezultatus su imitaciniais rezultatais, šiuos periodinius švytavimus būtina suapvalinti. Kaip aukščiau minėta, matavimų charakteristikos pakeistos į laike išmatuotų atskirų taškų vertes, todėl kiekvieno taško vertė apvalinama pridodant prie jos po du gretimus taškus ir padalinus iš jų skaičiaus. Taip gaunami suapvalinti momento pereinamieji vyksmai, pateikti 4.8 paveiksle.



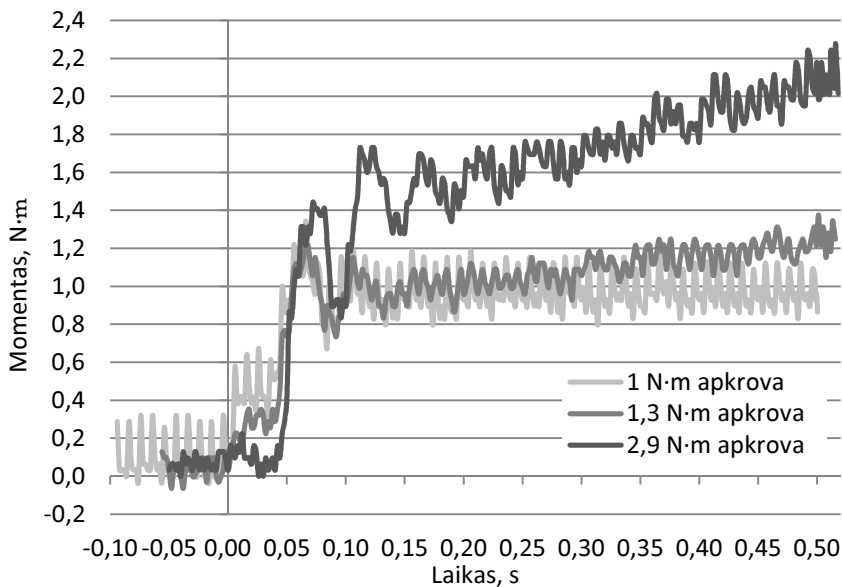
4.8 pav. Dvimasės sistemos variklio momento suapvalintų eksperimentinių pereinamųjų vyksmų palyginimas esant skirtingoms apkrovoms

Fig. 4.8. Comparison of torque rounded values of induction motor in experimental two-mass system with different load

Šiame paveiksle geriau matomi švytavimai ir nusistovinti vertė pereinamojo vyksmo metu. Bandymo metu, kai apkrova lygi 7 N·m, momentas nusistovi netoli didžiausios švytavimų vertės, tai reiškia, kad priartėta prie didžiausios galimos apkrovos. Lyginant su imitaciniais rezultatais, pateiktais 3.23 paveiksle, matoma, kad didžiausios pereinamųjų vyksmų momento vertės skiriasi. Tai galima paaiškinti tuo, kad imitaciniais bandymais gaunamas sukuriamas elektromagnetinis momentas, o eksperimentų metu gauti duomenys yra apkrovos sukuriamas momentas, taip pat imitacinis modelis sudaromas neįvertinant variklio parametrų paklaidos. Atliekant tyrimus ar lyginant imitacinius ir eksperimentinius rezultatus, svarbu suvokti ir išsiaiškinti momento kitimo pobūdį ir jam turimą įtaką skirtingais veikimo režimais. Todėl, norint pagerinti pereinamąjį vyksmą, pritaikius įvairias valdymo priemones imitacijoms ir gavus pageidautinus rezultatus, tikėtina, kad tie patys principai padarys tą patį poveikį realioms sistemoms.

Tolimesni bandymai atliekami pirmąjį variklį įjungus tiesiai į elektros tinklą ir įsukus jį asinchroniniu greičiu. Prie antrojo variklio, kaip ir pirmųjų bandymų metu, prijungtas dažnio keitiklis. Keičiant įtampos dažnį sukuriamas apkrovos

momentas. Tokiu būdu yra stabdomas pirmasis variklis. Greičio pokytį išmatuoti yra labai sunku, kadangi, lyginant su asinchroniniu variklio greičiu, pokyčio vertė yra labai maža, todėl bandymų metu matuojamas tik momentas. Palyginti momento pereinamieji vyksmai, esant skirtingoms antrojo variklio dažnio nuostatoms, pavaizduoti 4.9 paveiksle.

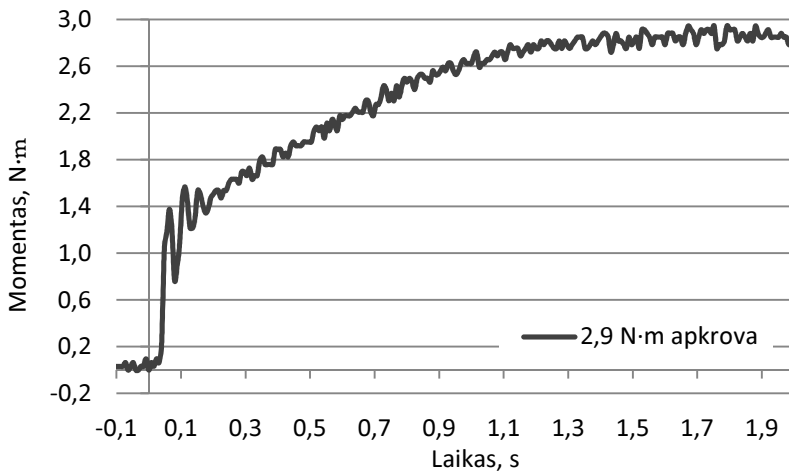


4.9 pav. Dvimasės sistemos variklio momento eksperimentinių pereinamųjų vyksmų palyginimas esant skirtingoms apkrovoms

Fig. 4.9. Comparison of torque values of induction motor in experimental two-mass system with different load

Atliekami bandymai su trimis apkrovomis: 1 N·m apkrova, kai antrojo variklio nustatytas įtampos dažnis 5 Hz; 1,3 N·m apkrova, įtampos dažnis 7 Hz; 2,9 N·m apkrova, įtampos dažnis 9 Hz. Bandymų su didesne apkrova atlikti negalima, nes naudojamas dažnio keitiklis turi srovės apsaugą, daugiau padidinus apkrovą, suveikia dažnio keitiklio automatinė atjungimo sistema.

Palyginus kreives, įjungimo metu matomi nedideli momento švytavimai. Didinant apkrovą, jie nežymiai didėja dėl dažnio keitiklyje esančių apribojimų. Bandymo metu, kai apkrova lygi 2,9 N·m, matomas tolygus momento augimas. Padidinus matavimo prietaiso laiko intervalą, gaunama, kad momentas nusistovi per ~1 s. Bandymo kreivė pavaizduota 4.10 paveiksle.



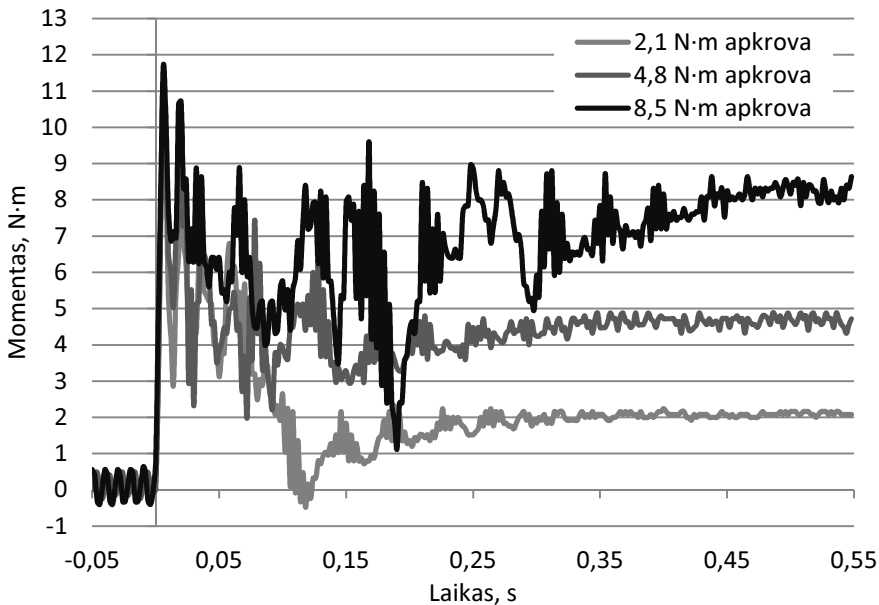
4.10 pav. Dvimasės sistemos variklio momento eksperimentinis pereinamasis vyksmas
Fig. 4.10. Torque value of induction motor in experimental two-mass system

Momento nusistovėjimo trukmė priklauso nuo dažnio keitiklio veikimo principo. Remiantis bandymu, matoma, kad dažnio keitiklis turi tolygaus momento didinimo funkciją. Šis eksperimentinis bandymas neatitinka nei vieno imitacinio bandymo, nes nebuvo modeliuota su tolygiai didėjančia apkrova. Įjungimo metu momentas neviršija nustatytos apkrovos, todėl tolygiai didėjanti apkrova ženkliai pagerina momento pereinamąjį vyksmą. Apkrovos dydžiu šis bandymas yra panašus į anksčiau atliktą, kurio rezultatai pateikti 4.7 paveiksle, kai apkrova lygi 2,2 N·m. Palyginus šias kreives, matomas skirtumas: pastaruoju bandymu įjungimo metu didžiausias momentas sumažėjo apie 7 kartus, tačiau apie 9 kartus pailgėjo pereinamojo vyksmo trukmė. Šie skirtumai yra dėl dažnio keitiklio veikimo algoritmo. Reikia paminėti, kad šiais bandymais ženkliai skiriasi sukuriamas apkrovos momentas, nors dažnio keitiklyje nustatytas panašus dažnis. Taip yra dėl skirtingo dažnio keitiklio veikimo režimo.

Kiti bandymai atliekami pakeitus antrojo (apkrovos) variklio maitinimo grandinę. Anksčiau atliktų bandymų metu apkrovos momentas buvo kuriamas dažnio keitikliu keičiant maitinimo įtampos dažnį. Kitais bandymais apkrovos momentas bus kuriamas keičiant antrojo variklio maitinimo įtampą. Sujungiama speciali variklio maitinimo grandinė, kuri susideda iš trijų autotransformatorių ir greitą paleidimą užtikrinančio kontaktoriaus. Autotransformatoriais nustatoma kiekvienos fazės įtampa. Atliekami keli bandymai su skirtingomis antrojo variklio maitinimo įtampomis. Kiekvienai fazei nustatoma 100 V, 150 V, 200 V įtampa. Nustatytos įtampos atitinka 2,1 N·m, 4,8 N·m, 8,5 N·m apkrovą. Pasinaudojus oscilografo kompiuteriniu programiniu paketu, bandymų grafikai

pakeičiami į laike išmatuotų atskirų taškų vertes. Remiantis aukščiau pateiktu aprašu, greičio ir momento matuoklių įtampų vertės perskaičiuojamos į variklio sukimosi greitį radianais per sekundę ir momentą niutonais į metrą. Pasinaudojus programiniu paketu *Microsoft® Excel®*, nubraižomi grafikai.

Atliekami variklio įjungimo bandymai esant skirtingoms antrojo variklio maitinimo įtampoms, kas atitinka skirtingą sukuriamą apkrovos momentą. Šių bandymų metu antrasis variklis sukasi maitinamas nustatyta įtampa, o pirmasis variklis kontaktoriumi įjungiamas į elektros tinklą. Antrojo variklio maitinimo įtampa mažesnė, todėl sukuriamas apkrovos momentas įveikiamas pirmojo variklio ir pirmasis variklis pradeda sukis nustatyta kryptimi. Gautų momento pereinamųjų vyksmų palyginamas pavaizduotas 4.11 paveiksle.



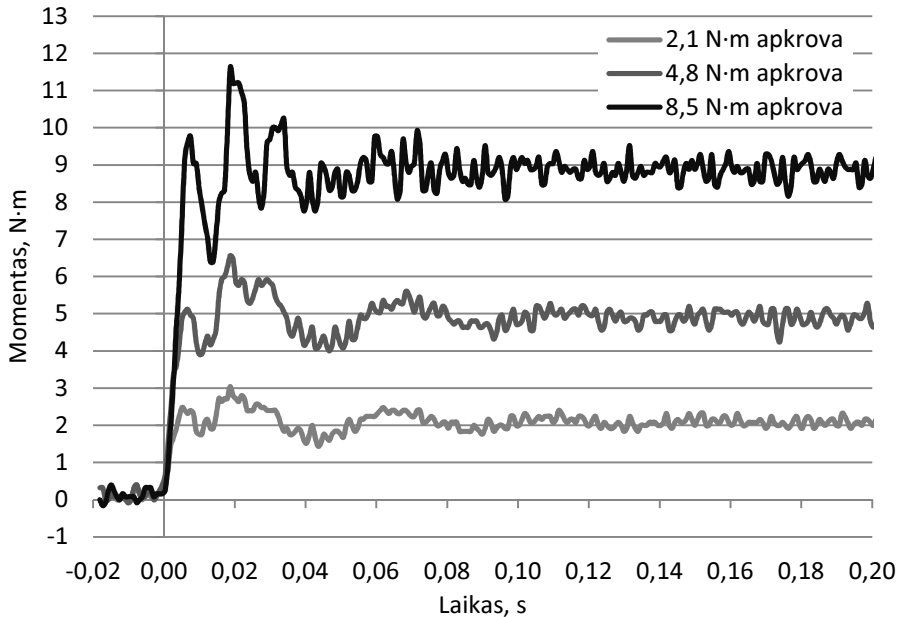
4.11 pav. Dvimasės sistemos variklio momento eksperimentinių pereinamųjų vyksmų palyginimas esant skirtingoms apkrovoms

Fig. 4.11. Comparison of torque values of induction motor in experimental two-mass system with different load

Atlikus kreivių analizę, matoma, kad visais atvejais įjungimo metu momentas pasiekia panašią didžiausią vertę, tačiau tolimesnis momento kitimas priklauso nuo apkrovos dydžio. Didinant apkrovą, pereinamo vyksmo laikas ilgėja, matomi ilgiau trunkantys švytavimai. Trečiuoju bandymu, kai apkrova lygi 8,5 N·m, matoma ilgiausia pereinamojo laiko trukmė, kuri lygi 0,5 s. Ilgesnį laiko trukmę visais atvejais lemia tai, kad pirmajam varikliui reikia

įveikti antrojo variklio sukimasi priešinga kryptimi. Šiuo atveju pereinamasis vyksmas trunka ilgiau lyginant su atveju, jei apkrovos momentas būtų statinis.

Kiti bandymai atliekami pirmąjį variklį įjungus į elektros tinklą ir įsukus asinchroniniu greičiu. Pasirinktu laiko metu įjungiamas antrasis variklis su nustatyta maitinimo įtampa. Bandymas atliekamas tris kartus su tokiomis pačiomis aukščiau aprašytomis įtampų vertėmis atitinkančiomis apkrovoms. Gautų momento pereinamųjų vyksmų palyginamas pavaizduotas 4.12 paveiksle.

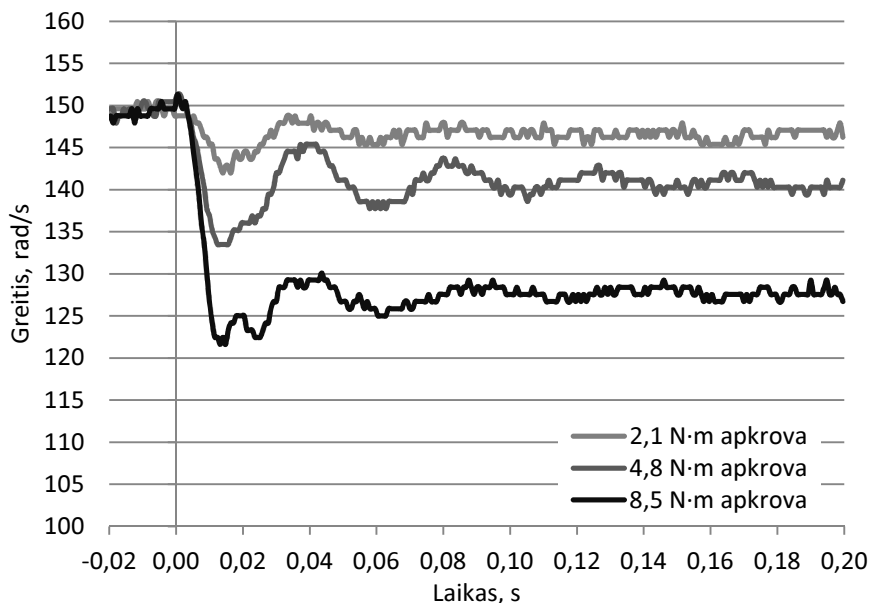


4.12 pav. Dvimasės sistemos variklio momento eksperimentinių pereinamųjų vyksmų palyginimas esant skirtingoms apkrovoms

Fig. 4.12. Comparison of torque values of induction motor in experimental two-mass system with different load

Remiantis bandymo rezultatais matoma, kad didinant apkrovą, didėja švytavimų amplitudė, pailgėja pereinamojo vyksmo trukmė. Momentas nusistovi antrojo variklio sukuriama apkrovos momento vertėje. Bandymo metu, kai apkrova yra didžiausia ir lygi 8,5 N·m, gaunamas didžiausias momento šuolis, kurio vertė 35,3 % didesnė už apkrovos momentą.

Gautų greičio pereinamųjų vyksmų palyginimas pavaizduotas 4.13 paveiksle.



4.13 pav. Dvimasės sistemos variklio greičio eksperimentinių pereinamųjų vyksmų palyginimas esant skirtingoms apkrovoms

Fig. 4.13. Comparison of speed values of induction motor in experimental two-mass system with different load

Atlikus kreivių analizę, matoma, kad įjungimo metu greitis per 0,013 s pasiekia mažiausią vertę, kuri lygi 122 rad/s, o nusistovėjusi vertė 15,3 % mažesnė už asinchroninį greitį. Esant net nedidelei apkrovai, greitis yra mažesnis už asinchroninį. Greičio skirtumas nuo asinchroninio greičio yra tuo didesnis, kuo didesnė apkrova. Remiantis bandymu, kai apkrova lygi 4,8 N·m, matomas ilgiausias pereinamasis vyksmas, lygus 0,18 s, didžiausia greičio švytavimo amplitudė. Švytavimus lemia masių jungties tamprumas ir antrosios masės inercijos momentas, turintys didesnės įtakos esant tam tikrai apkrovai. Šis bandymas patvirtina imitacijų metu pastebėtą tamprumo poveikį pereinamiesiems vyksmams esant skirtingoms apkrovoms.

4.4. Ketvirtojo skyriaus išvados

Palyginus dvimasės elektromechaninės sistemos imitacinius ir eksperimentinius rezultatus, nustatyta, jog darbe sukurtų kompiuterinių modelių imitacijos atitinka gautas eksperimentines charakteristikas. Modeliai gali būti

naudojami nevaldomų ir valdomų dvimasių sistemų dinaminį procesų analizei, keičiant apkrovos pobūdį ar modelio parametrus.

1. Sudarytas eksperimentinis stendas leidžia tirti dvimės sistemos dinaminį procesą imituojant skirtingus veikimo režimus, keičiant antrosios masės apkrovą ar jos pobūdį. Sukonstruotas greičio matavimo prietaisas leidžia matuoti variklio veleno sukimosi dinaminį greitį. Didelis impulsų kiekis per veleno apsisukimą (lygus 360 impulsų) leidžia vieno laipsnio tikslumu matuoti dinaminį procesą.
2. Remiantis eksperimentų rezultatais patvirtintas imitacijų metu gautų greičio pereinamųjų vyksmų dinaminis kitimas esant skirtingoms apkrovoms, patvirtinta masių jungties tamprumo daroma įtaka. Didėjant apkrovai, ilgėja pereinamojo vyksmo trukmė ir mažėja pasiekiamas greitis, taip pat pereinamojo vyksmo pradžioje, dėl masių jungties tamprumo, didėja švytvimų amplitudė. Esant didžiausiai bandytai apkrovai pereinamasis vyksmas trunka 0,19 s., greičio nusistovėjusi vertė yra 7,4 % mažesnė už asinchroninį greitį.
3. Remiantis momento eksperimentiniais rezultatais, nustatytas pereinamųjų vyksmų panašumas trukme ir gėstančiais periodiniais švytvimais į gautus imitacijų metu. Momento pereinamųjų vyksmų amplitudės skiriasi dėl momento išraiškos: imitaciniuose rezultatuose gaunamas sukuriamas elektromagnetinis momentas, o eksperimentiniuose rezultatuose gaunamas apkrovos momentas; ši skirtumą taip pat lemia imitacinio modelio parametrų paklaidos.
4. Didinant apkrovą, didžiausia momento vertė variklio įjungimo metu pastebimai nedidėja, tačiau ilgėja gėstančių periodinių švytvimų laikas. Panaudojus valdomą apkrovą, kai apkrova yra tolygiai didinama, matomi žymiai mažesni švytvimai – didžiausia momento vertė sumažėjo apie 7 kartus, tačiau pereinamojo vyksmo laikas pailgėjo apie 9 kartus.
5. Įjungus apkrovą kai variklio greitis nusistovėjęs, variklio greitis sumažėja, pasiekiamas greičio vertė priklauso nuo apkrovos momento dydžio. Esant didžiausiai bandytai apkrovai, greičio vertė yra 15,3 % mažesnė už asinchroninį greitį. Pereinamojo vyksmo laikas priklauso nuo apkrovos dydžio. Ilgiausia trukmė yra lygi 0,18 s ir pasiekiamas esant 4,8 N·m apkrovai.
6. Remiantis bandymų, kurių metu įjungiamas skirtinga apkrova, rezultatais, matoma, kad esant 4,8 N·m apkrovai gaunamas ilgesnis greičio pereinamojo vyksmo laikas, lyginant su charakteristikomis esant mažesnei ir didesnei apkrovai. Tai lemia masių jungties tamprumas, darantis didžiausią poveikį esant tam tikrai apkrovai.

Bendrosios išvados

1. Sudarius asinchroninių variklių imitacinius modelius stacionarioje ir besisukančioje koordinačių sistemose, gauti kampinio greičio ir momento pereinamieji vyksmai. Remiantis pereinamųjų veiksmų analize, galima teigti, kad pereinamojo vyksmo metu kreivės yra švytuojamojo pobūdžio, greičio didžiausios vertės viršija nominaliąsias 11,5–18 %, momento didžiausios vertės viršija nominaliąsias 6,5–8,5 karto, tai gali turėti neigiamą įtaką projektuojamoms sistemoms.
2. Sudarius ir ištyrus tampriosios dvimasės elektromechaninės sistemos su laisvumu imitacinį modelį, nustatytos tamprumo ir laisvumo priklausomybės. Standumui esant $C_{12}=150 \text{ N}\cdot\text{m/rad}$, pasiekiamas didžiausias variklio kampinis greitis, 37 % viršijantis nominalųjį variklio greitį. Tokį variklio greičio šuolį lėmė jungties tamprumas. Didžiausio greičio vertė didėja proporcingai laisvumui ir, esant laisvumui nuo -25 iki 25, 62,5 %, viršija nominaliąją vertę. Laisvumui viršijus minėtą tašką, didžiausias pasiekiamas greitis pradeda mažėti.
3. Vektorinis valdymas, sudarytoje dvimasės elektromechaninės sistemos su asinchroniniu varikliu imitaciniame modelyje, sutrumpina sistemos greičio pereinamąjį vyksmą iki 0,06 s. Jo metu nėra periodinių švytavimų ir greičio šuolių. Lyginant su nevaldoma sistema,

pereinamojo vyksmo trukmė sumažėjo iki 5 kartų. Valdomoje sistemoje didžiausias pasiekiamas momentas yra iki 4 kartų mažesnis, lyginant su nevaldoma sistema.

4. Kintant apkrovai, sudarytas dvimasės elektromechaninės sistemos, valdomos neraiškiosios logikos reguliatoriumi, imitacinis modelis palaiko greičio pereinamuosius vyksmus be periodinių švytavimų ir greičio šuolių. Lyginant su nevaldoma sistema, greičio pereinamasis vyksmas trunka iki 2 kartų trumpiau, variklio didžiausias momentas yra 40 % mažesnis. Neraiškūs valdymas dvimasėse sistemose leidžia pasiekti tokius greičio pereinamuosius vyksmus, kuriems apkrova beveik neturi įtakos. Sistemoje su dideliu tamprumu momento pereinamasis vyksmas turi iki 2,5 karto mažesnę švytavimų amplitudę.
5. Sistemų su vektorinio valdymo ir neraiškiosios logikos reguliatoriais pereinamųjų vyksmų trukmės, didžiausios vertės ir gėstančių periodinių švytavimų kokybės rodikliai yra geresni negu nevaldomų sistemų.
6. Remiantis eksperimentų rezultatais patvirtintas imitacijų metu gautų greičio pereinamųjų vyksmų dinaminis kitimas esant skirtingoms apkrovoms, patvirtinta masių jungties tamprumo daroma įtaka. Didėjant apkrovai, ilgėja pereinamojo vyksmo trukmė ir mažėja pasiekiamas greitis. Esant didžiausiai bandytai apkrovai pereinamasis vyksmas trunka 0,19 s, greičio nusistovėjusi vertė yra 7,4 % mažesnė už asinchroninį greitį. Įjungus apkrovą kai variklio greitis nusistovėjęs, pasiekama mažesnė greičio vertė priklauso nuo apkrovos momento dydžio. Esant didžiausiai bandytai apkrovai, pasiekama greičio vertė yra 15,3 % mažesnė už asinchroninį greitį. Ilgiausia pereinamojo vyksmo trukmė yra lygi 0,18 s ir pasiekama esant 4,8 N·m apkrovai.
7. Remiantis momento eksperimentiniais rezultatais, nustatytas pereinamųjų vyksmų panašumas trukme ir gėstančiais periodiniais švytavimais į gautus imitacijų metu. Didinant apkrovą, ilgėja gėstančių periodinių švytavimų laikas. Panaudojus valdomą apkrovą, kai apkrova yra tolygiai didinama, matomi žymiai mažesni švytavimai – didžiausia momento vertė sumažėjo apie 7 kartus, tačiau pereinamojo vyksmo laikas pailgėjo apie 9 kartus. Remiantis bandymų, kurių metu įjungiamo skirtinga apkrova, rezultatais, matoma, kad esant 4,8 N·m apkrovai gaunamas ilgesnis greičio pereinamojo vyksmo laikas, lyginant su charakteristikomis esant mažesnei ir didesnei apkrovai. Tai lemia masių jungties tamprumas, darantis didžiausią poveikį esant tam tikrai apkrovai.

Literatūros sąrašas

- Barambones, A.; Maseda, F. J. 2003. A sensorless robust vector control of induction motor drives, in *9th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Lisbon, Portugal*, vol. 3, 132–145.
- Barnes, M. 2003. Practical variable speed drives and power electronics, in *An imprint of Elsevier*. ISBN 07506 58088. 299 p.
- Baškys, A.; Gobis, V.; Zlosnikas, V.; Augustinas, D.; Košur, V.; Dervinis, A.; Bleizgys, V. 2007. Dažnio keitiklių tyrimo standas, *Puslaidininkų fizikos instituto XIX mokslinės konferencijos darbai*. 125–128.
- Baškys, A.; Rinkevičienė, R.; Petrovas, A. 2006. Simulation of overvoltages in the system Frequency converter – AC induction motor. *The XVI international conference on Electromagnetic disturbances. Proceedings. Kaunas: Technologija*. 221–224.
- Batkauskas, V. 2010. Dažnių elektros pavarų dinaminiai modeliai. Daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. 96 p.
- Blaschke, F. 1972. Principal of field orientation applied to the new transvector closed loop control system for rotating field machines, in *Siemens-Rev.*, vol. 39. 217–220.
- Boldea, S.; Nasar, A. 1992. Vector control of ac drives, *Taylor & Francis CRC*. 237 p.
- Boldea, S.; Nasar, A. 2005. Electric drives, *Taylor & Francis Group CRC*. 522 p.
- Bolognani, S.; Venturato A.; Zigliotto M. 2000. Theoretical and experimental comparison of speed controllers for elastic two-mass-systems. *IEEE 31st Annual Power Electronics Specialists Conference, Vol. 3*. 1087–1092.
- Bose, B. K. 1986. Power electronics and AC drives. *Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall*. 566 p.
- Bose, B. K. 2002. Modern power electronics and AC drives, *New Jersey, Prentice Hall*, 738 p.

- Bülent Ertan, H. 1994. Modern electrical drives, in *Proceedings of the NATO Advanced study institute on modern electrical drives*. 740 p.
- Chen G. 2001. Introduction to fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy control systems. Houston. 316 p.
- Choi, B. J.; Kwak, S. W.; Kim, B. K. 1999. Design of a single-input fuzzy logic controller and its properties, in *Fuzzy Sets and Systems*. 299–308.
- Госев В.И. 2008. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. –К.: „Радиоаматор”. 972 с.
- Depenbrok, M. 1988. Direct self-control DSC of inverter-fed induction machine, in *IEEE Trans Power Electron* 3. 420–429.
- Dewan, S. B.; Slemmon, G. R.; Straughen, A. 1984. Power semiconductor drives. New York: Wiley Interscience. 454 p.
- Ellis, G. 2002. Observers in control systems a practical guide, *Practical handbook*, Academic press. ISBN 0-12-237472-X. 264 p.
- Feiler, M.; Westermaier, C.; Schroder D. 2003. Adaptive speed control of a two-mass system. *Proceedings of IEEE Conference on Control Applications*, Vol. 1. 1112–1117.
- Gallegos, M. A.; Alvarez, R.; Nunez, C. A.; Perez-Pinal, F. 2006. Comparison of two nonlinear speed observers for induction motors. *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006, 32nd Annual Conference*. 799–804.
- Ghanes, M.; Leon, D.; Glumineau, A. 2006. Observability study and observer-based interconnected form for sensorless induction motor, *Decision and Control, 45th IEEE Conference* 1240–1245.
- Halasz, S.; Csonka, G.; Hassan, A. 1994. Sinusoidal PWM techniques with additional zero-sequence harmonics. *Industrial Electronics*. 199–205.
- Hasse, K. 1969. Zur dynamik drehzahl geregelter antriebe mit stromrichter gespeisten asynchronkurzschlußläufermaschinen. *Darmstadt, tech Hochschule*. 1–10.
- Hofmann, H.; Sanders, S. 1998. Speed sensorless vector control of induction machines using a two-time-scale approach, in *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 34. 169–177.
- Holtz, J.; Quan, J. 1998. Sensorless vector control of induction motors at very low speed using a nonlinear inverter model and parameter identification, in *IEEE Transactions on industry applications*, vol. 38. 1087–1095.
- Hung-ching, L.; Ta-Hsiung, H.; Cheng-Hung, T. 2000. Sensorless vector control of induction motor using artificial neural network, in *International Power and Energy Conference PECon*. 411 – 415.
- Hwan, S. K.; Park, T. S.; Yoo, J.; Park, G. 2001. Speed-sensorless vector control of an induction motor using neural network speed estimation, in *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 48, No. 3. 609–614.
- Jian Yu Finch, J. W. 2001. An alternative way to the scalar control of induction drives, in *Electrical Machines and Systems the Fifth International Conference* vol.2. 683–686.
- Juraitis, S. 2004. Dvimasės elektromechaninės sistemos tyrimas. *Baigiamasis magistro darbas. Vilniaus Gedimino technikos universitetas*. 65 p.
- Kara, T.; Eker, I. 2003. Experimental nonlinear identification of a two mass system. *Proceedings of IEEE Conference on Control Applications*, Vol. 1. 66–71.
- Kazmierkowski, M. P.; Krishnan, R.; Blaabjerg, F. 2002. *Control in power Electronics, in Selected Problems USA*: Elsevier Science. 509 p.

- Kilikevičius, A.; Petraška, A.; Juraitis, S. 2009. Measurement errors of comparator on carriage vibrations. *Journal of vibroengineering*. Vol. 11. 658–664. ISSN 1392-8716.
- Kilikevičius, A.; Vekteris, V.; Slivinskas, K.; Kasparaitis, A.; Juraitis, S. 2010. Research of Influence of Vibrations on Calibration Quality of Line Scale Gauge. *Periodical of Solid State Phenomena* Vol. 164. 47-55. ISSN 1012-0394.
- Kim, Y. R.; Sul, S. K.; Park, M. H. 1994. Speed sensorless vector control of induction motor using extended Kalman, *IEEE Trans. on Industry Applications*. vol. 2, 1225–1233.
- Ключев, В.И. 1985. Теория электропривода. Москва: Энергоатомиздан. 559 с.
- Krein, P.T.; Disilvestro, F.; Kanellakopoulos, I.; Locker, J. 1993. Comparative analysis of scalar and vector control methods for induction motors, in *Power Electronics Specialists Conference, PESC '93 Record., 24th Annual IEEE*. 1139–1145.
- Kumar, V.; Joshi, R.R. 2005. Hybrid controller based intelligent speed control of induction motor, in *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 71–75.
- Leonhard, W. 2001. Control of electric drives, 3rd edition. Springer. 440 p.
- Lisauskas, S. 2006. Tiesiaeigių asinchroninių variklių nesimetrinių režimų tyrimas. *Daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas*. 108 p.
- Liutkevičius, R.; Barzdaitis, V. 2001. Netiesinio laboratorinio proceso fuzzy reguliatorius. *Informacinė visuomenė ir universitetinės studijos, 6-tosios magistrantų ir doktorantų konferencijos pranešimų medžiaga*, Kaunas: VDU. 115–121.
- Longo, A.; Micheletti, R.; Pieri, R. 1999. Fast and Accurate Power System Frequency Measurement by Dynamic Parameter Estimation, *Proc. of the IMEKO XV World Congress*. 63–68.
- Messaoudi, M.; Kraiem, H.; Ben Hamed, M.; Sbata, L. 2004. Robust sensorless direct torque control of induction motor based on MRAS and extended kalman filtre, in *Research Unit of Modelling, Analysis and Control of Systems*. 35–56.
- Micheletti, R.; Pieri, R. 2001. Non-invasive slip measurement of induction motors, *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference IMTC 2001*, Budapest, vol. 1, 1958–1961.
- Mohan, N.; Undelande, T. M.; Robbins, W. P. 1989. Power electronics: converters, applications and design. *JohnWiley*. 668 p.
- Montanari, M.; Peresada, S.; Tilli, A. 2002. Observerless scheme for sensorless control of induction motor: stability analysis and design procedure, *Proc. of the 10th Mediterranean Conference on Control and Automation*. 1–10.
- Nemura A. 2007. Neraiškiųjų sistemų panaudojimas elektros energetikoje. Prieiga per internetą: neris.mii.lt/mt/straipsniai/20070708/ns.doc. 1-11. (žiūrėta 2011-10-01)
- Novatnak, R. T.; Chiasson, J.; Bodson, M. 1999. High-performance motion control of an induction motor with magnetic saturation, in *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 7, no. 3. 203–208.
- Novotny, D. W.; Lipo, T. A. 2004. Vector control and dynamics of AC drives. *Oxford: Clarendon Press*. 440 s.
- Ogasawara, S.; Akagi, H.; Nabae, A. 1988. The generalized theory of indirect vector control for AC machines in *IEEE Transactions on Industry Applications*. 470–478.
- Ohtani, T.; Takada, N.; Tanaka, K. 1992. Vector control of induction motor without shaft encoder in *Industry Applications, IEEE Transactions*. ISSN: 0093-9994. 157–164.
- Ostaševičius, V. Elektromechaninių sistemų dinamika. *Kaunas: Technologija*. 2000. 159 p.

- Peng, F. Z.; Fukao, T. 1993. Robust speed identification for speed sensorless vector control of induction motors in *Industry Applications Society Annual Meeting*. 419–426.
- Peresada, S. 2001. Simple sensorless vector control of induction motors with natural field orientation, in *Proc. of 27th Conf. IEEE Industry Electronics*. vol. 1. 641–646.
- Rajasheh, K.; Kawamura, A.; Matsuse, K. 1996. Sensorless control of AC motor drives, in *IEEE press*. 1–258.
- Rashid, M. H. 2001. Power electronics handbook, in *Academic Press, Anglija*. 892 p.
- Reljić, D. D.; Ostojić, D. B.; Vasić, V. V. 2006. Simple speed sensorless control of induction motor drive, in *Sixth international symposium Nikola Tesla*. 1–4.
- Rinkevičienė, R.; Baškys, A.; Petrovas, A. 2008. Model of simulation of dynamic characteristics of the system frequency converter – AC induction motor, in *Elektronika ir Elektrotechnika, Electronics and Electrical Engineering*. Nr.2 (82). 65–68.
- Rinkevičienė, R.; Batkauskas V. 2008. Modeling and Investigation of Vector Controlled Induction Drive. *Electronics and Electrical Engineering. Kaunas: Technologija, No. 1(81)*. 53–56.
- Rinkevičienė, R.; Lisauskas, S. 2003. Models of mechatronic systems with linear motors, in *Electronics and Electrical Engineering. Kaunas: Technologija* Nr. 4(46). 69–73.
- Rinkevičienė, R.; Petrovas, A. 2008. Direct current drive with observer, in *Electronics and Electrical Engineering*. Nr.5(85). 53–56.
- Rinkevičienė, R.; Petrovas, A. 2009. Modelling of frequency controlled induction drive with ventilator type load, in *Electronics and Electrical Engineering. Kaunas: Technologija*, Nr.6(94). ISSN 1392-1215. 69–72.
- Rinkevičienė, R.; Petrovas, A. 2008. Mechatroninių sistemų modeliavimas. Vilnius: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla. ISBN: 9789955202899. 165 p.
- Rinkevičienė, R.; Petrovas A. 2009. Model of Vector Controlled Induction Drive. *Solid State Phenomena. Mechatronic systems and materials, Switzerland*. 149-154 p.
- Rinkevičienė, R.; Petrovas, A. 2007. Dynamic models of asymmetric induction drive. Materials of International Electric machines and drives conference IEMDC'07. May 3–5, Antalya, Turkey. 683–687.
- Rinkevičienė, R.; Petrovas, A. 2004. Tiesiaieigės asinchroninės pavaros modelis. *Elektronika ir elektrotechnika*. Nr. 1(50). 28–33.
- Rinkevičienė, R.; Petrovas, A. 2005. Dynamic models of linear induction drives. *Information Technology and control*, Nr. 1(34). 37–41.
- Schauder, C. 1992. Adaptive speed identification for vector control of induction motors without rotational transducers, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 28, no. 5. 1054–1061.
- Schonfeld, R. 1995. Elektrische Antriebe. *Vlg. Springer*. 323 s.
- Sen P. C. 1996. Principles of electric machines and power Electronics, in *New York: Wiley*. ISBN: 978-0471022954. 640 p.
- Smith, A. C.; Healey, R. C.; Williamson, S. 1996. A transient induction motor model including saturation and deep bar effect, in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 11, no. 1. 5–15.
- Smilgevičius, A. 1989. Elektros pavarų mechanika. Vilnius: VISI. 40 p.
- Smilgevičius, A.; Rinkevičienė R. 2005. Simulation of transients in the Mechanical part of Electromechanical system. *Mathematical Modelling and Analysis Proceedings of the 10th International Conference MMA2005&CMAM2, Trakai*. 155-162 p.
- Smilgevičius A.; Rinkevičienė R.; Savickienė Z. 2006. Operation of electric motor with elastic load. *Electronics and Electrical Engineering, Kaunas*. 15–18 p.

- Stojic, D.; Vukosavic, S. 2005. Induction motor drive based on the stator flux vector control in *Electrical Engineering*, Nr. 87. 23–32.
- Tajima, H.; Hori, Y. 1993. Speed sensorless field-orientation control of the induction machine, *Industry Applications, IEEE Transactions on*. ISSN: 0093-9994. 175–180.
- Tajima, K.; Hirokazu, H.; Giuseppe, T. 2002. Consideration about problems and solutions of speed estimation method and parameter tuning for speed-sensorless vector control of induction motor drives, in *IEEE transactions on industry applications*, vol. 38, no. 5, ISSN 0093–9994. 1282–1289.
- Takahashi, I.; Ohmori, Y. 1989. High-performance direct torque control of an induction motor in *IEEE Trans Ind Appl* 25. 257–264.
- Trigg, M.; Dehbonei, H.; Nayar V. 2005. Digital sinusoidal PWM generation using a low-cost micro-controller based single-phase inverter, in *IEEE Emerging Technologies and Factory Automation*. ISBN: 0-7803-9401-1. 396–400.
- Trzynadlowski, M.; Andrzej, P. 2001. Control of induction motors, in *Academic press*. 228 p.
- Tursini, M.; Petrella, R.; Parasiliti, F. 2000. Adaptive sliding mode observer for speed-sensorless control of induction motors, in *IEEE Trans., on Ind. Applicat.*, vol. 36, nr. 5. 1380–1387.
- Valentine, R. 1998. Motor control electronics handbook. ISBN-13: 978-0070668102. 700 p.
- Vas, P. 1998. Sensorless vector and direct torque control, *Oxford university press. New York*, 729 p.
- Vas, P. 1999. Electrical machines and drives, *Oxford University Press, New York* . 768 p.
- Wang Li Su Bo. 2010. Modeling and simulation of vector control system of variable frequency speed regulation in electric actuator, in *Computer Modeling and Simulation, ICCMS '10. Second International Conference*. Kinija. 308–311.
- Yang, G.; Chin, T. H. 1993. Adaptive-speed identification scheme for a vector-controlled speed sensorless inverter-induction motor drive, in *IEEE transactions on industry applications*, Vol. 29. 404–408.
- Zaky, M. S.; Khater, M. M.; Yasin, H.; Shokralla, S. 2008. Speed and stator resistance identification schemes for a low speed sensorless induction motor drive, in *IEEE transactions on industry applications*. 96–103.
- Zlosnikas, V.; Baškys, A.; Gobis, V. 2008. Investigation of asymmetric PI controller using hardware-in-the-loop simulation system, in *Elektronika ir Elektrotechnika*. ISSN 1392-1215. 7–10.

Autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo leidiniuose

Juraitis, S.; Rinkevičienė, R.; Kilikevičius, A. 2010. Two-mass Variable Speed Drive. *Electronics and electrical engineering*. No. 4(100): 25–28. Kaunas. ISSN 1392-1215 (Thomson Reuters Web of Science).

Juraitis, S.; Rinkevičienė, R.; Kriaučiūnas, J. 2011. Fuzzy Controller of Two-mass System. *Electronics and electrical engineering*. No. 10(116): 3–6. Kaunas. ISSN 1392-1215 (Thomson Reuters Web of Science).

Juraitis, S. 2010. Dvimasės elektromechaninės sistemos modelis. *Elektronika ir Elektrotechnika*. 2 tomas, Nr. 1: 85–89. Vilnius. ISSN 2029-2341.

Juraitis, S.; Rinkevičienė, R.; Kriaučiūnas, J. 2009. Modeling of two-mass system with elasticity. *In Proceedings of the 4th International Conference Electrical and Control Technologies ECT-2009*. Kaunas: Technologija. 227–230. ISSN 1822-5934.

Juraitis, S.; Rinkevičienė, R.; Kilikevičius, A. 2010. Modeling of Performance of two-mass variable speed drive in closed loop system. *In Proceedings of the 5th International Conference Electrical and Control Technologies ECT-2010*. Kaunas: Technologija. 130–1334. ISSN 1822-5934.

Kriaučiūnas, J.; Rinkevičienė, R.; Juraitis, S. 2011. Simulation of Two-mass System with Fuzzy Controller. *In Proceedings of the 6th International Conference Electrical and Control Technologies ECT-2011*. Kaunas: Technologija. 105–108. ISSN 1822-5934.

Kituose leidiniuose

Juraitis, S. Dvimasės elektromechaninės sistemos tyrimas. 2008. *Elektronika ir Elektrotechnika, 11-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ medžiaga*. Vilnius: Technika. 135–143. ISBN 978-9955-28-373-7.

Juraitis, S.; Rinkevičienė, R.; Smilgevičius, A. 2009. Dynamic properties of two-mass electromechanical system. *In Proceedings of Doctoral School of Energy and Geotechnology*. Kuressaare, Estonia. 18–21. ISBN 978-9985-9089-1-4

Juraitis, S.; Rinkevičienė, R.; Smilgevičius, A. 2011. Experimental Investigation of Electric Drive Dynamics. *In Proceedings of Doctoral School of Energy and Geotechnology*. Pärnu, Estonia. 21–24. ISBN 978-9985-9089-1-4.

Sigitas JURAITIS

DVIMASĖS ELEKTROMECHANINĖS
SISTEMOS PEREINAMŲJŲ VYKSMŲ TYRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
elektros ir elektronikos inžinerija (01T)

Sigitas JURAITIS

RESEARCH OF TRANSIENT PROCESSES
IN ELECTROMECHANICAL TWO-MASS SYSTEM

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Electrical and Electronic Engineering (01T)

2012 05 02. 8,5 sp. I. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Ciklonas“,
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius