



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

AUTOMATIKOS KATEDRA

Robertas Janickas

SROVĖS ERDVINIO VEKTORIAUS VALDYMO TYRIMAS

CURRENT, FIELD – ORIENTED CONTROL ANALYSIS

Baigiamasis magistro darbas

Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 62401T104

Automatinių sistemų specializacija

Elektros inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2009

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

AUTOMATIKOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėja

(parašas)

Zita Savickienė

(vardas, pavardė)

200_ - _____

Robertas Janickas

SROVĖS ERDVINIO VEKTORIAUS VALDYMO TYRIMAS

CURRENT, FIELD – ORIENTED CONTROL ANALYSIS

Baigiamasis magistro darbas

Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 62401T104

Automatinių sistemų specializacija

Elektros inžinerijos studijų kryptis

Vadovas prof. habil. dr. Algirdas. Smilgevičius _____
(Moksl. laipsnis, vardas pavardė) (Parašas) (Data)

Konsultantas doc. dr. A. Kaulakienė _____
(Moksl. laipsnis, vardas pavardė) (Parašas) (Data)

Konsultantas doc. dr. Radzevičius Lionginas _____
(Moksl. laipsnis, vardas pavardė) (Parašas) (Data)

Vilnius, 2009

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
AUTOMATIKOS KATEDRA

Technologijos mokslų sritis
Elektros ir elektronikos mokslo kryptis
Elektros inžinerijos studijų kryptis
Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 62401T104
Automatinių sistemų specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėja

(Parašas)

Zita Savickienė
(Vardas, pavardė)

(Data)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO

UŽDUOTIS

2009 05 11.Nr. 03
Vilnius

Studentui Robertas Janickas
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: *Srovės erdvinio vektoriaus valdymo tyrimas. Current, field-oriented control analysis*

patvirtinta 2008 m. 11 21 d. dekanų potvarkiu Nr. 196 el.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2009 m. birželio 01 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

1. ĮVADAS
2. LITERATŪROS APŽVALGA 2.1. SROVĖS ERDVINIO VEKTORIAUS VALDYMAS
3. TYRIMO TIKSLAI IR UŽDAVINIAI
4. TEORINĖ DALIS 4.1. DAŽNIO KEITIKLIAI ELEKTROS VARIKLIŲ VALDYMUI 4.2. ERDVINIO VEKTORIAUS VALDYMAS 4.3. TRIFAZIO ELEKTROMECHANINIO KEITIKLIO TRANSFORMAVIMAS Į EKVIVALENTINĮ DVIFAZĮ
5. TIRIAMOJI DALIS 5.1. MATEMATINIAI ASINCHRONINIŲ VARIKLIŲ MODELIAI, 5.2. VALDYMO PROGRAMOS SUDARYMAS 5.3. PEREINAMŲJŲ VYKSMŲ IMITACIJA
6. IŠVADOS IR PASIŪLYMAI
7. LITERATŪRA
8. PRIEDAI

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai: doc. dr. Lionginas Radzevičius

Vadovas
(Parašas)

prof. habil. dr. Algirdas Smilgevičius
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Užduotį gavau
(Parašas)

Robertas Janickas
(Vardas, pavardė)

.....2008 10

Vilniaus Gedimino technikos universitetas	ISBN	ISSN
Elektronikos fakultetas	Egz. sk.	
Automatikos katedra	Data-.....-.....	

Magistrantūros studijų **Automatikos** programos baigiamasis darbas

Pavadinimas **Srovės erdvinio vektoriaus valdymo tyrimas**

Autorius **Robertas Janickas**

Vadovas **prof. habil. dr. Algirdas Smilgevičius**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame darbe apžvelgiami nauji asinchroninių variklių valdymo būdai, pabrėžiami pasirinktojo valdymo privalumai. Pateikiami atliekamų transformacijų skaičiavimai. Aprašomi dažnio keitikliai, naudojami įgyvendinant erdvinio srovės vektoriaus valdymą. Pateikiamas erdvinio srovės vektoriaus valdymo ir asinchroninio variklio matematinis modelis. Pateikiami sukurto modelio tyrimo grafiniai ir teoriniai rezultatai, valdymo privalumai ir trūkumai, programinis kodas. Darbą sudaro 8 dalys: įvadas, literatūros apžvalga, tyrimo tikslai ir uždaviniai, teorinė dalis, tiriamoji dalis, išvados ir pasiūlymai, literatūra, priedai. Darbo apimtis – 70 p. teksto be priedų, 28 iliustracijos, 5 lent., 30 bibliografinių šaltinių ir priedai.

Prasminiai žodžiai

asinchroninė pavara, dažnio keitiklis, vektorinis valdymas, srovės erdvinio vektoriaus valdymas, imitacija, SIMULINK modelis.

Vilnius Gediminas Technical University ISBN ISSN
Faculty of Electronics Copies No.
Department of Automation Date-.....-.....

Master Degree Studies **Automation** study programme Master's Thesis

Title **Current Field-Oriented Control Analysis**

Author **Robertas Janickas**

Academic supervisor **Prof Dr Habil Algirdas Smilgevičius**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

In the final paper new ways of induction drives control are overviewed and the advantages of the selected way of control are depicted. The calculation of the performed transformations are presented. Frequency converters used for the current, field-oriented vector control are described. The mathematic models of the current, field-oriented control and the induction drive are presented. Graphic and theoretical results of the analysis of the created model, its advantages and drawbacks, the programme code are presented.

Work consists of 8 parts: introduction, literature review, the study aims and objectives, the theoretical part, research part, conclusions and proposals, references, accessories.

Work size - 70 p. text without annexes, 28 illustrations, 5 tables, 30 bibliographical sources, and accessories.

Keywords

Induction drive, frequency converter, vector control, current, field-oriented control, simulation, SIMULINK model.

Turinys

UŽDUOTIS	3
1. ĮVADAS	7
2. LITERATŪROS APŽVALGA	9
2.1. Srovės erdvinio vektoriaus valdymas	9
2.1.1. IPM pranašumi	9
2.1.2. Clarke transformacija	11
2.1.3. Srovės erdvinio vektoriaus valdymas.	15
3. TYRIMO TIKSLAI IR UŽDAVINIAI	16
4. TEORINĖ DALIS	17
4.1. Dažnio keitikliai	17
4.1.1. Dažnio keitiklio veikimo principas.....	17
4.1.2. Dažnio keitiklių rinka	18
4.1.3. Lietuviškas skaliarinio valdymo dažnio keitiklis	19
4.2. ERDVINIO SROVĖS VEKTORIAUS VALDYMAS	21
4.2.1. Variklio valdymo dėsniai.....	21
4.2.2. Keitiklio išėjimo įtampos formavimo būdai	22
4.2.3. Impulsų dažnio moduliavimas erdvinio vektoriaus būdu	24
4.3. Trifazio elektromechaninio keitiklio transformavimas į ekvivalentinį dvifazį.....	26
5. TIRIAMOJI DALIS	31
5.1. Matematiniai asinchroninių variklių modeliai.....	31
5.1.1 Matematinis asinchroninio variklio modelis	31
5.1.2. Matematinis pasirinktos mašinos modelis.....	34
5.2. Valdymo programos sudarymas	36
5.2.1. Netiesioginis lauko valdymas	36
5.2.2 Valdymo programos sudarymas	38
5.2.3. Erdvinio srovės vektoriaus valdymo tyrimas	43
5.3. Pereinamųjų vyksmų imitacija	52
6. IŠVADOS IR PASIŪLYMAI	66
6.1 Išvados.....	66
6.2 Pasiūlymai	67
7. LITERATŪRA.....	68
8. PRIEDAI	71

1. ĮVADAS

Apsižvalgę aplinkui galima pamatyti daug įvairių įrenginių, įtaisų ir prietaisų, kuriuose naudojami varikliai. Išsivysčiusiose šalyse 60–70 % elektros energijos sunaudoja elektros varikliai [1, 2]. Apie 90% pramonėje naudojamų elektros variklių yra trifaziai asinchroniniai varikliai. Jų populiarumą lemia paprasta konstrukcija, aukštas patikimumas ir žema kaina. Asinchroniniai varikliai yra plačiai naudojami siurbliuose, ventiliatoriuose, konvejeriuose, liftuose, kranuose bei įvairiuose pramoniniuose įrenginiuose.

Asinchroninio variklio sukimosi greitį lemia trifazio elektros tinklo dažnis ir variklio polių skaičius, t. y. jei variklis maitinamas iš standartinio elektros tinklo, jis sukasi beveik pastoviu greičiu. Tačiau variklio sukimosi greitis dažnai turi būti reguliuojamas. Reguluojamo sukimosi greičio asinchroninės pavaros leidžia valdyti technologijas ir taupyti elektros energiją. Dažnai vien galimybės reguliuoti greitį neužtenka, preciziniams matavimams bei tikslaus sukimosi greičio reikalaujantiems procesams reikalingas dar ir palaikomas tikslus sūkių skaičius (kintant apkrovai arba sistemai veikiant trikdžiams).

Pasiekimai puslaidininkinių galios prietaisų, mikrovaldiklių ir signalinių procesorių, automatinio valdymo teorijos srityse, impulsų pločio moduliavimo (Pulse Width Modulation, sutrumpintai PWM, impulso pločio moduliacija – IPM) metodo, kuriuo galima trifaze impulsine įtampa formuoti sinuso formos srovę variklio apvijose, sukūrimas sudarė sąlygas atsirasti dažnio keitikliams, skirtiems asinchroninių elektros variklių sukimosi greičiui, sukimo momentui bei sukimosi kryptčiai valdyti.

Dažnio keitiklis yra galios elektronikos prietaisas, kuris keičia standartinį vienfazį arba trifazį elektros tinklą į keičiamo dažnio ir įtamos trifazį tinklą. Dažnio keitiklis yra sudėtingas ir brangus prietaisas, paverčiantis asinchroninį variklį protingai valdoma mašina. Juo galima valdyti variklį rankiniu būdu arba automatiškai uždaroje valdymo sistemoje pagal atitinkamo jutiklio signalus, taip pat kompiuteriu, įskaitant valdymą internetu. Dažnio keitiklis turi įvairių apsaugos priemonių, saugojančių jį patį ir valdomą variklį nuo sugadinimo.

Europos rinkos tyrimai rodo, kad dažnio keitiklių rinka nuolat didės. Tai lems konkurencingesnės kainos, nuolatinis šių prietaisų tobulinimas. Prietaisai bus labiau pritaikomi ir

vis didės poreikis geriau valdyti technologijas ir taupyti energiją. Naudojant saviagnozės galimybes, ypač kai šiai funkcijai įgyvendinti nereikia papildomų jutiklių, naudojamas „soft sensing“ metodas. Jis gali būti įdiegtas tiek į dažnio keitiklį tiek į variklio valdymo sistemą. Todėl ši sritis pradedama vis daugiau tyrinėti.

Nors vektorinis valdymas yra gana naujas, tačiau nepakankamai ištyrinėtos valdymo galimybės, jo atmainos, pavyzdžiui, erdvinio vektoriaus netiesioginis srovės moduliacijos valdymas, net šios srities specialistams nėra girdėtas. Šis būdas yra vienas iš sudėtingiausių vektorinio valdymo atmainų.

Tačiau pagrindinė problema ta, kad šis valdymas nėra pakankamai ištirtas, todėl realiai pritaikomos tik paprasčiausios vektorinio valdymo atmainos (tiesioginis vektorinis valdymas). Vienas iš pagrindinių trūkumų tas, kad nėra literatūros apie charakteristikas ir tokio valdymo privalumus. Pateikiami šaltiniai tik anglų kalba ir tai tik kaip straipsniai (kurie prienami ne visiems, nes pateikiami tik apmokestintuose duomenų bazėse). Juose ši problema nagrinėjama tik iš dalies, dažnai tik iš dalies susieta su erdvinio vektoriniu valdymu.

Šiame darbe išsamiau nagrinėjamas srovės erdvinio vektoriaus valdymas kartu su asinchroninio variklio matematiniu modeliu. Matematinis modelis yra saugi ir nereikalaujanti didelių investicijų tyrimo alternatyva, kuri taikoma įvairiems režimams, dažnai ekstremaliems, tirti kaip realus modelio bandymas galėtų sunaikinti modelį. Šis matematinis modelis gali būti pritaikytas „soft sensing“ technologijai kurti.

2. LITERATŪROS APŽVALGA

2.1. Srovės erdvinio vektoriaus valdymas

Magnetinis laukas, kurį reikia valdyti, kuriamas variklio statoriuje. Tai nejudama asinchroninio variklio dalis, kurios viduje sukasi rotorius. Tiesiaiegiame variklyje nejudamą dalį dažniausiai sudaro induktoriai, tarp kurių juda antrinis elementas.

Trifaziame variklyje fazinės srovės valdomos taip, kad sukurtų magnetinį lauką ir rotorius sukūsi ta pačia kryptimi kaip ir laukas. Tada, tinkamai valdant statoriaus sroves, valdant abiejų dedamųjų amplitudes, sudaromas vektorius, kuris seka statoriaus ir rotoriaus magnetinius laukus viso apsisukimo metu.

Trifaziame variklyje fazinėmis apvijomis teka kintamoji srovė. Srovę galima valdyti impulsų pločio moduliacijos (toliau – IPM) arba analoginiu būdu. Valdymo paklaida priklauso nuo jutiklių signalo duomenų skiltiškumo grįžtamojo ryšio duomenų, srovės grįžtamojo ryšio ir duomenų atnaujinimo spartos.

Toks valdymas vadinamas srovės erdvinio vektoriaus valdymu.

2.1.1. IPM pranašumi

Valdymo sistema valdo srovę variklio apvijose, kiekvienoje apvijoje perjungdama įtampą (išjungdama ir įjungdama) pastoviu dažniu, tačiau komutavimo ciklas yra kintamas ir priklauso nuo srovės, kurią nustato valdiklis. Tai nėra vienintelis galimo valdymo būdas, nes galima keisti impulso aukštį arba impulsų dažnį.

Kitas populiarus būdas gauti tą patį rezultatą yra analoginio stiprintuvo naudojimas. Tačiau tokie stiprintuvai yra brangūs ir dideli, palyginti su IPM stiprintuvais. Analoginiame stiprintuve, tranzistoriai veikia aktyvioje jų srityje. Jie nėra nei visiškai įjungti, nei visiškai išjungti. Jie sklaido galią, staigiu įtampos kritimu per juos ir srovę, kurią jie tiekia varikliui. Šitos srovės ir įtampos gali būti ganėtinai aukštos.

IPM varikliai yra pranašesni tuo, kad tranzistoriai turi tik dvi būsenas: visiškai įjungti ar visiškai išjungti. Kai jie yra išjungti, elektros srovė yra nedidelė, bet visgi šildo variklį. Kai jie įjungti, įtampos kritis kiekviename puslaidininkiniame prietaise yra tik tai pora voltų, tokiu būdu

galia, kurią jie sklaido, yra minimali. Dėl šios priežasties IPM valdomi varikliai gali būti maži ir pigesni už analoginio valdymo.

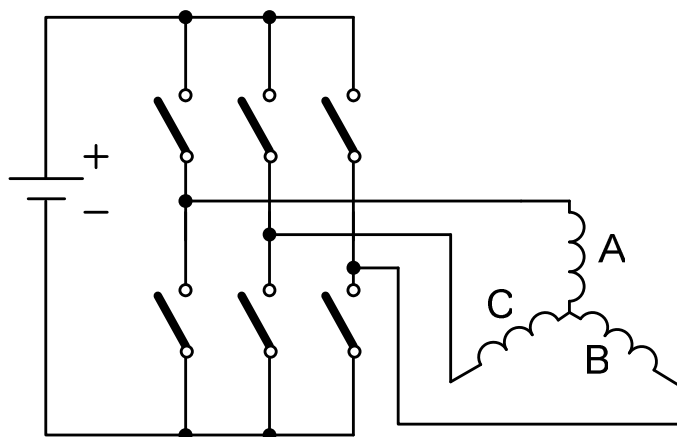
Bet kuriuo atveju srovės erdvinio vektoriaus valdymas yra toks pats. Tai yra tikrai paskutinė stadija, kurioje išėjimo vertės siunčiamos į analoginį stiprintuvą arba verčiamos į ciklo trukmės impulsą, kuris keičiasi. Įėjimą galima įsivaizduoti kaip skaitmeninį analoginį keitiklį (SAK).

Statoriuje yra trys fazinės apvijos, o variklio valdymas įgyvendinamas perskaičiuotoje dvejų vektorių erdvėje. Valdant variklį pakanka tik dvejų srovių dedamųjų. Viena srovės dedamoji i_d yra išilginė ir susieta tikrai su statoriaus srautu. Tai yra srovė, kuri kuria magnetinį lauką veikdama asinchroninio variklio rotorį ir palaiko jį pastoviu, priversdama rotorį pasisukti ta pačia kryptimi. Jeigu valdymui būtų naudojama tik ši viena srovė, tai judesys būtų žingsninis ir jį būtų galima valdyti keičiant statoriaus srauto padėtį per visą apsisukimą.

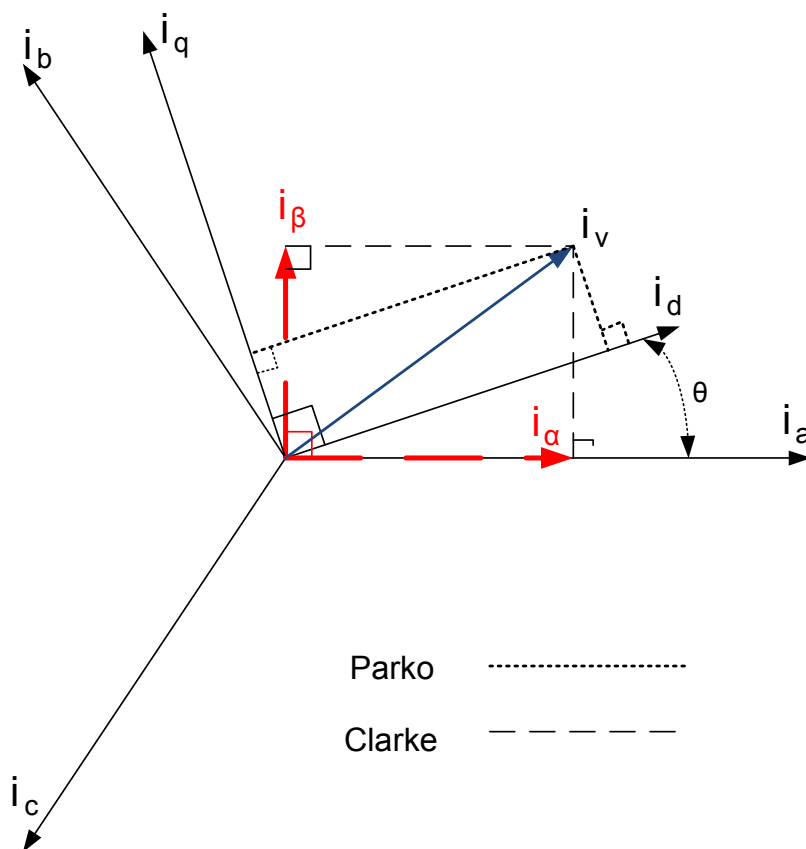
Kita srovės dedamoji i_q yra skersinė ir jos fazė skiriasi nuo pirmosios 90 laipsnių. Ši srovė kuria srautą, kuris atsilieka arba lenkia statoriaus srautą. Jei jis atsilieka nuo statoriaus srauto judesio, variklis dirba generatoriniu režimu, o jeigu pralenkia – varikliniu. Nuo i_q srovės vertės, kuri valdoma, priklauso ir sukimo momentas. Didesniam sukimo momentui gauti reikalinga ir didesnė i_q , o didesniam rotoriaus srautui – didesnė i_d . Žinant šitas dvi vertes, galima rasti vektorių, kuris atitiktų variklio sukimo momentą. Tiekdami i_d , i_q ir valdymo parametrus (stiprinimo koeficientus ir reguliatoriaus pastoviosios) į proporcinį integralinį diferencialinį (toliau PID) reguliatorių, galima sukurti reikiamas vertes ir naudoti jas judesiui, padėčiai, greičiui ar sukimo momentui valdyti.

Kai variklis sukasi, akimirkinės statoriaus fazinių srovių vertės kinta, o jų sukurtas magnetinis srautas nuolat keičia erdvinę padėtį. Net tada, kai variklis sukasi pastoviu sukimosi greičiu, srovės kiekvienoje apvijoje keičiasi nuolat priklausomai nuo rotoriaus kampinės padėties per kiekvienus 360 elektrinių laipsnių. Tai nereiškia, kad keičiasi i_d ir i_q – iš matematinės išraiškos matyti, kad jų vertės yra pastovios. Vadinasi, kad magnetinio srauto judesio greitis būtų pastovus, srovės kiekvienoje apvijoje turi keistis nuolat.

Šie pasikeitimai tinka abiem atvejams. Kad būtų galima sroves ir padėtį paversti tinkamais įėjimui į PID reguliatorių dydžiais, naudojama tiesioginė transformacija, ir atvirkštinė – kai reikia paversti juos atgal į atskiros fazės vertes stiprintuvo išėjime.



2.1 pav. Trifazis statorius ir galios tiltelis



2.2 pav. Srovių vektoriai

2.1.2. Clarke transformacija

PID reguliatoriui reikalinga informacija apie tikrąją rotoriaus padėtį ir sroves. Kadangi bandymas valdyti variklį naudojant atskiras fazines sroves yra sudėtingas, todėl naudojama Clarke

transformacija, kuri leidžia pakeisti trijų fazinių srovių $i_a(t)$, $i_b(t)$, ir $i_c(t)$ sistemą į dviejų srovių i_a ir i_b sistemą stačiakampėje statoriaus plokštumoje. Šis pakeitimas yra pavaizduotas (2.2 pav.):

$$\begin{aligned} i_a(t) + i_b(t) + i_c(t) &= 0; \\ u_a(t) + u_b(t) + u_c(t) &= 0; \\ \varphi_a(t) + \varphi_b(t) + \varphi_c(t) &= 0. \end{aligned} \quad (2.1)$$

Pažymėtina, kad čia yra išlaikomas srovių, įtampų ar srauto balansas, atitinkantis Kirchoffo dėsni, pagal kurį jų suma lygi nuliui. Bet kuriuo momentu, kai srovė, įtampa ar srautas yra vienoje fazėje, atitinkamos srovės, įtampos ar srautai turi būti kitose dviejose, kad būtų išlaikytas balansas. Srovėms ir įtampoms taip pat gali būti pritaikytos abi Parko ir Clarke transformacijos (tiesioginė ir atvirkštinė). Čia (2.1) naudojamos srovės, kurių vertės išmatuotos fazės apvijoje. Atsižvelgiant į santykį tarp atskiros fazės ir trijų fazių sistemų, gaunama [13]:

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{2\pi}{3}; \\ \begin{bmatrix} i_\alpha(t) \\ i_\beta(t) \end{bmatrix} &= \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \cos(\gamma) & \cos(2\gamma) \\ 0 & \sin(\gamma) & \sin(2\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix}; \end{aligned} \quad (2.2)$$

čia:

$$\begin{aligned} i_{ra} &= i_a; \\ i_{r\beta} &= \frac{1}{\sqrt{3}} i_\alpha + \frac{2}{\sqrt{3}} i_b. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Srovių išraiškos:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} &= \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \cos(\gamma) & \cos(2\gamma) \\ \sin(\gamma) & \sin(2\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha(t) \\ i_\beta(t) \end{bmatrix}; \\ i_\alpha &= \frac{2}{3} i_a - \frac{1}{3} (i_b - i_c); \\ i_\beta &= \frac{2}{\sqrt{3}} (i_b - i_c); \\ i_0 &= \frac{2}{3} (i_a + i_b + i_c). \end{aligned} \quad (2.4)$$

Nors šios išraiškos atrodo skirtingai, tačiau jos yra visiškai vienodos. Skirtumas tas, kad jos patogesnės programavimui. Pirmoji išraiška (2.2) leidžia sudaryti glaudesnę programą, kurios kodas trumpesnis ir vykdomas greičiau. Antroji (2.3) ir (2.4) išraiškos atrodo kaip tiesinio sprendimo lygtys. Apskritai matricinis kodavimas ir dauginimo – kaupimo komandų („MAC“) naudojimas sukuria paprastesnę, aiškesnę kodą.

Taikant Clarke transformaciją rotoriaus lauko ir sukimo momento valdymui galima naudoti abi sroves i_d ir i_q .

Srovių vertės gali pasikeisti dėl paleidimo, pagreičio, fazės pokyčio ir lauko nusilpimo. Bet jei variklis turi tiesiog palaikyti pastovų greitį ir sukimo momentą, jie neturi įtakos. Norint susieti sroves su statiniu duomenų bloku, tinkamu IPM reguliatoriui, reikalingas grįžtamasis ryšys ir rotoriaus padėties jutiklis, pavyzdžiui, enkoderis. Tokia transformacija yra žinoma Clarko transformacijos pavadinimu, bet daugelis žino ją kaip paprastą koordinačių transformacijos matricą:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}. \quad (2.5)$$

Kodavimo įtaisas duoda q (srauto vektoriaus padėtį). Naudojant transformaciją, galima sukurti statiškas (lėtai kintančias) vertes iš staigios (ir besikeičiančios) atskiros vertės, pagrįstos rotoriaus padėtimi per vieną apsisukimą.

Algoritmiškai tai atliekama su „lookup“ (informacine) lentele. Kodavimo įtaisi duoda pastovų impulsų skaičių per viena apsisukimą. Dalinant 360° iš šio skaičiaus, gaunama mažiausia kampo vertė, kurią galima išmatuoti. Tada galima sudaryti lentelę, pagrįstą išmatuotų kampų kampų sinusais ir kosinusais. Kaskart norint pakeisti stiprintuvo, kuris tiekia galią varikliui, stiprinimo koeficientą, tam tikrų periodų paprastai vadinamų servo atnaujinimo sparta - reikia gauti srovę, iš koduotą padėtį ir panaudoti jas, kad galima būtų transformuoti i_d , ir i_q vertes atitinkančiomis i_a ir i_b vertėmis. Galima šios matricos algebrinė forma. Panaudojus atvirkštinę Parko transformaciją gaunama:

$$\begin{aligned} i_a &= i_{rd} \cdot \cos(\theta) - i_{rq} \cdot \sin(\theta); \\ i_\beta &= i_{rd} \cdot \sin(\theta) + i_{rq} \cdot \cos(\theta); \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix}.$$

Dabar galima sujungti abi transformacijas į vieną matricą. Šis faktas yra svarbus, nes lengviau pamatyti ir suprasti, kai į žiūrima į transformacijas kaip į matricas.

Nors tai atrodo efektyvu, tačiau reikia būti atsargiems. Priklausomai nuo procesoriaus architektūros, keblumų dėl papildomo sinusinio padėties skaičiavimo.

Prieš pradedant naudoti šią valdymo formą, reikia nustatyti sistemą. Kadangi remiamasi fazine srove, rotoriaus padėtimi, tai palaikyti magnetinį srautą 90 laipsnių kampu statoriaus srauto atžvilgiu paleidimo momentu reikia žinoti tikslią pradinę rotorius padėtį.

2.1 lentelė. Dažnio keitiklio tranzistoriaus būsenų matrica

Padėtys	A	B	C	VA	VB	VC
	0	0	0	-	-	-
1	0	0	1	-	-	+
2	0	1	0	-	+	-
3	0	1	1	-	+	+
4	1	0	0	+	-	-
5	1	0	1	+	-	+
6	1	1	0	+	+	-
	1	1	1	+	+	+

Tai galima padaryti žinant pastovų statoriaus įtampos vektorių. Rotorius orientuojamas ties vienu iš polių. Tam ir pozicionuojama, kad būtų nustatyta pradinė padėtis kodavimo įtaisui. 1 lentelėje yra aštuonios būsenos, kai fazių skaičius yra 3. Šioje lentelėje minuso ženklas rodo, kad yra įjungti visi žemutiniai „jungikliai“ (2.1 pav.), o pliuso ženklas kad įjungti viršutiniai tranzistoriai.

Kad į variklį tekėtų srovė, būtinas bent vienas minuso ženklas ir bent vienas pliuso ženklas vienoje eilutėje. Tada susidaro tik šešios darbinės būsenos. Todėl varikliui valdyti reikia pasirinkti vieną iš likusių šešių derinių ir išlaikyti ją pastoviai. Esant šioms sąlygoms, srovė teka į apvijas, ir rotorius pasisuka statoriaus srauto kryptimi.

Valdymo pradinių reikšmių uždavimui iš tikrųjų reikalingas tikrai kodavimo įtaiso impulsų skaičius per apsisukimą [14].

Reikia žinoti, kiek kodavimo įtaisas suskaičiuoja impulsų kiekvieno elektrinio apsisukimo metu. Jei kodavimo įtaiso skaičiavimų per vieną apsisukimą skaičius nežinomas, galima gauti skaičių, "žingsnių" praeinant per šešias kombinacijas, pateiktas 1 lentelėje, išbandant kodavimo įtaisą prasukant variklį vieną visą apsisukimą.

2.1.3. Srovės erdvinio vektoriaus valdymas.

Jeigu žinomas impulsų skaičius per vieną sūkį, tai pradinė padėtis yra užkoduota. Šiame taške statoriaus srauto kampas gali būti pasuktas 90 laipsnių – tai taip pat perkelia i_d ir i_q ašis. Rotoriaus ir statoriaus srautas nesutampa, sistema mėgina išsilyginti ir variklis pasisuka.

Būtina nuolat atnaujinti duomenys apie padėtį ir sroves, kitaip variklis sustos. Šie atnaujinimo taškai, yra vadinami – servo atnaujinimas. Šituose taškuose, kodavimo įtaisas skaito srovių fazes variklio apvijose. Naudojamos tiesioginė Parko ir Clarke transformacijos, kad būtų apskaičiuotos i_d ir i_q ir elektrinis kampas. Ši informacija kartu su valdymo nuostata yra tiekama PID reguliatoriui, ir naujos (pakeistos) i_d , ir i_q srovių vertės yra grąžinamos į sistemą. Iš pakeistų išraiškų matyti, kad iš tikrųjų valdoma įtampa, tiekama variklio fazėms, kaip parodyta 1 lentelėje. Šitos vertės yra tada tiekiamos į IPM arba panašų reguliatorių (pvz., analoginį). Vertės i_d ir i_q atvirkščiai transformuojamos, kad duotų naujas fazinių srovių vertes. Šitos vertės yra tada tiekiamos IPM valdikliui ar kitam panašiam valdikliui.

3. TYRIMO TIKSLAI IR UŽDAVINIAI.

Tikslas: ištirti srovės erdvinio vektoriaus valdymo, ypatumus, privalumus ir charakteristikas.

Šiam tikslui pasiekti keliama tikie uždaviniai:

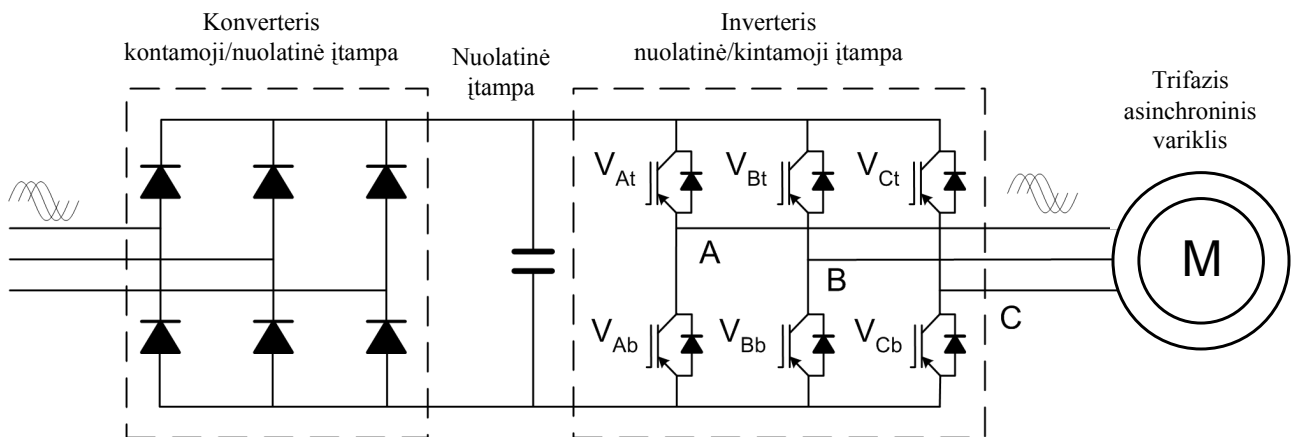
1. Atlikti erdvinio srovės vektoriaus valdymo literatūros apžvalgą.
2. Palyginti erdvinio srovės vektoriaus valdymą su kitais naudojamais valdymo būdais.
3. Sudaryti tiriamojo erdvinio srovės vektoriaus valdymo asinchroninių variklių tyrimui skirtą matematinį modelį.
4. Sudaryti modelio valdymo programą.
5. Pagal sudarytą erdvinio srovės vektoriaus valdymo asinchroninių variklių modelį, atlikti erdvinio vektoriaus netiesioginio, į srovę orientuoto valdymo charakteristikų ir pereinamųjų procesų tyrimą.
6. Apibendrinti tyrimo rezultatus ir suformuluoti atitinkamas išvadas.

4. TEORINĖ DALIS

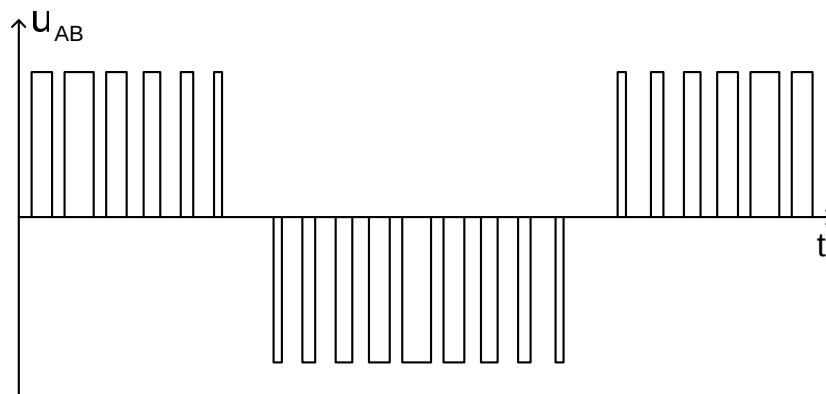
4.1. Dažnio keitikliai

4.1.1. Dažnio keitiklio veikimo principas

Dažnio keitiklio paskirtis – suformuoti keičiamo dažnio ir įtampos trifazį tinklą, prie kurio prijungus asinchroninį elektros variklį, jo apvijomis tekėtų sinusinės srovės ir jos būtų tokio dažnio, fazės ir dydžio, kad variklio rotorius sukėtų norimu greičiu, norima kryptimi ir turėtų reikiamą sukimo momentą. Egzistuoja didelė dažnio keitiklių įvairovė, tačiau dauguma jų yra 1 pav. pateiktos konverterio-inverterio struktūros. Konverteris kintamąją elektros tinklo įtampą paverčia nuolatine, o inverteris iš nuolatinės įtampos suformuoja trifazį keičiamo dažnio, fazės ir įtampos tinklą. Konverteris paprastai yra nevaldomas vienfazis arba trifazis lygintuvas. Sudėtingiausias dažnio keitiklio funkcinis mazgas yra inverteris, kurį sudaro tranzistoriniai raktai. Inverterį valdo specialus įrenginys su mikrovaldikliu arba (ir) signaliniu procesoriumi. Norint garantuoti patikimą inverterio darbą, turi būti stebimos tranzistorinių raktų būsenos, t. y. sekamos jų srovė, įtampa, temperatūra. Inverteris suformuoja impulsines įtampas (4.2 pav.), kuriomis maitinant variklį dėl jo apvijų indukcinės prigimties variklio apvijomis teka sinuso formos srovė.



4.1 pav. Struktūrinė dažnio keitiklio schema



4.2 pav. Įtampa tarp dviejų fazių inverterio išėjime

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

Vektorinio valdymo dažnio keitikliai gali greitai ir tiksliai valdyti variklio sukimosi momentą esant įvairiems sukimosi greičiams, gali dirbti esant dideliam pagreičiui. Jie taip pat gali įsijungti, kai variklis sukasi į bet kurią pusę. Asinchroninių variklių pavaros, valdomos vektorinio valdymo dažnio keitiklių, naudojamos didelio greičio liftuose, kranuose, laidų vyniojimo, popieriaus gamybos, plieno liejimo, plastikų gamybos ir kituose įrenginiuose.

4.1.2. Dažnio keitiklių rinka

Pramonėje plačiai naudojami asinchroniniai elektros varikliai, kurių galia svyruoja nuo 0,75 iki kelių dešimčių ir daugiau kilovatų (kW). Populiariausi pramonėje asinchroniniai varikliai, kurių galia 1–4 kW. Pavyzdžiui, JAV 1995 m. buvo apie 100 mln. įdiegtų asinchroninių variklių. JAV 2004 m. dažnio keitiklių parduota už 1,54 mlrd. dolerių arba apie 2–3 mln. vienetų. Planuojama, kad 2010 m. bus parduota už 1,73 mlrd. dolerių. Panaši situacija turėtų būti ir kitose išsivysčiusiose šalyse. Dažnio keitiklių rinka gana didelė. Ji turėtų būti maždaug tik kiek mažesnė nei televizorių, kurių pasaulyje per metus parduodama per 100 mln., arba asmeninių kompiuterių.

Remiantis neoficialiai iš atitinkamų firmų gautais duomenimis, Lietuvoje 2005 m. galėjo būti parduota keli tūkstančiai dažnio keitiklių, be tų, kurie buvo realizuoti kaip integruota atitinkamos įrangos dalis. Manoma, kad ateityje, siekiant vis labiau taupyti energiją ir geriau valdyti technologijas, asinchroninių variklių, valdomų dažnio keitikliais, bus išigyjama vis daugiau, todėl jų rinka, skirtingai nuo televizorių arba kompiuterių rinkos, turėtų nuolat augti. Dažnio keitikliai bus perspektyvūs ir dėl to, kad jie naudojami elektromobilių pavarose. Ateityje, mažėjant naftos atsargoms ir augant jos kainai, tokių automobilių gamyba, kartu ir jiems skirtų dažnio keitiklių rinka turėtų augti [13].

Keitiklio kaina priklauso nuo jo galios ir parametrų. Šiuo metu apytikriai ji svyruoja nuo 1000 Lt, 1 kW varikliui keitikliui iki 5000 Lt – 11kW varikliui [13].

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

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

4.1.3. Lietuviškas skaliarinio valdymo dažnio keitiklis

Panaudojant įgytą patirtį galios elektronikoje, Pustlaidininkų fizikos instituto Mikroelektronikos laboratorijoje buvo sukurtas skaliarinio valdymo dažnio keitiklis (3 pav.). Jis turi įprastas dažnio keitiklio galimybes, t. y. dažnis gali būti valdomas jame esančia rankenėle arba klaviatūra, taip pat naudojant išorinius analoginius signalus. Keitiklis turi vidinį reguliatorių sukimosi greičiui automatiškai valdyti uždaroje valdymo sistemoje ir įvairias apsaugas. Jis sukurtas naudojant modernią elementinę bazę, originalius scheminius sprendimus ir yra originalios konstrukcijos. Yra dvi 4–5,5 ir 7,5–11 kW galios modifikacijos.



4. 3 pav. Skalioarinio valdymo dažnio keitiklis

Sukurtas dažnio keitiklis turi ir išskirtinių savybių. Jame išėjimo įtampos formavimui panaudotas originalus signalo formavimo metodas, veikiantis erdvinio vektoriaus moduliavimo principu, leidžiantis sumažinti galios nuostolius ir tausojantis variklį. Automatiniam variklio sukimosi greičio valdymui uždaroje valdymo sistemoje panaudotas naujas, atsparus elektriniams trukdžiams netiesinis integrinis reguliatorius, kuris lengvai priderinamas prie valdomojo objekto. Dažnio keitikliai taip pat gali būti komplektuojami su reguliatoriais, pritaikytais nesimetrinės dinamikos objektų valdymui. Dažnio keitiklio inverterio raktų laipsnis suprojektuotas naudojant specialų modulį su šešiais atskirais raktų tranzistoriais. Tai leido pagerinti jų nuostolių energijos išsklaidymą, sumažinti keitiklio savikainą ir remonto kainą. Dažnio keitiklio konstrukcija pritaikyta nedidelės apimties gamybai, o jo kaina konkurencinga [13].

4.2. ERDVINIO SROVĖS VEKTORIAUS VALDYMAS

4.2.1. Variklio valdymo dėsniai

Asinchroninis variklis žinomas daugiau kaip 100 metų ir yra gerai ištirtas. Vykstantys jame procesai ir jų matematiniai modeliai smulkiai aprašyti pavarų teorijos ir elektrotechnikos knygose [3]. Čia paminėti tik pagrindiniai momentai, į kuriuos būtina atsižvelgti valdant elektros variklį.

Pastoviam sukimo momentui palaikyti variklyje reikia, kad būtų pastovus magnetinis srautas, kuris proporcingas statoriaus apvijų įmagnetinimo srovėms I_S . Srovės I_S teka per statoriaus apvijas, turinčias induktyvumą, ir gali būti reiškiamos taip:

$$I_S \sim E_S / (2 \pi f L_S); \quad (4.1)$$

čia: f – dažnis, L_S – statoriaus apvijų induktyvumas, E_S – statoriaus apvijų elektrovara. Jeigu statorius maitinimo įtampa U_S , tai neatsižvelgiant į įtampos kritimą statoriuje, $E_S = U_S$. Iš šio fakto ir (4.1) matyti, kad keičiant dažnį pastoviam variklio sukimo momentui palaikyti turi būti išlaikyta sąlyga

$$\frac{U}{f^2} = \text{const.} \quad \Rightarrow \quad U_S / f^2 = U_{\text{nom}} / f_{\text{nom}}^2; \quad (4.2)$$

čia: U_{nom} , f_{nom} – nominalioji įtampa ir nominalusis dažnis. Variklio valdymas pagal dėsnį (4.2) vadinamas tiesiniu.

Ventiliatorių ir siurblių variklių atliekamas darbas proporcingas sūkių kvadratu, todėl jų variklių sukimo momentas gali mažėti proporcingai dažniui, ir iš (4.1) išplaukia, kad U_S gali keistis pagal dėsnį $U_S / f^2 = U_{\text{nom}} / f_{\text{nom}}^2$, kuris vadinasi kvadratinio valdymo. Jis sumažina energijos nuostolius variklyje.

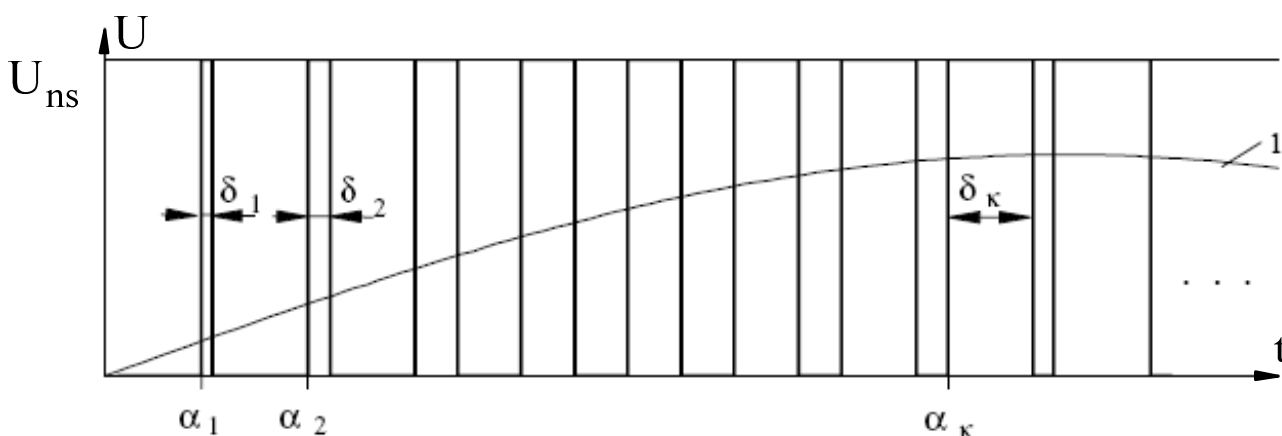
Tikroji įtampos priklausomybė nuo dažnio yra sudėtingesnė, nes įtampos kritimas statoriuje ΔU priklauso nuo variklio parametrų ir jo apkrovos ir beveik nepriklauso nuo dažnio, todėl

$$U_s \rightarrow \Delta U, \text{ kai } f \rightarrow 0. \quad (4.3)$$

Yra sričių, kurioms svarbios pavarų mechaninės ir dinaminės charakteristikos. Tada naudojami keitikliai, kurių jutikliai fiksuoja esamą variklio būseną, matematiniai modeliai ją įvertina ir optimaliu būdu parenka įtampą ir dažnį. Toks variklio valdymas vadinamas vektoriniu.

4.2.2. Keitiklio išėjimo įtampos formavimo būdai

Kaip matyti, valdymo metu variklio keitiklis turi keisti išėjimo įtampą plačiu diapazonu. Nors varikliui geriausia tinka sinusinė įtampa, keitiklio išėjimo elementai dirba rakto režimu ir formuoja ją kaip impulsų seką (4.4 pav.). Tinkamai parinkus impulsų parametrus (impulsų skaičių periode N , pradžios taškai α_i , $i = 1, 2, \dots, N$ ir pločiai δ_i , $i = 1, 2, \dots, N$) iš įtampos spektro galima eliminuoti antrą, trečią ir kitas žemas harmonikas arba minimizuoti jų amplitudes. Bet jos sukelia mažas sroves (4.1). Aukštesniųjų harmonikų amplitudės gali būti didelės. Tačiau statoriaus srovę lemia pirmoji įtampos harmonika ir ji pasidaro artima sinusinei. Proporcingai keičiant visų impulsų pločius δ_i keičiasi pirmosios harmonikos amplitudė A_1 . Pirmosios harmonikos dažnis f_p vadinamas faziniu, o įtampą formuojančių impulsų dažnis f_s – nešamojo virpesio dažniu.



4.4 pav. Keitiklio išėjimo įtampa ir jos pirmoji harmonika (1 kreivė)

Irodyta, kad galima pasiekti tokias keitiklio išėjimo įtampos spektro (harmonikų amplitudžių) savybes:

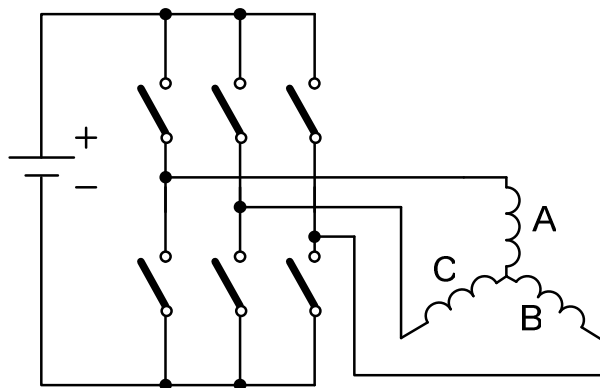
$$A_{2k} = 0, k = 1, 2, \dots, \quad (4.5)$$

$$A_{3k} = 0, k = 1, 2, \dots \quad (4.6)$$

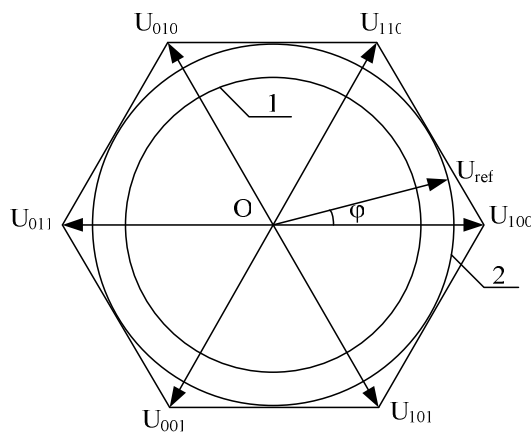
(4.5), (4.6) išraiškos būdingos sekoms, kurių impulsų pločiai gaunami lyginant du signalus: sinusinį, kurio dažnis lygus faziniam dažniui, su pjūkliniu, kurio dažnis pastovus ir lygus nešamojo virpesio dažniui. Toks išėjimo įtampos formavimo būdas vadinamas PWM (Pulse Width Modulation; IPM – impulso pločio moduliacija). PWM signalai, jų modifikacijos ir generavimo būdai pasaulyje buvo tyrinėjami 70-80-ais metais. PWM signalai tinka vienfazėms sistemoms, tačiau negali pasiekti pakankamos pirmosios harmonikos amplitudės trifazėse sistemose (4.6 pav.).

Pastaraisiais metais trifaziams signalams generuoti buvo sukurtas skaitmeniniais metodais pagrįstas SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation; EVIPM – erdvinio vektoriaus impulso pločio moduliacija) moduliavimo būdas [2, 4, 5]. Reikalaujama, kad trifazio inverterio (4.5 pav.) vieno peties raktai dirbtų priešinga faze, todėl inverteris gali turėti $2^3 = 8$ būsenas. Dvi iš jų, (000) ir (111) yra nulinės, o likusios (bazinės) pavaizduotos šešiakampio diagramoje (4.3 pav.), kuri parodo SVPWM principą. Bazinės inverterius būsenas atitinka šešiakampio viršūnės. Vektorius U_{ref} vaizduoja generuojamą įtampą: jo aukštis atitinka amplitudę, o φ – kampą nuo periodo pradžios. Priklausomai nuo φ , U_{ref} (atstojamasis) patenka į vieną iš šešių sektorių, o jo generavimo procese dalyvauja du artimiausi baziniai vektoriai (V_{100} ir V_{110} 4.6 pav.) ir nuliniai vektoriai. Skirtingas nulinių vektorių panaudojimas skatina rasti penkių skirtingų raktų jungimo algoritmus.

Žinomas dar vienas vienfazių signalų, pasižyminčių (4.5), (4.6) savybėmis generavimo būdas, kai kartu su faziniu dažniu keičiasi ir nešamojo virpesio dažnis, išlaikant santykį $f_s / f_p = M$, čia M yra pastovus dydis. Dėl besikeičiančio nešamojo virpesio dažnio jis vadinamas PFM (Pulse Frequency Modulation; IDM – impulsų dažnio moduliacija). Palyginti su PWM, PFM signalai turi daug privalumų ir vieną esminį trūkumą: $A_1 \rightarrow 0$, kai $f_p \rightarrow 0$. Tai prieštarauja (4.3) ir sukelia problemų valdant variklį esant mažiems dažniams. PFM signalus sudėtinga generuoti analoginiais būdais, todėl jie buvo mažiau ištirti negu PWM signalai prieš pradedant variklių valdymui taikyti mikroprocesorius.



4.5 pav. Trifazis inverteris

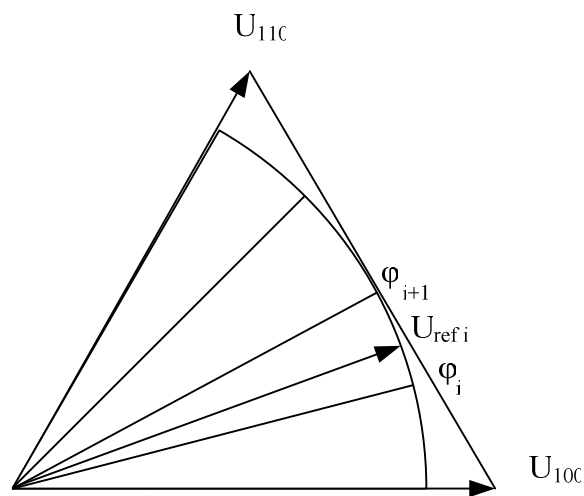


4.6 pav. Šėšiakampio diagrama (1 – maksimali PWM įtampa, 2 – maksimali SVPWM įtampa)

4.2.3. Impulsų dažnio moduliavimas erdvinio vektoriaus būdu

Erdvinio vektoriaus (SV) metodika naudojama PFM signalams gauti. SVPFM moduliavimo būdas panaudotas dažnio keitikliuose. SVPFM išlaikė teigiamus PFM moduliavimo būdo bruožus: stabilų išėjimo įtamos spektrą plačiame dažnių diapazone ir mažesnius energijos nuostolius inverteryje esant $f < f_{nom}$. Maksimali SVPFM įtampa tokia pat kaip SVPWM, tinka tie patys raktų jungimo algoritmai. SVPFM įtamos moduliavimo būdas gerai derinasi su skaitmeniniais metodais, o jo reikalavimai valdančiai elektronikai daug mažesni negu SVPWM.

Pavyzdžiui, valdant keitiklio išėjimo įtampą pagal (4.2) dėsnį SVPFM būdu generuojamų impulsų trukmės δ_i (4.4 pav.) išlieka pastovios, todėl jo realizavimui pakanka valdančio valdiklio, kurio laiko skiriamoji geba $1 \mu s$. Naudojant SVPWM ši mažėja proporcingai dažniui, todėl laiko skiriamoji geba turi būti dešimčių ns eilės. Moduluojant įtampą SVPFM būdu, vektoriai $U_{ref\ m}$, kuriems generuojami impulsai, atsiranda δ_m , $m = 1, 2, \dots M$ (4.4 pav.) yra fiksuoti. Tai leidžia apskaičiuoti impulsų trukmes δ_m ne pagal pradinį kampą φ (taip daroma naudojant SVPWM), o integruojant segmentuose $[\varphi_m, \varphi_{m+1}]$ (4.7 pav.). Signalas su integrinėmis impulsų trukmėmis turi mažesnę aukštų harmonikų lygį, o valdančiam mikrokontroleriui darbo metu nereikia skaičiuoti trigonometrinių funkcijų.



4.7 pav. Segmentinė diagrama

Gerus rezultatus davė impulsų su integravimo trukmėmis dauginimas. Jeigu $M = K \cdot L$, integravimo impulsų trukmės skaičiuojamos dažnių santykiui $f_s / f_p = L$, o kiekviename segmente $[\varphi_i, \varphi_{i+1}]$ generuojama K impulsų, kurių trukmė δ_m / K . Nors tokio signalo spektrinės savybės yra geresnės už integrinių impulsų trukmės signalų, kai $f_s / f_p = M$, jo generavimas žymiai paprastesnis nei pastarojo. Šiuo metu Pustlaidininkų instituto sukurtuose dažnio keitikliuose naudojamas generatorius, kurio $L = 24$, $K = 4$.

4.1 lentelėje pateiktos įvairiais būdais sugeneruotų signalų spektrinės charakteristikos taške $f_p = f_{nom}$, kuriame SVPWM ir SVPFM moduliavimo būdai sutampa.

4.1 lentelė. Įvairiais būdais sugeneruotų signalų spektrinės charakteristikos

Moduliavimo būdas	Santykis $ A_i / A_1 $			
	i = 5	i = 7	i = 9	i = 11
SVPWM, kai $f_p = 50$ Hz, $f_s = 4,8$ kHz	5,73e	3 5,45e	3 3,94e	3 5,63e
SVPFM kai, $f_p = 50$ Hz, $M = 96$	1,18e	3 1,31e	3 0,05e	3 1,71e
SVPFM (impulsų dauginimas) $f_p = 50$ Hz, $L = 24$, $K = 4$	1,25e	3 1,42e	3 0,23e	3 1,49e

Taške $f_p = f_{nom}$, kuris atitinka maksimaliąją variklio apkrovą, visais būdais generuotų signalų harmonikų lygis yra mažas, o SVPFM būdai netgi turi pranašumą (4.1 lentelė). Dažniui f_p mažėjant, SVPWM signalų spektrinės charakteristikos gerėja, o SVPFM signalų – blogėja. Dėl šios SVPFM signalų savybės ir priežasties (4.3), kai $f_p / f_{nom} < 0.1; 0.2$, būtina sustabdyti nešamojo virpesio dažnio mažinimą ir pereiti prie SVPWM moduliavimo būdo.

4.3. Trifazio elektromechaninio keitiklio transformavimas į ekvivalentinį dvifazį

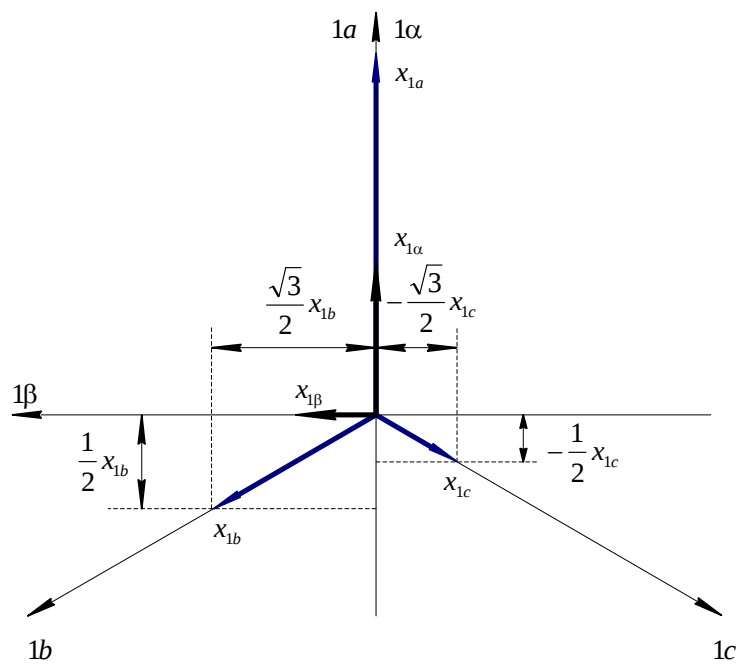
Dauguma pramoninių elektros pavarų kintamosios srovės varikliai – trifaziai, todėl iškyla būtinumas transformuoti tokių mašinų kintamuosius į dvifazės mašinos kintamuosius ir atvirkščiai.

Bet kokios simetrinės daugiafazės mašinos (kurios statorius turi m fazių, o rotorius – n fazių) dinamika gali būti aprašyta ekvivalentinės dvifazės mašinos lygčių sistema, bet tam reikia transformuoti daugiafazės į dvifazės mašinos kintamuosius. Trifazis asinchroninis variklis transformuojamas į ekvivalentinį dvifazį variklį. Tuomet išnyksta matematiniai sunkumai, susiję su dideliu lygčių kintamųjų ir mašinos parametrų skaičiumi, ir eliminuojami harmoniniu dėsniu kintantys parametrai. Transformacijos pagrindu gali būti koordinačių transformacija, nes MV suminis vektorius gali būti sukurtas maitinant apvijas tiek dvifaze, tiek trifaze įtampa.

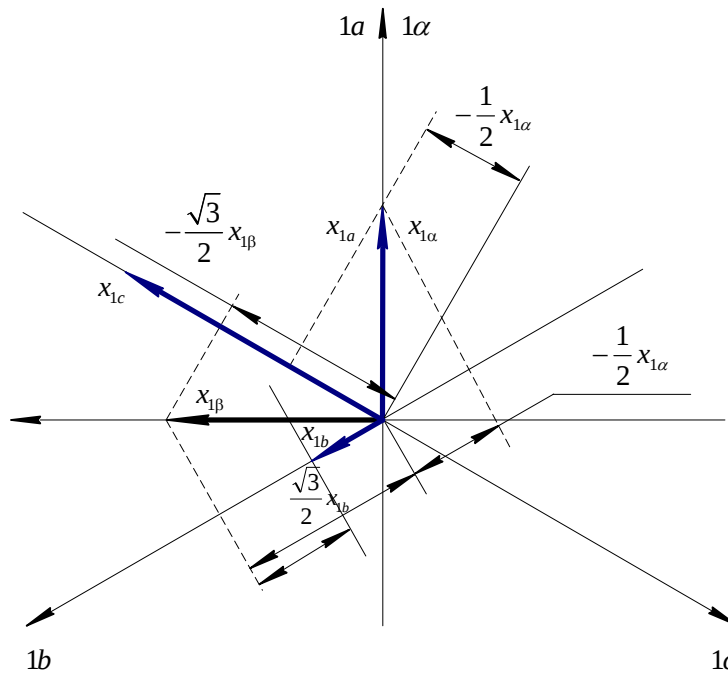
Taigi tenka transformuoti trifazės mašinos statoriaus realius kintamuosius x_{1a}, x_{1b}, x_{1c} į stačiakampę koordinačių sistemą α, β , į ekvivalentinės dvifazės mašinos statoriaus realiuosius kintamuosius. Kintamųjų transformacijos išraiškoms gauti laikoma, kad trifazės mašinos realieji kintamieji yra vektoriai ir tariama, kad transformuotieji kintamieji α ir β ašyse nelygūs, o proporcingi realiųjų kintamųjų x_{1a}, x_{1b}, x_{1c} projekcijų ašyse α ir β sumai. Remiantis schema, pavaizduota 4.8 pav., galima užrašyti:

$$\begin{cases} x_{1\alpha} = k_s \left(x_{1a} - \frac{1}{2} x_{1b} - \frac{1}{2} x_{1c} \right); \\ x_{1\beta} = k_s \left(\frac{\sqrt{3}}{2} x_{1b} - \frac{\sqrt{3}}{2} x_{1c} \right). \end{cases} \quad (4.7)$$

čia k_s – suderinantis proporcingumo koeficientas, kurio dydis priklauso nuo galios invariantiškumo sąlygų.



4.8 pav. Trifazės mašinos kintamųjų transformavimas



4.9 pav. Trifazės mašinos kintamųjų atvirkštinis transformavimas

Praktikoje labiausiai paplitęs atvejis, kai trifazė mašina yra simetrinė, jos apvijos sujungtos žvaigžde ir kintamieji atitinka sąlygą:

$$x_{1a} + x_{1b} + x_{1c} = 0. \quad (4.8)$$

Įvertintas lygtis (4.7) ir (4.8) galima pertvarkyti taip:

$$\begin{cases} x_{1\alpha} = \frac{3}{2} k_s x_{1a}; \\ x_{1\beta} = \frac{\sqrt{3}}{2} k_s (x_{1b} - x_{1c}). \end{cases} \quad (4.9)$$

Mašinos rotoriaus grandinės kintamieji x_{2d} , x_{2q} randami iš (4.6) ir (4.7) pakeičiant atitinkamus indeksus:

$$x_{2a} + x_{2b} + x_{2c} = 0; \quad (4.10)$$

$$\begin{cases} x_{2\alpha} = \frac{3}{2}k_s x_{2a}; \\ x_{2\beta} = \frac{\sqrt{3}}{2}k_s (x_{2b} - x_{2c}). \end{cases} \quad (4.11)$$

Atvirkštinio transformavimo formules galima analogiškai gauti panaudojant 4 pav.:

$$\begin{cases} x_{1a} = k_s x_{1\alpha}; \\ x_{1b} = k_s \left(-\frac{1}{2}x_{1\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2}x_{1\beta} \right); \\ x_{1c} = k_s \left(-\frac{1}{2}x_{1\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2}x_{1\beta} \right). \end{cases} \quad (4.12)$$

Tenkinant (4.6) sąlygą, (4.10) sistemos trečioji lygtis gali būti gauta panaudojant dvi pirmąsias, nes $x_{1c} = -(x_{1a} + x_{1b})$. Suderinimo koeficientas k_s užtikrina invariantiškumo sąlygą transformuojant kintamuosius. Norint gauti suderinimo koeficientą k_s , suminė akimirkinė galia, kurią sunaudoja trifazės mašinos statoriaus apvijos, išreiškiama ekvivalentinės dvifazės mašinos kintamaisiais, panaudojant (4.10) lygčių sistemą:

$$\begin{aligned} u_{1a}i_{1a} + u_{1b}i_{1b} + u_{1c}i_{1c} &= \\ &= (k_s u_{1\alpha})(k_s i_{1\alpha}) + \left[k_s \left(-\frac{1}{2}u_{1\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2}u_{1\beta} \right) \right] \left[k_s \left(-\frac{1}{2}i_{1\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{1\beta} \right) \right] + \\ &+ \left[k_s \left(-\frac{1}{2}u_{1\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2}u_{1\beta} \right) \right] \left[k_s \left(-\frac{1}{2}i_{1\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{1\beta} \right) \right] = \\ &= k_s^2 \left(\frac{3}{2}u_{1\alpha}i_{1\alpha} + \frac{3}{2}u_{1\beta}i_{1\beta} \right). \end{aligned} \quad (4.13)$$

Taigi norint įvykdyti invariantiškumo sąlygą, suderinimo koeficientas turi būti lygus $k_s = \frac{\sqrt{3}}{2}$. Tada $u_{1a}i_{1a} + u_{1b}i_{1b} + u_{1c}i_{1c} = u_{1\alpha}i_{1\alpha} + u_{1\beta}i_{1\beta}$.

Apskritai, jei $x_{1a} + x_{1b} + x_{1c} \neq 0$, tada atsiranda nulinė seka x_0 . Tokiu atveju tiesioginės ir atvirkštinės transformacijos formulės tokios:

$$\begin{cases} x_{1\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(x_{1a} - \frac{1}{2} x_{1b} - \frac{1}{2} x_{1c} \right); \\ x_{1\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} x_{1b} - \frac{\sqrt{3}}{2} x_{1c} \right); \\ x_{10} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\frac{\sqrt{2}}{2} x_{1a} + \frac{\sqrt{2}}{2} x_{1b} + \frac{\sqrt{2}}{2} x_{1c} \right); \end{cases} \quad (4.14)$$

$$\begin{cases} x_{1a} = \sqrt{\frac{3}{2}} \left(x_{1\alpha} + \frac{\sqrt{2}}{2} x_{10} \right); \\ x_{1b} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(-\frac{1}{2} x_{1\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2} x_{1\beta} + \frac{\sqrt{2}}{2} x_{10} \right); \\ x_{1c} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(-\frac{1}{2} x_{1\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2} x_{1\beta} + \frac{\sqrt{2}}{2} x_{10} \right). \end{cases} \quad (4.15)$$

Praktiškai transformavimo formulės (4.14) ir (4.15) naudojamos tiriant simetrinės trifazės mašinos nesimetrinius režimus. Čia reikia atsižvelgti į tai, kad nulinės sekos srovės nelemia variklio kuriamą momentą, todėl daugelyje atvejų nulinės sekos kintamųjų poveikis elektromechaninių sistemų dinamikai neįvertinamas.

5. TIRIAMOJI DALIS

5.1. Matematiniai asinchroninių variklių modeliai

5.1.1 Matematinis asinchroninio variklio modelis

Metalo pjovimo staklių (ir daugumos kitų mašinų) elektromechaninių sistemų pavarų nagrinėjimui ir skaičiavimui būtinas toks modelis, kuris būtų gana paprastas ir leistų išbandyti dinامينius (paleidimas stabdymas, apkrovos padidinimas ir sumažinimas, periodinis ir atsitiktinis apkrovos svyravimas sukantis nominaliuoju greičiu) bei statinius pavarų su asinchroniniais varikliais darbo režimus. Toks modelis turi realizuoti šias asinchroninio elektrinio variklio savybes:

- netiesinę statinę mechaninę charakteristiką (patikslintą arba apytikslę);
- įjungiamo ir stabdomo variklio dinaminio momento pasikeitimus pokyčius.

Visi modeliui reikalingi parametrai apskaičiuojami iš asinchroninio variklio paso duomenų:

n_n , aps/min	nominalusis sukimosi greitis;
f_T , Hz	maitinimo tinklo dažnis;
p	polių porų skaičius;
s_k	kritinis slydimas procentais, 39%;
s_n	nominalusis slydimas procentais, 6,3%;
M_{km}	maksimalusis sukimo momentas;
J_v , $\text{kg}\cdot\text{m}^2$	variklio rotoriaus inercijos momentas;
P_n , W	nominalioji variklio galia.

Iš šių paso duomenų apskaičiuojami modeliui reikalingi parametrai:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_n}{60}, \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Kampinis maitinimo tinklo dažnis

$$M_n = \frac{W_n \cdot p}{(1 - s_n) \cdot \omega_0}, \text{N} \cdot \text{m}$$

Nominalusis momentas

$$M_n = M_n \cdot M_{kk}, \text{N} \cdot \text{m}$$

Kritinis momentas

$$T_e = \frac{1}{\omega_0 \cdot s_k}, \text{s}$$

Laiko pastovioji

Asinchroninio variklio dinamikos matematinis modelis:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dM_n}{dt} &= (\omega_0 - p \cdot \omega) \cdot \Psi - \frac{1}{T_e} \cdot M_n; \\ \frac{d\Psi}{dt} &= \frac{2}{T_e} M_k - \frac{1}{T_e} \Psi - (\omega_0 - p \cdot \omega) \cdot M_n; \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} M_n - \frac{1}{J} M_a. \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

Asinchroninio variklio paleidimo proceso skaičiavimas MathCAD terpėje:

Lygčių sistema ir pradinės sąlygos:

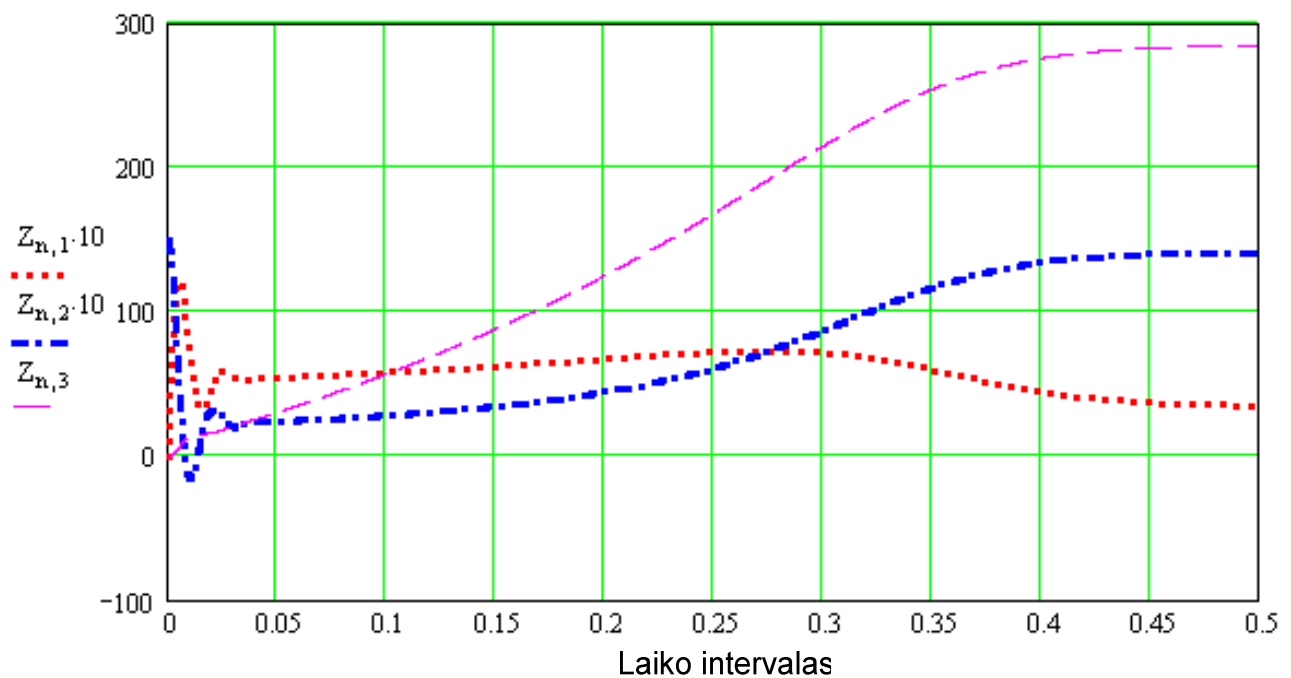
$$y := \begin{pmatrix} 0 \\ Mk \cdot 2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{variklio momentas;} \\ \text{pagalbinis momentas} \\ \text{sukimosi greitis} \end{array}$$

$$D(t, y) := \begin{bmatrix} y_1 \cdot (\omega_0 - p \cdot y_2) - \frac{y_0}{T_e} \\ \left[\frac{(2 \cdot Mk - y_1)}{T_e} + 1 \cdot -(\omega_0 - p \cdot y_2) \cdot y_0 \right] \\ \frac{(y_0 - Ma)}{J_v} \end{bmatrix}$$

$$Z := \text{rkfixed}(y, 0, 0.5, 8000, D) \quad n := 0 \dots 8000$$

$$\text{Laiko intervalas} := \frac{n \cdot 0.5}{8000}$$

(5.2)



5.1 pav. Asinchroninio variklio imitavimo kompleksinės varžos kitimo kreivės MathCAD terpėje

5.1.2. Matematinis pasirinktos mašinos modelis

Šiame darbe taikomi tokie pradiniai variklio duomenys (pateiktas ir pažymėjimas, pritaikytas sudarytoje programoje):

Pasirinkti variklio parametrai:

5.1 lentelė. Pasirinkto variklio parametrai

Galia	20	AG
U	220	V
$\cos \varphi$	0,853	
p	4	
f_{nom}	50	Hz
S_{nom}	0,0287	
n_{nom}	1748,3	aps/min
$i_{a\ sb}$	49,68	A
R_s	0,1062	Ω
X_{ls}	0,2145	Ω
X_m	5,8339	Ω
J	2,8	$kg \cdot m^2$
D	0	

Programos sudarymui taikomos formulės:

$$Galia = 20AG;$$

$$P_{nom} = S_b = Galia \cdot 746 = 20 \cdot 746 \text{ V} \cdot A;$$

$$U_{nom} = V_{rated} = 220 \text{ V};$$

$$\cos \varphi = 0,853;$$

$$I_{nom} = \frac{P_{nom}}{\sqrt{3} \cdot U_{nom} \cdot \cos \varphi \cdot \eta_{nom}} = I_{rated} = \frac{S_b}{\sqrt{3} \cdot U_{rated} \cdot \cos \phi \cdot 1} = 45,9 \text{ A};$$

$$p = 4;$$

$$f_{maitinimo} = f_{rated} = 50 \text{ Hz};$$

$$\omega_b = 2 \cdot \pi \cdot f_{rated} = 314 \text{ rad/s};$$

$$\omega_e = \omega_b = 314 \text{ rad/s};$$

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 2\pi f}{p} = \omega_{bm} = \frac{2 \cdot \omega_b}{p} = 157 \text{ rad/s};$$

$$M_{nom} = \frac{P_{nom}}{\omega_0} = T_b = \frac{S_b}{\omega_{bm}} = 95 \text{ N} \cdot \text{m};$$

$$Z = \frac{U^2}{P_{nom}} = \frac{P_{nom}}{I_{nom}^2} = Z_b = \frac{V^2}{S_b} = 3,24 \Omega;$$

$$U = U_{nom} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} = V_m = V_{rated} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} = 180 \text{ V};$$

$$V_b = V_m = 180 \text{ V};$$

$$M_{factor} = T_{factor} = \frac{3 \cdot p}{4 \cdot \omega_b} = 9,55 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m};$$

$$s_{nom} = s_{rated} = 0,0287$$

$$n_{nom} = n_{rated} = 1748 \frac{\text{aps}}{\text{min}};$$

$$\omega_{nom} = \frac{\pi \cdot n_{nom}}{30} = \omega_{m \text{ rated}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{rated}}{60} = \frac{\pi \cdot n_{rated}}{30} = 183 \frac{\text{rad}}{\text{s}};$$

$$M_{nom} = \frac{P_{nom}}{\omega_{nom}} = T_{rated} = \frac{S_b}{\omega_{m \text{ rated}}} = 81,5 \text{ N} \cdot \text{m};$$

$$i_{asb} = 49,7 \text{ A};$$

$$R_s = 0,106 \Omega;$$

$$X_{ls} = 0,215 \Omega;$$

$$X_{plr} = X_{ls} = 0,215 \Omega;$$

$$X_m = 5,84 \Omega;$$

$$X_M = \frac{1}{\frac{1}{X_m} + \frac{1}{X_{ls}} + \frac{1}{X_{plr}}} = 0,105 \Omega;$$

$$J = 2,8 \text{ kg} \cdot \text{m}^2;$$

$$M_x = \frac{P_x}{\omega_x} = T_{rated} = \frac{S_b}{\omega_{bm}};$$

$$t_{stabymo} = \frac{J \cdot \omega_{nom}}{M_{vid.} + M_{st}} = \frac{J \cdot \omega_{nom}}{\frac{S_b + S_b}{\omega_{nom}}} \Rightarrow H = \frac{J \cdot \omega_{bm}^2}{2 \cdot S_b} = 66,4 \cdot 10^{-3} \text{ s};$$

$$D = \frac{\omega_{max}}{\omega_{min}} = 0.$$

5.2. Valdymo programos sudarymas

5.2.1. Netiesioginis lauko valdymas

Labai mažiems greičiams ir pozicionavimui, greičio nestabilumas nėra leistinas. Būtent tokioms sąlygoms ir reikalingas alternatyvus valdymas, toks kaip netiesioginis lauko valdymas. Momentas gali būti valdomas keičiant fiktyvia rotoriaus įmagnetėjimo srovę – i_{qs}^e ir slydimo greitį, $(\omega_e - \omega_r)$. Rotoriaus srautas gali būti valdomas keičiant i_{ds}^e . Pasirinkus norimą rotoriaus srauto vertę – λ_r^* , reikiamą fiktyvi rotoriaus įmagnetinimo srovę – i_{ds}^{e*} skaičiuojama taip:

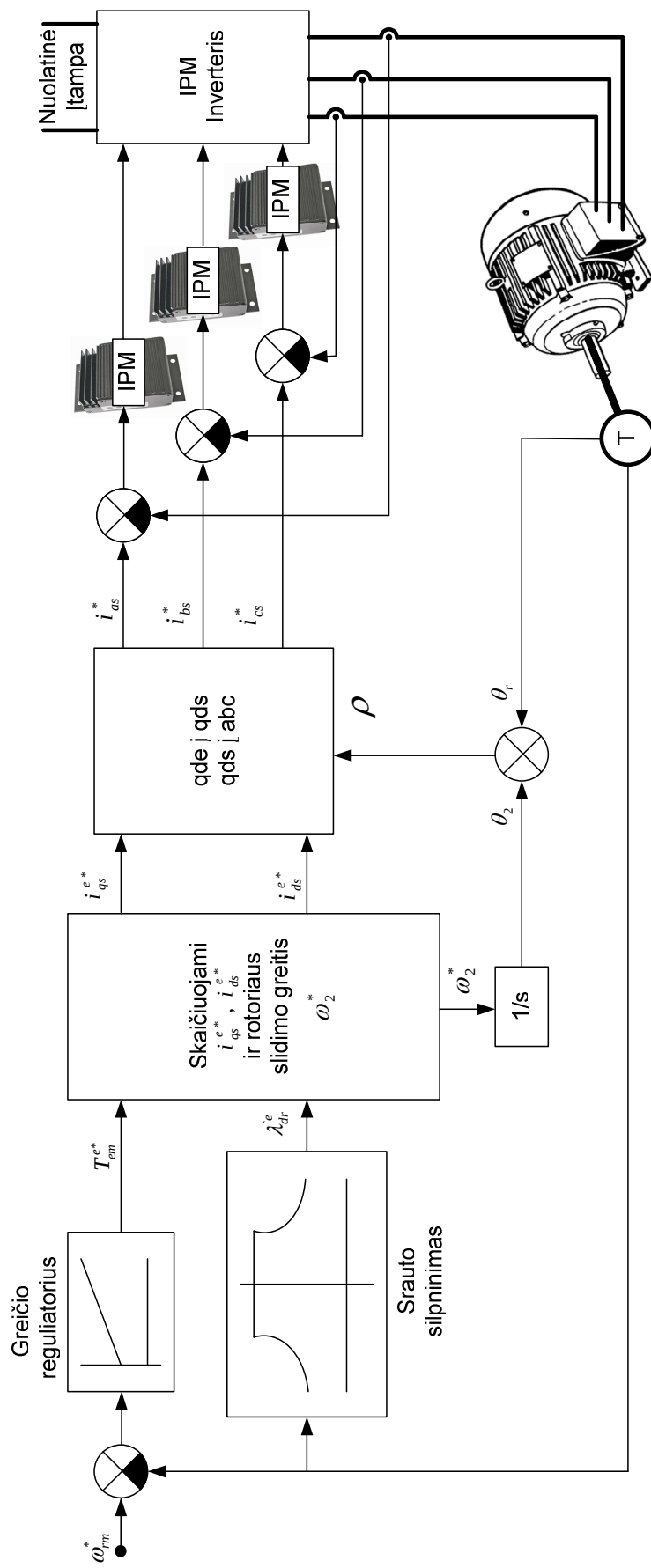
$$\lambda_r^* = \frac{r_r L_m}{r_r + L_r p} i_{ds}^{e*}. \quad (5.1)$$

Norimas momentas T_{em}^{e*} esama rotoriaus srauto vertei skaičiuojamas taip:

$$T_{em}^{e*} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot \lambda_r^* \cdot i_{ds}^{e*}. \quad (5.2)$$

Jeigu $i_{dr}^e = 0$ ir $\lambda_{dr}^e = L_m i_{ds}^{e*}$, tai slydimo greitis:

$$\omega_2^* = \omega_e - \omega_r = \frac{r_r}{L_r p} \cdot \frac{i_{qs}^{e*}}{i_{ds}^{e*}}. \quad (5.3)$$



5.1. pav. Netiesioginis, srovės erdvinio vektoriaus valdymo funkcinė schema su srovę valdančiu IPM

Rotoriaus ir statoriaus laukų orientacija – ρ yra rotoriaus kampo θ_r iš pozicionavimo jutiklio ir kampo θ_2 iš integruojamo slydimo greičio suma. Jeigu $\cos\theta_r$ ir $\sin\theta_r$ yra gaunami iš veleno sukimosi greičio matuoklio, dydžiai $\cos\rho$ ir $\sin\rho$ skaičiuojami iš priklausomybės :

$$\begin{aligned}\cos\rho &= \cos(\theta_r + \theta_2) = \cos\theta_r \cos\theta_2 - \sin\theta_r \sin\theta_2; \\ \sin\rho &= \sin(\theta_r + \theta_2) = \sin\theta_r \cos\theta_2 + \cos\theta_r \sin\theta_2.\end{aligned}\tag{5.4}$$

Pats imitacinis modelis yra sudarytas naudojant MATLAB programų paketą „SIMULINK“. Šioje programoje iš standartinių blokų sudaromas modelis, atitinkantis srovės vektoriaus valdomo asinchroninio variklio modelį.

5.2.2 Valdymo programos sudarymas

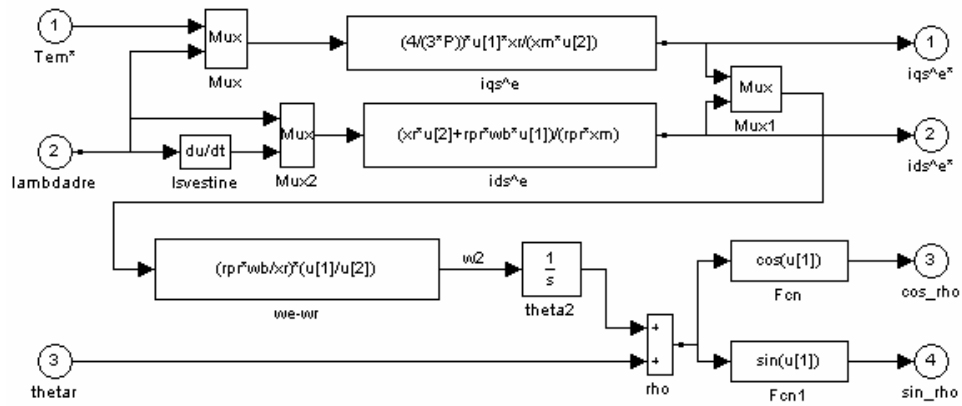
Matematiniam variklio modeliui, pateiktam 5.2. poskyryje, sudaryti reikalinga sukurti valdymo programą. Tokios programos kūrimas pradedamas nuo valdomo objekto matematinio modelio programavimo. Programuojama MATLAB terpėje ir sukuriamas jam atskiras failas „P20HP.M“, kuriame aprašomos variklio matematinio modelio, pateikto 5.6. poskyryje, priklausomybės. Variklio programa pateikta prieduose.

Norint gauti variklio charakteristikas, kurios vėliau bus naudojamos valdymo modelyje, naudojamas atskiras nustatymų failas „M3.M“. Jame rašoma programa skaičiuojamam varikliui, kurio matematinis modelis pateiktas „P20HP.M“, charakteristikų ir užduodamų nustatymo kintamųjų (toku kaip apkrovos kitimo funkcija, modeliavimo trukmė, greičio nuostato funkcija ir kiti) modeliavimui. Charakteristikų skaičiavimo rezultatai „M3.M“ faile yra pateikiami 5.5 pav.

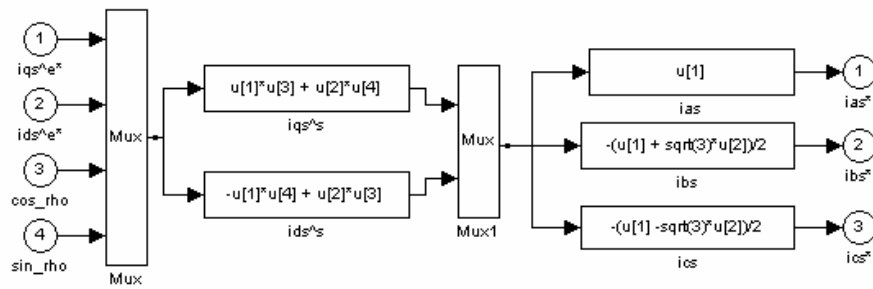
Pats imitacinis modelis yra sudaromas naudojant MATLAB programų paketą „SIMULINK“. Šioje programoje iš standartinių blokų sudaromas modelis, atitinkantis srovės vektoriaus valdomo asinchroninio variklio modelį (5.2 pav.).



Čia matomi pagrindiniai šio metodo blokai: trifazės maitinimo įtampos keitimas į dvi „vds“, „vqs“ ir atgal. Nors ši schema atrodo gana paprastai, bet joje yra daugiau apibendrintų logikos blokų :

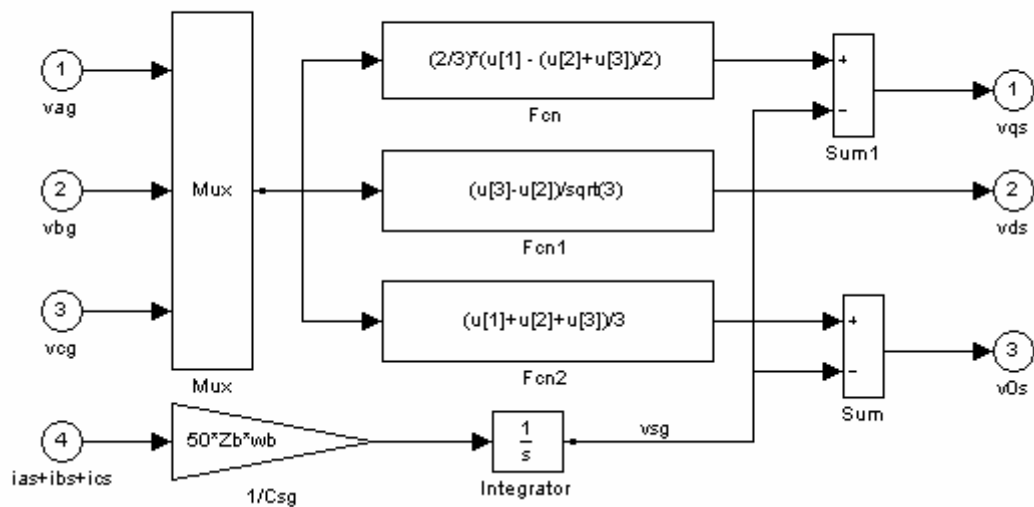


a)

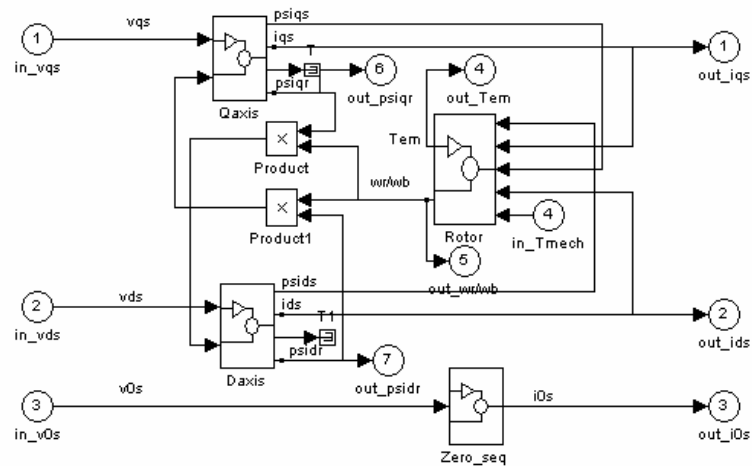


b)

abc i qd0 stacionarias

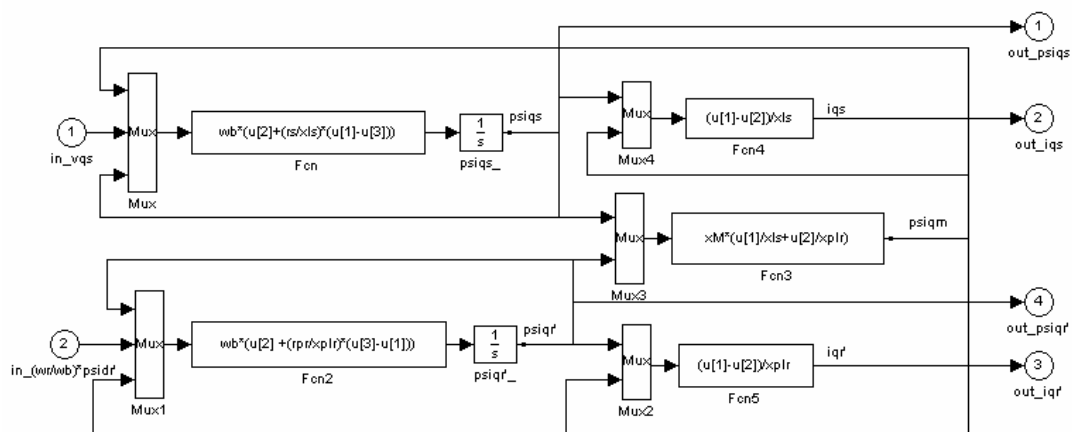


c)

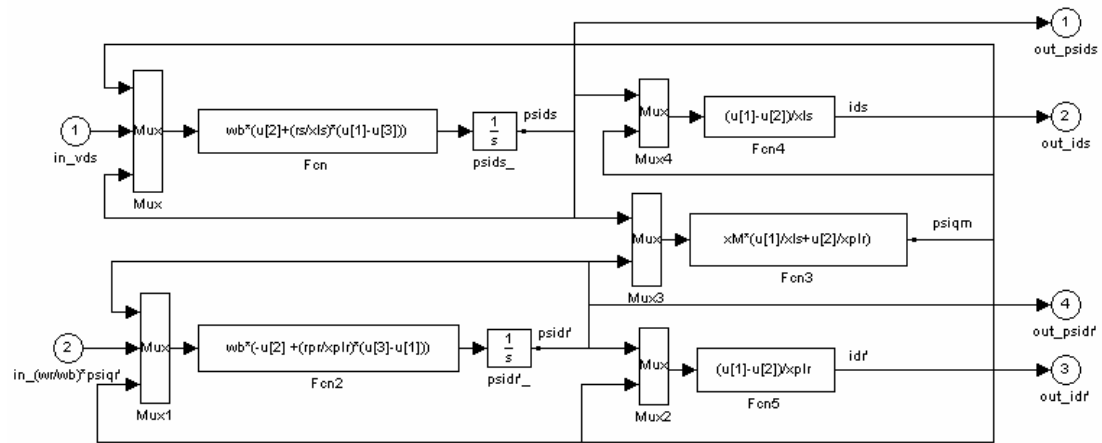


d)

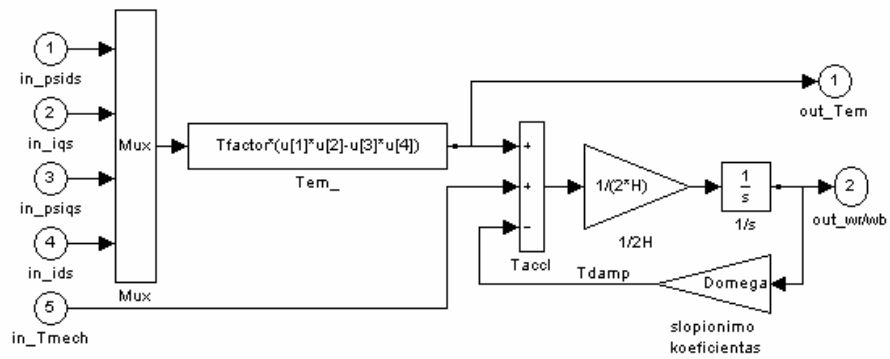
Pati asinchroninė mašina su statoriumi turi dar vidinius blokus:



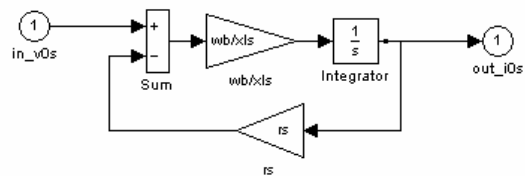
e)



f)



g)



h)

5.3 pav. Valdymo ir variklio modelio programos „Modelis“ blokų schemos: a) „I lauką orientuotas“; b) „qde2abc“; c) „abc2qds“; d) „indukcinė mašina su statorių qd0“; e) „Q ašis“; f) „D ašis“; g) „Rotorius“; h) „nulinė_seka“

5.3 pav. Parodyta programos modelio blokų vidinė sandara. Blokai išdėstyti pagal pavadinimus atitinkančius 5.2 pav. „*Modelis.mdl*“ blokinę schemą.

Visa ši funkcinių blokinių diagramų logika (FBD) sukurta standartiniais SIMULINK blokais yra papildoma kintamais duomenimis, užduodamais „M3.M“ (ten užduodamos ir nuostatų kitimas), o šiam moduliui, kaip aptarta aukščiau, yra pavaldus „P20HP.M“ failas su variklio nustatymais.

5.2.3. Erdvinio srovės vektoriaus valdymo tyrimas

Tai toks asinchroninio variklio valdymas, kuriame naudojami impulsų pločio moduliavimas. Čia kaip ir erdvinio vektoriaus moduliavime ir jo padėties bei amplitudės valdyme, rotorius srautas palaikomas beveik nekintamas, kintant apkrovos momentui. Dinaminio atsako privalumai naudojant šį vektorinio valdymo būdą palyginti su kitais esamais. Palyginimui naudojamas asinchroninis variklis:

$P = 20 \text{ AG (14,914 kW)}$;

$U = 220 \text{ V}$;

$2p = 4$ polių asinchroninis variklis.

5.4 pav., a parodyta asinchroninio variklio blokinė „*Modelis*“ schema, kai srovė valdoma, impulsų pločio moduliavimo būdu. Dėl didelės modeliavimo trukmės, persijungimų greitis neįvertintas ir įvertinama tik pagrindinė impulsų pločio moduliavimo išėjimo įtampos dedamoji. Proporcinis-integralinis (PI) sukimo momento reguliatorius greičio nuokrypį paverčia į atstojamąjį momentą – T_{em}^* . Erdvinio vektoriaus moduliavimo yra bloke atstojamasis momentas – T_{em}^* , d ašies rotorius srautas – λ_{dr}^{e*} , ir rotorius kampas – θ_r .

5.4 pav., b pateikiama „*Į lauką orientuotas*“ bloko struktūra. Jame panaudotos lygtys:

$$\lambda_{dr}^{e*} = \frac{r_r' L_m}{r_r' + L_r' p} i_{ds}^{e*}; \quad (5.5)$$

$$T_{em}^* = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r'} \lambda_{dr}^{e*} i_{ds}^{e*}; \quad (5.6)$$

$$\omega_2^* = \omega_e - \omega_r = \frac{r_r' i_{qs}^{e*}}{L_r' i_{ds}^{e*}}. \quad (5.7)$$

kintamiesiems i_{ds}^{e*} , i_{qs}^{e*} , ir ω_2^* skaičiuoti. Kampas ρ yra slydimo kampo θ_2 ir rotoriaus kampo θ_r vektorinė suma. *qde2abc* bloke, vykdoma tokia srovės transformacija:

$$\begin{aligned} i_{qs}^{s*} &= i_{qs}^{e*} \cos \rho + i_{ds}^{e*} \sin \rho; \\ i_{ds}^{s*} &= -i_{qs}^{e*} \sin \rho + i_{ds}^{e*} \cos \rho; \end{aligned} \quad (5.8)$$

$$\begin{aligned} i_{qs}^e &= i_{qs}^{s*} \cos \rho - i_{ds}^{s*} \sin \rho; \\ i_{ds}^e &= i_{qs}^{s*} \sin \rho + i_{ds}^{s*} \cos \rho. \end{aligned} \quad (5.9)$$

Ji naudojama *abc* redukuotosioms srovėms gauti. SIMULINK modelyje (5.4 pav.) yra trys šunto varžos, kurių kiekviena 500 kartų didesnė už mašinos induktyvumą. Jos prijungtos tarp statoriaus fazinių apvijų galų ir žvaigždės taško *g* iš šaltinio pusės, naudojamos įėjimo galų *abc* trifazei įtampai generuoti.

5.1 lentelėje (*Field-weakening look-up*) yra rotoriaus d ašies srauto λ_{dr}^e , vertę, atitinkančią mechaninį greitį – ω_m . Greitis mažesnis už tuščiosios veikos ar nominalųjį greitį λ_{dr}^e yra prilyginamas neapkrautos mašinos apskaičiuotam dydžiui esant nominaliajai šaltinio įtampai:

$$(\nu_{qs}^e - j\nu_{ds}^e) = (r_s + j\omega_e L_s')(i_{qs}^e - ji_{ds}^e) + (E_{qs}' - jE_{ds}'); \quad (5.10)$$

$$T_0' = \frac{x_{lr}' + x_m'}{\omega_e r_r'}. \quad (5.11)$$

Po variklio paleidimo srauto amplitudė išlieka pastovi nekintant užduotajam greičiui. Dydis λ_{dr}^{e*} ir mechaninis greitis yra generuojami *m3* faile, kuris kartu naudojamas parametrams ir kitoms paleidimo sąlygoms nustatyt ir modeliuoti MATLAB darbo lange.

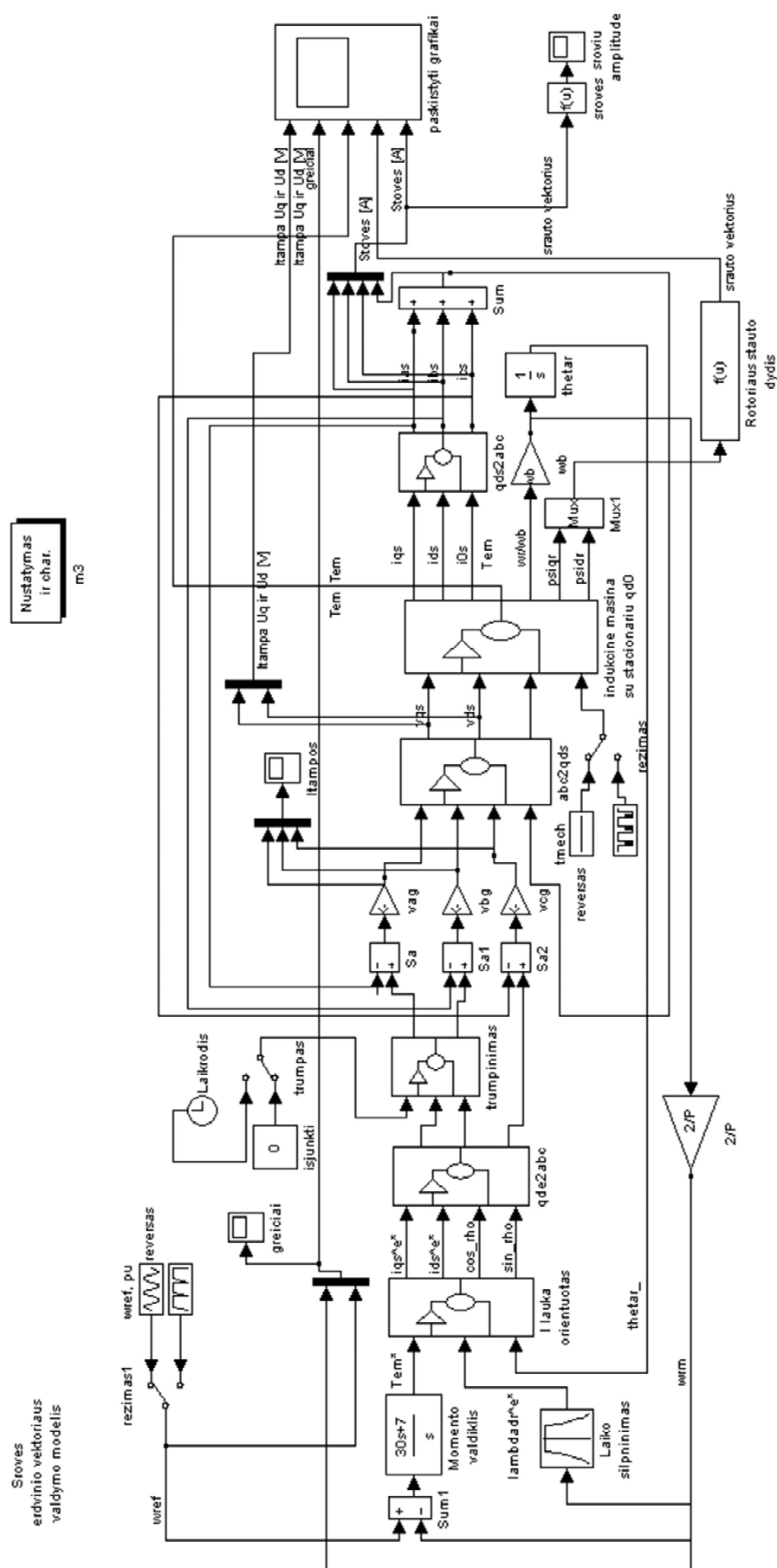
5.1 lentelė. „*field-weakening look-up*“ rotoriaus d-ašies srautas λ_{dr}^e

0,1624	0,1710	0,1805	0,1911	0,2030	0,2166	0,2320	0,2499
0,2707	0,2953	0,3248	0,3248	0,3248	0,3248	0,3248	0,3248
0,3248	0,3248	0,3248	0,3248	0,3248	0,3248	0,3248	0,3248
0,3248	0,3248	0,3248	0,3248	0,3248	0,3248	0,3248	0,2953
0,2707	0,2499	0,2320	0,2166	0,2030	0,1911	0,1805	0,1710
0,1624							

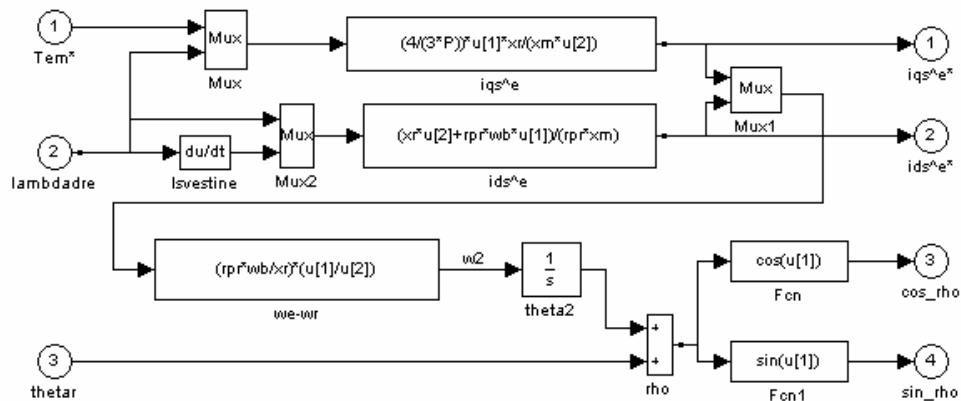
Atitinkamos mechaninio greičio vertės:

5.2 lentelė. „*field-weakening look-up*“ lauko silpninimui atitinkantis mechaninis greitis ω_{rm}

-376,9911	-358,1416	-339,2920	-320,4425	-301,5929	-282,7433	-263,8938	-245,0442
-226,7947	-207,3451	-188,4956	-169,6460	-150,7964	-131,9469	-113,0973	-94,2478
-75,3982	-56,5487	-37,6991	-18,8496	0	18,8496	-113,0973	56,5487
75,3982	94,2478	113,0973	131,9469	150,7964	169,6460	37,6991	207,3451
226,1947	245,0442	263,8938	282,7433	301,5929	320,4425	188,4959	357,1416
376,9911							



a)



b)

5.4 pav. Netiesiogiai, srove valdomo asinchroninio variklio blokinė schema: a) „Modelis“ blokinė schema; b) Modelis „[lauką orientuotas“ bloko vidus

Asinchroninio variklio netiesioginio erdvinio srovės vektoriaus valdymo su pradiniais duomenimis blokinė schema parodyta 5.4 pav. Naudojamas, *m3*, MATLAB kodo failas, kuriuo užduodami pradiniai parametrai ir mašinos pastoviosios. Valdymo parametrai, perdavimo signalai ir apkrovos trikdžius, veikiant sistemą.

Žingsninis momento pokytis esant pastoviam greičiui. Mašinos greičio pokytis gaunamas perskaičiuojant greitį į žingsninę apkrovos momento kitimo eilę. Naudojant teksto redaktorių tikrinama ar *m3* nustatė reikiamas vertes.

tstop: Tyrimo laikas iki dviejų sekundžių.

time_wref: Laiko riba greičio redukavimui *pasikartojančios sekos* signalo šaltiniui [0 0,5 tstop].

speed_wref: Dydžio riba greičio redukavimui *pasikartojančios sekos* signalo šaltiniui [0 wbm wbm].

time_tmech: Laiko riba T_{mech} *pasikartojančios sekos* signalo šaltiniui [0 0,75 0,75 1, 1, 1,25 1,25 1,5 1,5 2].

tmech_tmech: Dydžio riba T_{mech} *pasikartojančios sekos* signalo šaltiniui [0 0 -Trated -Trated -Trated/2 -Trated/2 -Trated -Trated 0 0].

Modelis paleidžiamas naudojant *ode15s* arba ADAMS/GEAR metodą, pabaigos laikas – 2 s, minimalus žingsnis – $1 \cdot 10^{-4}$ s, maksimalus žingsnis – 0,01 s ir leidžiamas nuokrypis – $1 \cdot 10^{-5}$ s.

Programoje naudojami dydžiai ir žymenys: redukuotas greitis – *wref*, rotoriaus mechaninis greitis – *wrm*, statoriaus *a*-fazės įtampa – *vag*, statoriaus *a*-fazės srovė – *ias*, elektromagnetinis momentas – T_{em} , ir rotoriaus srauto amplitudė – $\sqrt{\Psi_{qr}^2 + \Psi_{dr}^2}$. Grafikai pateikti 5.5 pav. Iš jų matyti kaip greitai, tolydžiai ir tiksliai variklio greitis reaguoja į suprogramuotą greičio valdymą taikant erdvinio srovės vektoriaus valdymo metodą. Matyti, kaip gerai erdvinio vektoriaus moduliavimo valdymas palaiko rotoriaus srauto dydį modeliavimo metu.

Gautus rezultatus galima palyginti su tokio paleidimo rezultatais pateiktais 5.5 pav.

Ciklinis greičio pokytis. Tikrinama ar *m3* nustatytos reikiamos vertės, kurios turi būti:

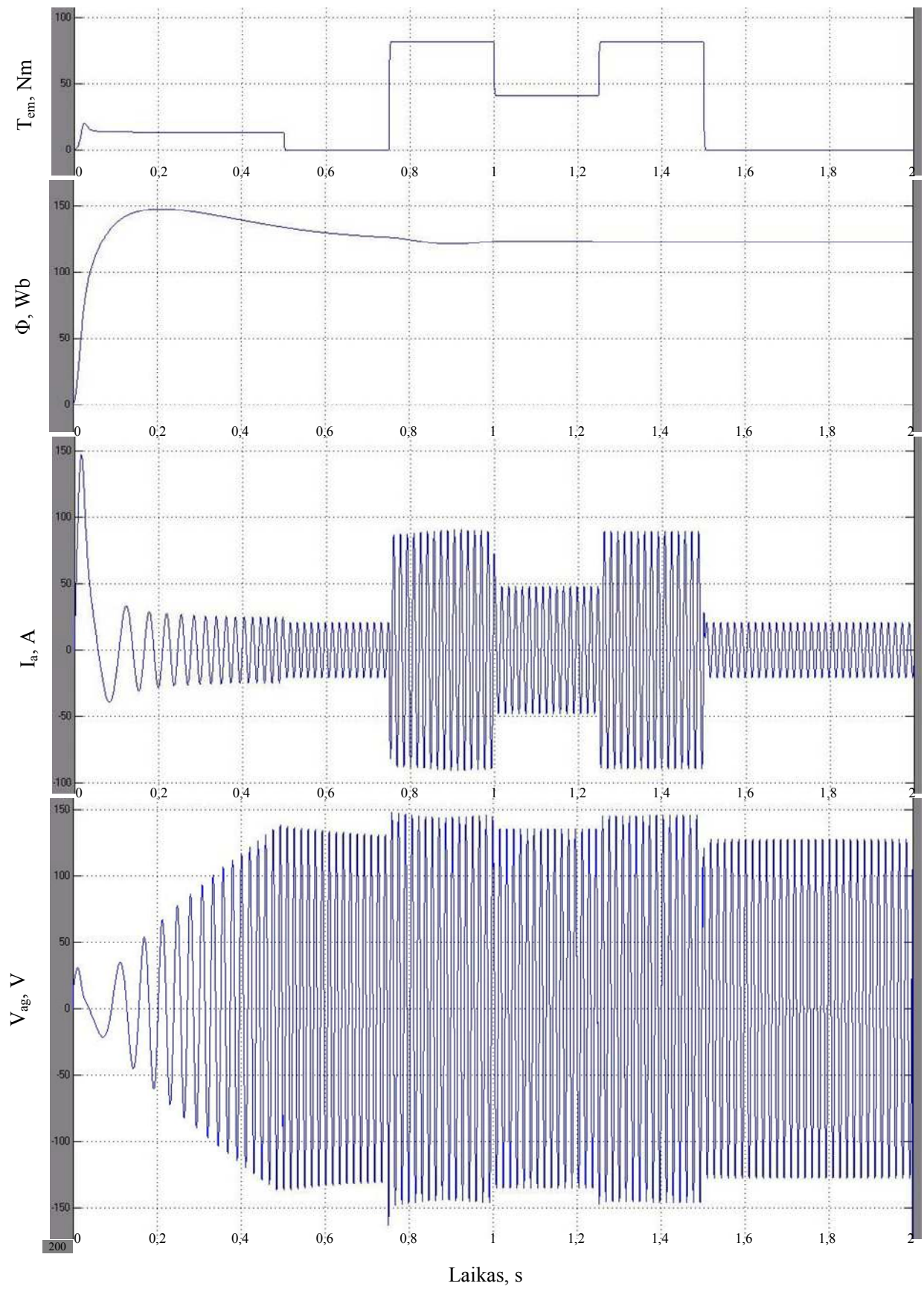
<i>tstop</i> :	Tyrimo laikas iki dviejų sekundžių.
<i>time_wref</i> :	Laiko riba greičio redukavimui <i>ciklo</i> signalo šaltiniui [0 0,25 0,5 1,0 1,25 1,5].
<i>speed_wref</i> :	Dydžio riba greičio redukavimui <i>ciklo</i> signalo šaltiniui [0 wbm/2 wbm/2 - wbm/2 - wbm/2 0].
<i>time_tmech</i> :	Laiko riba T_{mech} <i>ciklo</i> signalo šaltiniui [0 <i>tstop</i>].
<i>tmech_tmech</i> :	Dydžio riba T_{mech} <i>ciklo</i> signalo šaltiniui [0 0].

Toliau paleidimas kartojamas, kai variklis apkrautas nominaliuoju momentu, t. y. $T_{mech} = T_{rated}$. Dalis rezultatų yra pateikta 5.5 pav. Iš jų matyti šiek tiek didesnis trumpalaikis rotoriaus srautas esant pradiniam variklio paleidimui iš rimties būsenos. Tiriamas pagreičio momentas yra $T_{mech} + T_{em}$ ir rotoriaus kampas θ_r pirminio paleidimo trumpu laiko momentu.

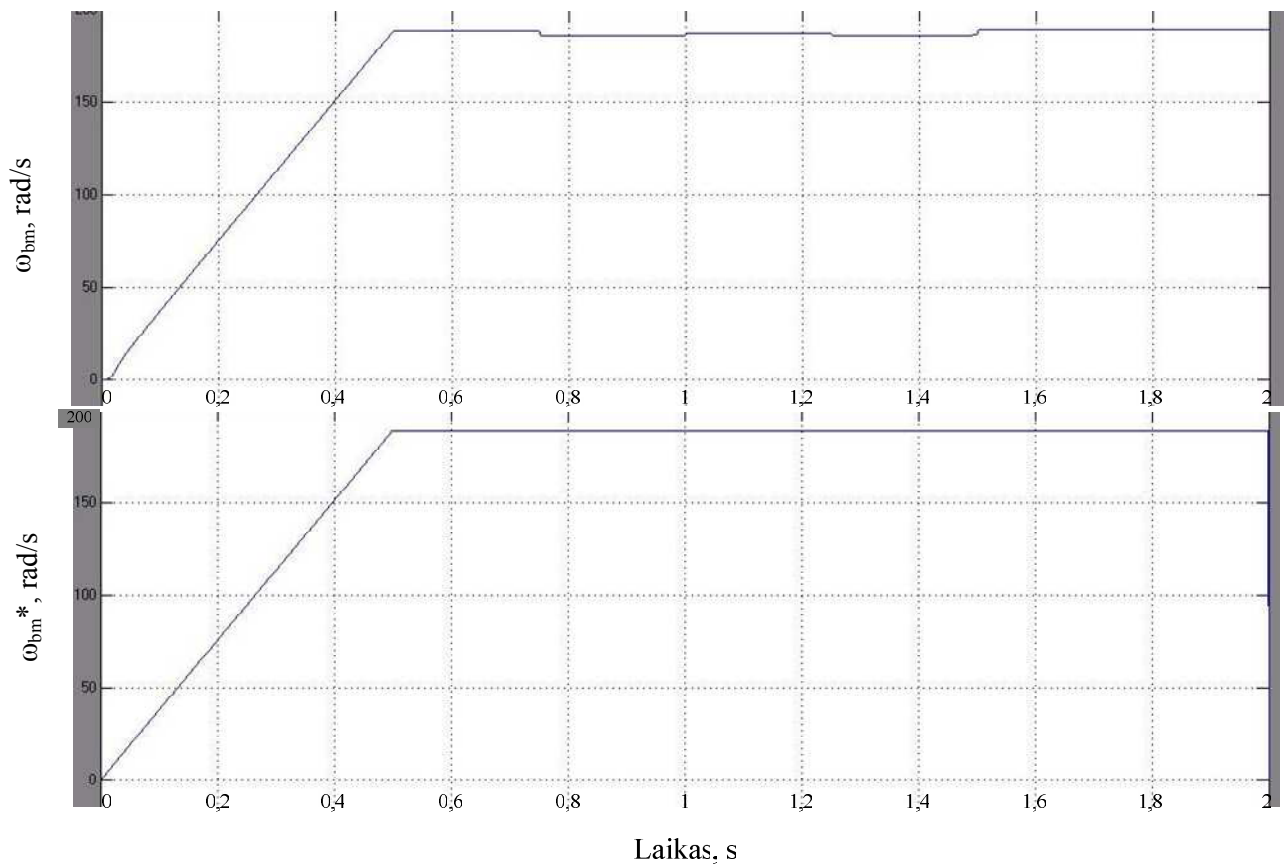
Valdiklio parametrų išderinimas. Srauto, išderinimas dažniausiai yra susijęs su mašinos parametrų pokyčiais, kintant darbo sąlygoms. Pavyzdžiui, rotoriaus varžai didėjant, rotoriaus srauto pokyčio laikas mažėja, bet dėl to gėstančioji srauto dedamoji daugiau švytuoja. Modeliuojant, galima „izoliuoti“ išsiderinimo efektą keičiant mašinos nustatymo parametrus, o modeliuojant valdomą mašiną – juos palikti nepakitusius. Naudojant šį metodą ir modeliavimo metu matomi

grafikų pobūdžio pokyčiai. Juose matomi nesuderinti valdiklio parametrai ir nedarantys poveikio mašinos parametruose.

Tiriant rotoriaus varžos išsiderinimo efektą, naudojamas skaičiavimų koeficientą k_r visoms r_r sąlygoms „I lauka orientuotas“ bloke. Nustatomų modelio pastoviųjų, idealus suderinimas yra kai $k_r = 1$. Kartojant prieš tai buvusių paleidimus žingsninio momento pokyčio esant fiksuotam atstojamajam greičiui ir ciklinio atstojamojo greičio pokyčio esant k_r 1,5 ir 0,5, kai variklis neapkrautas ir kai apkrautas vardine apkrova. Nagrinėjant pastebėtus dinaminį charakteristikų skirtumus ir rotoriaus srauto vertę palyginama su atveju, kai k_r yra 1.



a)



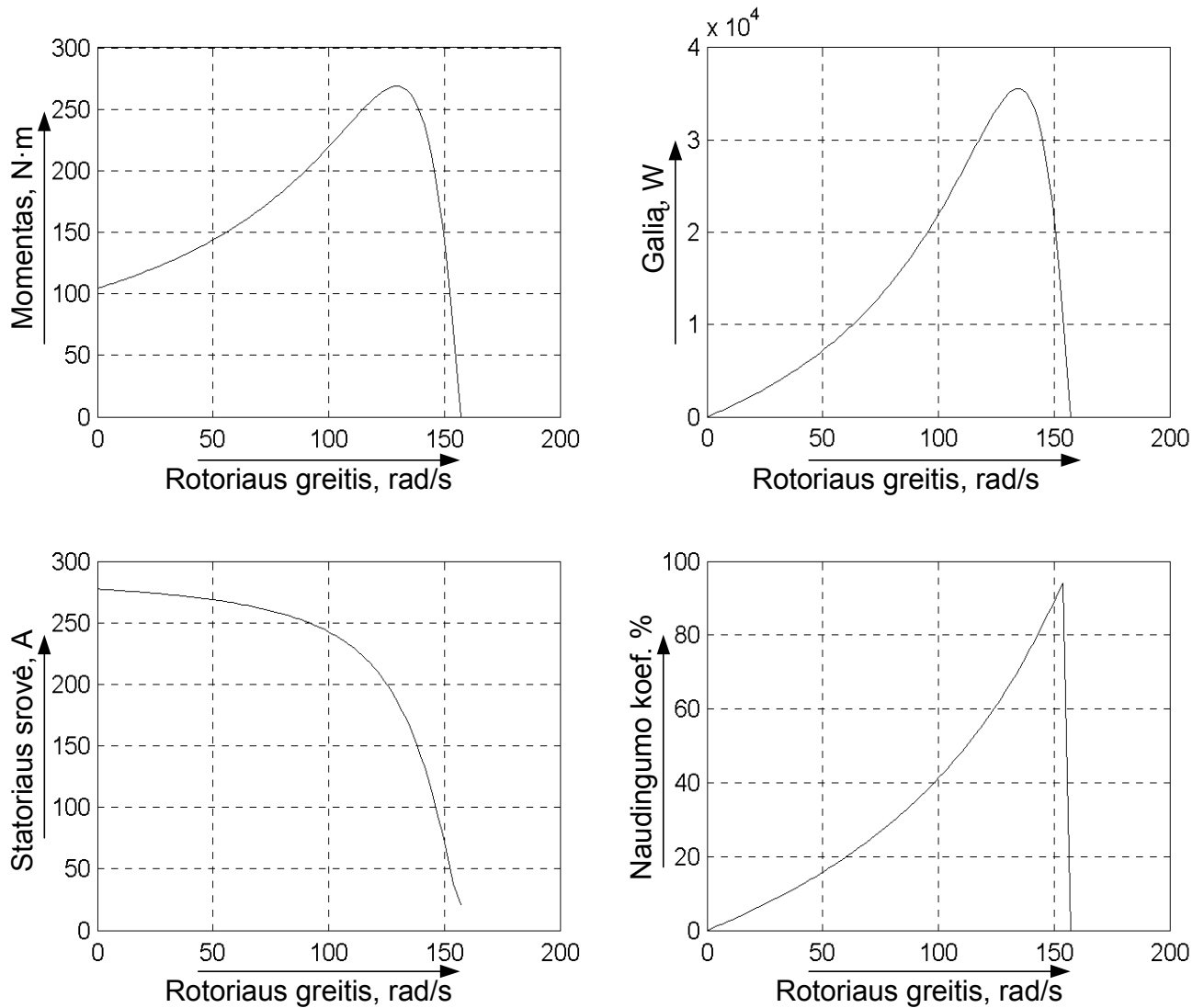
b)

5.5 pav. Erdvinio srovės vektoriaus valomos pavaros dinaminės charakteristikos:

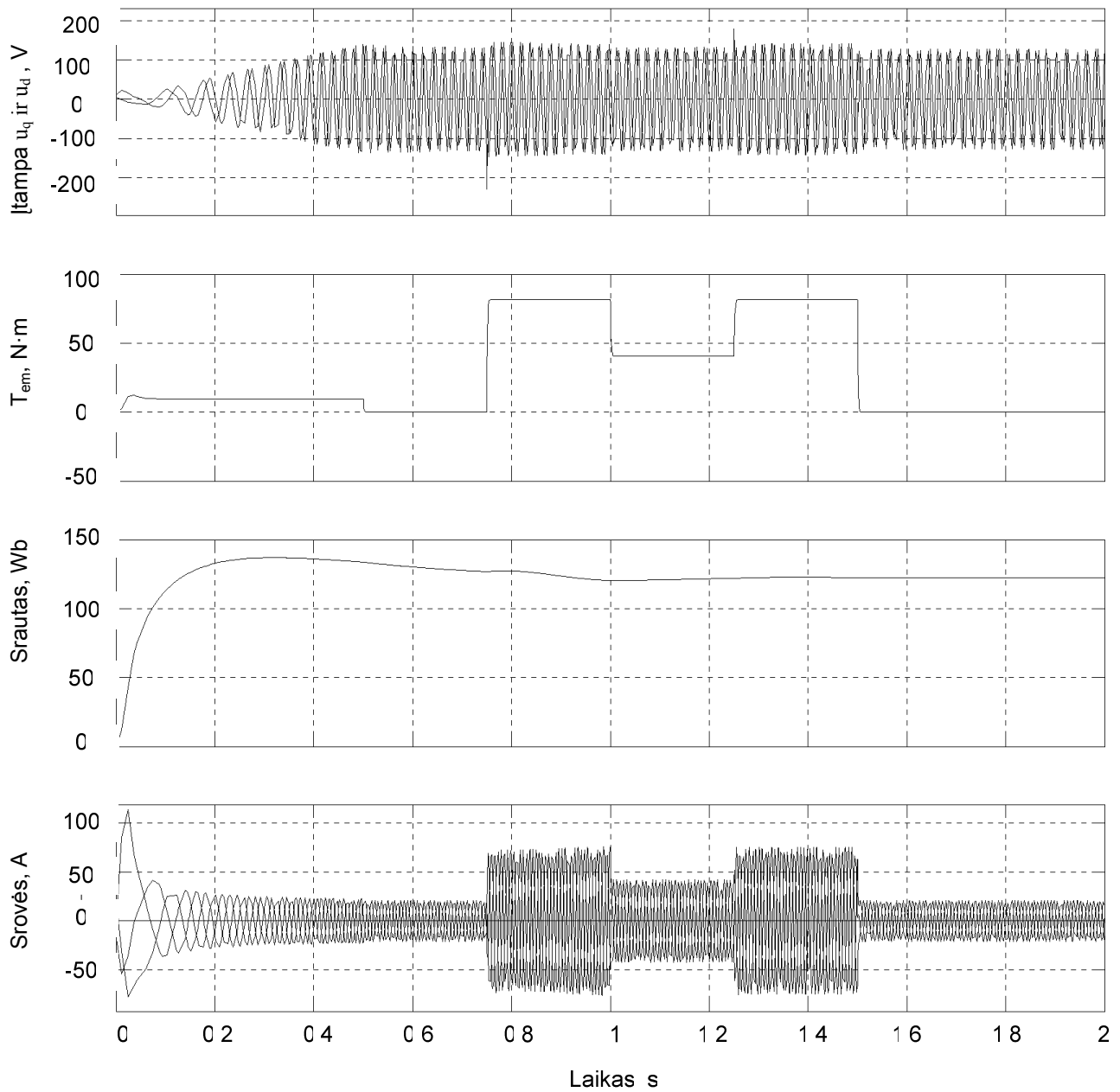
a) Elektromagnetinis variklio momentas – T_{em} , srauto amplitudė – Φ , srovė a fazėje – I_a , iš tinklo imama įtampa a fazėje – U_{ag} ; b) greitis – ω , greičio nuostatas – ω^*

5.3. Pereinamųjų vyksmų imitacija

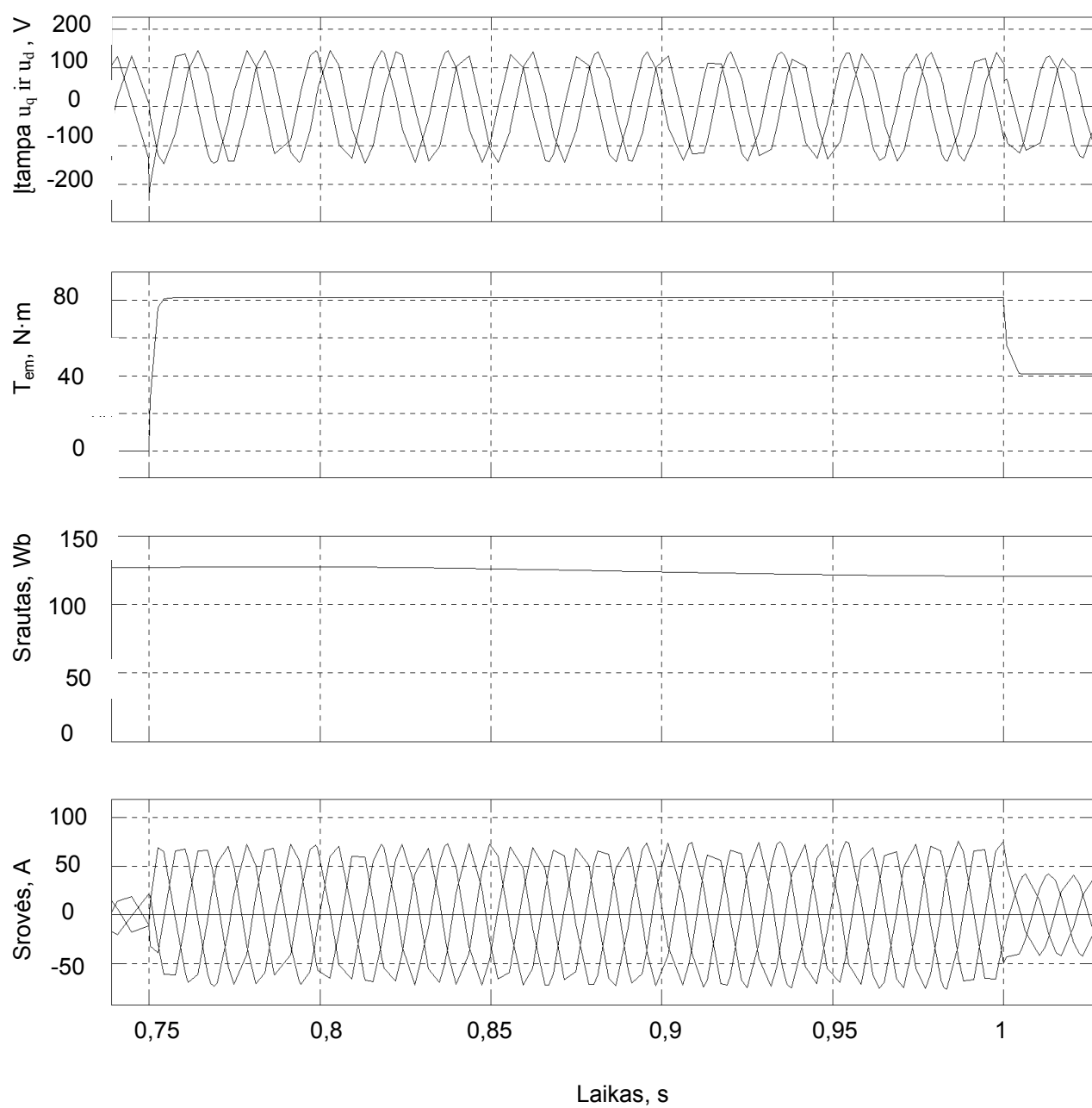
Pereinamųjų vyksmų imitacijai yra naudojamas variklio modelis, pateiktas ankstesniuose skyriuose.



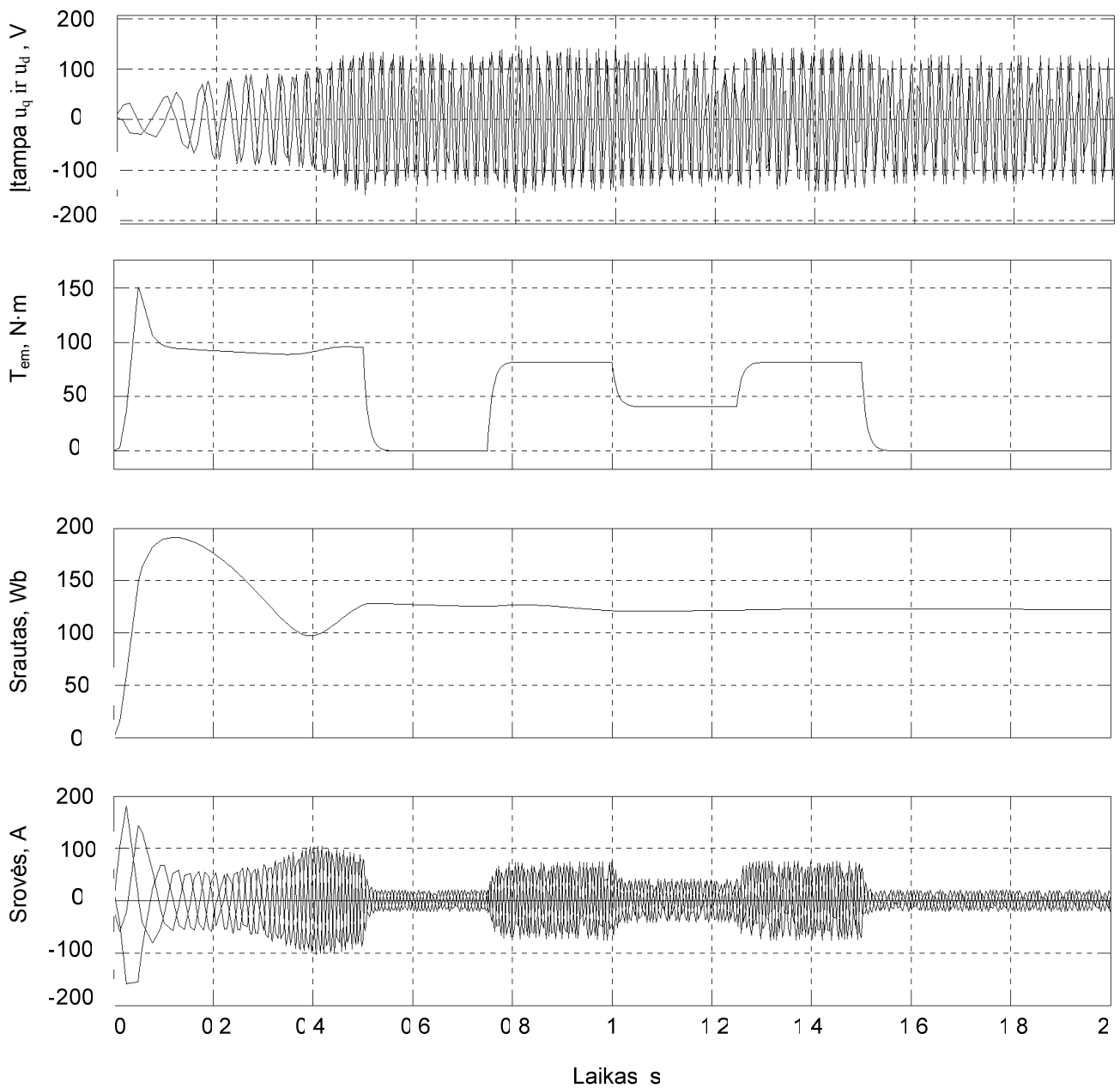
5.6 pav. Tiriama variklio I, M, P ir η statinės charakteristikos



5.7 pav. Erdvinio srovės vektoriaus valdymo charakteristikos kintant apkrovos momentui



5.8 pav. Dinaminės charakteristikos apkrovos pokyčio metu laikotarpyje nuo 0,75 iki 1s



5.9 pav. Charakteristikos, kai pavaros inercijos momentas 10 kartų didesnis

5.9 pav. pateikta variklio reakcija į apkrovos pokytį esant padidintam inercijos momentui: matomas 90° elektrinis kampas tarp valdymo įtampų u_q ir u_d , u_q pralenkia u_d .

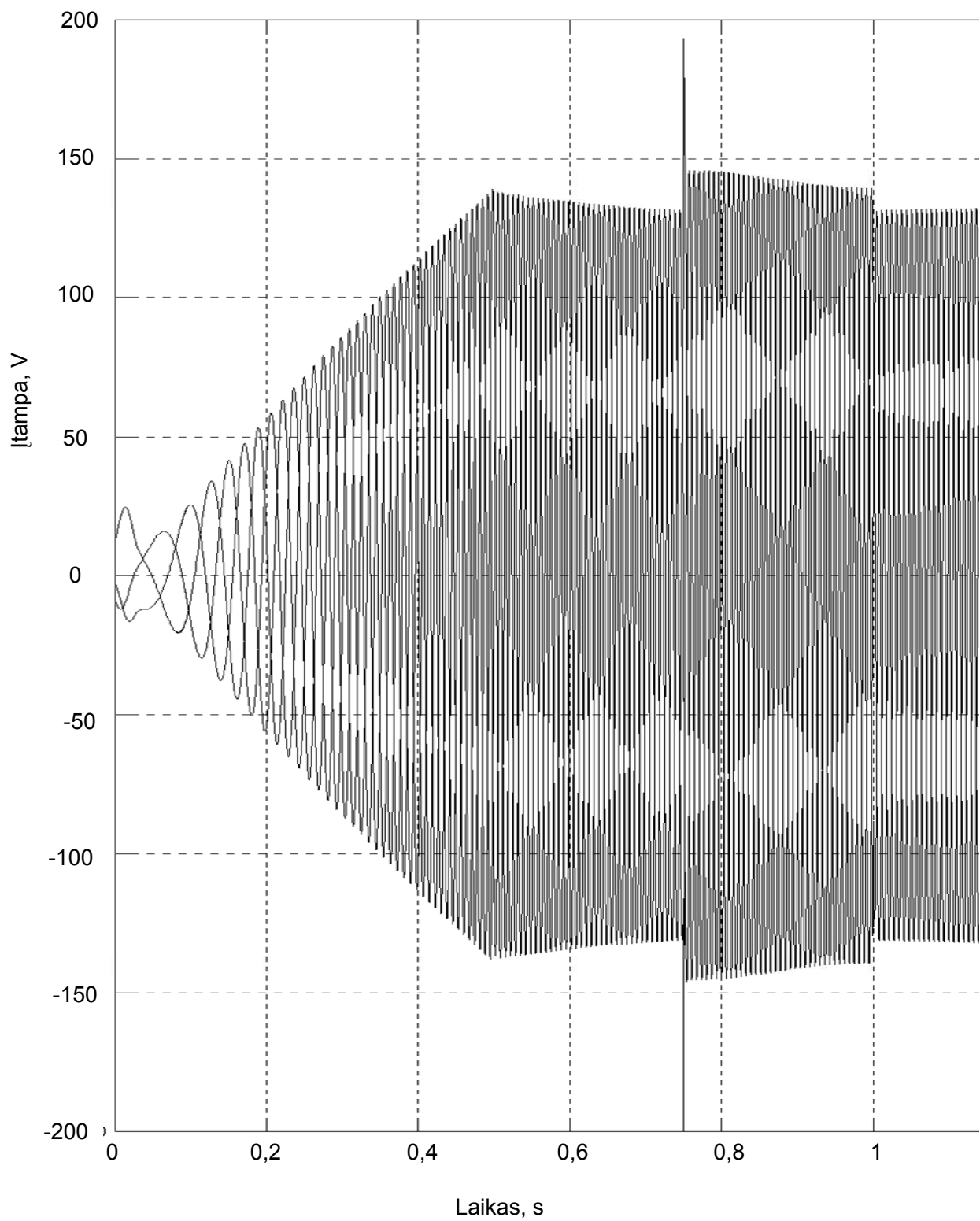
5.9 pav. matomos paleidimo stovės trijuose fazėse, iš kurių vienoje amplitudė siekia 180 A, bet įsisukant varikliui, įveikus rotoriaus inerciją, srovių amplitudės nusistovi ties ~ 25 A kol variklis nėra apkrautas išorinių apkrovos momentų (kuris modeliavimo metu užduotas kintamas).

Kintant apkrovos momentui kinta ir srovė, tekanti variklio apvijomis, ji kartoja apkrovos momento kreivės pobūdį. Bet 5.8 pav. matomas kitas įdomus efektas. Kintant apkrovos momentui matomi įtampos u_q ir u_d smūgiai (staigūs pikai ir nuosmukiai), momentui didėjant atsiranda viršįtampiai net iki ~ 100 V (momentui kintant nuo 0 iki $T_{nom.}$), momentui mažėjant nuo $T_{nom.}$ iki 0 atsiranda ~ 50 V įtampos kryptis.

Padidinus asinchroninės pavaros inercijos momentą 10 kartų, paleidimo metu variklio kuriamas momentas paleidimo metu taip pat padidėja 10 kartų, viršydamas nominalųjį variklio momentą, o paleidimo momentu net 1,5 karto. Srauto kreivė pakinta gan stipriai ypač paleidimo momentu – srauto perreguliavimas siekia net 50 Wb. Didesnė inercija neleidžia taip greitai kisti apkrovai ir dėl to apkrovos momento kreivės kampai yra užapvalinti. Toks sušvelnintas apkrovos momento kitimas panaikina staigius įtampos smūgius.

Įtampos kreivėje matomas inercijos momento poveikis. Įgreitinti mašiną reikalingas didesnis momentas, didesnė galia, o vėliau palaikyti pastovų užduotą greitį, nereikia nugalėti inercijos pasipriešinimo todėl naudojama mažiau elektros energijos (matoma iš įtampos ir srovės kreivių).

Tai matoma iš 5.10 pav. pateiktos kreivės:



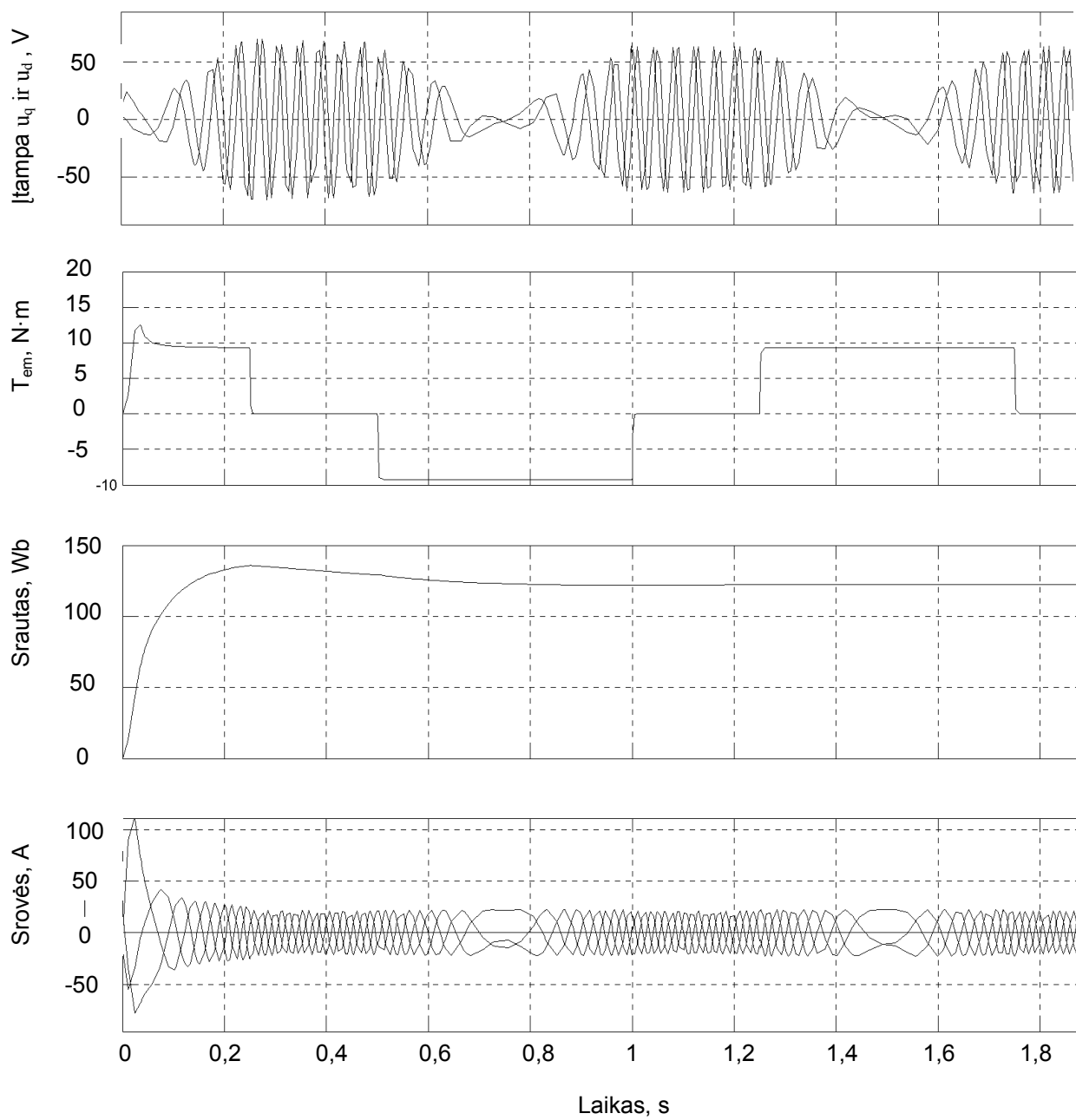
5.10 pav. Įtampų (trijų fazių) amplitudės

Valdant impulsiniu būdu visada išlieka priklausomybė, kad kintant įtampos amplitudei turi kisti ir impulsų dažnis.

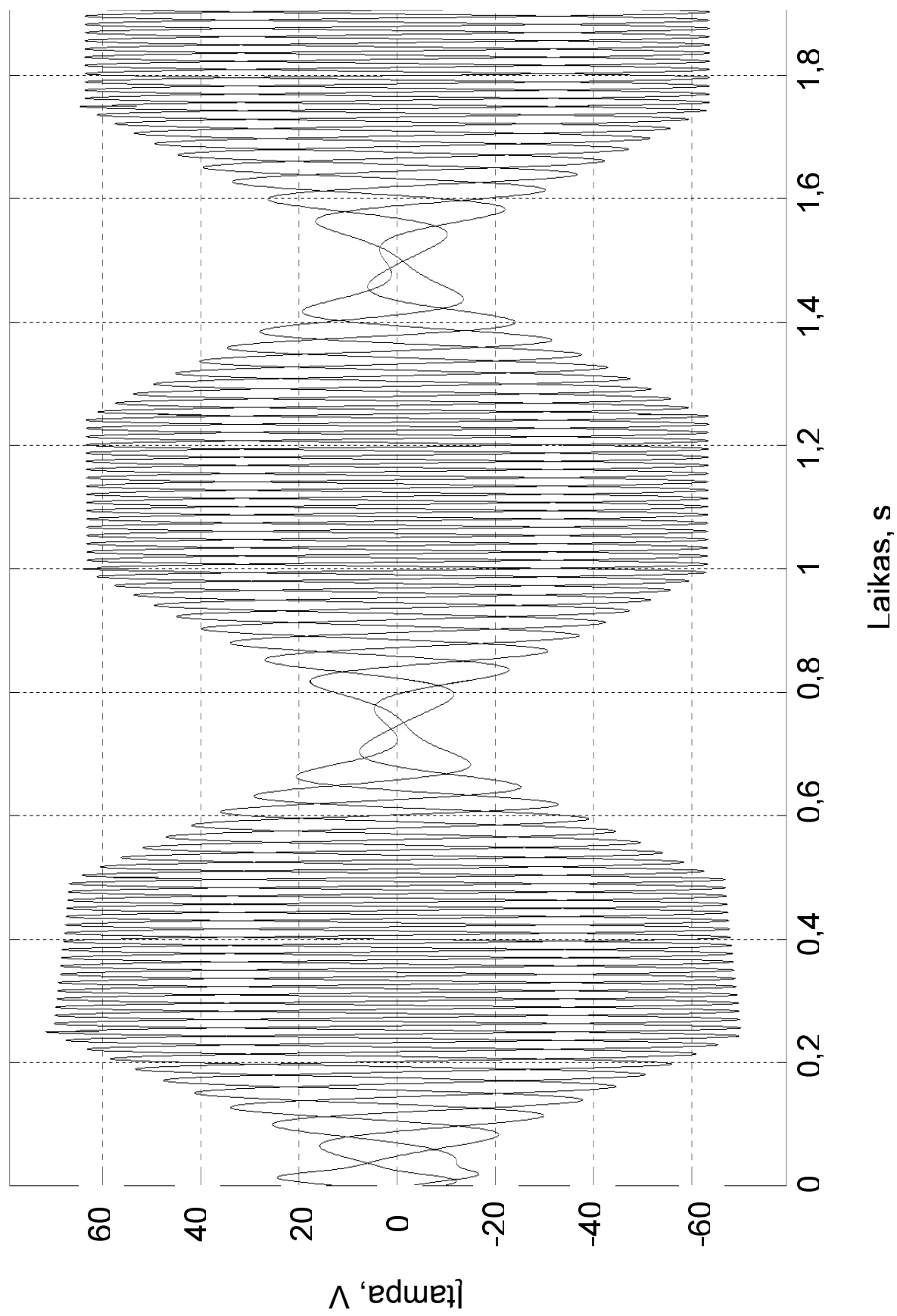
$$E = 4,44 f_1 w_1 k_{w1} \Phi. \quad (5.12)$$

čia: E – elektrovara, proporcinga įtampos amplitudei, f – maitinimo dažnis, w – apvijų skaičius, k_{w1} – apvijų koeficientas, Φ – srautas.

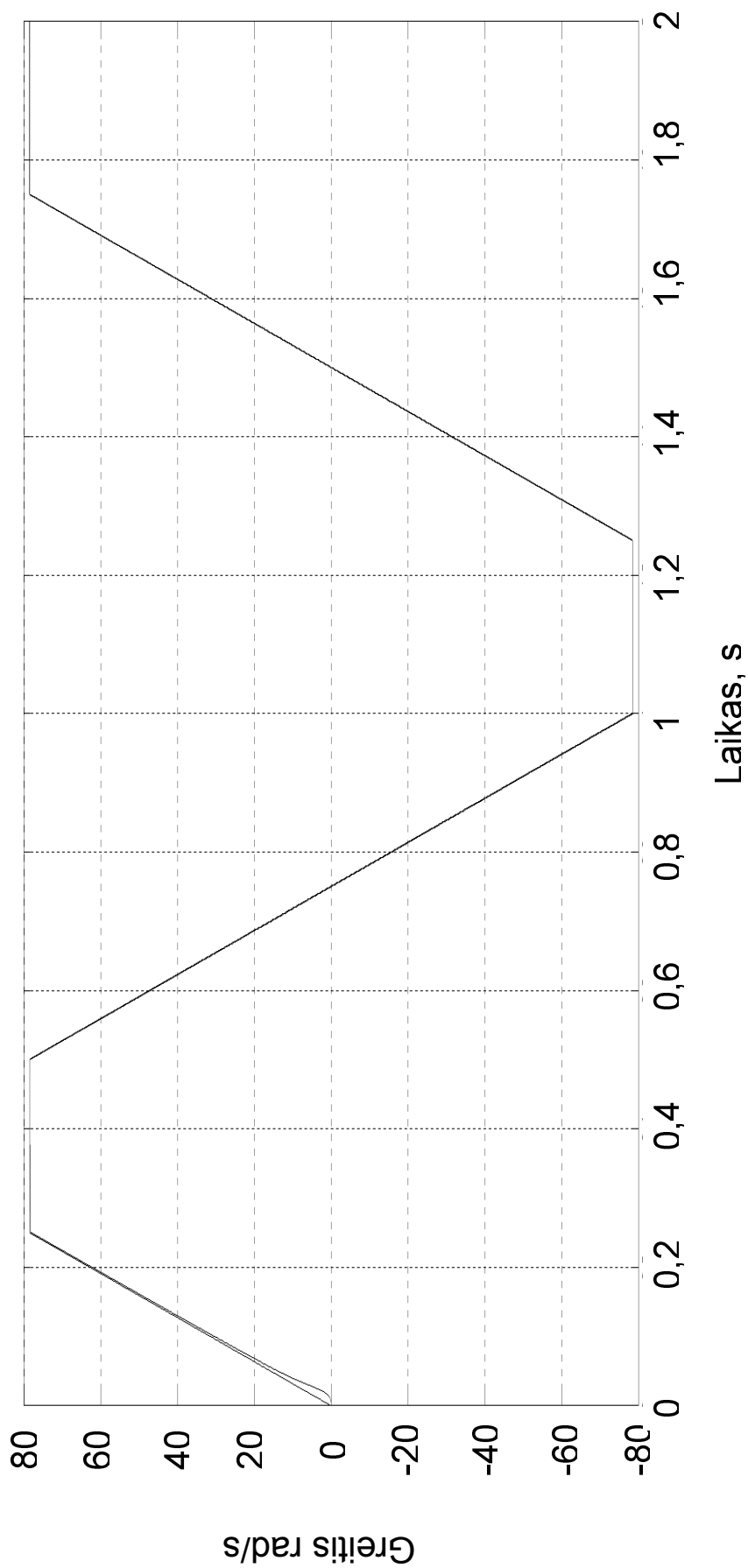
Todėl kintant apkrovos momentui arba keičiant variklio greičio nuostatą įtakojamas IPM dažnis. Iš įtampos amplitudės priklausomybė nuo dažnio aiškiau matoma imituojant variklio reversą:



5.11 a pav. Kreivės su kintamų greičio nuostatų: a) pagrindinių kintamųjų kreivės; b) maitinimo įtampos kreivės; c) greičio nuostatas ir „matuojamas“ greitis

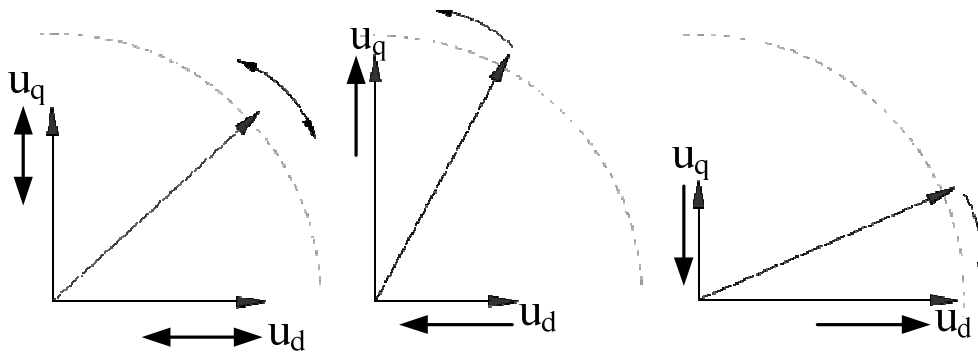


5.11 b pav. Kreivės su pakeista greičio nuostato funkcija: a) pagrindinių kintamųjų kreivės; b) maitinimo įtampos kreivės; c) greičio nuostatas ir „matuojamas“ greitis



5.11 c pav. Kreivės su pakeista greičio nuostato funkcija: a) pagrindinių kintamųjų kreivės; b) maitinimo įtampos kreivės; c) greičio nuostatas ir „matuojamas“ greitis

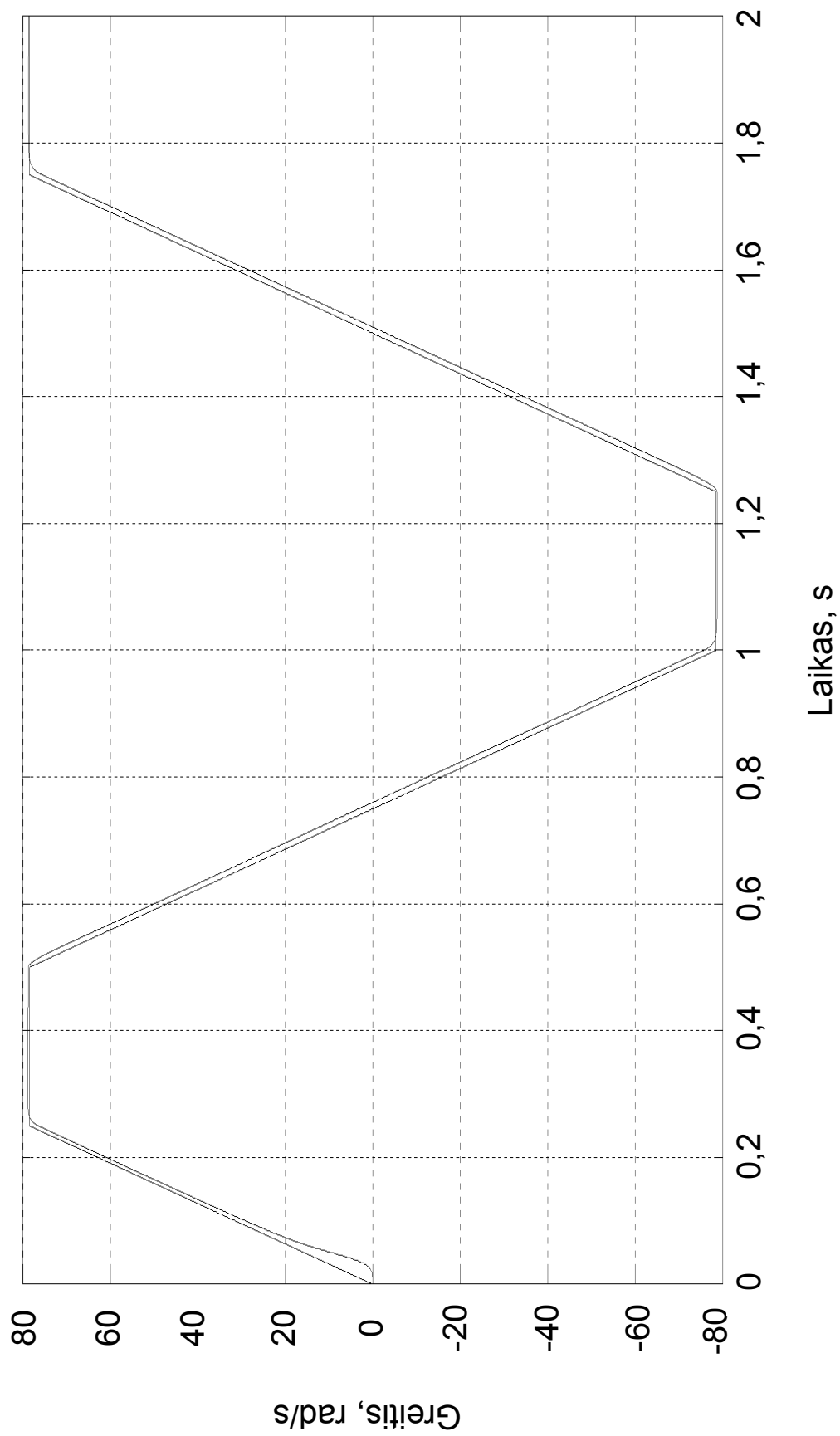
Variklio reverso metu (5.11 pav.) tarp įtampų u_q ir u_d matomas 90° elektrinis kampas 5.9 pav., u_q pralenkia u_d kintant greičiui, nes pradėjus sukti variklį priešinga kryptimi u_q ir u_d sukeičiamas eiliškumas. Tai matoma ir iš srovių bei maitinimo įtampų eiliškumo tam, kad variklis pradėtų sukis priešinga kryptimi.



5.12 pav. Vektoriaus sukimosi kryptis

5.13 a pav. matomas vienas iš tokio valdymo privalumų: kintant greičio nuostatui modeliuojamas (atspindintis realų) sukimosi greitis kabai tiksliai seka užduotį, skiriasi tik nedaug paleidimo metu. Ir nekintant apkrovos momentui srovės dydis ribojamas ir visas greičio kitimo metu yra konstanta (šiuo atveju ~ 80 A amplitudės) keičiant dažnį.

Greičio užduoties ir sukimosi greičio skirtumas gan ženkliai priklauso nuo mašinos inercijos momento.

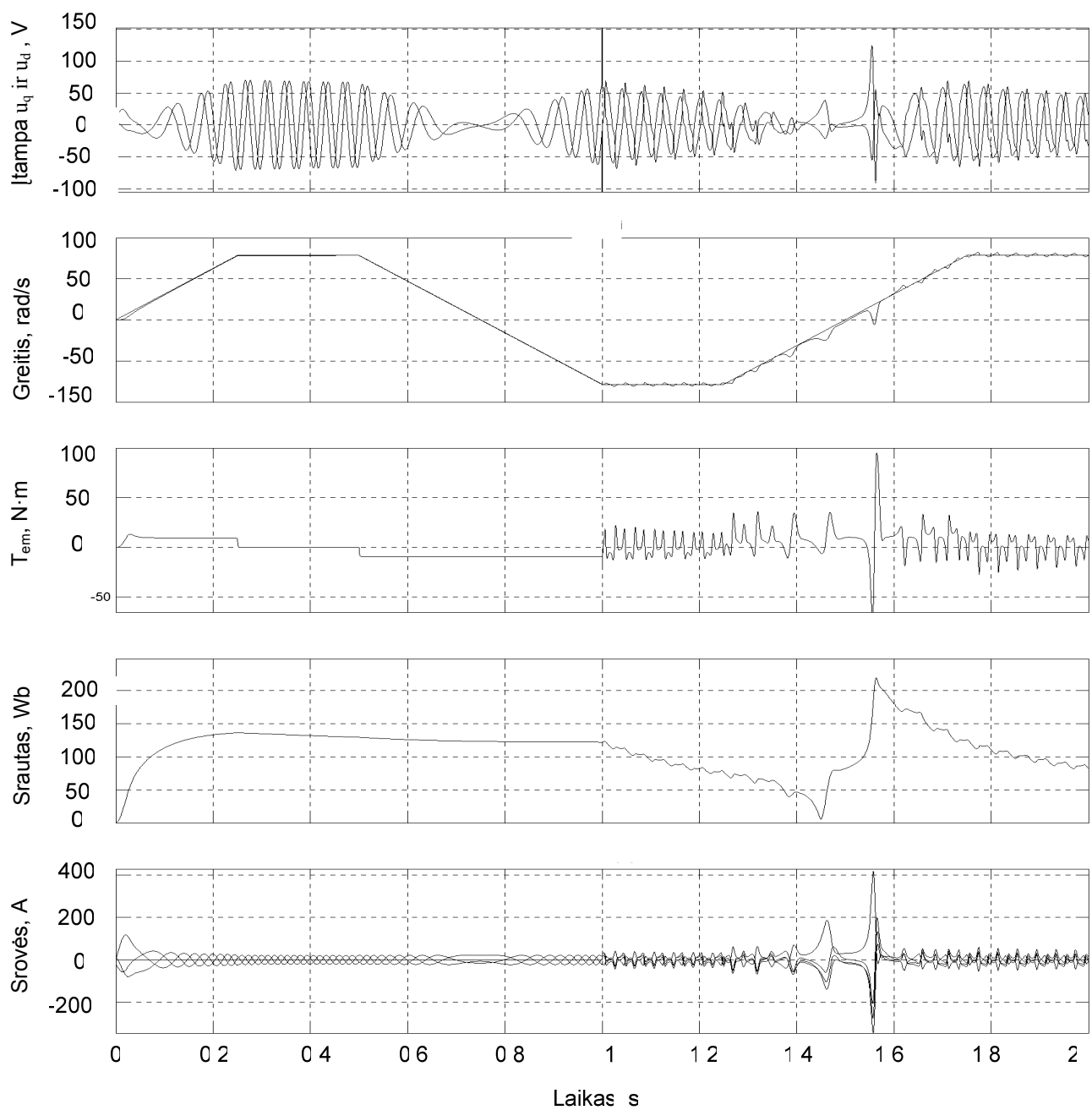


5.13 pav. Mašinos greičio kreivės, kai inercijos momentas padidintas 10 kartų

Iš 5.13 pav. ir 5.11 pav. pastebimas sukimosi greičio atsilikimas nuo esamos užduoties signalo. Greičio atsilikimas nuo užduoties lemiamas variklio inercija ir esamais valdymo sistemos trikdžiais, tokiais kaip apkrovos momento kitimas.

Tiriant modelį vienas iš bandymų yra trumpasis jungiamas. Šio tyrimo metu trumpai sujungtos dvi variklį maitinančios fazės. Tokius bandymus labai patogiu atlikti su modeliais, nes tai saugu ir galima ištirti ribines sąlygas. Variklio valdymo funkcija yra tokia pati kaip reverso, variklis reversuojamas du kartus esant pastoviam elektromagnetiniam momentui, bet praėjus 1 s dvi maitinančios fazės sujungiamos trumpai.

Kaip matyti iš 5.14 pav. po trumpojo įjungimo variklis mėgina palaikyti sukimosi greitį ir dėl to imamoji srovė reverso metu padidėtų. Taigi valdymas nesugeba visiškai susitvarkyti su tokiu ribiniu režimu. Iš srauto vektoriaus, bei variklio kuriamo momento matyti, kad variklis neįveiks apkrovos ir pradės trūkčioti. Toks darbo režimas gali sugadinti variklį ir padaryti žalą valdymo įrangai. Todėl tokiu atveju reikia stebėti maitinimo „kokybę“. Tai gali atlikti tam tikra papildoma įranga arba tai gali būti įvykdyta programiškai. Galimas programinis variantas: stebėti maitinimo įtampą, įvedus tam tikras viršįtampio ribas, kurias pasiekus variklis yra atjungiamas, arba paleidus variklį stebėti sroves, atitinkančias apkrovą, kurias viršijus variklį išjungti. Antrasis pasiūlytas būdas patogus ir savidiagnozei.



5.14 pav. Dvifazis trumpasis jungimas

6. IŠVADOS IR PASIŪLYMAI

6.1 Išvados

Pagal gautus darbo rezultatus galima daryti šias išvadas:

1. Sukūrus imitacinį modelį, gauti rezultatai leido susipažinti su erdvinio vektorinio valdymo privalumais ir trūkumais.
2. Sudaryta imitavimo programa leidžia grafiškai atvaizduoti tyrimas parametrų kitimo kreives.
3. Paleidimo metu variklis turi nugalėti statinę trintį, todėl greičio kreivės kitimas panašus į kvadratinę priklausomybę.
4. Iš variklio kuriamo elektromagnetinio momento charakteristikos T_{em} matyti, kad paleidimo metu šiek tiek perreguliuojama, bet paleistos ir valdomos sistemos, net ir dideli apkrovos momento pokyčiai beveik be perreguliavimo, priartėjant reikšmei prie užduotojo nuostato, matomi šiek tiek suapvalinti kampai, tokiu būdu gaunamas procesas be perreguliavimo.
5. Rotoriaus srautas po paleidimo nusistovi ir išlieka nekintamas.
6. Srovė valdymo metu susideda iš dviejų dedamųjų: pastovios, dėl variklio mechaninių ir elektrinių statinių charakteristikų ir kintamos dedamosios, kuri atspindi apkrovos kitimo kreivę.
7. Kintant greičio nuostatui modeliuojamas (atspindintis realų) sukimosi greitis labai tiksliai seka užduotį ir nedaug skiriasi paleidimo metu.
8. Iš tinklo imama srovė priklauso tik nuo variklio apkrovos.
9. Iš įtampos ir srovės kreivių amplitudžių gaubiamosios matomas pavaros apkrovos momento kitimo pobūdis.
10. Variklio paleidimo metu jo greitis atsilieka nuo užduotojo (nuostato greičio), bet paklaida labai nedidelė, todėl šį valdymą tikslinga naudoti kai siekiama išlaikyti kuo tikslesnį variklio sukimosi greitį.
11. Iš reverso ir kitų sistemos tyrimų matyti, kad dažnio pokytis priklauso nuo amplitudės pokyčio. Didėjant amplitudei proporcingai didėja ir dažnis.
12. Tiriamojo variklio srovė trumpojo jungimo metu gali siekti iki 400 A esant vardinei srovei 50 A.

13. Įsukos metu sukimosi greitis kinta neriesiškai dėl statinės trinties, bet nuokrypis nykstamai mažas ir variklio greitis, net stipriai pakitus apkrovai, reaguoja tik keliais sūkiais.

14. Impulsų dažnio moduliavimo erdvinio vektoriaus valdymo modelį lyginant su kitais metodais, galima:

- naudoti eile lėtesnius mikroprocesorius, praktiškai neprarandant keitiklio išėjimo signalo kokybės;

- dėl pirmosios harmonikos/fazinio dažnio pastovaus santykio su nešamojo virpesio dažniu ($f_s / f_p = \text{const}$), gauti lengvesnes keitiklio inverterio išėjimo galios elementų darbo sąlygas ir aukštesnį valdomo variklio ilgalaikiškumą.

Impulsų dažnio moduliavimo metodas panaudotas [Puslaidininkų fizikos institutas] Mikroelektronikos laboratorijoje sukurtame dažnio keitiklyje. Keitikliai yra įdiegti Lietuvos ūkyje ir leidžia valdyti technologinius procesus bei sutaupyti apie 100000 kW·h elektros energijos per metus.

6.2 Pasiūlymai

1. Trumpojo jungimo darbo režimas gali sugadinti patį variklį ir padaryti žalą apkrovos įrenginiui. Todėl reikia stebėti maitinimo kokybę. Tai gali atlikti papildoma įranga arba valdymo paprogramių: stebint maitinimo įtampą, imant tam tikras viršįtampio ribas, kurias pasiekęs variklis yra atjungiamas, arba po variklio paleidimo stebėti sroves, atitinkančias tam tikrą apkrovą, o viršijus sroves atjungti variklį. Antrasis pasiūlytas būdas būtų patogus ir savi diagnozei.

2. Šiuo metu yra kuriamas asmeninio kompiuterio USB jungties priedas/valdiklis, kuris leis gaunamus imituojamojo modelio valdymo rezultatus panaudoti realiam varikliui valdyti ir lyginti juos su modelio rezultatais.

3. Sukurti bejutiklinę “soft sensing” diagnostikos sistemą.

7. LITERATŪRA

1. **Bierke S.** *Enhanced control of an alternating current motor using fuzzy logic and a TMS320 digital signal processor*, Texas Instruments, 1996. 524 p.
2. **Valentine R.** *Motor control electronics handbook [CD-ROM]* 1998.
3. **Ключев.В.И.** *Теория электропривода*, Москва: Энергоатомиздат, 1985. 253 p.
4. **Holts J.** *Pulsewidth modulation - a survey*, IEEE, 1992. 13 p.
5. *Field Orientated Control of 3-Phase AC-Motors. Application report*, Texas Instruments, USA, 1998, 473 p.
6. **Caron J.P., Hautier J.P.** *Modeling and Control of Induction Machine. Technip Edition Prancūzija* 1995, 312 p.
7. **Hazzab A., Bousserhane I. K., Kamli M., Rahli M.** Design of fuzzy sliding mode controller by genetic algorithms for induction machine speed control. *Third IEEE International Conference on Systems, Signals & Devices SSD'05*, Tunisia, 2005. 56 p.
8. **Hazzab A., Bousserhane I.K., Kamli M., Rahli M.** New Adaptive fuzzy PI-Sliding Mode Controller for Induction Machine Speed Control. *Third IEEE International Conference on Systems, Signals & Devices SSD'05*, Tunisia, 2005. 125 p.
9. **Lorenz R.D., Lawson D.B.** A Simplified Approach to Continuous On-Line Tuning of Field-Oriented Induction Machine Drives. *IEEE Trans. On Industry application*, Vol.26, Issue 3, May/June 1990. 425 p.
10. **Miloud Y., Draou A.** Performance Analysis of a Fuzzy Logic Based Rotor Resistance Estimator of an Indirect Vector Controlled Induction Motor Drive. *Turk. Jour. Elec. Engin.* Vol.13, No.03, 2005. 426 p.
11. **Minh T.-C., Hoang L.-H.** Model Reference Adaptive Fuzzy Controller and Fuzzy Estimator for High Performance Induction Motor Drives. *Thirty First IEEE IAS Annual Meeting Conference Record*, Vol.1, 1996, p. 380-387 p.
12. **Karanayil B., Rahman M. F., Grantham C.** PI and Fuzzy Estimators for On-line Tracking of Rotor Resistance of Indirect Vector Controlled Induction Motor Drive. *IEEE Inter. Conf. on Power Electronics*, 2001. 298 p.
13. **Jiabhua Q., Azzizur Rahman M.** *Analysis of field oriented control for permanent magnet hysteresis synchronous motors*, Siemens Electric Ltd, relcon drives div., Brampton ON L6T 4H6, CANADA, 1993, 1156-1163 p.
14. www.ti.com/sc/docs/apps/digital/ac_induction_motors.html#App_Notes žiūrėtas 2008 sausio 15d.

15. **Poška A.J.** *Lanksčiosios gamybos sistemų automatizavimas*. Mokomoji knyga. Vilnius: Technika, 2004. 96p.
16. **Qian J., Rahman M.A.** *Analysis of field oriented control for permanent magnet hysteresissynchronous motors*. Industry Applications, IEEE Transactions on Volume: 29, Issue: 6, Nov /Dec 1993 1156-1163p.
17. **Niiranen J.** *Voltage dip ride through of a doubly fed generator equipped with anactive crowbar*, Nordic Wind Power Conference Sweden 2004,
18. **Peterson A.** *Analysis, Modelling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines*, Thesis for the degree of Doctor of Philosophy, Chalmers University of Technology, Sweden 2005.
19. **Wit De, Ortega P., Mareels R. I.,** *Indirect field oriented control of induction motors is robustlyglobally stable*, Decision and Control, 1995., Proceedings of the 34th IEEE Conference on Volume: 3, 13-15 Dec 1995 , 2139-2144 p.
20. **Rowan, Timothy M., Kerkman, Russel J.** *A new Synchronous Current Regulator and an Analysis of Current-Regulated PWM Inverters*, Industry Applications, IEEE Transactions on Volume: IA-22, July 1986, 678-690 p.
21. **Lorenz R.D., Divan D.M.** *Dynamic analysis and experimental evaluation of delta modulatorsfor field-oriented AC machine current regulators*, Industry Applications, IEEE Transactions on Volume: 26, Issue: 2, Mar/Apr 1990, 296-301 p.
22. **Radzevičius L.** *Elektros inžinerijos magistrantūros studijų tiriamieji ir baigiamieji darbai*, VGTU leidykla TECHNIKA, 2009. 66p.
23. **Bojoi, R. Lazzari, M. Profumo, F. Tenconi, A.** *Digital field oriented control for dual three-phase induction motor drives*, Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting, 2002. 818-825p.
24. **Jansen, P.L. Lorenz, R.D.** *A. physically insightful approach to the design and accuracyassessment of flux observers for field oriented induction machine drives*, Industry Applications, IEEE Transactions on, 1994. 101-110p.
25. **Ben-Brahm, L. Kawamura, A.** *Digital current regulation of field oriented controlled inductionmotor based on predictive flux observer*, Industry Applications Society Annual Meeting, 1990. 607-612p.
26. **Levi E., Vučković V.** *FIELD-ORIENTED CONTROL OF INDUCTION MACHINES IN THE PRESENCE OF MAGNETIC SATURATION*, Electric Power Components and Systems, 1989. 133-147p.

27. **Takahashi, Isao** **Noguchi, Toshihiko** *A New Quick-Response and High-Efficiency Control Strategy of an Induction Motor*, Industry Applications, IEEE Transactions on 1986. 820-827p.
28. **Ben-Brahim, L.** **Kawamura, A.** *A fully digitized field-oriented controlled induction motor drive using only current sensors*, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 1992. 241-249
29. **Simutis R.** *Sistemų modeliavimas ir identifikavimas*, Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 2008. 177p.
30. **Udris D.** *Elektroniniai galios keitikliai*, Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 2008. 160p.

8. PRIEDAI

„P20HP.M“ failas:

```
% Parameterai 20 Ag, 3-fazio indukcinio variklio

Sb = 20*746;      % Vardine galia [VA]
Vrated = 220;     % Vardine linijine itampa [V]
pf = 0.853;       % Vardinis galios koeficientas(cos fi )
Irated = Sb/(sqrt(3)*Vrated*pf); % Vardine vidutine statoriaus srove
P= 4;            % poliu skaicius
frated = 50;      % Vardinis daznis [Hz]

wb = 2*pi*frated;% Pagrindinis elektrinis daznis ???
we=wb;
wbm = 2*wb/P;     % Pagrindinis mechaninis daznis ???
Tb = Sb/wbm;      % Pagrindinis momentas
Zb=Vrated*Vrated/Sb; %pagrindine tariamoji varza [ohms]
Vm = Vrated*sqrt(2/3); % Itamos amplitude
Vb=Vm;
Tfactor = (3*P)/(4*wb); % Momeno koeficientas

srated=0.0287 / 0.0287 *2; % vardinis slidimas
Nrated = 1748.3; % vardinis greitis aps/min
wmrated=2*pi*Nrated/60; % vardinis greitis rad/s
Trated = Sb/wmrated; % Vardinis momentas
iasb= 49.68; % vardine rms fazes srove

rs = 0.1062;      % statoriaus wdg varza ohm
xls = 0.2145;     % statoriaus sklaidos varza ohm
xplr = xls;       % rotoriaus sklaidos varza ohm
xm = 5.8339;      % statoriaus stator magnetine varza ohm
rpr = 0.0764;     % perskaiciuota rotoriaus wdg varza ohm
xM = 1/(1/xm + 1/xls + 1/xplr);
J = 2.8;          % rotoriaus inercija kg m2
H = J*wbm*wbm/(2*Sb); % inercijos konstanta s
Domega = 0; % rotoriaus slopinimo koeficientas
```

„M3.M“ failas:

```

% MATLAB script filas m3.m magistro Projekto Vektorinio valdymo
%   variklis
% m3.m nustato masinos parametrus, imituoja trugdžius,
%   ir taip pat pateikiai rezultatus.
% Pokycius simuliuojamame modeleyje ir trugdžiu pobudis
%   gali buti atlikamas keiciant si faila ir paleidziant ji
%   arba keiciant teisiogiai MATLAB lange
%   po to kai paleidziamas failas, kad inicializuodi darbo lauka.

clear all % isvalyti darbo lauka

% Parametrai 20 arklio galiu variklio

p20hp

% Momento ir greiciu kreiviu skaiciavimai
vas = Vrated/sqrt(3); % nustatoma vazine itampa
we = wb; % nustatomas sukimosi daznis
xls = (we/wb)*xls; % reaktivioji varza esamam sukimosi dazniui
xplr = (we/wb)*xplr; % reaktivioji varza esamam sukimosi dazniui
xm = (we/wb)*xm; % reaktivioji varza esamam sukimosi dazniui

xM = 1/(1/xm + 1/xls + 1/xplr);
xs = xls + xm; % satoriaus varza
xr = xplr + xm; % rotoriaus varza
xsprime = xs - xm*xm/xr; % statoriaus pereinamojo proceso varza

% Thevenin'o lygtys
vth = abs((j*xm/(rs + j*(xls + xm))*vas);
zth = (j*xm*(rs + j*xls)/(rs + j*(xls + xm)));
rth = real(zth);
xth = imag(zth);

% Rotoriaus varzos skaiciavimas
% rotoriaus varza maksimaliam momentui kai s=1
rpr1 = sqrt(rth^2 + (xth + xplr)^2);
%rprm = 0.4*sqrt(rth^2 + (xth + xplr)^2);

%rotoriaus varzos vektoriaus nustatymas

```

```

%rprv = [rpr rprm rpr1]
rprv = [rpr];
Nrr=length(rprv);

s = (1:-0.01:0.02);
N=length(s);

for n=1:N
    sn = s(n);
    wr(n)=2*we*(1-sn)/P;
    for nrr = 1:Nrr
        rrn = rprv(nrr);
        zin=(rs +j*xls) + j*xm*(rrn/sn + j*xplr)/(rrn/sn + j*(xm + xplr));
        ias = vas/zin;
        Sin =3*vas*conj(ias);
        pin = real(Sin);
        pfin(nrr,n)=cos(-angle(ias));
        iin(nrr,n)=abs(ias);
        te(nrr,n)=(3*P/(2*we))*(vth^2*rrn/sn)/((rth + rrn/sn)^2 + (xth + xplr)^2);
        pe(nrr,n)=te(nrr,n)*wr(n);
        eff(nrr,n)=100*pe(nrr,n)/pin;

    end % nrr cilkui
end % n ciklui

% Sinchroninio variklio greicio kintamuju pridejimas
size(te);
z=[0];
inl=vas/(rs +j*(xls+xm));
inlm = abs(inl);
inla = cos(-angle(inl));
iin=[iin [inlm]'];
pfin=[pfin [inla]'];
eff=[eff z'];
te=[te z'];
pe=[pe z'];
s=[s 0];
wr=[wr 2*we/P];
% nustatymas rotoriaus srautas be apkrovas

eprime = vas - (rs +j*xsprime)*inl; % itampa pries tai
% statoriaus pereinamojo proceso realtivioji varza

```

```

lambdadr = real(eprime)*(xr/xm)/we;

%nustatymas greicio ir srauto vektorių ciklo lenteleje simulaicijai

speed = [-2: 0.1: 2];
mask = abs(speed)>1.1;
notmask=~mask;
i=find(speed==0); %randa pradinio greicio dedamosiso rodikli
speed(i) = realmin; % ir pakeicia ji maziausiu tinmamu teigiamu skaiciu
invspeed = abs(1./speed); % pries dalyba, kad isvwenkti dalybos is nulio
% nustatant masteli srautui ir greiciui
lambdadre = lambdadr.*(invspeed.*mask + notmask);
speed = wbm*speed;

N=size(te);
M=size(te);
subplot(2,2,1)
plot(wr,te(1,:), '-')
xlabel('Rotoriaus greitis [rad/s]')
ylabel('Momentas [Nm]')
grid
subplot(2,2,2)
plot(wr,pe(1,:), '-')
xlabel('Rotoriaus greitis [rad/s]')
ylabel('Pagaminta galia [W]')
grid
subplot(2,2,3)
plot(wr,iin(1,:), '-')
xlabel('Rotoriaus greitis [rad/s]')
ylabel('Statoriaus srove [A]')
grid
subplot(2,2,4)
plot(wr,eff(1,:), '-')
xlabel('Rotoriaus greitis [rad/s]')
ylabel('naudingumas [%]')
grid

% pradiniu salygu nustatymas nuliais SIMULINK simulacijoi
Psiqso = 0;
Psidso = 0;
Psipqro = 0;
Psipdro = 0;

```

```

wrbywbo = 0;

tstop = 2.; % simuliacijos laiks sekundemis
% nustatomas greicio atstojamasis signalas apkrovos sukimosi atzvilgiu
time_wref=[0 0.5 tstop];
speed_wref=[0 wbm wbm];
% nustatomas Tmech atstojamasis signalas apkrovos sukimosi atzvilgiu
time_tmech=[0 0.75 0.75 1.0 1.0 1.25 1.25 1.5 1.5 2];
tmech_tmech=[0 0 -Trated -Trated -Trated/2 -Trated/2 -Trated -Trated 0 0 ];
disp('Simuliacija nustatyta palidimui is ramybes busenos ')
disp('esant apkrovos sukimuisei nustatytu dazniu.')
disp('Paleisti simuliacija poto atvaozduoti grafikus')
% Kreipimasis i klaviatura simuliavimui
keyboard

subplot(3,1,1)
plot(y(:,1),y(:,2),'-')
xlabel('Laikas [s]')
ylabel('wbm* [rad/s]')
grid
subplot(3,1,2)
plot(y(:,1),y(:,3),'-')
xlabel('Laikas [s]')
ylabel('wbm [rad/s]')
grid
subplot(3,1,3)
plot(y(:,1),y(:,4),'-')
axis([-inf inf -200 200])
xlabel('Laikas [s]')
ylabel('Vag [V]')
grid
H2_fig=figure;
subplot(3,1,1)
plot(y(:,1),y(:,5),'-')
xlabel('Laikas [s]')
ylabel('Ia [A]')
grid
subplot(3,1,2)
plot(y(:,1),y(:,6),'-')
xlabel('Laikas [s]')
ylabel('Tem [Nm]')
grid

```

```

subplot(3,1,3)
plot(y(:,1),y(:,7), '-')
xlabel('Laikas [s]')
ylabel('|Psir| [V]')
grid
disp('Issaugokite grafikus pries tesiant sekanti tirima')
keyboard
close(H2_fig);

% nustatomas greicio atstojamasis signalas greicio sukimosi atzvilgiu
time_wref=[0 0.25 0.5 1.0 1.25 1.5];
speed_wref=[0 wbm/2 wbm/2 -wbm/2 -wbm/2 0];
% nustatomas Tmech signalas
time_tmech=[0 tstop];
tmech_tmech=[0 0];
disp('Simulacija dabar nustatoma greicio sukimuisi be apkrovos')
disp('Run simulation then return for plots')
% Simulaivimo perdavimas i klaviatura
keyboard

subplot(3,1,1)
plot(y(:,1),y(:,2), '-')
xlabel('Laikas [s]')
ylabel('wbm* [rad/s]')
grid
subplot(3,1,2)
plot(y(:,1),y(:,3), '-')
xlabel('Laikas [s]')
ylabel('wbm [rad/s]')
grid
subplot(3,1,3)
plot(y(:,1),y(:,4), '-')
axis([-inf inf -200 200])
xlabel('Laikas [s]')
ylabel('Vag [V]')
H2_fig=figure;
grid
subplot(3,1,1)
plot(y(:,1),y(:,5), '-')
xlabel('Laikas [s]')
ylabel('Ia [A]')
grid

```

```

subplot(3,1,2)
plot(y(:,1),y(:,6), '-')
xlabel('Laikas [s]')
ylabel('Tem [Nm]')
grid
subplot(3,1,3)
plot(y(:,1),y(:,7), '-')
xlabel('Laikas [s]')
ylabel('|Psir| [V]')
grid
disp('Issaugokite grafikus preis tai kaip baigsite')
keyboard
close(H2_fig);

```