VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

AUTOMATIKOS KATEDRA

Laurynas Kerpė

SKALIARINIO VALDYMO DAŽNINIŲ ASINCHRONINIŲ PAVARŲ MODELIAI

SCALAR CONTROL MODELS OF THE INDUCTION MOTORS

Baigiamasis magistro darbas

Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 621H62001

Automatinių sistemų specializacija

Elektronikos ir elektros inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2012

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

AUTOMATIKOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

_____
(Parašas)

_____
(Vardas, pavardė)

_____
(Data)

Laurynas Kerpė

SKALIARINIO VALDYMO DAŽNINIŲ ASINCHRONINIŲ PAVARŲ MODELIAI

SCALAR CONTROL MODELS OF THE INDUCTION MOTORS

Baigiamasis magistro darbas

Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 621H62001

Automatinių sistemų specializacija

Elektronikos ir elektros inžinerijos studijų kryptis

Vadovas prof. habil. dr. Roma Rinkevičienė _____ _____
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

Konsultantas doc. Dainius Udris _____ _____
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

Konsultantas asist. Daiva Macko _____ _____
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

Vilnius, 2012

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Elektronikos fakultetas

Automatikos katedra

ISBN ISSN

Egz.sk. 3

Data 2012-05-31

Automatikos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas Skaliariškai valdomų dažninių asinchroninių pavarų modeliai

Autorius: **Laurynas Kerpė** Vadovas: prof. habil.dr. **Roma Rinkevičienė**

Kalba

[X] lietuvių

[ ] užsienio

Anotacija

Įvadinėje darbo dalyje nurodomas darbo aktualumas, naudojant skaliariniu būdu valdomas asinchronines pavaras. Atlikta literatūros analizė apie dažniu valdomas elektros pavaras. Teorinėje darbo dalyje išnagrinėti trifazių asinchroninių variklių ypatumai bei sudaryti asinchroninio variklio matematiniai ir kompiuteriniai modeliai stacionarioje ir sinchroniškai besisukančioje koordinačių sistemose. Tiriamojoje darbo dalyje sudaryti dažninės asinchroninės pavaros kompiuteriniai modeliai Matlab SIMULINK aplinkoje. Sudaryti atvirosios ir uždarosios greičio reguliavimo sistemų modeliai. Išanalizuoti uždarosios greičio reguliavimo sistemos imitaciniai rezultatai su statine ir ventiliatorine apkrova bei skirtingais PI arba PID reguliatoriaus suderinimo koeficientais. Imitaciniai dažninės pavaros dinaminiai procesai palyginti su realios dažninės asinchroninės pavaros eksperimentiniais bandymais.

Darbą sudaro 6 dalys: įvadas, literatūros analizė, tyrimo tikslas ir uždaviniai, teorinė dalis, tiriamoji dalis, išvados ir pasiūlymai, literatūros šaltiniai.

Darbo apimtis – 86 p. teksto be priedų, 87 iliustr., 4 lent., 39 bibliografiniai šaltiniai.

Raktiniai žodžiai: dažnio keitiklis, dažninė pavara, skaliarinis valdymas, trifazis asinchroninis variklis, variklio greičio reguliavimas

Vilnius Gediminas Technical University

Faculty of Electronics

Department of Automation

ISBN ISSN

Copies No. 3

Date 2012-05-31

Master Degree Studies Automation study programme master thesis.

Title: Scalar control models of the induction motors

Author Laurynas Kerpė Academic supervisor Prof Dr Habil Roma Rinkevičienė

Thesis language

[X] Lithuanian

[ ] Foreign (English)

Annotation

In the introduction part refers relevance of work using scalar controlled induction drives. Performed an analysis of literature about frequency controlled induction drives. In the theoretical part of master thesis are analyzed the features of three phase induction motors as well as mathematical and simulation models in the stationary and synchronously rotating coordinate systems are made. In the research part are proposed computer models of frequency controlled induction drives created in Matlab SIMULINK environment. Composed models with opened and closed speed control systems. The simulation results of closed speed control systems are analysed with a different type of loads and differents correction gains of PI or PID controllers. Simulation results of frequency controlled drive are compared with the experimental results.

Structure: introduction, analysis of literature, study aim and objectives, theoretical part, research part, conclusions and proposals, references.

Thesis consist of: 86 p. text without appendixes, 87 pictures, 4 tables, 39 bibliographical entries.

Keywords: frequency converter, frequency controlled drive, scalar control, induction motor, inducion motor speed control

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
AUTOMATIKOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėja

_____
(Parašas)

Zita Savickienė
(Vardas, pavardė)

_____
(Data)

Technologijos mokslų sritis

Elektros ir elektronikos mokslo kryptis

Elektros inžinerijos studijų kryptis

Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 621H62001

Automatinių sistemų specializacija

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO UŽDUOTIS

…….....Nr. .....
Vilnius

Studentui Laurynui Kerpei
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: **SKALIARINIO VALDYMO DAŽNINIŲ ASINCHRONINIŲ PAVARŲ MODELIAI**
SCALAR CONTROL MODELS OF THE INDUCTION DRIVES
patvirtinta 2010 m. lapkričio 2 d. dekano potvarkiu Nr. 195el.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2012 m. birželio 01 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

1. ĮVADAS.
2. LITERATŪROS APIE DAŽNIU VALDOMAS PAVARAS ANALIZĖ.
3. TYRIMO TIKSLAI IR UŽDAVINIAI.
4. TEORINĖ DALIS.
4.1. Asinchroninių variklių dinaminiai modeliai.
4.2. Uždarosios skaliarinio valdymo sistemos su reguliatoriais.
5. TIRIAMOJI DALIS.
5.1. Skaliarinio valdymo dažninių asinchroninių pavarų modelių sudarymas.
5.2. Imitacinių rezultatų analizė.
5.3. Eksperimentiniai dažninės pavaros tyrimai ir analizė.
6. TYRIMO REZULTATŲ APIBENDRINIMAS.
6.1. Išvados.
6.2. Rekomendacijos ir pasiūlymai.
7. LITERATŪRA IR KITI ŠALTINIAI.

Vadovas ..... prof. habil. dr. R. Rinkevičienė
(Parašas) (Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

……..
(Parašas)
Laurynas Kerpė
(Vardas, pavardė)

……..
(Data)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Laurynas Kerpė, Nr. 20063907

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Elektronikos

(Fakultetas)

Automatika, AUSfm–10

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2012 m. birželio 1 d.

(Data)

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Skaliarinio valdymo dažninių asinchroninių pavarų modeliai“ patvirtintas 2010 m. lapkričio 2 d. dekano potvarkiu Nr. 195el., yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Parenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: doc. Dainius Udris, asist. Daiva Macko.

Mano darbo vadovas: prof. habil. dr. Roma Rinkevičienė.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

(Parašas) (Vardas ir pavardė)

TURINYS

ĮVADAS 8
2. LITERATŪROS APIE DAŽNIŲ VALDOMAS PAVARAS ANALIZĖ 9
2.1. Dažniu valdomos asinchroninės elektros pavaros 9
2.2. Energijos suvartojimo efektyvumas....17
2.3. Skaliarinis valdymas 18
2.4. Asinchroninių elektros variklių matematinių modelių analizė 21
2.5. Kintamosios srovės asinchroninių variklių svarbiausi ypatumai....22
2.5.1. Šiuolaikinių asinchroninių variklių apžvalga....23
3. TYRIMO TIKSLAI IR UŽDAVINIAI 24
4. TEORINĖ DALIS....25
4.1. Asinchroninių variklių dinaminiai modeliai 25
4.2. Fazinių koordinačių modelis. Bendrosios variklio lygtys 25
4.3. Asinchroninio variklio modelių sudarymas. Parametrų skaičiavimas....27
4.4. Koordinačių transformacijos. Koordinačių sistemos....29
4.5. Variklio modelio sudarymas sinchroniškai besisukančioje koordinačių sistemoje....31
4.6. Variklio modelio sudarymas stacionariojoje koordinačių sistemoje 34
4.7. Uždarosios skaliarinio valdymo sistemos su reguliatoriais 37
4.7.1. Neraiškioji logika....38
4.7.2. Neraiškiosios logikos reguliatorius ir jo struktūra....40
4.7.3. Intelektualus kombinuotas „*Fuzzy-PID*“ reguliatorius....41
4.7.4. „*Fuzzy-PID*” reguliatoriaus klasifikacija ir bendroji struktūra....42
4.7.5. PID reguliatorius....42
4.7.6. *PID* reguliatoriaus tobulinimas. Susireguliuojantis ”*Fuzzy-PID*“ reguliatorius 44
5. TIRIAMOJI DALIS....46
5.1. Skaliarinio valdymo dažninių asinchroninių pavarų modelių sudarymas 46
5.1.1. Dažninės pavaros kompiuterinio modelio sudarymas su erdvinio vektoriaus impulsų pločio moduliacija....52
5.2. Imitaciniai rezultatai ir analizė....57
5.3. Eksperimentiniai bandymai 77
5.3.1. Uždarosios skaliarinio valdymo dažninės pavaros 80
su reguliatoriais sudarymas....80
5.4. Eksperimentinių tyrimų rezultatai ir analizė....82
6. IŠVADOS 89
7. LITERATŪRA IR KITI ŠALTINIAI....90

ĮVADAS

Per pastaruosius metus kintamosios srovės variklių (angl. *Induction Motors*) paplito valdomose reguliuojamo greičio ir padėties pavarose. To priežastis – plati kintamosios srovės variklių eksploatacija įvairaus pobūdžio technologijose, pramonėje, kur anksčiau būdavo naudojami nuolatinės srovės varikliai. Pagrindinis elektros tinklo reaktyviosios energijos vartotojas yra kintamosios srovės asinchroninis variklis, pasižymintis tam tikrais ypatumais. Šie ypatumai bei privalumai plačiau aptariami pirmame šio tiriamojo darbo skyriuje.

Siekiant, kad technologijos ir (arba) sistemos būtų efektyvios, dauguma nevaldomų kintamosios srovės pavarų yra tobulinamos, jas papildant dažnio keitikliais, kurie pastaruoju metu taikomi pavarų greičio reguliavimui. Dažninių asinchroninių elektros pavarų greitis reguliuojamas, taikant skaliarinio ir vektorinio valdymo principus. Šiame darbe didžiausias dėmesys bus skiriamas skaliarinio valdymo principui.

Dažnio keitiklio paskirtis – formuoti kintamo dažnio įtampą. Variklis paprastai maitinamas sinusine įtampa. Šią įtampa tiekia inverteris, kuris gali būti: srovės inverteris, įtampos inverteris, valdomas impulsų pločio moduliacijos (angl. *Pulse width modulation – PWM*) būdu. Inverterį sudaro 6 laipsnių tranzistoriniai komutavimo raktai (IGBT), t.y. išėjimo įtampa PWM būdu formuojama tam tikra impulsų seka rakto režimu. Siekiant impulsų seką priartinti prie sinusinės formos įtampos, būtina nustatyti pagrindinius impulsų parametrus (impulsų skaičių per periodą, plotį ir kt.).

Norint pasiekti reikiamas dažniu valdomų pavarų statines bei dinamines savybes, būtina žinoti kuo daugiau informacijos apie valdomą objektą. Šioje srityje stipriai išaugo charakteristikų ir parametrų nustatymo svarba. Yra įvairių tipų trifazio variklio ekvivalentinių schemų, naudojamų charakteristikoms nustatyti bei parametrams apskaičiuoti. Apskaičiuoti bei gerai įvertinti parametrai toliau pritaikomi pavarų dinaminių modelių sudarymui.

Trifazio asinchroninio variklio dinaminių charakteristikų tyrimas tampa daug paprastesnis, transformuojant trifazę įtampų sistemą į dvifazę. Kadangi variklio netiesinių diferencialinių lygčių sprendimas analiziniu būdu dažnai yra labai komplikuotas, tai tokiu atveju lygtys sprendžiamos skaitiniais metodais, t.y. sudaromi matematiniai arba kompiuteriniai modeliai. Transformuojant statoriaus arba rotoriaus kintamuosius, koordinačių sistemos skirstomos į sinchroniškai besisukančią d^e-q^e ir stacionariąją (nejudančią) d^s-q^s.

Siekiant kuo didesnio efektyvumo bei optimalių sprendimų šiuolaikinėje automatizuotoje gamyboje, dažnai sprendžiama greičio palaikymo problema. Tiriamojo darbo eigoje ši problema sprendžiama sudarant uždarosios dažninės pavaros greičio reguliavimo sistemos modelį ir palyginant imitacijos rezultatus su eksperimentiniais.

2. LITERATŪROS APIE DAŽNIU VALDOMAS PAVARAS ANALIZĖ

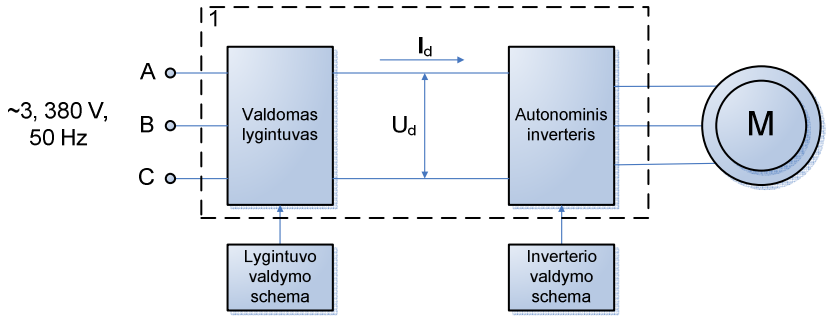
Tiriamojo darbo parengimui atlikta plati mokslinės literatūros ir kitų literatūros šaltinių, susijusios (-ių) su darbo tema, analizė. Atsižvelgiant į temos aktualumą bei pasirinktos tiriamosios problemos aspektams analizuoti, remiantis tiriamojo darbo metodiniais nurodymais (literatūros šaltinis: Radzevičius L. Magistrantūros tiriamieji ir baigiamieji studijų darbai. Metodiniai nurodymai. Vilnius: leidykla „Technika“, 2009 m., 66 psl.), todėl pagrindinis dėmesys skiriamas mokslinėms publikacijoms (straipsniams). Literatūros šaltiniai nurodyti paskutiniame darbo skyriuje.

2.1. Dažniu valdomos asinchroninės elektros pavaros

Daugelyje pramoninių valdymo sistemų bei kituose technologiniuose irenginiuose naudojamos valdomos arba reguliuojamos elektros pavaros. Pavarų valdymas paprastai siejamas su greičio keitimu. Pastaruoju metu vienas populiariausių asinchroninio variklio greičio reguliavimo būdų – tai dažninis valdymas (angl. *Variable-frequency drives*). Šis būdas stipriai išplėtė elektros pavarų pritaikymo sritį. Čia naudojami įvairių tipų pramoniniai dažnio keitikliai. Dažniu valdomų pavarų privalumai, trūkumai, veikimo principas bei struktūra – visa tai detaliai išanalizuota knygoje Andrzej Trzynadlowski M.. Control of induction motors [27] bei moksliniuose straipsniuose [23, 24, 28, 30].

Pagrindinė dažnio keitiklių paskirtis – įvairaus tipo bei paskirties variklių greičio reguliavimas. Yra žinoma, jog kintamosios srovės variklių greitis yra atvirkščiai proporcingas polių skaičiui ir tiesiogiai proporcingas statorių maitinančios įtampos dažniui *f*. Todėl atsiradus poreikiui keisti variklio sukimosi greitį, būtinas polių porų skaičiaus keitimas. Kadangi paprastai statoriaus polių skaičius būna fiksuotas, akivaizdu, kad jo keitimas negalimas [7, 9].

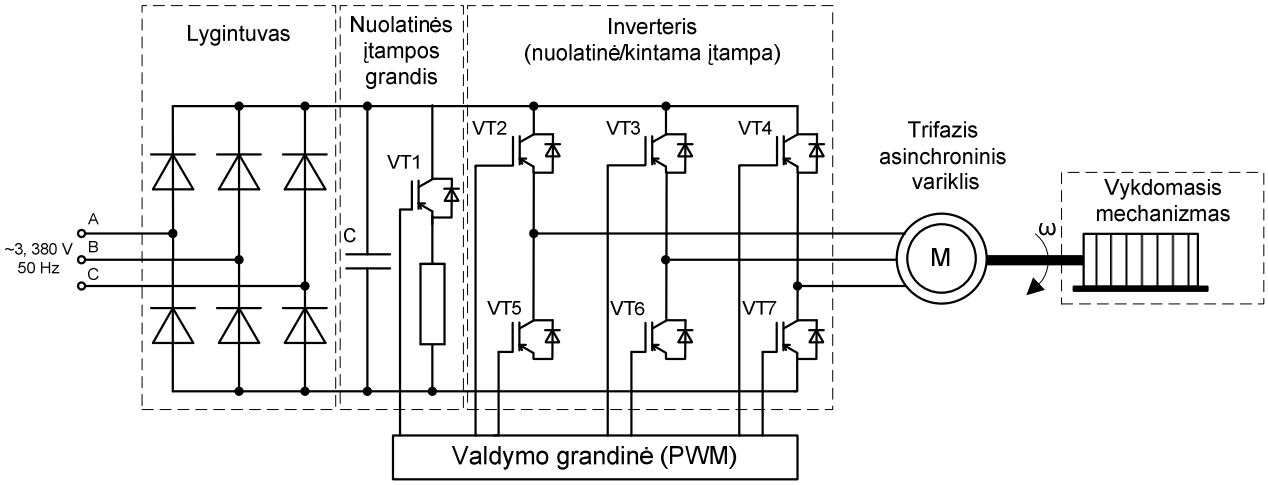
Dažnio keitiklio veikimo principas susijęs su įtampos lyginimu ir keitimu. Tai įtaisas, keičiantis kintamosios srovės ir įtampos dažnį. Pradžioje kintama trifazė įtampa puslaidininkiu lygintuvu keičiama į nuolatinę, o tada komutavimo raktai (IGBT tranzistoriai) tam tikru nustatomu dažniu atidaromi arba uždaromi. Komutacija yra neatsiejama dažnio keitiklio veikimo proceso dalis, todėl variklis, maitinamas iš dažnio keitiklio, veikia dinaminiu režimu [1]. Taip išėjime sukuriama tam tikro dažnio kintamoji įtampa. Bendra dažninės elektros pavaros struktūra pateikta 2.1 pav.



2.1 pav. Dažninės elektros pavaros struktūrinė schema

Iš 2.1 pav. pateiktos struktūros galima pastebėti, jog modeliuojant valdomąjį variklį yra modeliuojama mechatroninė sistema *keitiklis(1) – variklis(*M*)* [1]. 2.2 pav. pateikiama apibendrinta pramoninio dažnio keitiklio jėgos grandinės schema, kuri sudaryta iš 6 laipsnių (šeši vienetai, tranzistorinio tipo, komutuojamieji raktai) inverterio.

Šiame tiriamajame darbe sistema tiriama be valdomo lygintuvo, t.y. trifazio įtampos inverterio (2.1 pav. – autonominis inverteris) maitinimas numatytas tiesiogiai iš nuolatinės srovės šaltinio.

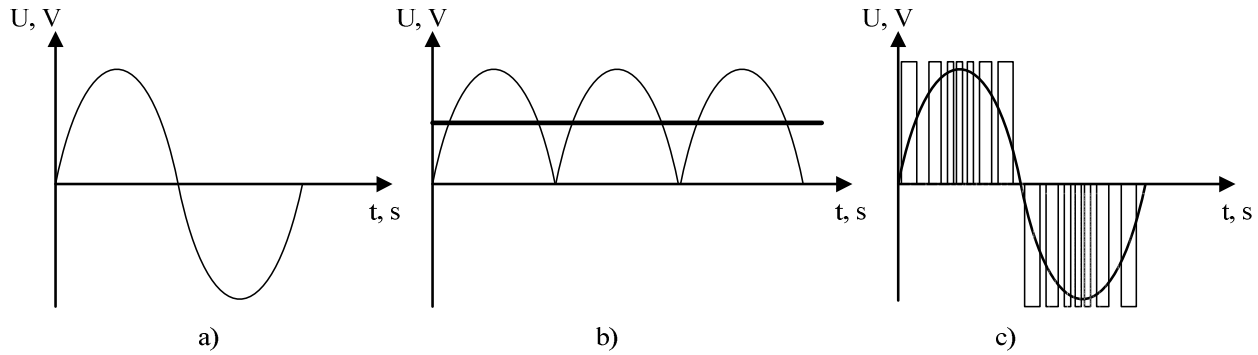


2.2 pav. Apibendrinta pramoninio dažnio keitiklio jėgos schema

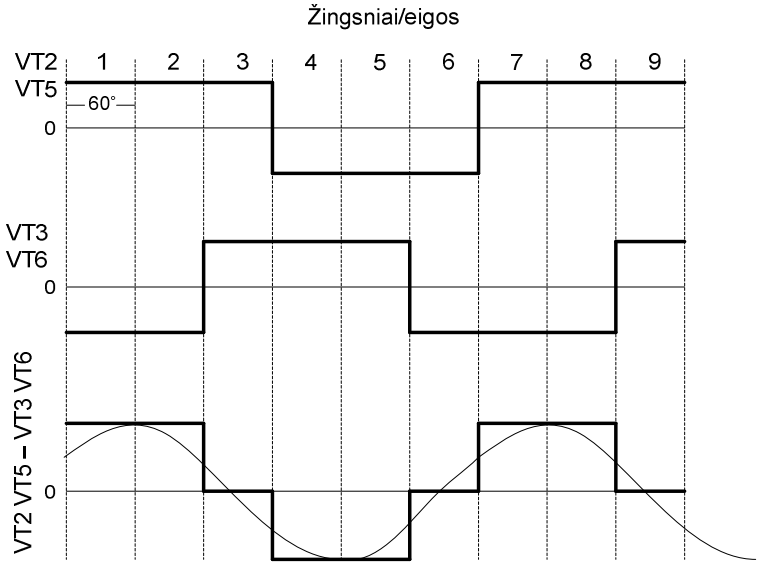
Iš 2.1 pav. ir 2.2 pav. pateiktų schemų matyti, jog dažnio keitiklis sudarytas iš trijų, nuosekliai sujungtų dalių. Čia sujungiamas nevaldomas lygintuvas (keitiklis: kintamoji/nuolatinė įtampa), nuolatinės įtampos grandis ir inverteris (nuolatinė/kintamoji įtampa). Sudėtingiausia ir pagrindinė dažnio keitiklio dalis yra inverteris, sudarytas iš tranzistorinių raktų VT2 – VT7. Pastarieji valdomi valdymo grandinės bloke formuojamais valdymo impulsais, impulsų pločio moduliacijos (angl. sutr. *PWM*) būdu [1]. Raktai komutuojami pagal atitinkamą valdymo algoritmą, kuris pateiktas šaltinyje [1], 6.1 lentelėje. Patikimas inverterio darbas garantuojamas, panaudojant atitinkamą raktų būsenos kontrolę, kuris realizuojamas įvairiais jutikliais, grįžtamaisiais ryšiais,

sekant raktų darbinę srovę, įtampą bei temperatūrą. Raktų komutavimo metu formuojami impulsai trifaziam inverteriui pavaizduoti 2.3 pav. (c) [15].

Pagrindinis dažnio keitiklio veikimo principo tikslas – generuoti tam tikro (dažniausiai nustatomo) dažnio ir amplitudės trifazį tinklą, prie kurio prijungus asinchroninį variklį, jo apvijomis tekėtų sinusinės srovės tam tikru dažniu, o rotorius sukasi norimu greičiu, kryptimi, su atitinkamu sukimo momentu.



2.3 pav. Dažnio keitiklio atskirų elementų formuojamų signalų formos: a) lygintuvo išėjimo; b) nuolatinės įtampos grandinės; c) inverterio



2.4 pav. IGBT tranzistorinių raktų komutavimo diagrama

Yra žinoma, jog raktų komutavimas vykdomas taikant IPM (liet. sutr.) metodus, kurie gali būti įvairiai klasifikuojami. Rinkevičienės R. ir Petrovo A. „Mechatroninių sistemų modeliavimas“ mokomojoje knygoje pateikiama plati šių metodų klasifikacija:

1. Sinusinė impulsų pločio moduliacija (sutr. SIPM);
2. Pasirinktų harmonikų eliminavimo (sutr. PHEIPM);

3. Mažų srovės pulsacijų IPM;
4. Erdvinio vektoriaus IPM (angl. sutr. SVPWM);
5. Atsitiktinė impulsų pločio moduliacija;
6. Histerezės srovės kilpos valdymo IPM;
7. Sinusinė IPM su akimirkinės srovės valdymu;
8. Delta moduliacija;
9. Sigma-delta moduliacija.

Sąryšyje su tiriamuoju darbu, detalesnė analizė ir pritaikymas tiriamajam objektui, atliekamas 1 ir 4 punktuose paminėtiems metodams.

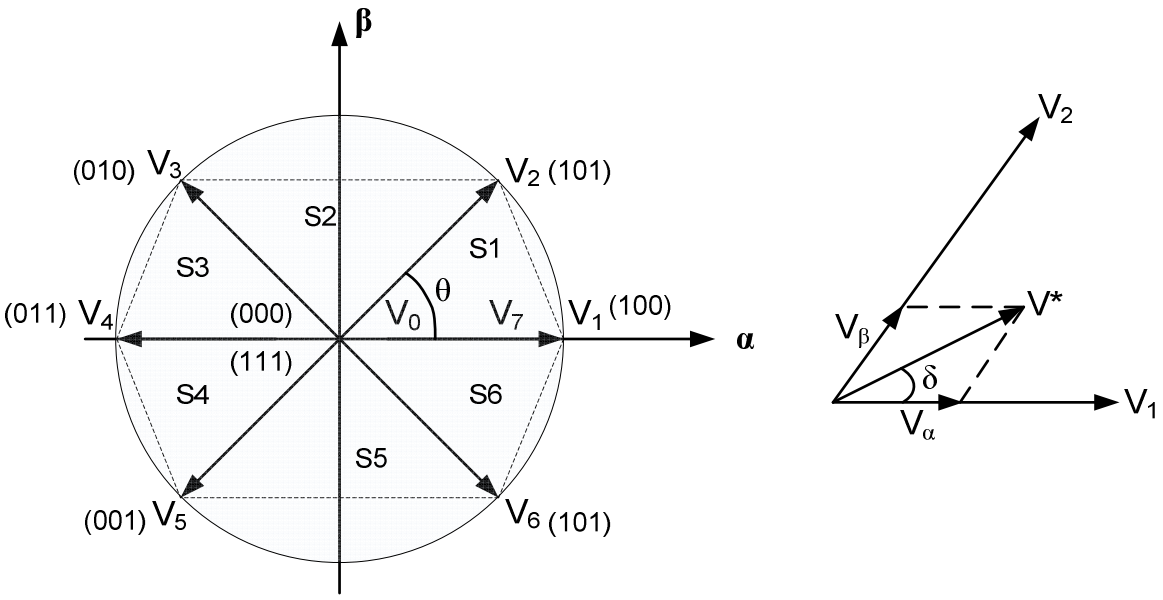
Erdvinio vektoriaus ir sinusinės IPM metodų teorinei analizei pasirinkta užsienio autoriaus Bose Bimal K. knyga „Modern Power Electronics and AC drives“ [4]. Tai ypač aukšto lygmens mokslinė medžiaga. Knygoje pateikiami IPM metodų veikimo principai, privalumai bei trūkumai, taip pat aiškiai suprantama skaičiavimo metodika, kuri pateikiama kartu su matematinėmis išraiškomis. Grafine forma iliustruojamos matematinės išraiškos vektorinėje erdvėje bei impulsų formavimas laiko diagramose.

Užsienio autoriaus Nagaraja H. Chikkegowda mokslinėje disertacijoje “Space vector PWM sequence and harmonic comparison for high power current source rectifier” atliktas teorinis ir praktinis erdvinio vektoriaus metodo mokslinis tyrimas.

Erdvinio vektoriaus impulsų pločio moduliacija (angl. sutr. SV PWM) – dėl savo paprastumo ypač didelę reikšmę turintis impulsų pločio moduliacijos algoritmas, taikomas trifazio inverterio valdymui. Tačiau kartais dėl didelio būsenų kiekio šio algoritmo taikymas tampa sudėtingas [39].

Skirtingai nei sinusinė IPM, šis būdas paremtas įtampų pateikimu erdviniais vektoriais *d* ir *q* koordinačių plokštumoje. Komponentės *d* ir *q* surandamos pagal Park‘o transformaciją. 90,7 % pagrindinės stačiakampės bangos yra galimos tiesinėje srityje (moduliacijos indekso išplėtimas), lyginant su sinusine IPM (78,55 %). Erdvinio vektoriaus moduliacija yra interaktyvi schema, tinkama skaitmeniniam realizavimui realiuoju laiku [39].

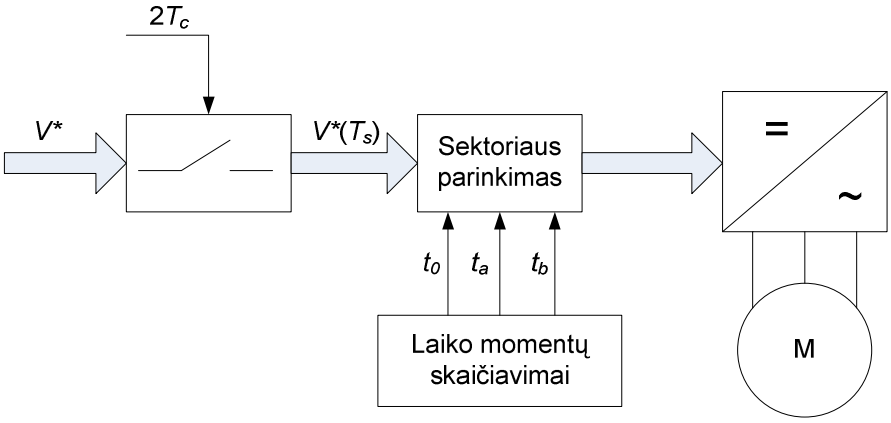
Trifazio tiltelinio inverterio valdymui galimos $2^3 = 8$ perjungimo būsenos: dvi nulinės ir šešios aktyviosios būsenos. Aktyviųjų vektorių projekcija dalinama į šešis sektorius (2.5 pav. sektoriai atitinka S1 – S6 žymėjimą), kur atskaitos vektorius V^* gaunamas įjungiant (tinkamu laiku) greta du vektorius. Trifazio inverterio įtampas vektorinėje erdvėje, α-β koordinačių sistemoje atitinka 2.5 pav. pateiktos įtampų vektorinės diagramos [37,4].



2.5 pav. Inverterio įtampos vektorinėje erdvėje

Iš 2.5 pav. pateiktos vektorinės diagramos galima pastebėti, jog įtampos atskaitos vektorius V^* gali būti gautas, esant skirtingai V_1 ir V_2 vektorių perjungimo sekai. Taip pat įžvelgiamas moduliacijos indekso sumažėjimas [37, 4].

Valdymo algoritmo realizavimo blokinė schema pateikta 2.6 pav.



2.6 pav. Erdvinio vektoriaus algoritmo realizavimo blokinė schema

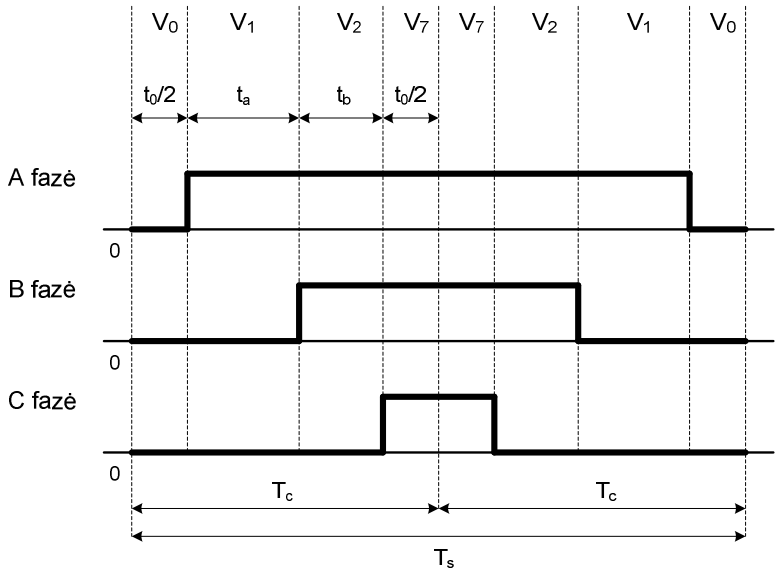
Remiantis literatūros šaltiniu [4], atskaitos įtampos vektoriaus vertė ir raktų įjungimo laiko momentų skaičiavimai atliekami pagal šias matematines išraiškas (kai yra tiesinė moduliacijos sritis):

$$V^* = V_a + V_b = V_1 \frac{t_a}{T_C} + V_2 \frac{t_b}{T_C} + (V_0 \; arba \; V_7) \frac{t_0}{T_C}; \qquad \textbf{Equation Section 2}(2.1)$$

Laiko momentai t_a, t_b, t_0 apskaičiuojami taip:

$$t_a = \frac{V_a}{V_1} \cdot T_c;\ t_b = \frac{V_b}{V_2} \cdot T_c;\ t_0 = T_c - (t_a + t_b). \tag{2.2}$$

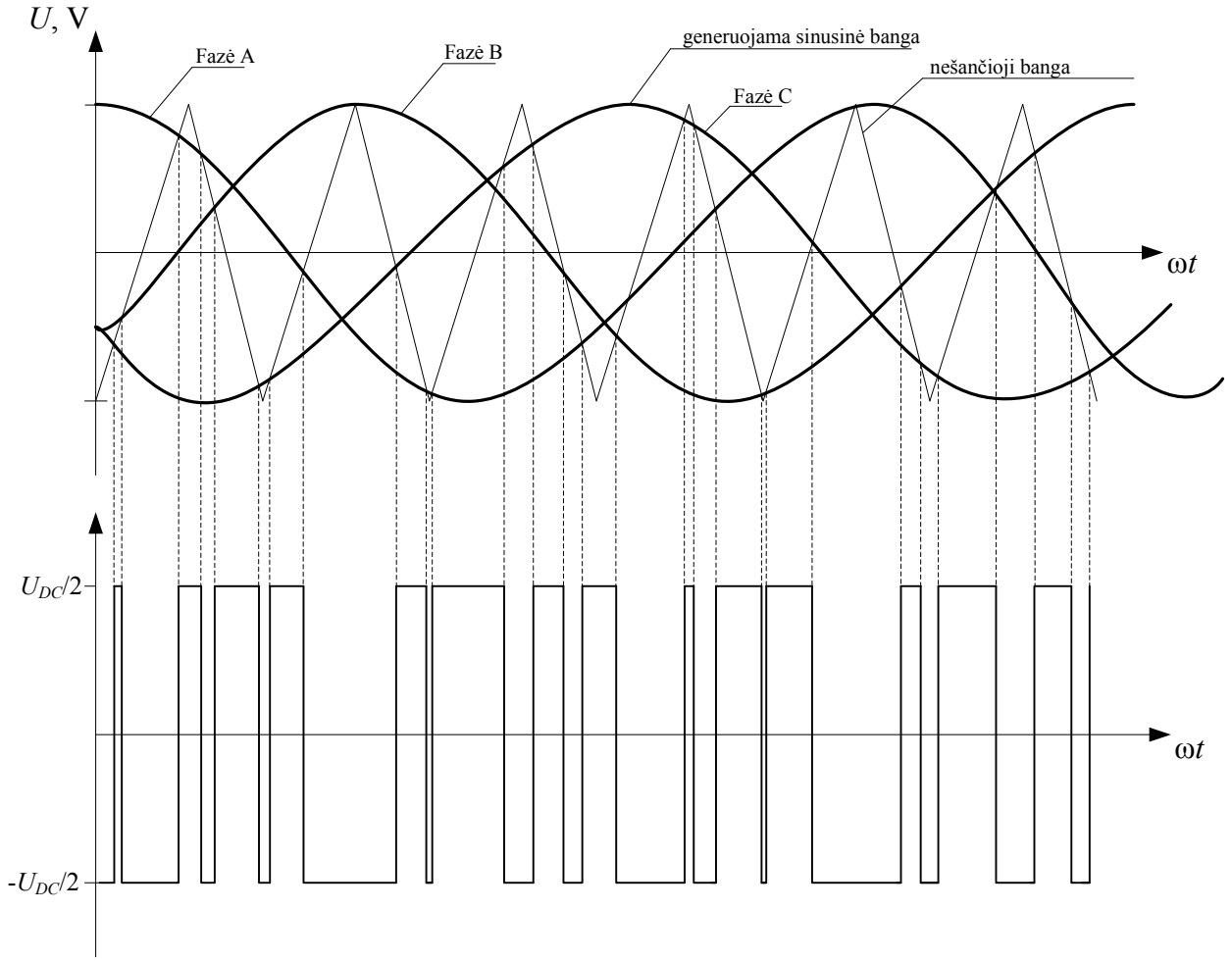
Praktikoje dažnai taikoma trifazė simetrinių impulsų moduliacija su nuliniais vektoriais vektorinėje erdvėje. Ši moduliacija paremta (2.1), (2.2) matematinėmis išraiškomis. Vektorių V_0, V_1, V_2 ir V_7 būsenos, esant simetrinei moduliacijai, pateikiamos 2.7 pav. [4].



2.7 pav. Trifazė simetrinė moduliacija

Sinusinė impulsų pločio moduliacija (sutr. SIPM) – taikant pramonėje dažnai vadinamas sinusu užkoduota IPM, skirta inverterio įtampos valdymui. Šiuo metodu palaikomos ypač geros pavaros charakteristikos, gaunant pirmosios harmonikos vertę nuo 0 iki 78 % pagal stačiakampės įtampos formos signalą. Kai moduliacijos indekso *m* vertė viršija vienetinę reikšmę, tiesinis santykis tarp moduliacijos indekso ir išėjimo įtampos nebepalaikomas, todėl šiuo momentu reikalingas permoduliavimo metodų pritaikymas.

Sinusinės IPM veikimas paaiškinamas paprastai. Sinusinių įtampų (U_a, U_b, U_c) sankirtoje su nešančiąja banga formuojami impulso priekinio ir galinio frontų impulsai. Suformuotu impulsu įjungiamas atitinkamas puslaidininkinis IGBT raktas. Moduliuojamų impulsų dažnis priklauso nuo generuojamos sinusinės įtampos dažnio *f*. Didinant dažnį atitinkamai didėja impulsų skaičius, kadangi atsiranda daugiau susikirtimo taškų su nešančiąja banga (pjūklinė kreivė). Sinusinių bangų ir pjūklinės kreivės amplitudės palaikomos pastovios. SIPM grafinis paaiškinimas pateiktas 2.8 pav.



2.8 pav. Sinusinė impulsų pločio moduliacija

Išraiškos, kuriomis remiantis, apskaičiuojamos inverterio įtampos:

- Linijinių įtampų seka:

$$\begin{aligned} U_{ab} &= U_{as} - U_{bs}; \\ U_{bc} &= U_{bs} - U_{cs}; \\ U_{ca} &= U_{cs} - U_{as}; \end{aligned} \tag{2.3}$$

čia: U_{as}, U_{bs}, U_{cs} - fazinės įtampos.

$$U_{ab} - U_{ca} = 2U_{as} - (U_{bs} + U_{cs}). \tag{2.4}$$

Matricų forma fazinės įtampos užrašomos taip:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_{DC} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}. \tag{2.5}$$

čia: [a, b, c,] – perjungimo kintamųjų vektoriai (loginiai kintamieji 0 arba 1).

Simetrinėje trifazėje sistemoje, fazinių įtampų suma yra lygi:

$$U_{as} + U_{bs} + U_{cs} = 0\,. \tag{2.6}$$

Remiantis pateiktomis (2.3) – (2.6) lygtimis, skirtumas tarp linijinių įtampų U_{ab} ir U_{ca} yra:

$$\begin{aligned} U_{ab} - U_{ca} &= 3U_{as}; \\ U_{as} &= \frac{U_{ab} - U_{ca}}{3}; \\ U_{bs} &= \frac{U_{bc} - U_{ab}}{3}; \\ U_{cs} &= \frac{U_{ca} - U_{bc}}{3}. \end{aligned} \tag{2.7}$$

Periodinės sinusinės įtampos, remiantis Furjė metodu:

$$\begin{aligned} U_{ab}(t) &= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} U_{DC}(\sin\omega_s t - \frac{1}{5}\sin 5\omega_s t + \frac{1}{7}\sin 7\omega_s t + ...) \\ U_{bc}(t) &= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} U_{DC}(\sin(\omega_s t - 120^0) - \frac{1}{5}\sin(5\omega_s t - 120^0) + \frac{1}{7}\sin(7\omega_s t - 120^0) - ...) \\ U_{ca}(t) &= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} U_{DC}(\sin(\omega_s t + 120^0) - \frac{1}{5}\sin(5\omega_s t + 120^0) + \frac{1}{7}\sin(7\omega_s t + 120^0) - ...) \end{aligned} \tag{2.8}$$

Išlyginta nuolatine įtampa (b) yra maitinamas inverteris, kuriame ši įtampa pakeičiama atgal į kintamąją. Inverterio (c) išėjime suformuota impulso pločio moduliacijos būdu trifaze impulsine įtampa valdomas asinchroninis variklis bei jo sukimosi greitis.

Nauji galios elektronikos įtaisai bei naujos jų valdymo technologijos žymiai sumažino dažnio keitiklių kainą, todėl buvo sukurtos reguliuojamos dažninės pavaros. Reguliuojant pavaros greitį dažnio keitikliais, buvo pagerintas įvairių procesų valdymas bei padidintas gamybos našumas. Šios pavaros pasižymi sklandžiu paleidimu ir stabdymu, taip pat geromis dinaminėmis savybėmis. Greitis tokiose pavaros gali būti keičiamas labai plačiose ribose [2].

Pagrindiniai valdomų elektros pavarų privalumai:

- Energijos taupymas;
- Nedidelė variklio paleidimo srovė;
- Paprastas įdiegimas;
- Aukštas galios ir naudingumo koeficientas;

- Didelis temperatūrinis ir mechaninis atsparumas smūgiams paleidimo metu.

Pagrindiniai dažninių elektros pavarų valdymo metodai (algoritmai) yra du: skaliarinis ir vektorinis. Valdymo metodai trumpai palyginami 2.1 lentelėje.

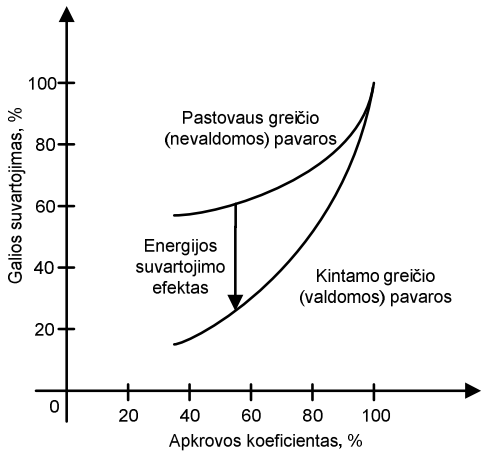
2.1 lentelė. Skaliarinio ir vektorinio valdymo palyginimas [29]

Valdomas parametras	***U/f* valdymas**	**Vektorinis valdymas**	**Bejutiklis vektorinis valdymas**
Greičio reguliavimas	Mažas tikslumas (1 %)	Didelis tikslumas 0,001 %	0,05 %
Momento reguliavimas	Blogas	± 2 %	± 5 %
Variklio modelis	Nebūtinas	Būtinas	+

Tai du skirtingi valdymo algoritmai, tačiau šiems metodams yra bendrai tai, kad keičiamas variklo statorių maitinančios įtampos dažnis. Pagrindinis dėmesys šiame darbe bus skiriamas skaliarinio valdymo metodui.

2.2. Energijos suvartojimo efektyvumas

Šiuo metu ypač aktualus klausimas elektros energijos suvartojimo sferoje yra elektros energijos taupymas. Čia taikomas energijos suvartojimo efektas. Pavyzdžiui, kaip matyti iš toliau pateiktos charakteristikos (žr. 6 pav.), jog esant apkrovai 60 %, naudojant dažnio keitiklį – efektyvumas ypač pagerinamas, t.y. tada elektros energijos suvartojama ~35 %. 2.9 pav. pateikiamos energijos suvartojimo charakteristikos, kai elektros variklių valdymui naudojami dažnio keitikliai [6].



2.9 pav. Energijos suvartojimo charakteristikos

2.3. Skaliarinis valdymas

Skaliarinio valdymo metodas siejamas su nevektoriniais variklio dydžiais. Taip pat šis metodas remiasi dažniniu variklio modeliu, aprašančiu nusistovėjusius darbo režimus. Remiantis statistika, šis metodas taikomas apie 80 % valdomų pavarų. Svarbiausi kriterijai, lemiantys šį pasirinkimą yra tokie: paprastas valdymas, paprastas paruošimas darbui, patogi vartotojo sąsaja ir nedidelė kaina [6]. Nors šis metodas nepasižymi ypač gerais kokybės rodikliais, tačiau pagrindinis privalumas – nesudėtingas realizavimas. Jis dažnai taikomas pramonėje įvairaus pobūdžio technologiniuose procesuose ir technologinėse sistemose. Šis metodas plačiai aptariamas literatūros sąraše nurodytuose šaltiniuose [6, 15, 18, 21].

Remiantis literatūros šaltiniu [5] galima teigti, jog skaliarinis valdymas taikomas atvirose (be grįžtamojo ryšio) ir uždarose (su grįžtamuoju ryšiu) valdymo sistemose. Inverteris skirstomas į:

1. Įtampos inverteris (angl. Voltage-fed);
2. Srovės inverteris (angl. Current-fed).

Plačiausiai įtampos inverteriai yra valdomi impulsų pločio moduliacijos metodu (angl. sutr. PWM).

Variklio greitis gali kisti, keičiant statoriaus maitinimo įtampos dažnį. Kintant induktyviajai varžai statoriaus apvijose, keičiasi srovė. Kai srovė yra nedidelė, variklio elektromagnetinis momentas yra nedidelis. Tokiu atveju, mažėjant dažniui arba didėjant įtampai atsiranda problema – dega apvijos arba variklio magnetolaidis įsisotina. Siekiant išvengti šių problemų, būtinas proporcingas įtampos ir dažnio keitimas tuo pačiu metu [6, 21] .

Skaliarinis valdymas aprašomas matematine išraiška:

$$\frac{U_e}{f} = 4,44 \cdot N \cdot \psi_s \cdot \zeta; \tag{2.9}$$

čia: U_e - indukuota įtampa statoriuje;

f - maitinimo įtampos dažnis;

N - vijų skaičius;

ψ_s - magnetinio srauto tankis statoriuje;

ζ - apvijos konstanta.

Elektromagnetinis variklio momentas apskaičiuojamas taip:

$$M_{em} = \frac{3}{2\omega_{\text{m}}} \cdot I_r^2 \frac{R_r}{s}. \tag{2.10}$$

čia: R_r - aktyvioji rotoriaus varža;

I_r - rotoriaus srovė.

Remiants (2.10) formule, gaunama tokia skaliarinio valdymo matematinė išraiška:

$$\frac{M_{em}}{\omega} \approx \frac{U^2}{2\pi f^2} \approx \frac{U}{f} = const. \tag{2.11}$$

Skaliariniame valdyme elektromagnetinis momento (M_{em}) ir variklio greičio santykis yra pastovus visuose pavaros dinaminės/statinės charakteristikos veikimo taškuose iki vardinės sukimosi greičio vertės. Rotorius gali suktis virš vardinės variklio sukimosi greičio vertės. Tačiau proporcingai didėjant dažniui, greičio padidėjimas virš vardinės vertės sumažina elektromagnetinį momentą, kadangi įtampa negali būti didesnė už lygintuvo išėjimo įtampą.

Šiam valdymui praktikoje dažnai taikomos tokio pobūdžio apkrovos:

- Kai M_{st} = const.:

$$\frac{U}{f} = \text{const.}; \tag{2.12}$$

- Kai siekiama išlaikyti pastovią galią P = const.:

$$\frac{U}{\sqrt{f}} = \text{const}.; \tag{2.13}$$

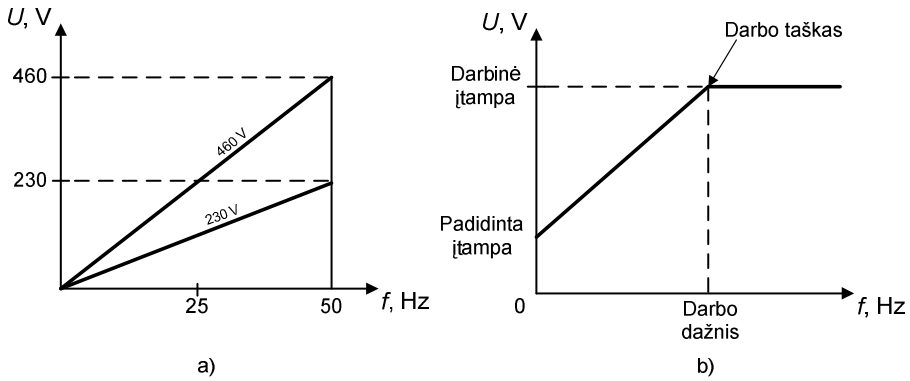
- Ventiliatorinė apkrova:

$$\frac{U}{f^2} = \text{const.} \tag{2.14}$$

Įtampos ir dažnio proporcingas reguliavimas paaiškinamas toliau pateiktu pavyzdžiu (2.10 pav. a)). Pvz., jeigu variklis suprojektuojas veikti prie 460 V nominalios įtampos, 50 Hz dažniu, tai tuo atveju, kai dažnis sumažinamas iki 25 Hz: įtampa turi būti sumažinta iki 230 V. Esant tokioms vertėms, gaunami šie koeficientai [13, 27, 28]:

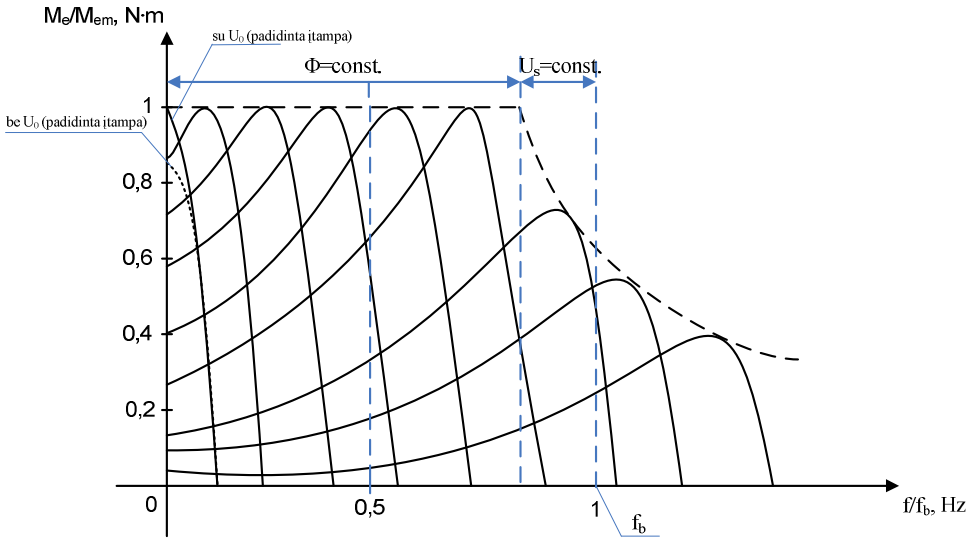
$$\frac{U}{f} = const \rightarrow \frac{460}{50} = 9,2; \ \frac{230}{25} = 9,2. \tag{2.15}$$

Šis koeficientas gali būti keičiamas, siekiant keisti variklio elektromegnetinį momentą, t.y. kintant šiam koeficientui, atitinkamai keičiasi ir momento kreivė.



2.10 pav. Skaliarinio valdymo charakteristikos

Keičiant statoriaus maitinimo įtampos dažnį, proporcingai turi būti keičiama įtampa, siekiant palaikyti pastovų variklio sukuriamą magnetinį srautą Φ oro tarpe. Elektromagnetinio momento M_{em} ir maitinimo įtampos dažnio f priklausomybė pavaizduota 2.11 pav.



2.11 pav. Elektromagnetinio momento ir maitinimo įtampos dažnio priklausomybė

Kai variklio greitis reguliuojamas varijuojant *U/f* koeficientą, susiduriama su tam tikromis problemomis. Esant mažam greičiui, gaunamas didesnis įtampos krytis statoriaus aktyviojoje varžoje. Tai sumažina sukuriamą variklio momentą, esant mažam greičiui. Yra keletas paminėtos problemos sprendimo būdų:

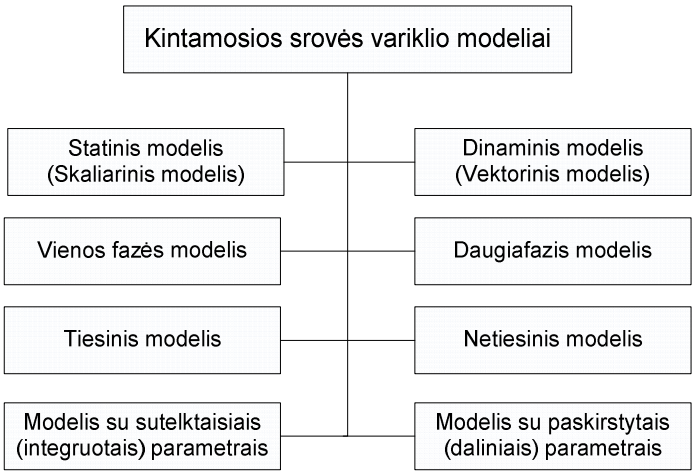
- Padidinti pradinę įtampą, esant mažam greičiui;
- Palaikyti pastovią įmagnetinimo srovę I_m (variklio ekvivalentinės schemos vidurinėje atšakoje tekanti srovė), sukurianti pastovų magnetinį srautą.

Vienas iš sprendimo būdų (su padidinta pradine įtampa) grafiškai paaiškinamas 2.10 pav. b) pateiktoje *U/f* charakteristikoje.

2.4. Asinchroninių elektros variklių matematinių modelių analizė

Asinchroninio variklio matematinių modelių sudarymui pasirinkta Rinkevičienės R. ir Petrovo A. „Mechatroninių sistemų modeliavimas“ mokomoji knyga bei Batkausko V. „Dažninių elektros pavarų dinaminiai modeliai“ daktaro disertacija. Pasirinktose mokslinėse publikacijose nagrinėjami mechatroninių sistemų modeliai su asinchroniniais varikliais, pateiktos variklio diferencialinės lygtys ir galutinės diferencialinių lygčių sistemos sudarymo metodika. Pagal sudarytą diferencialinę lygčių sistemą publikacijose pateikiama nuosekli kompiuterinio modelio sudarymo technika.

Dauguma skirtingų modelių yra tinkami narveliniams kintamosios srovės varikliams, reikalingi pavaros projektavimui ir valdymui. Bendruoju atveju šie modeliai klasifikuojami kaip statiniai ir dinaminiai, tiesiniai arba netiesiniai, daliniai arba integruoti. Variklio modelių klasifikacija pateikiama 2.12 pav. [25].



2.12 pav. Kintamosios srovės variklio modelių klasifikacija

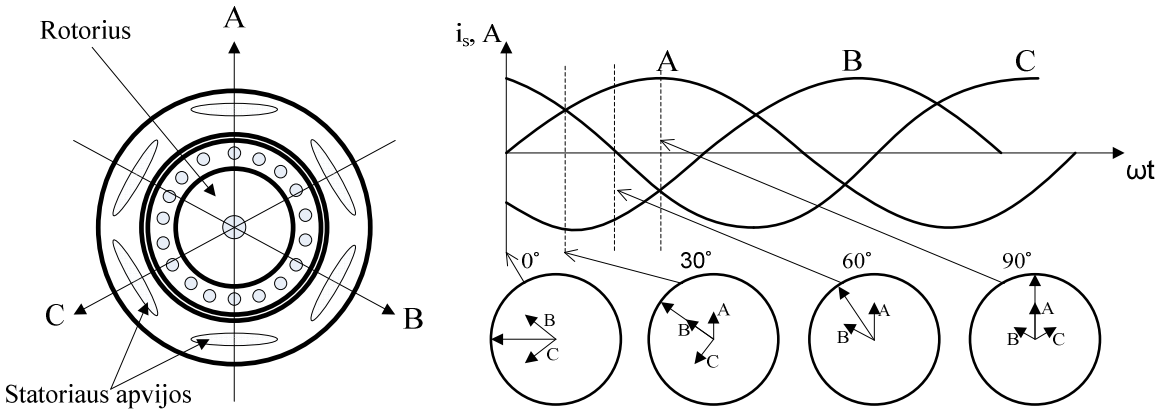
Matematiniu požūriu bendrosios asinchroninio variklio lygtys yra pirmos eilės netiesinės diferencialines lygtys su harmoniškai kintamais koeficientais. Todėl dėl sudėtingo diferencialinių lygčių analitinio sprendimo, lygtys sprendžiamos skaitiniais metodais, t.y. sudarant imitacinius modelius.

Dažninės asinchroninės pavaros modeliui būtina pradžioje sudaryti asinchroninio variklio matematinį ir kompiuterinį modelį.

2.5. Kintamosios srovės asinchroninių variklių svarbiausi ypatumai

Kintamosios srovės varikliai dažniausiai naudojami įvairaus pobūdžio technologinėse sistemose, pramonėje. Taip pat tai yra pagrindinis elektromechaninės sistemos elementas. Šie varikliai yra trifazės elektros sistemos reaktyviosios galios pagrindiniai vartotojai, kuriems tenka maždaug apie 60 – 70 % pagaminamos elektros energijos [10]. Kintamosios srovės asinchroniniai varikliai pasižymi paprasta konstrukcija, nedidele rinkos kaina, nesudėtingu veikimo principu – tai pagrindiniai šio tipo variklių privalumai.

Variklio veikimo principas siejamas ryšium su statoriaus ir rotoriaus kuriamų elektromagnetinių laukų sąveika. Sukamojo magnetinio lauko sukimąsis trumpai paaiškinamas 2.13 pav. pateiktose diagramose [28].



a) b)

2.13 pav. Sukamojo magnetinio lauko diagramos

Trys variklio statoriaus fazinės apvijos A, B, C kuria sukamąjį magnetinį lauką, besisukantį sinchroniniu greičiu ω_s. Pateikiamos statoriaus sinusinės srovės ir visų trijų fazių magnetinio lauko vektoriai (2.13 pav. b).

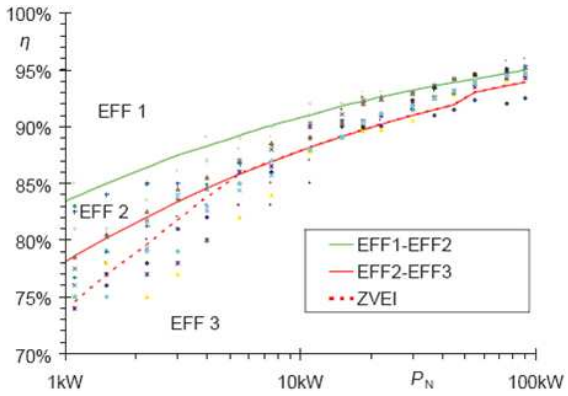
Petrovo A. daktaro disertacijoje „Trifazių asinchroninių variklių dinaminiai modeliai“ [10] išsamiai nagrinėjami trifaziai asinchroniniai varikliai bei su jais susijusių statinių ir dinaminių procesų analizė, taikant įvairius modeliavimo (imitavimo) algoritmus.

2.5.1. Šiuolaikinių asinchroninių variklių apžvalga

Remiantis įvairių firmų informacine medžiaga bei jų kataloginiais duomenimis, atlikta trumpa šiuolaikinių asinchroninių variklių apžvalga ir svarbiausi jų ypatumai.

Šiuo metu visame pasaulyje yra nemažai gamintojų, gaminančių trifazius bei vienfazius elektros variklius, tarp kurių taip pat yra ir kintamosios srovės asinchroniniai varikliai. Priklausomai nuo gamintojo, šiuolaikiniai asinchroniniai varikliai gaminami skirtingų komplektacijų, atitinkamai skiriasi ir jų techniniai duomenys, konstrukcija bei kitos ypatybės. Tačiau visiems varikliams bendra yra tai, jog visos kompanijos savo gamyboje remiasi bendrais standartais, tokiais kaip IEC (angl. *International Electrotechnical Comission*) ir *NEMA* (angl. National Electrical Manufacturers association).

Naudingumo identifikavimas. Priklausomai nuo variklio tipo, polių porų skaičiaus, dydžio bei daugelio kitų svarbių parametrų, variklių naudingumas yra klasifikuojamas į tris klases: *Eff1* – aukštas naudingumas, *Eff2* – standartinis naudingumas ir *Eff3* – žemas naudingumas. Šią klasifikaciją galima laikyti kaip savanorišką susitarimą tarp *CEMEP* (angl. the European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics) ir *EC/EU* (angl. European Comission/European Union) [38].



2.14 pav. Skirtingų variklių gamintojų naudingumo klasės, esant dviem polių poroms [14]

2.14 pav. pateikta naudingumo koeficiento η priklausomybė nuo variklio vardinės galios P_n. Čia nagrinėjami kaip uždaros konstrukcijos varikliai su ventiliatoriumi, trifaziai narvelinio tipo asinchroniniai varikliai, 50 Hz įtampos dažnis, darbo režimas – S1, apsaugos laipsnis ≥IP 54.

3. TYRIMO TIKSLAI IR UŽDAVINIAI

Tiriamojo darbo tikslas – sudaryti skaliariškai valdomų dažninių asinchroninių elektros pavarų modelius. Siekiant nurodyto tikslo, darbe bus sprendžiami šie uždaviniai:

1. Išanalizuoti dažniu valdomų pavarų bei asinchroninių variklių matematinių modelių sudarymą.
2. Sudaryti asinchroninio variklio kompiuterinius modelius;
3. Sudaryti skaliarinio valdymo dažninių asinchroninių pavarų kompiuterinius modelius;
4. Eksperimentiniu būdu gauti greičio ir elektromagnetinio momento dinamines charakteristikas;
5. Atlikti imitacinių ir eksperimentinių rezultatų analizę.

4. TEORINĖ DALIS

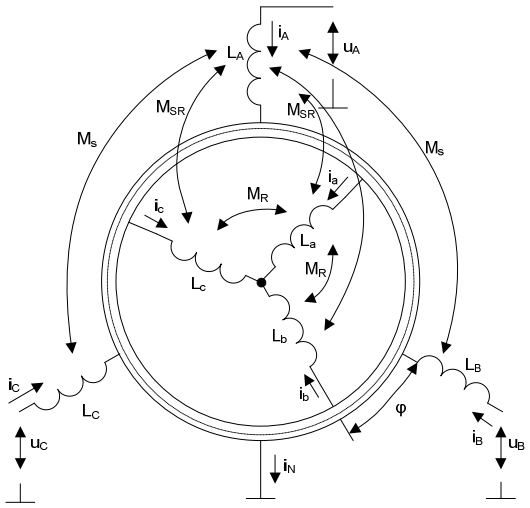
4.1. Asinchroninių variklių dinaminiai modeliai

Sudėtingų elektromechaninių sistemų tyrinėjimui didelę svarbą turi modeliavimas, kai tiriamą sistemą kartais tampa neįmanoma ištirti eksperimentiškai. Kai ypač dideli sunkumai kyla nagrinėjant variklyje vykstančius fizikinius reiškinius. Tam tikslui sistema imituojama pasirinktu imitavimo – modeliavimo algoritmu. Todėl teoriniu požiūriu, asinchroninio variklio dinamikai tirti šis pažinimo kelias yra labai reikšmingas, prieš įdiegiant pavarą sudėtingose technologinėse sistemose. Daugeliu atvejų yra taikomi matematiniai ir kompiuteriniai modeliai. Šiuo metu, pažangios šiuolaikinės kompiuterizuotos modeliavimo programos išplečia galimybes atlikti šių dviejų modeliavimo būdų kombinaciją. T.y. pradžioje variklis, remiantis skaitiniais teoriniais metodais, yra aprašomas matematinėmis diferencialinėmis lygtimis, pagal kurias toliau sudaromas tiriamojo variklio kompiuterinis modelis *Matlab SIMULINK* modeliavimo paketu.

Todėl šiame skyriuje trumpai apžvelgiami dažniausiai naudojami asinchroninių variklių modeliai teorine bei praktine prasme.

4.2. Fazinių koordinačių modelis. Bendrosios variklio lygtys

Trifazio asinchroninio variklio statoriuje ir rotoriuje yra suklota po tris fazines apvijas, kurios viena kitos atžvilgiu perstumtos 120˚. Variklio apvijos ir fazinių apvijų elektromagnetiniai ryšiai paaiškinami 4.1 pav. pateiktoje schemoje [1].



4.1 pav. Elektromagnetinių ryšių variklyje schema

Remiantis fazinių koordinačių modeliu užrašomos statoriaus ir rotoriaus apvijų įtampų balanso lygtys.

Statoriaus apvijoms įtampų balanso lygtys užrašomos taip:

$$\begin{cases} u_A = \dfrac{d\Psi_A}{dt} + R_A i_A; \\ u_B = \dfrac{d\Psi_B}{dt} + R_B i_B; \\ u_C = \dfrac{d\Psi_C}{dt} + R_C i_C. \end{cases} \qquad \text{Equation Section 4} \qquad (4.1)$$

Rotoriaus apvijoms įtampų balanso lygtys užrašomos taip:

$$\begin{cases} u_a = \dfrac{d\Psi_a}{dt} + R_a i_a; \\ u_b = \dfrac{d\Psi_b}{dt} + R_b i_b; \\ u_c = \dfrac{d\Psi_c}{dt} + R_c i_c; \end{cases} \qquad (4.2)$$

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

Matematiniu požiūriu bendrosios asinchroninio variklio lygtys yra pirmos eilės netiesinės diferencialines lygtys su harmoniškai kintamais koeficientais. Todėl dėl sudėtingo diferencialinių lygčių analitinio sprendimo, lygtys sprendžiamos skaitiniais metodais, t.y. sudarant imitacinius modelius. Remiantis 4.1 pav. pateikta schema toliau sudaromos bendrosios asinchroninio variklio lygtys.

Asinchroninio variklio lygčių sudarymas.

Asinchroninio variklio pilnutiniai srautai aprašomi tokia lygčių sistema:

$$\begin{cases} \Psi_A = L_A i_A + M_S(i_B + i_C) + M_{SR} i_a \cos\varphi + M_{SR}[ib_B \cos(\varphi + 120^0) + i_c \cos(\varphi - 120^0)] \\ \Psi_B = L_B i_B + M_S(i_A + i_C) + M_{SR} i_b \cos\varphi + M_{SR}[i_a \cos(\varphi - 120^0) + i_c \cos(\varphi + 120^0)] \\ \Psi_C = L_C i_C + M_S(i_A + i_B) + M_{SR} i_c \cos\varphi + M_{SR}[i_b \cos(\varphi - 120^0) + i_a \cos(\varphi + 120^0)] \\ \Psi_a = L_a i_a + M_R(i_b + i_c) + M_{SR} i_A \cos\varphi + M_{SR}[i_B \cos(\varphi - 120^0) + i_C \cos(\varphi - 120^0)] \\ \Psi_b = L_b i_b + M_R(i_a + i_c) + M_{SR} i_B \cos\varphi + M_{SR}[i_A \cos(\varphi + 120^0) + i_C \cos(\varphi + 120^0)] \\ \Psi_c = L_c i_c + M_R(i_a + i_b) + M_{SR} i_C \cos\varphi + M_{SR}[i_B \cos(\varphi + 120^0) + i_A \cos(\varphi - 120^0)] \end{cases} \qquad (4.3)$$

Asinchroninio variklio kuriamas elektromagnetinis momentas apskaičiuojamas taip:

$$M = p\frac{\partial W_m}{\partial \varphi} = \frac{p\partial\left(\Psi_A i_A + \Psi_B i_B + \Psi_C i_C\right)}{\partial \varphi} + \frac{p\partial\left(\Psi_a i_a + \Psi_b i_b + \Psi_c i_c\right)}{\partial \varphi}; \tag{4.4}$$

$$\begin{aligned} M = &-pM_{SR}\left[\left(i_A i_a + i_B i_b + i_C i_c\right)\sin\varphi\right] - pM_{SR}\left[\left(i_A i_b + i_B i_c + i_C i_a\right)\sin\left(\varphi + 120^\circ\right)\right] - \\ &-pM_{SR}\left[\left(i_A i_c + i_B i_a + i_C i_b\right)\sin\left(\varphi - 120^\circ\right)\right]. \end{aligned} \tag{4.5}$$

Asinchroninio variklio įtampų balanso lygtys *x, y* koordinačių sistemoje atrodo taip [1]:

$$\begin{cases} \dfrac{d\Psi_{x1}}{dt} = U_{1m}\cdot\cos\varphi - \omega_{0el}\cdot a_s'\cdot\Psi_{x1} + \omega_{0el}\cdot a_s'\cdot K_R\cdot\Psi_{x1} + \omega_{0el}\cdot\Psi_{y1}; \\ \dfrac{d\Psi_{y1}}{dt} = U_{1m}\cdot\sin\varphi - \omega_{0el}\cdot a_s'\cdot\Psi_{y1} + \omega_{0el}\cdot a_s'\cdot K_R\cdot\Psi_{y2} + \omega_{0el}\cdot\Psi_{x1}; \\ \dfrac{d\Psi_{x2}}{dt} = -\omega_{0el}\cdot a_R'\cdot\Psi_{x2} + \omega_{0el}\cdot a_R'\cdot K_S\cdot\Psi_{x1} + (\omega_{0el} - \omega_{el})\cdot\Psi_{y2}; \\ \dfrac{d\Psi_{y2}}{dt} = -\omega_{0el}\cdot a_R'\cdot\Psi_{y2} + \omega_{0el}\cdot a_R'\cdot K_S\cdot\Psi_{y1} - (\omega_{0el}\cdot\omega_{el})\cdot\Psi_{x2}. \end{cases} \tag{4.6}$$

Remiantis (4.3) – (4.6) sudarytomis variklio lygtimis, naudojantis *Matlab SIMULINK* programiniu paketu toliau sudaromi asinchroninio variklio kompiuteriniai modeliai, pasirinktose koordinačių sistemose.

4.3. Asinchroninio variklio modelių sudarymas. Parametrų skaičiavimas

Žinoma, jog kintamosios srovės asinchroninės mašinos pagrindiniai darbo režimai yra generatorinis ir variklinis. Šiame darbe sudaromi modeliai dinaminiams variklinio režimo procesams imituoti.

Variklio modelis sudaromas, remiantis eksperimentinio stendo variklio parametrais. Šiuo atveju modeliuojamo variklio tipas yra 4A1000S2Y3 – 4 kW, kurio pradiniai duomenys pateikiami 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė. Variklio 4A1000S2Y3 techniniai duomenys

Parametras	P_n, kW	U_{1f}, V	f, Hz	n, aps/min	η, %	cosφ	J, kg·m^2	Varža, santykiniais dydžiais				
								x_μ'	r_s'	x_s'	r_r'	x_r'
Vertė	4	400	50	2890	81	0,88	0,007	3,4	0,059	0,0081	0,041	0,121

Apskačiuojama variklio nominaliosios srovės vertė pagal (4.7) išraišką:

$$I_n = I_{nf} = \frac{P}{3 \cdot U_{1f} \cdot \eta \cdot \cos\varphi}; \tag{4.7}$$

$$I_{nf} = \frac{4000}{3 \cdot 220 \cdot 0,81 \cdot 0,88} = 8,51 \text{ A}.$$

Variklio rotoriaus kampinis sukimosi greitis vardiniame režime:

$$\omega = 2\pi f; \tag{4.8}$$

$$\omega = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ rad/s}.$$

Perskaičiuojamos varžos absoliutiniais dydžiais pagal išraiškas:

$$R_s = \frac{r_s^{'} \cdot U_{1f}}{I_{nf}} = \frac{0,059 \cdot 220}{8,51} = 1,55 \ \Omega; \tag{4.9}$$

$$X_s = \frac{x_s^{'} \cdot U_{1f}}{I_{nf}} = \frac{0,0081 \cdot 220}{8,51} = 0,209 \ \Omega; \tag{4.10}$$

$$R_r = \frac{r_r^{'} \cdot U_{1f}}{I_{nf}} = \frac{0,041 \cdot 220}{8,51} = 1,05 \ \Omega; \tag{4.11}$$

$$X_r = \frac{x_r^{'} \cdot U_{1f}}{I_{nf}} = \frac{0,121 \cdot 220}{8,51} = 3,13 \ \Omega; \tag{4.12}$$

$$x_\mu = x_\mu^{'} + x_\mu^{''}; \tag{4.13}$$

$$x_\mu^{''} = \frac{2x_1^{'} \cdot x_\mu^{'}}{x_\mu^{'} + \sqrt{\left(x_\mu^{'}\right)^2 + 4x_1^{'} \cdot x_\mu^{'}}}; \tag{4.14}$$

$$x_\mu^{''} = \frac{2 \cdot 0,0081 \cdot 3,4}{3,4 + \sqrt{11,56 + 0,1102}} = \frac{0,05508}{6,82} = 0,0081 \ \Omega; \tag{4.15}$$

$$x_\mu = 2,1 + 0,073 = 3,41; \tag{4.16}$$

$$x_m = \frac{x_\mu \cdot U_{1f}}{I_{nf}} = \frac{2,17 \cdot 220}{4,95} = 88,2 \ \Omega. \tag{4.17}$$

čia: R_S – variklio statoriaus fazinės apvijos aktyvioji varža;

X_S – variklio statoriaus induktyvioji varža;

R_r – variklio rotoriaus aktyvioji varža;

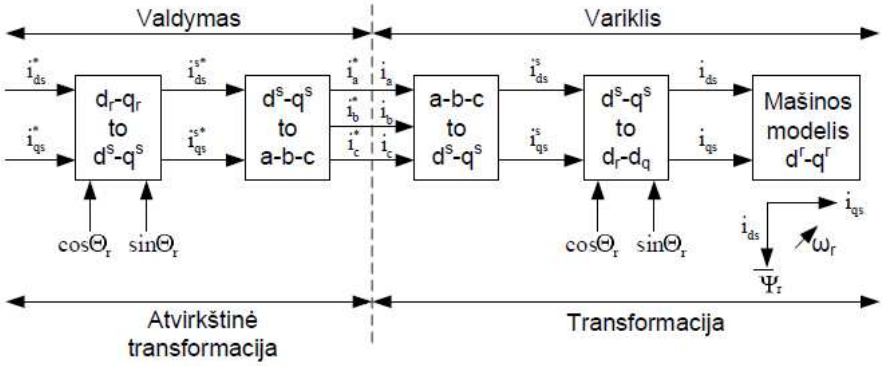
X_r – variklio rotoriaus induktyvioji varža;

x_μ – įmagnetinimo grandinės varža.

4.4. Koordinačių transformacijos. Koordinačių sistemos

Yra žinoma, jog asinchroninio variklio dinamika aprašoma netiesinėmis diferencialinėmis lygtimis su harmoniniu dėsniu kintančiais koeficientais, kurie priklauso nuo variklio veleno posūkio kampo. Paprastai šios lygtys analitiškai neišsprendžiamos, o jų kompiuterinį modelį sudaryti yra gana sunku. Šiai problemai išspręsti yra taikomi koordinačių transformacijos metodai, eliminuojantys harmoniniu dėsniu kintančius parametrus [1]. Taigi šios transformacijos pagrindinis tikslas – supaprastinti asinchroninio variklio fazinių koordinačių modelį, siekiant supaprastinti dinaminių procesų nagrinėjimą.

Variklio dinaminių savybių nagrinėjimą supaprastina trifazio elektros variklio pakeitimas į dvifazį. Toks keitimo procesas pateikiamas 4.2 pav. [3].

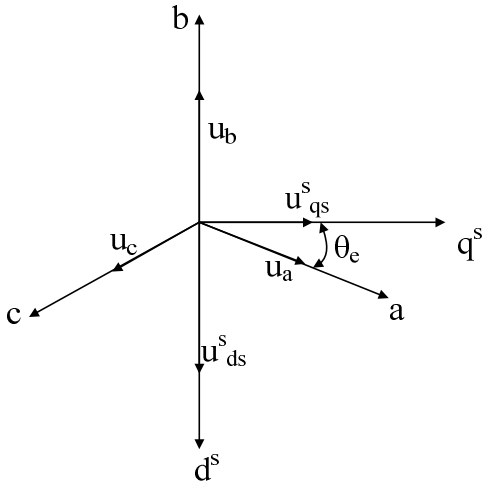


4.2 pav. Trifazės sistemos keitimas į dvifazę

Yra taikomos dvi pagrindinės koordinačių sistemos:

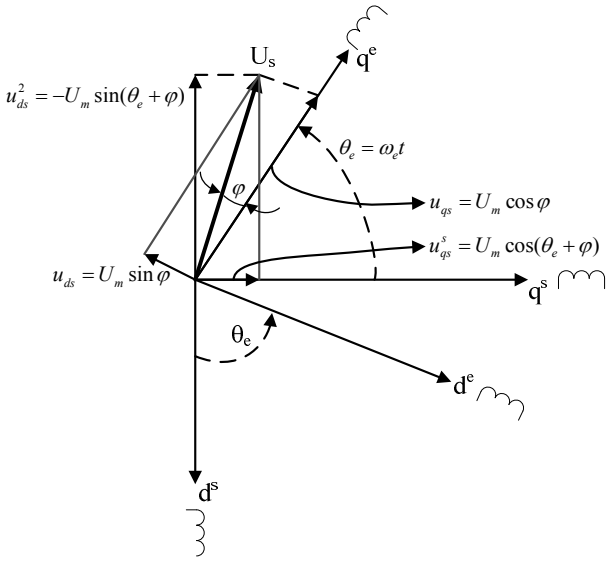
1. Stacionarioji koordinačių sistema;
2. Sinchroniškai besisukanti koordinačių sistema.

Variklio fazinės apvijos perstumtos 120˚ kampu viena kitos atžvilgiu. Siekiama transformuoti trifazės stacionariosios koordinačių sistemos *a-b-c* kintamuosius į dvifazės sistemos d^s-q^s kintamuosius, kurie toliau keičiami į sinchroniniu greičiu besisukančios sistemos d^e-q^e kintamuosius (žr. 4.3 pav.) [1].



4.3 pav. Stacionarioji *a-b-c* koordinačių sistema ir d^s-q^s sistema

Asinchroninio variklio netiesinės diferencialinės lygtys gali būti užrašomos prieš tai pateiktų dviejų tipų koordinačių sistemose. Remiantis 4.1 – 4.6 lygtimis sudaromas pavaros modelis. Vektorinis ryšys tarp šių sistemų pateiktas 4.4 pav.



4.4 pav. Vektorinis ryšys tarp skirtingų koordinačių sistemų [1]

4.4 pav. nurodomi pagrindiniai siejami parametrai:

d^e - q^e – sinchroniniu greičiu besisukančios ašys;

θ_e – fazinis kampas tarp fazinės koordinačių sistemos ir sistemos, kuri sukasi greičiu ω_e.

Į sinchroniškai besisukančias d^e – q^e ašis, stacionariųjų ašių d^s – q^s įtampos transformuojamos pagal toliau pateiktą bendrąją išraišką (4.18):

$$\begin{cases} u_{qs}^{e} = u_{qs}^{s}\cos\theta_{e} - u_{ds}^{s}\sin\theta_{e}; \\ u_{ds}^{e} = u_{qs}^{s}\sin\theta_{e} + u_{ds}^{s}\cos\theta_{e}. \end{cases} \quad (4.18)$$

čia: $u_{ds}^{s}, u_{qs}^{s}, u_{ds}^{e}, u_{qs}^{e}$ – įtampų dedamosios perskaičiuotoje fazinėje koordinačių sistemoje.

Pateiktoji išraiška (žr. 4.18) taip pat turi ir atvirkštinę transformaciją, t.y. yra galimybė transformuoti kintamuosius atgal į stacionariąją koordinačių sistemą.

4.5. Variklio modelio sudarymas sinchroniškai besisukančioje koordinačių sistemoje

Sinchroniškai besisukanti rotoriaus ir statoriaus atžvilgiu koordinačių sistema buvo pasiūlyta H. Krono, kuri juda sukamojo magnetinio lauko greičiu $d^e - q^e$.

1. <u>Sinchroninėje koordinačių sistemoje modelio koeficientų skaičiavimas.</u>

$$\begin{aligned} x_S &= x_m + x_s; \\ x_S &= 88,2 + 0,21 = 88,4\ \Omega; \end{aligned} \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned} x_r &= x_m + x_r; \\ x_r &= 88,2 + 3,12 = 91,3\ \Omega; \end{aligned} \quad (4.20)$$

$$\begin{aligned} \alpha_S &= \frac{R_s}{x_S}; \\ \alpha_S &= \frac{1,55}{88,4} = 0,018; \end{aligned} \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned} \alpha_r &= \frac{R_r}{x_r}; \\ \alpha_r &= \frac{1,04}{91,3} = 0,011; \end{aligned} \quad (4.22)$$

$$\begin{aligned} \sigma &= 1 - \frac{x_m^2}{x_r \cdot x_s}; \\ \sigma &= 1 - \frac{7779}{8070} = 0,036; \end{aligned} \quad (4.23)$$

$$\alpha_s^{/} = \frac{\alpha_s}{\sigma};$$
$$\alpha_s^{/} = \frac{0,018}{0,036} = 0,500; \tag{4.24}$$

$$\alpha_r^{/} = \frac{\alpha_r}{\sigma};$$
$$\alpha_r^{/} = \frac{0,011}{0,036} = 0,305; \tag{4.25}$$

$$K_s = \frac{x_m}{x_s} = \frac{88,2}{88,4} = 0,997; \tag{4.26}$$

$$K_r = \frac{x_m}{x_r} = \frac{88,2}{91,3} = 0,967; \tag{4.27}$$

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{3,14 \cdot 2890}{30} = 302 \text{ rad/s}; \tag{4.28}$$

$$\omega_{el} = \omega \cdot p = 302 \cdot 1 = 302 \text{ rad/s}; \tag{4.29}$$

$$\omega_{0el} = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ rad/s}. \tag{4.30}$$

čia: x_s – statoriaus apvijos pilnutinė induktyvioji varža;

x_r – rotoriaus apvijos pilnutinė redukuotoji induktyvioji varža;

α_s, α_r, α'_s, α'_r, K_r, K_s, σ – variklio diferencialinių lygčių koeficientai;

ω – variklio kampinis greitis;

ω_{0el} – variklio maitinimo įtampos kampinis dažnis.

Papildomos lygtys, kuriomis remiantis gaunamas srovės pereinamasis procesas:

$$\begin{cases} I_{X1} = \alpha_S^{/}(\Psi_{X1} - \Psi_{X1} \cdot K_R)\dfrac{U_1}{R_1}; \\ I_{Y1} = \alpha_S^{/}(\Psi_{Y1} - \Psi_{Y1} \cdot K_R)\dfrac{U_1}{R_1}; \end{cases} \tag{4.31}$$

$$I_A = I_{X1} \cdot \cos\omega_0 t - I_{Y1} \cdot \sin\omega_0 t. \tag{4.32}$$

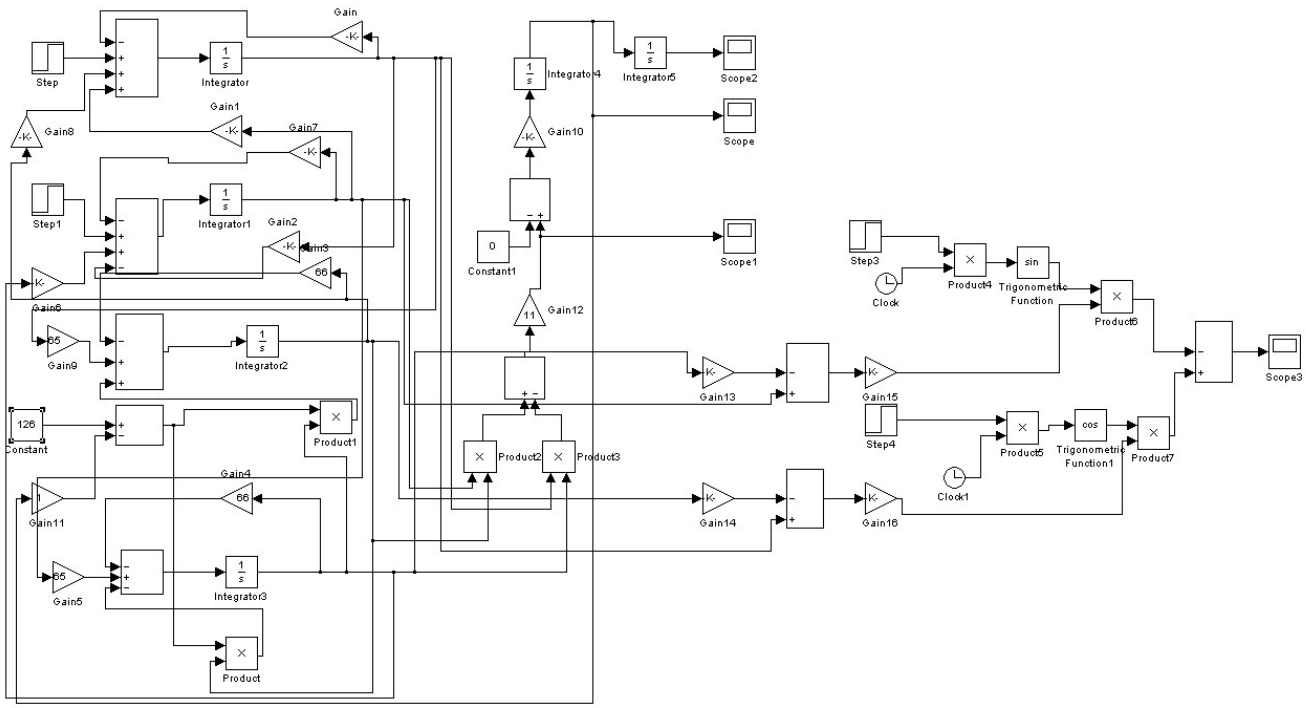
Apskaičiuojami pradiniai srovės pereinamojo proceso lygčių koeficientai, kai f = 50 Hz:

$$\alpha_s' \frac{U_1}{R_s} = 0,5 \cdot \frac{311}{1,55} = 100. \tag{4.33}$$

Apskaičiuojami kiti variklio diferencialinių lygčių koeficientai (4.34), kai maitinimo tinklo įtampos dažnis f = 50 Hz:

$$\begin{cases} U_1 = \sqrt{2} \cdot 220 = 311\,\text{V}; \\ \omega_{0el} = 2 \cdot 50 \cdot 3,14 = 314\ \text{rad/s}; \\ \omega_{0el} \cdot \alpha_S' = 314 \cdot 0,5 = 157; \\ \omega_{0el} \cdot \alpha_r' = 314 \cdot 0,305 = 95,8; \\ \omega_{0el} \cdot \alpha_S' \cdot K_r = 314 \cdot 0,5 \cdot 0,967 = 152; \\ \omega_{0el} \cdot \alpha_r' \cdot K_S = 314 \cdot 0,305 \cdot 0,997 = 95,5; \\ \dfrac{3 \cdot \omega_{0el} \cdot K_S}{2 \cdot \sigma \cdot x_S} = \dfrac{3 \cdot 314 \cdot 0,997}{2 \cdot 0,036 \cdot 88,4} = \dfrac{939}{6,36} = 148. \end{cases} \tag{4.34}$$

4.5 pav. pateikiamas *Matlab SIMULINK* programinio paketo aplinkoje sudarytas asinchroninio variklio kompiuterinis modelis sinchroniniu greičiu besisukančioje koordinačių sistemoje.



4.5 pav. Asinchroninio variklio modelis sinchroninėje koordinačių sistemoje

4.6. Variklio modelio sudarymas stacionariojoje koordinačių sistemoje

Šis modelis stacionarioje koordinačių sistemoje sudaromas tvirtai susietas su statoriumi. Pateikiamos pagrindinės variklio modelio sudarymui reikalingos lygtys stacionarioje d^s – q^s koordinačių sistemoje, kurios kartais yra vadinamos H. Krono lygtimis (4.35):

$$\begin{cases} u_{ds}^s = i_{ds}^s R_1 + \dfrac{d}{dt}\Psi_{ds}^s; \\ u_{qs}^s = i_{qs}^s R_1 + \dfrac{d}{dt}\Psi_{qs}^s; \\ 0 = i_{ds}^s R_2 + \dfrac{d}{dt}\Psi_{ds}^r + \omega\Psi_{qs}^r; \\ 0 = i_{qs}^s R_2 + \dfrac{d}{dt}\Psi_{qs}^r - \omega\Psi_{qs}^r; \end{cases} \tag{4.35}$$

čia: $u_{ds}^s; u_{qs}^s; u_{ds}^r; u_{qs}^r$ – statoriaus ir rotoriaus įtampų projekcijos d^s, q^s ašyse ;

$i_{ds}^s; i_{qs}^s; i_{ds}^r; i_{qs}^r$ – statoriaus ir rotoriaus srovių projekcijos į d^s, q^s koordinačių sistemos ašis;

$R_s; R_r$ - statoriaus ir rotoriaus apvijų perskaičiuotos aktyviosios varžos;

$\Psi_{ds}^s; \Psi_{qs}^s; \Psi_{ds}^r; \Psi_{qs}^r$ - pilnutiniai statoriaus ir rotoriaus srautai į q^s ir d^s projekcijas.

Srovės išreiškiamos per variklio magnetinius srautus:

$$i_{ds}^r = \frac{1}{L_2^{"}}\left(\Psi_{ds}^r - k_1\Psi_{ds}^s\right); \tag{4.36}$$

$$i_{qs}^r = \frac{1}{L_2^{"}}\left(\Psi_{qs}^r - k_1\Psi_{qs}^s\right); \tag{4.37}$$

$$\Psi_{ds}^s = i_{ds}^s L_1 + i_{ds}^r L_m; \tag{4.38}$$

$$\Psi_{qs}^s = i_{qs}^s L_1 + i_{qs}^r L_m. \tag{4.39}$$

Išreiškus statoriaus sroves nejudančioje koordinačių sistemoje ir perrašius rotoriaus srovių dedamąsias, gaunamos tokios srovių išraiškos:

$$i_{ds}^s = \left(\frac{1}{L_1} + \frac{L_m k_1}{L_1 L_2^{"}}\right)\Psi_{ds}^s - \frac{L_m}{L_1 L_2^{"}}\Psi_{ds}^r; \tag{4.40}$$

$$i_{qs}^s = \left(\frac{1}{L_1} + \frac{L_m k_1}{L_1 L_2^{"}}\right)\Psi_{qs}^s - \frac{L_m}{L_1 L_2^{"}}\Psi_{qs}^r; \tag{4.41}$$

Išreikštos srovės (4.40 – 4.41) surašomos į variklio įtampų balanso lygtis 4.35, ir gaunama ši įtampų lygčių sistema:

$$\begin{cases} u_{ds}^{s} = R_1\left[\left(\frac{1}{L_s}+\frac{L_m k_1}{L_s L_2^{''}}\right)\Psi_{ds}^{s}-\frac{L_m}{L_s L_2^{''}}\Psi_{ds}^{r}\right]+\frac{d}{dt}\Psi_{ds}^{s}; \\ u_{qs}^{s} = R_1\left[\left(\frac{1}{L_s}+\frac{L_m k_1}{L_s L_2^{''}}\right)\Psi_{qs}^{s}-\frac{L_m}{L_s L_2^{''}}\Psi_{ds}^{r}\right]+\frac{d}{dt}\Psi_{ds}^{s}; \\ u_{ds}^{s} = R_2\left[\frac{1}{L_R}\left(\Psi_{ds}^{r}-k_1\Psi_{ds}^{s}\right)\right]+\frac{d}{dt}\Psi_{ds}^{r}+\omega_r\Psi_{qs}^{s}; \\ u_{qs}^{s} = R_2\left[\frac{1}{L_R}\left(\Psi_{qs}^{r}-k_1\Psi_{qs}^{s}\right)\right]+\frac{d}{dt}\Psi_{qs}^{r}-\omega_r\Psi_{qs}^{s}; \end{cases} \tag{4.42}$$

Apskaičiuojami variklio apvijų induktyvumai:

$$L_{LS} = \frac{X_s}{2\cdot\pi\cdot f} = \frac{1,42}{314} = 0,005 \text{ H}; \tag{4.43}$$

$$L_{LR} = \frac{X_r}{2\cdot\pi\cdot f} = \frac{3,13}{314} = 0,01 \text{ H}; \tag{4.44}$$

$$L_m = 317\,\text{mH}; \tag{4.45}$$

$$L_s = L_m + L_{LS} = 0,317 + 0,005 = 0,322 \text{ H}; \tag{4.46}$$

$$L_r^{'} = L_m + L_{LR} = 0,317 + 0,01 = 0,327 \text{ H}; \tag{4.47}$$

$$L_r^{''} = L_{LR} + L_{LS} = 0,005 + 0,01 = 0,015 \text{ H}. \tag{4.48}$$

čia: L_{LS} – statoriaus sklaidos induktyvumas;

L_{LR} – rotoriaus sklaidos induktyvumas;

L_m – abipusis induktyvumas;

L_{LR} – rotoriaus sklaidos induktyvumas;

$L_s; L_r^{'}$ – statoriaus ir rotoriaus pilnutiniai induktyvumai;

$L_2^{''}$ – pilnutinis variklio sklaidos induktyvumas.

Koeficientai, reikalingi variklio modeliui sudaryti apskaičiuojami pagal šias išraiškas:

$$k_1 = \frac{L_m}{L_s} = \frac{0,317}{0,322} = 0,984; \tag{4.49}$$

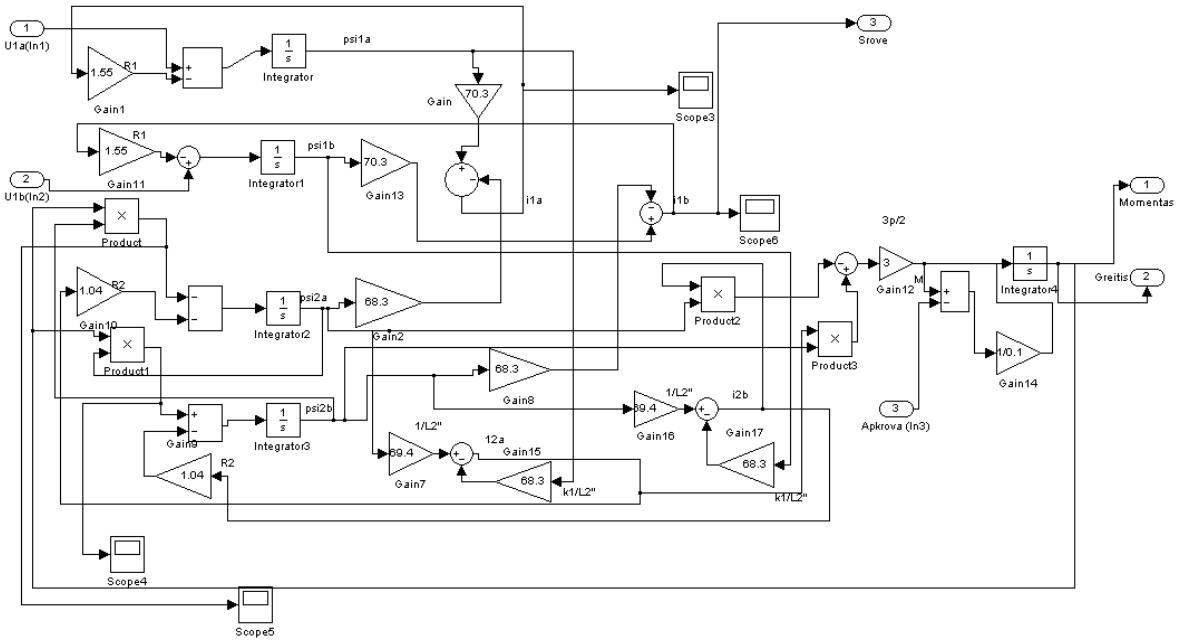
$$\frac{1}{L_s} + \frac{L_m \cdot k_1}{L_s \cdot L_r''} = 3,11 + \frac{0,312}{0,005} = 65,5; \tag{4.50}$$

$$\frac{L_m}{L_s \cdot L_r''} = \frac{0,317}{0,005} = 63,4; \tag{4.51}$$

$$\frac{1}{L_r''} = \frac{1}{0,015} = 66,7; \tag{4.52}$$

$$\frac{k_1}{L_r''} = \frac{0,984}{0,015} = 65,6. \tag{4.53}$$

Toliau šie duomenys įrašomi į variklio modelio atitinkamus blokus. Sudarytas 4 kW variklio kompiuterinis modelis stacionarioje koordinačių sistemoje pateiktas 4.6 pav.



4.6 pav. 4 kW asinchroninio variklio kompiuterinis modelis

Sudarytas variklio kompiuterinis modelis (žr. 4.6 pav.) darbe naudojamas dažninės pavaros kompiuteriniame modelyje, kaip valdomasis objektas.

4.7. Uždarosios skaliarinio valdymo sistemos su reguliatoriais

Uždarosios sistemos apibrėžimas siejamas su pasirinkto parametro palaikymu visame nusistovėjusiame režime. Šiame skyriuje atlikta dažniausiai taikomų reguliatorių dažninėms pavaroms trumpa teorinė apžvalga.

Asinchroninio variklio valdymo problema visais laikais buvo plačiai tiriama, siekiant optimizuoti pavarą, atsižvelgiant į sistemai keliamus reikalavimus ir kitus kokybės rodiklius.

Įtampa, srovė ir dažnis yra pagrindiniai asinchroninio variklio valdymo kintamieji. Yra naudojama daugybė metodų, siekiant pagerinti asinchroninio variklio valdymo efektyvumą. Trifazis asinchroninis variklis yra tipinis elektros įrenginys, kurio reguliavimui ir (arba) valdymui dažnai yra naudojami įprastiniai *PID* reguliatoriai. Pastarieji pasižymi paprasta struktūra, nedidele kaina ir labai dideliu efektyvumu taikant juos tiesinėse sistemose. Šių įprastinių reguliatorių naudojimas yra dažnai pakankamas, kai netiesiniai procesai yra nesudėtingi ir sistema veikia esant nedidelėms nuokrypoms. Modelio pagrindu pagrįsta netiesinio valdymo technika gali būti naudojama, kai reikalaujama aukštos kokybės charakteristikų, esant įvairioms veikimo sąlygoms. Tačiau šiems metodams yra svarbu turėti tikslų modelį Paprastesnė alternatyva, tačiau su tam tikrais kokybės rodiklių nuostoliais – tiesinių reguliatorių su koeficientų atsitiktiniu parinkimu arba numatymu (angl. *Gain scheduling*), naudojimas [32].

Pagrindinė sąlyga, parenkant reguliatorių valdymo sistemai (-oms) – reguliavimo kokybė, lemianti technologinio režimo tikslumą, kurį palaiko įvairūs automatikos įtaisai, o kartais ir ekonominis efektyvumas. Reguliatoriaus parinkimas suprantamas kaip reguliavimo dėsnio ir atitinkamo reguliatoriaus tipo parinkimas. Reguliatorius kontroliuoja kiekvieną sistemos operaciją, ir priima atitinkamus sprendimus. Vertinant valdymo sistemos požiūriu, jis suteikia sistemai stabilumo, esant sutrikimamas ar nuokrypiams, ir taip apsaugo nuo tolesnės žalos įrangai. Tai gali būti aparatinis reguliatorius arba programinė įranga bei abiejų derinys.

Kad reguliavimo procesas įgautų pageidaujamą pobūdį, būtina užtikrinti atitinkamas reguliavimo sistemos dinamines savybes. Kadangi reguliuojamo objekto dinaminių savybių neįmanoma keisti, tai norimą reguliavimo kokybę galima pasiekti tik parenkant tinkamą reguliavimo algoritmą.

Skaliarinis valdymo būdas dažninėms pavaroms, skirtingai nei vektorinis valdymas, yra ypač paprastai realizuojamas, tačiau duoda prastesnes charakteristikas. Šis valdymo metodas riboja greičio tikslumą, ypač mažo greičio diapazone bei duodą prastą elektromagnetinio momento dinaminę reakciją. Kadangi asinchroninis variklis yra sudėtinga netiesinė sistema, todėl laike kintantys parametrai sukelia papildomų sunkumų projektuojant reguliatorių [32].

Pradžioje yra svarbu nustatyti kokiai grupei turi priklausyti parenkamas reguliatorius. Tai galima padaryti aproksimuojant reguliavimo objektą aperiodine grandimi su vėlinimu, turint T_a ir τ_a laiko pastoviąsias [36].

- Kai $\frac{\tau_a}{T_a} \le 0,2$ – parenkamas relinio veikimo reguliatorius;
- Kai $0,2 < \frac{\tau_a}{T_a} \le 1$ – parenkamas tolydžiojo veikimo reguliatorius;
- Kai $\frac{\tau_a}{T_a} > 1$ – parenkamas impulsinio veikimo reguliatorius.

čia: τ_a – objektą aproksimuojančios perdavimo funkcijos vėlavimas;
T_a – laiko pastovioji.

Toliau galima parinkti reguliavimo dėsnį. Dvipoziciniai reguliatoriai (padėtis: įjungta / išjungta) parenkami tuomet, kai objektui būdingas mažas vėlinimas, retai kintanti arba pastovi apkrova.

4.7.1. Neraiškioji logika

Pastaruoju metu sparčiai populiarėja neraiškiosios logikos (angl. *Fuzzy logic*) valdymo sistemos inžineriniuose taikymuose – sprendimuose. Per pastaruosius keletą metų neraiškioji logika išpopuliarėjo daugelyje variklių valdymo sričių dėl jų netiesinių signalų apdorojimo savybių nepriklausomai nuo valdomo objekto. Pramoninių valdymo sistemų kūrimas ir įgyvendinimas dažnai remiasi kiekybiniais gamybos matematiniais modeliais (pvz.: kintamosios srovės varikliai, generatoriai, nuolatinės srovės mašinos, valdikliai ir t.t.). Tačiau kartais yra susiduriama su problemomis, dėl kurių reguliatorių projektavimas tampa labai brangus ir sudėtingas. Tokiais atvejais dažnai būtina išlaikyti gamyboje ar technologiniuose procesuose specialistus ar operatorius su patirtimi ir atrasti taisykles, reglamentuojančias automatinio valdymo veiksmus.

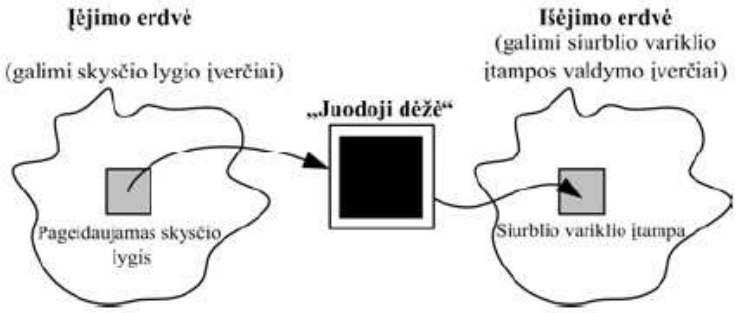
Pastaruoju metu pastebimas vis didėjantis susidomėjimas dirbtinio intelekto įrankių susijungimu su klasikinio valdymo metodais. Pagrindinės motyvacijos tokių hibridų / kombinacijų įgyvendinimui yra tai, kad naudojantis neraiškiąja logika, neuroniniais tinklais ir neapdorotais rinkinių klausimais, pavyzdžiui, neapibrėžti arba nežinomi gamybos parametrai ir struktūros – visa tai galima spręsti daug efektyviau ir taip didinti valdymo sistemos patikimumą. Tradiciniame valdyme yra gerai žinomas teorinės dalies stabilumas, kuris užtikrina, kad bus pasiekti skirtingi projektavimo tikslai, pvz., gauti tinkami nusistovėjusieji režimai ir pereinamosios charakteristikos uždarose valdymo sistemose [32].

Pagrindiniai tiesinių valdymo metodų trūkumai yra sistemos jautrumas parametrų kitimui, išorinims trikdžiams ir apkrovų pokyčiams. Siekiant išspręsti šiuos trūkumus bei kitas problemas, susijusias su reguliatoriaus projektavimu, yra galimybė naudoti *Takagi-Sugeno* neraiškiosios logikos valdymo schemą, skirtą asinchroninių variklių greičio reguliavimui [32, 34].

Neraiškioji logika apibendrina klasikinę loginių aibių teoriją. Neraiškioji logika – tai išplėstoji klasikinė aibė. Jei *X* yra įėjimo erdvė, o *x* – tos erdvės elementai, tai *fuzzy* aibė *A* erdvėje *X* [35]:

$$A = \{x, \mu_A(x) x \varepsilon X\}. \tag{4.54}$$

Objekto priklausomybės laipsnis aibėje nėra apibrėžtas sveikaisiais skaičiais 0 (objektas aibei nepriklauso) ir 1 (objektas aibei priklauso), bet gali būti bet kuris skaičius iš intervalo [0,1]. Neraiškiosios logikos sistemas (angl. sutr. FLS) apibūdina aibės (angl. *fuzzy sets*) ir ryšiai (angl. *fuzzy relations*). Tai taisyklėmis pagrįstos sistemos, naudojamos netiesiniam ryšiui tarp sistemos įvesties ir išvesties erdvių (žr. 4.2.1 pav.). Vienas svarbiausių analizuojamos logikos elementų yra lingvistiniai kintamieji, kurie yra sudaromi iš viena kitą dengiančių aibių, fizikine prasme apibūdinančių tą kintamąjį. Tarp įėjimo ir išėjimo erdvių yra vadinamoji „juodoji dėžė“, kurioje ir sprendžiama problema. „Juodojoje dėžėje“ gali būti ir neraiškiosios logikos, tiesinės, ekspertinės sistemos, neuroniniai tinklai, diferencialinės lygtys, daugiamatės lentelės ir kt. [35]. Neraiškiosios logikos tipinė sistema pavaizduota 4.7.1 pav.



4.7.1 pav. Neraiškiosios logikos sistema

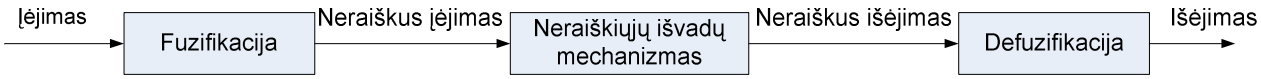
Lingvistiniai kintamieji apibrėžiami natūralioje kalboje kaip sakiniai (pvz., didelis arba mažas), kurie gali būti išreiškiami neraiškiaisiais rinkiniais (arba kitaip – aibėmis). Rinkinys yra tiksliai žinomo rinkinio išplėtimas, kur elementas gali pilnai priklausyti rinkiniui (angl. *full membership*) arba visai jam nepriklausyti (angl. *no membership*). Rinkiniai leidžiami dalinėmis narystėmis, o tai reiškia, jog elementas priklauso dalinai daugiau nei vienam rinkiniui [32].

Naudojami šie pagrindiniai neraiškiosios logikos algoritmai:

1. *Takagi-Sugeno* valdymo schema: pagrindinis privalumas – suderinamums su kitomis valdymo sistemomis, skirtomis kontroliuoti asinchroninio variklio greitį, pagerinti dinamines charakteristikas bei išlaikyti aukštą stabilumą.
2. *Mamdami*.

4.7.2. Neraiškiosios logikos reguliatorius ir jo struktūra

Vienas iš privalumų šio tipo reguliatoriaus – nėra jautrus parametrų pokyčiams ir pasižymi dideliu patikimumu [32, 34]. Šis reguliatorius tinka valdomiems objektams, kurių charakteristikos, pavyzdžiui, gali būti tokios: didelis vėlinimas, didelis inertiškumas, netiesiškumas. Neraiškiosios logikos *SISO* (iš angl. Single input single output) struktūra pateikta 4.7.2 pav.



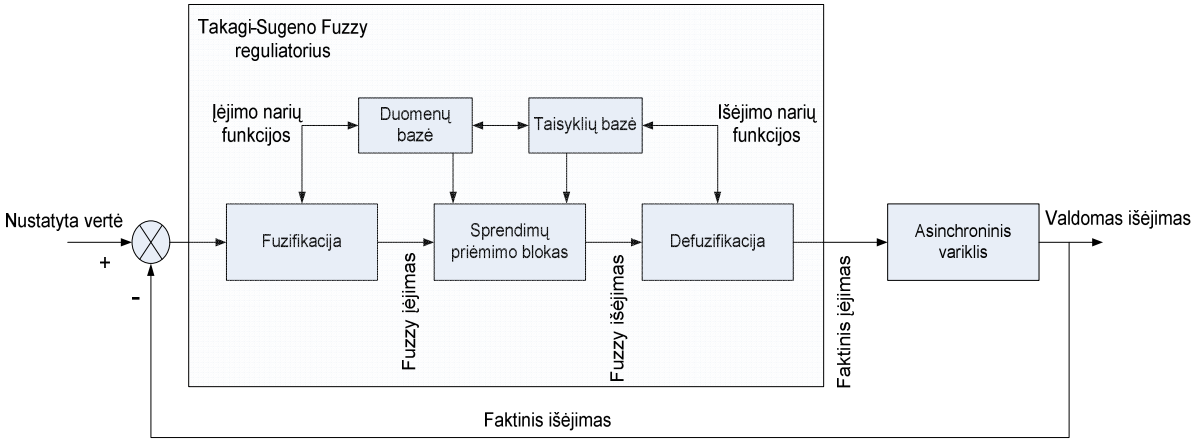
4.7.2 pav. Neraiškiosios logikos *SISO* struktūra

Reguliatorių sudaro šios pagrindinės dalys:

- **Fuzifikacija –** (angl. fuzzification) reguliatoriaus įėjimo signalus pakeičiamas taip, kad loginių išvadų mechanizmas galėtų suaktyvinti ir pritaikyti logines taisykles. Faktiniai kintamieji, greičio/nuostato paklaida ir paklaidos pokytis keičiami į neraiškiosios logikos kintamuosius arba lingvistinius kintamuosius
- **Taisyklių bazė** (angl. rules base) yra „jei..., tuomet.., tada...“ (angl. *If...–Then..–Else...)* taisyklių rinkinys. Taisyklės pagrįstos ekspertų patarimais, kaip tinkamai valdyti sistemą.
- **Sprendimų priėmimo blokas – loginių išvadų mechanizmas** (angl. Inference mechanism) išrenka, kurios taisyklės yra tinkamiausios, ir jas pritaiko. Tai neraiškiosios logikos branduolys.
- **Defuzifikacija –** (angl. Defuzzification interface) keičia logines komandas į valdomojo proceso įėjimo signalą per inverterį. Jei yra kokių nors kontroliuojamo išėjimo nuokrypių, grįžtamojo ryšio signalas yra lyginamas su nustatyta verte, ir tuo būdu generuojamas paklaidos signalas, kuris toliau paduodamas *Fuzzy* reguliatoriui. Šis išėjime suformuoja normalią vertę, tokiu būdu išlaikant sistemos stabilumą.

Pagrindinis privalumas, taikant neraiškiąją logiką – galimybė valdyti sudėtingas sistemas, panaudojant žmogiškąją patirtį ir protą bei kitu atveju, nedalyvaujant žmogui. Šios logikos reguliatoriaus modelis yra panašus į kitus tradicinių reguliatorių modelius, tačiau išsiskiria iš visų kitų savo įvesties ir išvesties parametrų aprašymo struktūra, taip pat ir įėjimų transformavimo į

išėjimus (sprendimų priėmimo) procesu. 4.7.3 pav. pateikta objekto valdymo sistema su neraiškiosios logikos reguliatoriaus architektūra.



4.7.3 pav. Objekto valdymo sistema su nereaiškiosios logikos architektūra

Įvesties signalai fuzifikuojami, naudojant neraiškiosios logikos rinkinius, kurie toliau paduodami į reguliatorių. Sprendimų priėmimo blokas dažnai atvaizduojamas lentelės forma, kurioje aprašomos reguliavimo taisyklės.

Variklio greičio reguliavimui neraiškiosios logikos reguliatoriaus įėjime atsiranda paklaida, kuri apibrėžiama (4.55) išraiška:

$$\begin{aligned} e(k) &= \omega_{nust} - \omega_f; \\ \Delta e(k) &= e(k) - e(k-1); \end{aligned} \tag{4.55}$$

čia: ω_{nust} – nustatytas greitis;

ω_f – faktinis rotoriaus greitis;

$e(k)$ – paklaida.

4.7.3. Intelektualus kombinuotas „*Fuzzy-PID*“ reguliatorius

Įvairių kombinacijų diskretaus laiko *FPID* (angl. *Fuzzy – PID*) reguliatoriai yra naujas neraiškiosios logikos variantas su įprastiniu *PID* reguliatoriumi. Šio tipo reguliatorių struktūra yra taip pat tiesinio pobūdžio, lyginant su *PID* [32].

Fuzzy-PID reguliatoriai užtikrina įprastų reguliatorių paprastą tiesinę struktūrą, padidina galimybes netiesiškumo sureguliavimui. Yra siūlomas *“pseudo-on-line”* metodas (angl. sutr. *GFPID*), kuriuo naudojantis yra atliekamas valdiklio parametrų automatinis sureguliavimas pagal

genetinį algoritmą ir neraiškiosios logikos (angl. *fuzzy*) grupavimo techniką, skirtą sistemų optimizavimui.

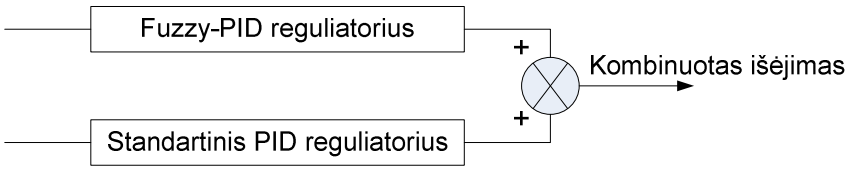
Šis metodas dažnai taikomas valdomų arba reguliuojamų asinchroninių pavarų *Fuzzy-PID* reguliatoriams. *GFPID* metodas taikomas variklio sukimosi greičio reguliavimui. Valdymas gali būti atliekamas interaktyviai arba realiuoju laiku [32].

4.7.4. „*Fuzzy-PID*" reguliatoriaus klasifikacija ir bendroji struktūra

Fuzzy-PID reguliatoriai klasifikuojami į tris pagrindines kategorijas:

- Tiesioginių veiksmų tipas;
- Apytikslio koeficiento nustatymo tipas;
- Kombinuoto tipo reguliatorius [33].

Intelektualaus kombinuoto *Fuzzy-PID* reguliatoriaus blokinė schema pateikiama 4.7.4 pav.



4.7.4 pav. Kombinuoto *Fuzzy-PID* reguliatoriaus blokinė schema

Kombinuotas reguliatorius sudarytas iš dviejų dalių:

- Standartinis *PID* reguliatorius;
- *Fuzzy-PID* reguliatorius[33].

4.7.5. PID reguliatorius

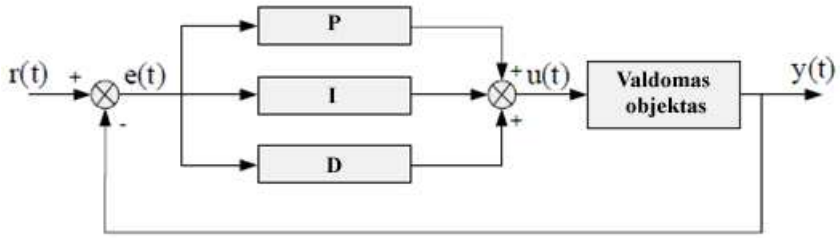
PID (proporcinis-integralinis-diferencialinis) reguliatorius plačiausiai naudojamas pavarų reguliavimo sistemose, pasirinktų parametrų nuokrypio koregavimui. Daugiau nei 90% pramoninių reguliatorių realizuoti *PID* algoritmo pagrindu. Pagrindiniai šio tipo reguliatoriaus privalumai: paprasta struktūra, valdymo principas lengvai suprantamas, praktiškas, lengvai realizuojamas. Kadangi trys PID reguliatoriaus dedamosios ir jų funkcionalumas yra labai aiškūs, jie gali būti sureguliuoti taip efektyviai, jog atsiranda galimybė gauti pageidaujamą pereinamąjį procesą ir nusistovėjusius režimus [34]. Elektros pavarų sistemos yra sutinkamos daugelyje sričių, kurios dažnai įtakoja bendros sistemos charakteristikas ir veikimą. Paprastai yra sudėtinga gauti tikslų

elektros pavarų matematinį modelį. Esant šioms savybėms, elektros pavarų kontrolė tampa ypač sudėtinga. Todėl šis reguliatorius parenkamas, kai objektui būdingas didelis vėlinimas, dideli ir staigūs apkrovos pokyčiai, kai be didelio sistemos valdymo tikslumo dar reikia pasiekti ir didelį uždarosios sistemos reakcijos greitaeigiškumą.

Yra žinoma, jog *PID* reguliatorių sudaro trys dedamosios (reguliatoriai):

- ***P* reguliatoriai** – parenkami tuomet, kai objektui būdingas nedidelis vėlinimas ir apkrova kinta nežymiai. Jei apkrova labai svyruoja, gaunama didelė statinė paklaida.
- ***I* reguliatoriai** – naudojami tik su statiniais objektais, kuriems būdingas nedidelis vėlinimas, lėtai kintanti apkrova.
- ***D* reguliatoriai** – naudojami tuomet, kai *P* reguliatorius negali užtikrinti reikiamo sistemos valdymo tikslumo, kai objektui būdingas bet koks vėlinimas, tačiau apkrova kinta lėtai.

PID reguliavimas paprastai taikomas analoginėse valdymo sistemose. Tai tiesinio valdymo metodas. Tačiau diskretaus pobūdžio sistemose priimta taikyti diskretųjį šio tipo reguliatorių. Tipinė *PID* reguliatoriaus struktūra pateikta 4.7.5 pav.



4.7.5 pav. PID reguliatoriaus tipinė struktūra

PID realizuojamas, remiantis šia matematine išraiška:

$$e(t) = r(t) - y(t)$$
$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t)dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4.56)$$

čia: $y(t)$ – sistemos išėjimas;

$r(t)$ – nuostato signalas;

$e(t)$ – paklaidos signalas tarp $y(t)$ ir $r(t)$;

$u(t)$ – *PID* reguliatoriaus išėjimas;

K_P – proporcinis koeficientas;

T_I – integravimo laiko pastovioji;

T_D – diferencijavimo laiko pastovioji.

Išraiška (4.54) perrašoma tokia forma:

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t)dt + K_D \frac{de(t)}{dt}. \qquad (4.57)$$

čia: K_P – proporcinis koeficientas;

K_I – integralinis koeficientas;

K_D – diferencialinis koeficientas;

T_I – integravimo laiko pastovioji;

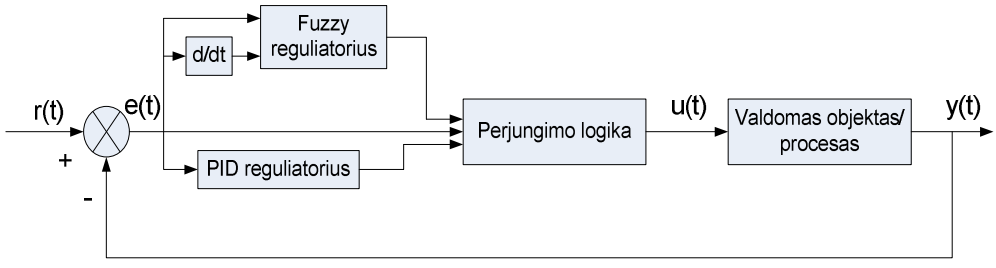
T_D – diferencijavimo laiko pastovioji.

Nors šių reguliatorių populiarumas išlieka elektros pavarų valdymo sistemose, vis dėlto jie negali nuolat palaikyti reikiamų aukštų pereinamojo proceso kokybės rodiklių. Siekiant išvengti šios problemos, reguliatoriaus parametrai (koeficientai) turi būti koreguojami dinamiškai priklausomai nuo sistemos būsenos viso proceso ir (arba) objekto valdymo metu [34].

4.7.6. *PID* reguliatoriaus tobulinimas. Susireguliuojantis "*Fuzzy-PID*" reguliatorius

Yra nemažai valdymo būdų, pvz., neraiškiosios logikos valdymas, neuroniniai tinklai ir ekspertinis valdymas, kurie gali būti skirti koeficientų koregavimui, priklausomai nuo skirtingų sistemos veikimo sąlygų [34].

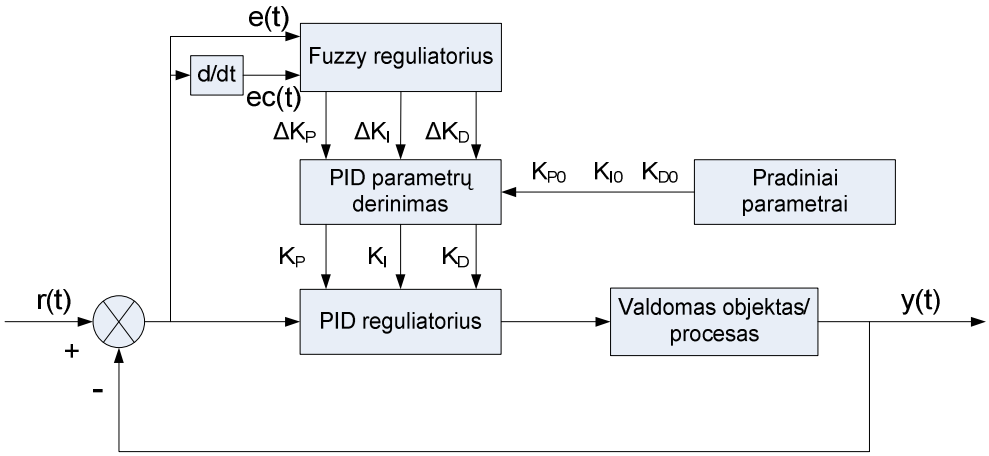
4.7.6 pav. pateikiama dažnai naudojama struktūra su *Fuzzy-PID* reguliatoriumi.



4.7.6 pav. Valdymo sistemos struktūra su *Fuzzy-PID* reguliatoriumi

Remiantis 4.7.6 pav. pateikta struktūra neraiškiosios logikos reguliatorius naudojamas pagreitinti dinaminę reakciją, esant didelei paklaidos vertei. *PID* reguliatorius čia skirtas užtikrinti aukštą sistemos tikslumą, kai paklaidos signalas yra mažas [34].

Detalesnė *Fuzzy-PID* reguliatoriaus struktūra pateikta 4.7.7 pav.



4.7.7 pav. *Fuzzy-PID* reguliatoriaus detalizuota struktūrinė schema

Pateiktoje 4.7.7 pav. detalizuotoje struktūroje *PID* reguliatorius dažnai vadinamas neraiškaus savaiminio suderinimo reguliatorius (angl. *fuzzy self-tuning PID controller – FPID*). Šiuo atveju neraiškiosios logikos reguliatorius (4.7.7. pav. – *Fuzzy* reguliatorius) skirtas *PID* reguliatoriaus parametrų suderinimui / parinkimui, priklausomai nuo pasirinktų reguliavimo sąlygų.

Pradžioje paklaidos signalas ir paklaidos pokyčio diferencialas yra įvedami į *Fuzzy* reguliatorių. Po gautų *fuzzy* išvadų (sprendimų priėmimo), taisyklių pagrindu, gaunamos išėjime *PID* reguliatoriaus parametrų skirtuminės vertės padalomis ΔK_P, ΔK_I ir ΔK_D, kurios toliau pridedamos prie pradinių *PID* parametrų K_{P0}, K_{I0} ir K_{D0} ir taip galutinai gaunami faktiniai (koreguoti) *PID* reguliatoriaus parametrai–koeficientai K_P, K_I, K_D. Pradinės vertės K_{P0}, K_{I0} ir K_{D0} gaunamos, panaudojant vieną iš prieš tai paminėtų valdymo būdų [34].

Apibendrinant atliktą reguliatorių teorinę analizę, galima padaryti preliminarią išvadą, kad praktiniam pritaikymui tinkamiausias yra *PID/PI* tipo reguliatorius. Todėl tiriamoji dažninė asinchroninė pavara uždaroje greičio reguliavimo struktūroje bus tiriama su šio tipo reguliatoriais.

5. TIRIAMOJI DALIS

5.1. Skaliarinio valdymo dažninių asinchroninių pavarų modelių sudarymas

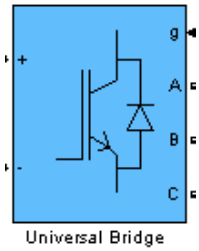
Naudojant *Matlab SIMULINK* programinį modeliavimo paketą, toliau sudaromi skaliariškai valdomos dažninės asinchroninės pavaros kompiuteriniai modeliai. Dalis naudojamų elementų standartiniai, t.y. paimti iš *SIMULINK* bibliotekos ir atitinkamai iš dalies pakoreguoti, siekiant nurodyto darbo tikslo. Skaliarinis valdymo metodas realizuojamas pastovaus variklio magnetinio srauto palaikymui – įtampos reguliavimo dėsnis, t.y. didinant arba mažinant statoriaus įtampos dažnį f (Hz), proporcingai turi būti keičiama statoriaus maitinimo įtampa U_s.

Dažniu valdomų pavarų modeliai tiriamojoje darbo dalyje sudaromi ir analizuojami, taikant šiuos, dažniausiai taikomus, IPM (angl. sutr. PWM) metodus:

1. Sinusinė impulsų pločio moduliacija – SIPM (angl. SPWM);
2. Erdvinio vektoriaus IPM (angl. SV PWM).

Pagal sudarytą 2.1 pav. bendrą dažninės pavaros struktūrą, atitinkamai ši struktūra detalizuojama toliau.

Parenkamas tipinis autonominis trifazis IGBT įtampos inverteris iš *SIMULINK* bibliotekos, kurio blokinė schema pateikta 5.2 pav.



5.2 pav. Autonominio įtampos inverterio modelis

- Toliau atliekamas sinusiniu IPM metodu valdomos pavaros modeliavimas:

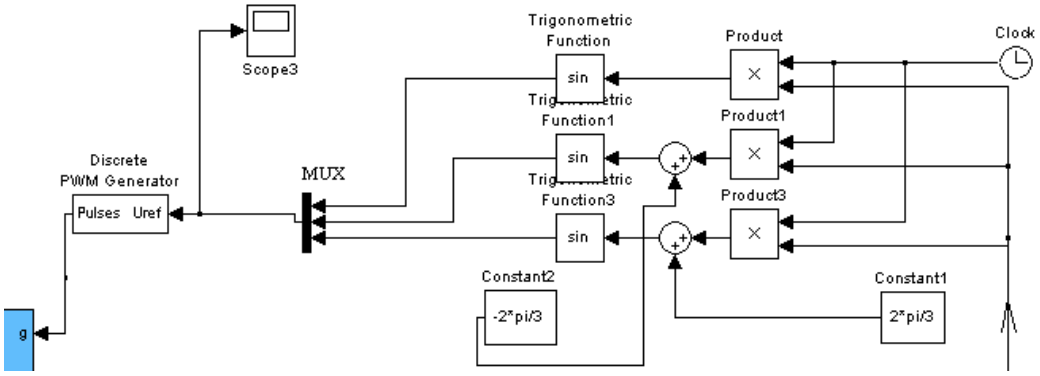
  Pradinėje modeliavimo stadijoje užrašomos sinusinės įtampų lygtys:

$$v_a^* = \sqrt{2}U_s \sin\theta_e;$$
$$v_b^* = \sqrt{2}U_s \sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3});$$
$$v_c^* = \sqrt{2}U_s \sin(\theta_e + \frac{2\pi}{3}).$$

Equation Section 5 (5.1)

čia: θ_e – generuojamo kampo signalas, gaunamas integruojant nuostato signalą ω_e.

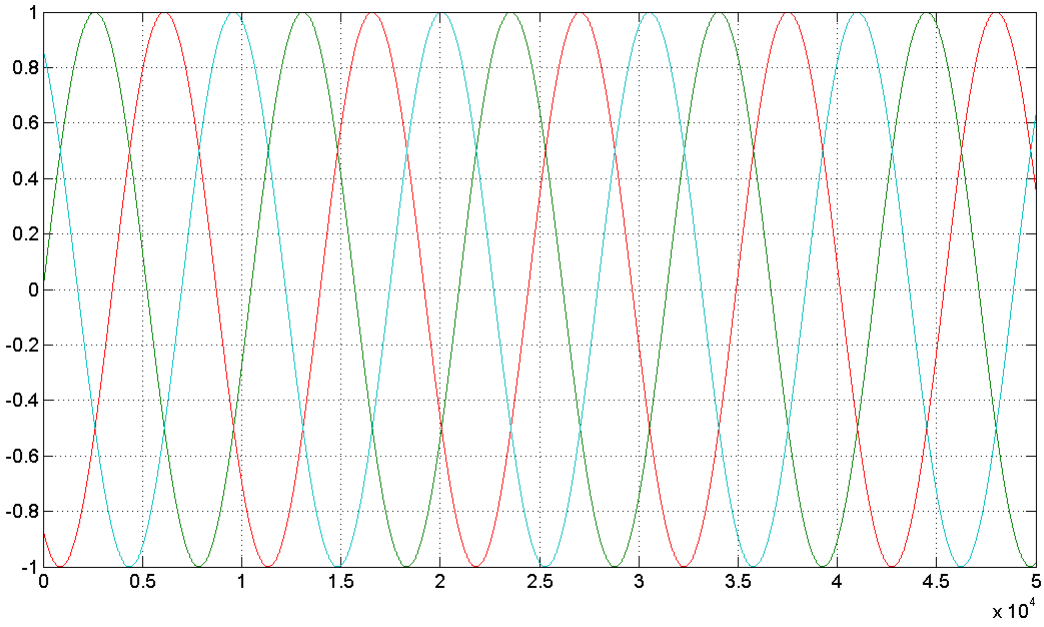
Remiantis aukščiau (3.1) pateiktomis sinusinėmis įtampų lygtimis toliau sudaromas kompiuterinis modelis:



5.3 pav. Sinusinių įtampų lygčių kompiuterinis modelis

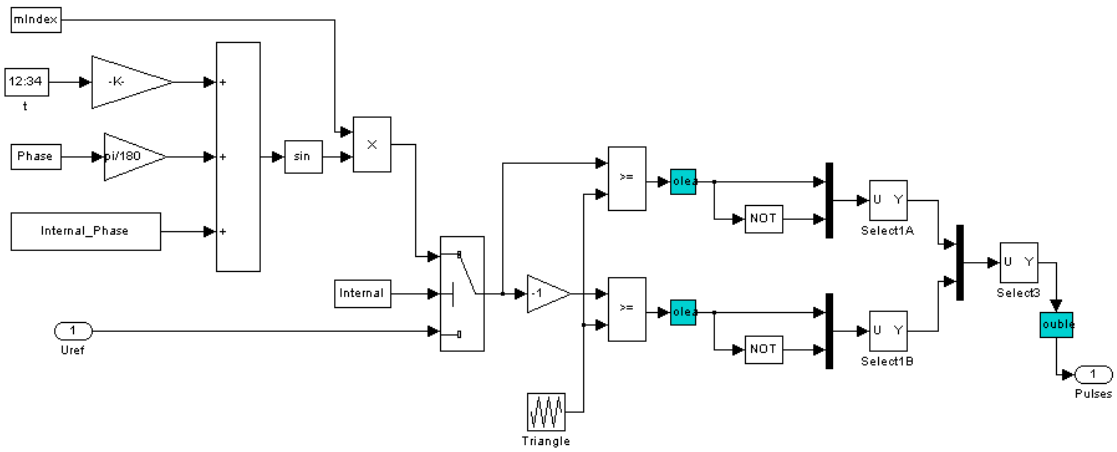
Multiplekseris (angl. multiplexer) – tai loginis įtaisas, kitaip dar vadinamas duomenų išrinkimo įtaisu (angl. data selector), kuris pagal *n* įėjimų signalų kiekį (šiuo atveju įėjimuose yra trys sinusinės įtampos) išėjime išrenka vieno įėjimo signalą arba apjungia visus įėjime esančius signalus.

5.4 pav. pateiktos suformuotos sinusinės įtampos, kur visos trys įtampos perslinktos 120˚ laipsnių (modelyje tai atitinka “Constant1” ir “Constant2” blokai ±2π/3) kampu viena kitos atžvilgiu.



5.4 pav. Sumodeliuotos sinusinės įtampos

Sinusinės įtampos paduodamos į multiplekserį *MUX,* kurio išėjimo signalas U_{ref} (greičio nuostatas) perduodamas į diskretųjį IPM generatorių (5.3 pav. modelyje atitinka *"Discrete PWM Generator"*), kurio vidinė struktūra pateikta 5.5 pav.



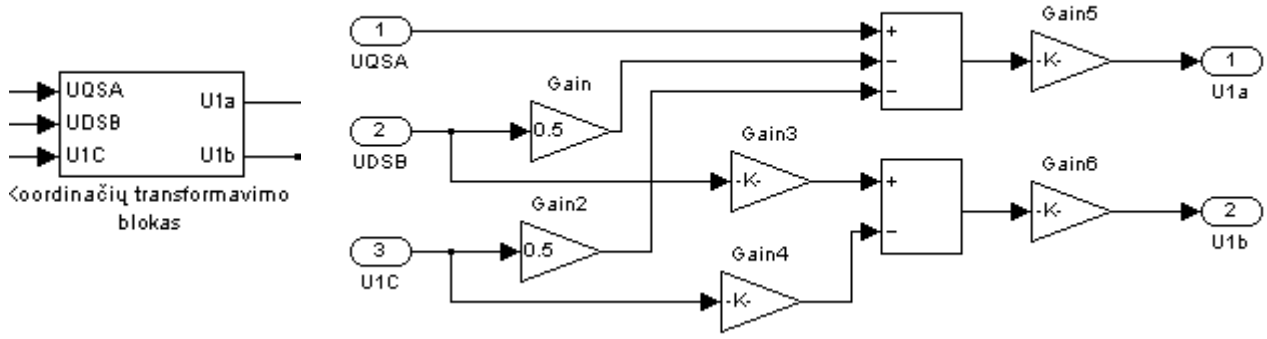
5.5 pav. Impulsų generatoriaus struktūra su SIPM

Suformuoti pagal sinusines įtampas impulsai siunčiami į autonominio inverterio įėjimą *"g",* kurio išėjime gaunamos sinusinės įtampos formos impulsai.

Variklio dinamikos analizei supaprastinti sudaromas koordinačių transformacijos modelis. Tam tikslui panaudojama Clark'o transformacija, t.y. sutapatinus α, β koordinačių sistemos realiąją ašį α su A fazės įtampos dedamąja, užrašoma tokia išraiška:

$$\begin{cases} u_{1\alpha} = \frac{2}{3}(u_{1A} - \frac{1}{2}\cdot u_{1B} - \frac{1}{2}\cdot u_{1C}); \\ u_{1\beta} = \frac{2}{3}(\frac{\sqrt{3}}{2}\cdot u_{1B} - \frac{\sqrt{3}}{2}\cdot u_{1C}). \end{cases} \quad (3.2)$$

Remiantis (3.2) lygtimis, sudarytas koordinačių transformavimo blokas ir jo detalesnė struktūra pateikta 5.6 pav.



a) b)

5.6 pav. Trifazės įtampos koordinačių sistemos keitimo į dvifazę blokas (a) ir vidinė jo struktūra (b)

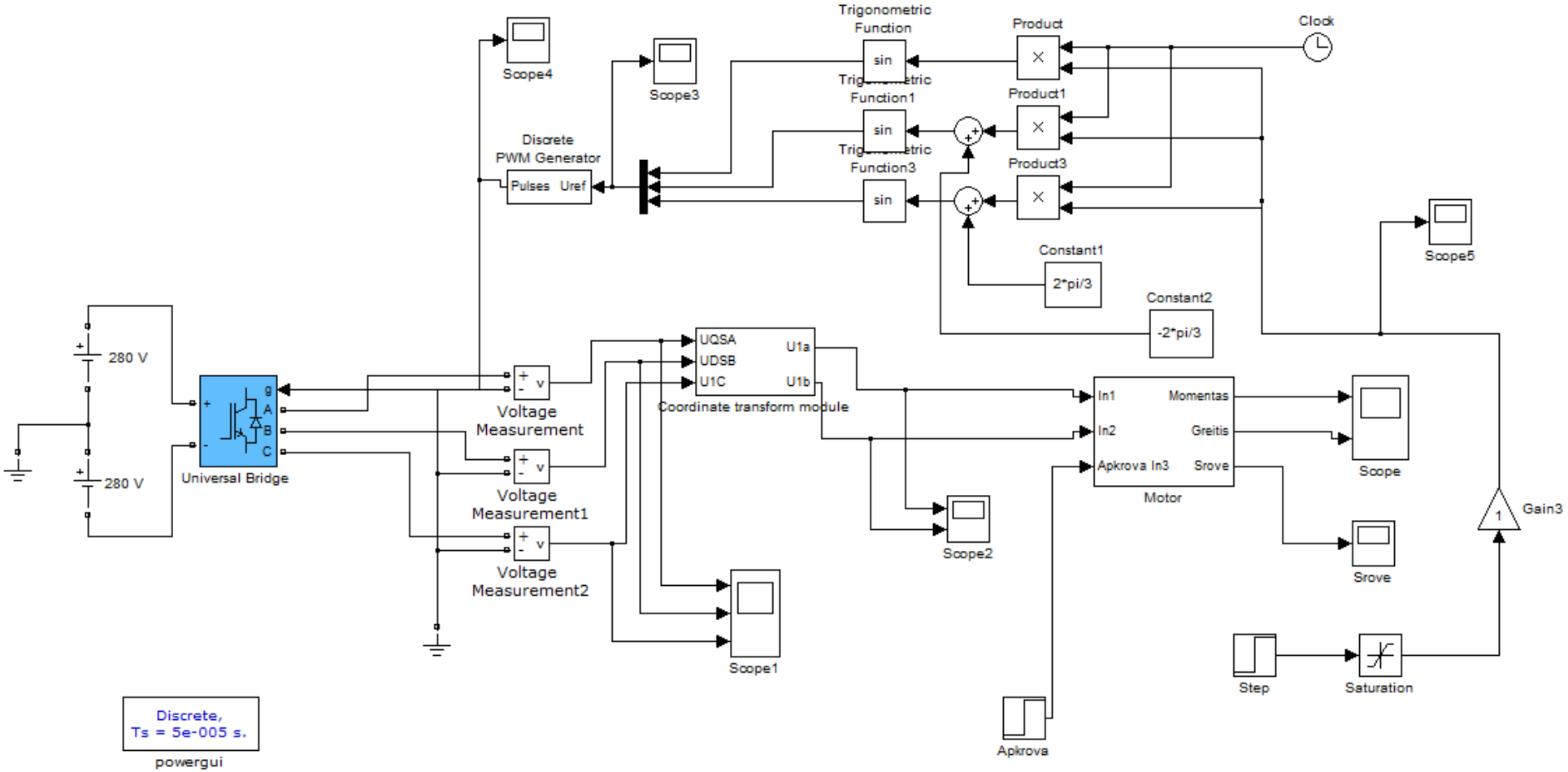
Kadangi koordinačių transformavimo bloko išėjime formuojamos dvi fazinės įtampos U1a ir U1b, todėl tam tikslui asinchroninio variklio modelio funkcinis blokas sudaromas su dviem įėjimais *In1*, *In2* (tai atitinka fazines įtampas *U1a* ir *U1b*). 5.7 pav. pateikiamas 4 kW trifazio asinchroninio variklio kompiuterinio modelio funkcinis blokas.



5.7 pav. 4 kW asinchroninio variklio kompiuterinio modelio blokas

Vienas funkcinio bloko įėjimas (*In3*) skirtas apkrovos prijungimui. Variklio kompiuterinio bloko išėjimai skirti gauti elektromagnetinio momento, veleno sukimosi greičio ir statoriaus srovės pereinamojo proceso charakteristikas.

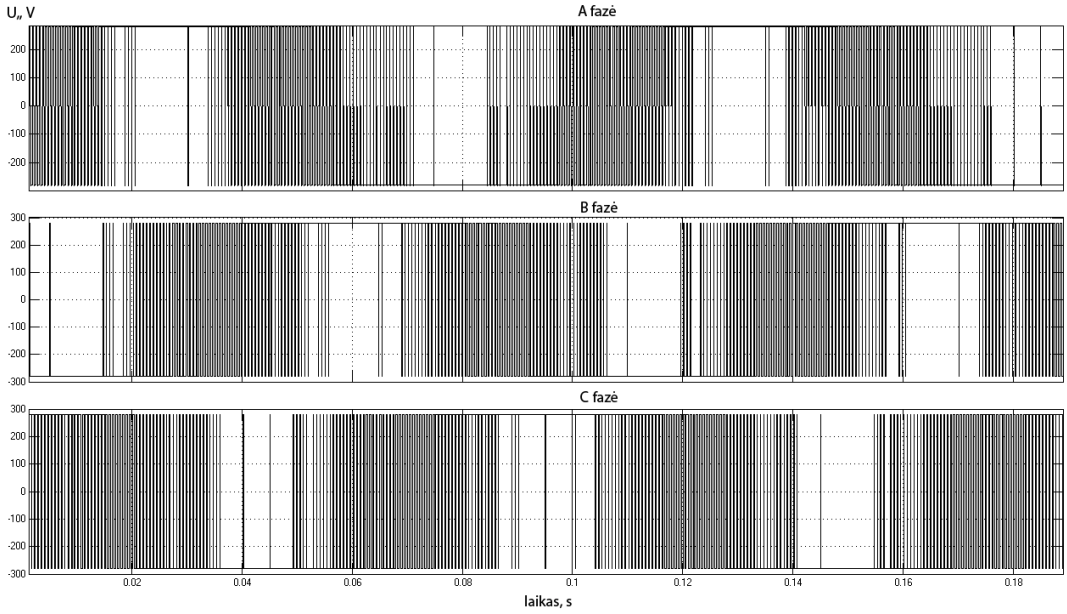
Matlab SIMULINK matematinio modeliavimo paketu sudarytas skaliarinio valdymo be greičio grįžtamojo ryšio dažninės asinchroninės pavaros modelis pateiktas 5.8 pav.



5.8 pav. Atvirosios skaliarinio valdymo dažninės asinchroninės pavaros kompiuterinis modelis

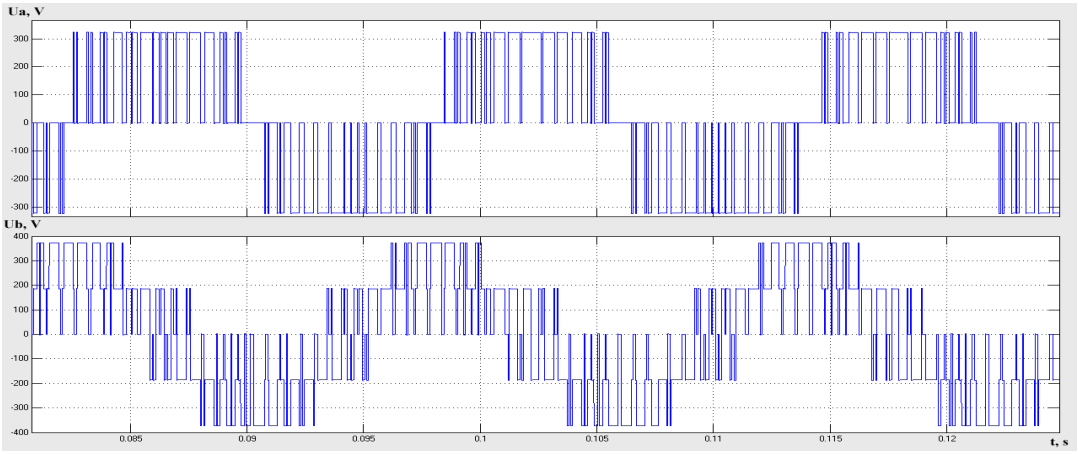
Iš 5.8 pav. matyti, jog naudojant sinusinę impulsų pločio moduliaciją, sudarytas sistemos modelis tiriamas kaip atviroji greičio reguliavimo sistema. Tai labai paprasta realizacija, kurioje nėra grįžtamojo ryšio ir reguliatoriaus, kuris skirtas greičio statinės paklaidos eliminavimui.

IGBT inverteryje suformuotos A, B, C fazių įtampos paduodamos į įtampos matavimui skirtus elementus (*V2*, *V4*, *V5*), kurie elektrinį signalą keičia tinkamais priimti koordinačių transformavimo blokui. Oscilografe *"Scope1"* gaunamos impulsinės inverterio išėjimo įtampos su skirtinga impulso pločio verte. Skirtingose fazėse formuojamos įtampos pateiktos 5.9 pav.



5.9 pav. IGBT inverterio A, B, C fazių išėjimo įtampos

Atlikus koordinačių pakeitimą iš trifazės į dvifazę sistemą, į variklio funkcinio bloko fazinių įtampų įėjimus *In1* ir *In2* paduodamos impulsinės įtampos, kai IPM diskrečiojo impulsų generatoriaus nešantysis dažnis (angl. *carrier frequency*) lygus 1060 Hz, parodytis 5.10 pav.

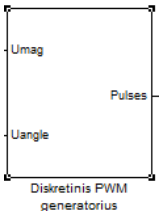


5.10 pav. Dvifazės sistemos impulsinės fazinės įtampos

5.1.1. Dažninės pavaros kompiuterinio modelio sudarymas su erdvinio vektoriaus impulsų pločio moduliacija

Modelio sudarymo tikslas – išanalizuoti erdvinio vektoriaus IPM metodą, taikytiną uždaroje dažninės pavaros greičio reguliavimo struktūroje. Erdvinio vektoriaus impulsų pločio moduliacijos principu valdomas IGBT inverteris išėjime formuoja trapecinės formos įtampas.

Diskretinių impulsų generavimas į trifazį inverterį realizuojamas 5.11 pav., pavaros valdymui pritaikant standartinį funkcinį bloką iš *SIMULINK* bibliotekos.



5.11 pav. Diskretusis erdvinio vektoriaus IPM generatorius

Pagrindiniai parametrai impulsų generavimui yra šie:

- Įėjimo atskaitos vektoriaus (U*) duomenų tipas: įtampos vektoriaus vertė (U_{mag} įėjimas) ir erdvinis kampas tarp vektorių (U_{angle} įėjimas). Vertė – moduliacijos indeksas „m“, kurio kitimo ribos galimos $0 \div 1$. Moduliacijos indeksas (koeficientas) apskaičiuojamas taip:

$$m = \frac{U_m}{U_T}. \tag{5.2}$$

čia: U_m – maksimali moduliuojančios įtampos vertė;

U_T – maksimali nešančiosios įtampos vertė.

- Pjūklinės įtampos dažnis 1060 Hz.

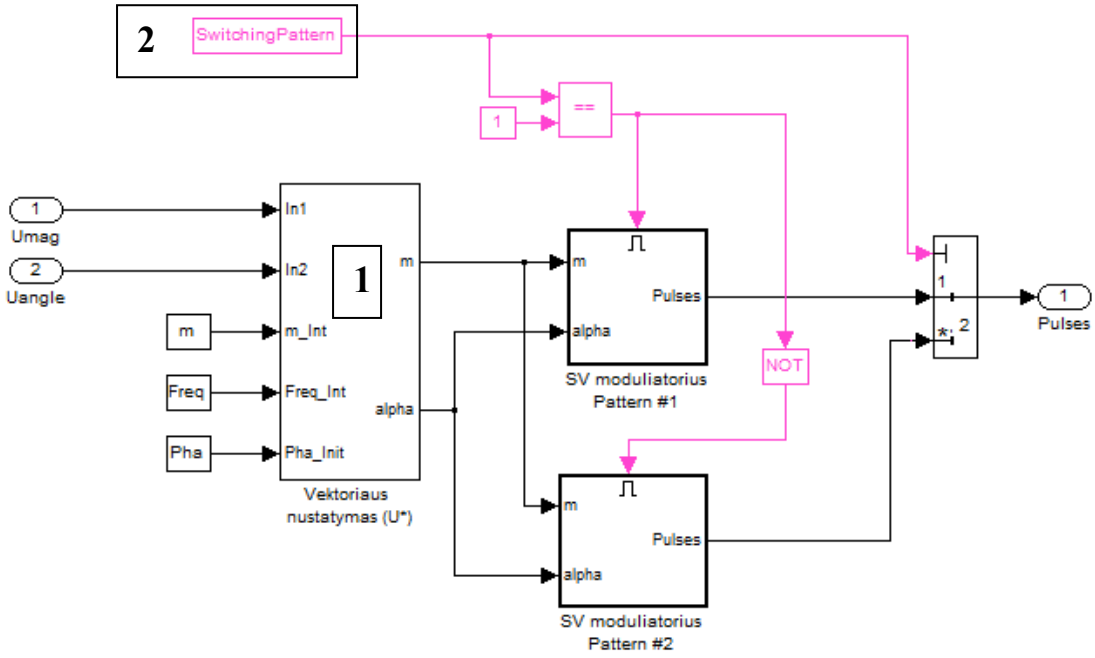
Linijinės įtampos vertė apskaičiuojama pagal išraišką (ši aritmetinė operacija atliekama IPM generatoriaus posistemėje (žr. 5.11 pav.)):

$$U_{lin} = \frac{m \cdot U_{DC}}{\sqrt{2}} \text{ V}. \tag{5.3}$$

5.11 pav. bloke suformuoti impulsai siunčiami šešiais taktais veikiančiam keitikliui (trifaziam inverteriui). Šiame modelyje pasirinktinai taikomi dviejų tipų simetriniai perjungimo būdai – struktūros:

- Pattern #1: apibrėžiamas kaip programinis realizavimas pagal „Texas Instruments“ gamintoją. Kiekvienas IPM kanalas perjungiamas du kartus per kiekvieną IPM periodą;
- Pattern #2: apibrėžiamas kaip techninės įrangos realizavimas pagal „Texas Instruments“ gamintoją. Šiuo atveju vienas IPM kanalas apibrėžiamas kaip nekintamas (konstanta) visame IPM periode. Lyginant su pirmuoju atveju (Pattern #1), šiuo būdu atliekamas mažesnis perjungimų skaičius. Todėl taikant šį būdą, sumažinami perjungimų nuostoliai.

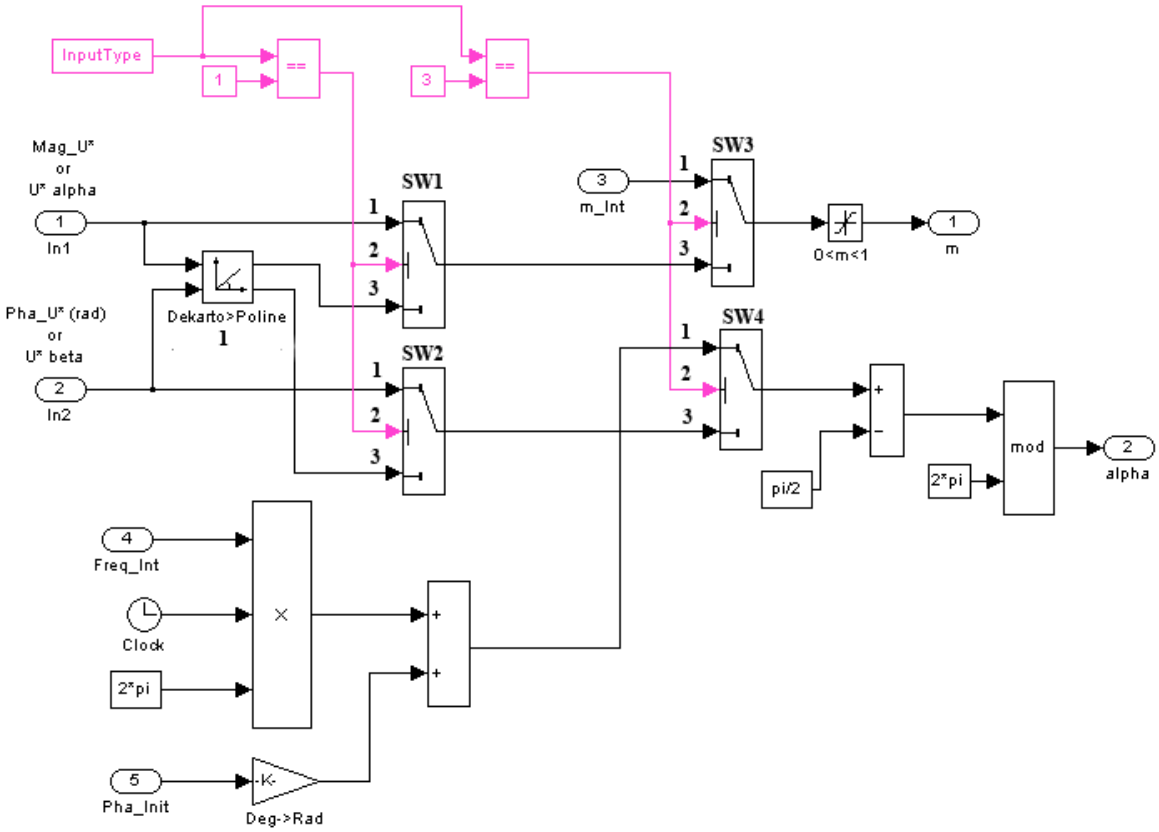
Impulsų generavimo funkcinis blokas pasižymi sudėtingais loginiais ryšiais tarp vidinių bloko elementų. Funkcinio bloko (žr. 5.8 pav.) sudėtinė struktūra ir funkciniai ryšiai tarp elementų pateikti 5.12 pav.



5.12 pav. Impulsų generatoriaus funkcinio bloko (pagal 5.8 pav.) vidinė struktūra

5.12 pav. raudona linija parodytas loginis impulsų moduliavimo būdų (*Pattern #1 ir Pattern #2),* perjungimas. Moduliavimo būdas nustatomas funkcinio bloko konfigūravimo lentelėje. Šie nustatymai perduodami **2-ajam** elementui (*SwitchingPattern*). Tolesniame etape atliekamas perjungimas pagal logines sąlygas, sudarytas iš trijų loginių elementų: 1, = =, NOT.

Įtampos vektoriaus nustatymas realizuojamas pagal 5.12 pav. pateiktą struktūrą. 5.13 pav. pateikiama funkcinio bloko (1) (žr. 5.12 pav.) detalizacija.



5.13 pav. Erdvinio įtampos vektoriaus nustatymo struktūrinė schema

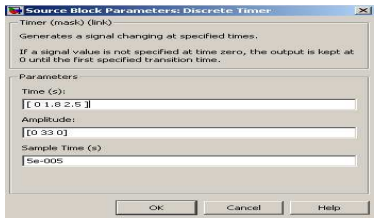
Perjungimo raktais SW1, SW2, SW3, SW4 atliekamas signalo (atitinkančio logines sąlygas) parinkimas. Signalo perdavimas pirmojo įėjimo kanalu galimas tik tuo atveju, kai antrasis įėjimas atitinka pasirinktą kriterijų. Kitu atveju signalas perduodamas trečiuoju įvesties kanalu. Signalų perdavimo kanalai atitinkamais skaitmenimis pažymėti iš viršaus į apačią (1-3). Įvesties 1 signalo praleidžiamumo kriterijus yra įvesties kanalo 2, kai yra didesnis arba lygus ir didesnis arba nelygus nustatytai ribinei reikšmei (pagal nutylėjimą ji lygi 0,5). Įvestis 1 ir įvestis 3 – duomenų perdavimo kanalai, o antrasis įvesties kanalas atlieka valdymo signalo funkciją.

Atskaitos įtampos vektoriaus padėtį α-β vektorinėje erdvėje apibūdina du pagrindiniai dydžiai: apskritimo spindulys *"r"*, kurio trajektorija sukamas įtampos vektorius *U** ir kampas θ nuo pradinės vektoriaus padėties. Dekarto koordinačių sistemos kintamieji x ir y (šiuo atveju U_{α}^{*} ir U_{β}^{*}) funkciniu bloku (1) transformuojami į polinę koordinačių sistemą, kurios kintamieji yra [r, θ]. Polinės koordinačių sistemos duomenys / signalai perduodami raktų SW1 ir SW2 trečiuoju įvesties kanalu.

- Statinės apkrovos imitavimas:

Statinė apkrova tam tikru nustatytu laiko momentu prijungiama vienetiniu šuoliniu signalu varikliui įėjime *In3*, naudojant *SIMULINK* funkcinį bloką "STEP".

Apkrovos arba nuostato signalo vertė gali būti keičiama nusistovėjusiame pavaros režime. Ši funkcija atliekama laikmačiu *"Timer"*. Kintamųjų įvedimo ir keitimo langas pateiktas 5.15 pav.



5.15 pav. Kintamųjų įvedimo langas *Simulink* aplinkoje

Matricų forma (5.15 pav. pateiktame lange) keičiamos šios vertės: variklio apkrovos momento įjungimo bei išjungimo laikas ir amplitudinė apkrovos vertė M_a (N·m). Analogiškai keičiamas ir greičio nuostato vertė.

- Ventiliatorinės apkrovos realizavimas / imitavimas:

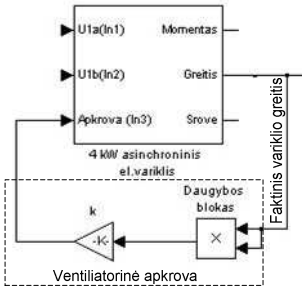
Tokio pobūdžio apkrova pavarai realizuojama, kai prie variklio veleno prijungiamas ventiliatorius arba siurblys. Apkrovimo metu varikliui sukuriamas stabdymo momentas M_a, kuris proporcingas greičio kvadratui pagal išraišką:

$$M_a = k \cdot \omega^2 . \tag{5.4}$$

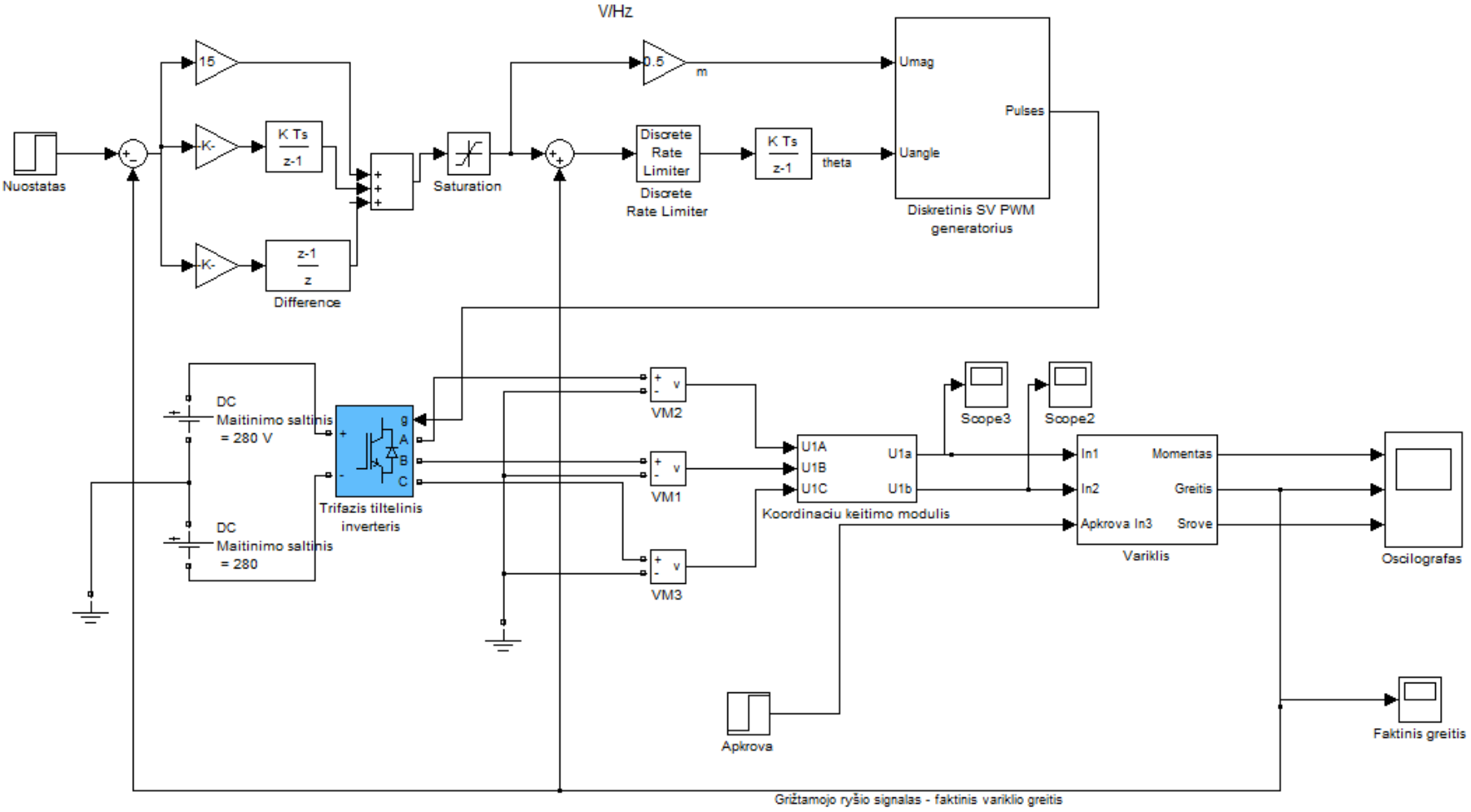
Pagal variklio vardinius parametrus (pateiktus 1 lentelėje) koeficientas *k* apskaičiuojamas taip:

$$k = \frac{M_n}{\omega^2} = \frac{13,21}{302^2} = 0,000145 . \tag{5.5}$$

Remiantis (5.4) ir (5.5) išraiškomis sudaromas ventiliatorinės apkrovos kompiuterinis modelis *Simulink* aplinkoje, kurio realizacija pateikiama 5.14 pav.



5.14 pav. Ventiliatorinės apkrovos realizavimas *Simulink* aplinkoje



5.16 pav. Uždarosios skaliarinio valdymo dažninės asinchroninės pavaros kompiuterinis modelis

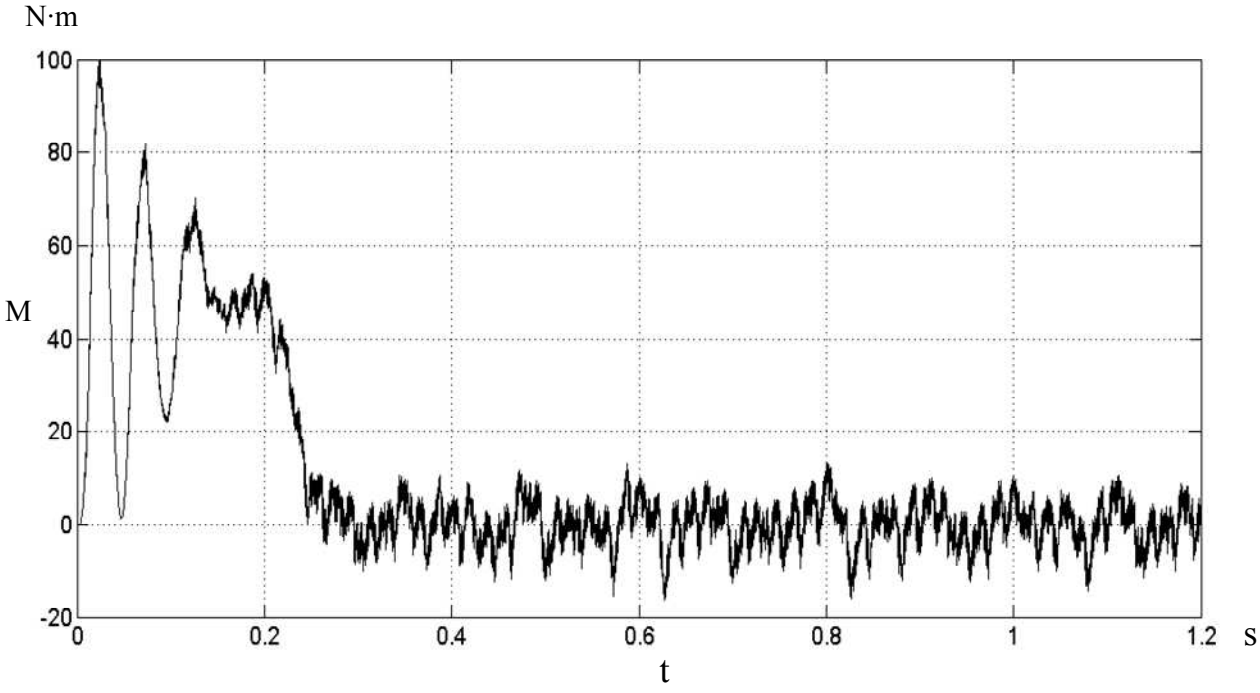
5.2. Imitaciniai rezultatai ir analizė

Dažninės pavaros dinaminės charakteristikos (pereinamieji procesai) gautos iš sudarytų 5.8 pav. ir 5.16 pav. skaliarinio valdymo pavaros kompiuterinių modelių – kai naudojama sinusinė ir erdvinio vektoriaus impulsų pločio moduliacija. Varikliui prijungta apkrova daro įtaką sukimosi greičio stabilumui. Šiuo atveju variklio sukimosi greitis palaikomas, įvedus greičio grįžtamąjį ryšį, o paklaidos signalą eliminuojant diskrečiuoju *PI* ir (arba) *PID* reguliatoriumi.

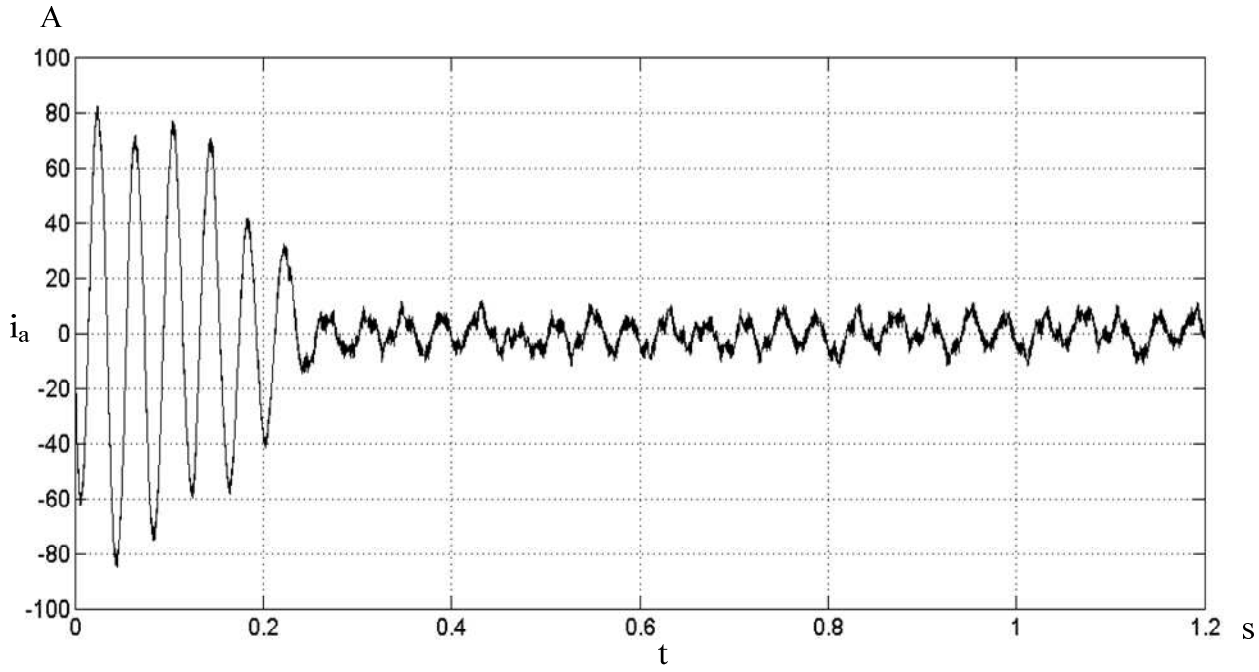
Variklio statinis apkrovos momentas M_a keičiamas ribose $10 \div 20$ N·m. Po apkrovos prijungimo greičio nuostato vertė turi būti pasiekta kaip galima greičiau bei tiksliau, keičiant PID reguliatoriaus K_P, K_I ir K_D dedamųjų vertes atsitiktiniu parinkimo būdu.

Imitacinės dažninės pavaros sukimo greitis taipogi viso tyrimo metu palaikomas pastovus – $\omega_1 = 157$ rad/s ir $\omega_2 = 270$ rad/s (siekiant imitacinių rezultatų palyginimo su eksperimentiniais rezultatais).

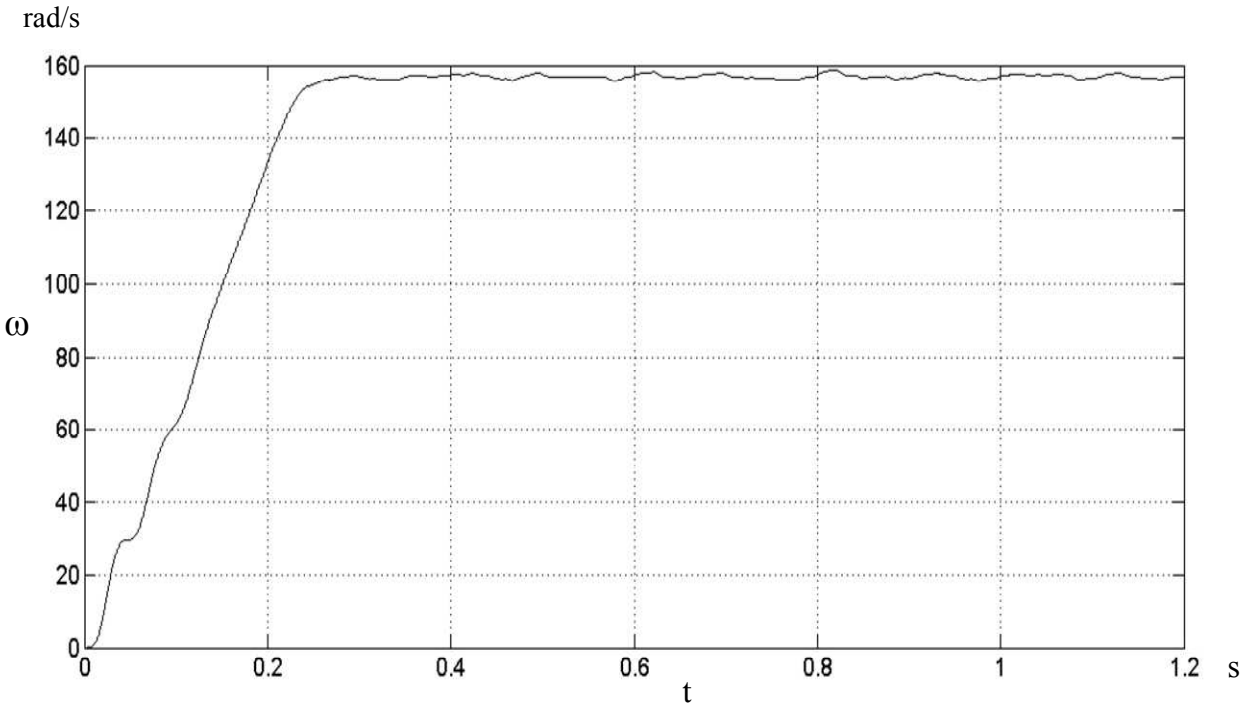
<u>Atviros (be greičio grįžtamojo ryšio)</u> dažninės pavaros dinaminės elektromagnetinio momento, statoriaus A fazės srovės ir sukimosi greičio charakteristikos pateiktos 5.18 – 5.24 pav.



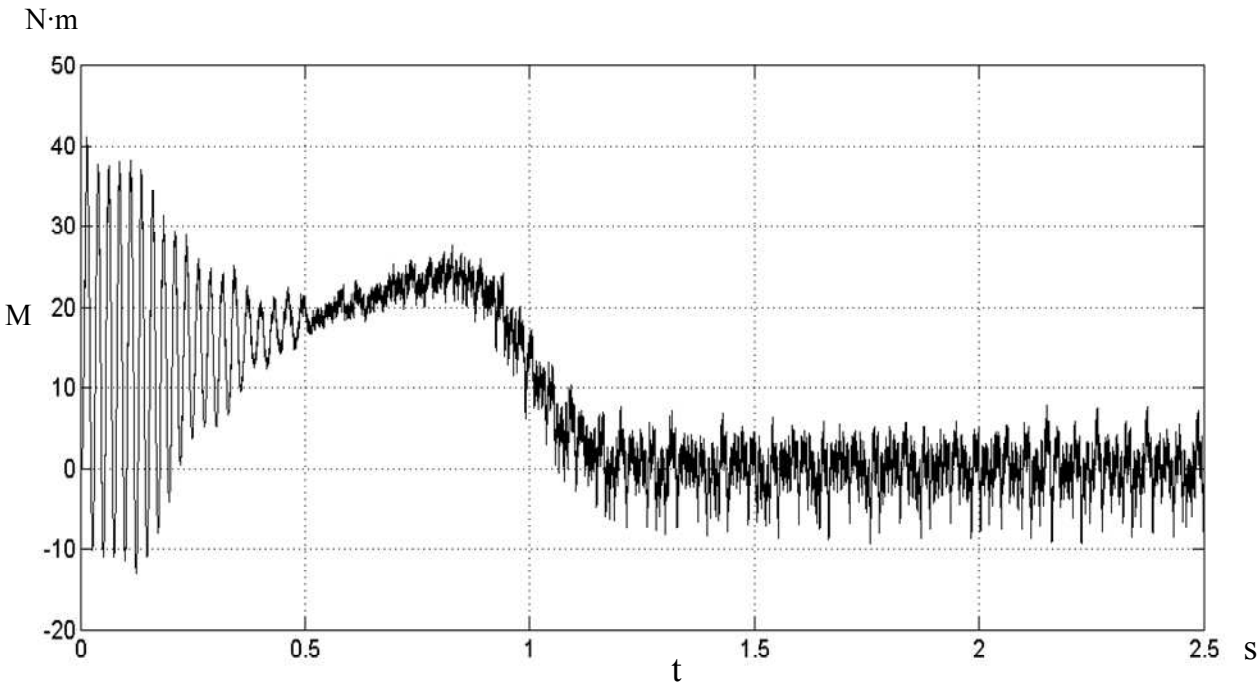
5.18 pav. Elektromagnetinio momento dinaminė charakteristika, kai ω = 157 rad/s be greičio grįžtamojo ryšio signalo



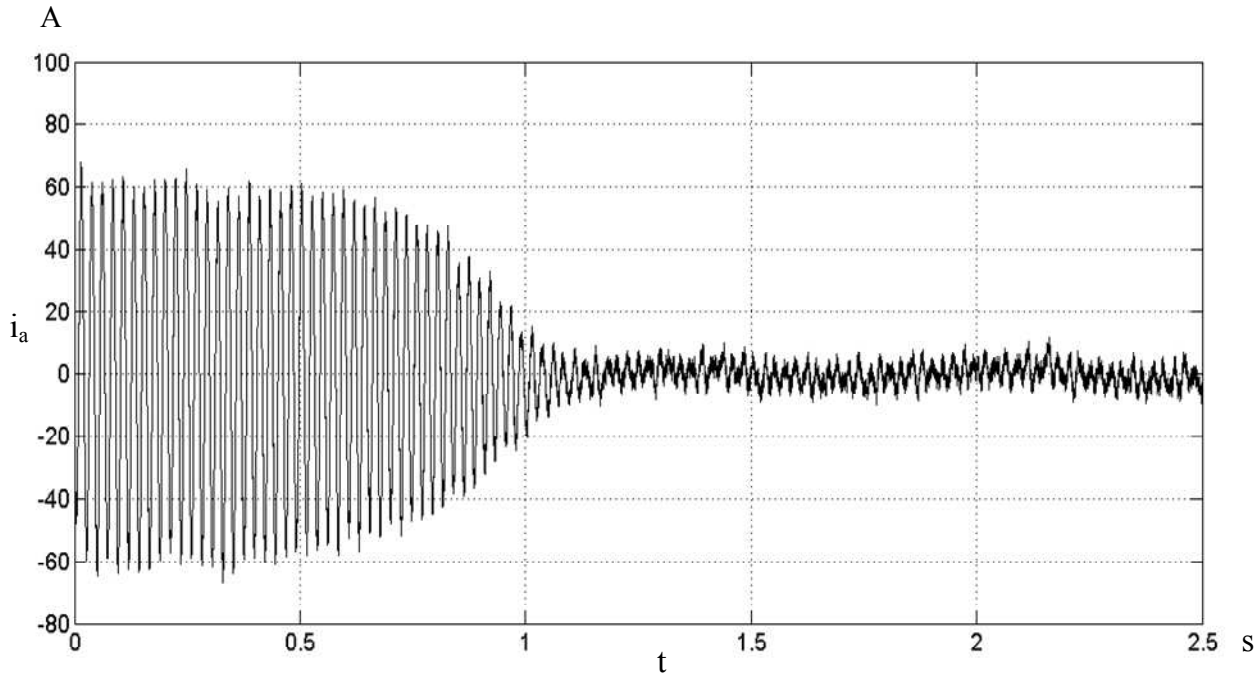
5.19 pav. Statoriaus A fazės srovės pereinamojo proceso charakterisika, kai ω = 157 rad/s be greičio grįžtamojo ryšio signalo



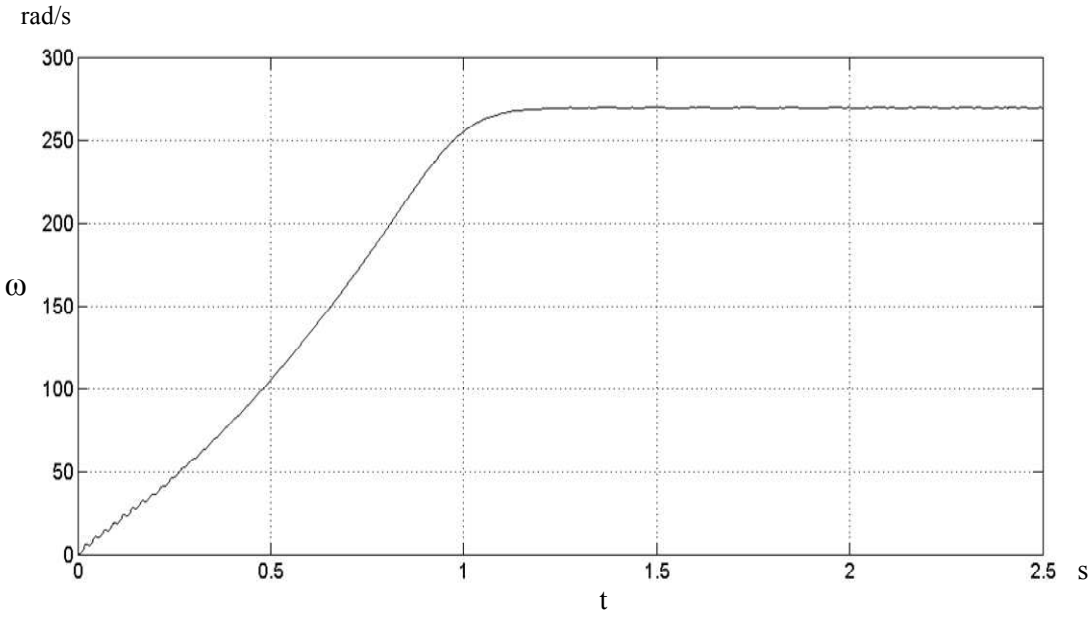
5.20 pav. Variklio sukimosi greičio dinaminė charakteristika, kai ω = 157 rad/s be greičio grįžtamojo ryšio signalo



5.21 pav. Elektromagnetinio momento dinaminė charakteristika, kai ω = 270 rad/s be greičio grįžtamojo ryšio signalo

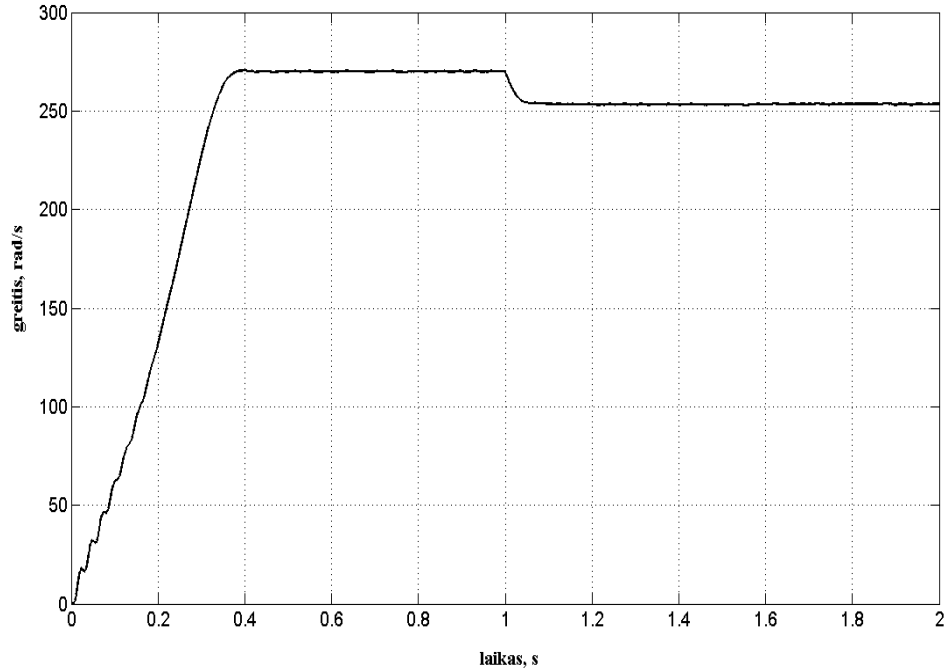


5.22 pav. Statoriaus A fazės srovės pereinamojo proceso charakteristika, kai ω = 270 rad/s be greičio grįžtamojo ryšio signalo



5.23 pav. Sukimosi greičio dinaminė charakteristika, kai ω = 270 rad/s be greičio grįžtamojo ryšio signalo

Prijungus varikliui apkrovą, greičio nuostato vertė nebepalaikoma. Tai akivaizdu pateiktoje greičio pereinamojo proceso dinaminėje charakteristikoje, pateiktoje 5.24 pav.



5.24 pav. Greičio dinaminė charakteristika, kai ω = 270 rad/s be greičio grįžtamojo ryšio

Pagal 5.18 – 5.23 pav. pateiktus, skaliariškai valdomos dažninės pavaros, be greičio grįžtamojo ryšio, modeliavimo rezultatus, matyti, jog tiriamoji pavara nusistovėjusiame darbo turi iki 0,5 % greičio statinę paklaidą.

Prijungus varikliui apkrovą po 1 s (5.24 pav.) statinė paklaida padidėja iki 6 %. Po 1 s greitis sumažėja iki 255 rad/s. Iš 5.24 pav. gautų rezultatų pastebima, jog greičio nuostatas nebepalaikomas, prijungus apkrovą.

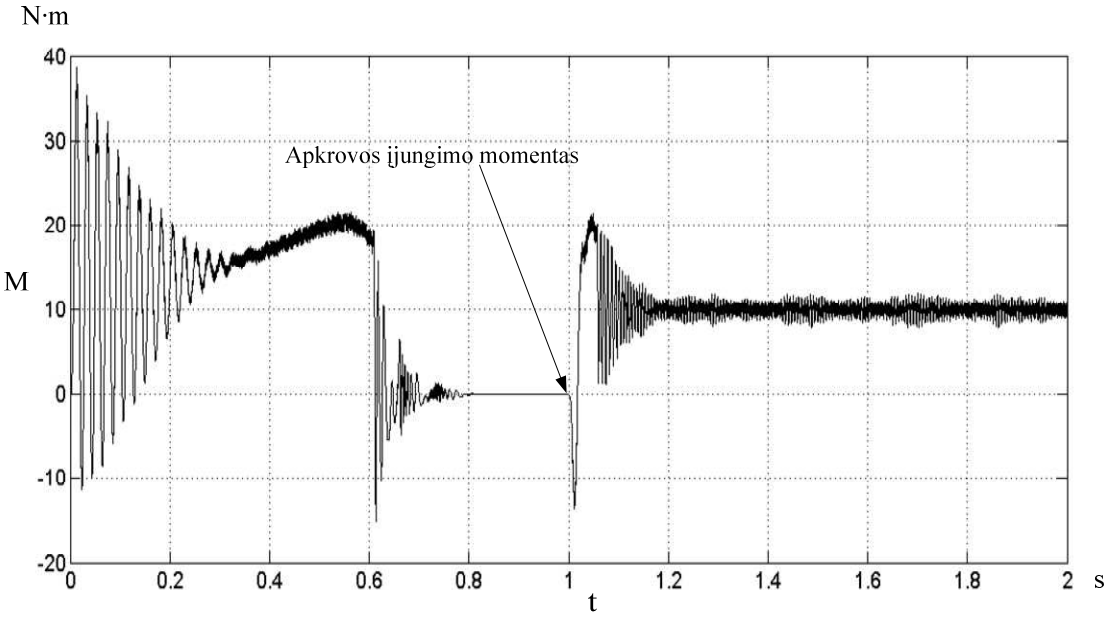
Elektromagnetinio momento ir statoriaus srovės pereinamieji procesai (žr. 5.18, 5.19, 5.21, 5.22 pav.) nusistovi su didesne kaip 10 % paklaida. Tai įrodo atsiradę tam tikru dažniu kintantys aperiodiniai švytavimai.

Uždarojo kontūro (su greičio grįžtamuoju ryšiu) dažninės pavaros dinaminės elektromagnetinio momento, statoriaus A fazės srovės ir sukimosi greičio charakteristikos pateiktos 5.25 – 5.51 pav.

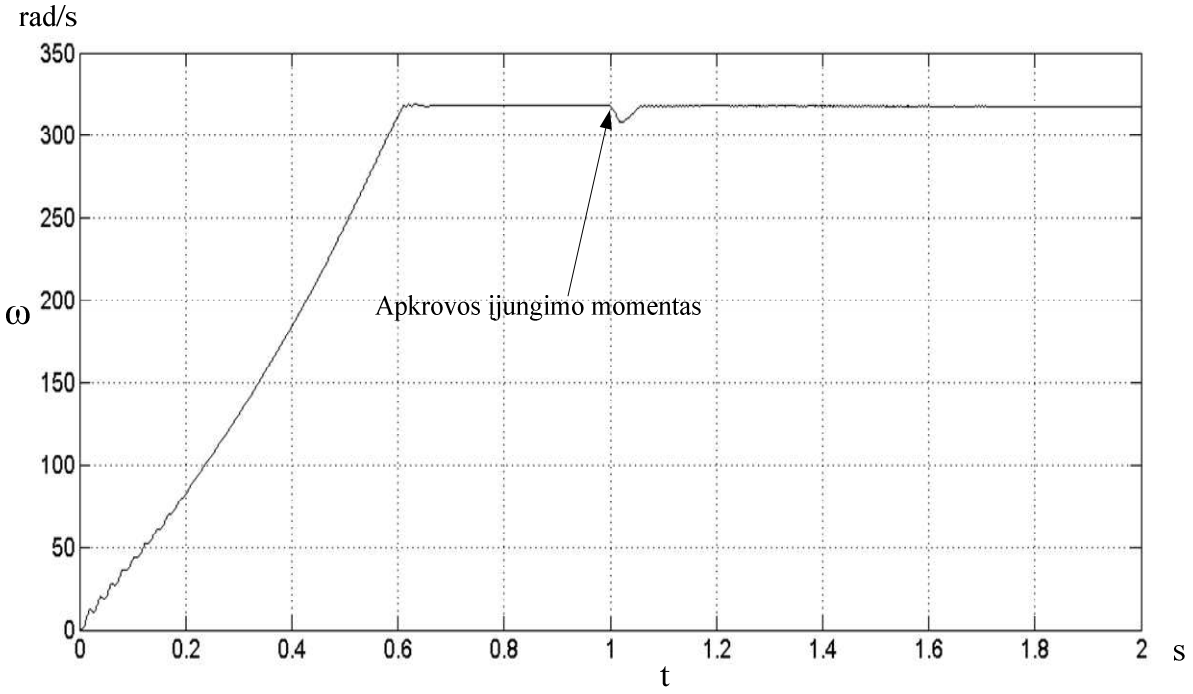
Greičio nuostatui įvesti kompiuteriniame modelyje taikomas vienetinis šuolinis signalas (angl. *„STEP“*) su tam tikra nustatyta verte. Apkrovos įtaka daro didelį poveikį pavaros pereinamųjų procesų reakcijai. Atliekamas tyrimas uždaroje sistemoje, kai varikliui prijungiama statinė arba ventiliatorinio pobūdžio apkrova.

Pradžioje pavaros įėjime veikia vienetinis šuolinis signalas (greičio nuostatas) su statine apkrova varikliui, kuri prijungiama pavaros nusistovėjusiame režime tam tikru nustatytu laiko momentu.

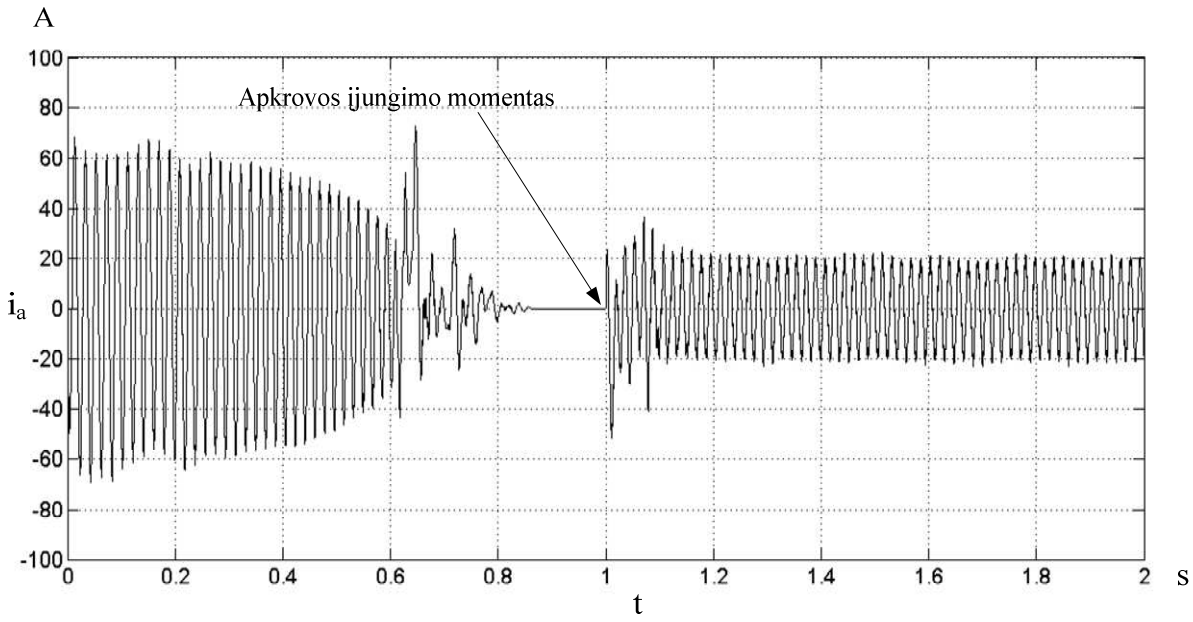
Atliekamas dažninės pavaros dinaminių procesų tyrimas, kai variklis sukasi vardiniu greičiu (314 rad/s), ir po 1 s varikliui prijungiama 10 N·m statinė apkrova. Gauti 5.25 – 5.27 pav. rezultatai tolimesniems tyrimams bus naudojami kaip atskaitos taškas.



5.25 pav. Elektromagnetinio momento pereinamojo proceso charakteristika, kai ω = 314 rad/s, $K_P = 0,8$; $K_I = 0,4$, $M_a = 10$ N·m

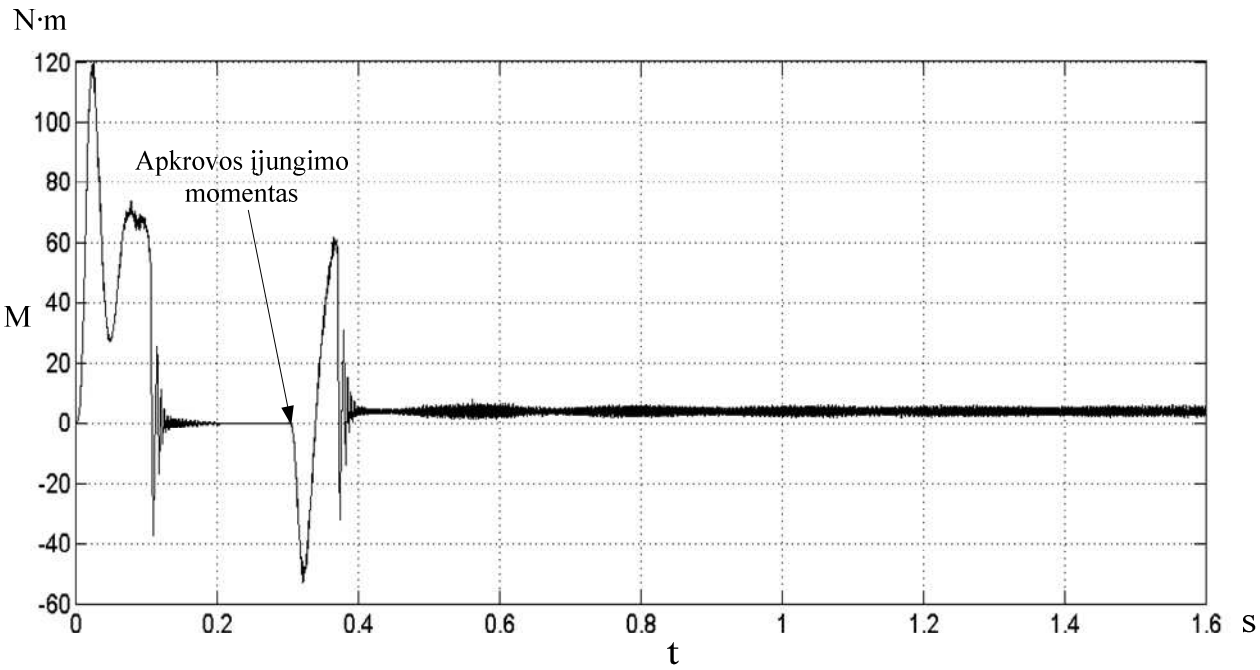


5.26 pav. Sukimosi greičio pereinamojo proceso charakteristika, kai ω = 314 rad/s, $K_P = 0,8$; $K_I = 0,4$, $M_a = 10$ N·m

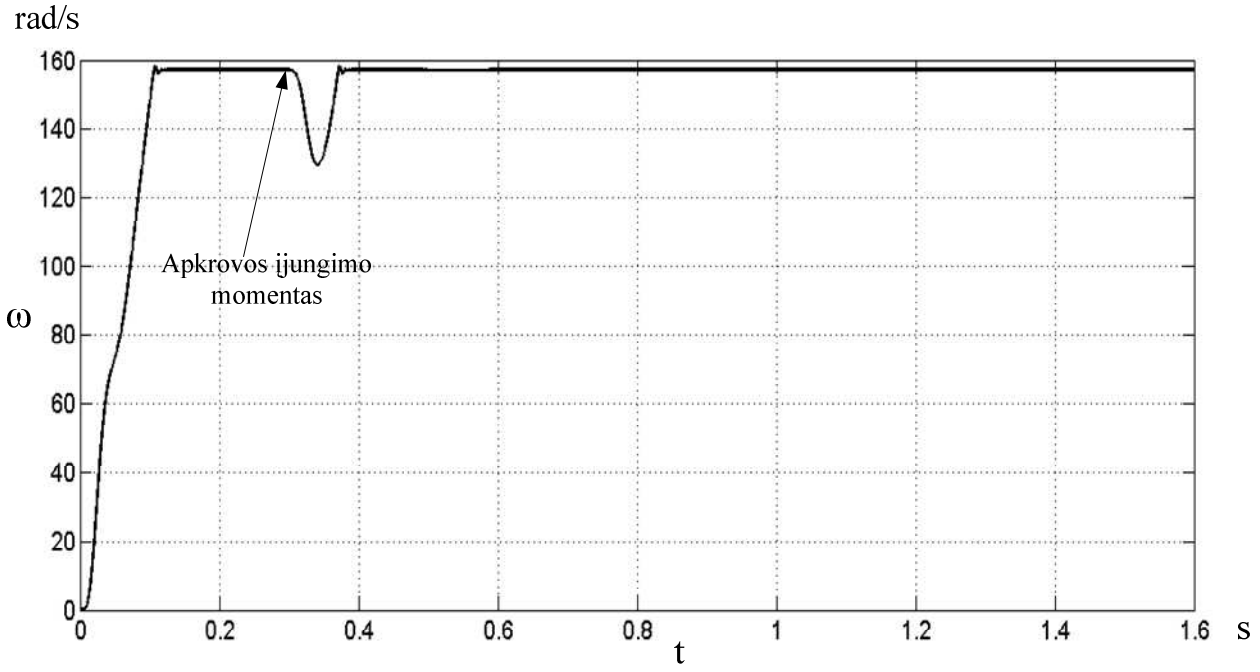


5.27 pav. Statoriaus srovės pereinamojo proceso charakteristika, kai ω = 314 rad/s, $K_P = 0,8$; $K_I = 0,4$, $M_a = 10$ N·m

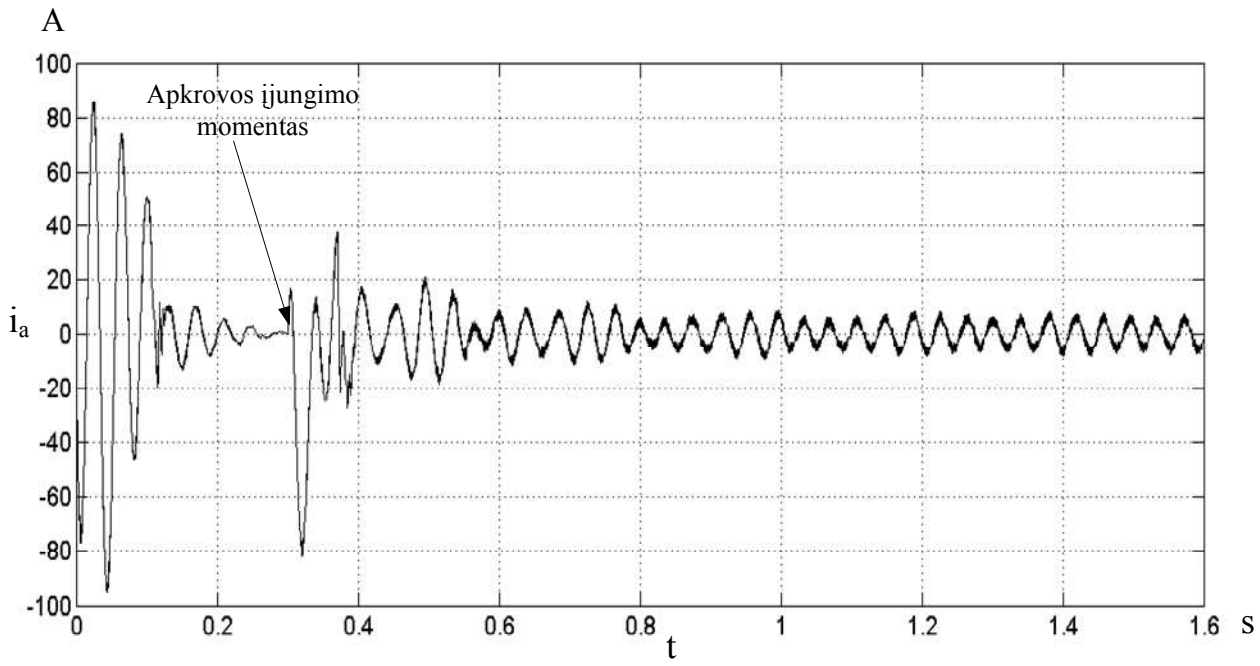
5.28 – 5.30 pav. pateikiami imitaciniai rezultatai, kai greičio nuostatas lygus 157 rad/s, o po 0,3 s varikliui prijungiama 10 N·m dydžio apkrova.



5.28 pav. Elektromagnetinio momento pereinamojo proceso charakteristika, kai ω = 157 rad/s, $K_p = 0,8$; $K_I = 0,5$; $K_D = 1,6$; $M_a = 10$ N·m



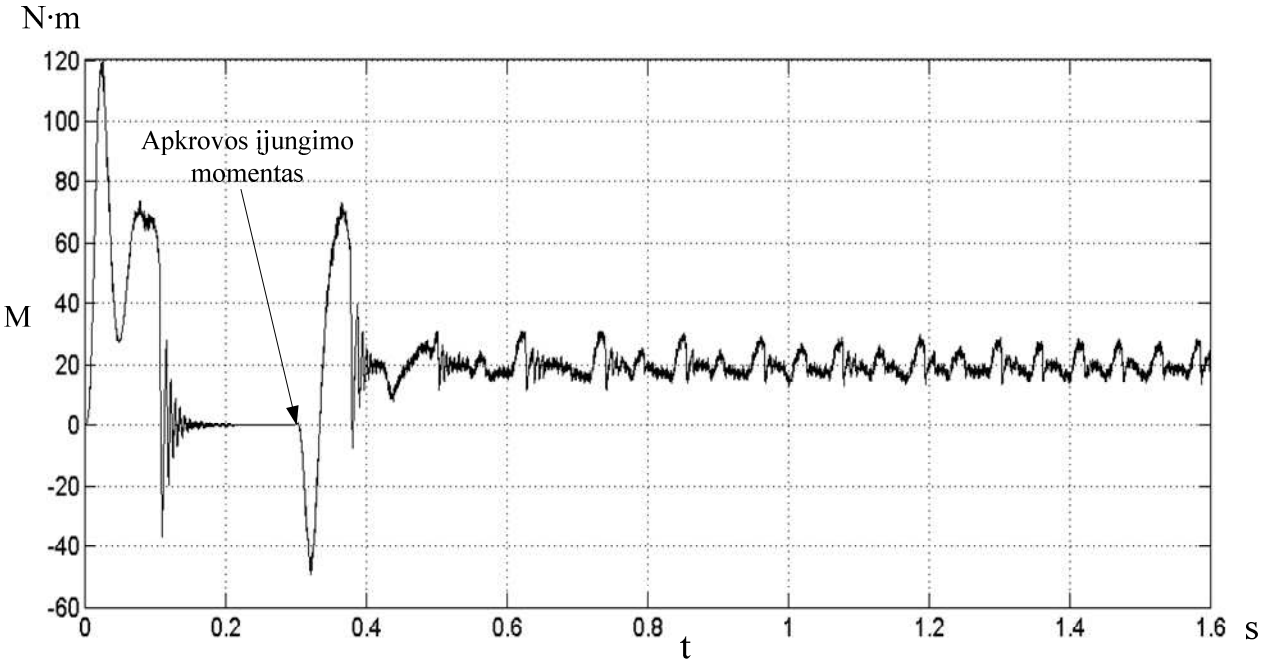
5.29 pav. Greičio pereinamojo proceso charakteristika, kai ω = 157 rad/s, $K_p = 0,8$; $K_I = 0,5$; $M_a = 10$ N·m



5.30 pav. Statoriaus srovės pereinamojo proceso charakteristika, kai ω = 157 rad/s,

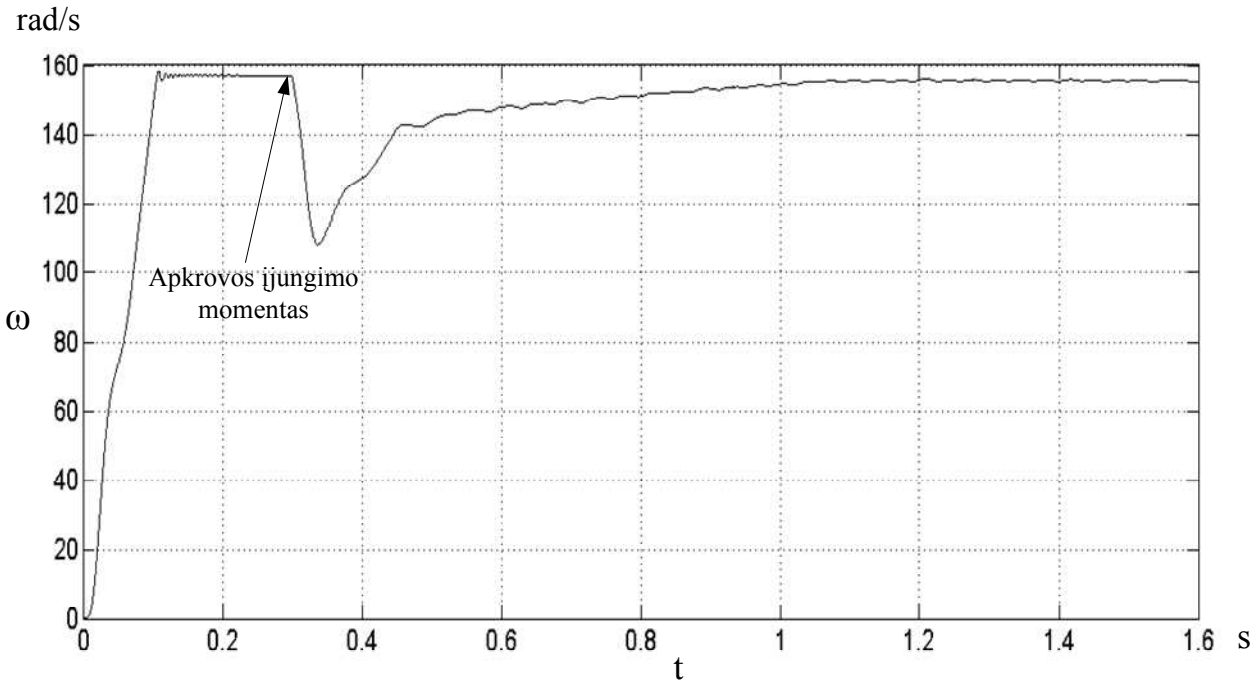
$K_p = 0,8$; $K_I = 0,5$; $K_D = 1,6$; $M_a = 10$ N·m

5.31 – 5.33 pav. pateikiami pavaros imitaciniai rezultatai, kai greičio nuostatas lygus 157 rad/s, o po 0,3 s varikliui prijungiama 20 N·m dydžio apkrova.



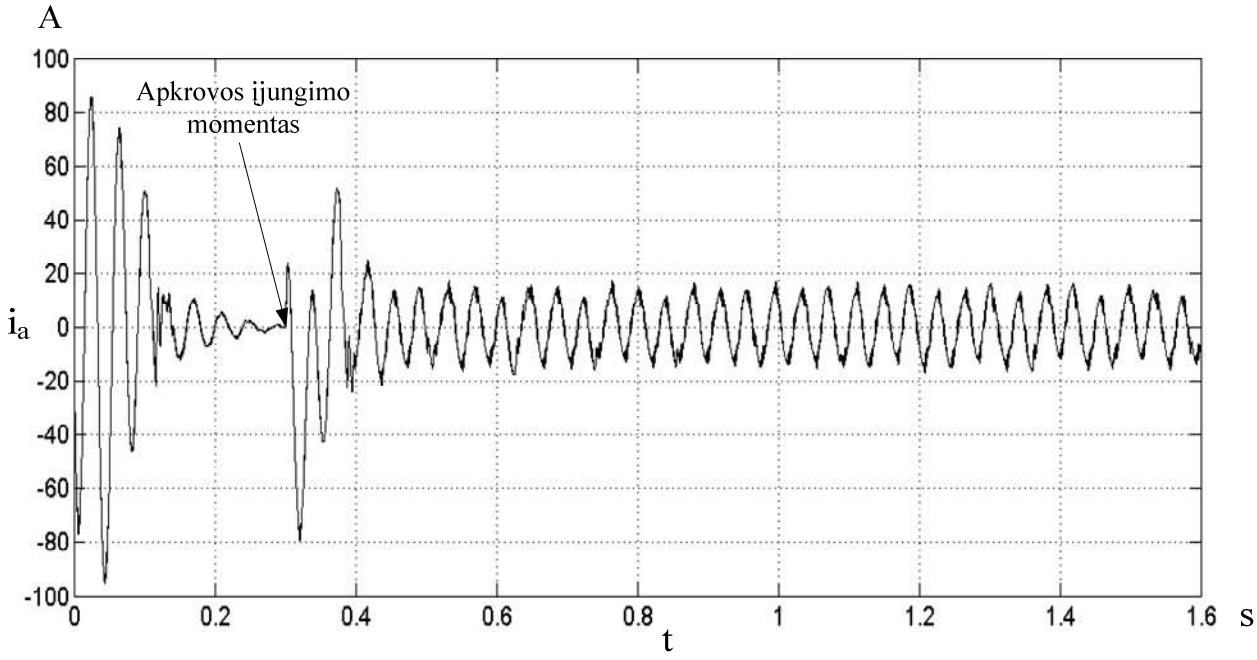
5.31 pav. Elektromagnetinio momento pereinamojo proceso charakteristika, kai ω = 157 rad/s,

$K_p = 0,8$; $K_I = 0,5$; $K_D = 1,6$; $M_a = 20$ N·m



5.32 pav. Greičio pereinamojo proceso charakteristika, kai ω = 157 rad/s,

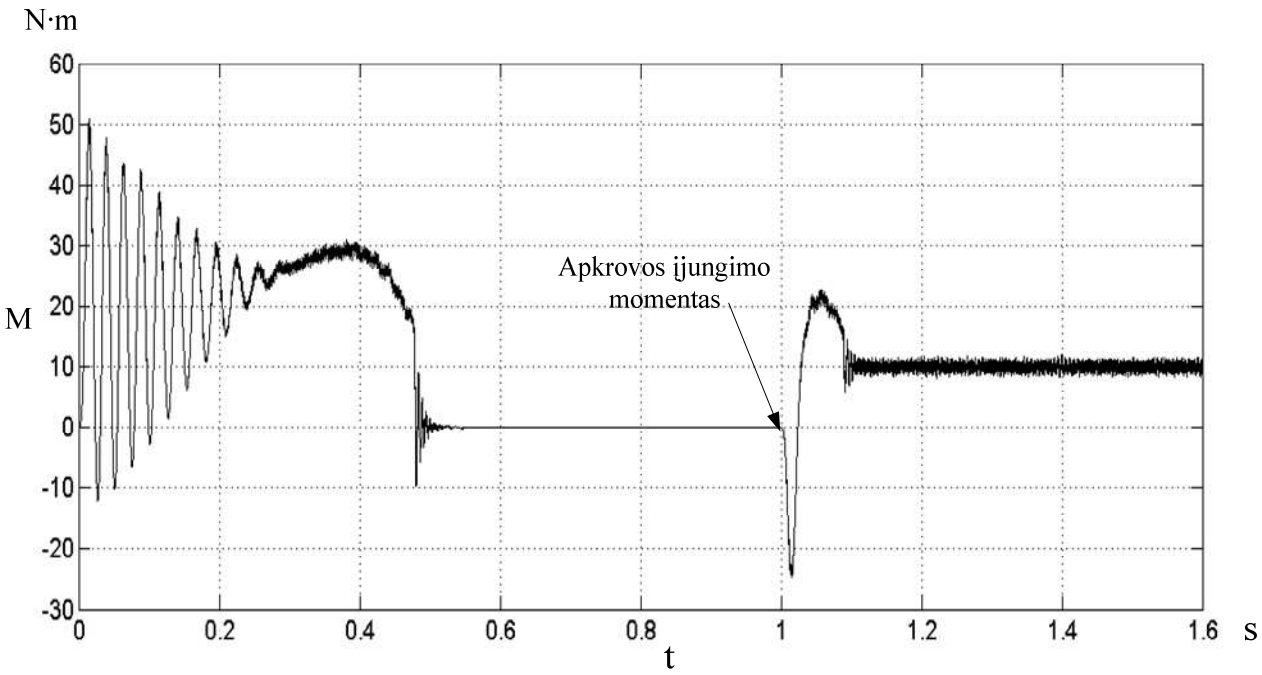
$K_p = 0,8$; $K_I = 0,5$; $K_D = 1,6$; $M_a = 20$ N·m



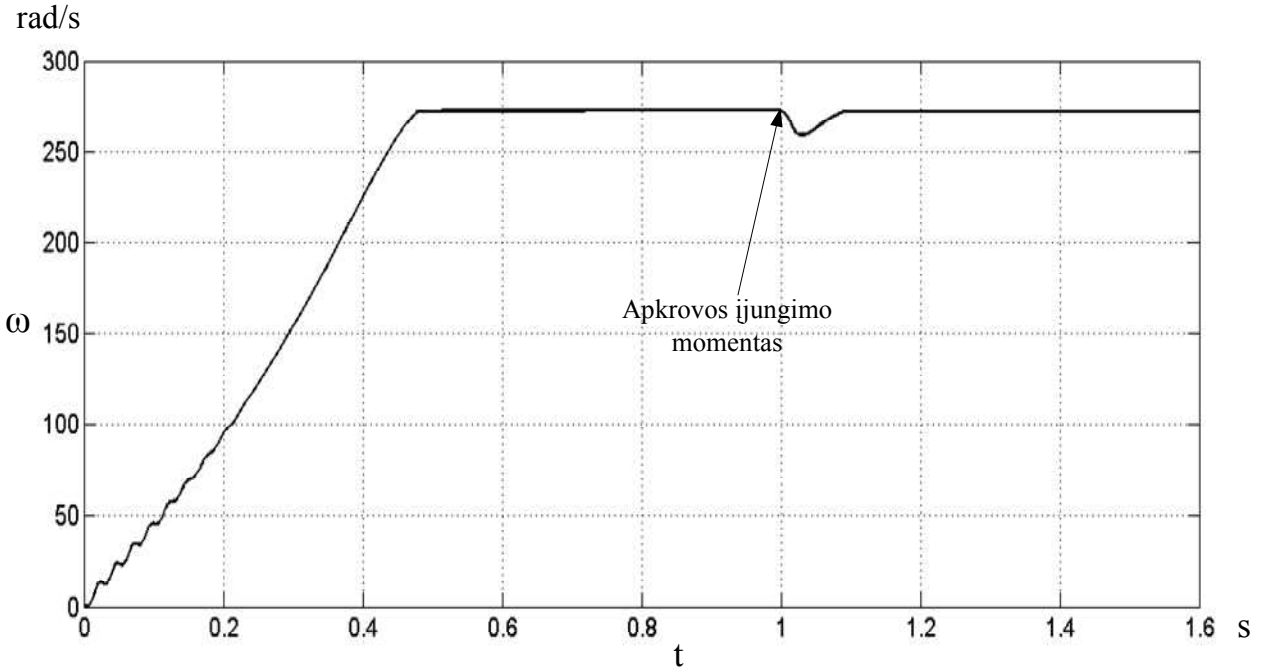
5.33 pav. Statoriaus srovės pereinamojo proceso charakteristika, kai ω = 157 rad/s,

$K_p = 0,8$; $K_I = 0,5$; $K_D = 1,6$; $M_a = 20$ N·m

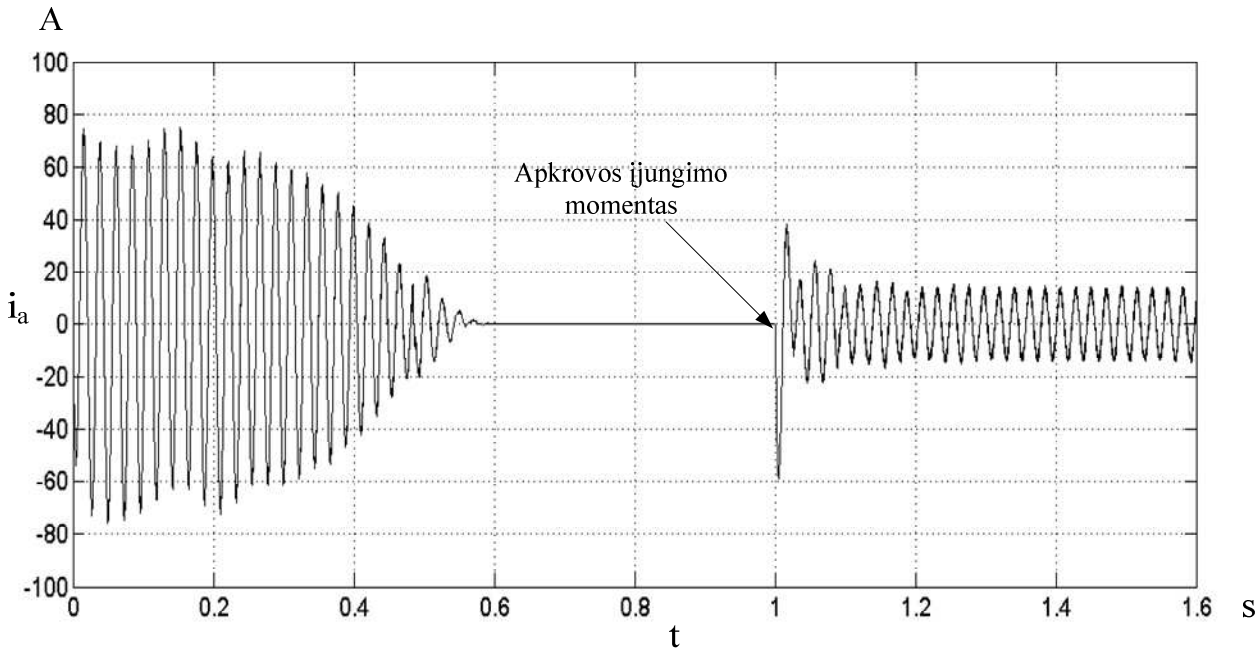
5.34 – 5.36 pav. pateikiami pavaros imitaciniai rezultatai, kai greičio nuostatas lygus 270 rad/s, o po 1 s varikliui prijungiama 10 N·m dydžio statinė apkrova.



5.34 pav. Elektromagnetinio momento pereinamojo proceso charakteristika, kai ω = 270 rad/s, $K_p = 0,8$; $K_I = 0,2$; $M_a = 10$ N·m

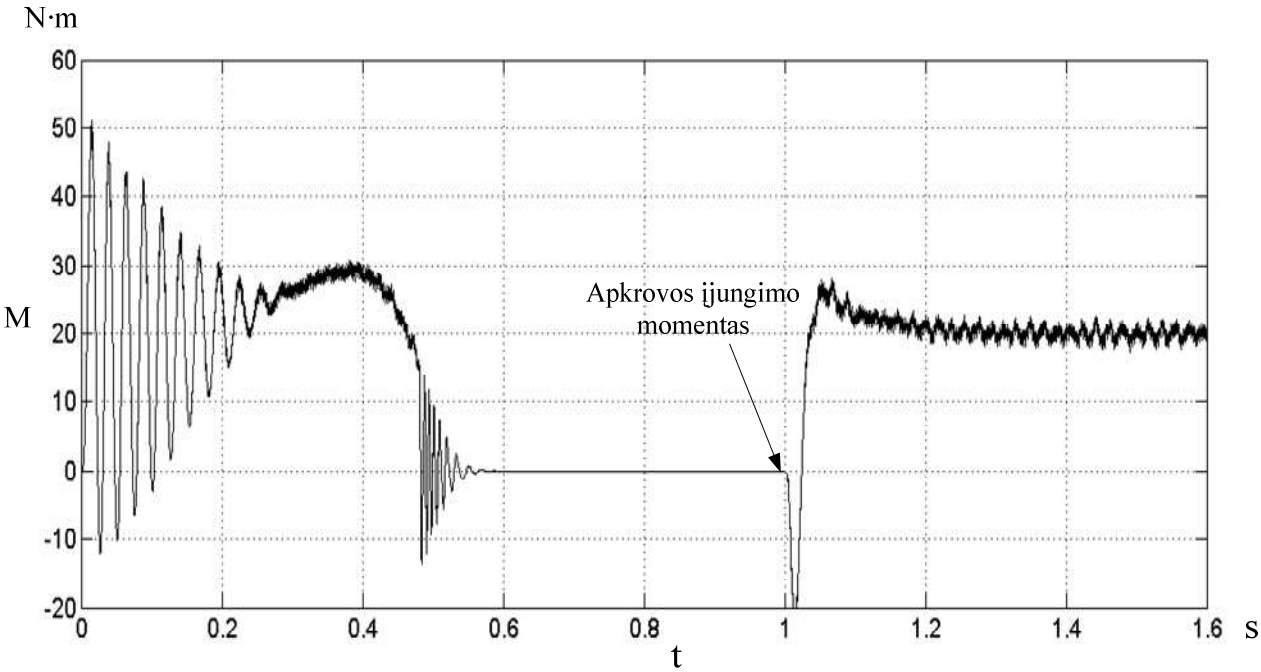


5.35 pav. Greičio pereinamojo proceso charakteristika, kai ω = 270 rad/s, $K_p = 0,8$; $K_I = 0,2$; $M_a = 10$ N·m

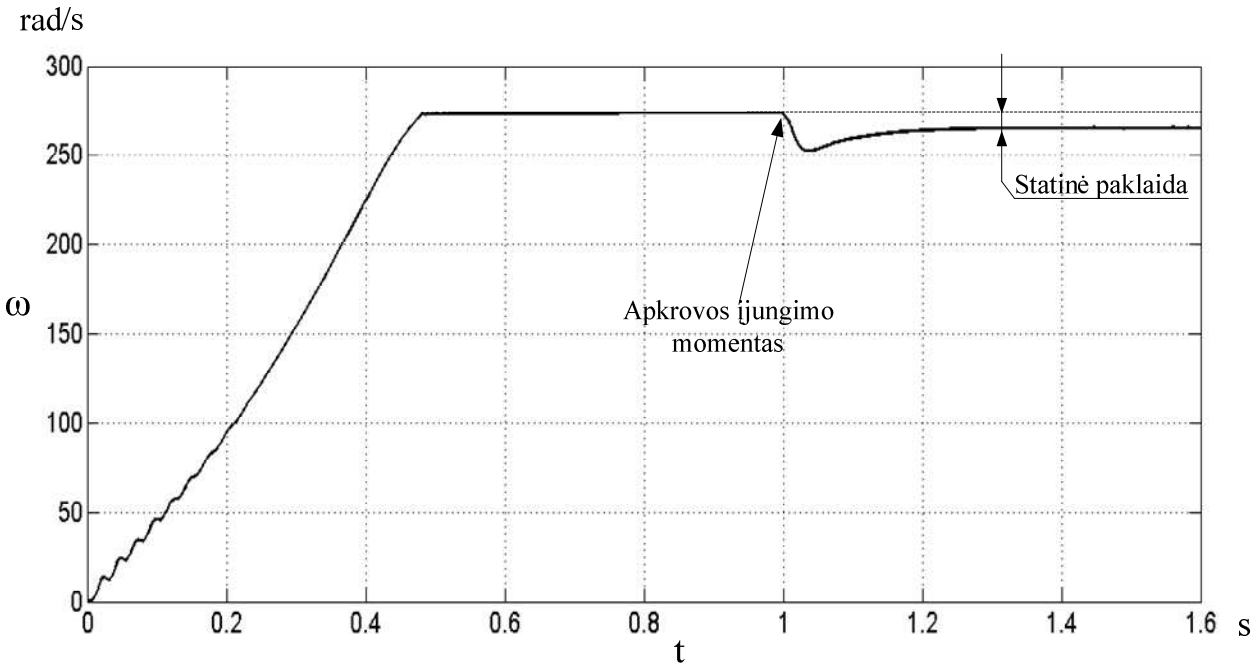


5.36 pav. Statoriaus srovės pereinamojo proceso charakteristika, kai ω = 270 rad/s, $K_p = 0,8$; $K_I = 0,2$; $M_a = 10$ N·m

5.37 – 5.42 pav. pateikiami pavaros imitaciniai rezultatai, kai greičio nuostatas lygus 270 rad/s, o po 1 s varikliui prijungiama 20 N·m dydžio statinė apkrova. Rezultatai gauti su skirtingais PI reguliatoriaus koregavimo parametrais.

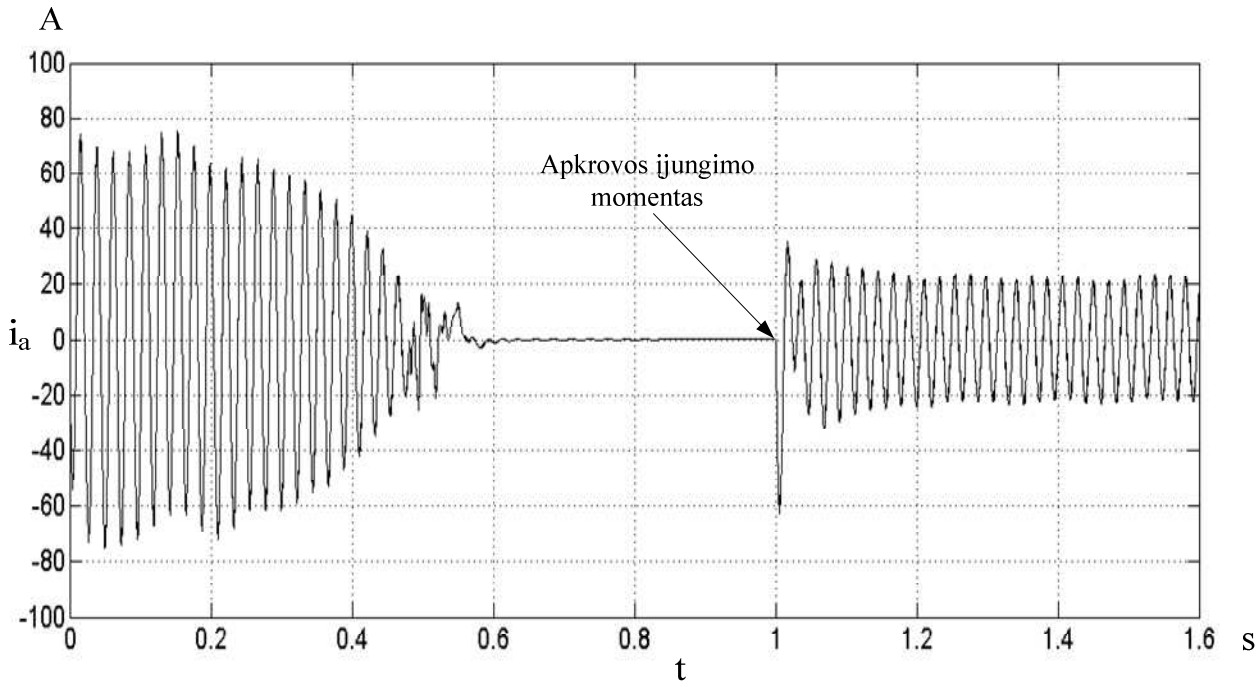


5.37 pav. Elektromagnetinio momento pereinamojo proceso charakteristika, kai ω = 270 rad/s, $K_p = 0,8$; $K_I = 0,2$; $M_a = 20$ N·m



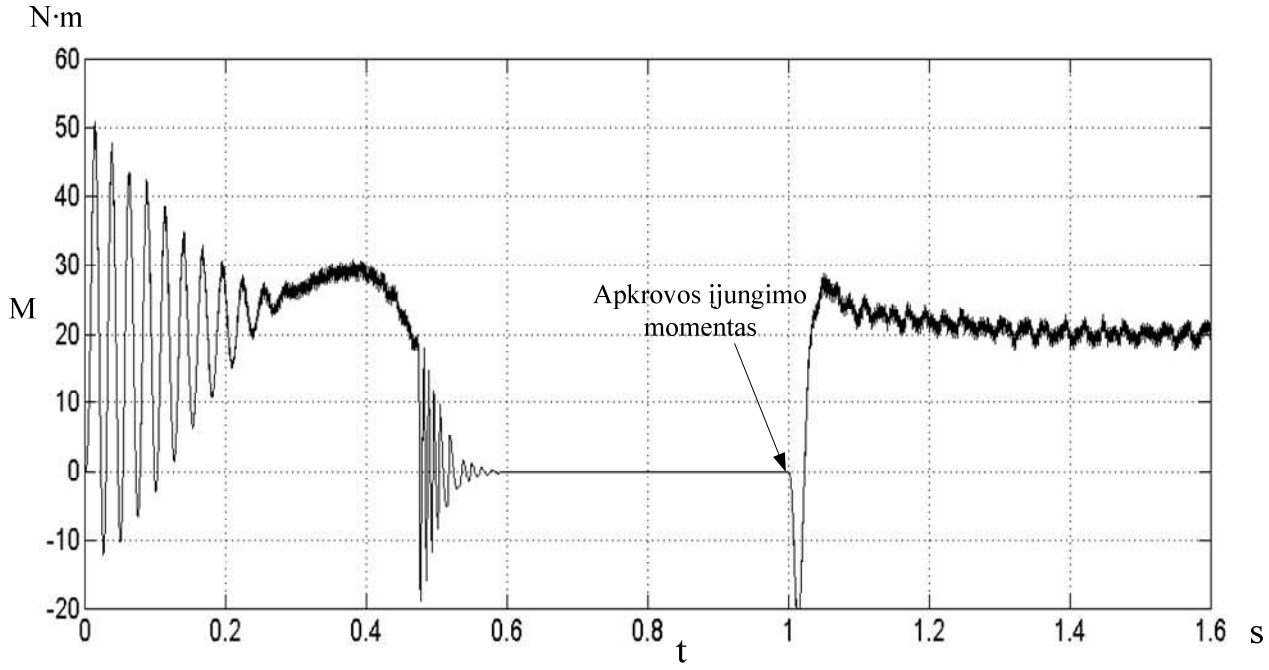
5.38 pav. Greičio pereinamojo proceso charakteristika, kai ω = 270 rad/s,

$K_p = 0,8$; $K_I = 0,2$; $M_a = 20$ N·m

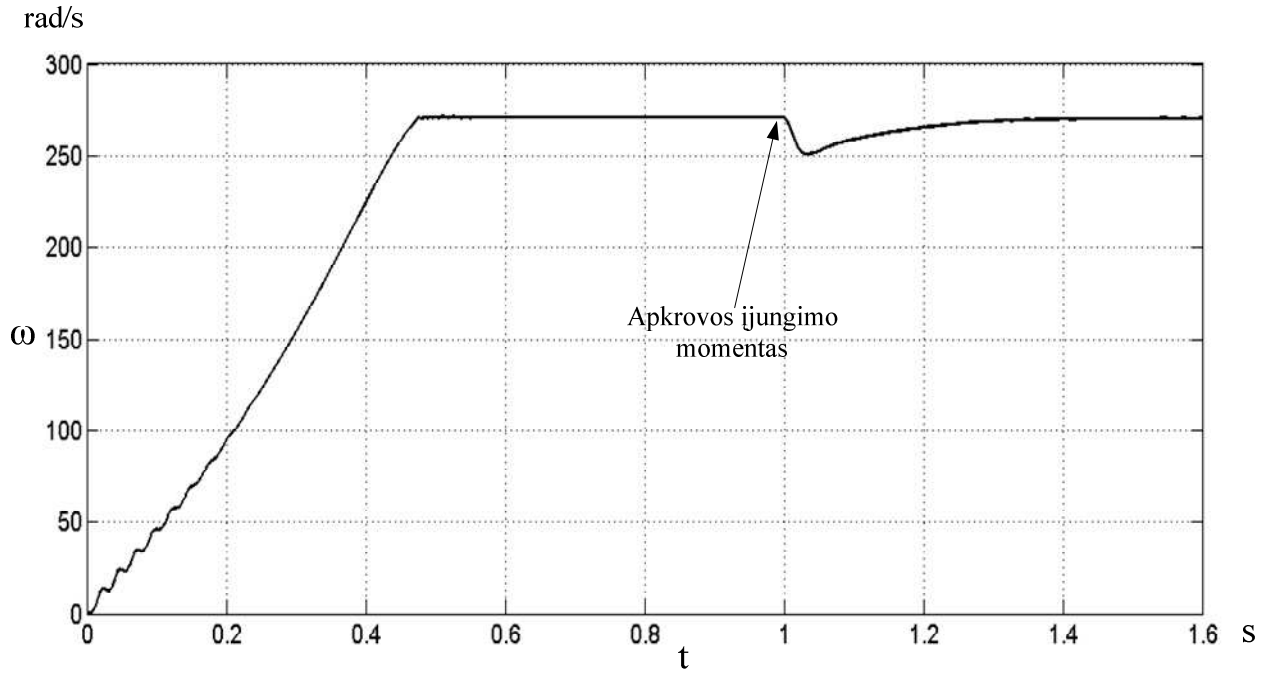


5.39 pav. Statoriaus srovės pereinamojo proceso charakteristika, kai ω = 270 rad/s,

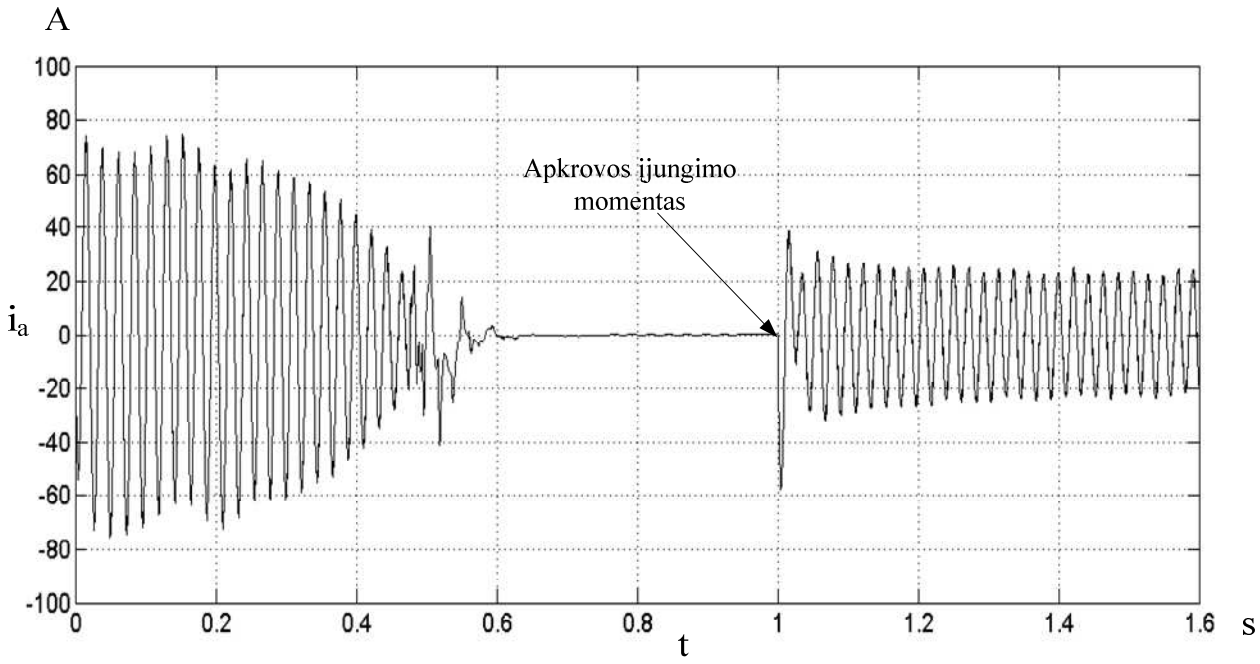
$K_p = 0,8$; $K_I = 0,2$; $M_a = 20$ N·m



5.40 pav. Elektromagnetinio momento pereinamojo proceso charakteristika, kai ω = 270 rad/s, K_p = 1,6; K_I = 0,2; M_a = 20 N·m

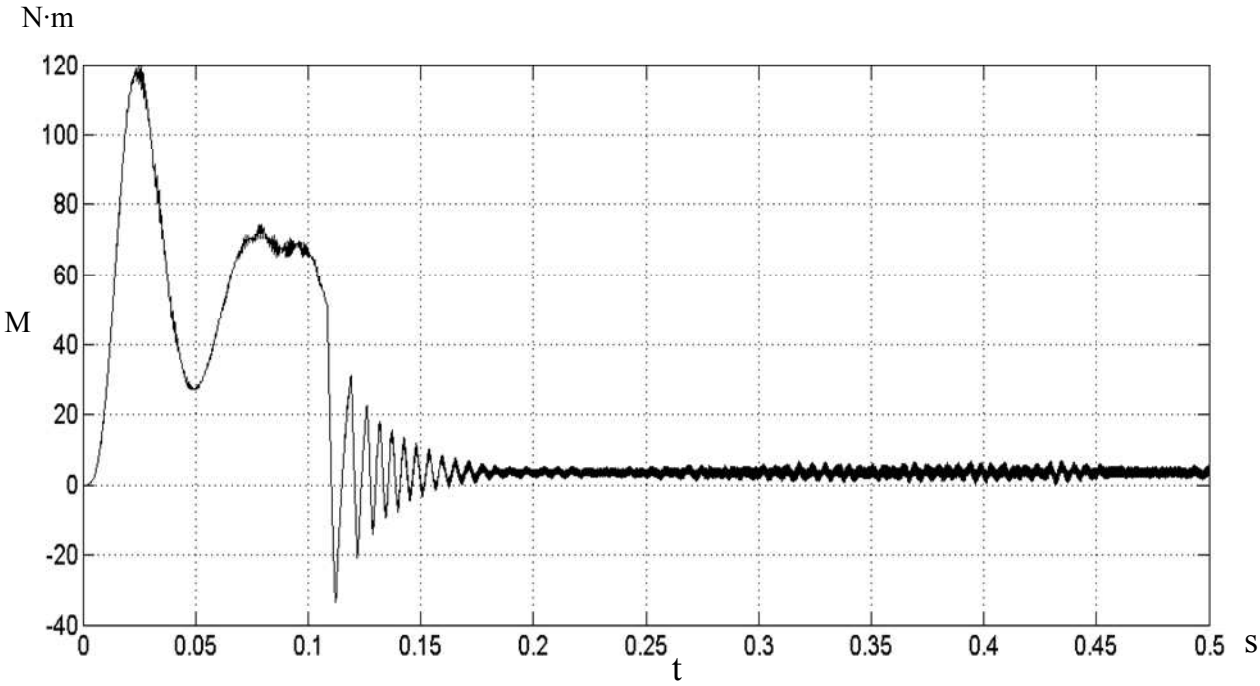


5.41 pav. Greičio pereinamojo proceso charakteristika, kai ω = 270 rad/s, K_p = 1,6; K_I = 0,2; M_a = 20 N·m

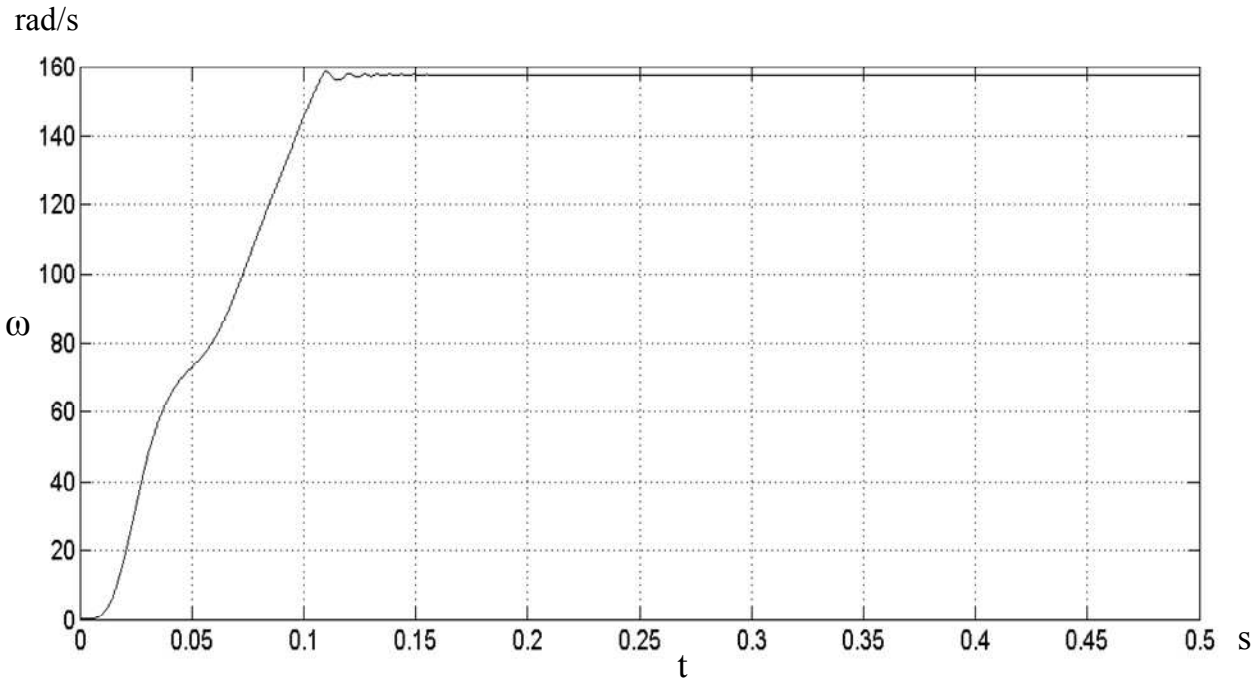


5.42 pav. Statoriaus srovės pereinamojo proceso charakteristika, kai ω = 270 rad/s, $K_p = 1,6$; $K_I = 0,2$; $M_a = 20$ N·m

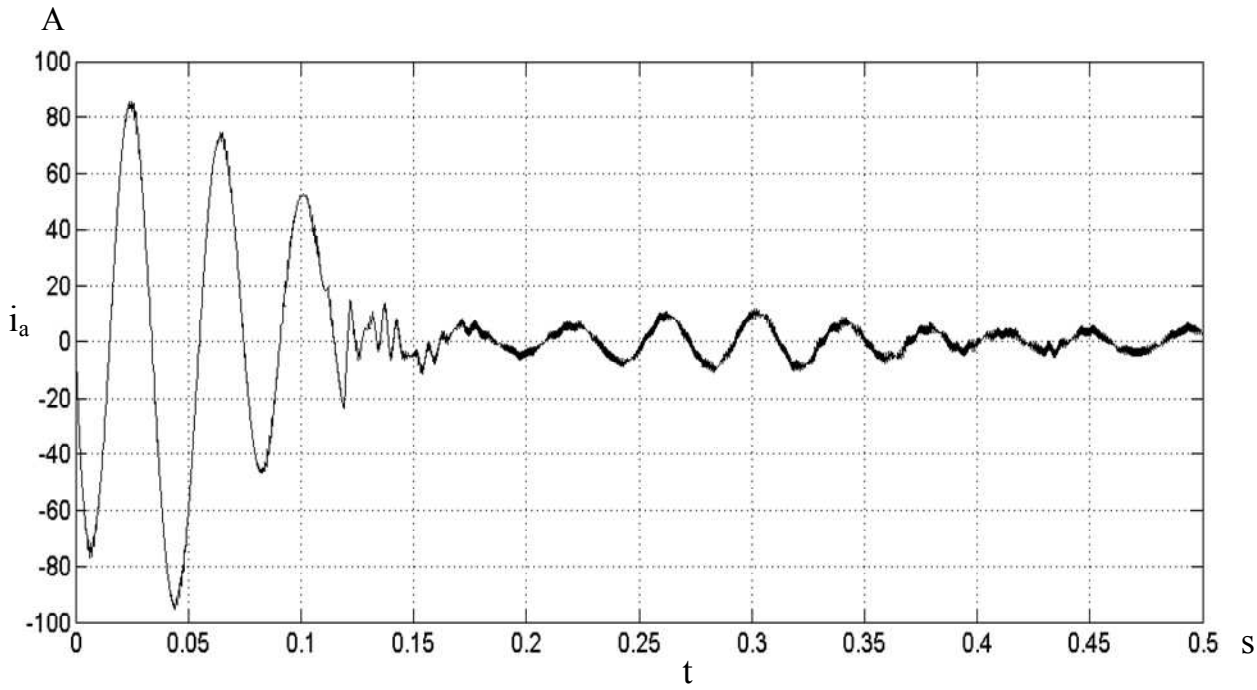
Toliau pateikiamos imitacinių pavaros procesų dinaminės charakteristikos (5.43 – 5.48 pav.), paleidžiant dažninę asinchroninę pavarą, kai paleidimo metu jau yra prijungta ventiliatorinio pobūdžio apkrova.



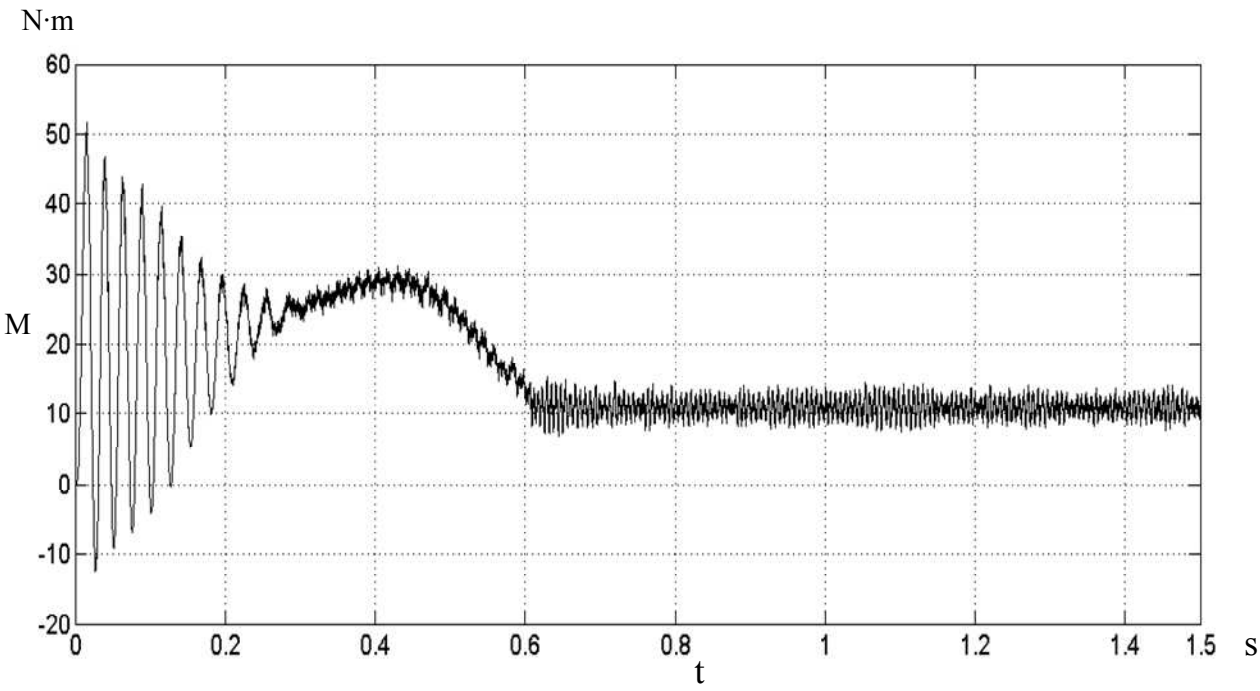
5.43 pav. Elektromagnetinio momento pereinamojo proceso charakteristika, kai ω = 157 rad/s, $K_p = 1,6$; $K_I = 0,1$; $K_D = 0,4$ su ventiliatorine apkrova



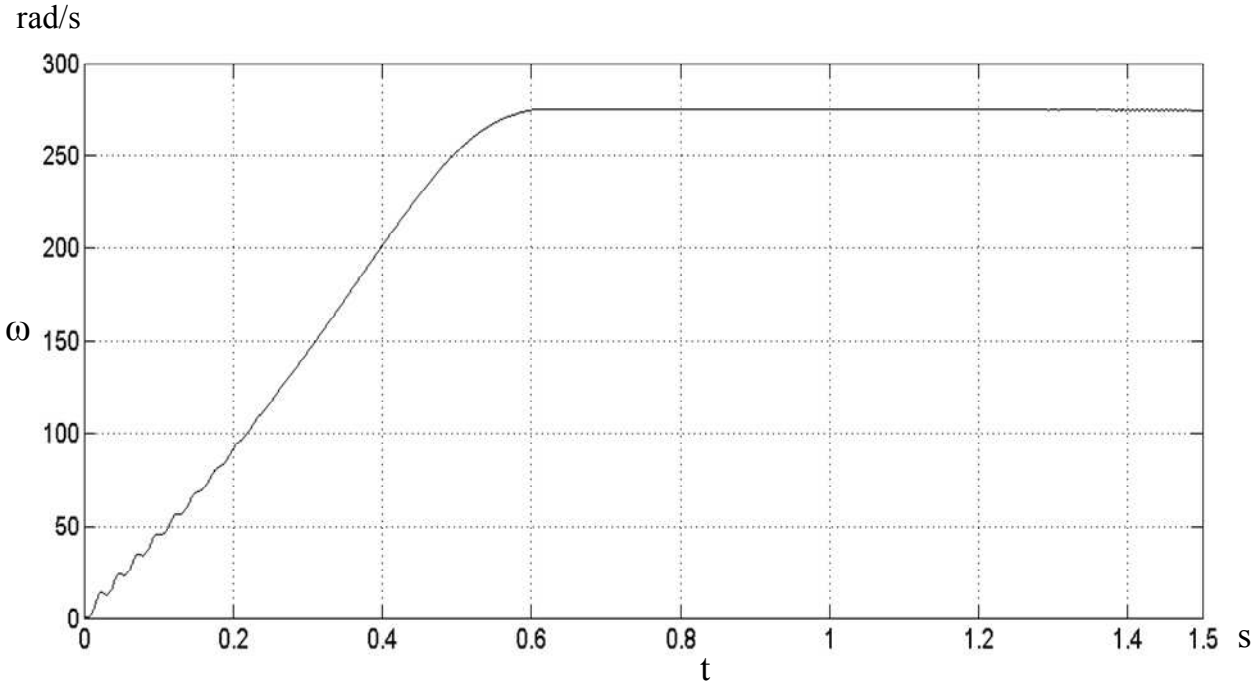
5.44 pav. Greičio pereinamojo proceso charakteristika, kai ω = 157 rad/s,
$K_p = 1,6$; $K_I = 0,1$; $K_D = 0,4$ su ventiliatorine apkrova



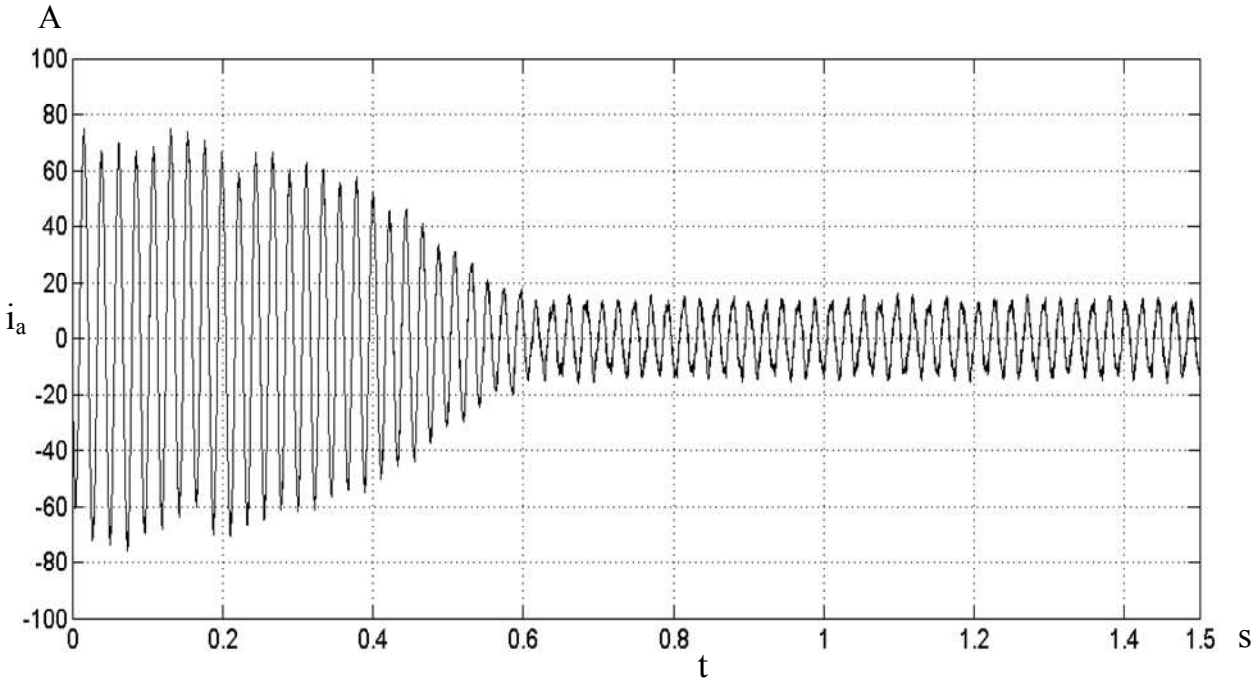
5.45 pav. Statoriaus srovės pereinamojo proceso charakteristika, kai ω = 157 rad/s,
$K_p = 1,6$; $K_I = 0,1$; $K_D = 0,4$ su ventiliatorine apkrova



5.46 pav. Elektromagnetinio momento pereinamojo proceso charakteristika, kai ω = 270 rad/s, $K_p = 1,6$; $K_I = 0,1$; $K_D = 0,4$ su ventiliatorine apkrova

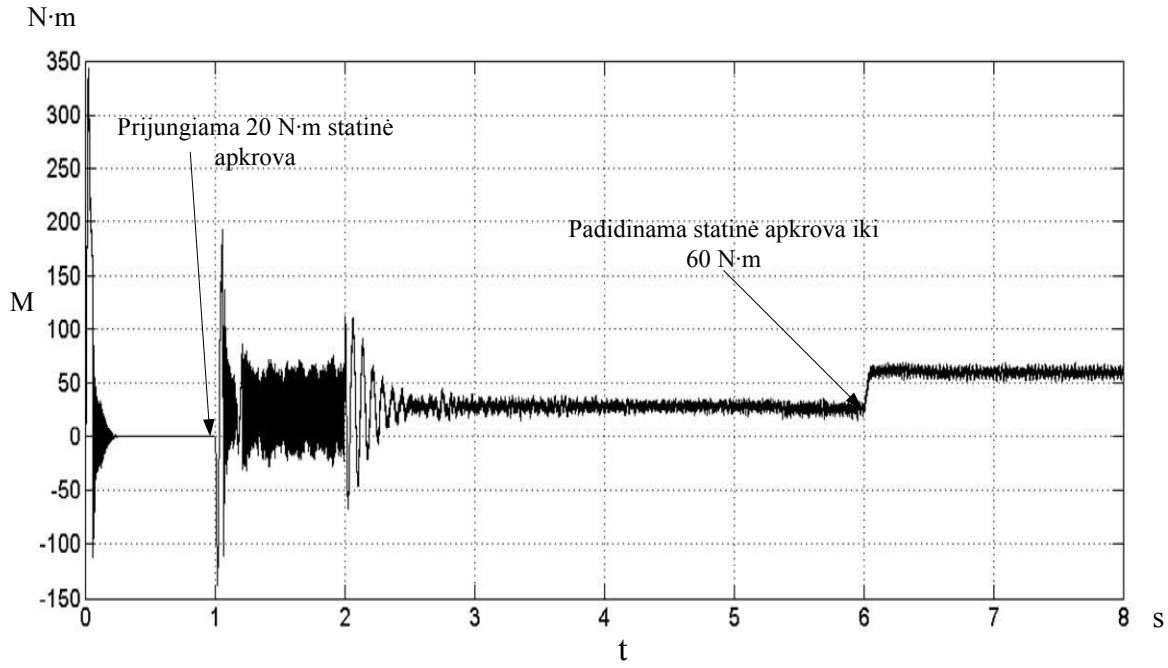


5.47 pav. Greičio pereinamojo proceso charakteristika, kai ω = 270 rad/s, $K_p = 1,6$; $K_I = 0,1$; $K_D = 0,4$ su ventiliatorine apkrova

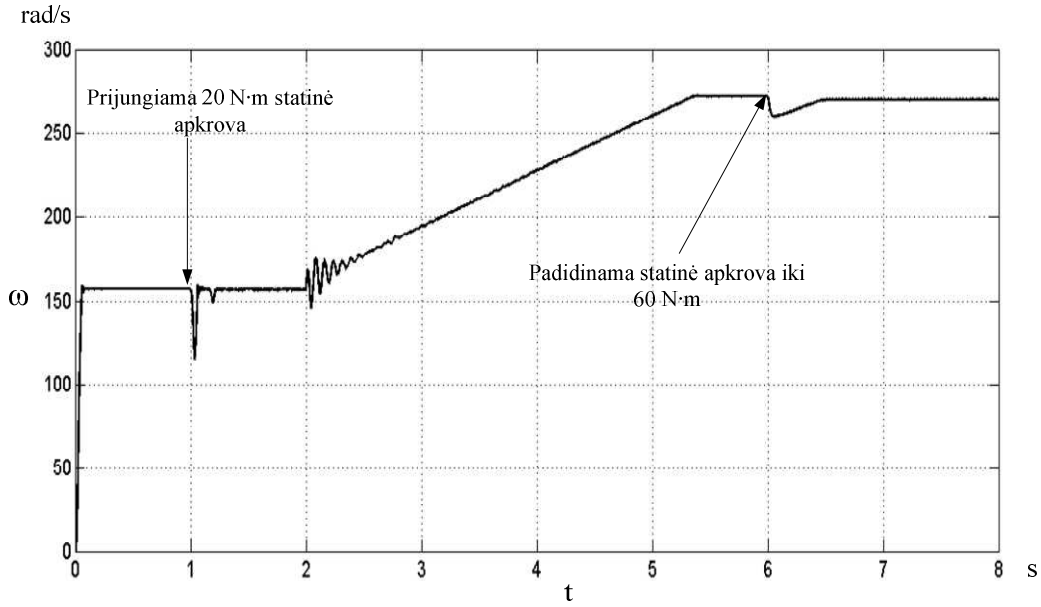


5.48 pav. Statoriaus srovės pereinamojo proceso charakteristika, kai ω = 270 rad/s, $K_p = 1,6$; $K_I = 0,1$; $K_D = 0,4$ su ventiliatorine apkrova

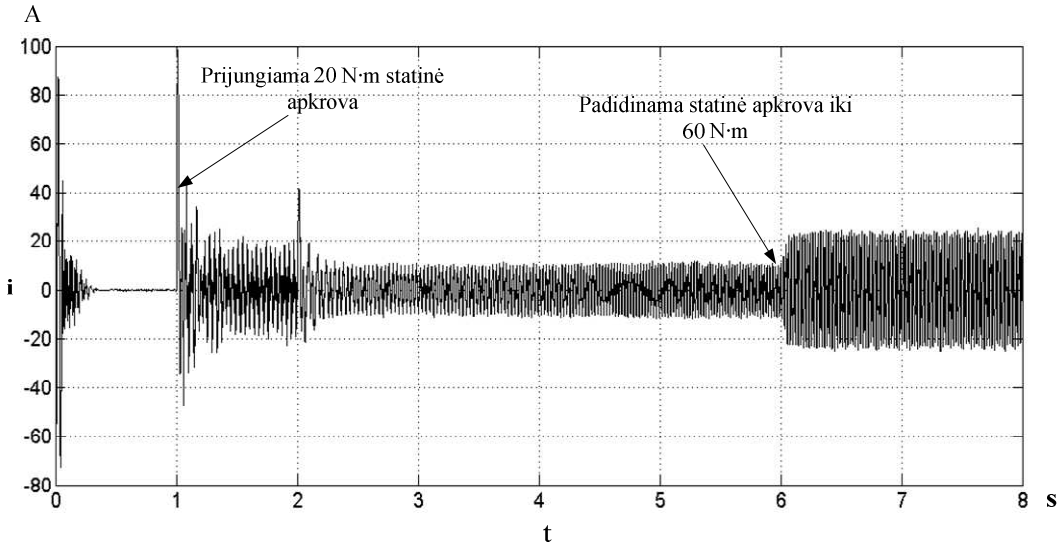
Taip pat ištirta uždaros dažninės pavaros reakcija, kai nusistovėjusiame darbo režime šuoliškai kinta greičio nuostatas su prijungta kintančia statine apkrova. Tiriamuoju atveju, pateikiamos elektromagnetinio momento, greičio ir statoriaus srovės dinaminės charakteristikos 5.49 – 5.51 pav.



5.49 pav. Elektromagnetinio momento pereinamojo proceso charakteristika, kai šuoliškai kinta statinė apkrova ir greičio nuostato signalas



5.50 pav. Greičio pereinamojo proceso charakteristika, kai šuoliškai kinta statinė apkrova ir greičio nuostato signalas



5.51 pav. Statoriaus srovės pereinamojo proceso dinaminė charakteristika, kai šuoliškai kinta statinė apkrova ir greičio nuostato signalas

Ištirtas dažninės pavaros greičio reguliavimas, kintant greičio nuostatui, PID ir PI reguliatoriaus koregavimo parametrams (P, I ir D koeficientams) ir statinės apkrovos dydžiui. Pagal uždarosios greičio reguliavimo sistemos gautus grafinius rezultatus, sudaryta rezultatų apibendrinimo 5.1 lentelė.

5.1 lentelė. Uždarosios dažninės pavaros imitacinių rezultatų suvestinė

Nustatymai		**Rezultatai**		
ω_n, rad/s	**M_a, N·m**	**$t_{p.p}$, s**	**$t_{grįžimo}$, s**	**Didžiausia greičio nuokrypio vertė, rad/s**
Su statine apkrova				
157	10	0,14	0,1	27
	20	0,14	0,95	50
270	10	0,48	0,07	13
	20	0,48	-	20
	20	0,48	0,4	20
314	10	0,65	0,04	6
Su ventiliatorine apkrova				
157	-	0,15	-	-
270	-	0,6	-	-

5.1 lentelėje pateikiami pereinamojo proceso laiko trukmės ($t_{p.p}$), greičio grįžimo (nuostato atstatymo) trukmės ($t_{grįžimo}$) ir greičio nuokrypio didžiausios vertės rezultatai. Remiantis grafiniais rezultatais, ir 5.1 pateikta lentele, suformuluojamos apibdendrinamosios išvados.

Nusistovėjusio darbo režime pavaros greičio paklaidos sumažėja, sudarius uždarojo kontūro greičio reguliavimo sistemą su *PID* reguliatoriumi (žr. 5.25 – 5.36 pav.), lyginant su atvirąja sistema. Tyrimo metu buvo siekiama palaikyti 314 rad/s, 157 rad/s ir 270 rad/s nustatytą greitį, varikliui prijungiant 10 ir 20 N·m dydžio statinę apkrovą tam tikru laiko momentu. Lyginant rezultatus, esant skirtingiems greičio nuostatams, iš gautų greičio pereinamojo proceso dinaminių charakteristikų (5.26, 5.29, 5.32, 5.35, 5.38, 5.41 pav.) matyti, kad pereinamojo proceso trukmė pasiekta beveik 70 % didesnė esant 270 rad/s nustatytam greičiui, kuri šiuo atveju lygi $t_{p.p.} \approx 0{,}48$ s, lyginant su 157 rad/s greičiu ($t_{p.p.} \approx 0{,}14$ s).

Kadangi $t_{p.p.}$ skiriasi, apkrova prijungiama po 0,3 s, kai nustatytas greitis lygus 157 rad/s, o po 1 s – esant 270 rad/s greičio nuostatui. Sprendžiant iš didžiausios greičio kritimo vertės apkrovos prijungimo momentu, matyti, kad apkrovos įtaka variklio sukimosi greičiui didesnė yra žemų greičių srityje. Greičio nuokrypio didžiausios vertės dydį įtakoja prijungiamos apkrovos M_a dydis. Kai greičio nuostatas yra 157 rad/s, tarp greičio nuokrypio didžiausių verčių matyti 54 % skirtumas. Kai greičio nuostatas yra 270 rad/s, tarp greičio nuokrypio didžiausių verčių matyti 65 % skirtumas.

Veleno statinis apkrovos dydis įtakoja greičio nuostato atstatymo (grįžimo) trukmę $t_{grįžimo}$. Prijungus 10 N·m dydžio apkrovą, esant 157 rad/s greičio nuostatui, nustatytą greitį variklis pasiekia per 0,1 s. Kai apkrova padidinama du kartus (iki 20 N·m), greičio nuokrypis PID reguliatoriuje eliminuojamas per 0,95 s. Todėl iš gautų rezultatų matyti, kad laiko trukmė skiriasi

beveik 10 kartų, esant skirtingoms apkrovos vertėms.Tačiau nusistovėjusio darbo režime matoma nežymi, iki 1 %, statinė paklaida, kai variklio apkrova viršija 45 % vardinį momentą (M_n = 13,21 N·m).

Atlikta statinės apkrovos įtakos analizė greičio atstatymo trukmei, esant 270 rad/s greičio nuostatui. Iš 5.37 – 5.42 pav. pateiktų rezultatų, matyti, jog pirmuoju atveju greičio pereinamasis procesas nusistovi su 3 % statine paklaida, o kitu atveju statinės paklaidos nebelieka. Statinės paklaidos eliminavimui PI reguliatoriaus stiprinimo koeficientas (proporcinė dedamoji) buvo padidinta 2 kartus. Nelikus statinės paklaidos, greičio nuostatas pasiekiamas per 0,4 s.

Iš elektromagnetinio momento ir statoriaus srovės pereinamojo proceso charakteristikų galima įžvelgti atsiradusius švytavimus su tam tikro dydžio pulsacijų amplitude ir dažniu, esant nuolat prijungtai apkrovai. Didėjant apkrovos dydžiui, amplitudė ir dažnis proporcingai didėja.

Remiantis 5.25, 5.28, 5.31, 5.34, 5.37 pav. gautais elektromagnetinio momento rezultatais, maksimalus paleidimo momentas siekia 120 N·m vertę, kai greitis lygus 157 rad/s, ir 50 N·m vertę – kai greitis lygus 270 rad/s. Lyginant su vardiniais asinchroninio variklio parametrais, pateiktais 1 lentelėje, esant 157 rad/s greičiui ši vertė viršijama apytiksliai 9 kartus, o antruoju atveju prie 270 rad/s – su nedidele paklaida pasiekiamas beveik 4 kartų skirtumas. Didelis skirtumas galimas dėl variklio induktyvumų, tačiau tai trunka apytiksliai iki 5 ms (žr. 5.28 ir 5.31 pav.), kai variklio rotorius dar nejuda.

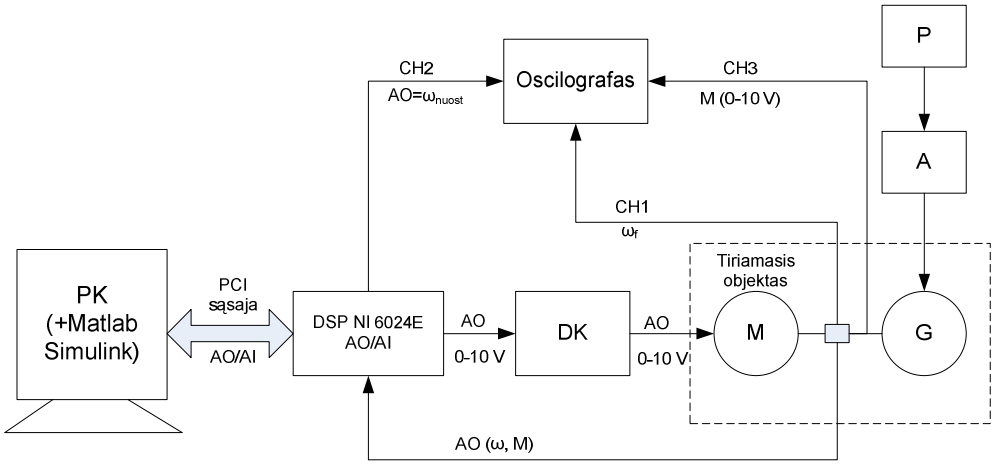
Atlikta *PID* reguliatoriaus koregavimo parametrų (P, I ir D koefiecientų) įtaka dažninės pavaros greičio pereinamiesiems procesams. 5.28 – 5.42 pav. pateikti pavaros dinamikos rezultatai su *PID ir PI* reguliatoriais. Iš pateiktų rezultatų matyti, jog pavaros pereinamųjų procesų stabilumą bei švytavimų dažnį ir amplitudę įtakoja diferencialinė (D) reguliatoriaus dedamoji. Akivaizdu, kad šią reguliatoriaus dedamąją tikslinga naudoti, esant mažiems greičiams. Šiuo atveju maža greičio vertė lygi 157 rad/s. Priešingu atveju, t.y. kai nuostatas lygus 270 rad/s – pereinamiesiems procesams diferencialinė dedamoji įtakos beveik neturi.

Paleidžiant asinchroninę dažninę pavarą su ventiliatorine apkrova, remiantis 5.43 – 5.48 pav. gautais imitaciniais rezultatais, sklandesnis paleidimas vyksta su *PID* reguliatoriumi. Paleidimo metu, 5.44 pav. matomas iki 2 % perreguliavimas. Paleidimo trukmė skiriasi 4 kartus, kai greičio nuostatas yra 157 rad/s ir 270 rad/s.

5.49 – 5.51 pav. pateikiami imitaciniai rezultatai, kai 5 kartus padidinamas variklio inercijos momentas J. Galima pastebėti, jog sumažėja pereinamojo proceso trukmė, tačiau mažų greičių srityje paleidimo momentas stipriai išauga. Pavaros reakcija į apkrovos poveikį nežymiai sumažėja. 157 rad/s greičio diapazone po 1 s prijungiama 20 N·m dydžio apkrova, o 270 rad/s diapazone po 6 s pavara jau veikia su 60 N·m apkrova. Matyti, jog imitacinė dažninė pavara dar gali veikti su 60 N·m dydžio apkrova, kai yra padidintas variklio veleno inercijos momentas.

5.3. Eksperimentiniai bandymai

Eksperimentinių bandymų struktūrinė schema pateikta 5.52 pav. Remiantis šia struktūra buvo gautos, toliau pateiktos, tiriamojo objekto dinaminės charakteristikos.



5.52 pav. Eksperimentinio stendo struktūrinė schema

5.52 pav. pateikta struktūrinė schema sudaryta iš šių elementų:

PK – personalinis kompiuteris, formuojantis valdymo signalus bei priimantis Matlab Simulink terpėje;

PCI – sąsaja, skirta analoginės įvesties/išvesties plokštės komunikacijai su PK;

DSP NI 6024E - *"National Instruments"* gamintojo analoginių kanalų (įvesties/išvesties) sujungimo blokas;

DK – dažnio keitiklis, priimantis analoginius įėjimo signalus bei formuojantis analoginius išėjimo signalus varikliui (struktūroje žymimas M) 0÷10 V DC ribose;

M – 4 kW galios trifazis asinchroninis variklis;

G – nuolatinės srovės generatorius;

A – apkrova, kurią sudaro 6 x 1 kW kaitinimo lempos. Vardinis šio variklio galimas stabdymo/apkrovos momentas $M_n \approx 13$ N·m. Analoginiu signalu lygmenyje šis apkrovos dydis atitinka 0,63 V DC.

P – rankiniu būdu reguliuojamas potenciometras, kurio išėjime suformuojamas valdymo signalas kaitinimo lempoms, tuo būdu jas įjungiant/išjungiant. Kaitinimo lempomis apkraunamas generatorius (G).

Struktūroje operuojama šiais pagrindiniais signalais:

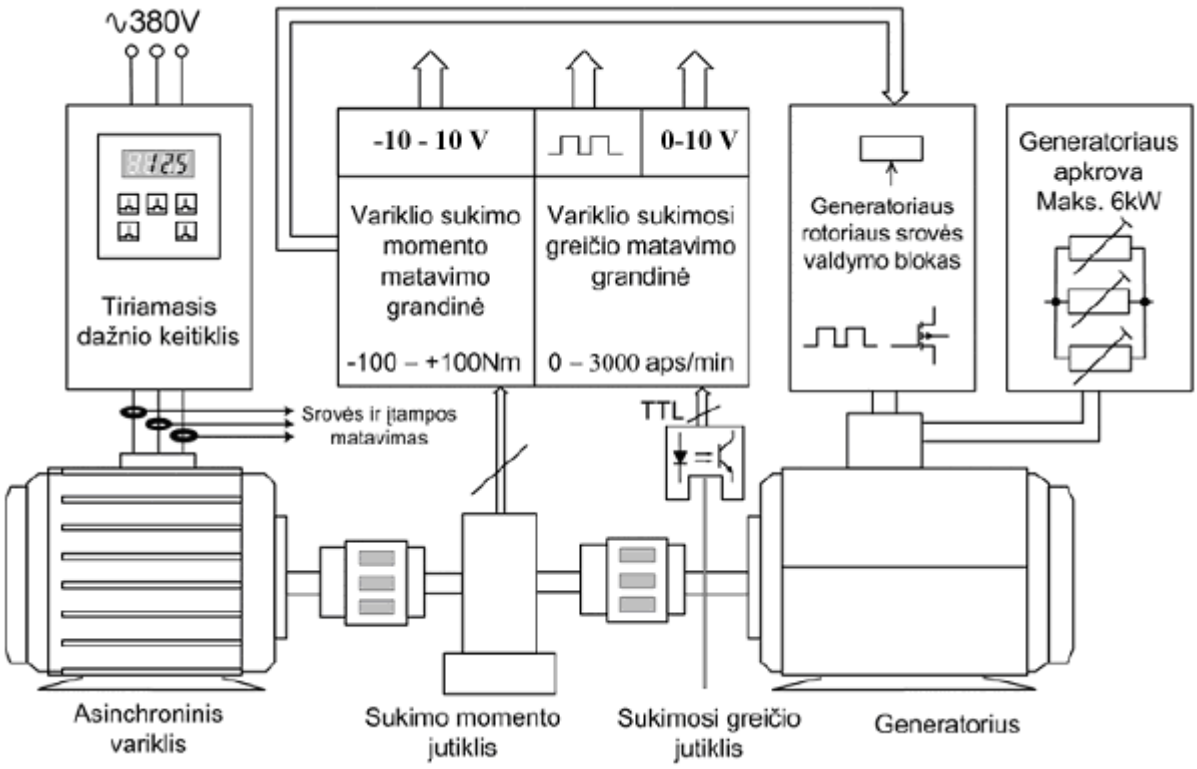
ω_{nuost} – greičio nuostatas įtampa 0÷10 V (proporcingai tai atitinka 0÷2890 aps./min variklio sukimosi greitį);

ω_f – faktinis variklio sukimosi greitis įtampų 0÷10 V ribose;

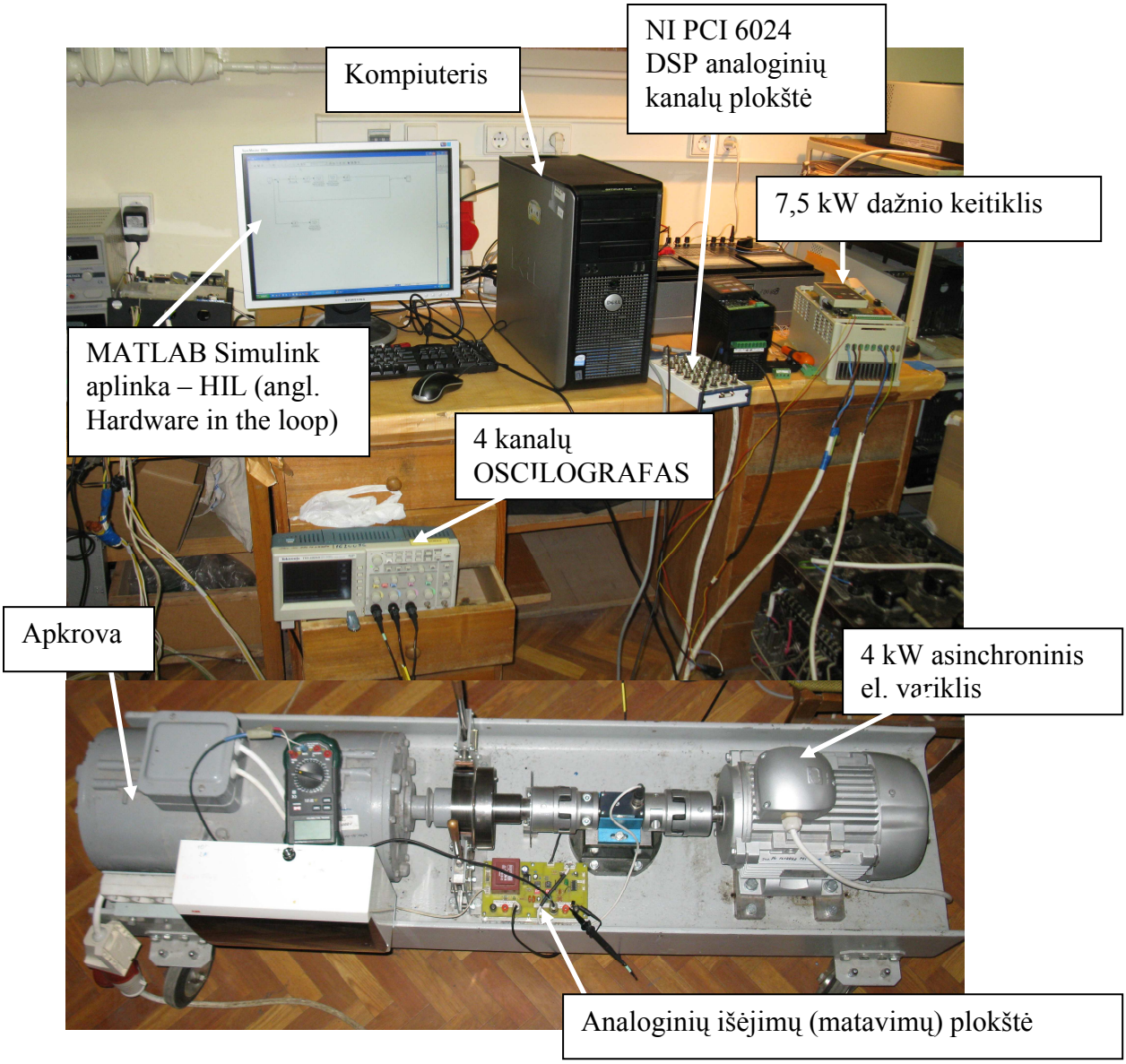
M – sukimo momento matavimo grandinė tiekia analoginį signalą (įtampą 0÷10 V), proporcingą elektromagnetiniam variklio momentui *M*.

Pateikti signalai perduodami CH1, CH2, CH3 kanalais į oscilografą tolimesniems sistemos pereinamiesiems procesams analizuoti.

Tyrimo stendo detalizuota schema pateikta 5.53 pav., o realiai naudojamos įrangos vaizdas – 5.54 pav. Stendą sudaro: asinchroninis variklis, maitinamas tiriamuoju dažnio keitikliu; nuolatinės srovės generatorius, veikiantis kaip reguliuojama variklio mechaninė apkrova; generatoriaus rotoriaus srovės valdymo blokas; generatoriaus elektrinė apkrova; sukimo momento, sukimosi greičio ir variklio srovės matavimo jutikliai; sukimo momento ir sukimosi greičio matavimo grandinės. Variklio apvijų srovei matuoti naudojami jutikliai, matuojantys bekontakčiu būdu.



5.53 pav. Dažninės pavaros (tyrimo stendo) struktūrinė schema [14]



5.54 pav. Eksperimentinių bandymų įranga

Variklio veleno mechaninė apkrova yra nustatoma rankiniu būdu, diskretiškai keičiant generatoriaus elektrinę apkrovą arba tolydžiai keičiant generatoriaus inkaro srovę. Nuolatinės srovės variklis apkraunamas, į inkaro grandinę įjungus 1 kW arba 2 kW galios kaitinimo lempas, tada yra sukuriamas elektromagnetinis stabdymo momentas M_a. Veleno sukimosi greitis proporcingai mažėja.

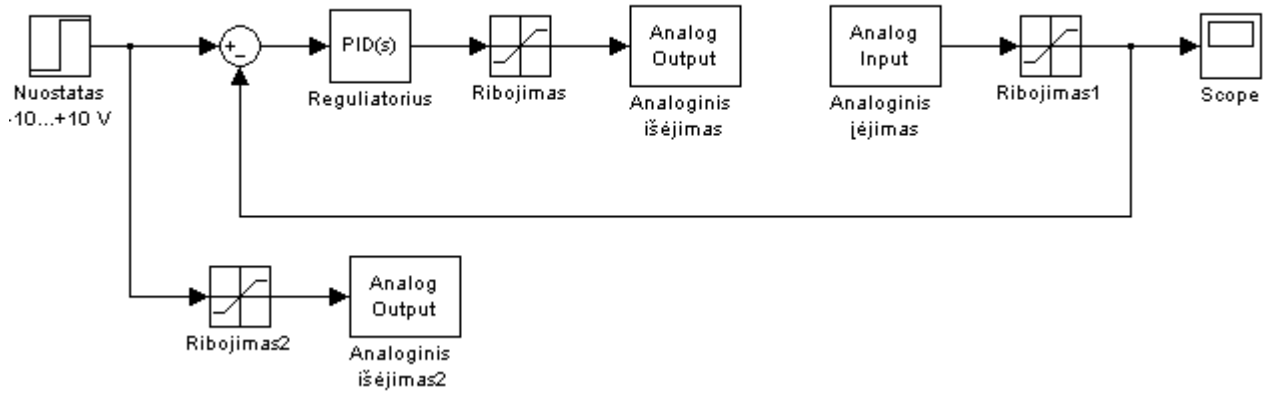
Greitis gali būti reguliuojamas automatiniu būdu, uždaroje valdymo sistemoje, taip, kad generatorius varikliui sudarytų mechaninę apkrovą su pastoviu momentu M, nepriklausomu nuo f_p, arba momentas kistų pasirinktu dėsniu, kintant f_p. Greičio atstatymui panaudoti *PI* arba *PID* reguliavimo dėsniais pagrįsti reguliatoriai.

Tyrimo stendu buvo tiriama pavara su 7,5 kW galios dažnio keitikliu, skirtu ventiliatorių ir siurblių asinchroninių variklių valdymui. Tiriamajame stende sumontuotas dviejų polių (viena polių pora) 4 kW galios asinchroninis elektros variklis, kuris yra pagrindinis valdomasis objektas.

5.3.1. Uždarosios skaliarinio valdymo dažninės pavaros su reguliatoriais sudarymas

Dažninės asinchroninės pavaros eksperimentinis greičio reguliavimas realizuotas matematinio modeliavimo *Matlab SIMULINK* terpėje. Šiam reguliavimui pritaikytas *„Hardware in the loop“ – HIL* (vertimas iš anglų kalbos neatliktas) technika.

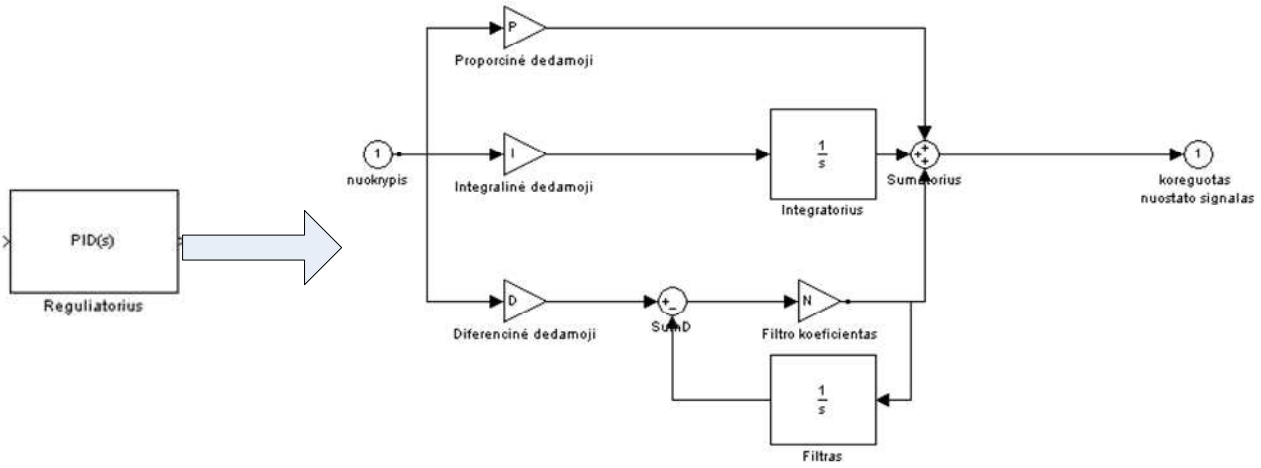
Variklio sukimosi greičio nuostatas įvedamas 5.55 pav. pateiktoje *SIMULINK* aplinkoje sumodeliuotoje struktūroje. Nuostato parametras yra nuolatinė įtampa -10 ÷ 10 V ribose. Šis nuolatinės įtampos diapazonas proporcingai atitinka -314 ÷ 314 rad/s (vardiniame variklio sukimosi greičio režime) greičių diapazoną.



5.55 pav. Dažninės asinchroninės pavaros uždarosios greičio reguliavimo sistemos *SIMULINK* modelis

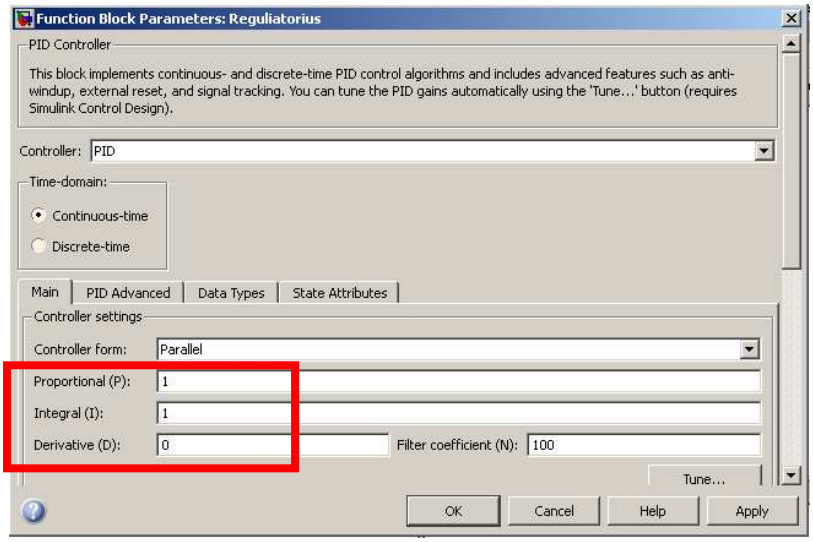
Faktinis variklio sukimosi greičio signalas grįžtamuoju ryšiu sumuojamas su nuostato verte. Sumatoriuje suformuotas signalų skirtumas eliminuojamas su parinktu *PI* arba *PID* reguliatoriu, taip palaikant nustatytą greičio vertę. Grįžtamojo ryšio signalas (įtampa -10...+10 V) perduodamas į stendą sumontuotoje elektroninėje valdymo plokštėje. Tam tikslui iš *SIMULINK* elementų duomenų bazės panaudoti *„analog_output“* ir *„analog_input“* funkciniai elementai. *„Analog_output“* ir *„analog_input“* atitinka *DSP NI 6024E* sujungimo bloką. Reguliatoriuje suformuotas koreguotas valdymo signalas patenka į analoginio išėjimo elementą, toliau perduodamas šį signalą dažnio keitikliui (DK).

PID(s) reguliatoriaus funkcinis blokas (tipinė *SIMULINK* posistemė) sudarytas iš tam tikrų elementų, kuriais galimas *PI* arba *PID* reguliavimo dėsnių realizavimas, kurie pateikti 5.56 pav.



5.56 pav. *PID* reguliatoriaus struktūra

Kaip matyti iš 5.56 pav., yra galimybė pritaikyti ne tik *PID* (proporcingai integruojantį diferencijuojantį) reguliavimo algoritmą, bet ir kitokio pobūdžio algoritmus. Reguliavimo dėsnio / algoritmo formavimas atliekamas keičiant P, I ir D signalo nuokrypio koregavimo parametrus (koeficientus) *SIMULINK* lange, pateiktame 5.57 pav.



5.57 pav. Reguliatoriaus koeficientų įvedimo langas

Kad sistemoje būtų realizuotas *PI* reguliavimo dėsnis, diferencialinei (D) dedamajai turi būti įvesta nulinė vertė (šiuo atveju pateikta paryškintu kontūru pažymėtame langelyje). Atitinkamai formuojamas ir kitokio pobūdžio reguliavimo dėsnis. Tokiu būdu atliekamas reguliatoriaus derinimas, atsižvelgiant į tiriamojo objekto kintančius parametrus paleidimo ir nusistovėjusiame darbo režime.

Analogiškai imitaciniam atvejui, greičio grįžtamuoju ryšiu palyginamas faktinis varikio sukimosi greitis su nuostatu, kur sumatoriuje suformuotas paklaidos signalas koreguojamas PI arba *PID* reguliatoriumi. Šiuo atveju panaudotas tolydusis reguliatorius. Nuostato signalo reikšmė

apribojama bloku *Ribojimas* (angl. *Saturation).* Jame parenkama maksimali ir minimali operuojamų signalų vertė – galimas greičio kitimo diapazonas.

Greičio nuokrypio vertė priklauso nuo apkrovos momento vertės, kuri nustatoma potenciometru reguliuojant kaitinimo lempų galią nuo 1 kW iki 6 kW (tai yra didžiausia leistina apkrovos galios riba). Variklio greitis, pridėjus apkrovą, atstatomas tik per tam tikrą laiką, o ne iškart, kadangi tyrimo stendas pritaikytas ne itin greitaeigiškų technologinių procesų realizavimui.

5.4. Eksperimentinių tyrimų rezultatai ir analizė

Dažninės pavaros dinaminiai pereinamieji procesai gauti, keičiant reguliatoriaus koeficientų vertes, nuostato signalą bei apkrovus pavarą 1 kW arba 2 kW galia (potenciometru įjungiamos viena arba dvi kaitinimo lempos). Variklio sukimosi greičio nuostatas yra įtampa 5 V ir 8,6 V, kuri perduodama analoginiais dažninės pavaros kanalais į dažnio keitiklį. Realus variklio sukimosi greitis prie 5 V yra 157 rad/s, o prie 8,6 V – 270 rad/s.

Realios elektromagnetinių momentų vertės išreiškiamos taip:

$$1\ \mathrm{N\cdot m} = 50\ \mathrm{mV};$$ **Equation Section 5** (5.1)

Iš (5.1) išraiškos proporcingai išreiškiamas momentinis (trumpalaikis smūginis) momentas [N·m].

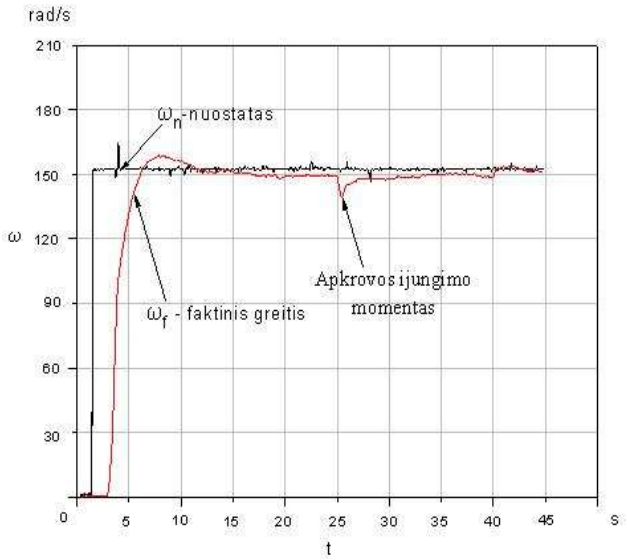
Tariama, kad apkrovos įjungimo momentu analoginis momento signalas lygus 1000 mV (žr. pirmojo eksperimentinio bandymo eksperimentinius rezultatus (5.52 pav.)):

$$530\ \mathrm{mV} \approx M_a = 10\ \mathrm{N\cdot m}. \qquad (5.2)$$

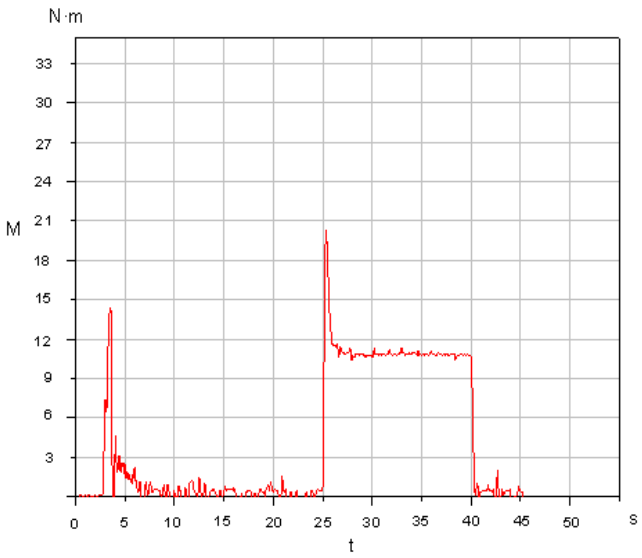
Tokiu būdu proporcingai pakeičiami ir kitų bandymų elektromagnetinio momento vertės. Tačiau toliau grafikuose vertės nurodomos ir nusistovėjusios elektromagnetinio momento.

Gautos ir pateiktos greičio pereinamojo proceso eksperimentinės charakteristikos, esant skirtingoms apkrovomos, skirtingiems reguliatoriaus koeficientams ir esant skirtingam greičio nuostatui. Pateiktos dinaminės charakteristikos atitinka realų tiriamojo objekto veikimą. a) ir b) pav. atitinka apdorotas kreives, naudojant „Origin 8.0“ programą, tuo tarpu c) paveikslas – oscilografo ekrane gautas eksperimentinių rezultatų vaizdas. Kreivės apdorojamos, siekiant sumažinti sistemoje atsiradusius trukdžius („elektrinius triukšmus“). Pradinė variklio sukimosi greičio nuostato vertė lygi 157 rad/s (įtampa lygi 5 V).

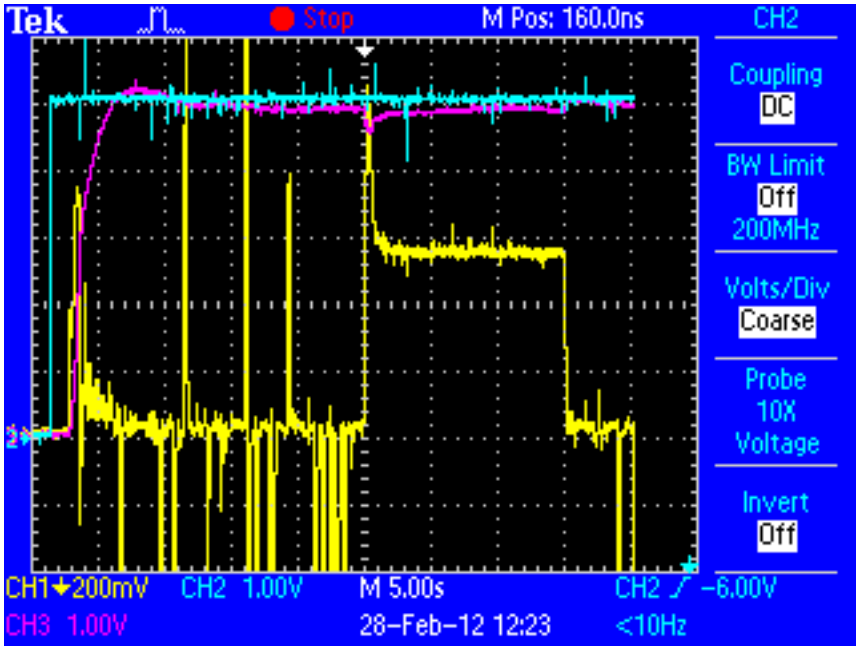
5.58 pav. pateikiamos eksperimentinės pavaros dinaminės charakteristikos, kai reguliatoriaus koeficientai yra lygūs: $K_P = 0,8$, $K_I = 0,6$, $K_D = 0,5$ – *PID* reguliatorius, o elektrinės apkrovos galia lygi $P_a = 2$ kW.



a)



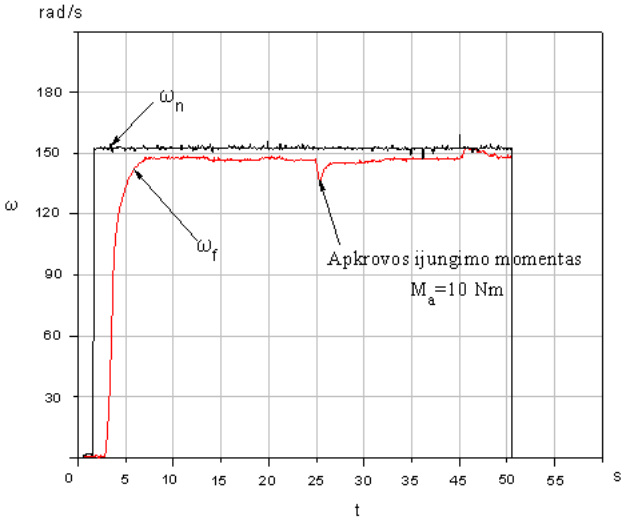
b)



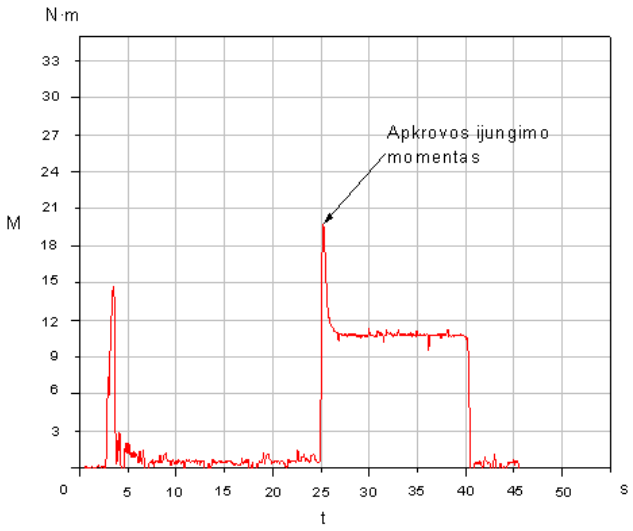
c)

5.58 pav. Eksperimentinės charakteristikos prijungiant apkrovą $M_a = 10$ N·m, kai reguliatoriaus koeficientai $K_P = 0,8$, $K_I = 0,6$, $K_D = 0,5$: a) greičio grįžtamojo ryšio signalo reakcijos kreivė; b) elektromagnetinio momento kreivė, c) realus vaizdas oscilografe

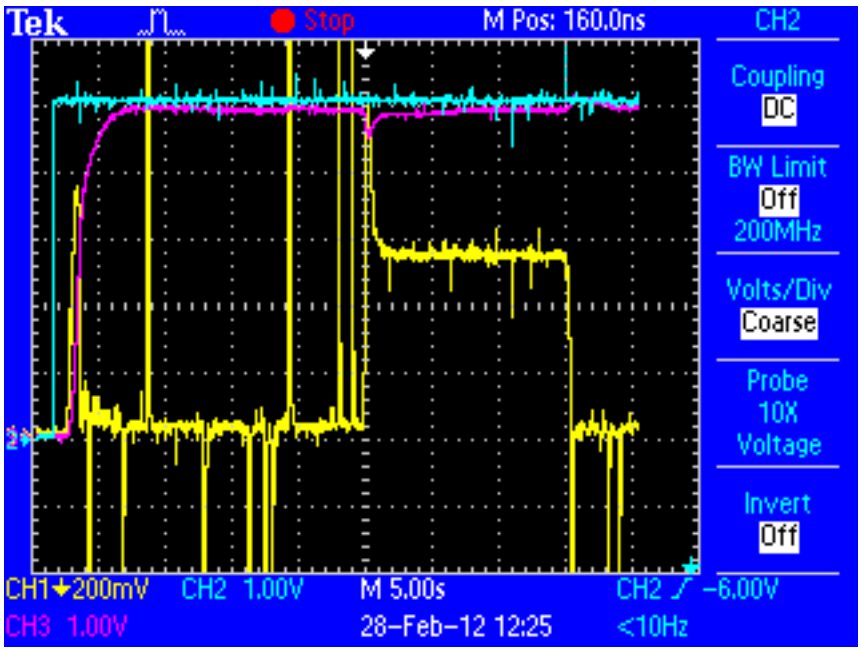
5.59 pav. pateikiamos eksperimentinės pavaros dinaminės charakteristikos, kai reguliatoriaus koeficientai yra lygūs: $K_P = 0,8$, $K_I = 0,8$, $K_D = 0,5$ – *PID* reguliatorius, o elektrinės apkrovos galia lygi $P_a = 2$ kW.



a)



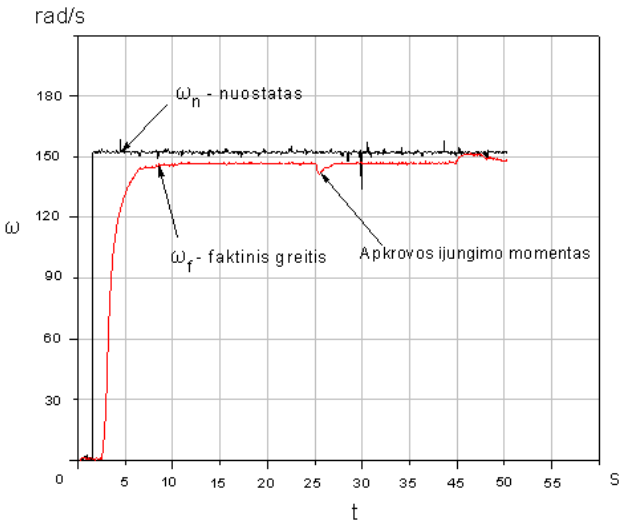
b)



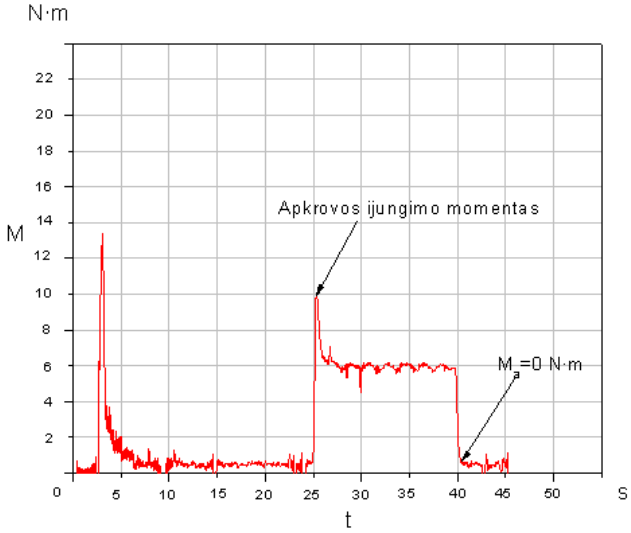
c)

5.59 pav. Eksperimentinės charakteristikos įjungiant apkrovą $M_a = 10$ N·m, kai reguliatoriaus koeficientai $K_P = 0,8$, $K_I = 0,8$, $K_D = 0,5$: a) greičio grįžtamojo ryšio signalo reakcijos kreivė; b) elektromagnetinio momento kreivė, c) realus vaizdas oscilografe

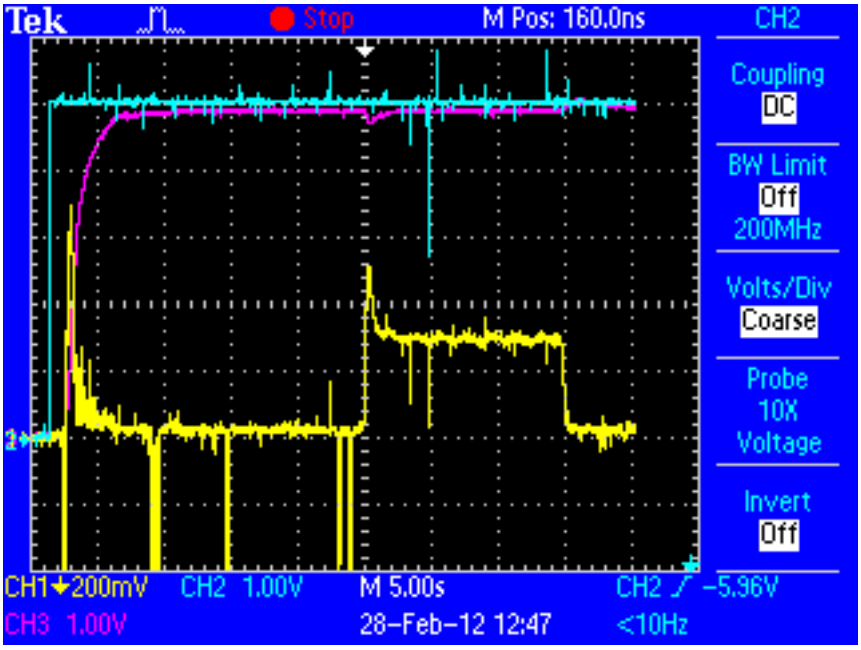
5.60 pav. pateikiamos eksperimentinės pavaros dinaminės charakteristikos, kai reguliatoriaus koeficientai yra lygūs: K_P = 0,5, K_I = 0,2 – *PI* reguliatorius, o elektrinės apkrovos galia lygi P_a = 1 kW.



a)



b)

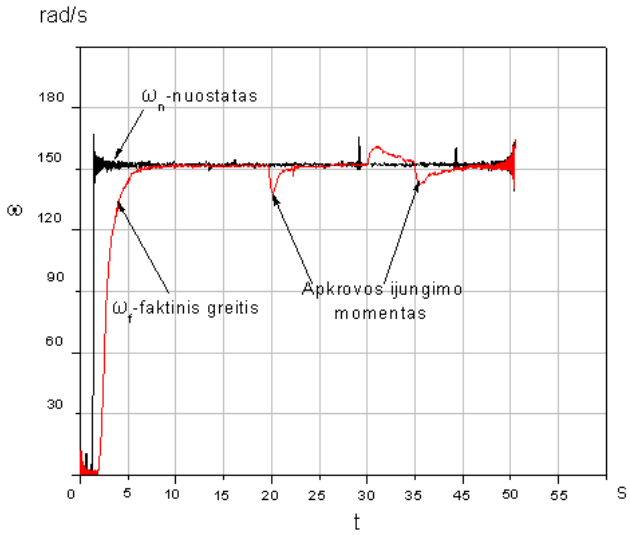


c)

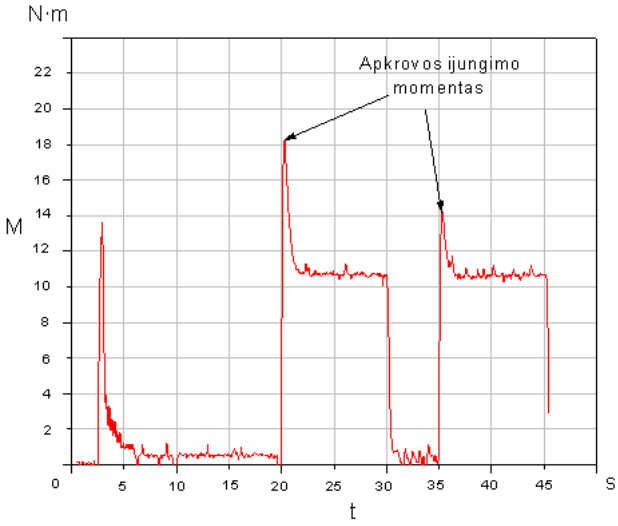
5.60 pav. Eksperimentinės charakteristikos įjungiant apkrovą M_a = 6 N·m, kai reguliatoriaus koeficientai K_P = 0,5, K_I = 0,5: a) greičio grįžtamojo ryšio signalo reakcijos kreivė; b) elektromagnetinio momento kreivė, c) realus vaizdas oscilografe

Pavarai dirbant trumpalaikių apkrovų režimu gauti eksperimentiniai rezultatai pateikti 5.61 pav. ir 5.62 pav.

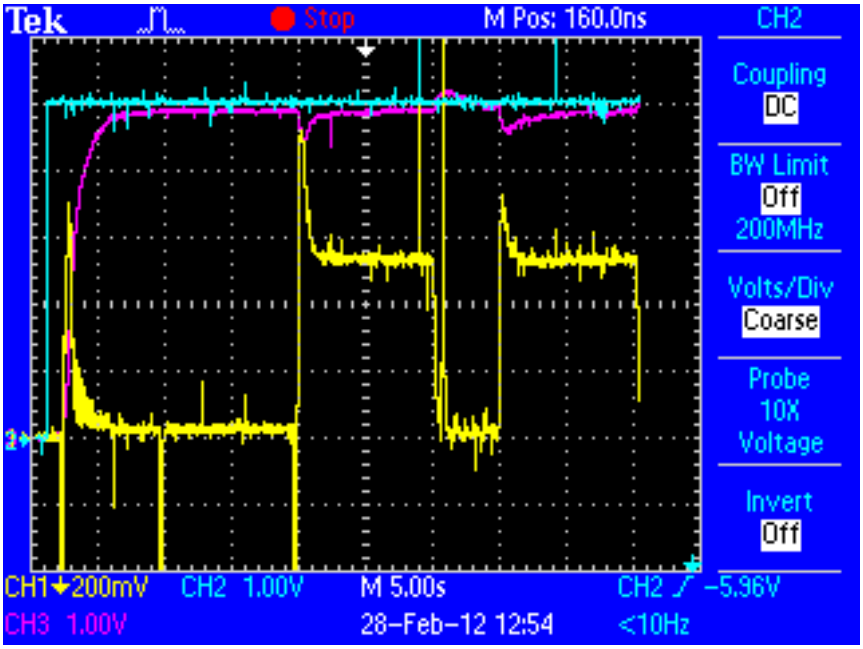
5.61 pav. pateikiamos eksperimentinės pavaros dinaminės charakteristikos, kai reguliatoriaus koeficientai yra lygūs: K_P = 0,8, K_I = 0,5 – *PI* reguliatorius, o elektrinės apkrovos galia lygi P_a = 2 kW.



a)



b)

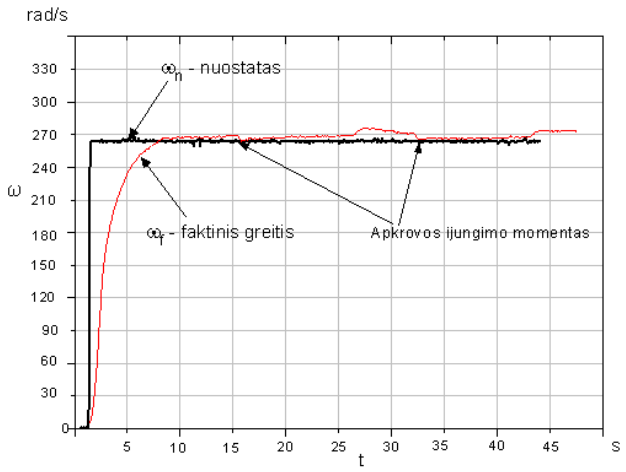


c)

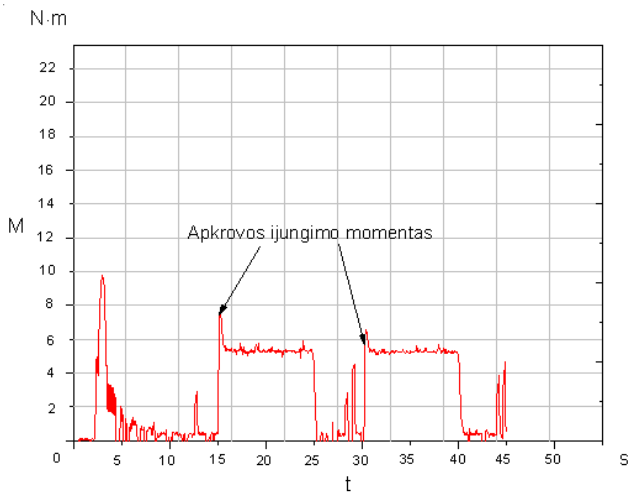
5.61 pav. Eksperimentinės charakteristikos įjungiant apkrovą M_a = 10 N·m, kai reguliatoriaus koeficientai K_P = 0,8, K_I = 0,5: a) greičio grįžtamojo ryšio signalo reakcijos kreivė; b) elektromagnetinio momento kreivė, c) realus vaizdas oscilografe

Eksperimentinė dažninė pavara taip pat ištirta esant didesniam greičio nuostatui. Greičio nuostato vertė padidinta ~30% nuo pradinės vertės (157 rad/s) iki 270 rad/s. Pavaros dinaminiai pereinamieji procesai gauti analogiškai kaip ir prie mažų greičių nuostato.

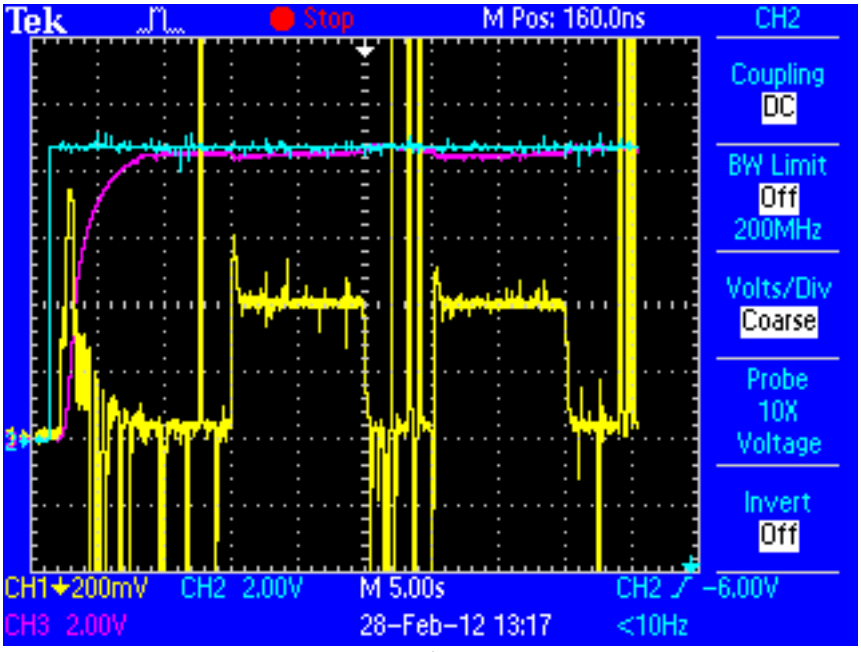
5.62 pav. pateikiamos eksperimentinės pavaros dinaminės charakteristikos, kai reguliatoriaus koeficientai yra lygūs: K_P = 0,8, K_I = 0,4 – *PI* reguliatorius, o elektrinės apkrovos galia lygi P_a = 2 kW.



a)



b)



c)

5.62 pav. Eksperimentinės charakteristikos įjungiant apkrovą M_a = 6 N·m, kai reguliatoriaus koeficientai K_P = 0,8, K_I = 0,4,: a) greičio grįžtamojo ryšio signalo reakcijos kreivė; b) elektromagnetinio momento kreivė, c) realus vaizdas oscilografe

Eksperimentinių charakteristikų realiame oscilografo vaizde (c) pagal spalva atitinka šie tiriamieji variklio parametrai:

- Geltona spalva – elektromagnetinis sukimo momentas;
- Mėlyna spalva – greičio nuostato signalas;
- Raudona spalva – faktinis variklio sukimosi greitis.

Eksperimentinių tyrimų metu apkrova įjungiama, pavarai veikiant nusistovėjusiu darbo režimu po 25 s. Priklausomai nuo parinktų reguliatoriaus koeficientų, atitinkamai kinta ir greičio pereinamojo proceso perreguliavimas, kurį pagrinde įtakoja integralinė (I) reguliatoriaus dedamoji. Greičio nuostato palaikymo tikslumui koeficientų įtaka iš esmės yra nedidelė. Didelis greičio palaikymo tikslumas nepasiekiamas dėl signalų priėmimo ir perdavimo vėlinimo įtakos analoginiuose sąsajų kanaluose. Todėl 5.58 – 5.60 pav. greičio pereinamuosiuose procesuose matoma iki 6 % statinė paklaida.

Iš gautų imitacinių elektromagnetinio momentų rezultatų (žr. 5.58 – 5.62 pav.), matyti, jog skirtingai nei imitaciniuose rezultatuose, pradinis paleidimo momentas nesiekia net 1,5 karto skirtumo nuo vardinės elektromagnetinio momento vertės.

Kadangi tiriamajame dažnio keitiklyje techninės galimybės neleidžia pasiekti nusistovėjusį darbo režimą ne greičiau nei 2 s, iš gautų rezultatų matyti, jog greičio nuostatas pasiekiamas apytiksliai per 10 s. Įgreitėjimo trukmė ribojama, siekiant išvengti variklio perkrovimo. Lyginant su imitaciniais rezultatais, pereinamojo proceso trukmė skiriasi nuo 94 % iki 99 %.

6. IŠVADOS

1. Tiriamajame darbe sudaryti skaliariškai valdomų atvirosios ir uždarosios sistemos dažninių asinchroninių pavarų kompiuteriniai modeliai, skirti variklio greičio, elektromagnetinio momento ir srovės imitaciniams tyrimams atlikti.
2. Pateikti imitaciniai ir eksperimentiniai dažninės asinchroninės pavaros rezultatai (elektromagnetinio momento, greičio ir statoriaus srovės dinaminės charakteristikos). Atlikta detali rezultatų analizė rodo, kad nusistovėjusio režimo ir dinaminės paklaidos priklauso nuo reguliatoriaus suderinimo parametrų.
3. Prijungus varikliui vardinę apkrovą, atviroje sistemoje statinė paklaida padidėja iki 6 %, esant 157 rad/s greičio nuostatui.
4. Esant skirtingiems greičio nuostatams, pereinamojo proceso trukmė yra beveik 70 % didesnė, kai greičio nuostatas yra 270 rad/s, kuri šiuo atveju lygi $t_{p.p.} \approx 0{,}48$ s, lyginant su 157 rad/s greičiu ($t_{p.p.} \approx 0{,}14$ s).
5. Didžiausia greičio nuokrypio vertė, apkraunant pavarą, priklauso nuo prijungiamos apkrovos M_a dydžio.
6. Kai greičio nuostatas yra 157 rad/s, tarp greičio didžiausių nuokrypio verčių yra 54 % skirtumas, esant 10 N·m ir 20 N·m apkrovos vertėms.
7. Kai greičio nuostatas yra 270 rad/s, tarp greičio didžiausių nuokrypio verčių matyti 65 % skirtumas, esant 10 N·m ir 20 N·m apkrovos vertėms.
8. Veleno statinė apkrova įtakoja variklio greičio atstatymo pereinamojo proceso trukmę.
9. Didėjant apkrovos dydžiui, elektromagnetinio momento ir srovės pereinamųjų procesų amplitudė bei dažnis proporcingai didėja, veikiant pavarai nusistovėjusiu darbo režimu.
10. Pavaros dinamikos rezultatų, su *PID ir PI* reguliatoriais, analizė rodo, kad pavaros pereinamojo proceso maksimali dinaminė nuokrypa priklauso nuo integralinės dedamosios.
11. Paleidžiant pavarą su ventiliatorine apkrova, paleidimo trukmė priklauso nuo skirtingų greičio nuostatų ir skiriasi 4 kartus.
12. Eksperimentiniai rezultatai rodo, kad greičio pereinamojo proceso trukmė apytiksliai lygi 10 s.

7. LITERATŪRA IR KITI ŠALTINIAI

1. Rinkevičienė R., Petrovas A. Mechatroninių sistemų modeliavimas. Mokomoji knyga. Vilnius: leidykla „Technika“, 2008, 165 p.
2. Rinkevičienė R., Lisauskas S. Tiesiaeigių mechatroninių sistemų modeliai. Straipsnis. Elektronika ir elektrotechnika. Vilnius: 2003, Nr. 4(46), 5 p.
3. Batkauskas V. Dažninių elektros pavarų dinaminiai modeliai. Daktaro disertacija. Elektros ir elektronikos inžinerija. Vilnius: leidykla „Technika“, 2010, 96 p.
4. Bose Bimal K. Modern Power Electronics and AC drives. New Jersy: Prentice Hall, 2002, 738 p.
5. Barnes M. Practical variable speed drives and power electronics. Great Britain: Oxford, 2003, 299 p.
6. Bolton W. Mechatronics. Electronic control systems in mechanical and electrical engineering 3rd Edition. England, 2003, 567 p.
7. Geleževičius V., Kriščiūnas K., Kubilius V. Elektros pavarų valdymo sistemos. Vilnius: leidykla „Mokslas“, 1990 m., 357 p.
8. Jenkinas P. Tiesiaeigės dažninės pavaros tyrimas. Magistro baigiamasis darbas. Vilnius, 2004.
9. Masteika R. K. Elektros pavaros: teorija, schemos, projektavimas, uždaviniai, pavyzdžiai. Kaunas: KTU, 2003, 127 p.
10. Petrovas A. Trifazių asinchroninių variklių dinaminiai modeliai. Daktaro disertacija. Vilnius, 2007 m., 106 p.
11. Baškys A. Dažnio keitiklių tyrimo stendas. Mokslinės konferencijos darbai. Vilnius, 2007.
12. Smilgevičius A. Automatikos mikromašinos. Vilnius: leidykla „Technika“, 2005, 343 p.
13. Internetinė enciklopedija. Prieiga per internetą: http://en.wikipedia.org. [žiūrėta 2010-10-26]
14. Baškys A. Specializuotas dažnio keitiklis. Mokslinės konferencijos darbai. Vilnius, 2008, 4 p.
15. Dažninės pavaros. Internetinė prieiga: http://www.joliettech.com/what_is_a_variable_frequency_drive-how_vfd_works.htm. [Žiūrėta: 2010-11-15]
16. Kintamosios srovės elektros pavarų simuliacija Matlab Simulink aplinkoje. Internetinė prieiga: http://www.mathworks.com/help/toolbox/physmod/powersys/ug/f4-23133.html. [žiūrėta 2010-11-27]
17. Kintamo dažnio elektros pavaros. Internetinė prieiga: www.sea.siemens.com/step/pdfs/acd_2.pdf. [žiūrėta: 2010-11-15]

18. Skaliarinio valdymo algoritmu veikiantis kintamosios srovės variklio valdymo stendas. Internetinės prieigos nuoroda į straipsnį: http://cache.freescale.com/files/32bit/doc/app_note/AN3000.pdf. [žiūrėta: 2010-11-27]
19. Dažniu valdomų pavarų modeliai. Impulsų pločio moduliacija. Internetinės prieigos nuoroda į straipsnį: www.ab.com/drives/techpapers/PWMDrives01.pdf**.** [žiūrėta: 2010-11-27]
20. Skaliarinio ir vektorinio valdymo režimų palyginimai. Internetinės prieigos nuoroda į straipsnį: http://www.drivesmag.com. [žiūrėta: 2010-11-27]
21. AL-JUFOUT S., KHANDAKJI K. Dynamic simulation of starting and chopper speed control of wound-rotor induction motor. Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Tafila Technical University, Tafila, Jordan, 2008, 7 p.
22. Lenart Ljung, Torkel Glad. Modelling of dynamic systems. Prentice Hall, Inc. 1997, 361 p.
23. Dažniu valdomų pavarų pagrindai. Internetinės prieigos nuoroda į straipsnį: www.kilowattclassroom.com/Archive/VFDarticle.pdf**.** [žiūrėta: 2010-11-28]
24. Dažninės elektros pavaros. Internetinės prieigos nuoroda į straipsnį: www.carriercca.com/Supporting_Doc/.../wp_varfreqdrive.pdf. [žiūrėta: 2010-11-28]
25. T.Lehtla. Parameter identification of an induction motor using fuzzy logic controller. Straipsnis. Estija: TTU, 2008, 10 p.
26. Kintamosios srovės pavarų pagrindai – inverterių rūšys. Internetinės prieigos nuoroda į straipsnį: www.sea.siemens.com/step/pdfs/acd_2.pdf**.** [žiūrėta: 2010-12-02]
27. Andrzej Trzynadlowski M.. Control of induction motors. London: Academic Press, 2001, 228 p.
28. C. J. Cowie. Kintamo dažnio pavarų principai. AFD Professional Services, 2001, 34 p.
29. Kintamosios srovės variklių valdymo algoritmai. Internetinė prieiga: http://am.renesas.com/applications/key_technology/motor_control/motor_algorithms/child_folder/ac.jsp. [žiūrėta: 2010-12-10]
30. Emmanuel D., Jean-Paul L., Romeo O. Modelling and control of induction motors. Article. J. Appl. Math. Comput. Sci., 2001.
31. Ansari. A. Mathematical model of asynchronous machine in MATLAB Simulink. International Journal of Engineering Science and Technology Vol.2(5). 2010, 8 p.
32. 1ASHOK KUSAGUR, 2DR. S. F. KODAD, 3DR. B V. SANKAR RAM MODELLING OF INDUCTION MOTOR & CONTROL OF SPEED USING HYBRID CONTROLLER TECHNOLOGY. Straipsnis 2009 m, 10 p.
33. Isin Erenoglu Ibrahim Eksin Engin Yesil Mujde Guzelkaya. Istanbul Technical University, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, AN INTELLIGENT HYBRID FUZZY PID CONTROLLER. 5 p.

34. Song Shoujun and Liu Weiguo. Application of Improved PID Controller in Motor Drive System. Northwestern Polytechnical University China. 18 p.
35. Valiulis, G. Skysčio lygio valdymas taikant fuzzy logiką. Straipsnis. ISSN 1392 – 1215 ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA. 2005. Nr.8 (64), 4 p.
36. Aleksa, V., Galvanauskas, V. Technologinių kompleksų automatizavimas. Kaunas: leidykla Technologija, 2008m., 95 p.
37. Impulsų pločio moduliacijos metodai. Internetinė prieiga: http://www.isep.pw.edu.pl/icg/LeonardoPWM/eng/metody_e.html. [žiūrėta: 2012-04-16]
38. S. Corino, E. Romero, L. F. Mantilla. How the efficiency of induction motor is measured? Department of Electrical Engineering and Energy E.T.S.I.I. y T. Universidad de Cantabria, 2007, 5 p.
39. Nagaraja H. Chikkegowda. Space vector PWM sequence and harmonic comparison for high power current source rectifier. Dissertation. Ryerson University, 2007. 172 p.

XV-toji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija
„MOKSLAS – LIETUVOS ATEITIS“

ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA

PAŽYMA

Laurynas Kerpė

Elektros inžinerijos ir automatizavimo, robotikos, valdymo inžinerijos jungtinėje sekcijoje perskaitė pranešimą

Skaliarinio valdymo dažninių asinchroninių pavarų modeliai

Mokslo komiteto pirmininkas prof. habil. dr. Romanas Martavičius

Sekcijos pirmininkas doc. dr. Andrius Petrovas

2012 m. kovo mėn. 16 d.
Vilnius