



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
AUTOMATIKOS KATEDRA

Viktor Rudinskij

**DAŽNIO KEITIKLIO TYRIMAS
INVESTIGATION OF FREQUENCY CONVERTER**

Baigiamasis magistro darbas

Automatikos studijų programa
Automatinio technologijų valdymo specializacija
Elektros inžinerijos studijų kryptis

Vadovas dr. A. Petrovas

Vilnius, 2008

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
AUTOMATIKOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėja

(parašas)

doc. dr. Zita Savickienė

(vardas, pavardė)

2008_____
(data)

Viktor Rudinskij

DAŽNIO KEITIKLIO TYRIMAS INVESTIGATION OF FREQUENCY CONVERTER

Baigiamasis magistro darbas

Automatikos studijų programa

Valstybinis kodas 62101T101

Automatinių sistemų specializacija

Elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo kryptis

Vadovas dr. Andrius Petrovas
(Moksl. laipsnis, vardas pavardė)

(Parašas) _____

(Data) _____

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

(Parašas) _____

(Data) _____

Konsultantas lekt. Vaida Buivydienė
(Moksl. laipsnis, vardas pavardė)

(Parašas) _____

(Data) _____

Vilnius, 2008

TURINYS

1. Įvadas.....	2
2. Literatūros dažnio keitiklių klausimais apžvalga.....	3
2.1. Dažnio keitiklių apžvalga.....	5
2.1.1 Dažnio keitiklių sandara.....	5
2.1.2 Skaliariniais metodais valdomos elektros pavaros modelis.....	8
2.1.3 Erdvinio vektoriaus metodas.....	11
2.1.4 Impulsų pločio moduliacijos metodai.....	13
2.1.5 Puslaidininkinių komutavimo elementų tobulinimo perspektyvos.....	17
2.1.6 Puslaidininkinių galios keitiklių klasifikacija.....	19
2.1.7 Šiuolaikiniai dažnio keitikliai.....	20
3. Tyrimo tikslas ir uždaviniai.....	24
4. Tiriamoji dalis. 4.1 Mechatroninės sistemos dažnio keitiklis-asinchroninis variklis imitavimas.....	25
4.1.1 Sinusinė impulsų pločio moduliacija.....	25
5. Skaičiuojamoji dalis. 5.1 Mechatroninės sistemos dažnio keitiklis – asinchroninis variklis imitacinio modelio „Scilab“ programoje sudarymas ir charakteristikų pagal jį skaičiavimas.....	40
6. Tyrimo rezultatų apibendrinimas. Išvados ir rekomendacijos.....	47
7. Literatūra ir kiti šaltiniai.....	48
PRIEDAI.....	51

1. ĮVADAS

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

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

Puslaidininkinių galios prietaisų, mikrovaldiklių ir signalinių procesorių pasiekimų srityse, impulsų pločio moduliavimo (angl. *Pulse Width Modulation*, sutrumpintai PWM) metodo, leidžiančio trifaze impulsine įtampa formuoti sinuso formos srovę variklio apvijose ir pasiekimai automatinio valdymo teorijos sukūrimas sudarė sąlygas atsirasti dažnio keitikliams, skirtiems asinchroninių elektros variklių sukimosi greičiui, sukimo momentui ir sukimosi kryptčiai valdyti.

Dažnio keitiklis yra galios elektronikos prietaisas, kuris keičia standartinį vienfazį arba trifazį elektros tinklą į keičiamo dažnio ir įtampos trifazį tinklą. Dažnio keitiklis yra sudėtingas ir brangus prietaisas, paverčiantis asinchroninį variklį protingai valdoma mašina. Jisai leidžia valdyti variklį rankiniu būdu arba automatiškai uždaroje valdymo sistemoje pagal atitinkamo jutiklio signalus, taip pat kompiuteriu, įskaitant valdymą per internetą. Dažnio keitiklis turi įvairias apsaugas, saugojančias jį patį ir valdomą variklį nuo sugadinimo.

Europos rinkos tyrimai rodo, kad dažnio keitiklių rinka nuolat didės. Tai lems konkurencingesnės kainos, nuolatinis šių prietaisų tobulinimas, kuris išplės jų pritaikymą ir vis didėjantis poreikis geriau valdyti technologijas ir taupyti energiją.

2. LITERATŪROS DAŽNIO KEITIKLIŲ KLAUSIMAIŠ APŽVALGA.

Rengiant šį baigiamąjį magistro darbą, buvo apžvelgta įvairiose šalyse skirtingų specialistų bei magistrų publikuota medžiaga dažnio keitiklių, bei jų tyrinėjimo tema. Dažnio keitikliai šiuolaikinėje technikoje nėra nauji, taigi dar aktuali tema ir mokslinės pakraipos internetinėse svetainėse, kur straipsnių šia tema galima rasti daug daugiau nei knygų, išleistų dažnio keitiklio nagrinėjimo tikslu.

Geleževičius V. dar dviejų bendraautorių „**Elektros pavarų valdymo sistemos**“ knygoje [5] minima, kad pagrindinis dažninės elektros pavaros jėgos grandinės elementas – tai dažnio keitiklis. Dažnio keitiklis pastovaus dažnio ir pastovios amplitudės pramoninio tinklo įtampą keičia į reguliuojamo dažnio ir reguliuojamos amplitudės įtampą arba srovę, kuria yra maitinamas variklis. Dažnio keitiklis turi du valdymo kanalus – dažnio ir įtampos arba srovės.

G. Sokolovskio išleistoje 2006 metų knygoje [1] yra aptariami asinchroninių ir sinchroninių variklių dažninės elektros pavaros, jų veikimo principai ir pateiktos charakteristikos. Ištirti dažnio keitiklių valdymo metodai. Naudojant IGBT tranzistorius, mikroprocesorinės sistemos valdymą ir apsaugas, pavyko pasiekti aukštas energetinės ir eksploatacinės savybės ir tai skatina dažnio keitikius užimti vis aukštesnę padėtį automatizavime. Pateiktos žinios apie sinusinę impulsų pločio moduliaciją. Taip pat akcentuojama, kad galutinė pavaros kaina būtų prieinama vartotojui, patogus naudojimas ir dažninių elektros pavarų valdymas iš kompiuterio per internetą.

Tęsiant literatūros apžvalgą, knygoje [2] tyrinėjami žinomų firmų kaip „ABB“, „Siemens“, „General Electric“ ir kt. analizuojama elektros pavarų techninės charakteristikos, veikimo principai ir dažnio keitiklio sandara. Pateiktos automatinio valdymo sistemų struktūros, aprašomi regulatoriaus parametrų skaičiavimo metodai ir pereinamųjų procesų pavyzdžiai.

Mokomoje knygoje [3] „**Mechatroninių sistemų modeliavimas**“ nagrinėjami mechatroninių sistemų būsenų kintamųjų modeliai, būsenos lygčių sudarymas iš perdavimo funkcijos, būsenos kintamųjų grįžtamųjų ryšių projektavimas ir būsenų observeriai.

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

Vienas skyrius skirtas mechatroninių sistemų su tiesiaieigiais asinchroniniais varikliais modelių sudarymui.

Andriaus Petrovo daktaro disertacijos darbe „**Trifazių asinchroninių variklių dinaminiai modeliai**“ [4] tiriami asinchroninio variklio modeliai, kurie būtų tinkami netiesiškų ar nesimetriškų asinchroninių variklių dinamikai tyrinėti. Plačiai apžvelgta asinchroninių variklių modeliai. 2 - skyriuje aptarti matematiniai modeliai, 3 – skyriuje kompiuteriniai asinchroniniai variklio modeliai pateikti, o 4 – nagrinėjami praktiniai modelio taikymo aspektai. Imituojami įvairūs asinchroninio variklio darbo režimai, parodoma, kaip modelis naudojamas valdomoms pavaroms bei jose vykstantiems procesams imituoti, pateikiami sudaryti pavarų modeliai.

Piotro Jenkino baigiamajame magistro darbe „**Tiesiaeigės dažninės pavaros tyrimas**“ [6] atliktas tiesiaeigės dažninės pavaros tyrimas. Išnagrinėti tiesiaeigio asinchroninio variklio ypatumai ir naudojimo sritys, padaryta dažnio keitiklių ir juose naudojamų valdymo būdų apžvalga. Išanalizuoti impulsų pločio moduliacijos realizavimo metodai, apžvelgti skaliarinio ir vektorinio valdymo metodų principai. Išnagrinėtas valdymo sistemų, naudojamų dažnio keitikliuose, veikimo principas. Sudarius du tiesiaeigės dažninės pavaros modelius: skaliarinio ir vektorinio valdymo, gautos inverterio išėjimo įtampos, TAV statoriaus srovių, jėgos ir linijinio greičio pereinamųjų procesų charakteristikos ir palyginti rezultatai.

[7] knyga teigia, kad dažninės elektros pavaros kokybę lemia asinchroninio variklio kompleksinio valdymo poveikio dedamųjų – dažnio keitiklio išėjimo įtampos dažnio ir amplitudės – valdymo principas. Šios dedamosios sąlygoja asinchroninio variklio srovę ir srautą, kuriu sąveikoje susidaro momentas, lemiantis variklio greitį.

Deja daugybe knygų apie dažninės elektros pavaras yra parašyta užsienio kalbomis, tai gi viena iš tokių išskirtinių autoriaus **Bimal K. Bose** knygoje „**Modern power Electronics and AC drivers**“ [8], kurioje yra gana detalai ir smulkiai yra aprašyti tranzistorių, klasikinių inverterių, sinusinių impulsų pločio moduliacijos veikimo principai, charakteristikos ir pateiktos gana aiškos išvados. Variklių modeliai sudaryti „Matlab“ pagalba. Šita knyga yra skirta kaip ir kvalifikuotiems inžinieriams taip ir universitetų studentams.

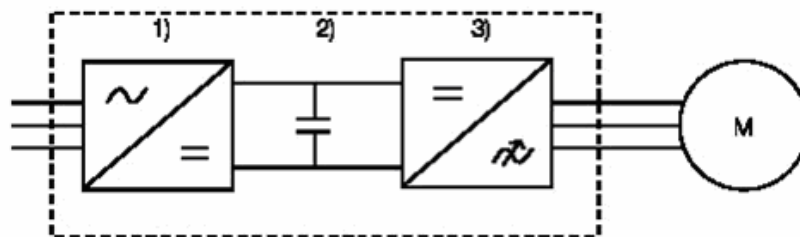
Atlikus aštuonių literatūros šaltinių dažnio keitiklis tyrimo tema, apžvalgą, pastebima, kad mažoka literatūros šaltinių, kuriuose būtų aprašomi eksperimentiniai dažnio keitiklių tyrimai ir eksperimentiniu būdu gauti rezultatai naudojant impulsų pločio moduliaciją. Iš to seka šio darbo tikslas – sudaryti mechatroninės sistemos dažnio keitikli – asinchroninis variklis modelį, kur keitiklio signalas formuojamas naudojant impulsų pločio moduliaciją.

2.1. DAŽNIO KEITIKLIŲ APŽVALGA

2.1.1. Dažnio keitiklių sandara

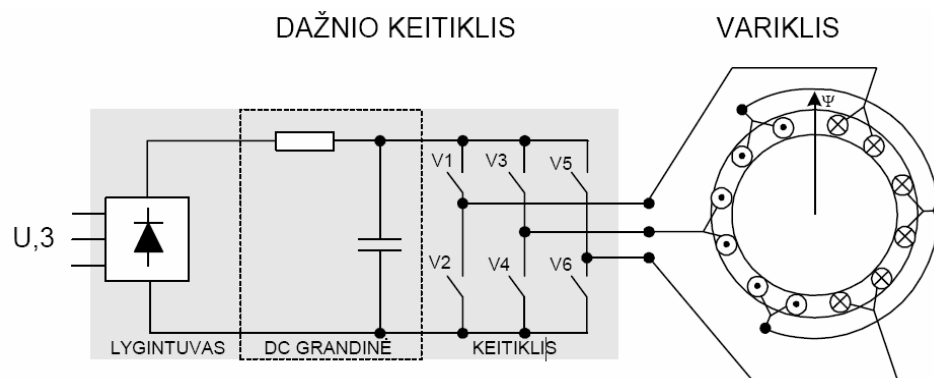
Kintamosios srovės variklių savybė elektrinę energiją keisti mechanine pagrįsta elektromagnetine indukcija. Įtampa statoriaus apvijose lemia srovės ir magnetinio srauto atsiradimą. Šio srauto kryptis gali būti nustatyta dešinės rankos taisykle. Keičiant įtampos kryptį statoriaus apvijose tuo gali būti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

Šis valdymas gali būti realizuotas naudojant dažnio keitiklį. Dažnio keitiklis – keičia kintamosios srovės ir įtampos dažnį. Dažniausiai dažnio keitiklis susideda iš trijų dalių. Šiuolaikinio dažnio keitiklio struktūra pavaizduota 2.1 paveiksle. Dažnio keitiklis susideda: 1 – lygintuvas, 2 – nuolatinės srovės (NS) grandinės filtras ir 3 – inverteris.[9]



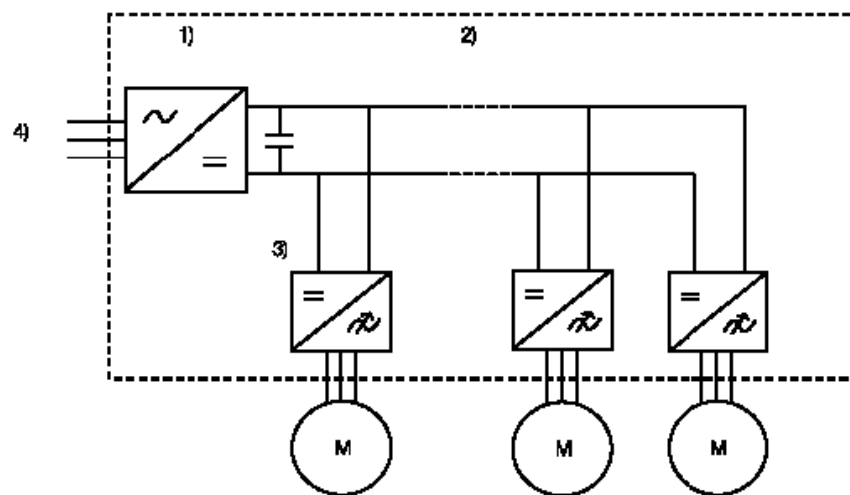
2.1 pav. Dažnio keitiklio sandara

Reguliari trifazė srovė tiekiamą į lygintuvo dalį, kuri paverčia srovę į nuolatinę. Nuolatinė įtampa paduodama į nuolatinės srovės (NS) grandinę, kuri filtruoja pulsuojančią įtampą. Keitiklis tam tikra tvarka sujungia kiekvieną variklio apvijos fazę su neigiamu arba su teigiamu NS grandinės dydžiu. Srautas, pavaizduotas 2.2 paveiksle, gaunamas uždariant raktus V1, V4 ir V5. Tam, kad srautas pasisuktų 60° prieš laikrodžio rodyklę, reikia komutatorių V6 uždaryti, o V5 būtinai atidaryti, nes priešingu atveju gautųsi trumpas jungimas.



2.2 pav. Magnetinio srauto modeliavimas dažnio keitikliu

Automatinėse sistemose su daugiafunkcinėmis pavaromis gali būti panaudotas kitokio tipo dažnio keitiklis (daugiakanalis). Šiuo atveju 2.3 paveiksle dažnio keitiklio 3-oji dalis – inverteriai sujungta su bendra nuolatinės srovės (NS) linija. Daugiakanalės pavaros sistema susideda: 1 – atskira maitinimo sekcija, 2 – bendra NS linija, 3 – pavaros sekcija (inverteris) ir 4 – trifazis maitinimas.



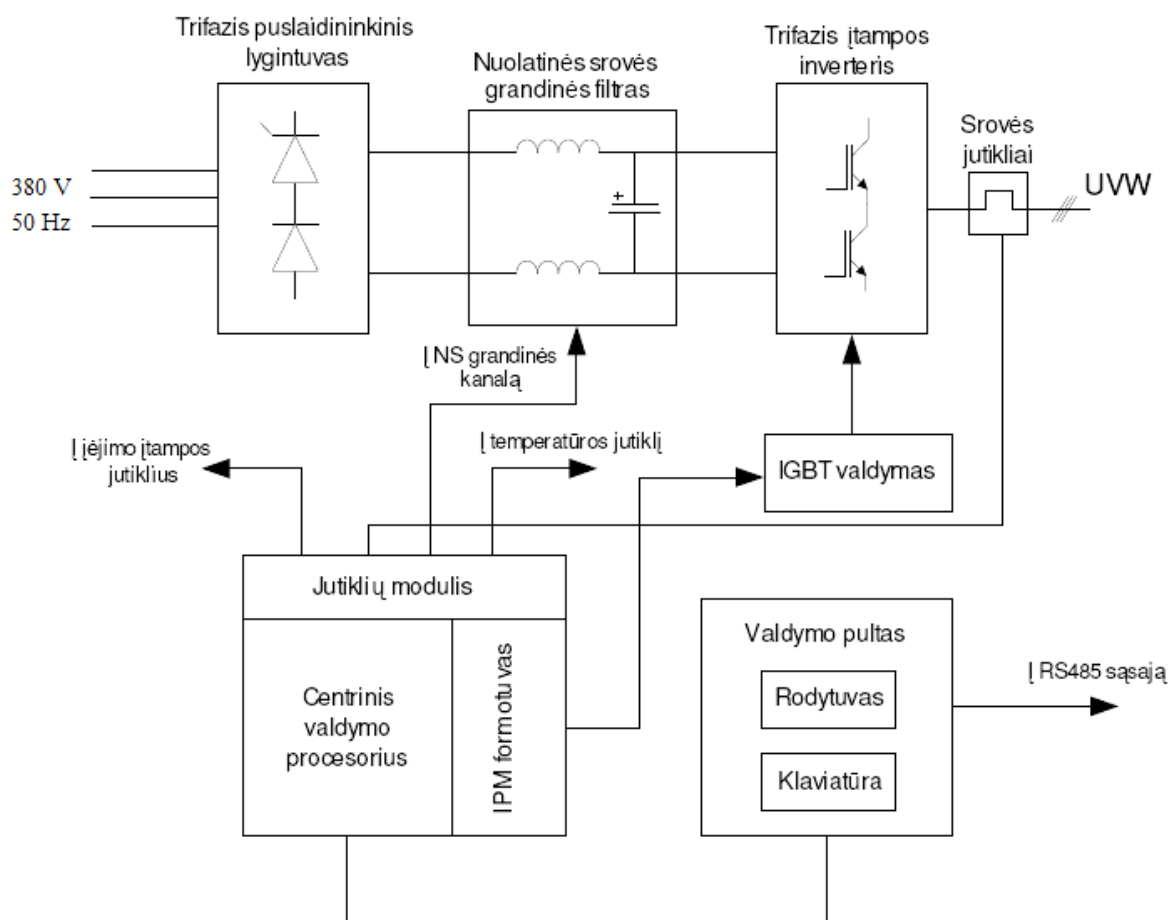
2.3 pav. Daugiakanalės pavaros sistema

Kaip buvo minėta aukščiau, dažnio keitiklis susideda iš trijų pagrindinių dalių, be kurių didelę reikšmę turi keitiklio valdymo sistema. Tad konkrečiau apžvelgta struktūrinę dažnio keitiklio schemą [9], pateikta 2.4 paveiksle. Šis dažnio keitiklis sudarytas iš: trifazio puslaidininkinio lygintuvo, kuris

išlygina tinklo įtampą; filtro, skirto išlygintos įtampos pulsacijoms filtruoti; trifazio įtampos inverterio nuolatinei įtampai keisti į kintamąją; srovės jutiklių, kuriais matuojant kiekvienos fazės variklio srovę nustatomas ne tik variklio apkrovimas, bet ir sudėtingesnio valdymo dažnio keitikliuose nustatomas variklio srauto vektoriaus padėtis. Taip pat be minėtų jutiklių, įeinančių į apsaugos grandinę, dažnio keitiklis turi įėjimo (maitinimo) įtampos jutiklius ir temperatūros jutiklį, kuris signalizuoja apie per aukštą inverterio raktų temperatūrą. Dažnio keitiklio valdymo sistema susideda ne tik iš daugybės jutiklių, iš kurių nuskaityta informacija ateina į jutiklių modulį, bet ir valdymo modulių. Impulso pločio moduliacijos (IPM) valdymo modulyje formuojami valdymo signalai inverterio raktams.

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

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



2.4 pav. Dažnio keitiklio struktūrinė schema

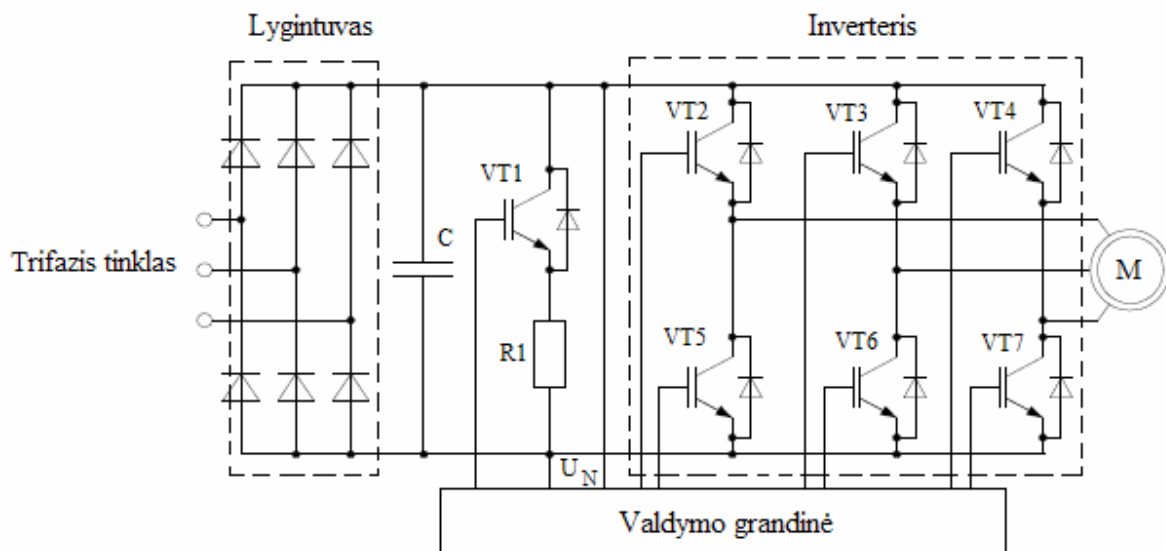
Visų signalų apdorojimo, taip pat valdymo signalų generavimą, vykdo sudėtingas valdymo procesoriaus modulis. Dažnio keitiklis valdomas iš valdymo pulto klaviatūra, o vartotojo ir kiti nustatymai rodomi to paties pulto skystųjų kristalų rodytuve. Duomenis išvesti ir priimti numatytas nuoseklus perdavimo kanalas su RS 485 sąsaja. Tokia keitiklio struktūra yra dažniausiai naudojama šiuolaikiniuose dažnio keitikliuose, tik su skirtingais valdymo kintamųjų būdais realizavimu.

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

2.1.2 Skaliariniais metodais valdomos elektros pavaros modelis

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

Labai apibendrintai pramoninio dažnio keitiklio jėgos grandinės schema pavaizduota 1 pav. Dažnio keitiklio dažniausiai sudaro nuosekliai sujungti nevaldomas lygintuvas ir inverteris, tarp kurių jungiamas filtro kondensatorius C. Inverterį sudaro tiltelinė schema sujungti valdomi raktai VT2 – VT7, kuriu valdymo impulsus generuoja raktų valdymo grandinė. Prie dažnio keitiklio išėjimų jungiamas asinchroninis variklis M. [3]



2.5 pav. Dažnio keitiklio jėgos grandinė

2.5 paveiksle pateiktoje schemoje variklis neturi nulinio laido, tai galimi variklio apvijų jungimai apsiriboja žvaigžde be nulinio laido arba trikampi.

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

Yra sukurta įvairių raktų VT2 – VT7 komutavimo algoritmu. Jie apžvelgiami daugelyje šaltinių, pvz. [10, 11, 12, 13] ir kiti. Visi jie skiriasi sudėtingumu, išėjimo įtampos harmonine sudėtimi, variklio elektromagnetinio momento tolydumu ir kitomis charakteristikomis. Paprasčiausias yra taip vadinamas 180° algoritmas. [13] Komutuoiant VT2 – VT7 raktus šiuo algoritmu, visas signalo periodas T skaidomas į šešias lygias dalis, kurių metu raktų padėties būna tokios, kaip nurodyta 1 lentelėje.

2.1 lentelė. Raktų valdymo algoritmas

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

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

Raktai lentelėje sugrupuoti pagal tiltelio pečius, kuriuose jie įjungti.

Dažnio keitiklio realizuojamas algoritmas pasirenkamas atsižvelgiant į daugelį eksploatacinių pavaros savybių, pvz., leistinas greičio pulsacijų dydis, algoritmo paprastumas ir pan. Taikant 180° algoritmą, visas maitinimo įtampos periodas skaidomas į šešis intervalus ir kiekvieno tokio intervalo metu variklio fazinė įtampa palaikoma pastovi. Faziniu įtampų vertės kiekviename intervale pateiktos 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Dažnio keitiklio tiekiamos įtampos

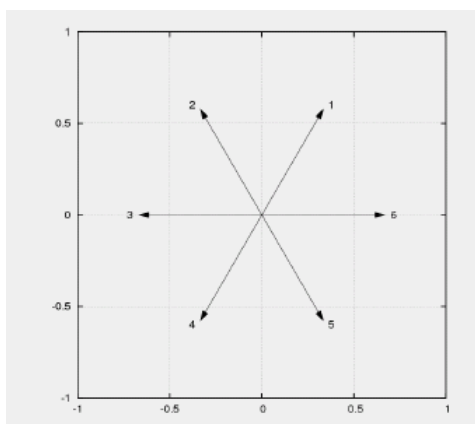
Laikas	0-T/6	T/6-T/3	T/3-T/2	T/2-2T/3	2T/3-5T/6	5T/6-T
U_A	$U_{\max}$	0	0	0	$U_{\max}$	$U_{\max}$
U_B	$U_{\max}$	$U_{\max}$	$U_{\max}$	0	0	0
U_C	0	0	$U_{\max}$	$U_{\max}$	$U_{\max}$	0
U_{qs}	$U_{\max}/3$	$-U_{\max}/3$	$-2U_{\max}/3$	$-U_{\max}/3$	$U_{\max}/3$	$2U_{\max}/3$
U_{ds}	$U_{\max}/\sqrt{3}$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

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

$$\vec{U}_s = \frac{2}{3} \left[U_A + U_B \exp\left(j \frac{2\pi}{3}\right) + U_C \exp\left(-j \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (2.1)$$

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

Kai U_A , U_B , U_C sudaro simetrinę trifazę įtampų sistemą, suma (2.1) išreiškia apie koordinačių sistemos pradžią besisukanti vektorius. Dažnio keitiklyje įtampos keičiamos diskretiškai, todėl suma (2.1) gali įgyti tik baigtinį skaičių fiksuotų verčių. Atvaizdavus minėtus vektorius kompleksinėje plokštumoje, gaunama keitiklio įtampos vektorinę diagramą. Pagal 2.2 lentelės duomenis nubraižyta keitiklio vektorinė diagrama pateikta 2.6 paveiksle. Ties kiekvieno vektoriaus pabaiga esantis skaičius rodo, kuriam 2.2 lentelės intervalui vektorius priskirtas.



2.6 pav. Dažnio keitiklio formuojamos įtampos vektorinę diagrama

Apie 75 % visos elektros energijos, kurią sunaudoja elektros varikliai, tenka siurblių ir ventiliatorių pavaroms, todėl šiuo metu populiariausi yra dažnio keitikliai skirti skaliariniam asinchroninio variklio valdymui. Studijoje, kurią atliko žurnalas „Engineering magazine“, teigiama, kad skaliarinio valdymo dažnio keitikliai pasirenkami 84 % atvejų. Trys svarbiausios savybės, pagal kurias perkant yra pasirenkami dažnio keitikliai, yra paprastas valdymas ir paruošimas darbui (70 % vartotojų šią savybę laiko svarbiausia); patogi vartotojo sąsaja 53 % ir kaina 50 %.[14]

2.1.3 Erdvinio vektoriaus metodas

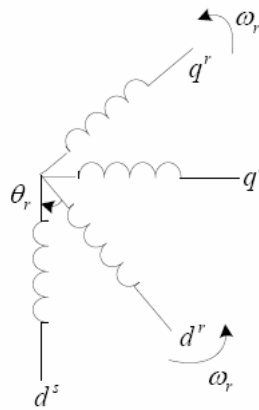
Valdant pavaras su asinchroniniais varikliais labai dažnai naudojamas vektorinio valdymo metodas ir įvairios jo modifikacijos. Viena jų – variklio valdymas iš srovės šaltinio. Vektorinis variklio valdymas labai supaprastėja valdymo (būsenos) kintamaisiais pasirinkus statoriaus sroves, o ne įtampas, nes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

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

$$\begin{cases} u_{qs} = i_{qs} R_s - \alpha_k \psi_{ds}; \\ u_{ds} = i_{ds} R_s - \alpha_k \psi_{qs}; \\ 0 = i_{dr} + (\alpha_k - \omega_r) \psi_{qr}; \\ M_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} i_{ds} \psi_{qm}; \\ \psi_{qs} = L_s i_{qs}; \\ \psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr}; \\ \psi_{qr} = L_m i_{qds} = \psi_{rm}; \end{cases} \quad (2.2)$$

Iš (2.2) lygčių sistemos labai aiškiai formuluojamas vektorinio valdymo principas, t.y. variklio rotoriaus srautas vienareikšmiškai ir tiesiškai priklauso nuo statoriaus srovės q dedamosios, o variklio elektromagnetinis momentas – nuo statoriaus srovės d dedamosios ir rotoriaus srauto sandaugos. Taigi, valdant variklio statoriaus srovės vektoriaus projekcijas q ir d ašyse, valdomas elektromagnetinis momentas.

Bendruoju atveju kiekviena trifazė mašina gali būti pakeista ekvivalente dvifaze, kaip parodyta 2.7 paveiksle. Čia $d^s - q^s$ sudaro statoriaus apvijų koordinačių sistemą, kurios vertikalioji ašis yra d^s , o horizontalioji ašis – q^s . Rotoriaus koordinačių analogiškos ašys žymimos $d^r - q^r$. θ^r yra kampas tarp vienvardžių variklio apvijų. Tačiau, naudojant šią koordinačių sistemą, laike kintančių parametrų priklausomybė nuo variklio posūkio kampo išlieka. Todėl ir variklį aprašančių lygčių sistema turi kintamus parametrus, priklausančius nuo variklio posūkio kampo, todėl ją spręsti yra sudėtinga.



2.7 pav. Ekvivalentinė dvifazė variklio schema

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

$$\begin{cases} M_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} i_{ds} \psi_{rm} \\ \psi_{qr} = L_m i_{qs} = \psi_{rm}. \end{cases} \quad (2.3)$$

Lygčių sistema (2.3) yra daug paprastesnė nei (2.2), todėl ir ją aprašomas valdymo objektas yra paprastesnis.

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

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

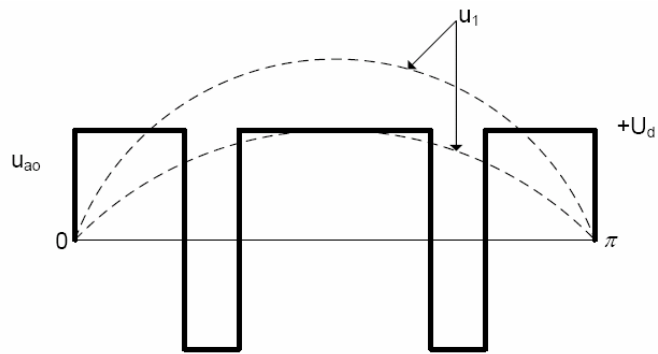
2.1.4 Impulsų pločio moduliacijos metodai

Trifazis šešių laiptelių įtampos inverteris turi savo trūkumų ir privalumų. Privalumai – inverterio raktų komutacija yra paprasta ir komutacijos nuostoliai maži, nes per periodą vyksta tik šeši raktų įsijungimai. Tačiau žemo dažnio harmonikos iškraipo srovės forma, nežiūrint naudojamų didelių ir neekonomiškų žemo dažnio filtrų.

Kadangi inverteris yra maitinamas nuolatine įtampa U_d ir jį sudaro elektroniniai raktai, tai atsiranda galimybė valdyti išėjimo įtampą, atliekant daugybę raktų komutavimų. Impulsų pločio moduliacijos principas yra paaiškintas 2.8 paveiksle. Pirmoji įtampos harmonika turi amplitudę $\frac{4U_d}{\pi}$, esant stačiakampei įtampos formai; tačiau, suformuojant dvi įtampos iškarpas, kaip parodyta 2.8 paveiksle, įtampos dydis gali būti sumažintas. Esant didesniems iškarpų pločiams, pirmoji įtampos harmonika bus mažesnė.

Čia: U_{ao} - stačiakampė fazinė įtampa;

U_d – maitinimo įtampa.



2.8 pav. Impulsų pločio moduliacijos principas

Impulsų pločio moduliacijos (IPM) metodai gali būti klasifikuojami taip:

- Sinusinė impulsų pločio moduliacija (SIPM), (angl. SPWM);
- Pasirinktų harmonikų eliminavimo (PHE) IPM, (angl. SHE PWM);
- Mažų srovės pulsacijų IPM;
- Erdvinio vektoriaus IPM, (angl. SVM);
- Atsitiktinių impulsų pločio moduliacija;
- Delta moduliacija.

[3] Sinusinė impulsų pločio moduliacijos tipas plačiai taikomas pramoniniuose dažnio keitikliuose. Čia trikampė nešančiojo signalo, turinčio dažnį f_c , įtampa sulyginama su pagrindinio dažnio f sinusine įtampa. Kreivių susikirtimo taškai nusako galios elektronikos prietaisų įjungimo momentus. Įtampos U_{a0} iškirpimo ir impulsų pločiai kinta sinuso dėsnio, todėl jos pagrindinės harmonikos dažnis yra toks pat, kaip f ir jos amplitudė yra lygi nustatytai moduliacijos įtampai tai parodyta 2.9 paveiksle. Tas pat nešantysis signalas gali būti naudojamas visu trijų fazinių įtampų formavimui. Įtampos U_{a0} Fourier analizė rodo, kad ji gali būti užrašyta tokia forma:

$$U_{a0} = 0,5U_d \sin(\omega t + \varphi) + \text{aukštadažniai}(M\omega_c + N\omega)\text{nariai}, \quad (2.4)$$

čia m – moduliacijos indeksas, ω – pagrindinės (pirmosios) harmonikos dažnis, rad/s; φ – inverterio išėjimo įtampos fazė, priklausanti nuo moduliuojančios įtampos.

Moduliacijos koeficientas yra skaičiuojamas taip:

$$m = \frac{U_m}{U_T}, \quad (2.5)$$

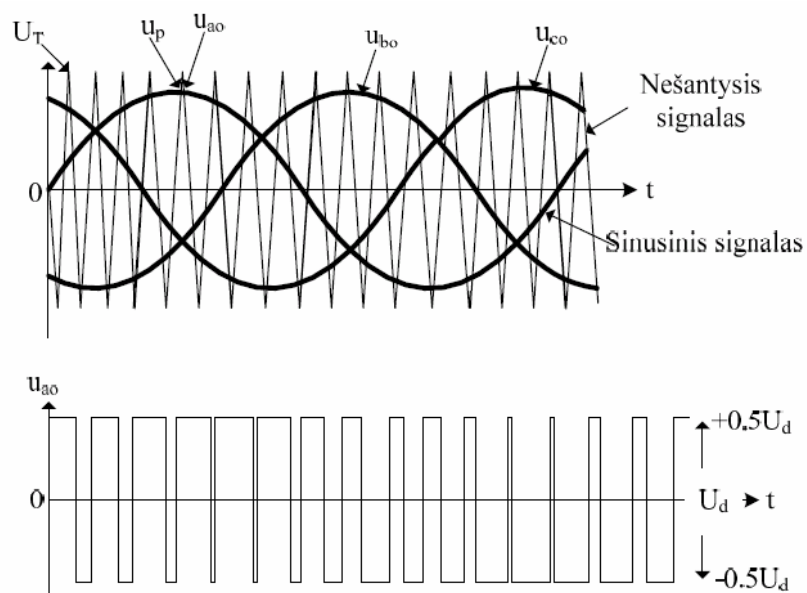
Čia U_m – didžiausia moduluojančios įtampos vertė;

U_T – didžiausia nešančiosios įtampos vertė.

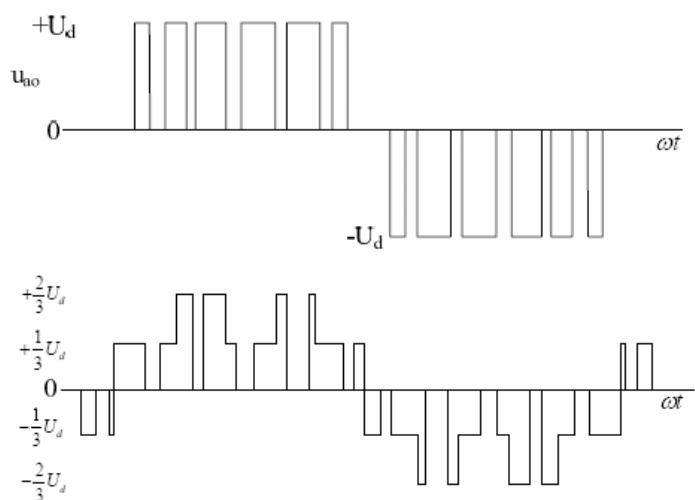
Moduliacijos koeficientas m gali kisti nuo nulio iki vieneto. Paprastai inverteris gali būti laikomas tiesiniu stiprintuvu, kurio stiprinimo koeficientas k užrašomas taip:

$$k = \frac{0,5mU_d}{U_p} = \frac{0,5U_d}{U_T}. \quad (2.6)$$

Kai $m = 1$, didžiausia pagrindinės harmonikos įtampos vertė yra $0,5 U_d$, kuri sudaro 78,55 % stačiakampės įtampos didžiausios reikšmės, lygios $\frac{4U_d}{2\pi}$. Kai $m = 0$ ir nešančiajam signalui turint simetrinius impulsų ir iškarpų plotus, įtampa U_{a0} yra stačiakampės formos.



2.9 pav. Impulsų pločio moduliacijos principas



2.10 pav. Inverterio fazinės ir linijinės įtampos

Plačiausiai paplitę dažnio keitikliai su tarpine nuolatinės srovės grandimi. Tokių dažnio keitiklių sudaro valdomas arba nevaldomas lygintuvas, įtampos pulsacijų filtras ir autonominis įtampos arba srovės inverteris, nuolatinę įtampą arba srovę keičiantis trifaze kintamo dažnio įtampa arba srove. Naudojant įtampos inverterį, lygintuvas turi pasižymėti įtampos šaltinio savybėmis, o naudojant srovės inverterį, - srovės šaltinio savybėmis. Naudojant valdomą lygintuvą, išėjimo įtampos amplitudė reguliuojama keičiant nuolatinės įtampos didumą, o jos dažnis reguliuojamas veikiant autonominio įtampos inverterio valdymo kanalą. Sudarius neigiamą išlygintos srovės grįžtamąjį ryšį, valdomajam lygintuvui galima suteikti srovės šaltinio savybes ir, panaudojus srovės inverterį, gauti reguliuojamo dažnio srovės šaltinį. Kai naudojamas nevaldomas lygintuvas, inverteriui tenka ir išėjimo įtampos dažnio, ir jos amplitudės regulatoriaus funkcijos [1].

Kintamosios srovės dažniniu būdu valdomas asinchroninės elektros pavaros plačiai taikomas įvairiausių gamybos įrenginių ir technologinių procesų automatizavimui bei uždaroje automatinio valdymo ir reguliavimo sistemose. Paaukštinto dažnio įrenginiai ir keitikliai naudojami metalo lydymo, kaitinimo ir terminio apdorojimo procesuose, stiklo, optinio pluošto, metalų dangos bei skysto metalo elektromagnetinėse technologijose, o taip pat šiuolaikiniuose joninės plazmos, vakuuminiuose, ultragarsiniuose bei lazeriniuose įrenginiuose.

Asinchroninės dažninės elektros pavaros pritaikytos ir šiuolaikinėse daugiaspalvėse ofsetinėse spausdinimo mašinose, kuriuose kiekviena sekcija valdo elektroniniu vėliu susieti atskiri elektros varikliai. Iš elektros pavarų teorijos žinoma [31], kad atvirose dažninio valdymo sistemose asinchroninių variklių magnetinis srautas labai priklauso nuo variklio apkrovos. Didėjant apkrovai,

variklio srautas silpnėja, dėl to mažėja ir variklio maksimalusis momentas. Stabilizuojant variklio magnetinį srautą ($\psi = \text{const.}$) uždaroje automatinio reguliavimo sistemoje (ARS), pavyksta išvengti šio atvirų dažnio valdymo sistemų trūkumo. Kai kuriais atvejais magnetinio srauto ARS netgi padidina maksimaliojo ir vardinio momento santykį ir esant vardiniam (nominaliajam) dažniui. Be to padidėja leistinas variklio greičio reguliavimo diapazonas ir jo perkrovos galimybės. Šie rezultatai skatina diegti ir tirti naujas dažninio valdymo asinchronines pavaras ir sudėtingose ofsetinio spausdinimo mašinose.

Dažninių būdu valdomi asinchroniniai varikliai yra sudėtingi valdymo objektai turintys du tarpusavyje susietus valdymo kanalus: statoriaus įtampos ir dažnio. Dažninio valdymo sistemoje įtampos ir dažnio santykis turi būti keičiamas tam tikru dėsniu kuris labai priklauso nuo variklio apkrovos charakterio. Todėl diferencialinės lygtys, aprašančios elektromagnetinius procesus dažninėse pavarose, yra netiesinės, o sudarant tokiu pavarų dinamikos struktūrines schemas, naudojami supaprastinti, linearizuoti modeliai [34]. Be to modelio sudėtingumas priklauso nuo dažnio keitiklio tipo, nuo variklio parametrų, nuo pasirinkto valdymo būdo ir kitų faktorių.

2.1.5 Puslaidininkinių komutavimo elementų tobulinimo perspektyvos

Šiuo metu pagrindiniais galios elektronikos elementais komutavimo srovės srityje iki 50A yra diodai (Diode), tiristoriai (Thyristors, SCR), bipoliariniai tranzistoriai (BPT), bipoliariniai tranzistoriai su izoliuota užtūra (IGBT), lauko tranzistoriai su izoliuota užtūra (MOSFET), galios integriniai grandynai (Power IC), intelektualios galios integriniai grandynai (Smart Power IC) [19].

Komutuojamų srovių srityje virš 50A pagrindiniais galios elektronikos elementais yra galios moduliai, sudaryti iš bipoliarinių tranzistorių, IGBT, tiristorių, uždaromų tiristorių (GTO), diodų.

Komutavimo įtaisuose iki 50A pagrindinį reikšmingiausią dalį sudaro lauko tranzistoriai su izoliuota užtūra – MOSFET. Šie puslaidininkiniai elementai turint mažus statinius ir dinامينius nuostolius, ypač trumpus persijungimo laikus (kas leido jiems veikti iki 1Mhz dažniu), praktiškai visiškai išstūmė visų kitų tipų puslaidininkinius elementus žemos įtampos įtaisuose (iki 200V). Firmos „Siemens“ protrūkis aukštos įtampos MOSFET kūrime su santykiine varža apie 3 (mm² dar labiau išplėtė šių elementų pritaikymo sritį. MOSFET komutuojama įtampa (nuo 600 iki 1000V) ir padidėjęs galingumas (iki 10 kW) leido išstumti šios srities anksčiau taikomus bipoliarinius tranzistorius, kurie šiuo metu taikomi tik 50A diapazone esant pigiai ir masinei pramonės ir buities įtaisų gamyboje.

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

Pastaraisiais metais GTO buvo modernizuojami („ABB“, „Mitsubishi“) ir atsirado naujas komutavimo įtaisas užtūra komutuojamas tiristorius (IGCT – angl. Integrated Gate Commutated Thyristor).

Bipoliariniai tranzistoriai (BPT)

Dėl sudėtingumo ir didelės valdymo sistemų kainos, mažos greitaveikos ir atsparumo perkrovimams šie puslaidininkiniai elementai jau paseno. Bet užtai BPT turi nemažą pranašumą prieš elementus MOSFET pagal komutuojamos galios ir kainos santykį įtampos srityje virš 400V. Todėl bipoliariniai tranzistoriai lieka efektyviais komponentais pigiuose pritaikymuose. [38]

Tiristoriai (SCR)

Nepaisant šių elementų akivaizdžių privalumų, tokius, kaip mažas įtampos kritimas (1,2 – 1,5 V vidutiniuose įtampos diapazonuose), didelis srovės tankis, aukštos komutavimo įtampos (šiandien 8 kV) ir srovės (4 kA), paprastumas ir maža valdymo sistemų kaina, stabilumas srovės perkrovimams, didelis patikimumas prispaudžiamosios spyruoklės konstrukcijoje – ši galios elektronikos klasė galima priskirti prie pasensusių dėl pagrindinės priežasties – valdymo elektrodu neįmanoma jų išjungti (uždaryti). Šie puslaidininkiniai elementai vis labiau išstumiami visiškai valdomais IGBT ir IGCT. Dėl aukšto komutuojamos galios ir kainos santykio vis dėlto SCR labiau naudojami tam tikrose srityse:

- Buitiniai prietaisai, kur kaina yra pagrindiniu nusakančiu faktoriumi;
- Aukštos galios ir srovės keitikliai (nuolatinės srovės aukštos įtampos perdavimo linijose, reaktyviosios galios kompensatoriai, lygintuvai ir t. t.).

SCR charakteristikų pagerinimas ir tobulinimas bus susijęs tik su tam tikrom papildomomis funkcijomis aukštos įtampos tiristoriuje (tokių, kaip apsauga nuo virš įtampių), taip pat kūrimas dviejų, keturių ir šešių raktų tiristorinių grandinių viename kristale.

Uždaromi tiristoriai (GTO, IGCT)

GTO elementų modernizavimas taikant naujas technologijas leido padidinti IGCT greitaveiką, žymiai sumažinti statinius ir dinامينius nuostolius. Todėl aukštų įtampų srityse (virš 3,5 kV) dominuojančią padėtį užims IGCT.

Lauko tranzistoriai su izoliuota užtūra (MOSFET)

Turi visus greito komutavimo privalumus, žemus statinius ir dinامينius nuostolius, mažą valdymo galingumą, atsparūs dideliems perkrovimams, todėl jie yra ir ateityje bus pagrindiniais žemos

įtampos komutavimo komponentais tokiuose pritaikymuose, kaip galios integriniai grandynai (Smart IC). Naujų technologijų (trench-gate) naudojimas leis labiau praplėsti MOSFET pritaikymo ribas diskretiniuose, modulinuose ir integriniuose išpildymuose.

Bipoliariniai tranzistoriai su izoliuota užtūra (IGBT)

Šiai dienai ir artimiausioje ateityje ši galios elektronikos įtaisų klasė užima ir užims galingumo diapazone nuo kelių kW iki kelių MW dominuojančią padėtį. Tolimesnis IGBT tobulinimas gali būti susijęs su:

- naujų struktūrų, artimų tiristoriams, išvystymu;
- tiesioginio įtampos kritimo sumažinimu;
- komutuojamų srovių ir įtampos didinimu;
- greitaveikos didinimu;
- perkrovimo ir avarinių režimų atsparumo didinimu;
- intelektualių IGBT vystymu su integruotom diagnostikos ir apsaugos funkcijomis;
- naujų aukšto patikimumo korpusų kūrimu.

Komutavimo elementų apjungimas su valdymo, diagnostikos ir apsaugos elementais viename įtaise – pagrindinę galios elektronikos vystymosi tendencija.[44]

Tokiu būdu šiuolaikinės, patikimos, efektyviai taupančios puslaidininkinės pavaros sukūrimui galima pritaikyti keletą komutavimo įtaisų tipų, kiekvienas iš kurių užima tam tikras tikslingo pritaikymo sritis. Kaip jau buvo pabrėžta, perspektyviausiais galio elektronikos elementais laikomi MOSFET ir IGBT.

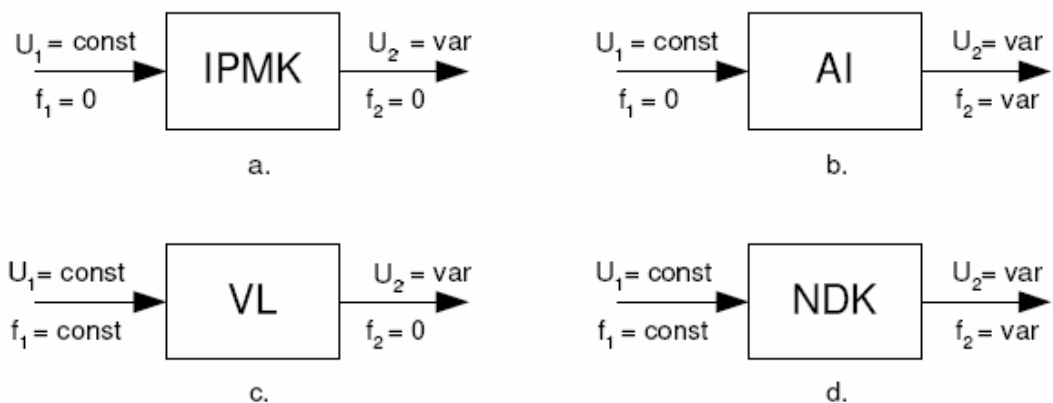
2.1.6 Puslaidininkinių galios keitiklių klasifikacija

[15] šaltinyje yra kalbama, kad elektros pavarų sistemose puslaidininkiniai galios keitikliai vykdo greičio ir momento reguliavimo funkciją. Pagal veikimo principą galios keitikliai skirstomi į tipus [16]:

- a) **Impulsų pločio moduliacijos keitikliai** (IPMK), jungiantys nuolatinės srovės šaltinį su nuolatinės srovės varikliu, keičia nuolatinę maitinimo įtampą ($U_1=const, f_1=0$) į nuolatinę reguliuojamą įtampą išėjime ($U_2=var, f_2=0$).
- b) **Valdomieji lygintuvai** (VL), jungiantys kintamosios srovės šaltinį su nuolatinės srovės varikliu, keičia kintamąją sinusinę įtampą (pvz. $f_1=50Hz$ ir 220V) į nuolatinę reguliuojamą įtampą išėjime ($U_2=var, f_2=0$).

- c) **Autonominiai inverteriai** (AI), jungiantys nuolatinės srovės šaltinį su kintamosios srovės varikliu, keičia nuolatinę maitinimo įtampą ($U_1 = \text{const}$, $f_1 = 0$) į kintamosios amplitudės ir dažnio įtampą išėjime ($U_2 = \text{var}$, $f_2 = \text{var}$).
- d) **Nepriklausomi dažnio keitikliai** (NDK), jungiantys kintamosios srovės šaltinį su kintamosios srovės varikliu, keičia vieno dažnio kintamąją sinusinę įtampą į kintamąją įtampą išėjime su reguliuojama įtampos amplitude ir dažniu ($U_2 = \text{var}$, $f_2 = \text{var}$).

Bazinių keitiklių funkcinės schemas pateiktos 2.11 paveiksle, kur a – impulsų pločio moduliacijos keitiklis, b – autonominis inverteris, c – valdomasis lygintuvas ir d – nepriklausomas dažnio keitiklis.



2.11 pav. Bazinių puslaidininkinių keitiklių funkcinės schemas

Kintamosios srovės pavarose variklio maitinimui nuolatinę įtampą naudojami autonominiai inverteriai AI, o esant kintamosios srovės maitinimui gali būti panaudoti nepriklausomi dažnio keitikliai NDK, arba valdomas lygintuvas kartu su autonominiu inverteriu (VL+AI).

2.1.7 Šiuolaikiniai dažnio keitikliai

Išnagrinėję dažnio keitiklio sandarą ir dažniausiai naudojamų valdymo būdų ypatumus, apžvelgsime keletą šiuolaikinių dažnio keitiklių. Kaip pavyzdį paimkime firmos „Telemecanique“ dažnio keitiklius. „Altivar 31“ modelio dažnio keitikliai gali būti panaudojami įvairiose pramonės šakose ir pritaikymuose elektriniam pavarų greičiui reguliuoti. Juose panaudota dažnio IPM moduliacija [17]. Šio dažnio keitiklio bendras vaizdas parodytas 2.12 paveiksle.



2.12 pav. Altivar 31 modelio dažnio keitiklis

„Altivar 31 ” – vienas iš šios firmos produktų, realizuojantis visų standartinių pritaikymų reikalavimus:

- ✓ Lengvas įdiegimas;
- ✓ Paprastas greičio nustatymas;
- ✓ Funkcijos – išibėgėjimas, stabdymas ir sukimosi krypties keitimas;
- ✓ Apsaugos funkcijos;
- ✓ V/f linijinio ir kvadratinio santykio palaikymo pasirinkimas.

„Altivar 31 ” – geriausias sprendimas pavarose kurių galios diapazonas 0,18 iki 2,2 kW esant 230V vienfaziam tinklui ir nuo 0,37 iki 15kW esant 400V trifaziam tinklui.

Patikimumas

60 sekundžių dažnio keitiklį galima apkrauti iki 150% nominalios srovės.

Dažnio diapazonas

Perjungimų dažnis gali būti reguliuojamas diapazone nuo 2 iki 16 kHz. Esant didesniam už 4 kHz perjungimų dažniui, jeigu temperatūra pakyla iki per didelės reikšmės, greičio reguliatorius perjungimų dažnį sumažina. Temperatūros kilimą kontroliuoja maitinimo modulyje sumontuotas PTC zondas.

Aptarnavimas

Dažnio keitiklis gali būti prijungtas prie tinklo interneto per tiltą „Ethernet/Modbus.

Greitas aptarnavimas

Integruota klaviatūra ir standartiniai greičio reguliavimo taikymai su jau sukonfigūruotomis funkcijomis lemia greitą įdiegimą ir patogų aptarnavimą.

„8200 Vector” – vektorinio valdymo dažnio keitikliai. Turi viską, ko reikia patogiam aptarnavimui, valdymui, diagnostikai ir ryšiui [18]. Kasdieniniam naudojimui skirta – patobulinta patikima sistema, kuri pasižymi patogiu aptarnavimu, derinimo galimybe ir daugeliu kitų aspektų. Šio modelio dažnio keitiklių šeima pavaizduota 2.13 paveiksle.



2.13 pav. 8200 Vector dažnio keitikliai

Išskirtinės pavarų savybės:

- ✓ Perkrovos galimybė 180% nominalaus momento 60 sekundžių;
- ✓ Darbo rūšys: U/f linijinis, U/f 4 kvadrantų, Vektorinis valdymas;
- ✓ Reguliavimo diapazonas 1 : 50;
- ✓ Išėjimo dažnis iki 650 Hz.

Greitas diegimas:

Taikant naują aptarnavimo ir parametrizavimo programinę įrangą, valdymas tampa labai lengvas ir paprastas. Didesnis konfigūruojamų parametrų kiekis ir standartinių funkcijų pasirinkimo galimybė taupo įdiegimo laiką ir pinigus.

Patogus aptarnavimas:

Menu struktūra panaši į mobiliojo telefono meniu. Aptarnavimo moduly skystųjų kristalų ekrane yra aiškus tekstas, todėl galimas paprastas ir greitas parametrų nustatymas.

Saugumas net agresyvioje aplinkoje:

Valdymo ir variklio galios kabelių ekranavimas palengvina elektromagnetinio (EM) suderinamumo sprendimo problemose. Dėl paprasto „ekrano“ prijungimo pasiekiamas optimalus EM-suderinamumas.

3. TYRIMO TIKSLAS IR UŽDAVINIAI.

Darbo tikslas:

„Scilab“ programos pagalba sudarius mechatroninės sistemos dažnio keitiklis – asinchroninis variklis modelį, ištirti keitiklio signalą, kuris formuojamas naudojant impulsų pločio moduliaciją.

Siekiant šio tikslo, reikia išspręsti šiuos uždavinius:

1. Atlikti dažnio keitiklių apžvalgą;
2. Sudaryti tiriamo asinchroninio variklio tyrimui skirtą matematinį modelį;
3. Pagal sudarytą modelį atlikti mechatroninės sistemos dažnio keitiklis – asinchroninis variklis charakteristikų tyrimą.
4. Apibendrinti tyrimo rezultatus ir suformuluoti išvadas.

4. TIRIAMOJI DALIS

4.1 MECHATRONINĖS SISTEMOS DAŽNIO KEITIKLIS-ASINCHRONINIS VARIKLIS IMITAVIMAS

Tyrinėjant sudėtingas elektromechanines ir mechatronines sistemas didžiulę reikšmę turi modeliavimas. Naudojant šį pažinimo ir tyrimo metodą galima nagrinėti sistemos veikimą įvairiomis sąlygomis. Kartais tai ištirti tradicinėje laboratorijoje būtų net labai sunku ar net neįmanoma. Tada šiam atvejui naudojami sistemų modeliai, kurie gana tiksliai imituoja tiriamą sistemą sutaupant laiką ir pinigus. [19]

Asinchroninis variklis, kaip žinoma yra plačiausiai pramonėje paplitęs elektromechaninis keitiklis, todėl šiuo metu yra sukurta daug ir įvairių šios mašinos modelių. Sudarant asinchroninio variklio ar bet kokios kitos elektros mašinos matematinį modelį, galima remtis arba elektromagnetinio lauko, arba elektros grandinių teorijomis [21, 22, 37]. Remiantis elektromagnetinio lauko teorija, modelis sudaromas pagal Maksvelo lygtys. Tokius modelius geriausia naudoti tada, kai pagrindinis dėmesys sutektas į magnetinėje grandinėje vykstančius reiškinius. Remiantis elektros grandinių teorija, modelis sudaromas pagal Kirchhofo bei Omo dėsnius, kurie naudojami mašinos elektros grandinėms aprašyti. Pats perspektyviausias yra kombinuotas modelis, kuris sudaromas remiantis abiem teorijomis.[21]

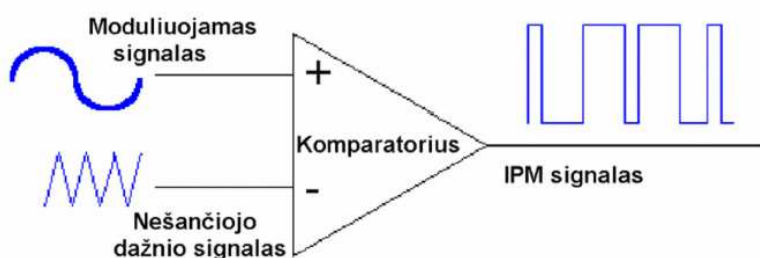
Jei modelį numatoma panaudoti elektroninėms variklio galios valdymo sistemoms projektuoti, pvz., dažnio keitikliams, arba dėl kokių kitų priežasčių domimasi būtent elektriniams procesams vykstančiais variklyje, tai tikslinga variklio modeliavimui pasirinkti kurią nors elektrinėms schemoms modeliuoti tinkamą programą pvz., *Matlab/Simulink* arba *Pspice*. Šių programų privalumas yra tas, kad adaptuotą variklio modelį galima tiesiogiai jungti prie modeliuojamos elektrinės valdymo sistemos. Dar labai svarbu tai, kad naudojant tokį modelį, labai paprastai skaičiuojami išvestiniai elektriniai dydžiai.[4]

4.1.1 Sinusinė impulsų pločio moduliacija

Daugelis šiuo metu gaminamų dažnio keitiklių, skirtų trifazių variklių greičio reguliavimui, realizuoja sinusinę impulsų pločio moduliaciją (SIPM) įtampos inverterio valdymui [24]. Metodo esmė: vienu metu pagal užduot nešantįjį dažnį (2 – 20 kHz) valdyti visus šešis inverterio raktus taip, kad vidutiniuose inverterio taškuose U_1 , U_2 , U_3 būtų gaunamos sinusinės formos įtampos bangos, perstumtos viena nuo kitos 120 elektrinių laipsnių. Tačiau kiekvienos fazės viršutinis ir apatinis

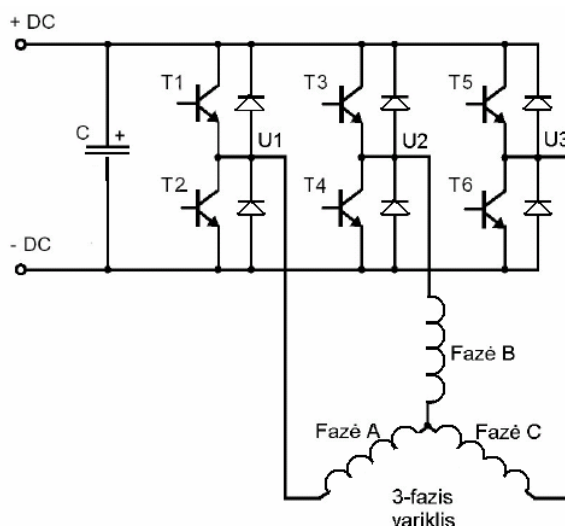
inverterio raktai komutuojami priešingai. Maksimali išėjimo signalo amplitudė šiuo atveju lygi pusei nuolatinės srovės grandinės įtampai.

Šis IPM būdas paprastai realizuojamas analoginiu būdu naudojant komparatorių [23], kuris lygina bangos formos signalą su pjūklinės formos signalu 4.1 paveiksle. Komparatoriaus išėjime atsiranda aukšto lygio įtampa tik tuomet, kai vienas įėjimo signalas didesnis už kitą.



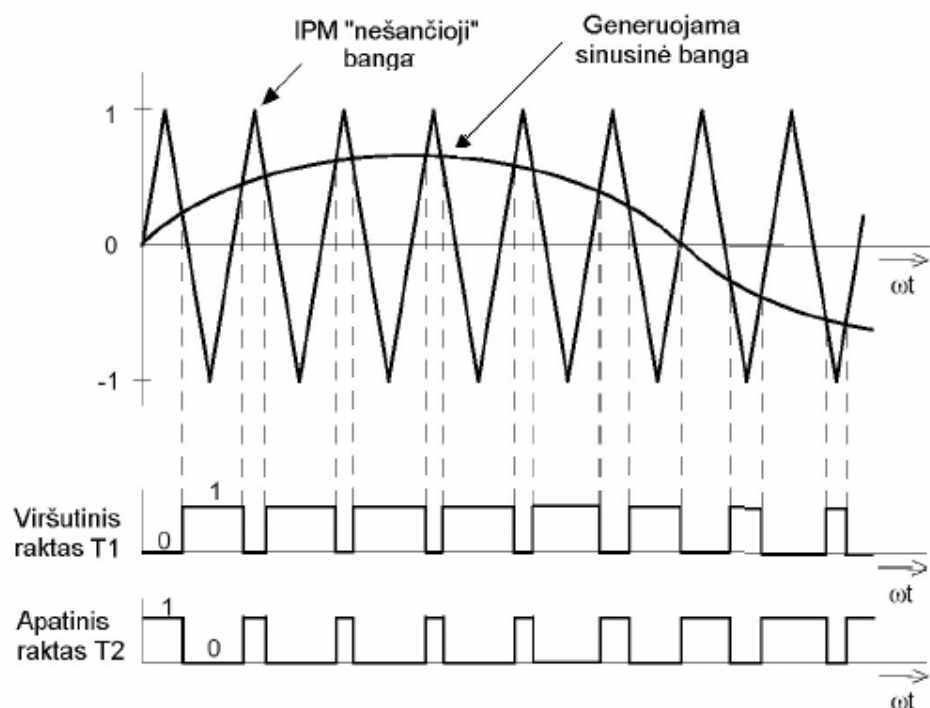
4.1 pav. Sinusinės IPM realizavimo metodas

Reguliuojamo greičio pavarose kintamosios srovės varikliai maitinami inverteriais, kurie paverčia nuolatinę įtampą į reikalingo dažnio ir amplitudės kintamąją įtampą naudojant SIPM. Tipinio trifazio inverterio schema pateikta 4.2 paveiksle.

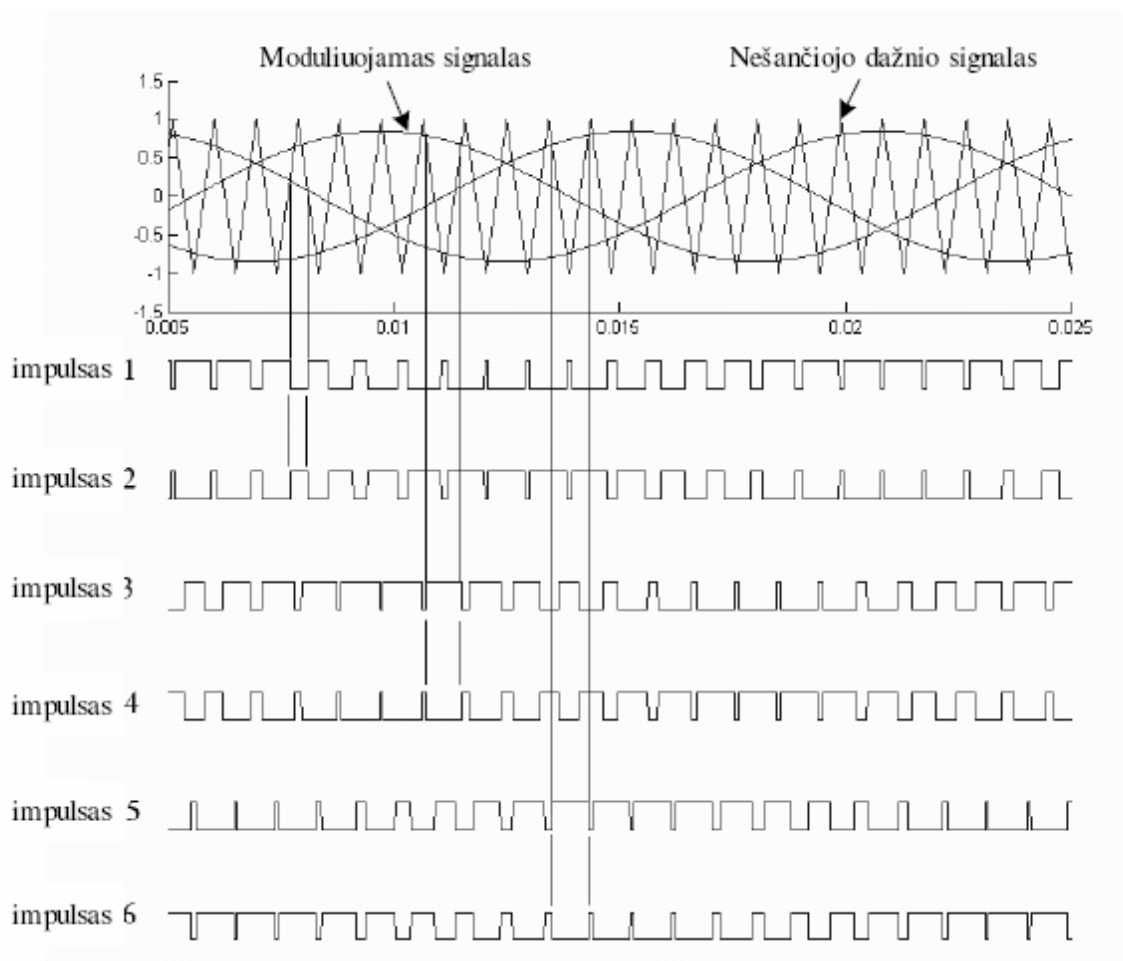


4.2 pav. Trifazio inverterio schema

Inverteris susideda iš trijų pusiau tiltelių (kiekvienai fazei), kur viršutinis T1 ir apatinis T2 raktai valdomi taip, kaip buvo minėta anksčiau, kai vienas įjungiamas – kitas išjungiamas. Dėl to, kad inverterio raktai turi ilgesnę išsijungimo laiką negu įsijungimo, kartais tarp vieno rakto išsijungimo ir įsijungimo įterpiamas vadinamas „mirties“ arba nejautrumo laikas, kuris realizuojamas papildomais įrenginiais. Maitinant trifazį variklį tokio tipo inverteriu su sinusinės IPM realizavimu inverterio išėjimo įtampa gaunama lyginant nešančiojo dažnio signalą su fundamentalaus dažnio sinusinės bangos signalu. Šių signalų susikirtimo taškai nusako inverterio raktų įjungimą [27] (4.3 pav.).



4.3 pav. Sinusinė impulsų pločio moduliacija

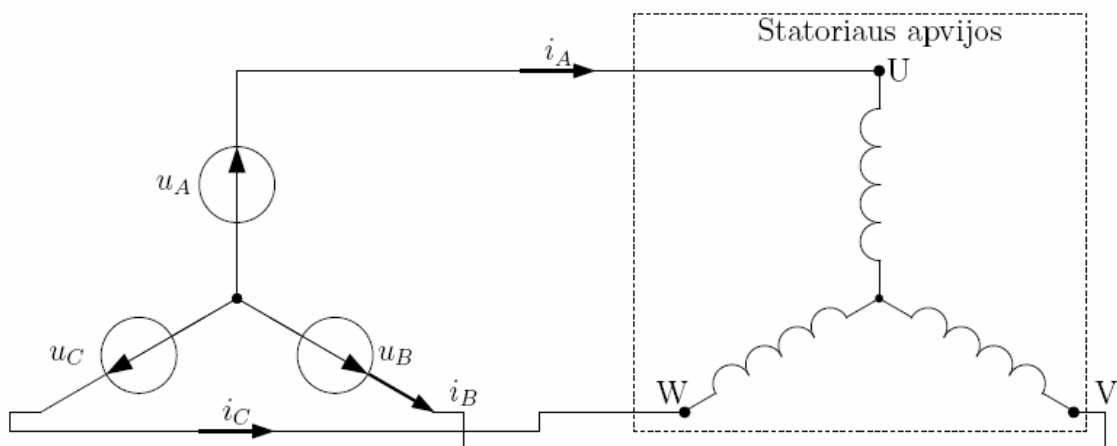


4.4 pav. Sinusinė impulsų pločio moduliacija esant 6 impulsams

Šiame darbe nagrinėjamas simetriškas asinchroninis variklis, kurio apvijos sujungtos žvaigždė be nulinio laido.

Simetriškas asinchroninis variklis – tai toks variklis, kuris tenkina elektrinių bei magnetinių grandinių simetriškumo sąlygas:

- Statoriaus bei rotoriaus elektros grandinės simetriškos;
- Statoriaus bei rotoriaus magnetinės grandinės simetriškos ir neįsotintos;
- Elektriniai ir magnetiniai mašinos parametrai nepriklauso nuo išorės faktorių.



4.5 pav. Variklio apvijų jungimas žvaigždė be nulinio laido

Variklio, kurio apvijos sujungtos žvaigždė be nulinio laido, jungimo prie tinklo schema pateikta 4.5 paveiksle. Trifazis tinklas pavaizduotas trimis įtampos šaltiniais: U_A , U_B ir U_C , o variklis pavaizduotas trimis sujungtomis statoriaus apvijomis, kurios 4.5 paveiksle apibrėžtos punktyrinė linija.

Įtampų balanso lygtys tokiam jungimo atvejui užrašoma taip:

$$\begin{cases} U_{AC} = R_s(2i_A + i_B) + d(2\psi_A + \psi_B)/dt; \\ U_{BC} = R_s(i_A + 2i_B) + d(\psi_A + 2\psi_B)/dt; \\ U_{ac} = R_r(2i_a + i_b) + d(2\psi_a + \psi_b)/dt; \\ U_{bc} = R_r(i_a + 2i_b) + d(\psi_a + 2\psi_b)/dt. \end{cases} \quad (4.1)$$

Čia: U_{AC} , U_{BC} ir U_{ac} ir U_{bc} – linijinių įtampų akimirkinės vertės;

R_s – statoriaus apvijos aktyvioji varža;

R_r – rotorius apvijos aktyvioji varža.

Su apvijomis surištų magnetinių srautų lygtys simetriškam varikliui daug paprastesnės už atitinkamas lygtys nesimetriškam varikliui, taigi variklio sistemą galima užrašyti taip:

$$\begin{cases} \psi_A = \dot{L}_S i_A - \sqrt{3} M_{SR} [i_a \sin(\varphi - \pi/3) + i_b \sin \varphi] \\ \psi_B = \dot{L}_S i_B - \sqrt{3} M_{SR} [i_a \sin \varphi + i_b \sin(\varphi + \pi/3)] \\ \psi_a = \sqrt{3} M_{SR} [i_A \sin(\varphi + \pi/3) + i_B \sin \varphi] + \dot{L}_R i_a; \\ \psi_b = -\sqrt{3} M_{SR} [i_A \sin \varphi + i_B \sin(\varphi - \pi/3)] + \dot{L}_R i_b \end{cases} \quad (4.2)$$

Srautų išraiškas iš (4.2) įrašius į (4.1), srautai eliminuojami ir visos fazinės įtampos iš (4.1) sistemos išreiškiamos funkcine priklausomybe nuo srovių, srovių išvestinių ir rotoriaus posūkio kampo. Pvz., į pirmąją lygtį įrašius ψ_A ir ψ_B išraiškas iš (4.2) gaunama:

$$\begin{aligned} U_{AC} = R_S (2i_A + i_B) + 2\dot{L}_S \frac{di_A}{dt} + 2\dot{L}_S \frac{di_B}{dt} + 3M_{SR} \left[\frac{di_a}{dt} \cos \varphi + \frac{di_b}{dt} \cos \left(\varphi + \frac{\pi}{3} \right) \right] - \\ - 3M_{SR} \left[i_a \sin \varphi + i_b \sin \left(\varphi + \frac{\pi}{3} \right) \right] \frac{d\varphi}{dt}. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Įrašius kitų fazių srautų išraiškas į atitinkamas įtampų balanso lygtis, gaunamos panašios į (4.1) išraiškas. Sistemai tinkamas diferencialinių lygčių užrašymo pavidalas yra matricinis t.y.

$$M(t) \dot{x}(t) = f(t, x(t)); \quad (4.4)$$

Sisteminė matrica simetriškam varikliui yra:

$$M(t) = \begin{pmatrix} 2L'_S & L'_S & 3M_{SR}C & 3M_{SR}C_+ & f_{AC} & 0 \\ L'_S & 2L'_S & 3M_{SR}C_- & 3M_{SR}C & f_{BC} & 0 \\ 3M_{SR}C & 3M_{SR}C_- & 2L'_R & L'_R & f_{ac} & 0 \\ 3M_{SR}C_+ & 3M_{SR}C & L'_R & 2L'_R & f_{bc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_r \end{pmatrix}; \quad (4.5)$$

$\check{C}ia :$

$$C_- = \cos(\varphi - \pi/3);$$

$$C = \cos \varphi;$$

$$C_+ = \cos(\varphi + \pi/3);$$

$$f_{AC} = -3M_{SR}[i_a \sin \varphi + i_b \sin(\varphi + \pi/3)];$$

$$f_{BC} = -3M_{SR}[i_a \sin(\varphi - \pi/3) + i_b \sin \varphi];$$

$$f_{ac} = -3M_{SR}[i_A \sin \varphi + i_B \sin(\varphi - \pi/3)];$$

$$f_{bc} = -3M_{SR}[i_A \sin(\varphi + \pi/3) + i_B \sin \varphi].$$

Simetriško asinchroninio variklio, kurio apvijos sujungtos žvaigždė be nulinio laido, matematinio modelio lygčių sistema pateikta (4.6):

$$M(t) \cdot \begin{pmatrix} di_A / dt \\ di_B / dt \\ di_a / dt \\ di_b / dt \\ di_\varphi / dt \\ d\omega / dt \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{AC} - R_S(2i_A + i_B) \\ U_{BC} - R_S(i_A + 2i_B) \\ U_{ac} - R_R(2i_a + i_b) \\ U_{bc} - R_R(i_a + 2i_b) \\ \omega \\ M_{em} + \sum M \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Aptariamą asinchroninio variklio matematinį modelį sudaro tik keturios diferencialinės lygtys. Sistema gali būti skaičiuojama tik skaitiniais metodais, tam galima pritaikyti daugelį specializuotų matematinių programų.

Sudarant variklių modelius, būsenos kintamaisiais parinktos statoriaus bei rotorius apvijomis tekančios srovės, rotorius kampinis greitis bei posūkio kampas. Modeliuojant variklį, kurio apvijos sujungtos žvaigždė su nuliniu laidu arba trikampiui, visos srovės yra nepriklausomai kintamieji, todėl bendras sistemą sudarančių lygčių skaičius yra 8. Jei apvijos sujungtos žvaigždė be nulinio laido, viena iš srovių yra tiesinė kitų kombinacija, todėl bendras sistemą sudarančių lygčių skaičius sumažėjai iki 6.

Parinktas pagal katalogą asinchroninis variklis - 4A100L2, [40] kurio apvijos sujungtos žvaigždė be nulinio laido ir kuris maitinamas iš dažnio keitiklio, veikiančio pagal 180° algoritmą. Kataloginiai 4A100L2 variklio duomenys pateikti 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė. Variklio 4A100L2 duomenys

Parametras	Vertė	Pastabos
Bendrieji variklio duomenys		
Nominali galia P_n , kW	5,5	
Fazinė maitinimo įtampa U_f , V	220/280	
Galios koeficientas $\cos\varphi$	0,91	
Naudingumo koeficientas η , %	87,5	
Nominalus greitis n_n , aps./min.	2880	Sinchroninis greitis 3000 aps./min.
Inercijos momentas J_r , $\text{kg}\cdot\text{m}^2$	0,0075	
R_s , Ω	1,05	Tiesiogiai naudojamas modelyje
L_s , H	0,385	Tiesiogiai naudojamas modelyje
M_{SR} , H	0,253	Tiesiogiai naudojamas modelyje
R_R , Ω	0,754	Tiesiogiai naudojamas modelyje
L_R , H	0,390	Tiesiogiai naudojamas modelyje

„Scilab“ programoje sudarėme atitinkamą programą, kuri sudaryta iš trijų dalių:

1. Keitiklis – variklis;
2. Stop sąlyga;
3. Asinchroninis variklis, kurio apvijos sujungtos žvaigžde be nulinio laido.

Mechatroninės sistemos dažnio keitiklis – asinchroninis variklis programa pateikta žemiau.

SCENARIJUS REALIZUOJANTIS ASINCHRONINIO VARIKLIO PALEIDIMĄ IŠ PWM VALDOMO DAŽNIO KEITIKLIO

```
Delta_t = 1e-6;           Diskretizacijos periodas
t_pabaiga = 850e-3;       // Imituojamas laikas
t_modeliavimas_vekt = [0:Delta_t:t_pabaiga]; // Laiko vektorius
[Plotis, Ilgis] = size(t_modeliavimas_vekt);
x_0 = [0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0]; // Pradinė sąlyga vektorius
K_vekt = 12e3; // Pjūklo signalo statusas kai nešantysis dažnis lygus 3 kHz
U_plius = 540; // Konverterio išėjimo teigiama įtampa
U_S_vekt = [0; 0; U_plius]; // Pradinės įtampos (pagal fazės A trikampi)
x_vekt = zeros(7,Ilgis); // Bus saugomi imitavimo rezultatai
riba_pj = 1; // Riba link kurios turi artėti pjūklinis signalas
U_vekt = zeros(3,Ilgis); // Bus saugomos įtampos vektoriaus vertės
```

```
t_2 = 0;
t_3 = 0;
t_4 = 0;
```

Pirmoji imitacija (būtina)

```
tic();
[x_iteracija_vekt, rd] = ode("roots", x_0, 0, t_modeliavimas_vekt, ...
    list(Variklis_Y_be_0_PWM, K_vekt, U_S_vekt), 4, list(Stop_salyga,riba_pj));
t_1 = toc();
```

```
Formuojame rezultatų vektorių
Rodykle = 1; // Kintamasis adresuoja pirmąjį įrašomą elementą
[Plotis, Ilgis] = size(x_iteracija_vekt);
t_modeliavimas_vekt(Rodykle + Ilgis - 1) = rd(1); // Pakeičiame laiko vertę laiko vektoriuje
x_vekt(:,Rodykle:Rodykle + Ilgis - 1) = x_iteracija_vekt; // Papildome atsakymu vektorių
// t_vekt = [t_modeliavimas_vekt(1:Ilgis - 1), rd(1)];
U_iteracija_vekt = diag(U_S_vekt)*ones(3,Ilgis);
U_vekt(:,Rodykle:Rodykle + Ilgis - 1) = U_iteracija_vekt;
Rodykle = Rodykle + Ilgis - 1; // Pakeičiam rodyklės vertę (rodo į paskutinįjį elementą)
```

```
while ~isempty(rd) do // Vykdomė tol, kol pasieksime pabaigą
// Analizuojame kodą dėl ko sustojome ir keičiame valdymo signalus
select int8(rd(2)) // Analizuojame dėl ko sustojome
case 1 then // Pjūklinio signalo amplitudė— pasiekė— maksimalią ar minimalią reikiamą
    K_vekt = -1*K_vekt; //Keičiam krypties koeficiento ženklą
    riba_pj = -1*riba_pj; // Keičiame ribą
case 2 then // U_A_nuostatos kertasi su pjūkliniu signalu
    if U_S_vekt(1) == U_plus then
        U_S_vekt(1) = 0;
    else U_S_vekt(1) = U_plus;
    end
case 3 then // U_B_nuostatos kertasi su pjūkliniu signalu
    if U_S_vekt(2) == U_plus then
        U_S_vekt(2) = 0;
    else U_S_vekt(2) = U_plus;
    end
case 4 then // U_C_nuostatos kertasi su pjūkliniu signalu
    if U_S_vekt(3) == U_plus then
        U_S_vekt(3) = 0;
    else U_S_vekt(3) = U_plus;
    end
end
end
```

Paleidžiame kitą imitavimo iteraciją

```
tic()
x_0 = x_vekt(:,Rodykle); //Naujas pradinis sąlygų vektorius
[x_iteracija_vekt, rd] = ode("roots", x_0, rd(1), t_modeliavimas_vekt(Rodykle:$), ...
    list(Variklis_Y_be_0_PWM, K_vekt, U_S_vekt), 4, list(Stop_salyga,riba_pj));
```

```

t_3 = toc()+t_3;

Formuojame rezultato vektorių
tic();
[Plotis, Ilgis] = size(x_iteracija_vekt);
if ~isempty(rd) then
    t_modeliavimas_vekt(Rodykle + Ilgis - 1) = rd(1); // Pakeičiame laiko vertę laiko vektoriuje
end
x_vekt(:,Rodykle:Rodykle + Ilgis - 1) = x_iteracija_vekt; // Papildome atsakymu vektoriui
U_iteracija_vekt = diag(U_S_vekt)*ones(3,Ilgis);
U_vekt(:,Rodykle:Rodykle + Ilgis - 1) = U_iteracija_vekt;
Rodykle = Rodykle + Ilgis - 1; // Pakeičiam rodykles vertę (rodo į paskutinįjį elementą)
t_4 = toc()+t_4;

end

```

PWM KEITIKLIO LOGIKĄ, REALIZUOJANTI FUNKCIJA

```

function z = Stop_salyga(t,x,riba_pj)
// Funkcija skirta stabdyti asinchroninio variklio diferencialini lygčių sprendimą, kai nešančiojo
pjūklinio signalo amplitudė pasiekia 1 (vienetą) arba -1 arba kai nuostatos signalo ir pjūklinio signalo
vertės sutampa.
// Funkcijos argumentai:
// x - būsenos kintamųjų vektorius(i_A, i_B, i_a, i_b, fi_el, omega, P_A, P_B, P_C);
// (Pjūklinio signalo amplitudės kiekvienai fazei - trys paskutiniai koeficientai)
// t - momentinė laiko vertė
// riba_pj - riba link kurios turi artėti pjūklinis signalas (-1 arba +1)
// Išvedimo duomenys:
// z - stabdymo sąlygų vektorius (stabdoma tada, kai nors vienas jo elementų keičia ženklą)
// Funkcija skirta iškviešti su "roots" modifikatoriumi ir iškviečiama instrukcijų seka:

// Parametriškai nurodytos apvijų maitinimo įtampos
alpha = 0.90; // Moduliacijos koeficientas
u_A = sin(100*%pi*t);
u_B = sin(100*%pi*t - 2*%pi/3);
u_C = sin(100*%pi*t + 2*%pi/3);
U_vekt = [u_A; u_B; u_C]*alpha;

// Tikriname ar trikampio amplitudė neviršija vieneto
z_1 = x(7) - riba_pj;
// Tikriname ar nesikerta nuostatos ir pjūklinės įtampos signalai
z_2 = U_vekt - x(7);

z = [z_1; z_2];

endfunction

```

VARIKLĮ SU DAŽNIO KEITIKLIU MODELIUOJANTI FUNKCIJA

```
function [x_dot] = Variklis_Y_be_0_PWM (t, x, K_vekt, U_S_vekt)
```

Funkcija skirta simetriško asinchroninio variklio, jungto žvaigžde be nulinio laido ir maitinamo iš dažnio keitiklio (keitiklio signalas formuojamas naudojant impulsų pločio moduliaciją) imitavimui. Visi variklio konstrukciniai ir elektriniai parametrai, tokie kaip varžos, induktyvumai, maitinimo įtampų vertės ir pan., užduodami tiesiogiai. Keitiklio nešantysis dažnis užduodamas funkcijos viduje, moduliuojantis signalas apskaičiuojamas funkcijos išorėje. PWM generuojamas klasikiniu metodu lyginant pjūklinę įtampą su nustatyta verte (pats palyginimas atliekamas "Stop" funkcijoje, šioje pjūklinis signalas yra tik generuojamas. Pjūklinis signalas generuojamas integruojant konstantas.

```
// Funkcijos argumentai:
```

```
// x - būsenos kintamųjų vektorius(i_A, i_B, i_a, i_B, fi_el, omega, k_tri);
```

```
// t - momentinė laiko vertė
```

```
// K_vekt - konstantos užduodančios pjūklinio signalo amplitudės didėjimo greitį
```

```
// (normalizuotui signalui K_vekt skaičiuojamas iš išraiškų  $K\_vekt = 4*f$  kur
```

```
// f - našančiojo signalo dažnis).
```

```
// U_S_vekt - fazinių įtampų vektorius
```

```
// Išvedimo duomenys:
```

```
// x_dot - būsenos kintamųjų išvestinių vektorius
```

```
// Funkcija skirta iškviesti su "roots" modifikatoriumi ir iškviečiama instrukcijų seka:
```

```
// x_0 = [0; 0; 0; 0; 0; 0; K_0]; Pradinė sąlygą vektorius (STULPELIS)
```

```
// Čia: K_0 - pradinės pjūklinio signalo vertės (0; -2/3; 2/3)
```

```
// t_0 = 0; Pradinė laiko vertė
```

```
// t_intervalas = [0; 1e-4; 1]; Laiko vertės kurioms turi būti gražinti sprendiniai)
```

```
// K_vekt = 12e3; Pjūklo signalo statusas kai nešantysis dažnis lygus 3 kHz
```

```
// U_S_vekt = [540, 0, 0];
```

```
// [x_vekt, rd] = ode("roots", x_0, t_0, t_intervalas, list (Variklis_Y_be_0_PWM, K_vekt, U_S_vekt),  
4, Stop_salyga);
```

```
// Parametrizuotos statoriaus apvijų maitinimo fazinės įtampos (užduodamos tiesiogiai)
```

```
// u_A = 310*sin(100*%pi*t);
```

```
// u_B = 310*sin(100*%pi*t - 2*%pi/3);
```

```
// u_C = 310*sin(100*%pi*t + 2*%pi/3);
```

```
u_A = U_S_vekt(1);
```

```
u_B = U_S_vekt(2);
```

```
u_C = U_S_vekt(3);
```

```
// Perskaičiuojam į linijines įtampas
```

```
u_AC = u_A - u_C;
```

```
u_BC = u_B - u_C;
```

```
// Rotoriaus apvijų maitinimo įtampos
```

```
// (trumpai jungtas rotorius)
```

```
u_a = 0;
```

```
u_b = 0;
```

```
u_c = 0;
```

```
// Čia trinties arba varantysis momentas (jei pastovus, jei kinta - per atskiras funkcijas)
```

```

M_isorinis = 0;

// 5 kW variklio duomenys
L_S = 0.385; L_R = 0.390; L_u = 0.253;
R_S = 1.05; R_R = 0.75;
J_r = 0.0075;
PPS = 1; (polių porų skaičius)

// Mechaninė inercija
J_rot = J_r;
pps = PPS;

// Išskiriame nepriklausomus kintamuosius
fi = x(5);
omega = x(6);
i_A = x(1); i_B = x(2); i_a = x(3); i_b = x(4);

// Skaičiuojame elektromagnetinį momentą
i_C = -i_A - i_B; i_c = -i_a - i_b;
S_pl = sin(fi+2*%pi/3); S_0 = sin(fi); S_min = sin(fi-2*%pi/3);
M_em = -pps*L_u*(i_A*i_a + i_B*i_b + i_C*i_c)*S_0 ...
        -pps*L_u*(i_A*i_b + i_B*i_c + i_C*i_a)*S_pl ...
        -pps*L_u*(i_A*i_c + i_B*i_a + i_C*i_b)*S_min;

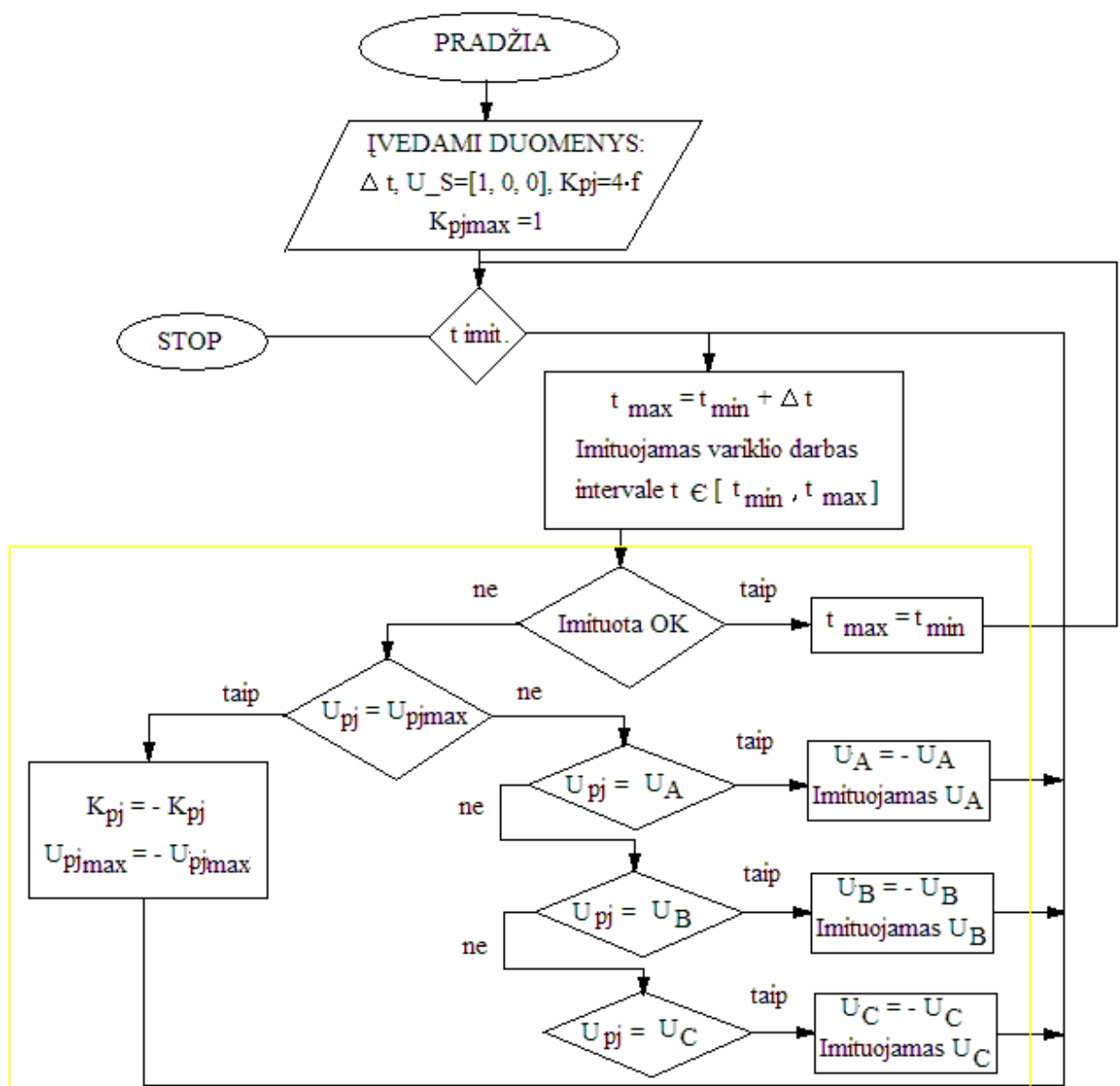
// Sistemos matrica, pagal formulę
M=[ 2*L_S, L_S, 3*L_u*cos(fi), 3*L_u*cos(fi+%pi/3), -3*L_u*(i_a*sin(fi)+i_b*sin(fi+%pi/3)), 0; ...
    L_S, 2*L_S, 3*L_u*cos(fi-%pi/3), 3*L_u*cos(fi), -3*L_u*(i_a*sin(fi-%pi/3)+i_b*sin(fi)), 0; ...
    3*L_u*cos(fi), 3*L_u*cos(fi-%pi/3), 2*L_R, L_R, -3*L_u*(i_A*sin(fi)+i_B*sin(fi-%pi/3)), 0; ...
    3*L_u*cos(fi+%pi/3), 3*L_u*cos(fi), L_R, 2*L_R, -3*L_u*(i_A*sin(fi+%pi/3)+i_B*sin(fi)), 0; ...
    0, 0, 0, 0, 1, 0; ...
    0, 0, 0, 0, 0, J_rot];

// Dešinioji lygybės pusė
f_des = [u_AC - R_S*(2*i_A+i_B); ...
        u_BC - R_S*(i_A+2*i_B); ...
        0 - R_R*(2*i_a+i_b); ...
        0 - R_R*(i_a+2*i_b); ...
        omega; ...
        M_em];

// Randame būsenos kintamąjį vektorių
x_dot = [M\f_des; K_vekt];

endfunction

```



4.6 pav. Mechatroninės sistemos dažnio keitiklis – asinchroninis variklis imituojančios programos algoritmas

Programos gaunami duomenys yra: Δt – minimalus sprendimo žingsnis, U_S – vektorius santykinėms variklio maitinimo įtampoms saugoti, K_{pj} – konstanta nustatanti pjūklinio nešančiojo signalo dažnį, $K_{pj,max}$ – konstanta nustatanti absoliutinę nešančiojo dažnio amplitudės vertę.

Sudarant sistemos dažnio keitiklis – asinchroninis variklis modelį visą sistemą būtina aprašyti diferencialinėmis lygtimis. Variklio diferencialinės lygtys buvo išdėstytos 4.1.1 skyrelyje. Invertelio modelį tikslinga supaprastinti teigiant, kad raktai yra idealūs, o pats inverteris maitinamas iš begalinės galios nuolatinės įtampos šaltinio. Padarius šias prielaidas nebereikia konstruoti realių IGBT ar kitų puslaidininkinių raktų modelių, todėl modelis supaprastėja.

Matematiniam modelyje taip pat turi būti imituojama keitiklio veikimo logika. Jei keitiklis valdomas pagal sinusinės impulse pločio moduliacijos algoritmą, būtina generuoti tiek nešantįjį, t. y. pjūklinį, tiek sinusinį nuostatos signalą. Pastovaus dažnio it tolydų sinusinį signalą gauti labai paprasta. Pjūklinis nešantysis signalas gali būti gaunamas integruojant konstantas. Priekinis frontas, kur funkcija didėja, gaunamas integruojant teigiamą, galinis, kur funkcija mažėja – neigiamą konstantą. Paprasčiausiu atveju tiek priekinis tiek galinis frontas turi sutapti, todėl gali būti keičiamas tik konstantos ženklas.

Atsižvelgiant į nešančiojo ir nuostatos signalų vertes generuojamos maitinimo įtampos, kurios, signalams susilyginus, turi kisti šuoliškai. Tai reiškia, kad nors sistema bus aprašoma tolydinėmis diferencialinėmis lygtimis, tačiau valdymo signalas bus trūkios matematinės funkcijos. Visi skaitiniai diferencialinių lygčių sprendimo metodai numatyti tik tolydinėms funkcijoms, todėl visą imitavimo intervalą reikia išskaidyti į trumpesnius intervalus, kuriuose valdymo signalai yra tolydžios funkcijos. Galima išskirti šiuos įvykius, kuriems įvykus turi būti generuojamas trūkus valdymo signalas. Visi jie išvardinti 4.2 lentelės.

4.2 lentelė. Sprendimo metu analizuotinių įvykių sąrašas

Įvykis	Veiksmai aptikus
Pjūklinio signalo amplitudė pasiekė maksimalią (minimalią) vertę	Pakeisti integravimo konstantos ženklą
Nuostatos signalo U_A amplitudė lygi pjūklinio signalo amplitudei	Pakeisti A fazės tiltelio raktų padėtį (idealizuotame modelyje – pakeisti įtampos vertę)
Nuostatos signalo U_B amplitudė lygi pjūklinio signalo amplitudei	Pakeisti B fazės tiltelio raktų padėtį (idealizuotame modelyje – pakeisti įtampos vertę)
Nuostatos signalo U_C amplitudė lygi pjūklinio signalo amplitudei	Pakeisti C fazės tiltelio raktų padėtį (idealizutame modelyje – pakeisti įtampos vertę)

Daugelyje modernių matematinių programų integruotose metoduose yra galimybė nurodyti įvykius, kuriems įvykus diferencialinių lygčių sprendimas stabdomas. Scilab'e, kuriame sudaromas pavaros modelis, irgi galima užprogramuoti funkciją, kuri aptiktų lentelėje pažymėtus įvykius. Scilab'as stabdytų sprendimą tada, kai tokios funkcijos rezultatas tampa lygus nuliui. Tokia funkcija turi grąžinti vektorius, kuris apskaičiuojamas taip (4.7):

$$x = \begin{pmatrix} x_{\Delta} - x_{\Delta \max} \\ \sin(100\pi) - x_{\Delta} \\ \sin(100\pi - 2\pi/3) - x_{\Delta} \\ \sin(100\pi + 2\pi/3) - x_{\Delta} \end{pmatrix}; \quad (4.7)$$

čia: x_{Δ} – nešančiojo signalo amplitudė; $x_{\Delta \max}$ – maksimali nešančiojo signalo amplitudės vertė.

Kai kuris nors vektoriaus x elementas keičia ženklą Scilab'as sustabdo diferencialinių lygčių sprendimą ir, analizuojant vektoriaus x vertes, galima nustatyti kuris konkrečiai įvykis įvyko. Ši kodo dalis algoritmo struktūroje apibrėžta geltonu kvadratu, o x vektorių skaičiuojanti funkcija pavadinta “Stop sąlyga”.

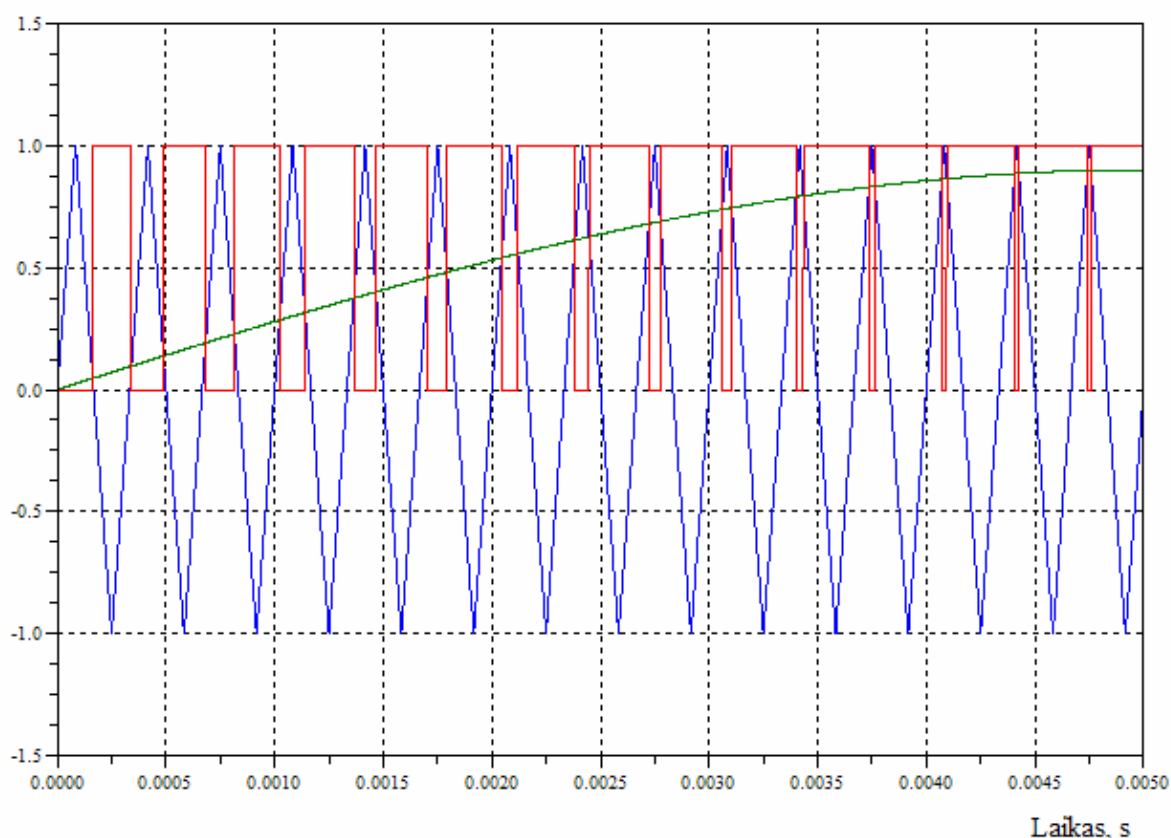
Kai sprendimas sustabdomas pirma analizuojama, ar šis sustojo natūraliai, pasibaigus Δt trukmės sprendimo žingsniui, ar sustabdytas priverstinai įvykus kuriam nors iš 4.2 lentelėje paminėtų įvykių. Algoritmo schemoje tai patikriname “Imituota OK” bloke. Jei imitavimas pasibaigė neįvykus jokiam įvykiui laiko vertės inkrementuojamos ir imituojama toliau. Jei vis tiek aptiktas kuris nors iš įvykių analizuojama, kuris konkrečiai. Bloke “Upj = Upj.max” analizuojama ar šis įvykis nesusijęs su maksimalia pjūklinio signalo amplitude, o blokuose “Upj = U_A”, “Upj = U_B” ir “Upj = U_C” tikrinamos atitinkamos fazės nuostatos signalo ir nešančiojo dažnio signalų sankirtos. Identifikavus konkretų įvykį atliekamas 4.2 lentelės nurodytas veiksmas ir imitavimas tęsiamas toliau. Galutinis rezultatas formuojamas kaip atskirų trumpų imitavimų visuma. Visą šią logiką valdo ir rezultatus į duomenų masyvus ruošią pagrindinis scenarijus.

Funkcijoje “Variklis_Y_be_0_PWM” užprogramuotos sistema aprašančios diferencialinės lygtys. Jas sudaro asinchroninio variklio diferencialinės lygtys bei lygtis skirta nešančiojo signalo generavimui (iš principo integratorius).

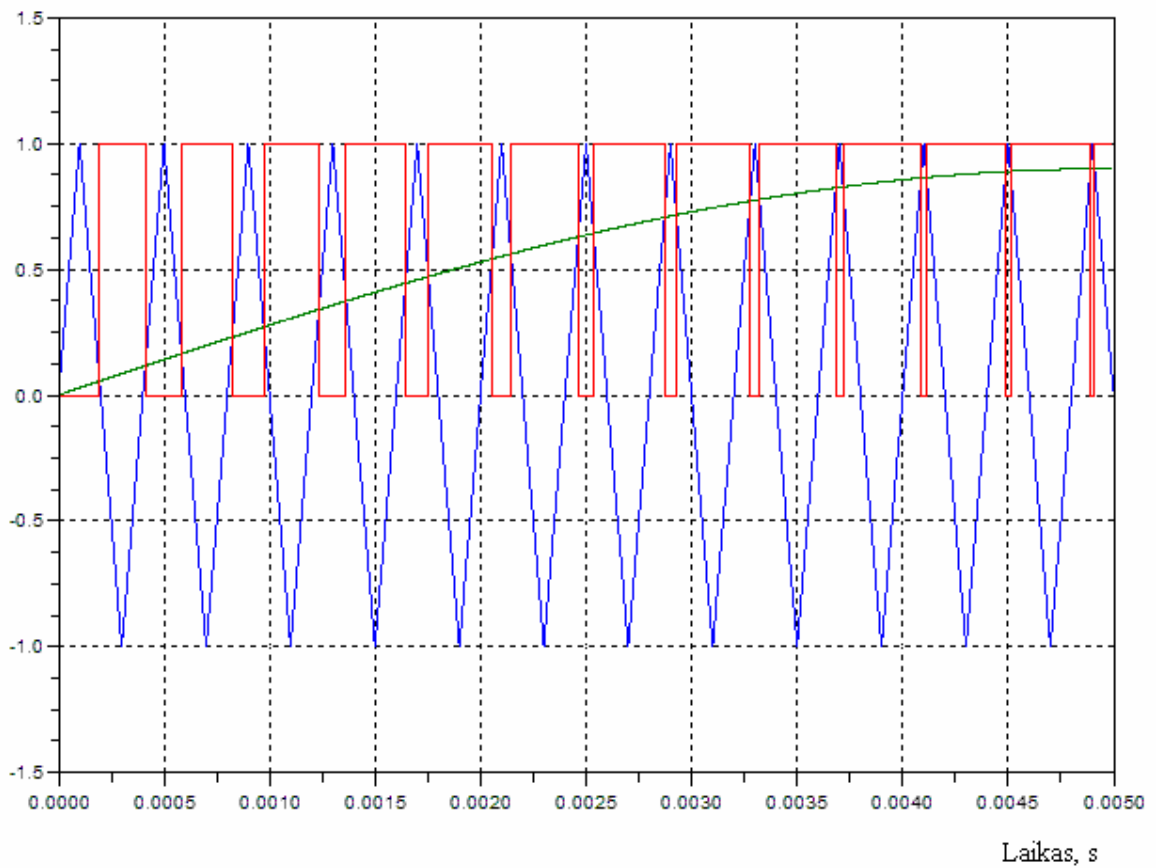
5. SKAIČIUOJAMOJI DALIS

5.1 MECHATRONINĖS SISTEMOS DAŽNIO KEITIKLIS – ASINCHRONINIS VARIKLIS IMITACINIO MODELIO „SCILAB“ PROGRAMOJE SUDARYMAS IR CHARAKTERISTIKŲ PAGAL JĮ SKAIČIAVIMAS

Užduodamas nešantis dažnis 3 kHz, kai $U=540V$, kuris valdis visus šešis inverterio raktus, taip kad vidutiniuose inverterio taškuose U_1 , U_2 , U_3 būtų gaunamos sinusinės formos įtampos bangos, perstumtos viena nuo kitos 120 elektrinių laipsnių. Inverteris susidėda iš trijų pusiau tiltelių (kiekvienai fazei), kur viršutinis ir apatinis raktai valdomi taip, kad vienas įjungiamas – kitas išjungiamas. Dėl to, kad inverterio raktai turi ilgesnę išsijungimo laiką negu įsijungimo, kartais tarp vieno rakto išsijungimo ir įsijungimo įterpiamas vadinamas „mirties“ arba nejautrumo laikas, kuris realizuojamas papildomais įrenginiais. Maitinant trifazį variklį tokio tipo inverteriu su sinusinės IPM realizavimu inverterio išėjimo įtampa gaunama lyginant nešančiojo dažnio signalą nuostatos signalu. Šių signalų susikirtimo taškai nusako inverterio raktų įjungimą. Tai iliustruojama 5.1 ir 5.2 pav.



5.1 pav. Sinusinė impulsų pločio moduliacija, kai $U=540V$, dažnis 3 kHz



5.2 pav. Sinusinė impulsų pločio moduliacija, kai $U=300V$, dažnis 2,5 kHz

Tam, kad būtų galima pavaizduoti vienoje koordinatų sistemoje visi 5.1 ir 5.2 paveikslėliuose pavaizduoti dydžiai perskaičiuoti santykiniais santykiniais pagal formulę (5.1):

$$a_s = \frac{a}{U} \quad (5.1)$$

čia: a_s – dydis santykiniais vienetais; U – nuolatinės inverterių maitinančios įtampos vertė [V].

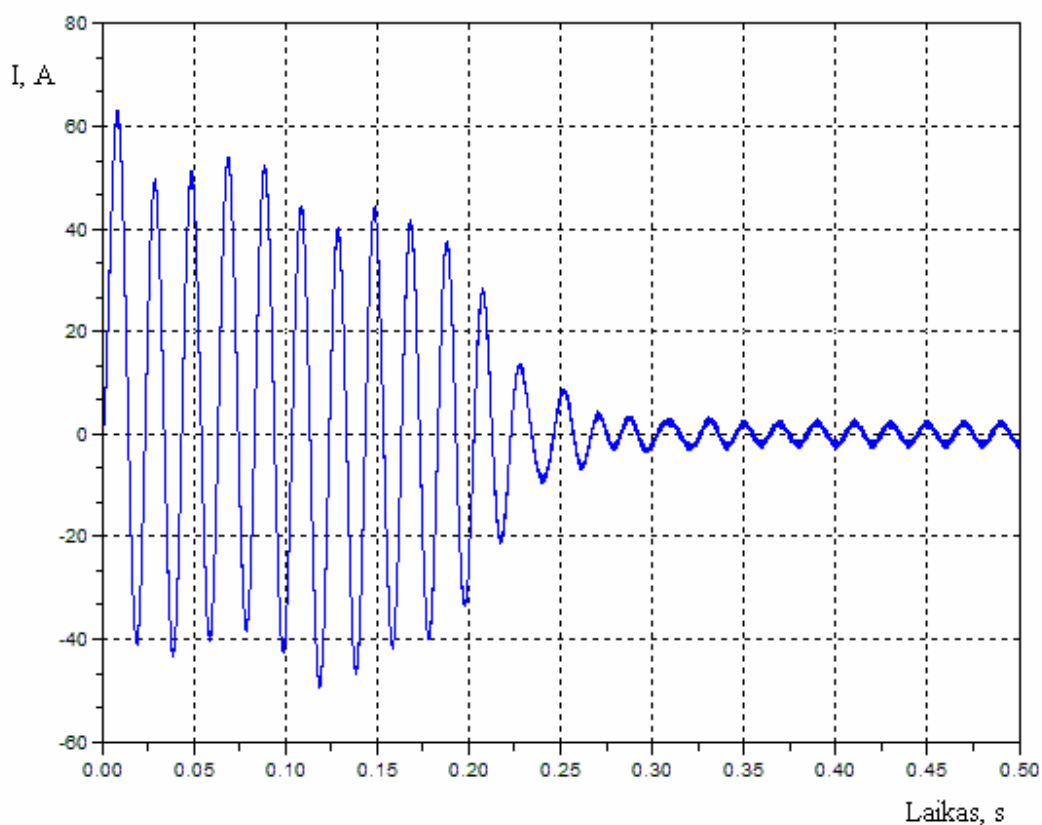
Mėlynos spalvos kreivė vaizduoja nešančiojo dažnio signalą. Šiuo atveju jis atitinka klasikinį pjūklinės įtampos signalą. Abudu signalo frontai simetriški. Žalia kreivė vaizduoja nuostatos signalą, kuris atitinka pirmąjį įtampos periodo ketvirtį A fazei. Raudona kreivė vaizduoja įtampą prie kurios prijungta atitinkama fazinė apvija. Kadangi imituojamas idealus raktas įtampos frontai gaunami labai statūs. Realiose sistemose raktų užsidarymas trunka kažkiek laiko.

Nežiūrint to, kad tiek nuostatos tiek nešantysis signalai simetriški laiko ašies atžvilgiu įtampos reikšmės yra tik teigiamos. Tai aiškinama tuo, kad imituojamas keitiklis inverteris maitinamas tik iš

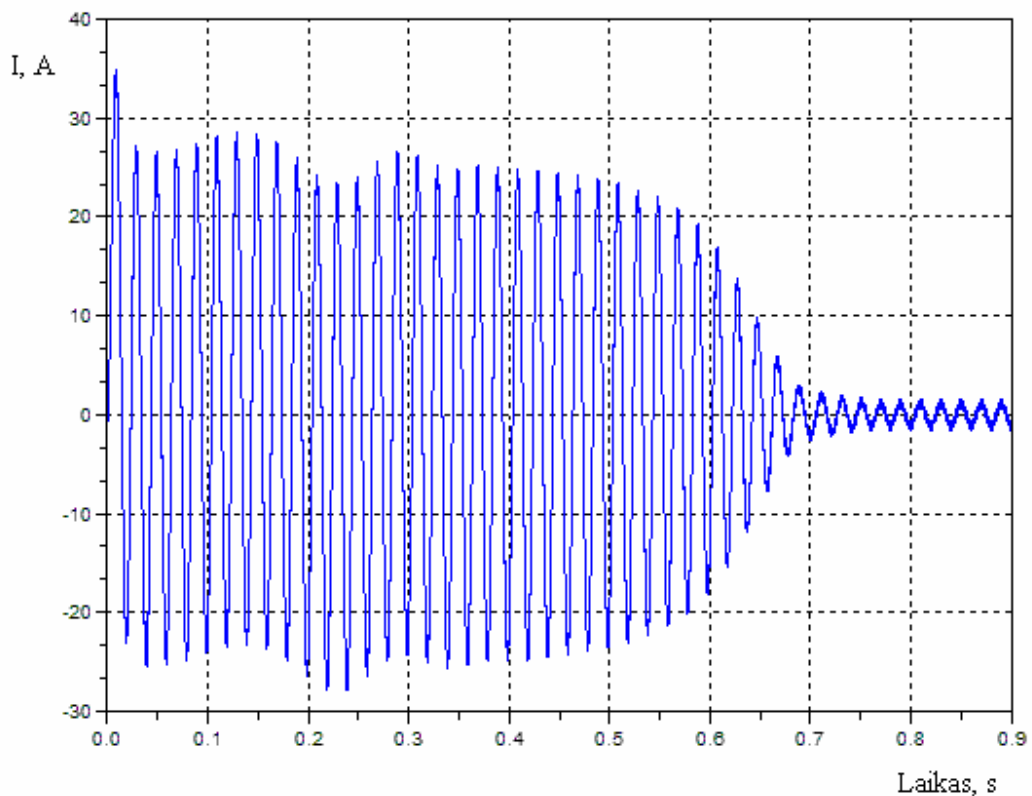
vienpolio šaltinio. Sudarytas algoritmas puikiai tiktų ir iš dvipolio šaltinio maitinamam inverteriui imituoti.

Iš grafikų matyti, kad tik nuostatos signalas atitinka tolydžias funkcijas. Nešantysis ir įtampos signalai yra trūkūs. Maitinimo įtampos vertė keičiasi kai nuostatos signalas tampa lygus nešančiajam.

Imituojamas neapkrauto variklio paleidimas. Statoriaus A fazės srovės pereinamieji procesai pateikti 5.3 ir 5.4 paveiksluose, esant skirtingiems įtampoms ir dažniams. Iš paveikslų matosi, kad paleidimo metu srovė beveik 6 kartus viršija variklio nominaliąją srovę, kuri tokios galios varikliui lygi apie 10 A. Pasibaigus pereinamajam procesui, statoriaus grandinėje teka apie 3 A srovė – tuščios veikos srovė. Iš grafikų matyti, kad pakeitus įtampą ir dažnį paleidimo srovės skiriasi beveik dvigubai. Tuščios veikos srovė, esant $U=540V$ ir dažniui 3 kHz nusistovi apie $t \approx 0,3$ s, o sumažinus įtampą iki 300V ir dažnį 2,5 kHz matyti, kad varikliui pasiekti tuščios veikos greitį tam reikia beveik dvigubai laiko.

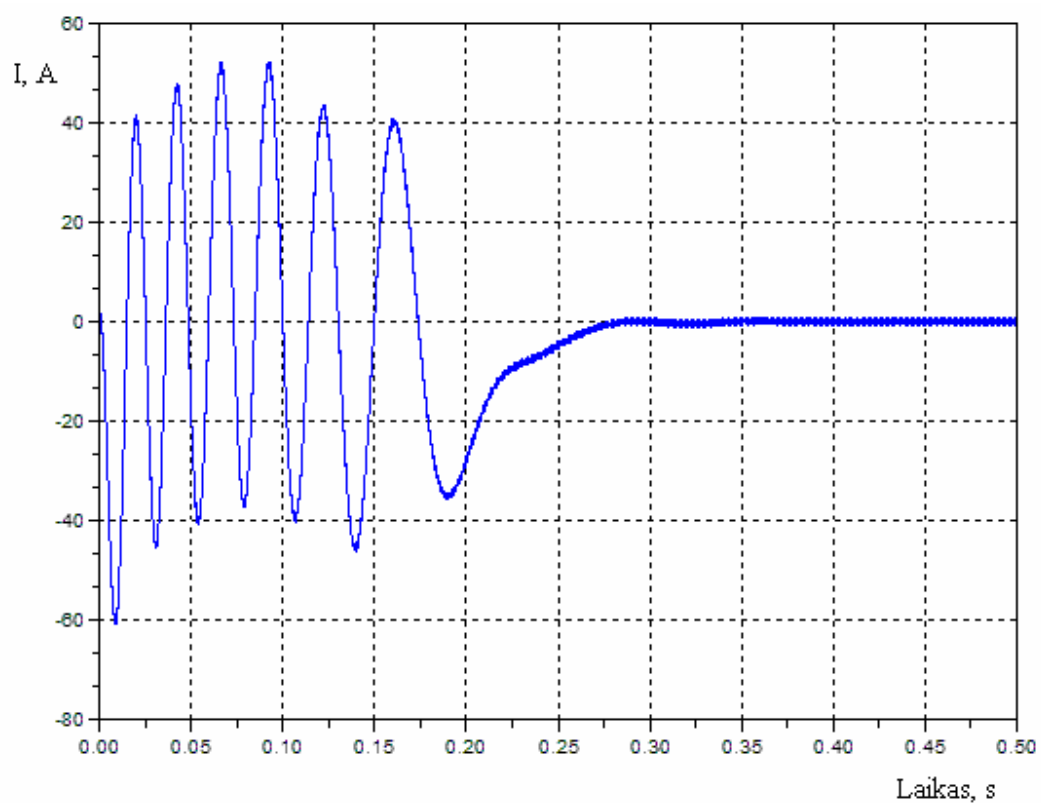


5.3 pav. Statoriaus A fazės srovės pereinamasis procesas, kai $U=540V$, dažnis 3 kHz

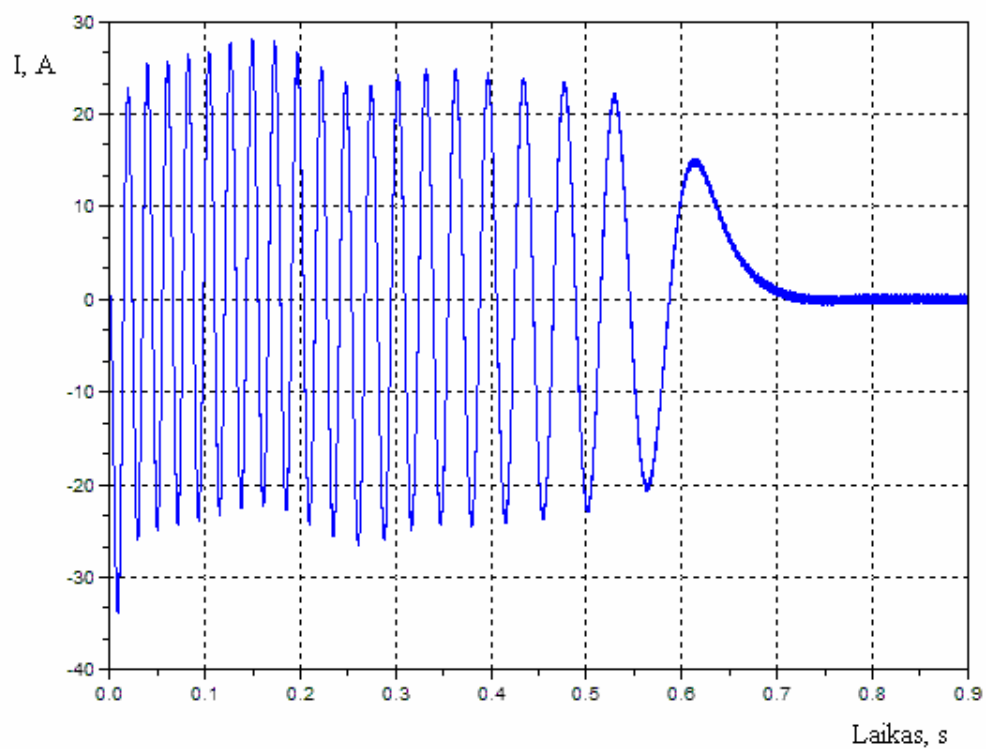


5.4 pav. Statoriaus A fazės srovės pereinamasis procesas, kai $U=300\text{V}$, dažnis 2,5 kHz

Rotoriaus A fazės srovės pereinamieji procesai pateikti 5.5 ir 5.6 paveiksluose. Paleidžiant tiek apkrautą, tiek neapkrautą variklį, rotoriaus srovė pereinamojo proceso metu švytuoja. Srovės amplitudė paleidimo pradžioje yra didžiausia, o dažnis artimas tinklo dažniui. Panašiai, kaip ir statoriaus srovės, pereinamojo proceso pradžioje rotoriaus srovės stipris apribojamas, taigi aiškiai matyti išskiriamas momentas $t \approx 0,28\text{ s}$, esant dažniui 3 kHz ir kai $t > 0,7\text{ s}$, esant dažniui 2,5 kHz. Pereinamojo proceso pabaigoje, nežiūrint to, kad variklis dirba tuščiąja veika, o rotoriaus greitis lygus sinchroniniam, rotoriaus grandinėmis teka srovės, kurių maksimali akimirkinė vertė siekia apie 3 A. Šios srovės atsiranda dėl atsiranda dėl komutacijos procesų statoriaus grandinėse.

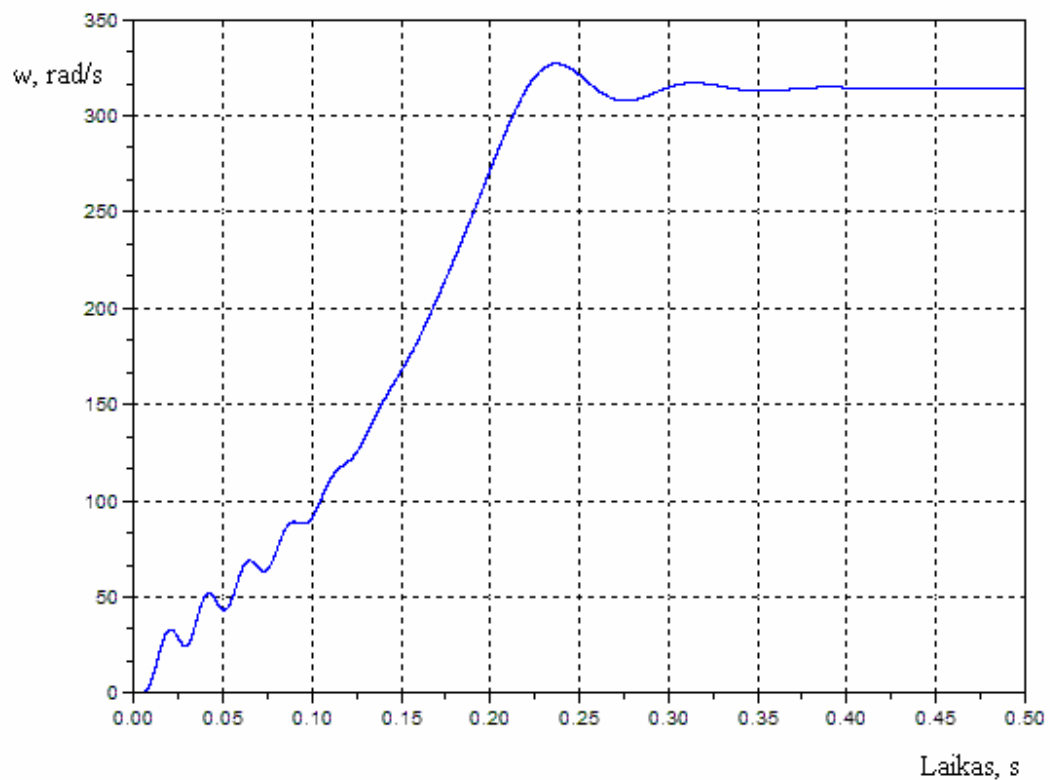


5.5 pav. Rotoriaus A fazės srovės pereinamasis procesas, kai $U=540V$, dažnis 3 kHz

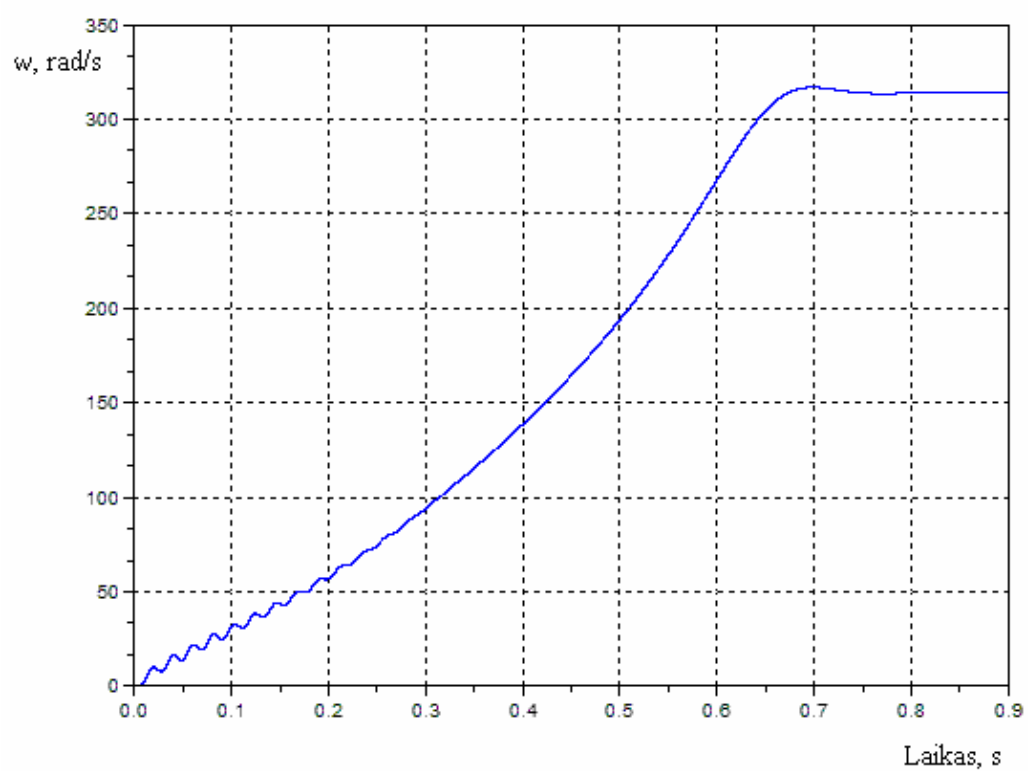


5.6 pav. Rotoriaus A fazės srovės pereinamasis procesas, kai $U=300V$, dažnis 2,5 kHz

Rotoriaus greičio pereinamieji procesai pateikti 5.7 ir 5.8 paveiksluose. Abiem atvejais sinchroninis sukamojo magnetinio lauko greitis vienodas (vienos polių poros) asinchroninei mašinai lygus 100π , todėl nusistovėjusi greičio vertė lygi 314 rad/s. Paleidžiant variklį didesnę pereinamojo proceso dalį jis veikia varikliniu režimu, ir tik pačioje pereinamojo proceso pabaigoje, kai dėl perreguliavimų akimirkinė greičio vertė viršija sinchroninį, galimas trumpalaikis veikimas generatoriniu režimu. Didesnis švytavimas pereinamojo proceso pradžioje bei pabaigoje galima sieti su didesne 4A100L2 asinchroninio variklio rotoriaus inercija. Dėl didelės rotoriaus inercijos, pasibaigus greičio pereinamajam procesui, nėra jokių pulsacijų.



5.7 pav. Greičio pereinamasis procesas, kai $U=540V$, dažnis 3 kHz



5.8 pav. Greičio pereinamasis procesas, kai $U=300V$, dažnis 2,5 kHz

6. TYRIMO REZULTATŲ APIBENDRINIMAS

IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

Programinio paketo „Scilab“ pagalba buvo sudarytas mechatroninės sistemos dažnio keitiklis – asinchroninis variklis modelis ir gauti šie rezultatai:

1. Statoriaus ir rotoriaus A fazių srovių pereinamųjų procesų trukmės sumažėja nuo 0,35 – 0,7 s sumažinus įtampą ir nešančiojo signalo dažnį.
2. Greičio pereinamojo trukmė, sumažinus įtampą nuo 540V iki 300V, o nešančiojo signalo dažnį nuo 3 kHz iki 2,5 kHz pailgėja du kartus (0,35 iki 0,7 s).
3. Variklį maitinant iš dažnio keitiklio fazinės įtampos keičiasi šuoliškai, todėl imituojant šią sistemą visą imitavimo laiką būtina skaidyti į trumpesnius intervalus, kurių metu visos funkcijos tolydžios.
4. Nagrinėjamu atveju, kai nekinta nei nešančiojo nei nuostatos signalo charakteristikos, galima buvo iš anksto nustatyti raktų persijungimo momentus, kas labai supaprastintų programą, tačiau sudaryta programa tuos momentus nustato automatiškai, todėl yra universalesnė.
5. Pjūklinės įtampos generatoriaus veikimas buvo imituojamas integruojant konstantą. Šis sprendimas leidžia varijuojant konstantą paprastai keisti nešančiojo signalo charakteristikas, pvz. dažnį, užpildomumą ir pan.
6. Idealizavus inverterio raktus ir padarius prielaidą, kad inverteris maitinamas nuolatine įtampa sistemą dažnio keitiklis – variklis galima imituoti variklio diferencialinių lygčių sistemą papildžius tik viena tiesine diferencialine lygtimi.

LITERATŪRA IR KITI ŠALTINIAI

1. Г. Г. Соколовский Электроприборы переменного тока с частотным регулированием. Учебник. Москва: Академия, 2006 г. 265 с.
2. А. Е. Козярук, В. В. Рудаков Современное и перспективное алгоритмичное обеспечение частотно-регулируемых электроприводов. Санкт-Петербург: Электротехническая компания, 2004 г. 64 с.
3. R. Rinkevičienė, A. Petrovas Mechatroninių sistemų modeliavimas. Mokomoji knyga. Vilnius: Leidykla. 2007 156 psl.
4. A. Petrovas Trifazių asinchroninių variklių dinaminiai modeliai. Daktaro disertacija. Vilnius, 2007.
5. Geleževičius V., Kriščiūnas K., Kubilius V. Elektros pavarų valdymo sistemos. – Vilnius: Mokslas 1990. – 360 p.
6. P. Jenkinas Tiesiaieigės dažninės pavaros tyrimas. Baigiamasis magistro darbas. Vilnius, 2004.
7. Башарин А. В.,Новиков В. А. и др. Управление электро приводами. – Ленинград: Ленинградское отделение 1982.
8. Bimal K. Bose Modern power Electronics and AC drivers. United States of America: Printice Hall PTP 2002. 691 p.
9. Приобразобатели частоты для частотно-регулируемого асинхронного электропривода. Электротекст [žiūrėta 2008-04-18]. Prieiga per internetą: www.etx.ru
10. ATTAIANCE, C., et al. Optimal Modulaiton Strategy for Active Front-End Inverter Feeding Induction Motors. In Proc. Of the IEEE International Symposium, 8-11 July 2002, vol 4. p. 1253-1258.
11. PURCELL, A.; ACARNLEY, P.P. Enhanced Inverter Switching for Fast Response Direct Torque Control. In Power Electronics, IEEE Transitions, May 2001, vol. 16, p. 382-389.
12. TANIGUCHI K. et al. A PWM Strategy for Reducing Torque-Ripple in Inverter-Fed Induction Motor. In Industry Applications, IEEE Transactions, January 1994, vol. 30, p 503-507.
13. ГЕРМАН-ГАЛКИН, С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 СПб. 2001. 302 с.
14. A.Baškys, V.Gobis Puslaidininkinio dažnio keitiklio išėjimo įtampos moduliavimas erdvinio vektoriaus būdu. Elektronika ir elektrotechnika, 2006, Nr. 4(54), p. 25-29.

15. Field Orientated Control of 3-Phase AC-Motors. Texas Instruments. February 1998 [žiūrėta 2007-04]. Prieiga per internetą: www.ti.com.
16. Глазенко Г. А., Гончареко Р.Б. Полупроводниковые преобразователи частоты в электроприводах. Л. : Энергия, 1969, 184 с.
17. Drive and Automation. Telemecanique [žiūrėta 2008-03]. Prieiga per internetą: www.telemecanique.de.
18. Drive and Automation. Vector [žiūrėta 2008-03]. Prieiga per internetą: www.vector.de.
19. POŠKA, A.J. Specialiosios automatines sistemas. Habilitacinis darbas. Vilnius: Technika, 1995, 204 p.
20. MASTEIKA R.K. *Elektros pavaros: teorija, schemas, projektavimas, uždaviniai, pavyzdžiai*. Kaunas, 2002. 125 p.
21. КОПЫЛОВ, И.П. Математическое моделирование электрических машин: учебник для вузов М.: 2001. 327 с.
22. КОПЫЛОВ, И.П. Электрические машины: учебник для вузов М.: 2000. 607 с.
23. Pulse Width Modulation (PWM) Basics [žiūrėta 2004-04-19]. Prieiga per internetą: www.powerdesigners.com
24. Козачекко В. Основные тенденции развития встроенных систем управления двигателями и требования к микроконтроллерам Chip News. 1999. Nr.1. С.29 [žiūrėta 2008-02-16]. Prieiga per internetą: www.chipnews.com.
25. A. Matkevičius E., Radzevičius L. Žmonių sauga. Metodikos nurodymai. Vilnius: Technika, 2007. 144 p.
26. Specialybės kalbos kultūra. Vilnius: Technika, 2003.
27. Petr Uhler, Zdenek Kubiczek. 3-Phase AC Motor Control with V/Hz Speed Closed Loop Using the DSP56F80X [žiūrėta 2008-02-14]. Prieiga per internetą: <http://e-www.motorola.com/motor>
28. RINKEVIČIENĖ, R.; PETROVAS, A. New model of linear induction drive. *Elektronika ir elektrotechnika*. 2004, Nr. 2(51), p. 25–28
29. СОКОЛОВ, М. М.; СОРОКИН, Л. К. Электропривод с линейными асинхронными двигателями. Москва: Энергия, 1974. 136 с.
30. KARALIŪNAS, B. Elektromechaninių energijos keitiklių nestacionariųjų procesų tyrimai *Elektronika ir elektrotechnika*. Kaunas: Technologija, 2006, Nr. 1(65), p. 68–72.
31. MATKEVIČIUS, E. Mechatroninių įrenginių valdymas. Daktaro disertacijos santrauka. Vilnius: Technika, 2003. 31 p.

32. LYSHEVSKI, S. E. Electromechanical systems, Electric Machines and Applied Mechatronics. CRC Press, 2000. 800 p.
33. POŠKA, A. Mathematical Models of an automatic System for localizing Dust Explosions. *Informatica*, 1996, Vol.7, No.4, p. 517–524.
34. Nise, N. S. Control System Engineering. 4th edition. – John Wiley & sons, Inc., 2004.
35. Сафонов Ю.М. Электроприводы промышленных роботов.– М.: Энергоатомиздат, 1990.– 176с.
36. М.Г. Чиликин, А. С. Сандлер Общий курс электропривода. Москва : Энергоиздат, 1981.– 577 с.
37. Преображевский В. И. Полупроводниковые выпрямители. М. Энергия, 1976. – 120 с.
38. Ellis, G. Control systems design guide. – Academic press, 2000.
39. Poška A. ir kt. Automatikos terminų žodynas (lietuvių, vokiečių, anglų, prancūzų, rusų kalbų). Vilnius: Technika. 2004, 715 p.
40. Variklių katalogas. [žiūrėta 2008-01-24]. Prieiga per internetą: <http://www.ampermetr.ru.nhu9.htm>
41. Л. П. Петров и др. Асинхронный электропривод с тиристорными коммутаторами. М. Энергия, 1970. – 128 с.
42. Ключев В. И. Теория электропривода. Учебник для вузов 3-е издание. М.: Энергоатомиздат, 2001. – 714 с.
43. Kuo, B. C., Golnaraghi, F. Automatic control systems. 8th edition.– John Wiley & sons, Inc., 2002.
44. Терехов В. М. Элементы автоматизированного электропривода. Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1987. – 224 с.
45. Elektrotechnikos terminų žodynas: ADIAFORA [kompaktinis diskas]. Kauno technologijos universitetas. 2001.
46. Elektrotechnikos terminų žodynas. – Kaunas.: Technologija, 1999. – 871 p.
47. Enciklopedija. [žiūrėta 2008-02-14]. Prieiga per internetą: http://en.wikipedia.org/wiki/Stepper_motor
48. Dabartinės lietuvių kalbos žodynas [žiūrėta 2008-02-14]. Prieiga per internetą: <http://www.autoinfo.lt/webdic/>
49. Barzdžiukienė L. D., Celiešienė V., Kaulakienė A.. Baigiamasis studijų darbas. Kalbininkų patarimai: teorija ir tvarkyba. 2-asis pataisytas ir papildytas leidimas. Vilnius: Technika, 2005. 148 p.

PRIEDAI

1 priedas: Pažyma: XI-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „MOKSLAS-LIETUVOS ATEITIS“.