



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

**Darius Vilčiauskas**

**ELEKTROS MAŠINŲ BANDYMO STENDO**  
**MODERNIZAVIMAS IR TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Darbo vadovas:  
dr. Gytis Petrauskas

**KAUNAS, 2015**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**

**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS  
AUTOMATIKOS KATEDRA**

**ELEKTROS MAŠINŲ BANDYMO STENDO  
MODERNIZAVIMAS IR TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas  
Valdymo technologijos (kodas 621H66001)

Darbo vadovas:

dr. Gytis Petrauskas

2015-06-04

Recenzentas:

\_\_\_\_\_

2015-06-\_\_

Darbo atliko:

Darius Vilčiauskas

2015-06-04

**KAUNAS, 2015**



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
Elektros ir elektronikos fakulteto

---

(Fakultetas)

**Darius Vilčiauskas**

(Studento vardas, pavardė)

---

**Valdymo technologijos 621H66001**

Studijų programos pavadinimas, kodas

Baigiamojo projekto „Elektros mašinų bandymo stendo modernizavimas ir tyrimas“

**AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA**

2015 m. birželio 4 d.

**Kaunas**

Patvirtinu, kad mano **Darius Vilčiausko** baigiamasis projektas, tema „Elektros mašinų bandymo stendo modernizavimas ir tyrimas“, yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka

---

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

---

(parašas)

Vilčiausko, Dariaus. „Elektros mašinų bandymo stendo modernizavimas ir tyrimas“. *Magistro* baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Gytis Petrauskas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Automatikos katedra.

Kaunas, 2015. 46 psl.

## SANTRAUKA

Tyrimo tikslas – modeliavimo būdu ištirti modernizuoto lokomotyvo elektros mašinų bandymo stendo įtaką pagrindiniams elektros tinklo parametrams, nusistovėjusiame režime.

Tyrimas atliekamas modeliavimo būdu, MATLAB SIMULINK aplinkoje. Tiriamos elektros keitiklių modifikacijos: nevaldomas, pusiau valdomas ir pilnai valdomas, naudojant fazinio kampo ir erdvinio vektoriaus moduliacijas. Taip pat ištirtas elektros keitiklis su filtru. Keitiklio apkrova – 180 kW galios nuolatinės įtampos variklis.

Buvo fiksuojami pagrindiniai tinklo parametrai: galios faktorius, tarpfazinės įtampos harmoninis iškraipymas, naudingumo koeficientas ir tinklo srovės harmoninis iškraipymas, su kiekvienu elektros keitikliu, keičiant tinklo pastotės transformatoriaus nominalią galią.

Tyrimo rezultai parodė, kad tinkamiausias elektros keitiklis yra pilnai valdomas su erdvinio vektoriaus valdymu, galios grandinėje įterpus šalutinių harmonikų filtrą.

Reikšminiai žodžiai: harmoninis, iškraipymas, elektros keitiklis, galios faktorius, elektros tinklas.

Vilčauskas, Darius. Modernization and Research of Test Stand for Electrical Machines. Master degree / supervisor doc. dr. Gytis Petrauskas; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Automation

Kaunas, 2015. 46 p.

## **SUMMARY**

The goal of this research is to investigate modernized test stand of locomotive electrical machines influence to power grid main parameters by modeling established states

The research was done by modeling in MATLAB Simulink environment. Investigation of uncontrolled, semi-controlled and fully controlled converters modifications was done, using phase angle and space vector modulation. Also investigation of electrical converter with capacitor filter was done. Converter load is 180 kW DC motor.

Main grid parameters that was captures is: power factor, interfacial harmonics distortion, efficiency coefficient and grid currents harmonic distortion for each power converter while the grid transformer rated power was changed.

Research results has revealed, that the most suitable converter is fully controlled converter with IGBT valves and capacitor filter, using space vector modulation. By increasing rated power of substation, power factor, voltage and current harmonic distortions are improving.

Keywords: harmonic, distortion, electric converter, power factor, power grid.

# Turinys

Įvadas.....	7
1 Apžvalginė dalis.....	8
1.1 Abipusės apkrovos metodas.....	8
1.1.1 Esama bandymo sistema.....	8
1.1.2 Siūloma modifikacija.....	9
1.2 Elektros energijos parametrų keitikliai.....	10
1.2.1 Įtampos keitiklis.....	11
1.2.2 Įtampos valdymas impulso pločio moduliacija matematinis aprašymas.....	15
1.3 Erdvės vektoriaus moduliacija.....	17
1.3.1 Erdvinio vektoriaus moduliacijos valdymo strategijos.....	20
2 Metodinė dalis.....	21
2.1 Tinklo pastotės modelis.....	21
2.2 Energijos perdavimo linijos modelis.....	22
2.3 Įtampos keitiklio ir bandamosios mašinos modelis.....	23
2.4 Valdymo modeliai.....	24
2.5 Filtro modelis.....	26
2.6 Matuojami parametrai.....	27
3 Tyrimo rezultatai.....	28
3.1 Nevaldomas keitiklio įtakos tyrimas.....	29
3.2 Elektros keitiklų su fazinio kampo valdymu įtakos tyrimas.....	29
3.3 Elektros keitiklų su erdvinio vektoriaus moduliacija įtakos tyrimas.....	32
3.4 Elektros keitiklų su erdvinio vektoriaus moduliacija ir filtru įtakos tyrimas.....	37
3.5 Dvigubas apkrovos įtakos tyrimas.....	41
Išvados.....	43
Šaltiniai.....	44

## Ivadas

Nuolatinės srovės elektros mašinos eksploatuojamos tiek varikliniu, tiek generatoriniu režimais. Nors, išstobulėjus puslaidininkinėms technologijoms daugelyje sričių, nuolatinės srovės generatorius pakeitė elektroniniai keitikliai, tačiau jie vis dar naudojami aukštos kokybės suvirinimo darbuose, elektrolizės procesuose, akumuliatorių baterijoms įkrauti ir kt.

Nuolatinės srovės variklio pritaikymas yra žymiai platesnis, nes galima tiksliai ir plačiame diapazone valdyti variklio sukimosi greitį, didelis paleidimo momentas, reguliuojamos mechaninės charakteristikos. Dėl šių ypatybių šie varikliai plačiai naudojami elektriniame transporte: elektriniai traukiniai, troleibusai, tramvajai.

Elektriniame transporte dažniausiai naudojami galingi nuolatinės įtampos varikliai, dėl tikslesnio momento valdymo. Kadangi nuolatinės srovės varikliai yra brangesni nei kitų tipų varikliai, jų sandara sudėtingesnė ir dažniau genda, todėl ypač svarbu profilaktiškai ar remonto metu išbandyti nuolatinės srovės mašinos darbą su apkrova. Bandymo metu nustatoma būklė, ieškoma defektų, nustatomi parametrai ir kt.

Galingų nuolatinės srovės elektros mašinų bandymui naudojamas specialus bandymo įrenginys, kurį sudaro daugiau nei dvi nuolatinės srovės mašinos ir asinchroninis variklis. Papildomas elektros mašinas galima pakeisti ekonomiškais elektroniniais keitikliais, kurie pagerintų sistemos valdymą ir sumažintų sistemos eksploatacijos sąnaudas.

Dėl didelės bandomųjų elektros mašinų galios (iki 180 kW) svarbu patikrinti modernizuoto elektros mašinų bandymo stendo galimybę dirbti 0,4 kV įtampos elektros tinkle.

Šio darbo tikslas – modeliavimo būdu ištirti modernizuoto lokomotyvo elektros mašinų bandymo stendo elektros įtaką pagrindiniams elektros tinklo parametrams, nusistovėjusiame režime.

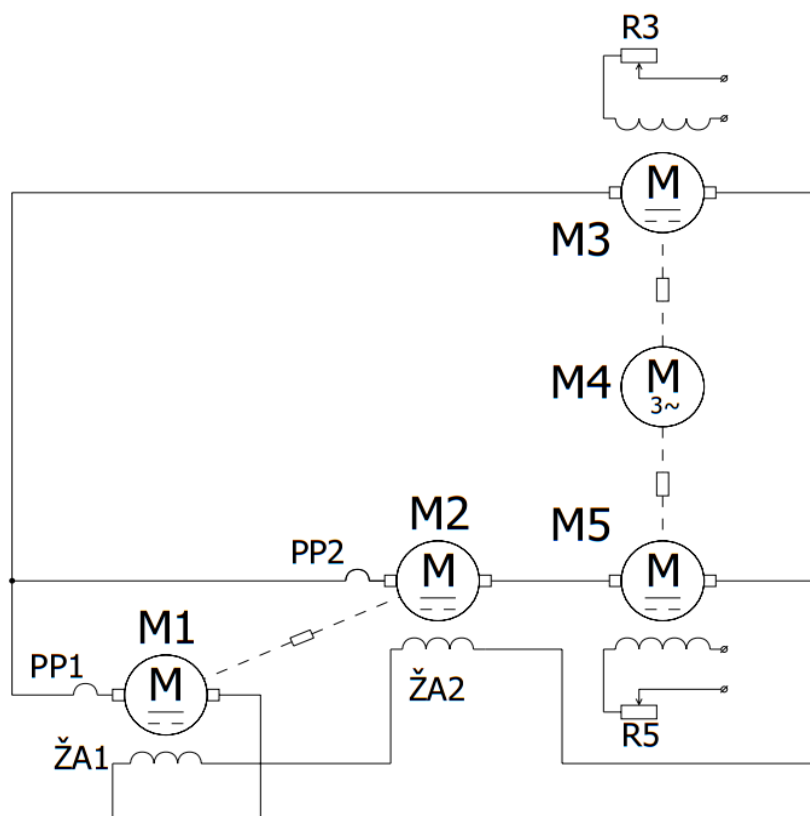
# 1 Apžvalginė dalis

## 1.1 Abipusės apkrovos metodas

Per bandymus, taikant abipusės apkrovos metodą, dvi elektros mašinos sujungiamos mechaniškai bei elektriškai ir prijungiamos prie energijos šaltinio. Viena iš mašinų, veikianti generatoriniu režimu, perduoda energiją kitai mašinai, veikiančiai varikliniu režimu, o ši eikvoja visą savo mechaninę energiją pirmosios sukimui. Iš tinklo energijos suvartojama tik tiek, kiek reikia abiejų mašinų nuostoliams padengti [1].

### 1.1.1 Esama bandymo sistema

Nuolatinės srovės generatoriai M4 ir M5 yra mechaniškai sujungti su trifaziu asinchroniniu varikliu M3 (1 pav.). Generatorius M4 yra pagrindinis nuolatinės elektros srovės šaltinis, M5 – papildomas nuolatinės srovės šaltinis. Šliaužikliniais reostatais R4 ir R5 yra reguliuojama nuolatinės srovės generatorių M4 ir M5 generuojama įtampa. Nuolatinės įtampos elektros mašina M1 – bandomasis variklis, M2 – bandomasis nuolatinės įtampos generatorius, kurie yra tarpusavyje mechaniškai sujungti. Atitinkamai sujungti PP1 ir PP2 bandomųjų mašinų papildomieji poliai. Kadangi dvi nuolatinės įtampos nuoseklaus žadinimo mašinos negali dirbti lygiagrečiai, generatoriaus M2 žadinimo apvija jungiama nuosekliai, variklio M1 grandinėje.



1 pav. Abipusės apkrovos bandymo įrenginio schema



Kontaktorai K1, K2 ir K3 bandomųjų mašinų žadinimo apvijas įjungia į skirtingus režimus:

- a) kontaktorius K1 bandomųjų mašinų M1 ir M2 žadinimo apvijas įjungia tiesiogine eiga;
- b) kontaktorius K2 bandomųjų mašinų M1 ir M2 žadinimo apvijas įjungia reversine eiga;
- c) kontaktorius K3 lygiagrečiai bandomųjų mašinų žadinimo apvijoms įjungia šuntavimo varžą R1.

Pagal sistemos maitinimo šaltinius bandymo sistema gali veikti 3 režimais [2, 3]:

1. Veikia tik pagrindinis elektros energijos šaltinis M4. Tuomet abi bandomosios mašinos veiks kaip varikliai ir suksis ta pačia kryptimi, nes per bandomųjų mašinų M1 ir M2 inkaro ir žadinimo apvijas elektros srovė tekės ta pačia kryptimi. Kol šaltinio M4 įtampa maža, variklių sukimosi greitis bus vienodas. Prie didesnės generuojamos įtampos variklių M1 ir M2 sukimosi greičiai pradės skirtis ir vienas iš variklių gali būti mechaniškais sugadintas – tai nepageidaujamas režimas.

2. Veikia tik papildomas elektros energijos šaltinis M5. Tuomet bandomosios mašinos M1 ir M2 veikia kaip varikliai, kurių sukimosi momentai bus vienodo dydžio ir nukreipti į priešingas sukimosi puses. Tokiu atveju varikliai nesisuks, nes per elektros mašinų M1 ir M2 inkarų ir žadinimo apvijų sudarytą grandinę teka vienodo dydžio ir tos pačios krypties srovė.

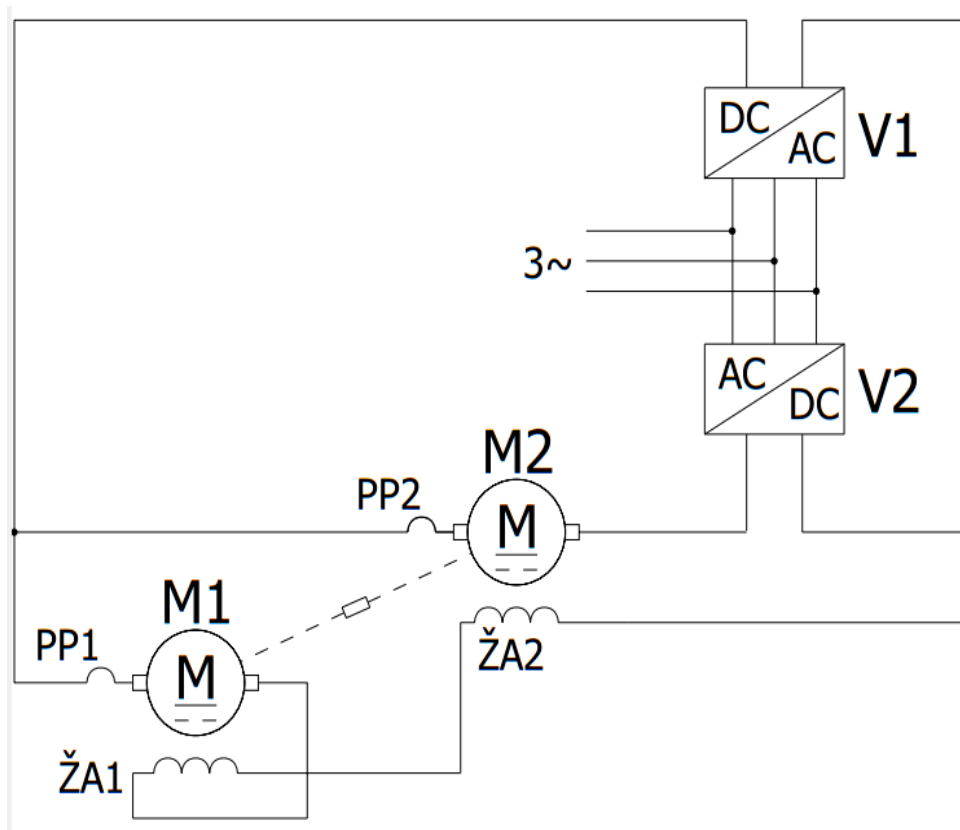
3. Veikia M4 ir M5 elektros energijos šaltiniai. Iš pradžių jų generuojamos įtampos vienodos. Taip ant elektros mašinos M2 inkaro apvijos nekrenta įtampa ir mašina nei dirba kaip variklis, nei kaip generatorius. Kadangi bandomoji mašina M2 nesukuria jokios apkrovos, elektros mašina M1 dirbdama varikliniu režimu įsisuka iki tam tikro greičio, pasiekus reikiamą greitį, šaltinio M5 generuojama įtampa mažinama šliaužikliniu reostatu R4. Ant elektros mašinos M2 inkaro pradeda kristi įtampa. Kadangi inkaras yra sukamas elektros mašinos M1, elektros mašina pradeda generuoti srovę, kurią kartu vartoja ir elektros mašina M1, todėl srovės vartojimas iš pagrindinio elektros energijos šaltinio mažėja. Elektros mašina M1, variklis, suka elektros mašiną M2, generatorių, o elektros energijos šaltiniai M4 ir M5 padengia elektrinius, magnetinius, mechaninius ir kitus elektros mašinų M1 ir M2 nuostolius.

### **1.1.2 Siūloma modifikacija**

Didžiausias esamos sistemos trūkumas yra galios nuostoliai nuolatinės srovės gavyboje, dėl elektros mašinų skaičiaus. Nuolatinės srovės mašinų naudingumo koeficientas paprastai kinta nuo 0,75 iki 0,97 priklausomai nuo apkrovos [4], o kintamosios srovės mašinų naudingumo koeficientas 0,8 – 0,95 [5]. Didžiausią naudingumo efektyvumą šios mašinos pasiekia esant nominalioms apkrovoms. Testuojamų nuolatinės srovės variklių galios varijuoja, ir kartu šios mašinos testuojamos apkraunant įvairiomis galiomis, todėl praktiškai elektros mašinos M3, M4,

M5, kurios tiekia nuolatinę srovę, nedirbs su nominalia apkrova.

Šias tris elektros mašinas M3, M4 ir M5 galima pakeisti dviem elektroniniais srovės keitikliais. Šiuolaikiniai elektroniniai keitiklių naudingumo koeficientas gali pasiekti iki 0,98 % ir jų galios koeficientas būna mažiau priklausomas nuo apkrovos [5, 6]. Panaudojus elektroninius keitiklius, sumažinamas įrenginių skaičius ir padidinamas elektros keitimo našumas. Modernizuoto bandymo stendo supaprastinta bandymo sistema pateiktas 2 pav.



2 pav. Abipusės apkrovos įrenginys su modifikacija

## 1.2 Elektros energijos parametrų keitikliai

Paprasciausi keitikliai naudoja diodų tiltelius, perduodant energiją iš kintamos įtampos pusės į nuolatinės įtampos pusę. Naudojant tyristorius, galima valdyti energijos perdavimo srautą. Didžiausia natūraliai komutuojančių keitiklių problema yra šalutinių harmonikų generavimas ir reaktyvi galia [7, 8]. Bet elektros energijos srauto valdymui panaudojus pilnai valdomus ventilius, IGBT ar MOSFET, galima sumažinti šalutinių harmonikų kiekį ir valdyti galios faktorių. Tačiau pilnai valdomų keitiklių sudėtingesnis valdymas.

Šalutinės harmonikos turi neigiamą poveikį elektrinių sistemų veikimui, todėl priverčia atkreipti dėmesį į harmonikų generavimą ir jų poveikį. Šalutinių harmonikų generavimas į tinklą yra apibrėžiamas standartais.

Su kintamo impulso pločio moduliacijos keitikliais galima valdyti ne tik galios faktorių, bet ir harmonikų generavimą į tinklą.

Keitikliai turi keletą pritaikymo sričių, kur energijos srautas gali pakeisti tekėjimo kryptį veikimo metu. Pavyzdžiui, lokomotyvuose, žemyn – aukštyn veikiančiuose konvėjeriuose, kranuose. Šiuose pritaikymuose elektros keitikliai turi grąžinti energiją atgal į tinklą. Plačiausiai naudojami k elektros keitiklių tipai pateikti lentelėje 1.

Lentelė 1. Labiausiai paplitę keitiklių tipai

Keitiklių tipas	Privalumai	Trūkumai
PWM vienafazis įtampos lygintuvas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Paprastas valdymas</li> <li>Reikalinga mažiau galios ventilių</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pulsacijos, kurių dažnis dvigubai didesnis nei tinklo dažnis</li> </ul>
PWM trifazis įtampos lygintuvas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nėra nuolatinės įtampos harmonikų</li> <li>Nesant valdymo signalų, veikia, kaip nevaldomas keitiklis</li> <li>Veikia be apkrovos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sudėtingesnė ir brangesnė valdymo sistema.</li> <li>Didina elektromagnetinę interferenciją</li> <li>Aukštesnė nuolatinė įtampa</li> <li>Negali dirbti su užtrumpinta apkrova</li> </ul>
PWM trifazis srovės lygintuvas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nuolatinės srovės pusėje nereikia kondencatoriaus</li> <li>Dirba su maža nuolatinės srovės įtampa</li> <li>Sumažina elektromagnetinę interferenciją</li> <li>Gali veikti kai apkrova yra užtrumpinta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kintamos srovės pusėje filtro kondencatorius gali sukelti rezonancinius reiškinius</li> <li>Visada turi būti valdymo signalas</li> <li>Negali veikti su atvira apkrovos grandine</li> </ul>

### 1.2.1 Įtampos keitiklis

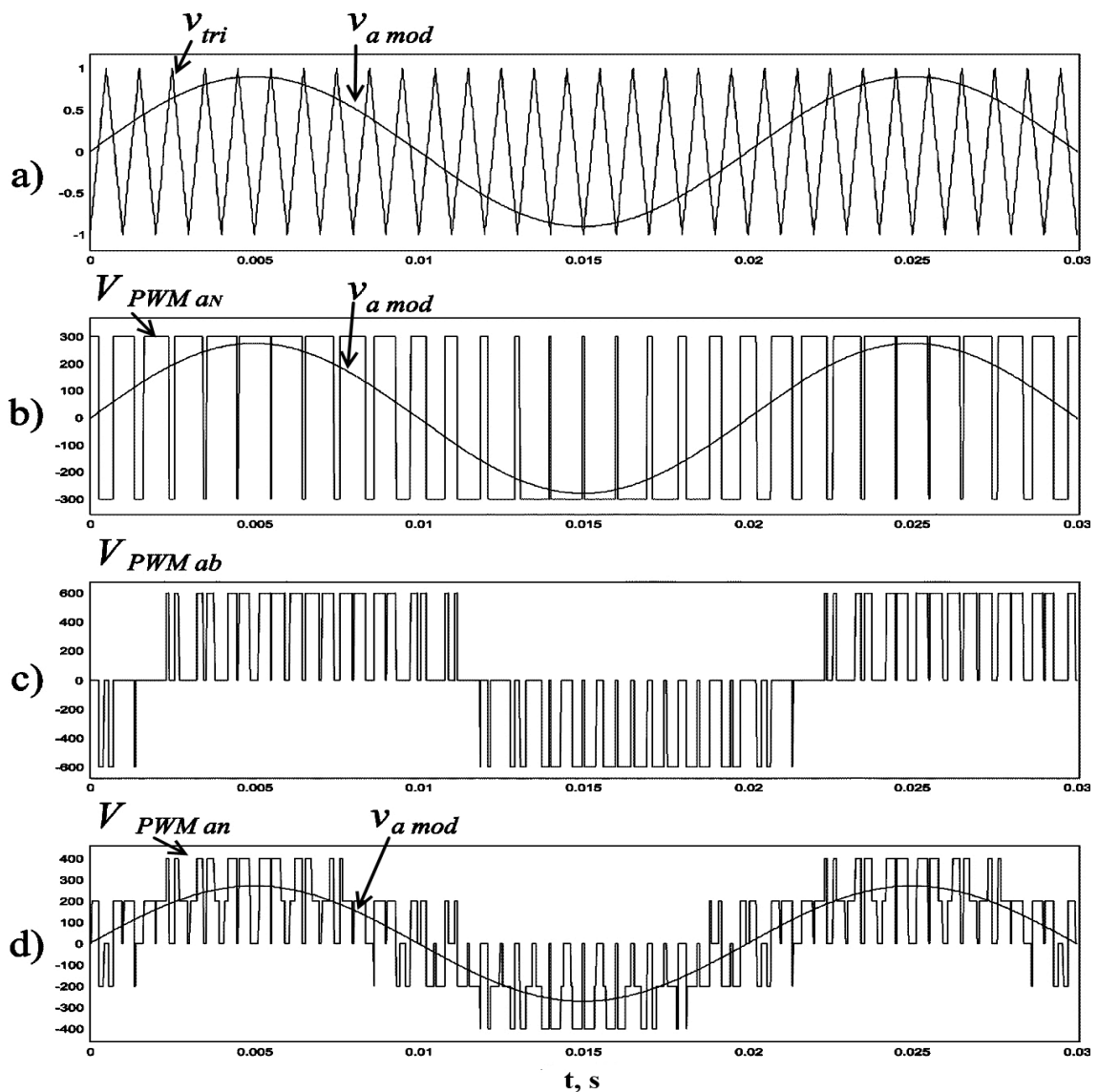
Įtampos keitiklio pagrindinis veikimo principas yra palaikyti pastovią užduotą nuolatinę įtampą apkrovai. Užduotos įtampos  $V_{ref}$  vertė turi būti pakankamai aukšta, kad keitiklio diodai liktų užblokuoti. Kai ši sąlyga yra tenkinama, nuolatinė įtampa yra matuojama ir palyginama su nustatyta  $V_{ref}$  įtampa. Gauta paklaidos vertė yra panaudojama įjungti arba išjungti ventilius.

Tokiu būdu priklausomai nuo nuolatinės įtampos vertės, galia gali būti vartojama arba grąžinama iš kintamos įtampos šaltinio.

Kai įtampos keitiklio apkrovos srovė  $I_{DC}$  yra teigiama (lygintuvo režimas), nuolatinės įtampos pusėje esantis kondencatorius  $C_{DC}$  yra iškraunamas ir įtampos paklaidos vertė tampa teigiama. Dėl šios sąlygos, valdymo blokas generuoja kintamo impulso pločio valdymo signalus įtampos keitiklio galios ventiliams (IGBT, MOSFET ar kt.)[11]. Tokiu būdu srovė teka iš kintamos įtampos pusės į nuolatinę pusę ir kondencatorius vėl įkraunamas. Tačiau (vietoj bet) kai

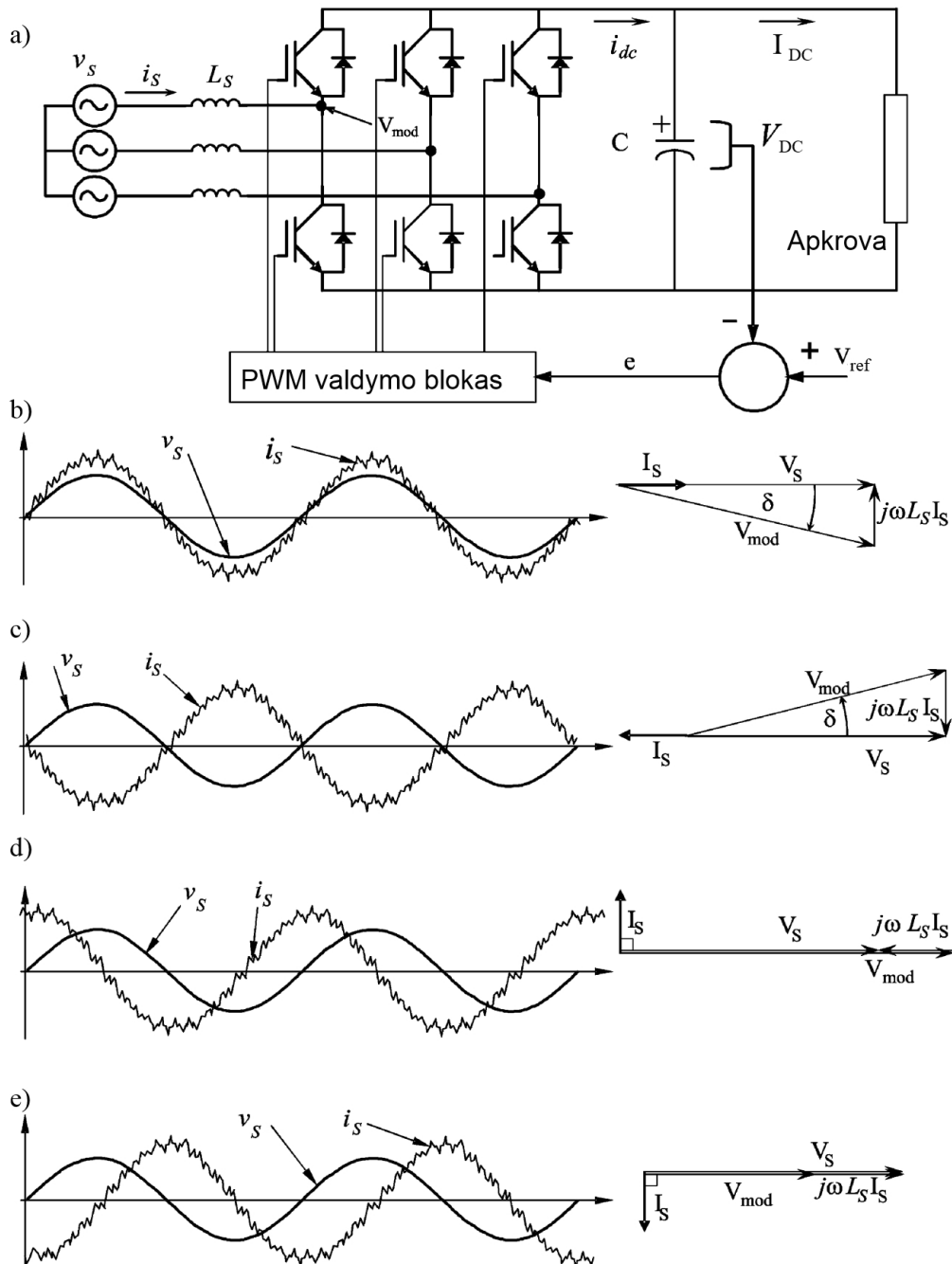
nuolatinė srovė  $I_o$  tampa neigiama (inverterio režimas), kondenciatorius yra perkraunamas, valdymo blokas generuoja valdymo signalus, siekdamas iškrauti kondenciatorių, grąžinant galią į kintamos įtampos pusę.

Modulatorius ventilius valdo (išjungia arba įjungia) pagal vieną iš egzistuojamų valdymo modelių [11]. Valdymo modelis gali būti įtampos (įtampos keitiklis) arba srovės (srovės keitiklis) sinusoidinė kintamo impulso moduliacija (sinusoidal pulse with modulation). Pavyzdžiui, įtampos keitiklis gali būti valdomas pavaizduotu 3 pav. metodu, kuris literatūroje vadinamas  $v_{xmod}$  santykinė šablono amplitudės (proportional to the amplitude of the template) moduliacija. Yra ir kitų moduliacijos metodų, kurie pateikti [9] šaltinyje. Bet populiariausia yra sinusoidinė kintamo impulso moduliacija (SPWM), kuri naudoja pjūklinį (triangular) nešantįjį signalą impulsų generavimui.



3 pav. PWM fazių įtampos: a) pjūklinis moduliacijos signalas ir užduotos įtampos sinusoidė; b) PWM fazės moduliacija; c) PWM tarpfazinė įtampa; d) PWM fazės įtampa

Kad įtampos keitiklis veiktų tinkamai, impulsų moduliatorius turi tinkamai generuoti pagrindinį  $v_{xmod}$  signalą, tokio pat dažnio, kaip ir įtampos šaltinio dažnis. Keičiant pagrindinio signalo amplitudę ir šio signalo fazės poslinkį su tinklo įtampa, įtampos keitiklį galima priversti veikti viename iš keturių režimų: lygintuvas, didinantis galios faktorių, lygintuvas, mažinantis galios faktorių, inverteris, didinantis galios faktorių, inverteris, mažinantis galios faktorių.

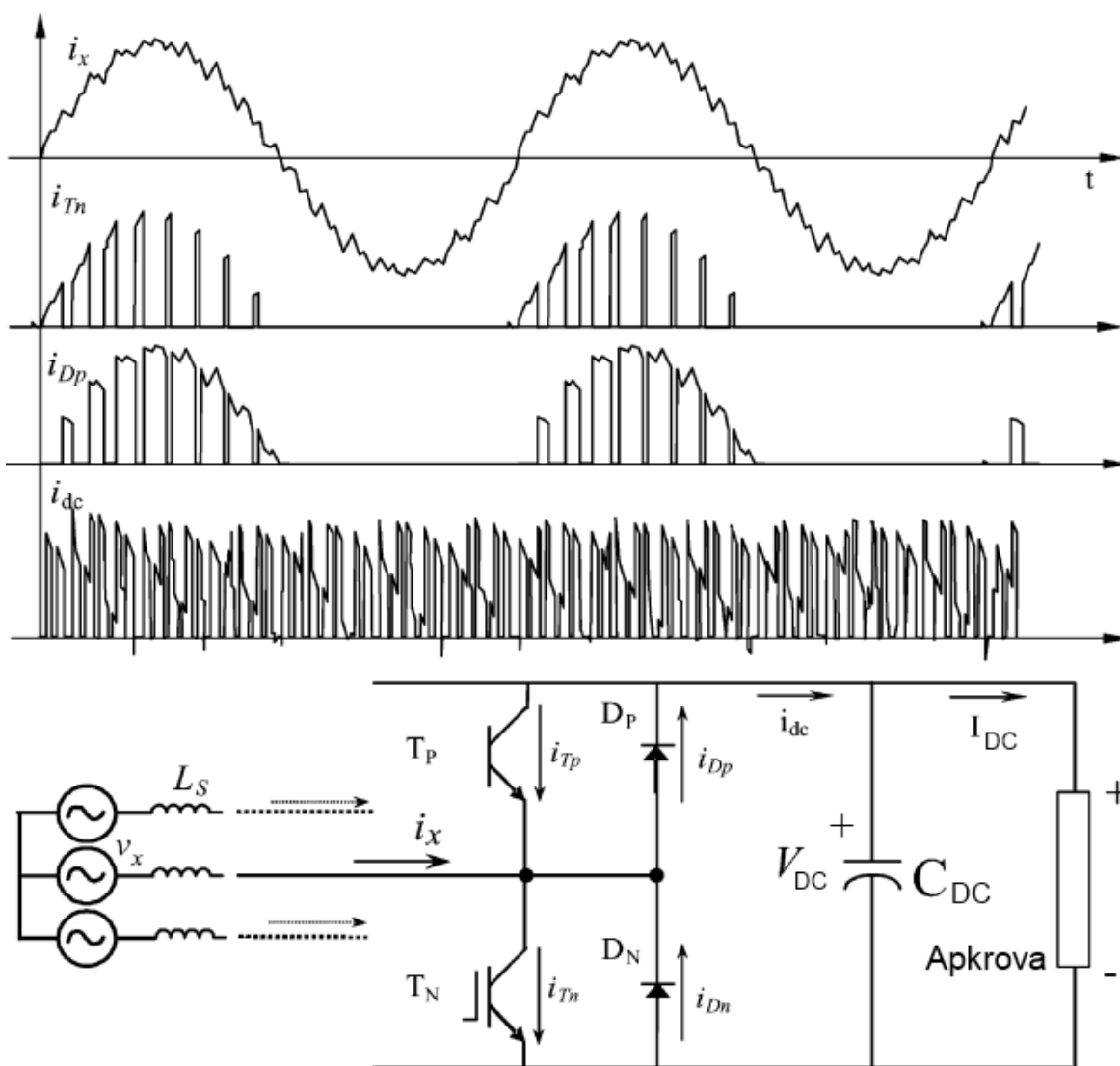


4 pav. Įtampos keitiklio 4 veikimo režimai: a) PWM įtampos keitiklis; b) lygintuvo režimas su vienetiniu galios faktoriumi; c) inverterio režimas su vienetiniu galios faktoriumi; d) talpuminis režimas su nuliniu galios faktoriumi; e) induktyvinis režimas su nuliniu galios faktoriumi

Kintamo impulso moduliacijos elektros energijos parametrų negali dirbti permoduliavimo (overmodulation) režim, nesukeldami žemo dažnio harmonikų tiek keitiklio įėjime, tiek išėjime [10].

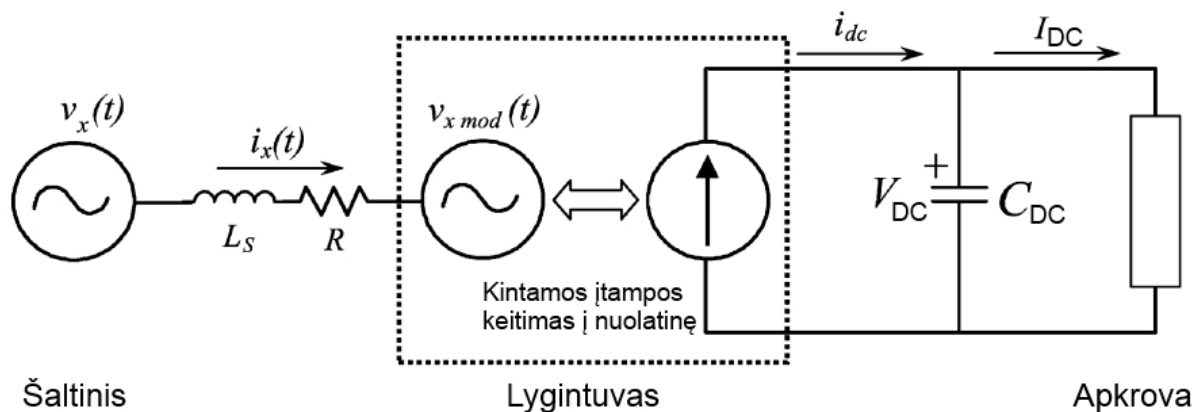
Įtampos keitiklis turi valdyti ne tik aktyviąją, bet ir reaktyviąją galią, taip gerinant galios faktorių. Taip pat, šaltinio pusėje srovės formą keitiklis gali palaikyti labai artimą sinusoidei, taip mažindamas harmonikų poveikį šaltinio tinklui.

Sąsaja tarp  $v_{x\text{mod}}$  ir  $v_x$  matoma fazorių diagramoje 4 pav. Ši sąsaja leidžia suprasti visus keturis įtampos keitiklio veikimo režimus. Visi šie režimai pavaizduoti 4 pav.: a) lygintuvo režimas, kai yra vienetinis galios faktorius; c) inverterio režimas, kai yra vienetinis galios faktorius; d) talpuminis režimas, kai yra nulinis galios faktorius; e) induktyvinis režimas, kai yra nulinis galios faktorius.



5 pav. Elektros srovės formos pobūdis, ventilių išdėstymo schema ir nuolatinės įtampos poliariškumas

Srovė  $I_s$  yra tinklo srovės  $i_s$  kvadratinis vidurkis, o įtampa  $V_{mod} - V_{xmod}$ . Ši srovė teka per puslaidininkinį elementą, taip, kaip parodyta 5 pav. Per teigiamo ciklo pusę galios ventilis  $T_N$ , sujungtas su nuolatinės įtampos neigiamu poliumi yra įjungiamas ir srovė  $i_s$  pradeda tekėti per ventilių  $T_N$  ( $i_{Tn}$ ). Srovė grąžinama į tinklą ir praeina pro ventilius, uždarančius grandinę su kita faze ir keliauja pro diodą, sujungtą su tuo pačiu nuolatinės įtampos neigiamu poliumi. Srovė taip pat, gali tekėti pro nuolatinės įtampos apkrovą ir grįžti pro kitą ventilių, esantį prie teigiamos nuolatinės įtampos poliaus. Kai galios ventilis  $T_N$  yra išjungtas, srovės tekėjimo kelias yra pertraukiamas ir srovė pradeda tekėti pro diodą  $D_P$ , sujungtą su teigiamu nuolatinės įtampos poliumi. Ši srovė vadinama  $i_{Dp}$  ir teka tiesiogiai į nuolatinės įtampos grandinę, padėdama generuoti  $i_{dc}$  srovę ir įkrauti kondensatorių  $C_{DC}$ , tokiu būdu priverčiant keitiklį generuoti galią [17]. Induktyvumas  $L_s$  yra labai svarbus šiam procesui, nes sukelia (induced) įtampą, kuri krenta ant diodo  $D_P$ . Panašus procesas vyksta ir neigiamame pusperiodyje, bet tik su  $D_N$  ir  $T_P$ . Inverterio režime srovė teka kitaip, nes srovė teka iš kondensatoriaus  $C$  į tinklą, per galios ventilius.

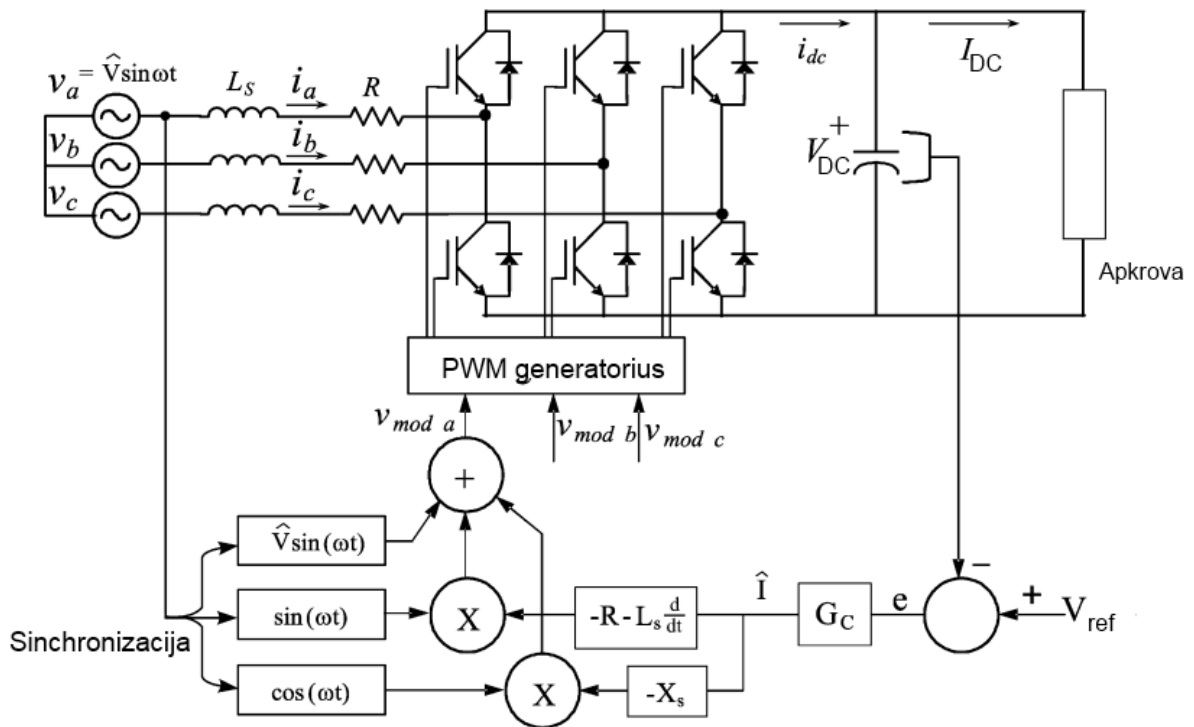


6 pav. Vienfazio įtampos keitiklio pagrindinė diagrama

### 1.2.2 Įtampos valdymas impulso pločio moduliacija matematinis aprašymas

Pavaizduotojo vienfazio įtampos keitiklio principinė schema 6 pav., pagal kurią apibrėžiama valdomos įtampos keitiklio valdymo sistema. Šiame paveikslėlyje yra pavaizduotas ekvivalentinės schemos pagrindas, tai yra visiška sinusoidė tinklo pusėje ir nuolatinė srovė nuolatinės įtampos pusėje. Valdymas pasiekiamas sukuriant sinusoidinį įtampos modelį  $v_{xmod}$ , kurio pakeista amplitudė ir kampas sąveikauja su tinklo įtampa  $v_x$ . Tokiu būdu įėjimo srovė

yra kontroliuojama nematuoiant jos. Įtampa  $v_{xmod}$  yra generuojama pasinaudojant diferencialinėmis lygtimis, kurios apibūdina keitiklį[11].



7 pav. Valdomos įtampos keitiklio išpildymo schema su vienetiniu galios faktoriumi

Pagal 6 pav. diferencialinė lygtis gali būti apibrėžiama:

$$v_x(t) = L_s \frac{d i_x}{d t} + R i_x + v_{xmod}(t) \quad . \quad (1)$$

Priimama, kad

$$v_x(t) = \hat{V} \sin(\omega t + \varphi) \quad . \quad (2)$$

Tuomet sprendinys  $i_x(t)$  įtampai  $v_{xmod}$ , kad keitiklis galėtų dirbti su pastoviu galios faktoriumi, turėtų būti:

$$i_x(t) = \hat{I}(t) \sin(\omega t + \varphi) \quad . \quad (3)$$

Lygtis (1), (3) ir  $v_{xmod}$  leidžia gauti laiko funkciją, su kuria galima keisti  $v_{xmod}$  amplitudę ir fazę, taip priverčiant keitiklio dirbti su pastoviu galios koeficientu. Apjungiant šias lygtis išreiškiama  $v_x(t)$  :

$$v_{xmod} = [X_s \hat{I} \sin \varphi + (\hat{V} - R \hat{I} - L_s \frac{d \hat{I}}{d t}) \cos \varphi] \sin \omega t - [X_s \hat{I} \cos \varphi + (R \hat{I} + L_s \frac{d \hat{I}}{d t} - \hat{V}) \sin \varphi] \cos \omega t ; \quad (4)$$

Ši (4) lygtis gali būti perrašyta vienetiniui galios faktoriui pasiekti. Tokiu atveju  $\cos \varphi = 1$  ir



$$\sin \varphi = 0 :$$

$$v_{x_{mod}} = (\hat{V} - R\hat{I} - L_s \frac{d\hat{I}}{dt}) \sin \omega t - X_s \hat{I} \cos \omega t . \quad (5)$$

Valdomo įtampos keitiklio valdymo sistemos išpildymas pavaizduotas 7 pav., kurioje sistema gali veikti su galios faktoriumi artimu vienetui. Galima pastebėti, jog matuoti įeinančios srovės. Vis dėl to, norint užtikrinti stabilumą, parametrų  $-R - sL_s$  ir  $-X_s$  reikšmės turi būti kuo artimesnės realioms  $R$ ,  $L_s$  ir  $X_s$  reikšmėms galios grandinėje. Bet šitie parametrai realybėje nėra konstantos, todėl šių parametrų svyravimai daro įtaką sistemos stabilumui – mažina keitiklio stabilumą.

### 1.3 Erdvės vektoriaus moduliacija

Erdvės vektoriaus moduliacija (EVM) yra kintamo impulso pločio moduliacijos valdymo algoritmas. Šis algoritmas naudojamas srovės ir įtampos valdymo signalų kūrimui. Tai pat metodas naudojamas tiek kintamos įtampos konvertavimui į nuolatinę, tiek nuolatinės įtampos konvertavimui į kintamą. Yra įvairių variantų ir modifikacijų, lemiančių skirtingus kokybės ir skaičiavimo reikalavimus [13, 14]. Viena iš naudojamų sričių yra visuotinis harmonikų iškraipymo (THD) mažinimas, kai yra galimas aukštas komutacijos dažnis.

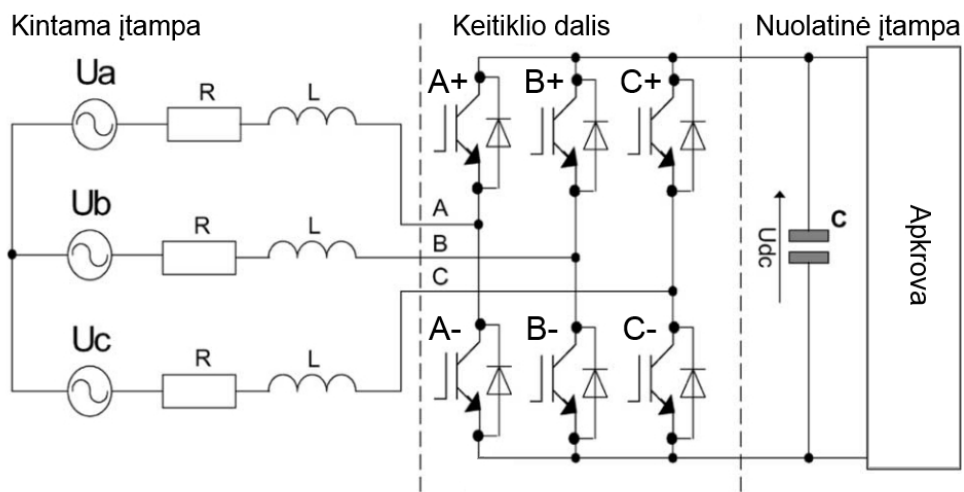
Kintamo impulso pločio moduliacijos įtampos keitiklio valdymo esmę galima aprašyti taip: pagal užduotos įtampos ir esamos įtampos skirtumą, suformuojamas srovės valdymo signalas (reaktyviosios srovės dedamosios užduota reikšmė lygi 0), tuomet pagal srovės valdymo signalo ir esamos srovės skirtumą yra formuojama įtampos vektoriaus amplitudė ir fazė kintamos įtampos pusėje, taip valdant energijos kiekį imamą iš tinklo. Sudaryto įtampos vektoriaus sukimosi dažnis turi būti toks pats, kaip ir maitinimo tinklo pusės. Keičiant suformuoto vektoriaus amplitudę ir kampą galima keisti kintamos įtampos pusės srovės amplitudę ir fazę.

Lentelė 2 Vektorių ir jungiklių būsenos (sudėk taškus, kur „išjung.“)

Vektorius	A+	B+	C+	A-	B-	C-	$V_{AB}$	$V_{BC}$	$V_{CA}$	
$V_0 = \{000\}$	Išjung.	Išjung.	Išjung.	Ijung.	Ijung.	Ijung.	0	0	0	nulinis
$V_1 = \{100\}$	Ijung.	Išjung.	Išjung.	Išjung.	Ijung.	Ijung.	$+V_{dc}$	0	$-V_{dc}$	aktyvus
$V_2 = \{110\}$	Ijung.	Ijung.	Išjung.	Išjung.	Išjung.	Ijung.	0	$+V_{dc}$	$-V_{dc}$	aktyvus
$V_3 = \{010\}$	Išjung.	Ijung.	Išjung.	Ijung.	Išjung.	Ijung.	$-V_{dc}$	$+V_{dc}$	0	aktyvus
$V_4 = \{011\}$	Išjung.	Ijung.	Ijung.	Ijung.	Išjung.	Išjung.	$-V_{dc}$	0	$+V_{dc}$	aktyvus
$V_5 = \{001\}$	Išjung.	Išjung.	Ijung.	Ijung.	Ijung.	Išjung.	0	$-V_{dc}$	$+V_{dc}$	aktyvus
$V_6 = \{101\}$	Ijung.	Išjung.	Ijung.	Išjung.	Ijung.	Išjung.	$+V_{dc}$	$-V_{dc}$	0	aktyvus
$V_7 = \{111\}$	Ijung.	Ijung.	Ijung.	Išjung.	Išjung.	Išjung.	0	0	0	nulinis

Pateiktam įtampos keitikliui (8 pav.) su erdvinio vektoriaus moduliacija galimos 8 jungimo

būsenos – vektoriai, kurie pateikti lentelėje 2. 0 simbolizuoja peties apatinio ventilio (pvz., A-) įjungimą, 1 – peties viršutinio ventilio (pvz., A+) įjungimą. Šie vektoriai gali būti atvaizduoti dviejų koordinatų  $\alpha$  ir  $\beta$  plokštumoje, kaip pateikta 9 pav. Vektoriai V0 ir V7 yra atvaizduoti koordinatų pradžioje, nes šie vektoriai atjungia apkrovą, todėl jie vadinami nuliniiais vektoriais. Pagrindiniai 8 vektoriai koordinatų plokštumoje atvaizduojami 7 taškais ir jų ryšys yra apibrėžiamas šešiakampiu, kurio šoninė kraštinė yra lygi  $2V_{DC}/3$ , o jo viršūnės yra lygios vektoriams V1-V6. Šis šešiakampis suskirstomas į 6 sritis. Sritis esanti už šio šešiakampio ribų įtampos keitikliui yra nepasiekiamo. Užduotą įtampos vektorių atvaizduotą  $\alpha\beta$  plokštumoje, galima sintezuoti pasinaudojus pagrindiniais vektoriais.



8 pav. Įtampos keitiklis

Norimas įtampos lygis  $V_{ref}$  gali būti sugeneruotas iš trijų fazių, panaudojus  $\alpha\beta\gamma$  transformaciją [15] ir/arba dq0 transformacijas, kombinuojant du aktyvius sujungimo vektorius ir vieną nulinį vektorių, pavaizduota 9 pav.

Yra pasirenkamas komutacijos dažnis  $f_s$ . Kiekviename komutacijos periode yra sudaromas užduotos įtampos  $V_{ref}$  vektorius. Pagal užduoto vektoriaus  $V_{ref}$  projekcijas į sektoriaus, kuriame yra  $V_{ref}$  vektorius, pagrindinius vektorius yra apskaičiuojamos ventilių įjungimo trukmės:

$$t_1 = \frac{\sqrt{3} T_s V_{ref}}{V_{DC}} \sin\left(\frac{\pi}{3} - \Theta\right) \quad (6)$$

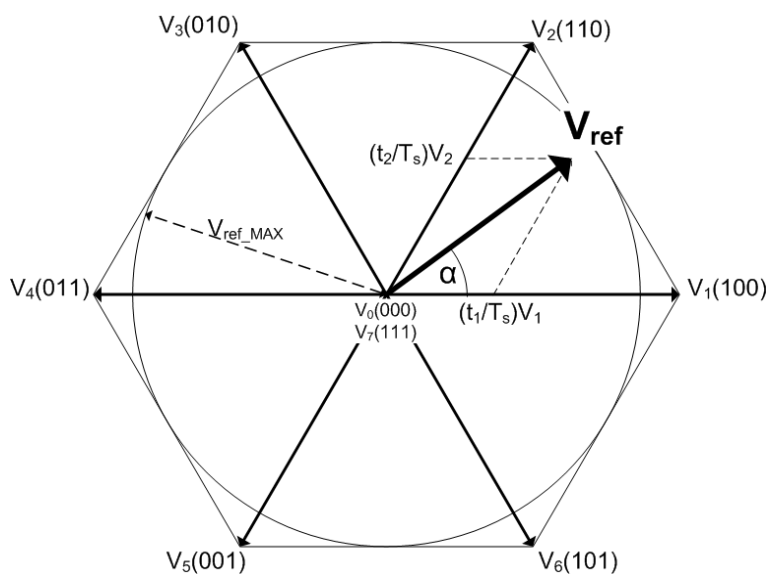
$$t_2 = \frac{\sqrt{3} T_s V_{ref}}{V_{DC}} \sin(\Theta) \quad (7)$$

$$t_0 = T_s - t_1 - t_2 \quad (8)$$

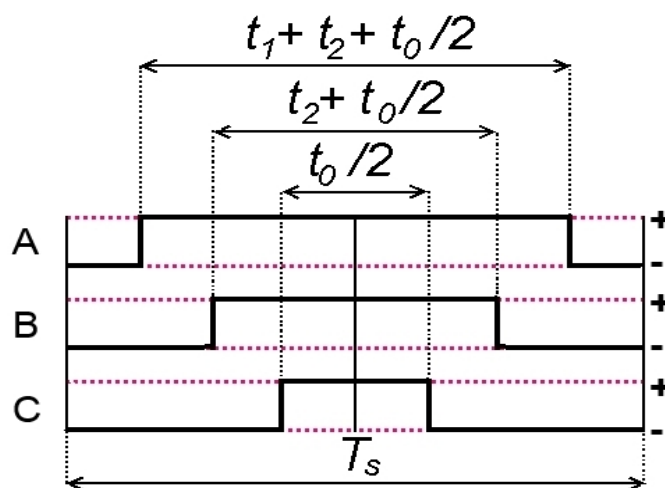
$T_0$  yra nulinių vektorių įjungimo trukmė.  $T_s$  yra komutacijos periodas.

Ventiliai yra junginėjami taip, kaip parodyta 10 pav. Vienu metu negali būti įjungtas viršutinis peties ventilis ir apatinis, tai yra, jei viršutinis ventilis įjungtas, apatinis – išjungtas ir atvirškčiai. Pirmiausia visi viršutiniai ventiliai išjungti – vektorius  $V_0$ . Toliau įjungiamas tas ventilis, kurio būseną abiejuose vektoriuose yra įjungta. Po tam tikro laiko įjungiamas antras ventilis, kurio būseną įjungta yra tik viename vektoriuje. Ir galiausiai, trečias ventilis – vektorius  $V_7$ . Visų viršutinių ventilių įjungimo impulsų centrai sutampa su komutacijos periodo centru.

Taip junginėjant užtikrinamas mažiausias perjungimų skaičius.



9 pav. 8 galimų perjungimo vektorių atvaizdavimas



10 pav. Įtampos keitiklio ventilių komutacijos laikinė diagrama

Priklausomai nuo keliamų tikslų, egzistuoja įvairūs metodai pasirenkant vektorių jungimo seką, kurie paminimi šaltinyje [18].

### 1.3.1 Erdvinio vektriaus moduliacijos valdymo strategijos

Erdvinio vektoriaus moduliaciją galima naudoti įvairiomis pažangiomis valdymo strategijomis, tokiomis, kaip orientuotos įtampos valdymas (voltage oriented control, VOC), įtampos tiesioginės galios valdymas (Voltage direct power control, V-DPC), tariamo srauto valdymas (virtual flux control, VFC), tariamo srauto tiesioginis galios valdymas (virtual flux based direct power control). Šių valdymo strategijų privalumai ir trūkumai pateikti lentelėje 3 [11].

Lentelė 3. Erdvinio vektoriaus moduliacijos valdymo strategijos

Valdymo strategija	Privalumai	Trūkumai
VOC	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fiksuotas komutacijos dažnis (mažesnis filtras)</li> <li>Galima naudoti pažangesnius impulso moduliavimo metodus</li> <li>Pigesni analogas – kodas keitikliui</li> <li>Nejautrus tinklo induaktyvumo kitimui</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reikalingos koordinatinės transformacijos</li> <li>Reaktyvios ir aktyvios galių valdymo atskyrimas</li> <li>Sudėtingas valdymo algoritmas</li> <li>Galios faktorius mažesnis nei V-DPC</li> </ul>
V-DPC	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nėra atskirtas impulso moduliavimo blokas</li> <li>Nėra srovės valdymo kontūro</li> <li>Nereikalingos koordinatinės transformacijos</li> <li>Geros dinaminės savybės</li> <li>Atskirti aktyvios ir reaktyvios galių valdymai</li> <li>Eliminuojamos momentinių kinatamųjų harmoninės dedamosios (gerinamas galios faktorius)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reikalinga aukštesnė indukatyvo vertė</li> <li>Aukštas komutacijos dažnis (Komutacijos metu negalima palyginti galios ir įtampos (tai sukelia dideles paklaidas))</li> <li>Kintamas komutacijos dažnis (įėjimo filtras turi filtruoti žemesnes harmonikas, nei komutacijos dažnio vidurkis, dėl to reikia didesnio filtro nei VOC arba VFC)</li> <li>Greitas procesoriaus darbas</li> <li>Greitas analoginių signalų diskretizavimas</li> </ul>
VFC	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fiksuotas komutacijos dažnis</li> <li>Galima naudoti pažangesnius impulso moduliavimo metodus</li> <li>Pigesni analogas – kodas keitikliui</li> <li>Nejautrus tinklo induaktyvumo kitimui</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reikalingos koordinatinės transformacijos</li> <li>Reaktyvios ir aktyvios galių valdymo atskyrimas</li> <li>Sudėtingas valdymo algoritmas</li> <li>Galios faktorius mažesni nei V-DPC</li> </ul>
VF-DPC	<ul style="list-style-type: none"> <li>Paprastas ir atsparus signalų triukšmui valdymo algoritmas</li> <li>Mažesnis komutacijos dažnis</li> <li>Nėra atskirtas impulso moduliavimo blokas</li> <li>Nėra srovės valdymo kontūro</li> <li>Nereikalingos koordinatinės transformacijos</li> <li>Geros dinaminės savybės</li> <li>Atskirti aktyvios ir reaktyvios galių valdymai</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kintamas komutacijos dažnis (įėjimo filtras turi filtruoti žemesnes harmonikas, nei komutacijos dažnio vidurkis, dėl to reikia didesnio filtro nei VOC arba VFC)</li> <li>Spartus procesoriaus darbas</li> <li>Spartus analoginių signalų diskretizavimas</li> </ul>

## 2 Metodinė dalis

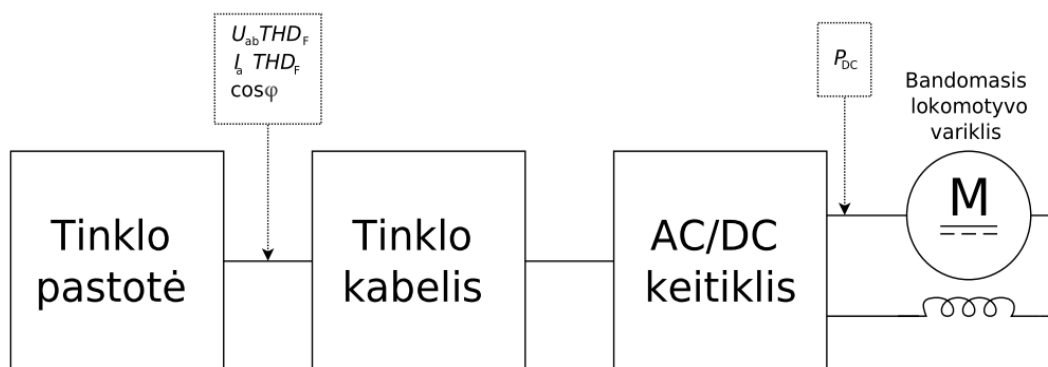
Modernizuoto elektros mašinų badymo stendo MATLAB SIMULINK modelio (pateiktas I priede) struktūra pateikta 11 pav. Struktūrą sudaro 4 dalys:

- pastotė;
- linijos kabelis;
- keitiklis;
- apkrova.

Modernizuoto stendo galimybė dirbti prijungtam prie žemos 0,4 kV įtampos vertinama pagal pagrindinius tinklo parametrus:

- galios faktorius  $\cos\phi$  ;
- įtampos harmoninis iškreipymas  $U_{ab}THD_F$  ;
- srovės harmoninį iškreipymą .

Taip pat įvertinamas elektros keitiklio naudingumo koeficientas  $\eta$  .



11 pav. MATLAB SIMULINK modelio struktūra

### 2.1 Tinklo pastotės modelis

Tinklo pastotės transformatoriaus antrinės apvijos atstojamą schemą sudaro: trys idealus kintamos įtampos šaltiniai, apvijų induaktyvumas ir varža. Tinklo pastotės antrinės apvijos ekvivalentinės schemos modelis yra pateiktas 12 pav.

Idealaus tinklo šaltinio parametrai nustatomi pagal Lietuvos elektros tinklo standartinius parametrus [14]:

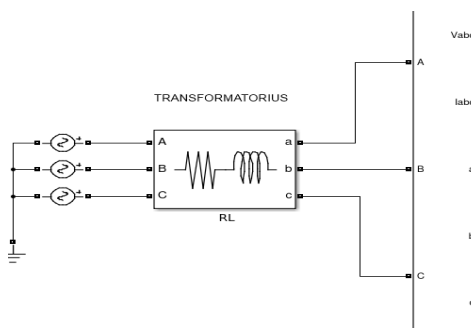
$$f_T = 50 \text{ Hz} ,$$

$$U_{AB} = 400 \text{ V} .$$

Linijinė įtampa perskaičiuoja į fazinę amplitudinę įtampos vertę:

$$U_A = \frac{U_{AB}}{\sqrt{3}} = \frac{400 V}{\sqrt{3}} = 230,94 V \quad , \quad (9)$$

$$U_a = U_A \cdot \sqrt{2} = 230,94 V \cdot \sqrt{2} = 326,60 V \quad . \quad (10)$$



12 pav. Pastotė su įtampos ir srovės matavimo bloku, MATLAB Simulink modelio fragmentas

Modeliavimas atliktas su 0,4 kV transformatoriais, pateiktais 2 lentelėje, kuri gauta remiantis G. Svinkuno ir K. Medved darbu „Dažnio keitiklio veikimo pramoniniame tinkle simuliacija“ [16]. 2 lentelėje yra pateikti transformatorių atstojamosios schemas varžos ir induaktyvumo parametrai.

Lentelė 4. Transformatoriaus parametrai

<b>Transformatorius</b>	<b>Transformatoriaus galia, kV·A</b>	<b>R<sub>r</sub>, Ω</b>	<b>L<sub>r</sub>, mH</b>
T <sub>1</sub>	100	0,036	0,207
T <sub>2</sub>	250	0,017	0,079
T <sub>3</sub>	400	0,005	0,054
T <sub>4</sub>	630	0,003	0,027

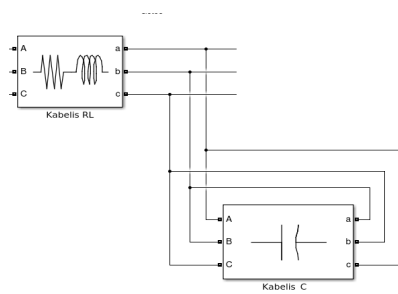
## 2.2 Energijos perdavimo linijos modelis

Energijos perdavimo liniją atstojamą schemą sudaro aktyvioji varža, induaktyvumass ir kondesatorius. Kabelio MATLAB SIMULINK modelis pateiktas 13 pav. Perdavimo linijos atstumas– 1 km, įvertinant atstumą nuo pastotės iki keitiklio. Kabelio atstojamosios schemas parametrai parinkti iš [16] šaltinio, pagal maksimalią apkrovos galią, kuri yra 180 kW:

$$R_K = 0,2 \Omega;$$

$$L_K = 0,27 \text{ mH};$$

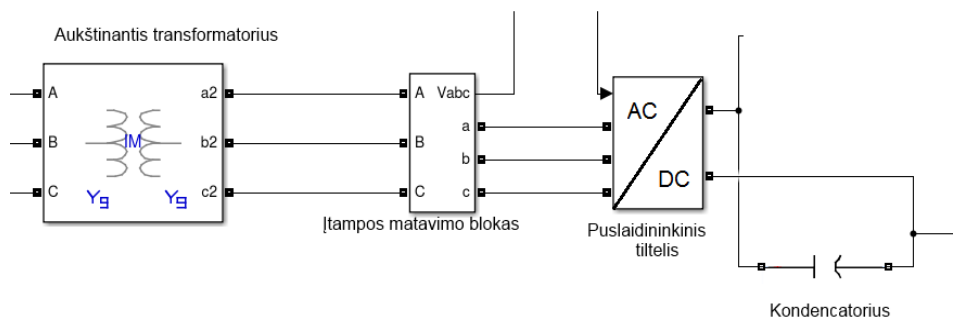
$$C_K = 0,06 \mu\text{F};$$



13 pav. Kabelis, MATLAB SIMULINK modelio fragmentas

### 2.3 Įtampos keitiklio ir bandamosios mašinos modelis

Elektros keitiklį sudaro aukštinantis transformatorius, įtampai pakelti iki reikiamo lygio, puslaidininkinis tiltelis ir kondensatorius, nuolatinės įtampos pulsacijų išlyginimui. Keitiklio modelis pateiktas 14 pav.



14 pav. Elektros keitiklis, MATLAB SIMULINK modelio fragmentas

Aukštinančio transformatoriaus antrinės apvijos įtampos lygis apskaičiuojamas remiantis maksimalia išlygintos nuolatinės įtampos vidutine verte. Išlygintos nuolatinės įtampos vidurkis apskaičiuojamas formulėmis:

$$U_L = U_F \cdot \sqrt{3} \quad , \quad (11)$$

$$U_{DC} = \frac{3 \cdot \sqrt{6} \cdot U_F}{\pi} \quad . \quad (12)$$

Išlygintos maksimalio įtampos lygis turi pasiekti 1200 V, ir pasinaudojus formulėmis (11) ir (12) apskaičiuojamas aukštinančio transformatoriaus antrinės apvijos linijinė įtampa:

$$U_{L2} = \frac{U_{DC} \cdot \pi}{3 \cdot \sqrt{2}} = \frac{1200 \text{ V} \cdot \pi}{3 \cdot \sqrt{2}} = 888,58 \text{ V} \approx 900 \text{ V} \quad (13)$$

Puslaidininkinis tiltelis modeliuojamas standartiniu MATLAB SIMULINK universaliu bloku „Universal bridge“. Panaudojant „Universal bridge“ bloką, modeliuojami ketiklių tipai:

- nevaldomas (diodinis);
- pusiau valdomas (tiristorinis);
- pilnai valdomi (IGBT, MOSFET).

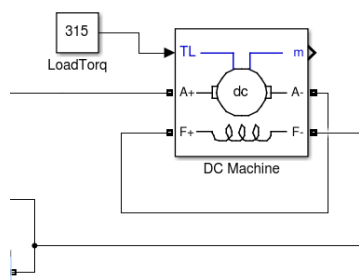
Išlygintos keitiklio nuolatinės įtampos pulsacijų mažinimui naudojamas kondensatorius. Nuolatinės įtampos pulsacijų amplitudė su kondensatoriumi išreiškiama:

$$\Delta U_p = \frac{I_{DC}}{f_p C_{DC}} \quad (14)$$

Pasirinkus, kad pulsacijos įtampa sudarytų 3%, tai yra  $\Delta U_p = 36 V$  prie 1200V. Įvertinę, kad išlyginus trifazę įtampą, pulsacijų dažnis yra  $f_p = 300 Hz$ , apskaičiuojama kondensatoriaus talpa:

$$C_{DC} = \frac{P}{f_p \Delta U_p \cdot U_{dc}} = \frac{180000}{300 \cdot 36 \cdot 1200} = 0,013889 F = 13889 \mu F \quad (15)$$

Keitiklio apkrova yra lokomotyvo nuolatinės įtampos variklis. Variklis modeliuojamas „DC machine“ MATLAB SIMULINK bloku, pavaizduotu 15 pav. Modeliuojamo variklio galia – 180 kW, nominali apkrova – 315 Nm.



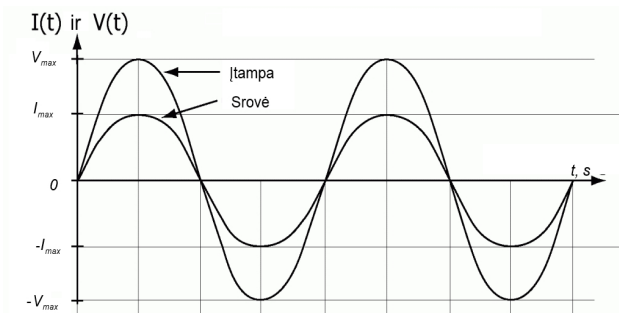
15 pav. Lokomotyvo nuolatinės įtampos variklis, MATLAB SIMULINK modelio fragmentas

## 2.4 Valdymo modeliai

Pusiau valdomų ventilių (tiristorių) keitiklio ir pilnai valdomų ventilių (MOSFET ir IGBT) keitiklio įtaka tinklo parametrams tiriama naudojant fazinį kampo valdymą, bet ir impulso plotį. Pusiau valdomų ventilių atveju galima valdyti tik ventilio atidarymo kampą  $\alpha$ , o pats ventilis užsidaro natūraliai. Pilnai valdomų ventilių valdomas ne tik atidarymo kampas, bet ir impulso plotį  $\beta$ .

Palyginimui pusiau ir pilnai valdomus keitiklius, buvo išlaikytas vienodas atidarymo impulso plotis. Pilnai valdomų ventilių atidarymo ir uždarymo kampai buvo pasirenkami taip, kad įtampos ir srovės fazių skirtumas būtų  $\phi=0$ , kaip parodyta 16 pav. MATLAB SIMULINK modelio fragmentas su išpildytu fazinio kampo valdymu pavaizduotas 17 pav. „PLL“ blokas nustato momentinę fazės A įtampos fazę, o blokas „pulses“ momentinei įtampos fazei pasiekus užduotą atidarymo kampą  $\alpha$ , blokas „Alpha“, suformuoja valdymo impulsą su nustatyta impulso trukme.





16 pav. Srovės ir įtampos momentinės vertės, kai fazių skirtumas yra  $\phi=0$

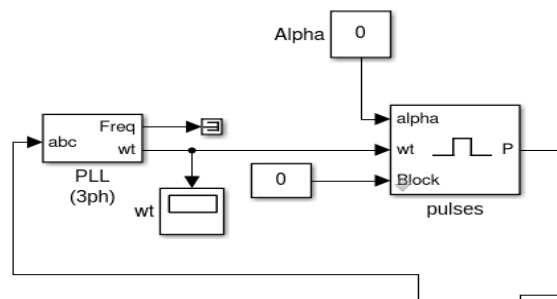
Erdvinio vektoriaus moduliacijos privalumas yra tai, kad komutacijos dažnis nepriklauso nuo tinklo įtampos dažnio ir komutacijos dažnį riboja tik aparatūrinė įranga. Bet didėjant komutacijos dažniui, mažėja generuojamų šalutinių harmonikų lygis, todėl komutacijos dažnis buvo pasirinktas

$$f_s = 10\text{kHz} \quad (16)$$

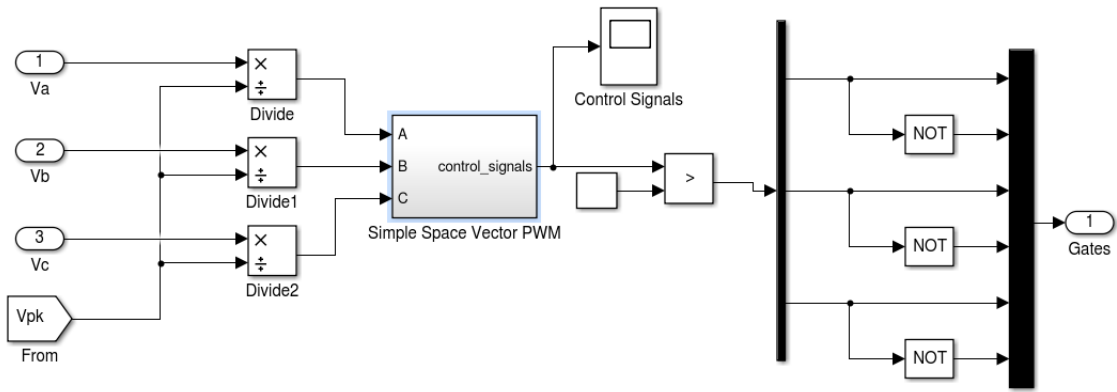
Erdvinio vektoriaus moduliacijos valdymo MATLAB SIMULINK aplinkoje blokas pavaizduotas 18 pav. Matuojamos visos linijinės įtampų momentinės vertės, perskaičiuojamos į fazines įtampas iš kurių sudaromas erdvinis vektorius  $V_{ref}$ , pasinaudojus  $\alpha\beta$  transformacija.

$$V_{ref}(t) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a(t) \\ u_b(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix} \quad (17)$$

Pagal teorinėje dalyje aprašyta principą, funkciname bloke „Simple spacevector pwm“ yra nustatomas vektoriaus sektorius erdvėje, užduoti  $V_{ref}$  vektoriaus projekcijos į būsenos vektorius. Iš projekcijų į busenos vektorius  $V_1-V_8$  nustatomos ventilių įjungimo trukmės ir formuojami valdymo impulsai.



17 pav. Fazinio kampo valdymas, MATLAB SIMULINK modelio fragmentas



18 pav. Erdvinio vektoriaus moduliacija, MATLAB SIMULINK modelio fragmentas

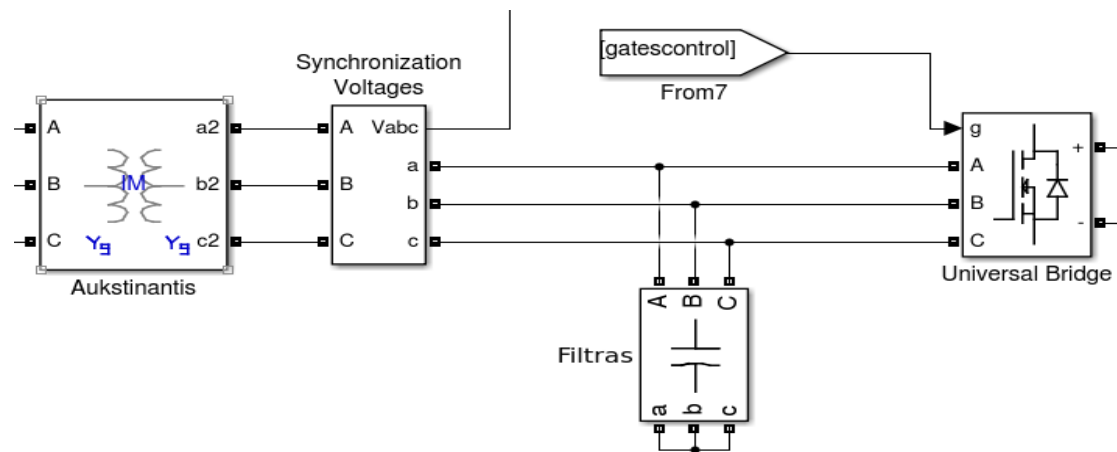
## 2.5 Filto modelis

Atsirandančias šalutines įtampas harmonikas šalinama naudojant kondensatorinį trifazį filtrą. Filto talpa paskaičiuota remiantis [19] šaltiniu:

$$Z_b = \frac{U_{F2}^2}{P_{DC}} = \frac{1200^2}{180000} = 8 \Omega \quad (18)$$

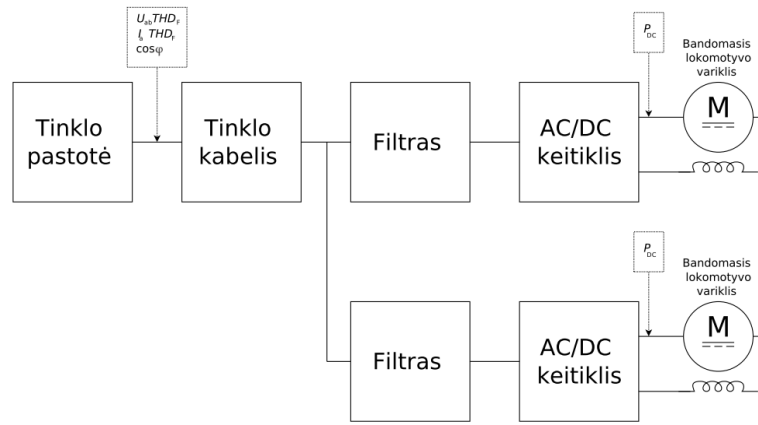
$$C = \frac{1}{\omega_T \cdot Z_b} = \frac{1}{2\pi \cdot f_T \cdot Z_b} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 8} \approx 0,000032 F \quad (19)$$

Trifazis filtras jungiamas žvaigžde tarp aukštinančio transformatoriaus ir puslaidininkinio tiltelio, kaip pavaizduota 19 pav.



19 pav. Keitiklis su filtru, MATLAB SIMULINK modelio fragmentas

Tam tikrais atvejais abi bandomosios mašinos gali veikti kaip varikliai, kai naudojama kita stendo konfigūracija, todėl buvo modeliuota sistema su dviem elektros keitikliais. Modeliuojamos sistemos struktūra pateikta 20 pav.



20 pav. Tiriamos sistemos struktūra su dvigubu apkrovimu

## 2.6 Matuojami parametrai

Matuojami pagrindiniai tinklo parametrai yra: įtampos  $U_{ab}$  harmoninis iškreipymas- $THD_{U_{ab}}$ , srovė  $I_a$  harmoninis iškreipymas  $THD_{I_a}$ , galios koeficientas –  $\cos\phi$ . Taip pat įvertinamas keitiklio naudingumo koeficientas  $\eta$ . Dėl skirtingų transformatorių ir jų apkrovimo šių parametru priklausomybės sudaromos nuo santykinės galios  $P^*$ . Santykinė galia  $P^*$  lygi:

$$P^* = \frac{P_{AC}}{P_{Tvard}} \quad (20)$$

$P_{Tvard}$  – transformatoriaus vardinė įtampa.

Įtampos  $U_{ab}$  ir  $I_a$  srovės šalutinių harmonikų kiekis  $THD_F$  skaičiuojamas pagal šią formulę:

$$THD_F = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \quad (21)$$

$V_1$  – pirmos harmonikos amplitudė,  $V_2, V_3, \dots, V_n$  – aukštesnių harmonikų amplitudės. Harmoninių iškreipymų lygių matavimui naudojamas specialus MATLAB SIMULINK blokas, „Total harmonic distortion“, skirtas harmoniniam iškreipymui fiksuoti.

Galios faktorius apskaičiuojamas iš formulės:

$$\cos\phi = \cos\left(\arctg\left(\frac{Q_{AC}}{P_{AC}}\right)\right) \quad (22)$$

$Q_{AC}$  ir  $P_{AC}$  reaktyvioji ir aktyvioji galios matuojamos prie 0,4 kV įtampos tinklo pastotės.

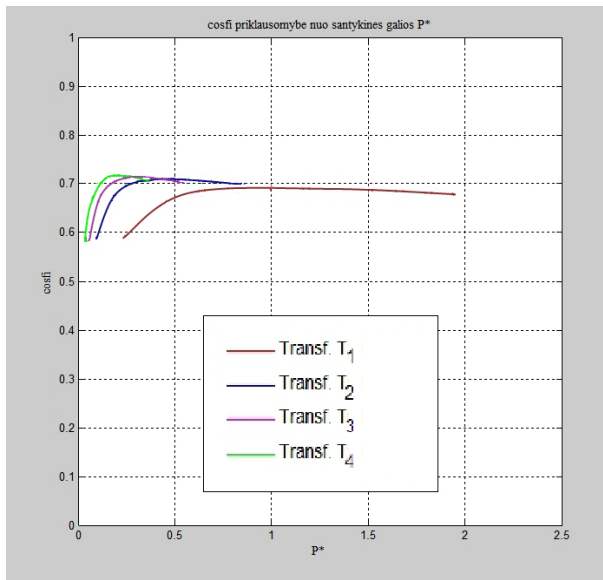
Naudingumo koeficientas apskaičiuojamas:

$$\eta = \frac{P_{DC}}{P_{AC}} \cdot 100\% \quad (23)$$

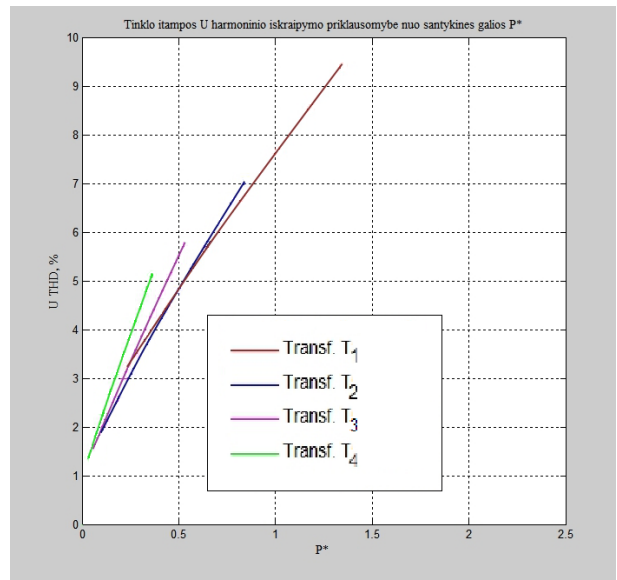
$P_{DC}$  suvartojama nuolatinės įtampos galia.

### 3 Tyrimo rezultatai

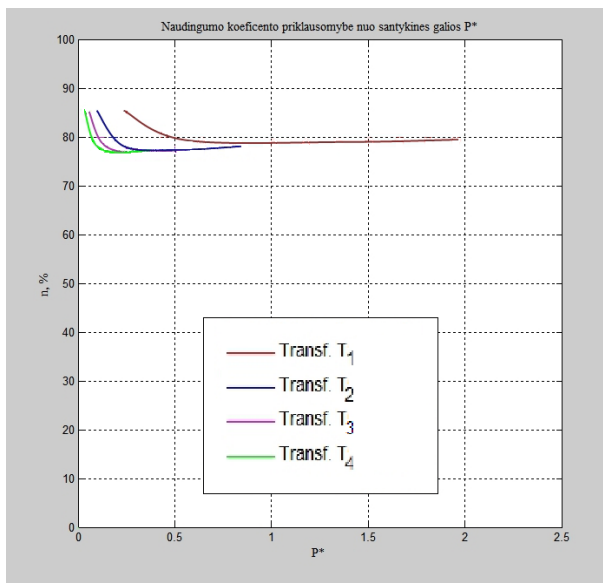
#### 3.1 Nevaldomas keitiklio įtakos tyrimas



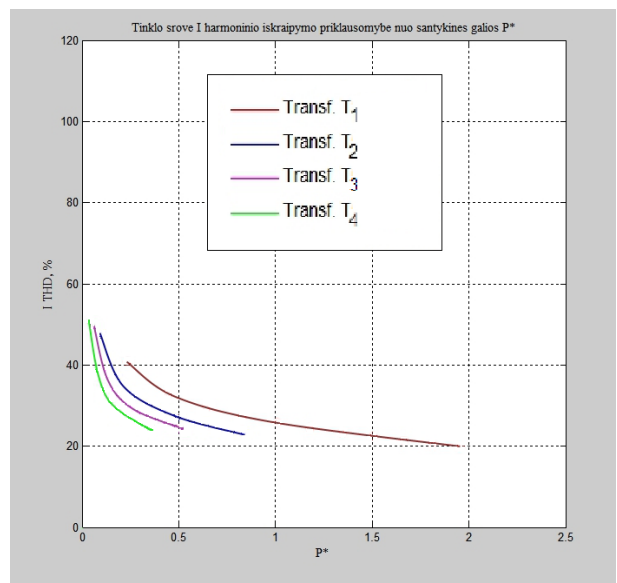
c) galios faktorius  $\cos\phi$



d) įtampos  $U_{ab}$  harmonis iškraipymas  $THD_F$



c) naudingumo koeficiento  $\eta$



d) srovės  $I_a$  harmoninis iškraipymo  $THD_F$

21 pav. Nevaldomo keitiklio tyrimo rezultatai

Elektros keitiklio pagrindinių parametru priklausomybės nuo santykinės galios pateiktos 21 pav.

Minimalus galios faktorius  $\cos\phi=0,58$  su visais transformatoriais, bet maksimalus galios koeficientas  $\cos\phi=0,73$  pasiekiamas esant transformatoriui  $T_4$  (21 pav. a)).

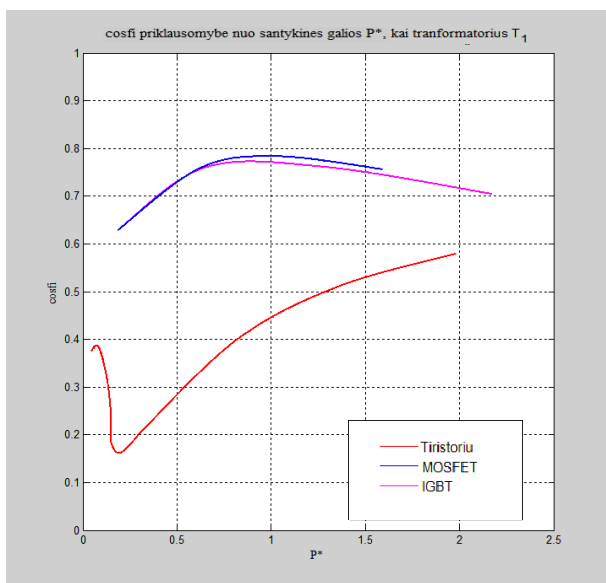
Stendas su nevaldomu keitikliu nesukelia šalutinių įtampos  $U_{ab}$  kiekio, didesnio nei 8%,

išskyrus su mažiausio tirta nominalo transformatoriumi  $T_1$  (21 pav. b)).

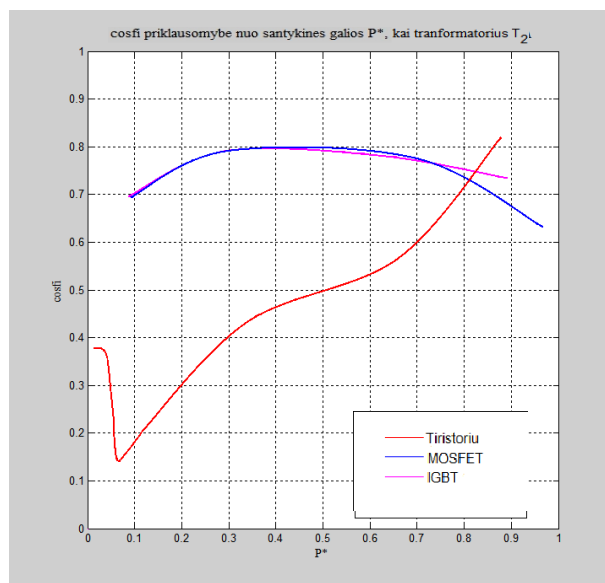
Elektros keitiklio naudingumo koeficientas  $\eta$  kinta nuo 77 % iki 85 % (21 pav. c). Mažiausias naudingumo koeficiento  $\eta$  pokytis yra su transformatoriumi  $T_1$ , kuris kinta nuo 79 % iki 85%.

Elektros mašinų bandymo stendas mažiausių srovės  $I_a$  šalutinių harmonikų kiekį generuoja su transformatoriumi  $T_1$  ir nenusileidžia žemiau 20 % ribos ( 21 pav. d)).

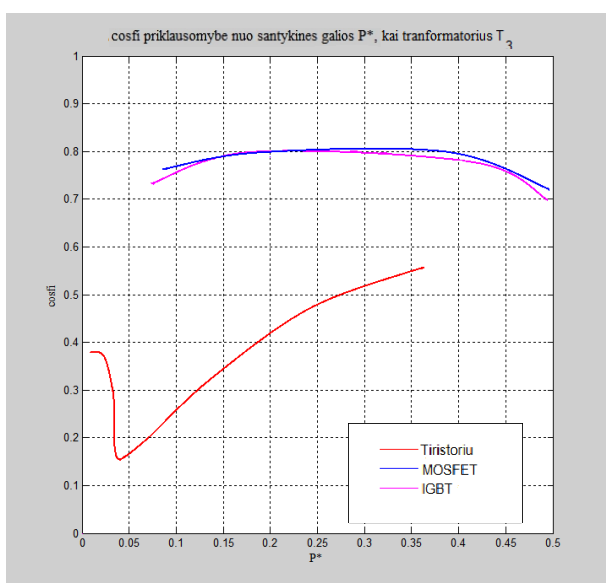
### 3.2 Elektros keitiklių su fazinio kampo valdymu įtakos tyrimas



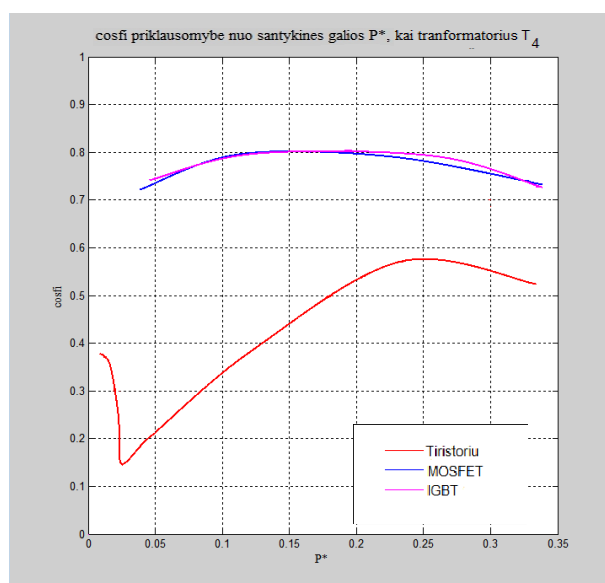
a) transformatorius  $T_1$



b) transformatorius  $T_2$



a) transformatorius  $T_3$



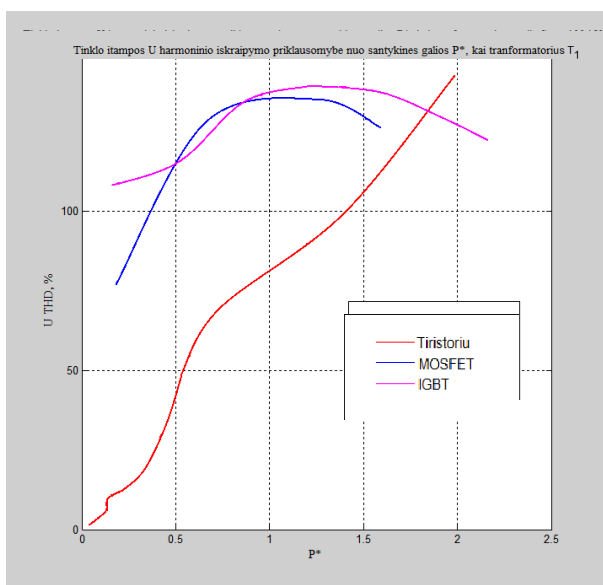
b) transformatorius  $T_4$

22 pav.  $\cos\phi$  priklausomybė nuo santykinės galios  $P^*$ , kai naudojamas fazinis valdymas

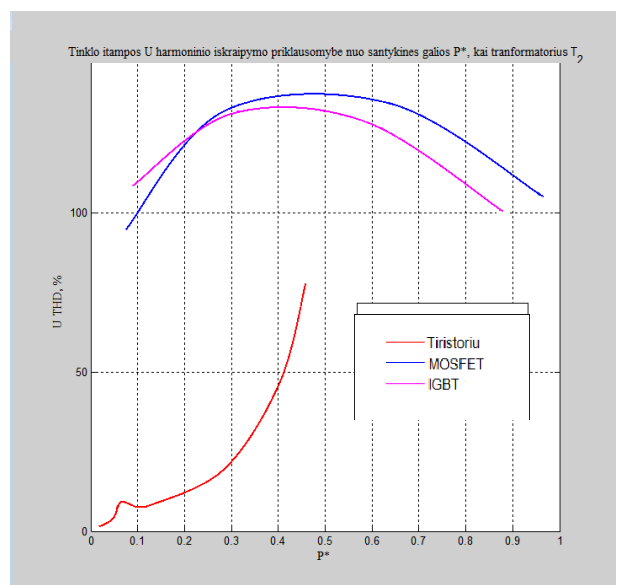
Elektros keitiklio pagrindinių parametų priklausomybės nuo santykinės galios pateiktos : galios faktoriaus  $\cos\phi$  – 22 pav., įtampos  $U_{ab}$  šalutinių harmonikų kiekis  $THD_F$ – 23 pav., naudingumo koeficiento  $\eta$  – 24 pav., srovės  $I_a$  šaltinių harmonikų kiekio  $THD_F$ – 25 pav.

Stendo generuojamų įtampos  $U_{ab}$  šalutinių harmonikų kiekis viršija standartų numatytus 8 %. Su pilnai valdomu keitikliu pasiekiamas gana aukštas galios faktorius –  $\cos\phi=0,8$ . Su pusiau valdomu keitikliu pasiekiamas gana didelis naudingumo koeficientas, kuris siekia  $\eta = 93\%$ .

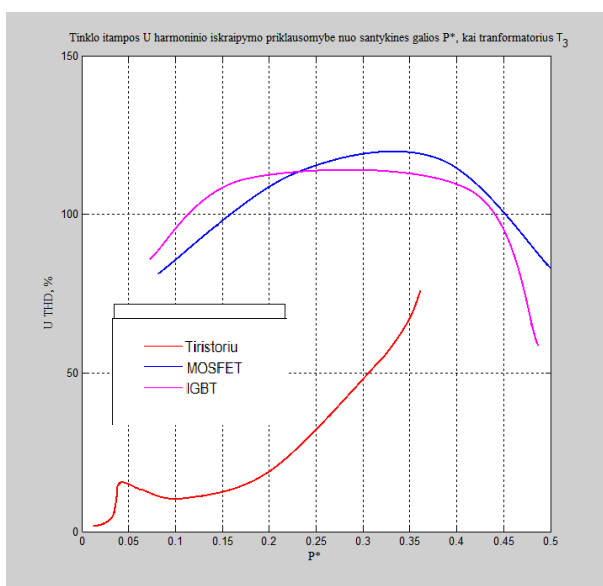
Stendas su pusiau valdomu keitikliu prie mažesnio apkrovimo pasiekia mažesnę srovės  $I_a$  harmoninį iškraipymo lygį  $THD_F$ , lyginant su pilnai valdomais keitikliais.



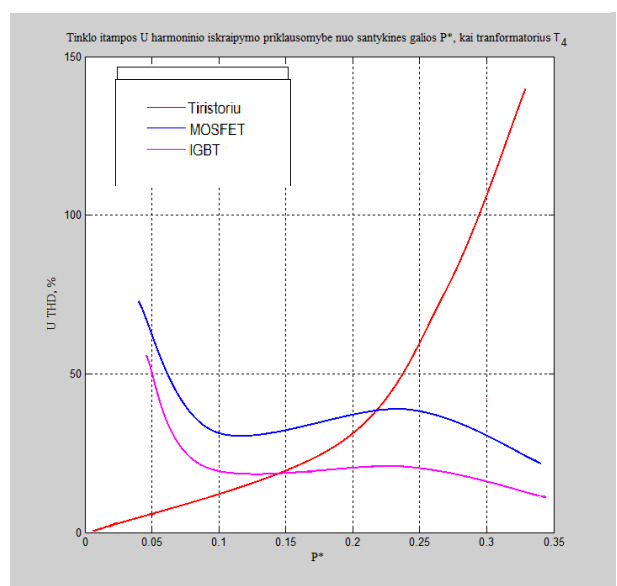
a) transformatorius  $T_1$



b) transformatorius  $T_2$

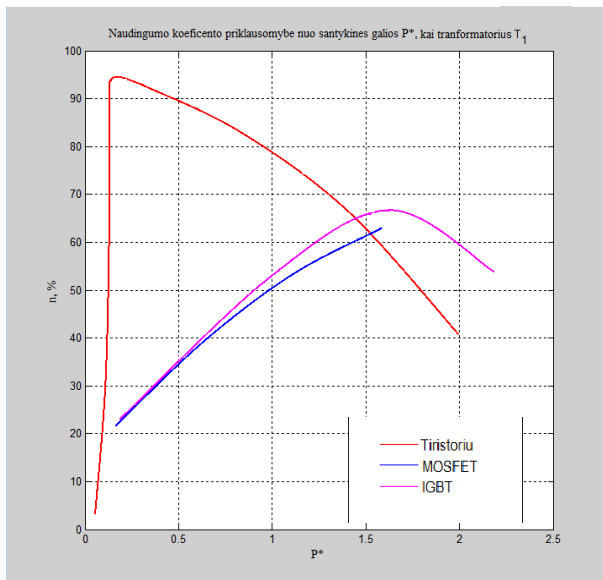


a) transformatorius  $T_3$

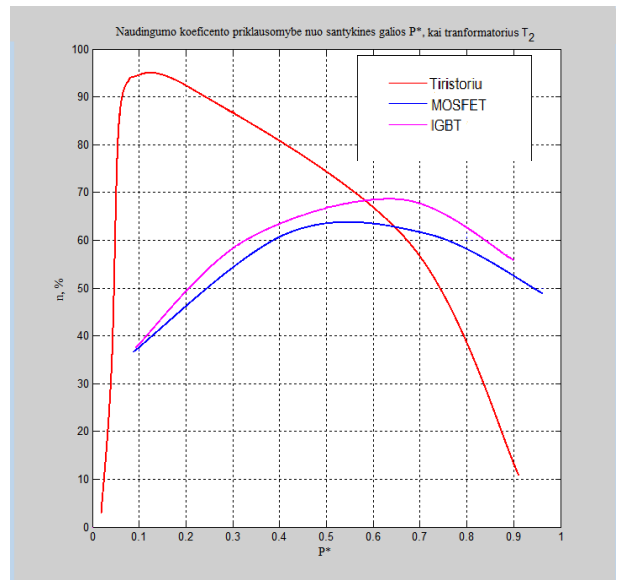


b) transformatorius  $T_4$

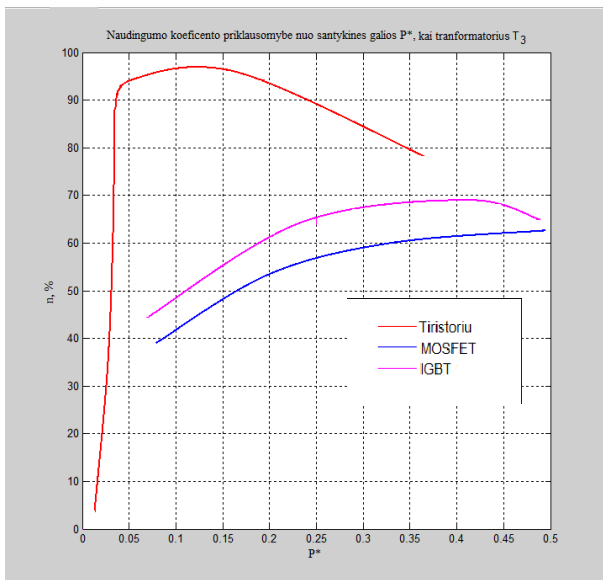
23 pav.  $U_{ab} THD_F$  priklausomybė nuo santykinės galios  $P^*$ , kai naudojamas fazinis valdymas



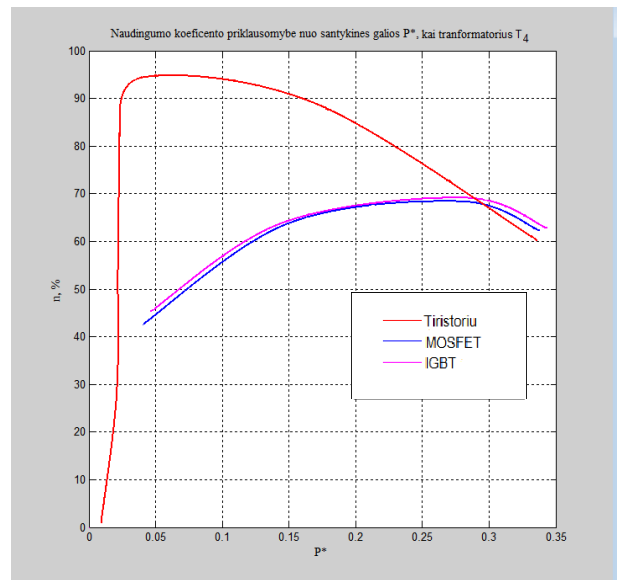
a) transformatorius  $T_1$



b) transformatorius  $T_2$



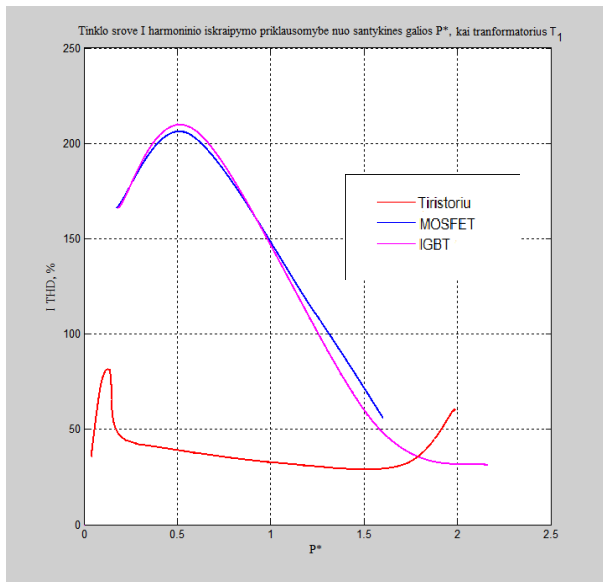
a) transformatorius  $T_3$



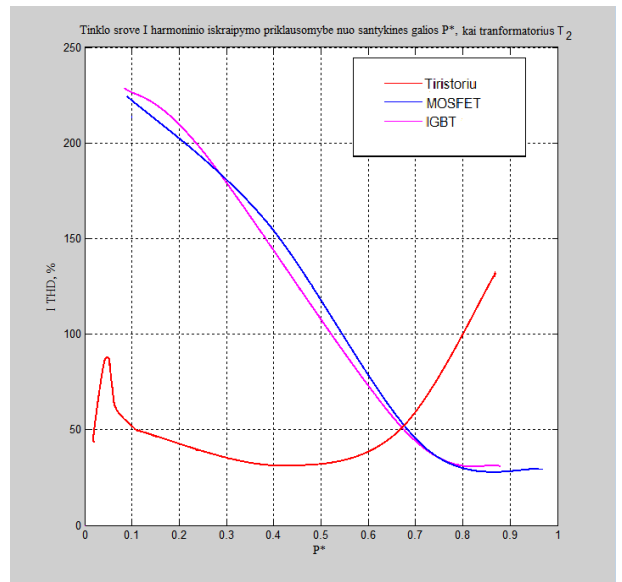
b) transformatorius  $T_4$

24 pav.  $\eta$  priklausomybė nuo santykinės galios  $P^*$ , kai naudojamas fazinis valdymas

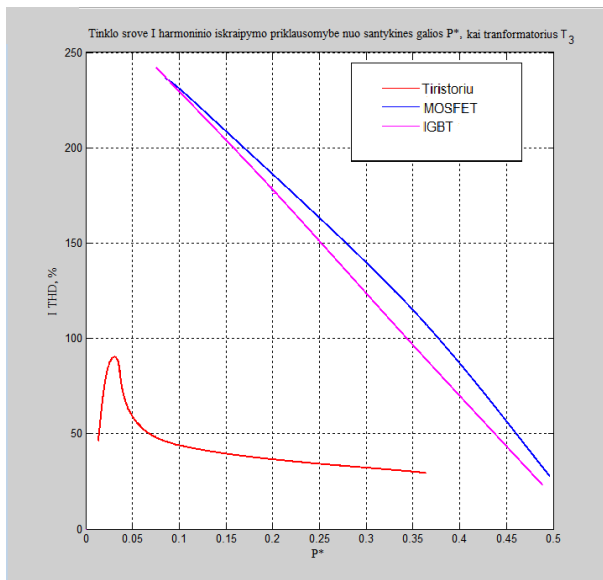
Palyginus pilnai ir pusiau valdomų keitiklių su fazinių valdymu, įtampos  $U_{ab}$  ir srovės  $I_a$  šalutinių harmonikų kiekio, bei keitiklių naudingumo koeficiento  $\eta$  priklausomybes, galima padaryti išvada, kad pusiau valdomas keitiklis su fazinių valdymu pranašesnis už pilnai valdomą keitiklį, nors su pilnai valdomu keitikliu pasiekiamas didesnis galios faktorius.



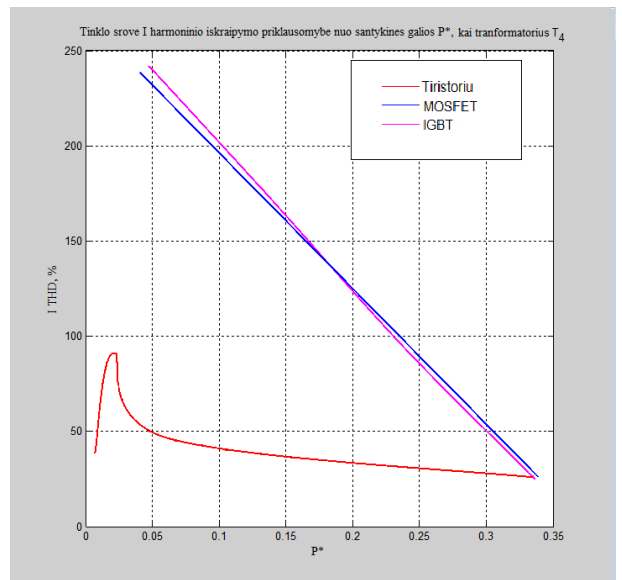
a) transformatorius  $T_1$



b) transformatorius  $T_2$



a) transformatorius  $T_3$



b) transformatorius  $T_4$

25 pav.  $I_a$   $THD_F$  priklausomybė nuo santykinės galios  $P^*$ , kai naudojamas fazinis valdymas

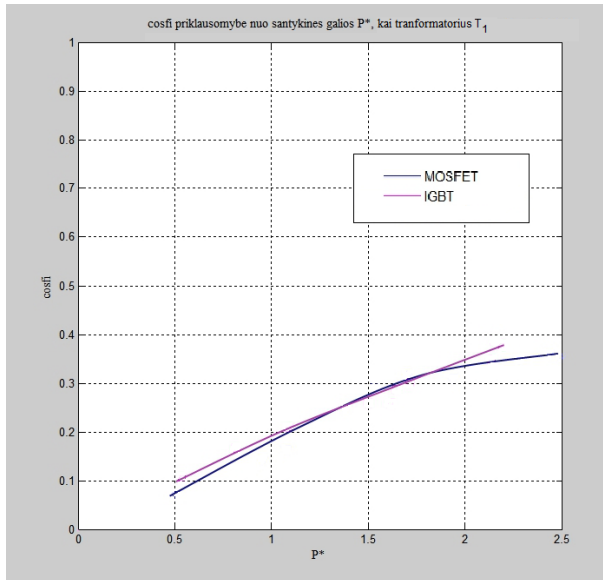
### 3.3 Elektros keitiklių su erdvinio vektoriaus moduliacija įtakos tyrimas

Elektros mašinų bandymo stendo su erdvinio vektoriaus moduliacijos valdymu, elektros keitiklių modeliavimo rezultatai pateikti: galios faktorius  $\cos\phi$  – 26 pav., įtamos  $U_{ab}$  šalutinių harmonikų kiekis  $THD_F$  – 27 pav., naudingumo koeficiento  $\eta$  – 28 pav., srovė  $I_a$  šaltinių harmonikų kiekio  $THD_F$  – 29 pav.

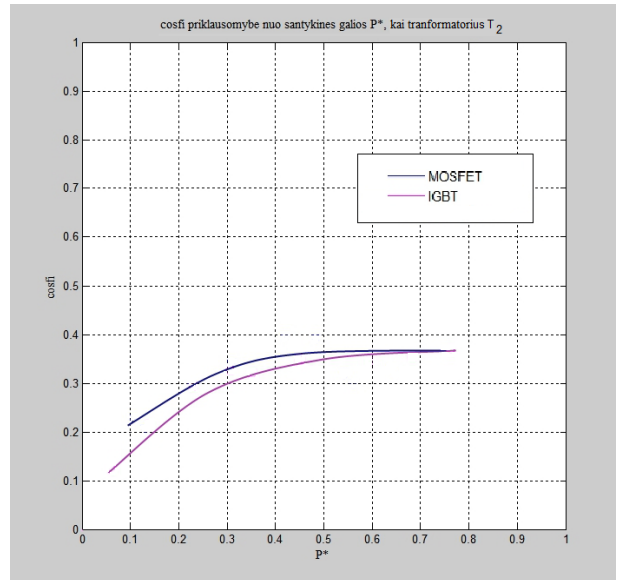
Su erdvinio vektoriaus moduliacijos elektros keitikliu bandymo stendo galios faktorius  $\cos\phi$  sumažėjo per 0,3 ir siekia 0,5 (26 pav. d)), kai naudojamas transformatorius  $T_4$ . Galios faktorius tiesiogiai priklausomas nuo apkrovos.



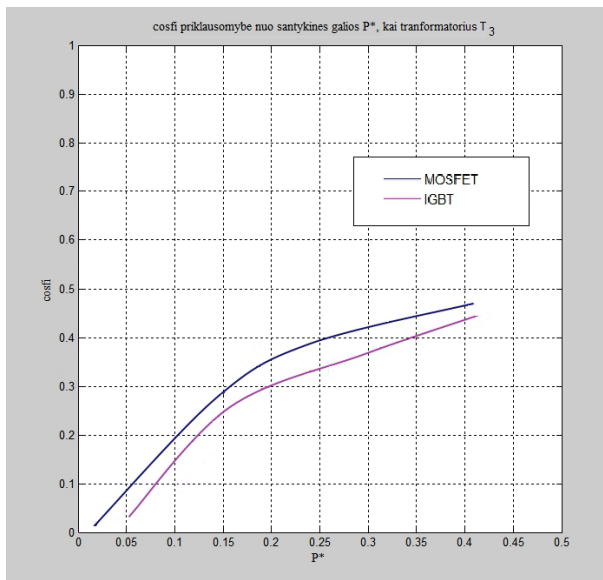
Esant mažam apkrovimui srovės  $I_a$  harmoninio iškraipymas  $THD_F$  lygis siekia 50%, su  $T_4$  transformatoriumi (28 pav. d). Srovės  $I_a$  harmoninio iškraipymo  $THD_F$  lygis yra atvirkščiai proporcingas apkrovai.



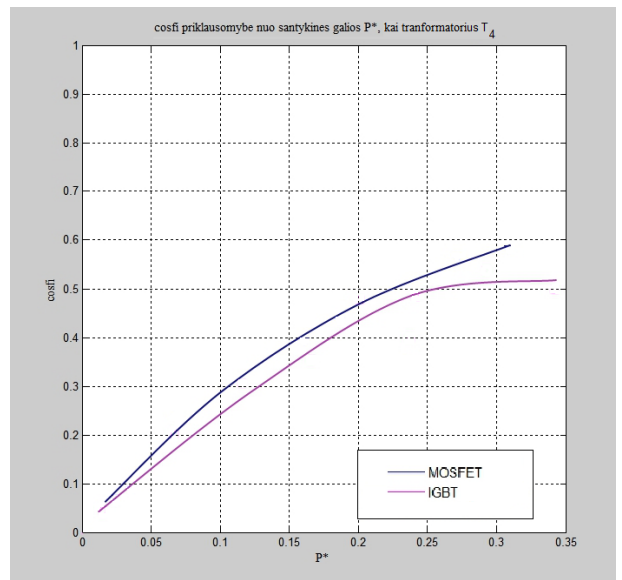
a) transformatorius  $T_1$



b) transformatorius  $T_2$

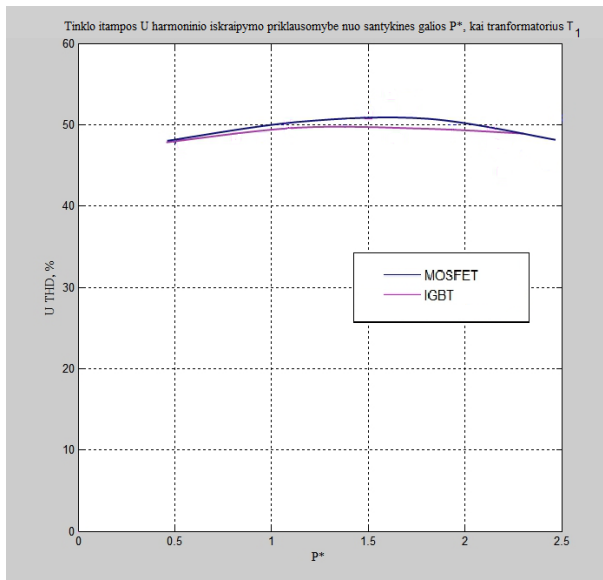


a) transformatorius  $T_3$

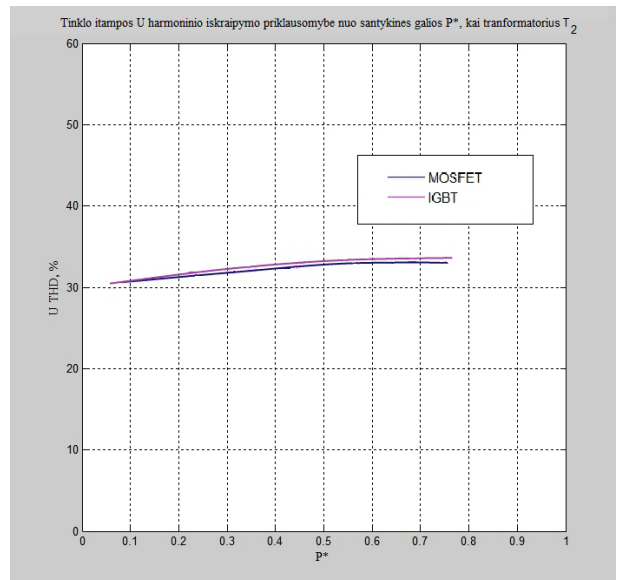


b) transformatorius  $T_4$

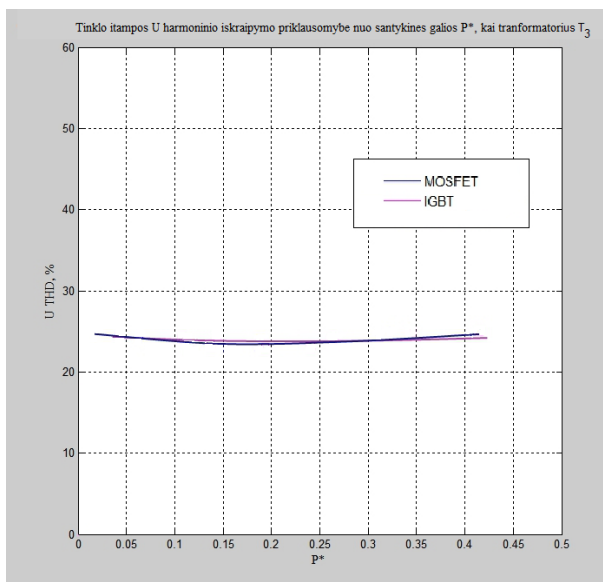
26 pav.  $\cos\phi$  priklausomybė nuo santykinės galios  $P^*$ , kai naudojamas vektorinis valdymas



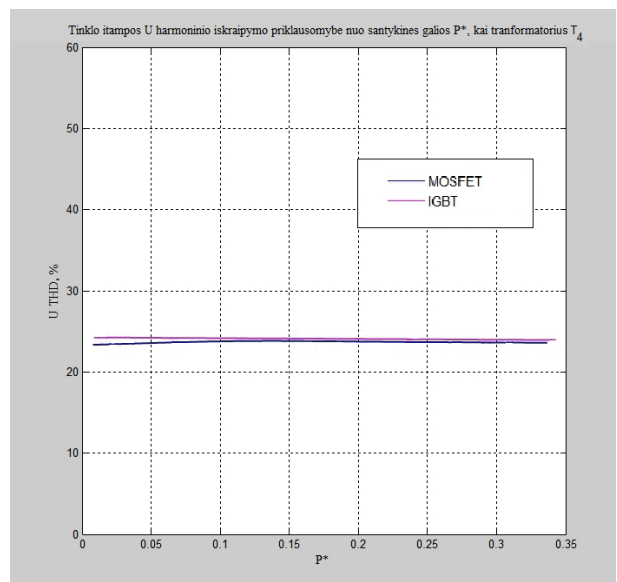
a) transformatorius  $T_1$



b) transformatorius  $T_2$



a) transformatorius  $T_3$

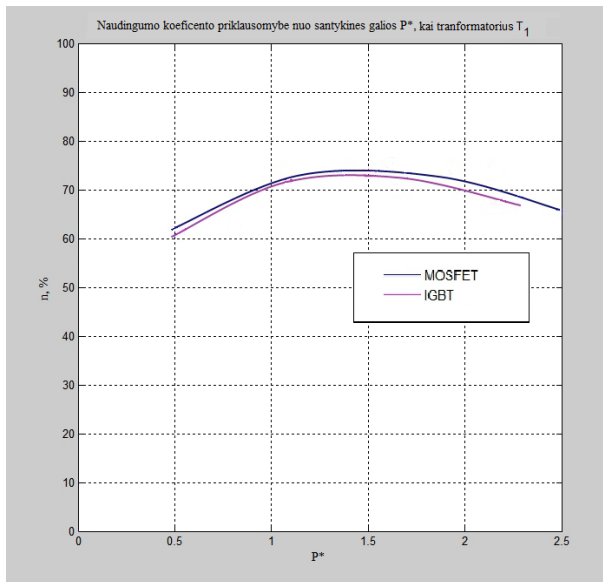


b) transformatorius  $T_4$

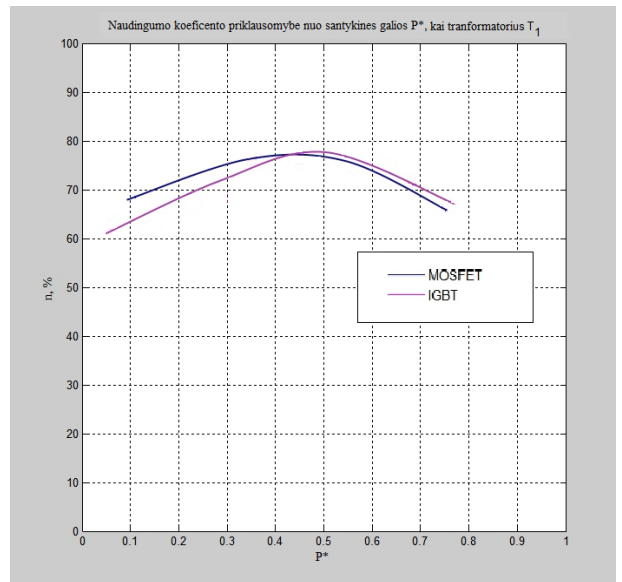
27 pav.  $U_{ab}$   $THD_F$  priklausomybė nuo santykinės galios  $P^*$ , kai naudojamas vektorinis valdymas

Elektros mašinų bandymų stendo įtampos  $U_{ab}$  šalutinių harmonikų  $THD_F$  kiekis sumažėja, bet viršija 8% ribą su bet koku transformatoriumi (27 pav.). Šalutinių įtampos harmonikų kiekis tampa nepriklausomas nuo apkrovos lyginant su fazinio valdymo keitikiais. Tai sudaro prielaidą, kad galios grandinėje panaudojus filtrą, galima sumažinti šalutinių harmonikų kiekį.

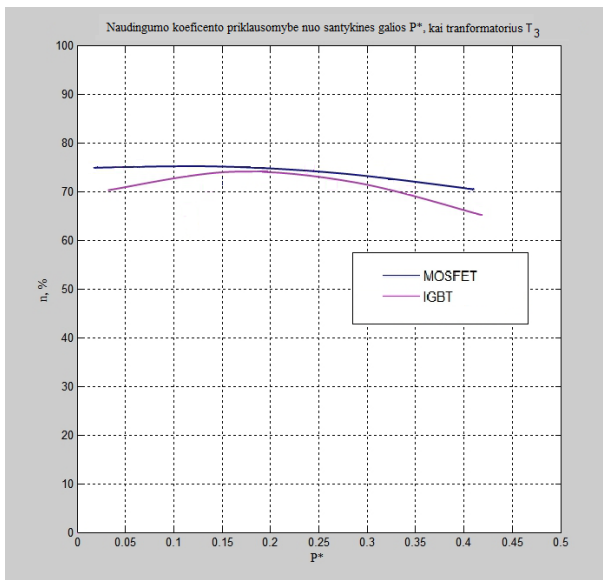
Mažiausią įtampos šalutinių harmonikų kiekį į elektros tinklą įtampos keitiklis generuoja su tdidžiausio nominalo tinklo transformatoriumi  $T_4$ . Iš to galima teikti, kad su didesnio nominalo transformatoriumi elektros keitiklis generuoja mažesnius šalutinių įtampos harmonikų kiekius.



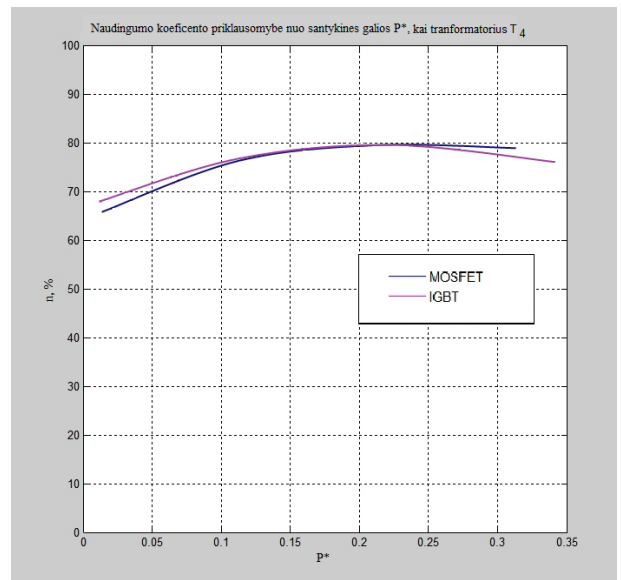
a) transformatorius  $T_1$



b) transformatorius  $T_2$



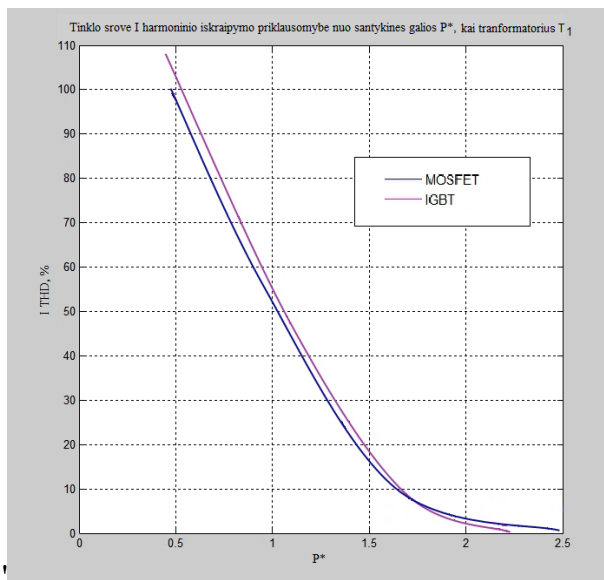
a) transformatorius  $T_3$



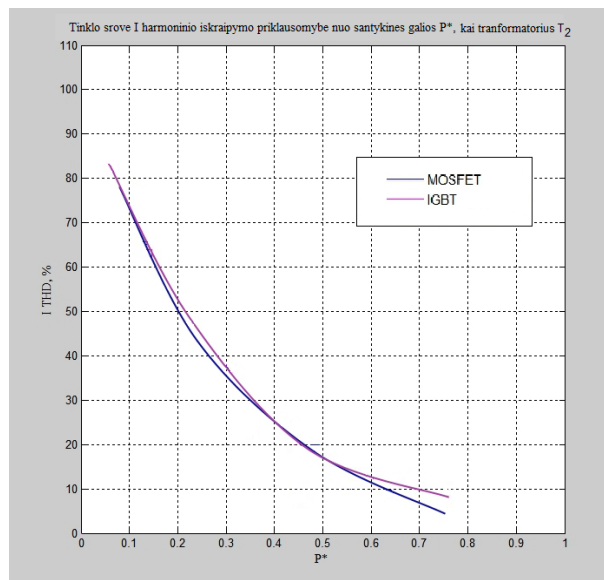
b) transformatorius  $T_4$

28 pav.  $\eta$  priklausomybė nuo santykinės galios  $P^*$ , kai naudojamas vektorinis valdymas

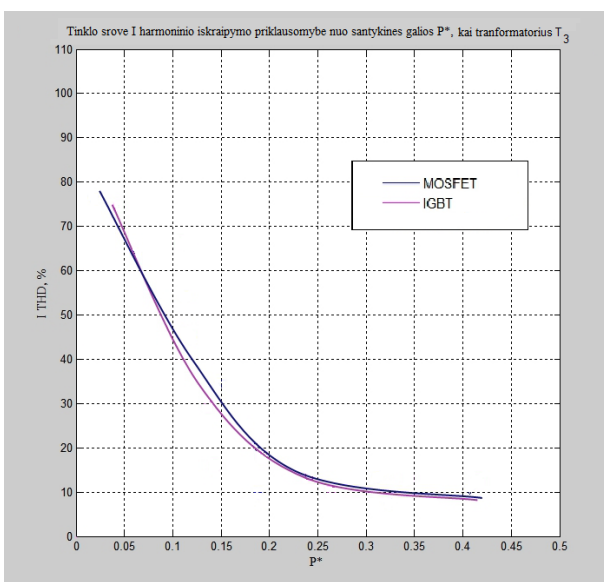
Iš pateiktų naudingumo koeficiento priklausomybių, koeficientas  $\eta$  pasiekiamas 10% didesnis nei su fazinio kampo pilnai valdomais elektros keitikliais, kai naudojamas  $T_4$  transformatorius (pavaizduota 28 pav. d)).



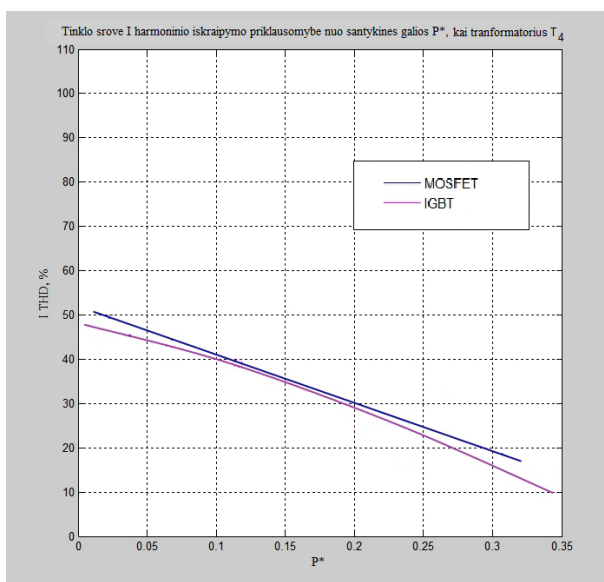
a) transformatorius  $T_1$



b) transformatorius  $T_2$



c) transformatorius  $T_3$



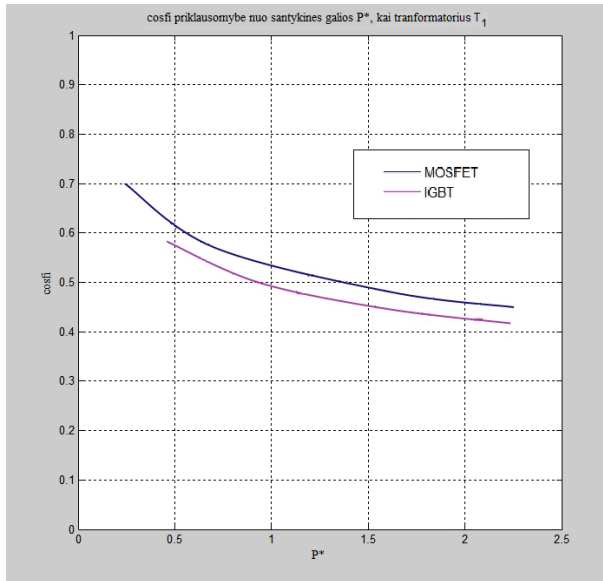
d) transformatorius  $T_4$

29 pav.  $I_a$   $THD_F$  priklausomybė nuo santykinės galios  $P^*$ , kai naudojamas vektorinis valdymas

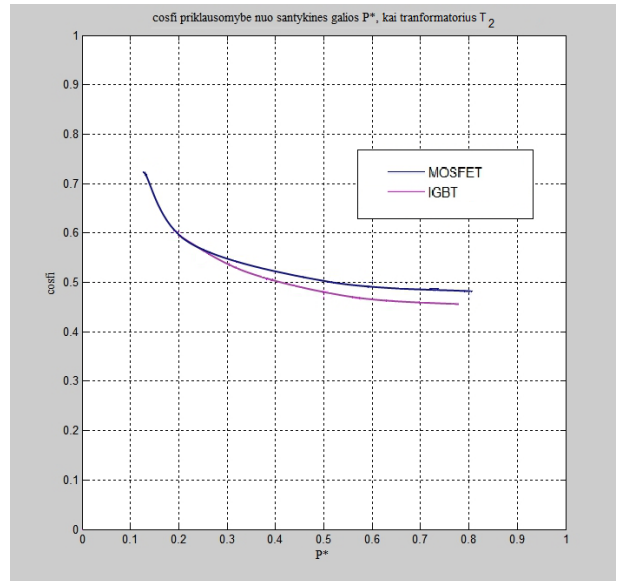
### 3.4 Elektros keitiklių su erdvinio vektoriaus moduliacija ir filtru įtakos tyrimas

Elektros mašinų bandymo stendo su erdvinio vektoriaus moduliacijos valdymu, panaudojus filtrą elektros keitiklio galios grandinėje, modeliavimo rezultatai pateikti: galios faktoriaus  $\cos\phi$  – 30 pav., įtampos  $U_{ab}$  šalutinių harmonikų kiekis  $THD_F$  – 31 pav., naudingumo koeficiento  $\eta$  – 32 pav., srovė  $I_a$  šaltinių harmonikų kiekio  $THD_F$  – 33 pav.

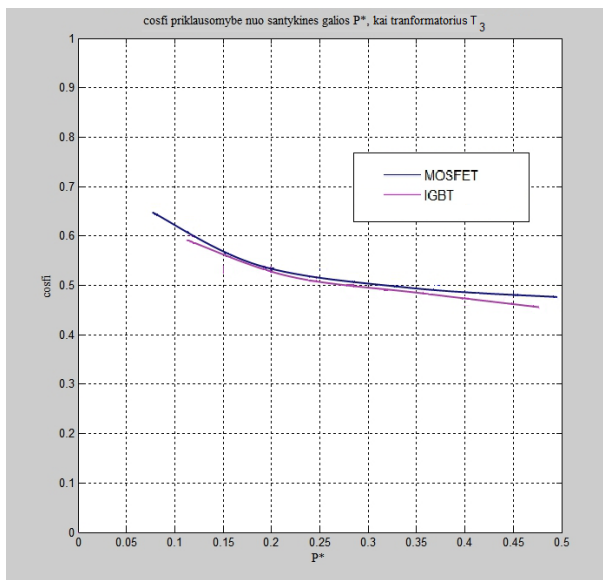
Bandymo stendo elektros keitiklio galios grandinėje įterpus kondensatorinį filtrą prie mažesnio transformatoriaus apkrovimo (30 pav. d)), pasiekiamas maksimalus galios faktorius yra  $\cos\phi=0,7$ . Galios faktorius yra atvirkščiai proporcingas transformatoriaus apkrovai.



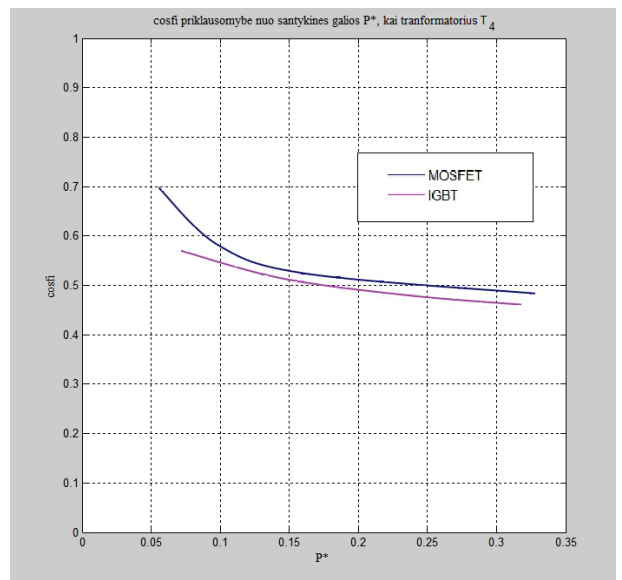
a) transformatorius  $T_1$



b) transformatorius  $T_2$



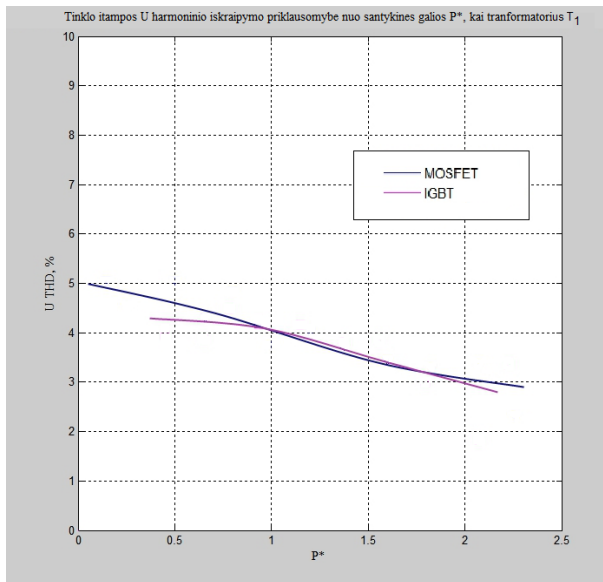
c) transformatorius  $T_3$



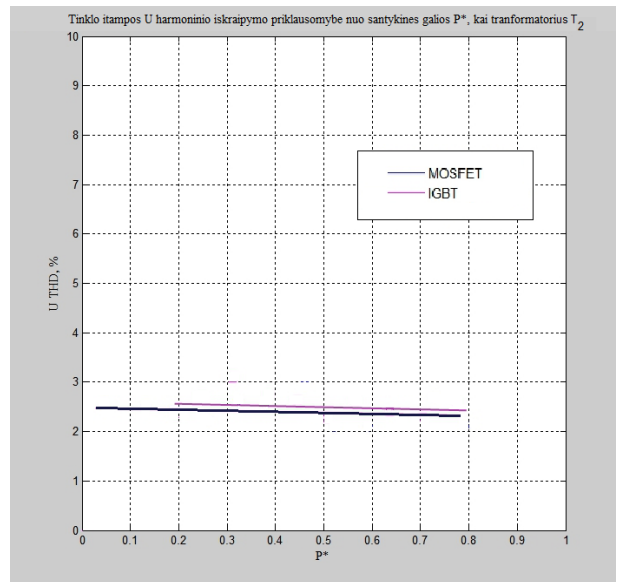
d) transformatorius  $T_4$

30 pav.  $\cos\phi$  priklausomybė nuo santykinės galios  $P^*$ , kai naudojamas vektorinis valdymas su filtru

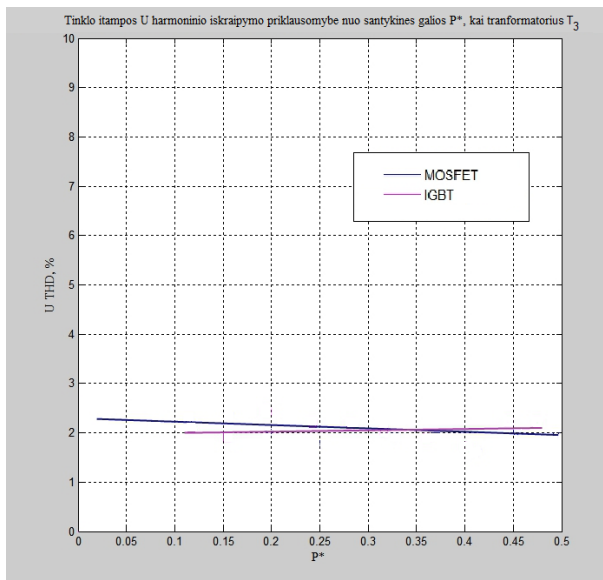
Su bet kuriuo transformatoriumi įtampos  $U_{ab}$  šalutinių harmonikų kiekis  $THD_F$  neviršija 8% ir pasiekiamas 2% lygis (31 pav. d)). Įtampos  $U_{ab}$  šalutinių harmonikų kiekis  $THD_F$  nepriklauso nuo apkrovos.



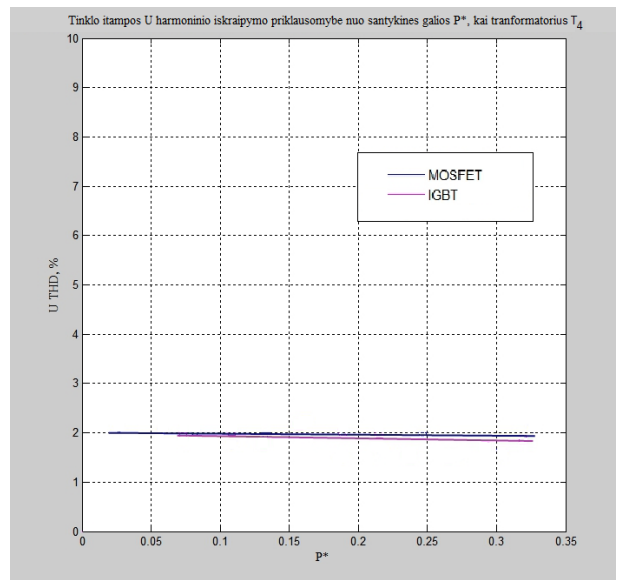
a) transformatorius  $T_1$



b) transformatorius  $T_2$



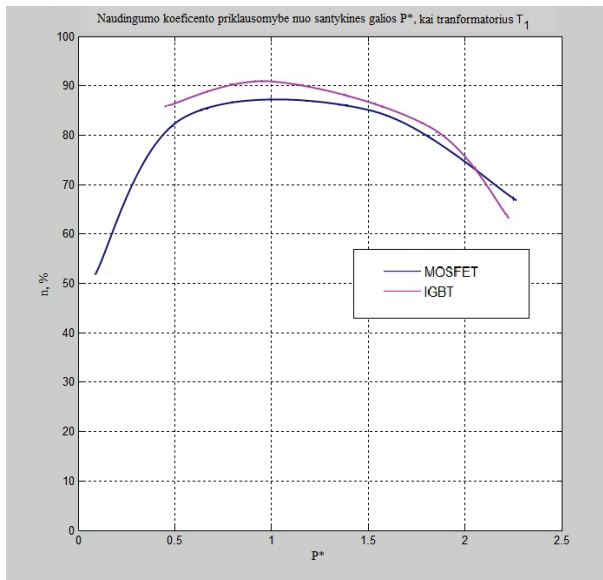
a) transformatorius  $T_3$



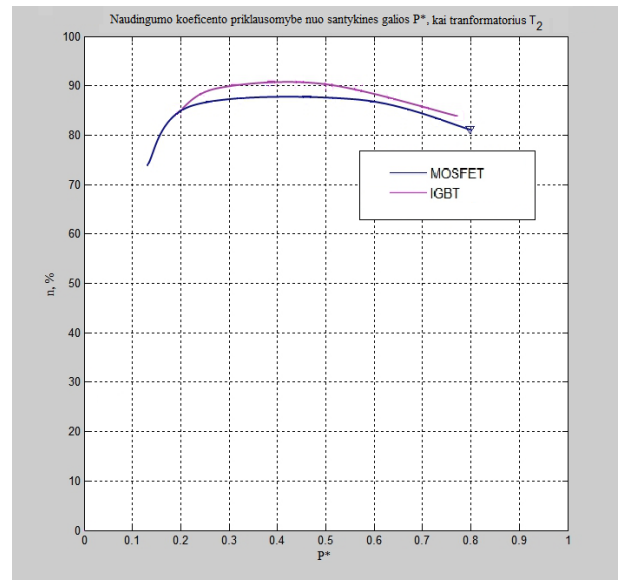
b) transformatorius  $T_4$

31 pav.  $U_{ab} THD_F$  priklausomybė nuo santykinės galios  $P^*$ , kai naudojamas vektorinis valdymas su filtru

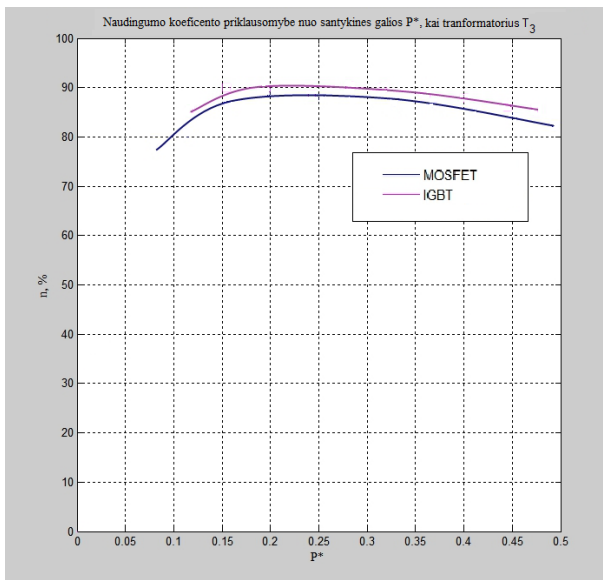
Elektros keitiklio naudingumas su galios grandinėje esančiu filtru padidėja apie 10%, lyginant, kai galios grandinėje nenaudojamas filtras, nes harmonikų filtras sumažina šalutinių harmonikų sukeltus nuostolius (32 pav).



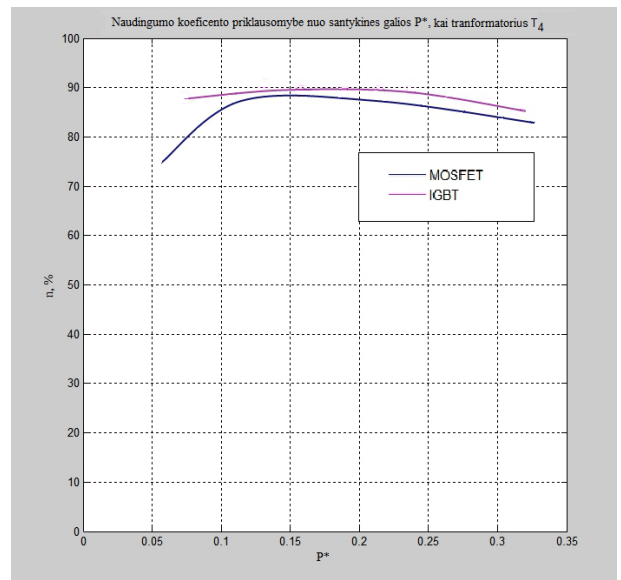
a) transformatorius  $T_1$



b) transformatorius  $T_2$



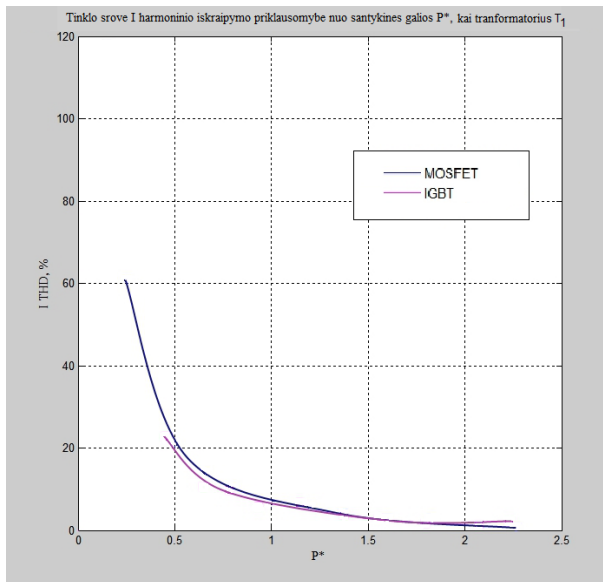
a) transformatorius  $T_3$



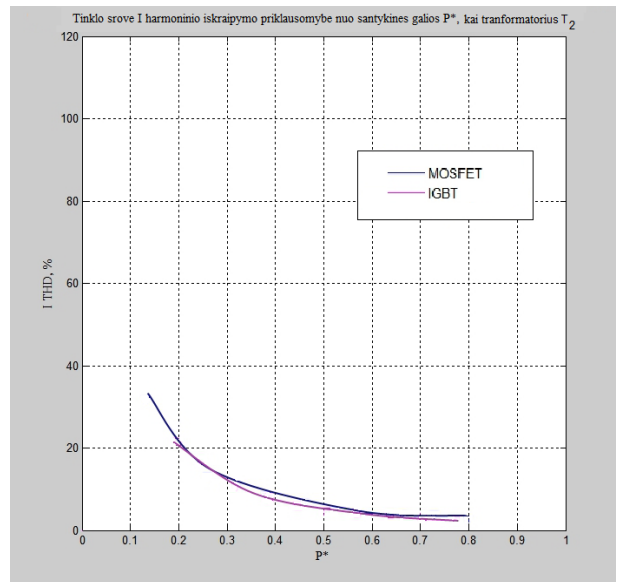
b) transformatorius  $T_4$

32 pav.  $\eta$  priklausomybė nuo santykinės galios  $P^*$ , kai naudojamas vektorinis valdymas su filtru

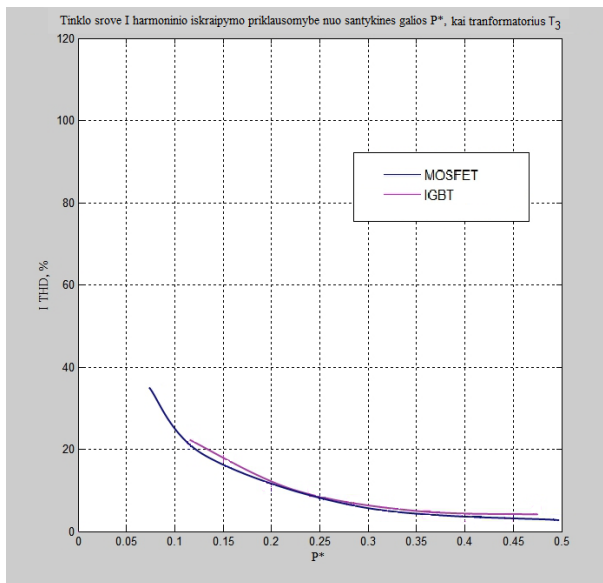
Galima padaryti išvada, palyginus elektromašininio keitiklio tipinių elementų ir puslaidininkinio keitiklio naudingumo koeficiento  $\eta$  ir galios faktorius  $\cos\phi$  priklausomybes, kad puslaidininkinio keitiklio naudingumo koeficientas yra didesnis nei elektromechaninio keitiklio, nes dėl bandomųjų mašinų galios įvairovės elektromechaninio keitiklio apkrova retais atvejais bus lygi vardinei, todėl bendras elektromechaninio keitiklio naudingumas bus mažesnis nei nurodytas prie vardinių parametrų. Tai pat, prie mažesnio apkrovimo elektroninio keitiklio galios faktorius didesnis nei elektromechaninio keitiklio. Plačiau apie elektromechaninių keitiklio elementų charakteristikas yra šaltiniuose [20,21]. Prieduose 2 ir 3 pateiktos asichroninio variklio galios faktorius ir naudingumo koeficiento tipinės priklausomybės nuo apkrovos.



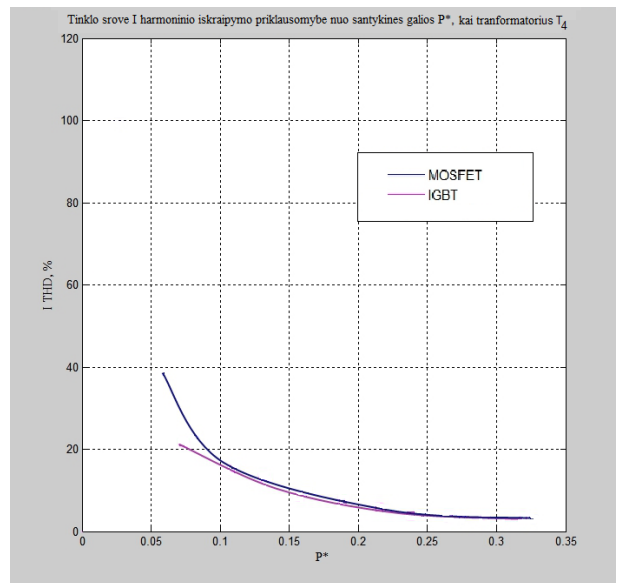
a) transformatorius  $T_1$



b) transformatorius  $T_2$



a) transformatorius  $T_3$



b) transformatorius  $T_4$

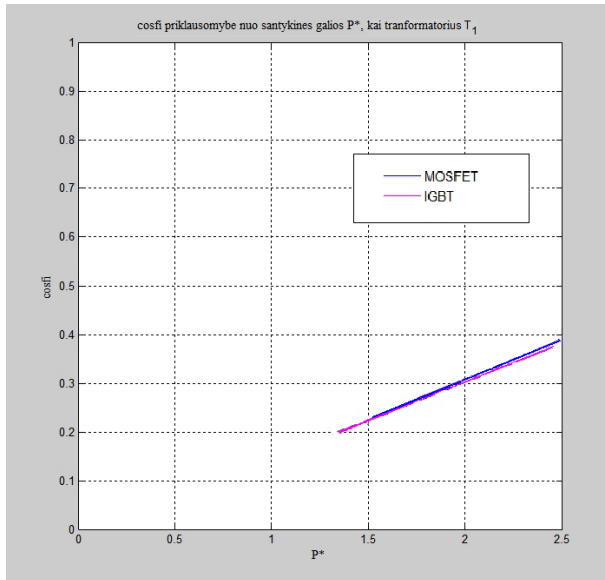
33 pav.  $I_a$   $THD_F$  priklausomybė nuo santykinės galios  $P^*$ , kai naudojamas vektorinis valdymas ir filtru

Stendo generuojamas rovės  $I_a$  šalutinių harmonikų kiekis  $THD_F$  sumažinamas ir neviršija 40%, išskyrus, su mažiausio nominalo transformatoriumi  $T_1$  (33 pav. a)). Iš visų tirtų elektros keitiklių modifikacijų, įtampas keitiklis su vektoriniu valdymu ir galios grandinėje įterptu filtru, generuoja mažiausią srovės šalutinių harmonikų kiekį. Naudojant šį keitiklį sumažinamas neigiamas srovės šalutinių harmonikų poveikis tinklui.

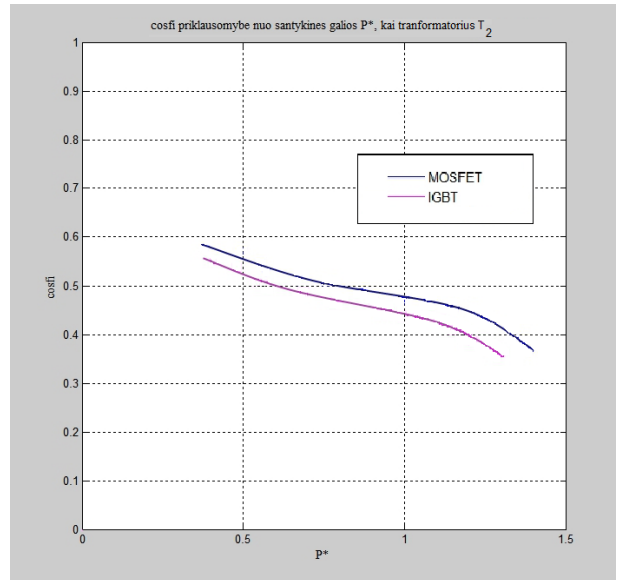


### 3.5 Dvigubas apkrovos įtakos tyrimas

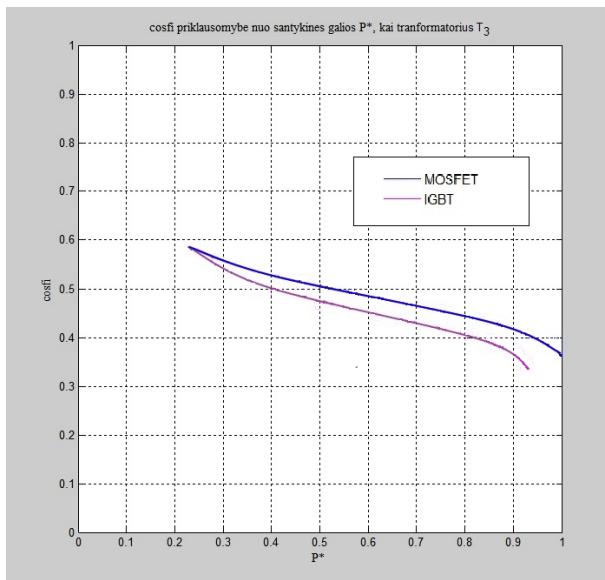
Modeliavimo rezultatai, kai modeliuotas tinklo transformatorius apkrautas dviem elektros keitikliais, pateikti: galios faktoriaus  $\cos\phi$  – 34 pav., įtampos  $U_{ab}$  šalutinių harmonikų kiekis  $THD_F$  – 35 pav.



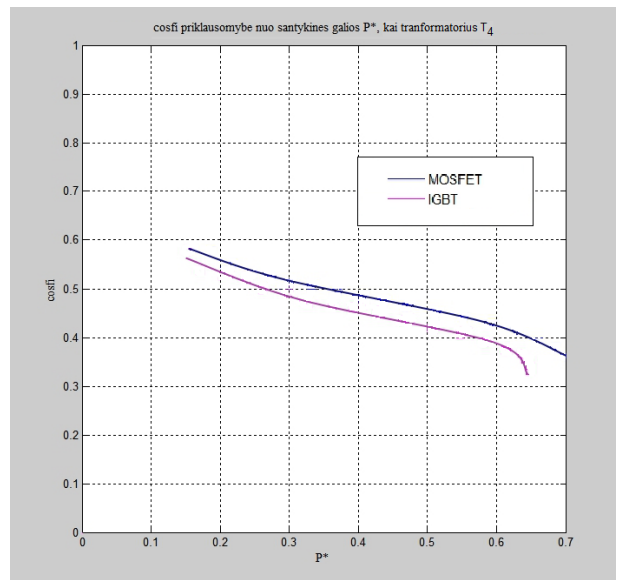
a) transformatorius  $T_1$



b) transformatorius  $T_2$



a) transformatorius  $T_3$



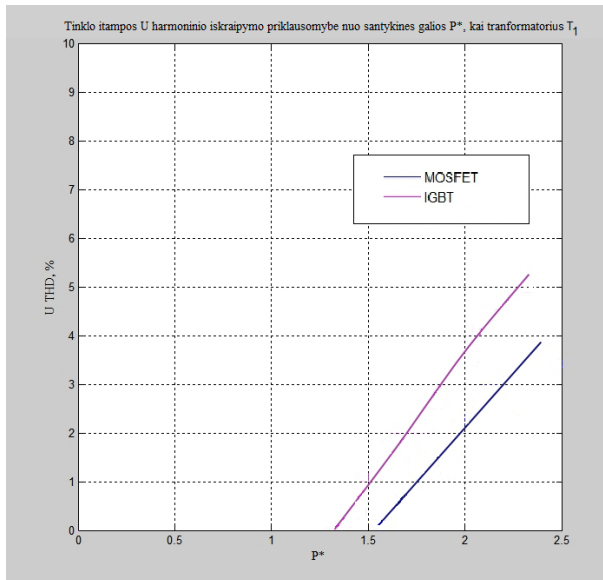
b) transformatorius  $T_4$

34 pav.  $\cos\phi$  priklausomybė nuo santykinės galios  $P^*$ , kai prijungti du varikliai su vektoriniu valdymu

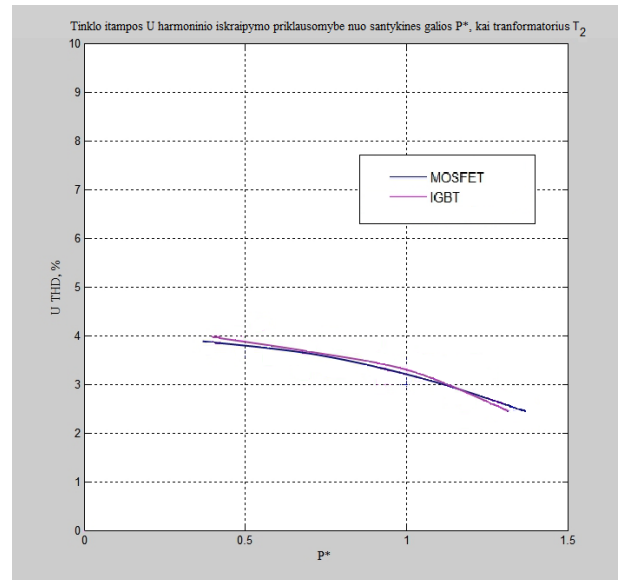
Dvigubas 0,4 kV transformatoriaus apkrovimas padidina galios faktorių prie tų pačių santykinės galios  $P^*$  verčių. Pavyzdžiui, kai santykinė galia  $P^*=0,3$  ir naudojamas  $T_4$

transformatorius apkraunamas tik vienu elektros keitikliu, galios faktorius –  $\cos\phi=0,49$  (30 pav. d)), o kai transformatorius  $T_4$  apraunamas su dviem elektros keitikliais, galios faktorius yra  $\cos\phi=0,52$  (34 pav. d).

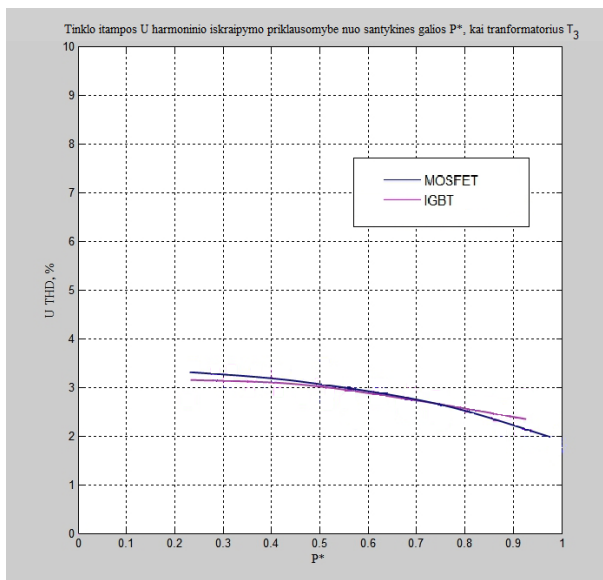
Elektros mašinų bandymo stendo generuojamų įtamos  $U_{ab}$  šaltinių harmonikų kiekis į tinklą padidėja 2 % lyginant, dėl didesnio transformatoriaus induktyvinio apkrovimo.



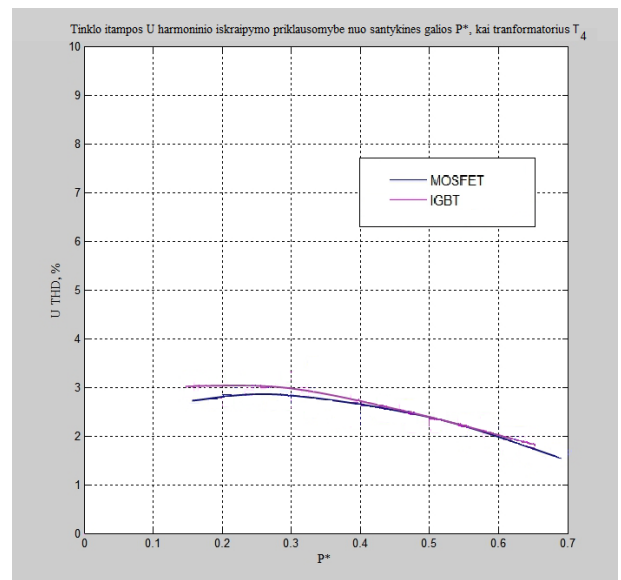
a) transformatorius  $T_1$



b) transformatorius  $T_2$



a) transformatorius  $T_3$



b) transformatorius  $T_4$

35 pav.  $U_{ab}$  THD<sub>F</sub> priklausomybė nuo santykinės galios  $P^*$ , kai prijungti du varikliai su vektoriniu valdymu

## Išvados

1. Mašinų bandymo stendo, naudojant fazinį valdymą, generuojamų įtampos šalutinių harmonikų lygis viršija standartuose leidžiamą ribą prie visų standartinių pastočių transformatorių, todėl jis yra nenaudotinas jungiant prie 0,4 kV įtampos tinklo. Tačiau turi ir privalumų – pasiekiamas aukštas naudingumo koeficientas ir galios faktorius.
2. Mašinų bandymo stendo su nevaldomu keitikliu generuojamas šalutinių harmonikų lygis tenkina standartuose numatytą 8% ribą, esant visiems standartiniams pastotės transformatoriams, išskyrus mažiausią – 100 kVA transformatorių.
3. Erdvinio vektoriaus moduliacija stendo generuojamų įtampos šalutinių harmonikų kiekį sumažina nuo 130% iki 25% ir sudaro prielaidą panaudojus filtrą tenkinti standartuose numatytą reikalavimą.
4. Galios grandinę papildžius filtru, stendo generuojamų įtampos šalutinių harmonikų kiekis tenkina standarto reikalavimus 8%, todėl tik šita modifikacija yra naudotina.
5. Situacijoje, kai abi bandomosios mašinos veiks variklio režimu, stendo generuojamų įtampos šalutinių harmonikų kiekis padidėtu 2%.

## Šaltiniai

- [1] S. Gečys, Elektros mašinų patikimumas ir eksploatacija.  
[interaktyvus] [žiūrėta 2015 m. vasario 29 d.]. Prieiga per internetą:  
<https://www.ebooks.ktu.lt/eb/192/elektros-masinu-patikimumas-ir-eksploatacija/>
- [2] ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ  
[interaktyvus] [žiūrėta 2014 m. vasario 25d.]. Prieiga per internetą:  
[http://edu.dvgups.ru/METDOC/GDTRAN/NTS/EPS/T\\_E\\_M/METHOD/PLYASKIN/MU1.htm](http://edu.dvgups.ru/METDOC/GDTRAN/NTS/EPS/T_E_M/METHOD/PLYASKIN/MU1.htm)
- [3] А. С. Курбасов, Тяговые электрические машины и проектирование тяговых электрических машин  
[interaktyvus] [žiūrėta 2014 m. kovo 19d.]. Prieiga per internetą:  
[http://library.miit.ru/methodics/13\\_08\\_2012/98-20151.pdf](http://library.miit.ru/methodics/13_08_2012/98-20151.pdf)
- [4] Xiaodong Liang, Induction Motor Starting in Practical Industrial Applications  
[interaktyvus] [žiūrėta 2014 m. kovo 19d.]. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5621895>
- [5] Ho-Sung Kim, High-Efficiency Isolated Bidirectional AC–DC Converter for a DC Distribution System  
[interaktyvus] [žiūrėta 2014 m. vasario 25d.]. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=06269110>
- [6] 98% Efficient Single-Stage AC/DC Converter Topologies  
[interaktyvus] [žiūrėta 2014 m. vasario 25d.]. Prieiga per internetą:  
[http://www.power-mag.com/pdf/feature\\_pdf/1310569074\\_Teslaco\\_Feature\\_Layout\\_1.pdf](http://www.power-mag.com/pdf/feature_pdf/1310569074_Teslaco_Feature_Layout_1.pdf)
- [7] N. Mohan, T. Undeland, and W. Robbins, Power Electronics: Converters Applications and Design, 3rd edition New York: Wiley, 2002.
- [8] A. Trzynadlowski, Introduction to Modern Power Electronics, 1st edition. New York: Wiley-Interscience, 1998.
- [9] Michael A. Boost, State-of-the-Art Carrier PWM Techniques: A Critical Evaluation  
[interaktyvus] [žiūrėta 2015 m. kovo 15d.]. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=2867>
- [10] Yabin LI, Yonglong, Over-Modulation Technique of Three-Phase Current Source Rectifier Base on FPGA

- [interaktyvus] [žiūrėta 2015 m. kovo 15d.]. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4318731>
- [11] José R. Rodríguez, PWM Regenerative Rectifiers: State of the Art  
[interaktyvus] [žiūrėta 2015 m. kovo 15d.]. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1391089>
- [13] Mitja Nemec, Predictive Torque Control of Induction Machines Using Immediate Flux Control  
[interaktyvus] [žiūrėta 2014 m. vasario 25d.]. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4273666>
- [14] Veeramraju T. Somasekhar, Effect of Zero-Vector Placement in a Dual-Inverter Fed Open-End Winding Induction-Motor Drive With a Decoupled Space-Vector PWM Strategy  
[interaktyvus] [žiūrėta 2014 m. vasario 25d.]. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4455602>
- [15] Internetinė svetainė apie pasaulinius standartus.  
[interaktyvus] [žiūrėta 2015 m. balandžio 25d.]. Prieiga per internetą:  
<http://www.worldstandards.eu/electricity/three-phase-electric-power/>
- [16] G. Svinkunas, K. Medvedev Simulation of Frequency Converters Operation in Industrial Power Net  
[interaktyvus] [žiūrėta 2015 m. kovo 24 d.]. Prieiga per internetą:  
[http://www.ee.ktu.lt/journal/2012/01/13\\_\\_ISSN\\_1392-1215\\_Simulation%20of%20Frequency%20Converters%20Operation%20in%20Industrial%20Power%20Net.pdf](http://www.ee.ktu.lt/journal/2012/01/13__ISSN_1392-1215_Simulation%20of%20Frequency%20Converters%20Operation%20in%20Industrial%20Power%20Net.pdf)
- [17] S. Begag, Three-Phase PWM Rectifier with Constant Switching Frequency  
[interaktyvus] [žiūrėta 2014 m. rugsėjo 13 d.]. Prieiga per internetą:  
<http://journal.esrgroups.org/jes/papers/JESV5SI0109%20%282%29.pdf>
- [18] Shuai Lu, Direct Torque Control of Five-Phase Induction Motor Using Space Vector Modulation with Harmonics Elimination and Optimal Switching Sequence  
[interaktyvus] [žiūrėta 2014 m. lapkričio 5 d.]. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1620539>
- [19] Marco Liserre, Design and Control of an LCL-Filter-Based Three-Phase Active Rectifier  
[interaktyvus] [žiūrėta 2015 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1510826>

[20] DETERMINING ELECTRIC MOTOR LOAD AND EFFICIENCY

[interaktyvus] [žiūrėta 2015 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per internetą:

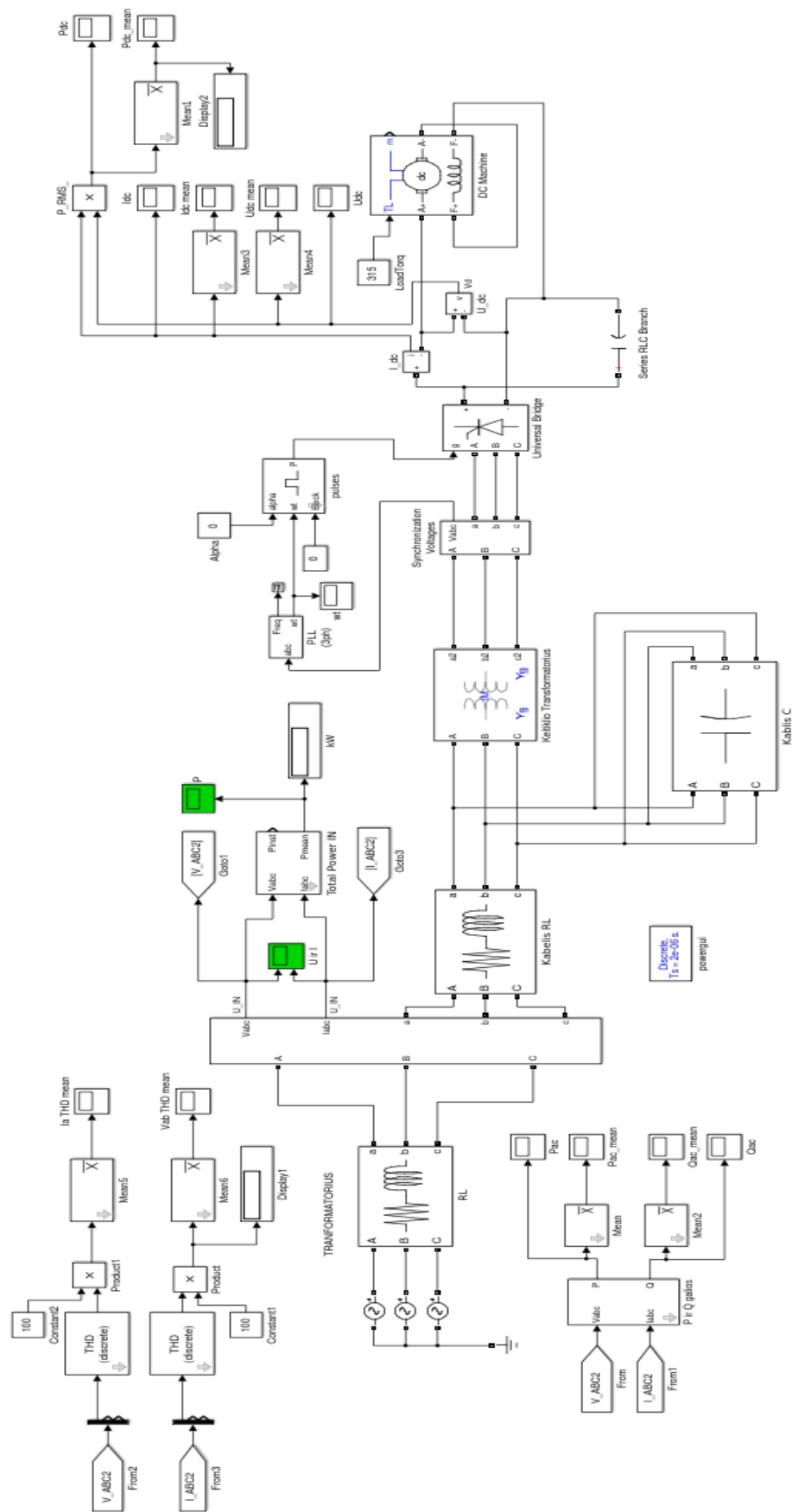
[http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech\\_assistance/pdfs/10097517.pdf](http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_assistance/pdfs/10097517.pdf)

[21] Characteristics Of DC Generators

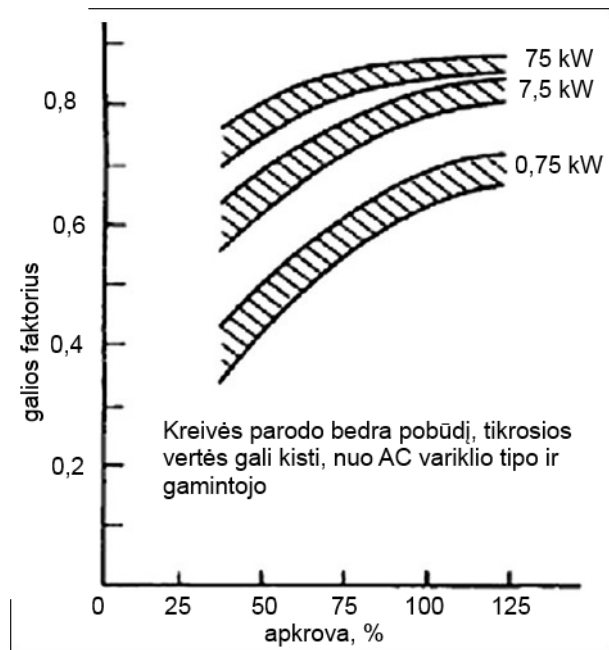
[interaktyvus] [žiūrėta 2015 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per internetą:

<http://www.electricaleasy.com/2014/07/characteristics-of-dc-generators.html>

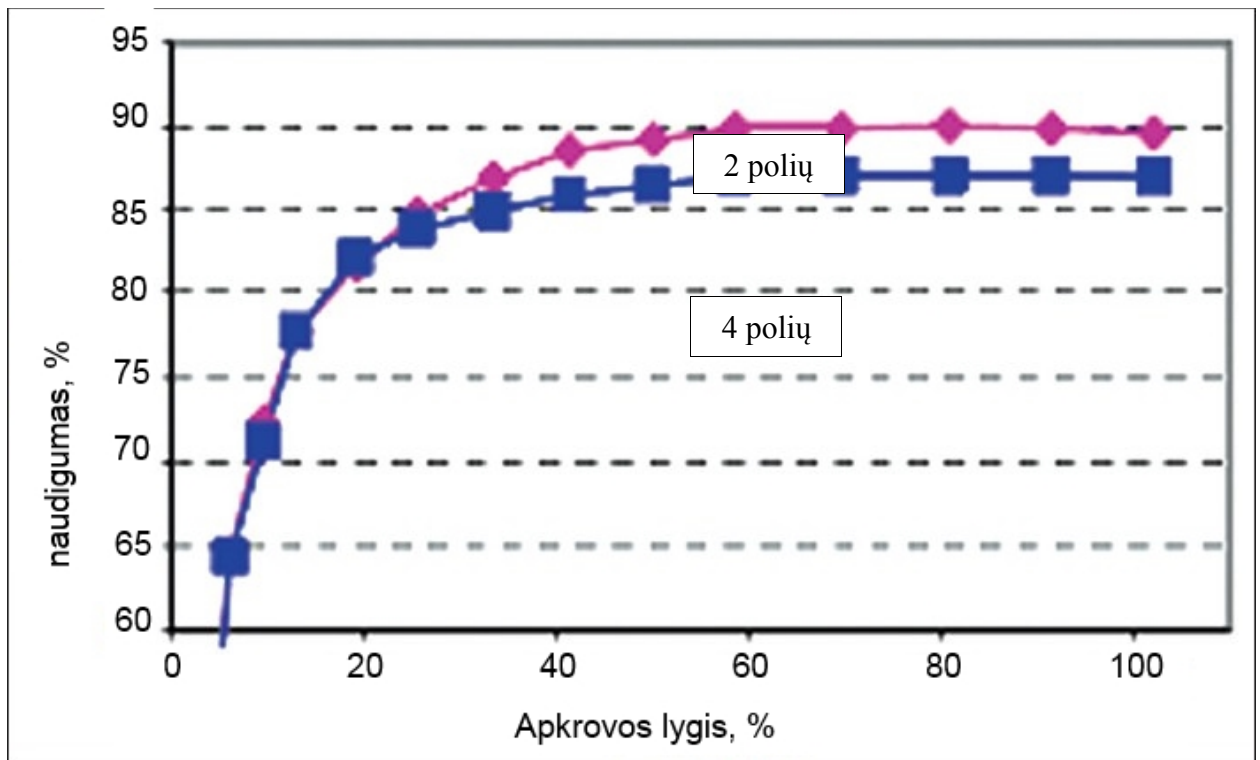
# Priedai



1 priedas. Simulink modelis su erdvinio vektoriiaus moduliacija



Priedas 2. Asinchroninio variklio galios faktorius priklausomybė nuo apkrovos



Priedas 3. Asinchroninio variklio naudingumo koeficiento priklausomybė nuo apkrovos