



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS**

**Ernestas Skrickas**

**MIKROTINKLO INVERTERIO HARMONIKŲ VALDYMO  
TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Doc. dr. Jonas Valickas

**PANEVĖŽYS, 2017**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS**

**MIKROTINKLO INVERTERIO HARMONIKŲ VALDYMO  
TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas  
Valdymo technologijos (kodas 621H66001)

**Vadovas**

Doc. dr. Jonas Valickas

**Recenzentas**

**Projektą atliko**

Ernestas Skrickas

**PANEVĖŽYS, 2017**



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**

**PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS**

(Fakultetas)

**Ernestas Skrickas**

(Studento vardas, pavardė)

**Valdymo technologijos, 621H66001**

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Baigiamojo projekto pavadinimas“

**AKADEMINIO SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

20 \_\_\_\_ m. \_\_\_\_\_ d.  
Panevėžys

Patvirtinu, kad mano, **Ernesto Skricko**, baigiamasis projektas tema „**Mikrotinklo inverterio harmonikų valdymo tyrimas**“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nėra 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)

20..... ..

## BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS

**Išduota studentui:** Ernestui Skrickui Grupė PME-5

**1. Darbo tema:**

Lietuvių kalba: Mikrotinklo inverterio harmonikų valdymo tyrimas

Anglų kalba: Research on Control of Microgrid Inverter Harmonic Distortion

Patvirtinta 2017 m. kovo mėn. 30 d. dekanų potvarkiu Nr. V25-13-8

**2. Darbo tikslas:**

*Ištirti mikrotinklo inverterio harmonikų valdymo galimybes – bendro harmoninio iškraipymo sumažinimo galimybes, išlaikant kuo aukštesnį įtampos keitimo energinį efektyvumą.*

**3. Reikalavimai ir sąlygos:**

*Išanalizuoti tipines galios inverterių schemas. Pasirinkti daugiausiai naudojamą mikrotinkluose. Atlikti literatūros analizę ir ištirti modeliuojant. Pasiūlyti harmonikų sumažinimo būdą.*

**4. Projekto struktūra.** Turinys konkretizuojamas kartu su vadovu, atsižvelgiant į BP pobūdį.

1. Atsinaujinantys energijos šaltiniai, naudojami mikrotinkluose.
2. Inverterių struktūra, jų veikimas bei valdymas.
3. Impulsų pločio moduliacijos metodas.
4. Kuriamos kintamosios įtampos bendras harmoninis iškraipymas.
5. Pasirinktos inverterio schemas modeliavimas.
6. Harmonikų valdymo tyrimas keičiant inverterio parametrus.
7. Inverterio valdymo schemas sudarymas.

**5. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo projekto dalis.**

**6. Projekto pateikimo gynimui kvalifikacinėje komisijoje terminas**

2017-06-01

(data)

Užduotį gavau:

2017-02-01

(data)

(studento vardas, pavardė, parašas)

Vadovas:

2017-02-01

(data)

(pareigos, vardas, pavardė, parašas)

# TURINYS

<b>IVADAS</b> .....	8
<b>1. ATSINAUJINANČIŲ ENERGIJOS ŠALTINIŲ PLĖTRA</b> .....	10
<b>2. MIKROTINKLAS</b> .....	12
<b>3. INVERTERIS</b> .....	14
3.1. Vienfazis įtampos šaltinio inverteris.....	14
3.1.1. Pusės tiltelio topologijos inverteris .....	14
3.1.2. Pilno tiltelio topologijos inverteris.....	15
3.2. Trifazis įtampos šaltinio inverteris .....	16
3.3. Inverterio tiltelio struktūra .....	17
3.3.1. IGBT ir MOSFET tranzistoriai .....	18
3.4. Inverterio ekvivalentinė schema .....	21
<b>4. IMPULSŲ PLOČIO MODULIACIJA</b> .....	22
4.1. Erdviškojo vektoriaus impulsų pločio moduliacija .....	23
4.2. Modifikuota impulsų pločio moduliacija.....	24
4.3. Sinusinė impulsų pločio moduliacija.....	24
<b>5. SINUSINĖS IMPULSŲ PLOČIO MODULIACIJOS INVERTERIAI</b> .....	26
5.1. Bipolinė impulsų pločio moduliacija.....	29
5.2. Vienpolinė impulsų pločio moduliacija.....	30
5.3. Daugiapakopė impulsų pločio moduliacija.....	31
<b>6. ŽEMŲ DAŽNIŲ FILTRAS</b> .....	32
<b>7. BENDRAS HARMONINIS IŠKRAIPYMAS</b> .....	34
<b>8. INVERTERIO MODELIAVIMAS</b> .....	37
8.1. Modelio tyrimo metodika .....	39
8.2. Modeliavimo rezultatai .....	42
8.3. Inverterio modelio ir apkrovos struktūros sudarymas .....	42
<b>9. PASIRINKTO INVERTERIO MODELIO TYRIMAS</b> .....	44
9.1. Inverterio parametrų valdymo galimybių tyrimas .....	44
9.2. Harmonikų valdymo tyrimas varijuojant apkrovos bei filtro parametrais.....	46
9.3. Inverterio valdymo schema.....	47
<b>IŠVADOS</b> .....	49
<b>LITERATŪRA</b> .....	50

Skrickas, Ernestas. Mikrotinklo inverterio harmonikų valdymo tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Jonas Valickas; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas. Lietuvių kalba, 51 puslapis, 45 iliustracijos, 6 lentelės, 12 formulių.

Mokslo kryptis ir sritis: Valdymo technologijos

Reikšminiai žodžiai: atsinaujinantys energijos šaltiniai, mikrotinklas, inverteris, valdymas, harmonikos, modeliavimas

Panevėžys, 2017. 51 p.

## SANTRAUKA

Pasaulio užterštumas išlieka viena svarbiausių problemų pasaulyje, todėl vis daugiau dėmesio skiriama atsinaujinantiems energijos šaltiniams, kurių generuojama įtampa neretai skiriasi nuo viešojo tinklo ar buitinių įrenginių naudojamos standartinės įtampos. Šiai įtampai suderinti naudojami įtampos šaltinių keitikliai, kurie dėl savo techninių savybių, keisdami nuolatinę įtampą į kintamąją, sukuria ir nepageidaujamas parazitines harmonikas. Parazitinių harmonikų filtravimui naudojamas žemų dažnių filtras, kuris turi užtikrinti įtampos kokybės reikalavimus. Jei ši sąlyga užtikrinama, siekiant energetinio efektyvumo, išlaikant kokybės parametrus, turi būti išlaikomi minimalūs filtro parametrai.

Šiame darbe analizuojami tipiniai mikrotinklo inverteriai, jų schemas, technika bei veiksniai turintys įtakos harmonikų iškraipymams. Kaip vertinimo kriterijus pasirinktas bendras harmoninių iškraipymų koeficientas. Tyrimui pasirinktas sinusinių impulsų pločio moduliacijos metodu valdomas pilno tiltelio schemas inverteris, kuris plačiai naudojamas mikrotinkluose.

Sudarytas inverterio MATLAB Simulink modelis. Modeliavimo metu nustatytas bendro harmoninio iškraipymo dydis esant įvairiems apkrovimo lygiams bei filtro ir impulsų pločio moduliacijos parametrams. Sudarytos inverterio valdymo charakteristikos ir jo valdymo schema, kuri leidžia užtikrinti reikiamą harmonikų lygį, išlaikant didžiausią energetinį efektyvumą.

Skrickas, Ernestas. Master's thesis in Research on Control of Microgrid Inverter Harmonic Distortion / supervisor assoc. prof. Jonas Valickas. The Faculty of Panevėžys technology and business, Kaunas University of Technology. Lithuanian language, 51 pages, 45 images, 6 tables, 12 formulas.

Research area and field: Technologies of Control

Key words: renewable energy sources, microgrid, inverter, control, harmonic, modelling

Panevėžys, 2017. 51 p.

## **SUMMARY**

World pollution remains one of the most important problems in the world so more and more attention is focused on renewable energy sources which generated voltage often differs from the public grid or electronics used standard voltage. Voltage source inverters are used to match these voltages. Negative parasitic harmonics are made while changing direct voltage to alternating because of the inverter technical characteristics. Low pass filters are used to filter these parasitic harmonics and ensure voltage quality requirements. If this condition is ensured, to reach maximum energy efficiency, filter parameters have to be kept to a minimum while voltage maintains quality requirements.

Microgrid inverters, their schemes, techniques and factors which affects the harmonic distortion are analyzed in this paper. Total harmonic distortion selected as the main evaluation factor. Full bridge inverter controlled by sinusoidal pulse width modulation was selected for research which is widely used in microgrids.

Inverter model was made with MATLAB Simulink program. Modelling have shown that total harmonic distortion value depends on various load levels, filter and pulse width modulation parameters. Inverter control scheme and characteristics were presented which allows to ensure harmonic distortion required level while maintaining the highest energy efficiency.

## IVADAS

Didžioji pasaulyje sunaudojamos elektros energijos dalis pagaminama elektrinėse, deginant išskastinį kurą. Tokiu būdu, kaip šalutinis produktas, generuojami milžiniški kiekiai šiltnamio efekta sukuriančių dujų, sukeliančių vis reikšmingesnę pasaulio klimato kaitą. Kaip pabrėžiama daugelyje tarptautinių organizacijų deklaracijų, iš jų Paryžiaus 2015 m. Jungtinių Tautų klimato kaitos konferencijos dokumentuose, yra tik vienintelis kelias katastrofiškiems padariniams išvengti – visų pirma, perėjimas prie ekologiškų elektros energijos gamybos būdų [1].

Atsinaujinantys saulės ir vėjo energijos šaltiniai – gera alternatyva. Moksle jiems skiriama vis daugiau dėmesio, didinant jų efektyvumą bei tiriant racionalaus panaudojimo galimybes.

Moksliniuose straipsniuose konstatuojama, kad apie 30 % energijos, pagaminamos išskastinio kuro elektrinėse, prarandama viešųjų elektros energijos tinklo tiekimo linijose. Pasigaminant elektros energiją lokaliniame alternatyvios energijos mikrotinkle, šių perdavimo nuostolių išvengiama [2].

Siekiant efektyviai išnaudoti lokalinius alternatyvius energijos resursus, į mikrotinklą jungiami įvairūs šaltiniai: fotoelektriniai moduliai, mažosios vėjo ir hidroelektrinės ir kt. Pirminių šaltinių įtampa neretai skiriasi nuo buityje bei pramonėje naudojamos standartinės įtampos, todėl mikrotinklo elektros įtampos bei dažnio suderinimui naudojami įtampos šaltinio keitikliai, kitaip vadinami inverteriais, kurie nuolatinę pirminių šaltinių įtampą keičia standartinių parametrų vienfazė arba trifazė kintamojo dažnio įtampa, kuri atitinkamai naudojama nacionaliniuose elektros tinkluose.

Atsinaujinantys elektros energijos šaltiniai ir kiti įtaisai, kurie prijungti prie bendrojo elektros tinklo, turi užtikrinti Lietuvos standarto LST EN 50160:2008 „Viešųjų skirstomųjų tinklų tiekiamos elektros įtampos charakteristikos“ reglamentuojamą žemosios ir vidutinės įtampos elektros kokybę [3].

Siekiant efektyvaus energijos keitimo elektroniniuose inverteriuose, naudojama IPM sinusinio signalo moduliacija. Tokiu būdu pasiekiamas aukštas jų ekonomiškumas, tačiau gaunamas didelis parazitinių harmonikų lygis, kuris neigiamai atsiliepia jautriems mikrotinklo vartojimo įrengimams bei yra pakankamai problematiškas, sinchronizuojant mikrotinklo įtampą su nacionaliniu – viešuoju tinklu. Leistinas harmonikų iškraipymo lygis nacionaliniame tinkle pagal standartą EN 50160:2010 yra iki 10% [4].

**Tyrimo objektas** – mikrotinklo inverteris.

**Darbo tikslas** – ištirti mikrotinklo inverterio kuriamų harmonikų valdymą, jų sumažinimo galimybes.



### **Darbo uždaviniai**

1. Iškelti atsinaujinančių elektros energijos šaltinių problematiką.
2. Išnagrinėti mikrotinklo struktūrą.
3. Išnagrinėti inverterio struktūrą ir jo veikimą.
4. Išanalizuoti inverterio valdymo būdus.
5. Ištirti vienfazio inverterio parametrų įtaką bendro harmoninio iškraipymo valdymui.
6. Pasiūlyti bendro harmoninio iškraipymo sumažinimo galimybę.

**Tyrimo metodai** – mokslinės literatūros analizė, modeliavimas.

# 1. ATSINAUJINANČIŲ ENERGIJOS ŠALTINIŲ PLĖTRA

Oro tarša pasaulyje [5] kenkia ne tik žmogaus sveikatai, bet ir aplinkai. Per pastaruosius dešimtmečius Europoje gerokai sumažėjo į orą išmetamų teršalų kiekiai, tačiau jų koncentracijos vis dar per didelės ir oro kokybės problema išlieka.

Kietosios dalelės, azoto dioksidas ir pažemio ozonas laikomi 3 didžiausią neigiamą poveikį žmonių sveikatai darančiais teršalais. Ilgalaikio ir maksimalaus šių teršalų poveikio padariniai yra nuo kvėpavimo takų pažeidimo iki ankstyvos mirties. Europoje apie 90% miesto gyventojų nuolat veikiami tokių teršalų koncentracijų, kurios viršija sveikatai kenksmingus oro kokybės lygius. Taip pat oro tarša veikia aplinką, augaliją, gyvūnus. Dėl didelės ozono koncentracijos ir iškrentančio rūgštinio lietaus, prisotinto sieros ir azoto junginių, nuolat neigiamai veikiama aplinka, gamta, rūgštinama žemė, dėl ko ji tampa vis mažiau derlinga, nualinta. Pagrindiniai oro taršos šaltiniai – iškastinio kuro deginimas, pramoniniai procesai, tirpiklių naudojimas, žemės ūkio veikla bei atliekų perdirbimas.

Iškastinis kuras vis dar yra svarbiausias ir plačiausiai naudojamas iš visų kuro rūšių. Beveik 77 proc. vidutinio europiečio energijos poreikių patenkinama iš naftos, dujų ir anglies. Iš atominės energetikos gaunama apie 14 proc., o iš atsinaujinančiųjų energijos šaltinių – likusieji 9 proc. Tačiau, siekiant sumažinti pasaulio užterštumą, vis daugiau dėmesio skiriama atsinaujinantiesiems energijos šaltiniams ir tai lemia didėjantį šios energijos panaudojimą.

Pagrindiniai atsinaujinančiosios energijos šaltiniai yra [6]:

- Saulės energija: saulės baterijos sugeria šviesą ir paverčia ją energija – šiluma ir elektra;
- Vėjo energija: vėjo turbinomis oro masių judėjimo energija paverčiama elektra;
- Geoterminė energija: žemės gelmėse esantis karštas vanduo panaudojamas šilumos tiekimui ir elektros gamybai;
- Hidroenergija: (vandenynų potvynių ir atoslūgių energija) naudojant hidroturbinas, tekančio vandens energija paverčiama elektra;
- Biomasės energija: specializuotose jėgainėse biocheminių procesų metu išsiskirianti energija paverčiama šiluma ir elektra.

Būdingiausia blogoji atsinaujinančiųjų energijos šaltinių savybė [2] – jų nepastovumas. Dideli energijos parametrai priklauso nuo laiko, geografinės padėties, oro sąlygų. Kai šie šaltiniai pradami naudoti masiškai, kyla daug nepatogumų. Ypač tai svarbu naudojant saulės ir vėjo energiją. Tačiau, nepaisant trūkumų, saulės ir vėjo energijos išteklių turi didžiausias panaudojimo galimybes. Svarbus bruožas tas, kad tokie atsinaujinantys išteklių yra visuotinai prieinami. Tai labai

svarbu valstybėms, kurios neturi savo iškastinio kuro ir yra priklausomos nuo kitų valstybių energetikos.

Svarbiausios priežastys, lemiančios spartų atsinaujinančiųjų energijos išteklių naudojimo didėjimą [2]:

1. Naudojant atsinaujinančius energijos išteklius, galima labai sumažinti taršą;
2. Dėl taršos sumažinimo sumažėtų ir visuotinio atšilimo pasekmės;
3. Naudojant saulės ir vėjo energiją, nereikalingas kuras, todėl gali būti sumažinamos gamybinės pramonės išlaidos;
4. Atsinaujinantys energijos ištekliai ekonomiką veikia teigiamai;
5. Skatina tapti „žalesniais“ energijos vartotojais.

Moksliniuose straipsniuose konstatuojama, kad apie 30 % energijos, pagaminamos iškastinio kuro elektrinėse, prarandama viešųjų elektros tinklo perdavimo linijose. Pasigaminant elektros energiją lokaliame alternatyvios energijos mikrotinkle, šių perdavimo nuostolių išvengiama [2, 5].

Pasaulyje vis daugiau dėmesio skiriama atsinaujinančiai energetikai neatsitiktinai, tačiau jos progresas išlieka labai lėtas lyginant su energijos poreikio augimu, todėl reikalingas didesnis šios energijos rūšies panaudojimas, efektyvumo didinimas, skatinimas bei visuomenės informavimas.

## 2. MIKROTINKLAS

Mikrotinklai – tai nedideli tinklai (2.1 pav.), apimantys keletą nedidelės galios turinčius energijos šaltinius [7]. Taip sudaromos kuo geresnės sąlygos atsinaujinančių energijos šaltinių naudojimui ir jų plėtrai. Tokie tinklai dažniausiai įrengiami atokiose vietovėse: salose, dykumose, ten, kur nėra arti elektros tinklo ar norima patiems apsirūpinti elektros energija ir būti nepriklausomiems nuo didžiųjų energijos gamintojų ir tiekėjų. Taip pat tokie mikrotinklai neabejotinai efektyvesni ir paprastesni, pigesni, nes naudoja energijos pasikeitimą su nacionaliniu tinklu ir taip mažina išlaidas laikinam energijos kaupimui, kai atskirų energijos šaltinių efektyvumas nesutampa su energijos vartojimo poreikiu.



2.1 pav. Mikrotinklo atvaizdavimas [8]

Pagrindiniai skirtumai tarp mikrotinklų ir klasikinės energetikos [7] yra:

- 1) Mikrotinklų energijos šaltiniai yra kur kas mažesnio pajėgumo nei įprastinės elektrinės;
- 2) Pagaminama elektros energija gali būti tiekama tiesiai į skirstomąjį tinklą, nereikalingas perdavimo tinklas kaip klasikinėje energetikoje;
- 3) Mažųjų tinklų energijos šaltiniai įrengiami prie pat vartotojų, todėl elektros ar šilumos energijos nuostoliai ganėtinai maži palyginus su įprastais tinklais.

Pagal šiuolaikines publikacijas, mikrotinklai išskiriami į 5 pagrindines grupes [9]:

1. Miestelių mažieji tinklai. Juos sudaro konkretus pastatų skaičius ribotoje geografinėje zonoje. Dažniausiai visi pastatai ar dalyviai šio tipo tinkle priklauso vienai organizacijai, kur yra tik vienas asmuo ar įmonė, sprendžianti iškilusius klausimus, problemas. To privalumas – sprendimai gali būti greitai priimami.
2. Komerciniai ir pramoniniai mikrotinklai. Tokie tinklai labai panašūs į pirmąjį tipą, tik esminis skirtumas tas, kad savininkas bus įmonė ar keletas įmonių, jei tai yra industrinis parkas. To priežastis – noras būti žaliaja pramone, naudojančia atsinaujinančius energijos šaltinius.

3. Karinis mikrotinklas. Pats mažiausias mikrotinklų tipas. Naudojamas, kad būtų užtikrintas pastovus elektros energijos tiekimas, ypatingai nutraukus pagrindinį perdavimo tinklą iš išorės.
4. Bendruomenės mikrotinklas, kurio pagrindą sudaro privatūs galutiniai klientai gyvenamuosiuose rajonuose, nors kartais šiuose rajonuose gali būti ir pramoniniai klientai.
5. Salų ar nutolusių vietovių mikrotinklas. Šis tipas praktiškai toks pat kaip ir bendruomenės mikrotinklas. Pagrindinis skirtumas, kad daugeliu atvejų šis tinklas negali būti prijungtas prie visuotinio tinklo, jei atstumas yra per didelis ar nėra galimybių nutiesti elektros kabelį.

Pirminiai alternatyvios energijos šaltiniai paprastai generuoja nuolatinę įtampą, kas nėra tinkama standartiniams buitiniams ar pramoniniams elektros energiją vartojantiems įrenginiams, todėl mikrotinklo elektros įtampai bei dažniui suderinti naudojami įtampos šaltinio keitikliai arba dar kitaip vadinami inverteriai [10].

Didžiausias atsinaujinančių elektros energijos šaltinių efektyvumas pasiekiamas, kai skirtingos jų rūšys jungiamos į mikrotinklus, panaudojant vietinius resursus ir taip išvengiant energijos perdavimo nuostolių.

Atsinaujinančios energijos šaltinių kuriamos įtampos pritaikymui tinklo vartotojų poreikiams bei suderinimui su viešuoju tinklu, naudojami įtampos šaltinio keitikliai.

### 3. INVERTERIS

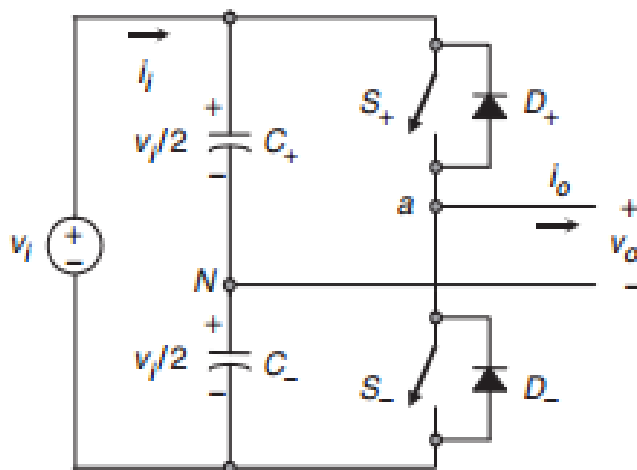
Inverterių paskirtis nuolatinę įtampą arba srovę keisti reikiama vienfazė arba trifazė kintamojo dažnio įtampa arba srove. Dažniausiai naudojami [10, 11] įtampos ir srovės keitikliai. Keitiklis, kuris formuoja sinusinę įtampą su valdoma amplitude, dažniu ir faze, vadinamas įtampos šaltinio keitikliu. Taip pat yra ir srovės šaltinio keitikliai, kuriuose formuojama reikiamų parametrų kintamoji srovė. Populiariausi yra įtampos šaltinio keitikliai, kadangi jie yra įtampos šaltinių analogai, o pramonėje tokie ir reikalingi. Srovės šaltinio keitikliai naudojami vidutinės įtampos pramoniniuose įrenginiuose, kuriuose reikalinga aukštos kokybės srovė. Atsinaujinančių energijos šaltinių įtampai suderinti naudojami įtampos šaltinio keitikliai.

#### 3.1. Vienfazis įtampos šaltinio inverteris

Įtampos šaltinių keitikliai gali būti vienfaziai arba trifaziai [11]. Buityje naudojamiems įrenginiams dažniausiai užtenka vienfazio įtampos šaltinio, pramonėje, esant didesnės galios įrenginiams, reikalingas trifazis įtampos šaltinis. Vienfaziai įtampos šaltinių keitikliai – inverteriai – gali būti dviejų topologijų: pusės arba pilno tiltelio. Šios topologijos apžvelgiamos 3.1.1, 3.1.2 poskyriuose.

##### 3.1.1. Pusės tiltelio topologijos inverteris

3.1 paveiksle pavaizduotas pusės tiltelio topologijos inverteris [12]. Jį sudaro įtampos šaltinis  $v_i$ , dveji kondensatoriai  $v_i/2$ , kurie lygūs pusei šaltinio įtampos vertės ir skirti formuoti virtualiai žemei taške  $N$ , bei dveji komutaciniai raktai  $S+$  ir  $S-$ . Šie raktai apsaugomi nuo parazitinių srovių naudojant atbulinius diodus  $D+$  ir  $D-$ . Raktų veikimas lygiagretus, t. y. kai vienas išjungtoje padėtyje, kitas – įjungtoje. Priešingu atveju elektros grandinėje įvyktų trumpas jungimas ir įrenginys būtų sugadintas. Šių raktų veikimas valdomas pasirinktu moduliacijos metodu – populiariausiu impulsų pločio moduliacijos metodu. Galimos raktų padėtyys pateiktos 1 lentelėje. Yra dvi apibrėžtos (1 ir 2 padėtyys) ir viena neapibrėžta (3 padėtis) raktų būsenos. Neapibrėžtos būsenos reikia vengti, kadangi išėjimo įtampa turi būti determinuotos vertės.



3.1 pav. Vienfazis pusės tiltelio topologijos inverteris [12]

1 lentelė

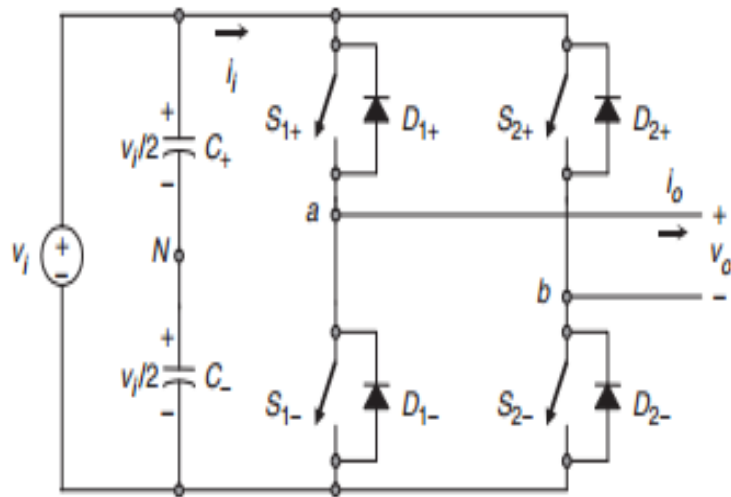
Pusės tiltelio vienfazio inverterio raktų padėtys

Raktų padėtys	S+	S-	Išėjimo įtampa $v_o$
1	„Įjungta“	„Išjungta“	$v_i/2$
2	„Išjungta“	„Įjungta“	$-v_i/2$
3	„Išjungta“	„Išjungta“	$v_i/2$

### 3.1.2. Pilno tiltelio topologijos inverteris

3.2 paveiksle pavaizduotas pilno tiltelio įtampos šaltinio topologijos keitiklis [12]. Pagrindinis skirtumas nuo pusės tiltelio topologijos, yra tas, kad atsiranda papildoma komutacinių raktų šaka  $S_{2+}$  ir  $S_{2-}$ , kuri sukuria neutralės tašką apkrovai. Inverterio raktai gali būti valdomi keliais moduliacijos metodais. Populiariausias jų – impulsų pločio (bipolinės, vienpolinės) moduliacija IPM. Atsižvelgiant į moduliacijos metodą, jei tai bipolinis – raktai valdomi poromis  $S_{1+}$  su  $S_{2-}$  ir  $S_{1-}$  su  $S_{2+}$ , t. y. kai vienos poros raktai įjungtoje padėtyje, kiti privalo būti išjungtoje. Antru atveju – vienpolinis moduliacijos metodas, kai kiekvienas raktas valdomas skirtingu signalu. Tačiau bet kuriuo atveju raktai  $S_{1+}$  ir  $S_{1-}$  arba  $S_{2+}$  ir  $S_{2-}$  negali būti vienu metu įjungiami, nes elektros grandinėje įvyktų trumpas jungimas.

Galimos raktų padėtys pateiktos 2 lentelėje. Kai inverterio raktai valdomi vienpoliniu moduliacijos metodu, raktai gali įgauti reikšmes 1 – 4 padėtyse. Kai moduliacijos metodas – bipolinis, tuomet raktai gali įgauti tik 1 – 2 padėtis. Taip pat egzistuoja neapibrėžta būseną (5 padėtis), kurios turi būti vengiama.



3.2 pav. Vienfazis pilno tiltelio topologijos inverteris [12]

2 lentelė

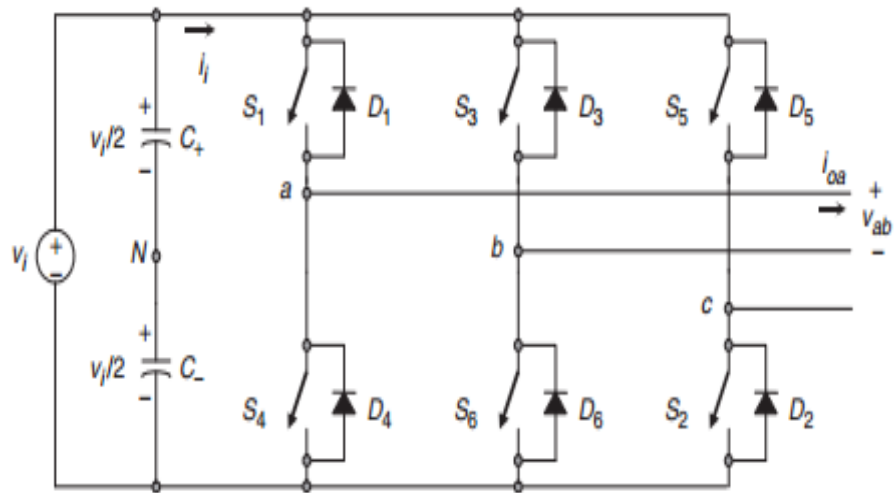
Vienpolinės moduliacijos pilno tiltelio inverterio raktų padėtys

Raktų padėtys	$S_{1+}$	$S_{2-}$	$S_{2+}$	$S_{1-}$	Išėjimo įtampa $v_o$
1	„Įjungta“	„Įjungta“	„Išjungta“	„Išjungta“	$v_i$
2	„Išjungta“	„Išjungta“	„Įjungta“	„Įjungta“	$-v_i$
3	„Įjungta“	„Išjungta“	„Įjungta“	„Išjungta“	0
4	„Išjungta“	„Įjungta“	„Išjungta“	„Įjungta“	0
5	„Išjungta“	„Išjungta“	„Išjungta“	„Išjungta“	$v_i$ $-v_i$

### 3.2. Trifazis įtampos šaltinio inverteris

Vienfaziai įtampos šaltinio keitikliai naudojami mažos galios, o trifaziai – vidutinės ir didelės galios įrenginiuose [12]. Pagrindinis šios topologijos tikslas – aprūpinti trifaziu įtampos šaltiniu, kur įtampos amplitudė, fazė ir dažnis nuolat kontroliuojamas. Standartinė trifazio įtampos šaltinio keitiklio topologijos struktūrinė schema pateikta 3.3 paveiksle. Jį sudaro įtampos šaltinis  $v_i$ , kondensatoriai  $v_i/2$  ir komutacinių raktų poros (šakos):  $S_1$  ir  $S_4$ ,  $S_3$  ir  $S_6$  bei  $S_5$  ir  $S_2$ . Kaip ir vienfazio inverterio, vienos poros raktai negali būti įjungiami vienu metu, kad neįvyktų trumpas jungimas elektros grandinėje. Šių raktų veikimas pagrįstas impulsų pločio moduliacijos metodu. Trifazio inverterio galimos raktų padėtys pateiktos 3 lentelėje.





3.3 pav. Trifazio inverterio struktūrinė schema [12]

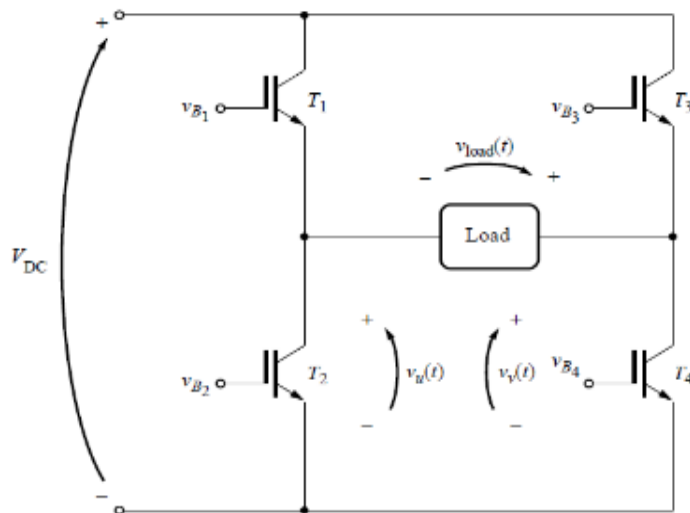
3 lentelė

Trifazio inverterio raktų padėtys

Raktų padėtys	„Įjungta“	„Išjungta“	Įtampa $v_{ab}$	Įtampa $v_{bc}$	Įtampa $v_{ca}$
1	$S_1, S_2, S_6$	$S_3, S_4, S_5$	$v_i$	0	$-v_i$
2	$S_1, S_2, S_3$	$S_4, S_5, S_6$	0	$v_i$	$-v_i$
3	$S_2, S_3, S_4$	$S_1, S_5, S_6$	$-v_i$	$v_i$	0
4	$S_3, S_4, S_5$	$S_1, S_2, S_6$	$-v_i$	0	$v_i$
5	$S_4, S_5, S_6$	$S_1, S_2, S_3$	0	$-v_i$	$v_i$
6	$S_1, S_5, S_6$	$S_2, S_3, S_4$	$v_i$	$-v_i$	0
7	$S_1, S_3, S_5$	$S_2, S_4, S_6$	0	0	0
8	$S_4, S_6, S_2$	$S_1, S_3, S_5$	0	0	0

### 3.3. Inverterio tiltelio struktūra

Inverteriui dirbant įvairiais režimais, energija per jį gali būti tiek imama iš tinklo, tiek ir grąžinama. Geriausiai tam tinkamas tiltelinis keitiklis. Pats populiariausias dėl savo valdymo galimybių [13] yra pilno tiltelio topologijos vienfazis inverteris, kurio principinė schema pateikta 3.4 paveiksle. Inverterio vieni iš pagrindinių sistemos elementų yra komutaciniai raktai – elektroniniai jungikliai [14], kurių funkcija – periodiškai įsijungiant ir išsijungiant, suformuoti kintamąją elektros įtampą ar srovę.



3.4 pav. Pilno tiltelio inverterio principinė elektrinė schema [13]

Elektroninius jungiklius dažniausiai sudaro puslaidininkiniai elementai [14]:

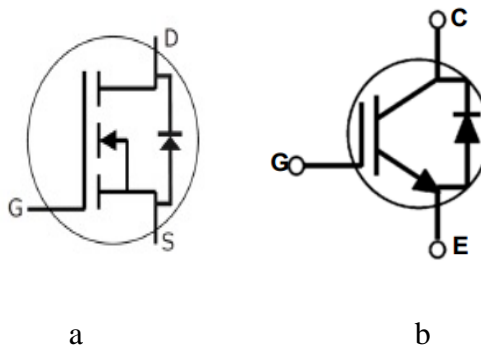
- Tiristoriai;
- Dvipoliai tranzistoriai;
- MOP (MOSFET) tranzistoriai;
- IGBT tranzistoriai.

Patys populiariausi elektroniniai jungikliai, naudojami keitikliuose, yra MOSFET ir IGBT tranzistoriai.

### 3.3.1. IGBT ir MOSFET tranzistoriai

Sudarinėjant įtampos šaltinio keitiklių grandines, dažniausiai tenka rinktis iš dviejų elektroninių jungiklių tipų, naudojamų elektronikoje [12, 15]. Vienas jų – galios MOSFET (angl. Metal oxide semiconductor field effect transistor) tranzistorius – puslaidininkinis įtaisas, sudarytas iš metalo oksido ir puslaidininkio, kurio kanalo varžos dėka reguliuojama įtampa, todėl jis yra lengvai valdomas. Kaip ir kiti tranzistoriai, šių laidus kanalas yra N arba P tipo. Šis tranzistorius turi tris valdymo elementus – G (angl. Gate – užtūra), D (angl. Drain – santaka), S (angl. Source – ištaka). Jo simbolis pateiktas 3.5 paveiksle, a dalyje.

Kitas yra IGBT (angl. Insulated gate bipolar transistor) tranzistorius – izoliuotos užtūros dvipolis tranzistorius (3.5 pav., b). Šio tranzistoriaus valdymo elementai – G (angl. Gate – užtūra), C (angl. Collector – kolektorius), E (angl. Emitter – emiteris). Abu tranzistoriai turi panašių savybių ir skirtingų privalumų.



3.5 pav. Lauko tranzistoriai: a – MOSFET, b – IGBT tipo [16]

IGBT tranzistoriai naudojami aukštos įtampos įrenginiuose, tačiau jie neturi didelio dažnio perjungimų galimybės, kaip MOSFET tranzistoriai. Jų dažnis žemesnis už 30 kHz, bet gali atlaikyti aukštas sroves bei pasižymi puikiomis terminėmis savybėmis. Pagrindinis tokių tranzistorių trūkumas – išjungiant atsirandanti „srovės uodega“, kuri sukuria galios nuostolius.

MOSFET tranzistoriai pasižymi didelio dažnio perjungimų galimybe – virš 200 kHz, tačiau ganėtinai žemu įtampų ir srovių atlaikymu. Darbinė įtampa žemesnė už 250 V ir darbinė galia mažesnė už 500 W, kai IGBT tranzistoriai naudojami didelės galios įrenginiuose – virš 5 kW.

Tiek vieni, tiek kiti tranzistoriai patiria galios nuostolius esant įtampos perjungimams, tačiau projektuojant didelės įtampos šaltinio keitiklį – tinkamiausi IGBT tranzistoriai.

Pagrindinės IGBT ir MOSFET tranzistorių savybės pateiktos 4 lentelėje.

4 lentelė

IGBT ir MOSFET tranzistoriai

IGBT tranzistoriai	MOSFET tranzistoriai
<ul style="list-style-type: none"> <li>• IGBT naudojami 500 – 1700 V įtampoms valdyti, kintant galiai 1 – 1000 kW;</li> <li>• Nesudėtinga valdyti;</li> <li>• Mažesnis perjungimo greitis lyginant su vienpoliais tranzistoriais;</li> <li>• Perjungimo dažnis 3 – 30 kHz;</li> <li>• Labai sparčiai vystosi.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Didelį perjungimo greitį lemia pagrindinių krūvininkų laidumo mechanizmas. Perjungimo dažnis siekia šimtus kHz;</li> <li>• Galios nuostoliai priklauso nuo aktyviosios schemos varžos ir srovės, tekančios per tranzistorių;</li> <li>• Paprasta valdyti;</li> <li>• Komutuojamos galios mažesnės negu dvipolių tranzistorių. Puikiai tinka žemesnės įtampos didelio dažnio operacijoms atlikti.</li> </ul>

## IGBT tranzistorių galios nuostoliai

Perjungimo nuostoliai IGBT tranzistoriuose yra neišvengiamai didžiausi nuostoliai sistemoje [17]. Valdymo įtaisas pats negali sunaudoti daugiau nei keletą dešimčių vatų galios, kai kiekvienas IGBT tranzistorius sunaudoja mažiausiai tiek pat energijos perjungimų metu. Žinoma, tai priklauso nuo sistemos elementų ir keitiklio išėjimo parametrų, kadangi daugumai elementų nuolat reikės dešimčių kilovatų energijos, kai perjungimo nuostoliai sudarys tik keletą procentų visos tos sunaudojamos energijos. Informacija apie perjungimo nuostolius IGBT tranzistoriuose pateikiama jų specifikacijose, tačiau jie gali būti ir apskaičiuojami naudojantis žemiau pateiktomis formulėmis, esant skirtingam dažniui.

- Nuostoliai perjungimų metu:

$$P_{switching} = \frac{V_{s(off)} \times f_s}{2} \times (t_{on} + t_{off}) \times I_{on}, \quad (3.1)$$

čia:  $P_{switching}$  – galios nuostoliai esant įjungimo ir išjungimo momentais, W;  $V_{s(off)}$  – blokuojama įtampa, kai jungiklis yra išjungimo padėtyje, V;  $t_{on}$  – laiko tarpas, kuriame jungiklis yra įjungtas, s;  $t_{off}$  – laikas, kada jungiklis yra išjungtas, s;  $f_s$  – perjungimo dažnis, Hz;  $I_{on}$  – laidumo srovė, A.

- Nuostoliai, kai IGBT yra įjungtas:

$$P_{on} = D \times I_{on}^2 \times R_{ds}, \quad (3.2)$$

čia:  $P_{on}$  – laidumo nuostoliai, kai jungiklis yra įjungtas, W;  $D$  – ciklo trukmė, s;  $R_{ds}$  – įtaiso varža, kai IGBT yra įjungtas,  $\Omega$ .

- Bendri IGBT galios nuostoliai, kai nėra vertinami nuostoliai esant IGBT išjungtam:

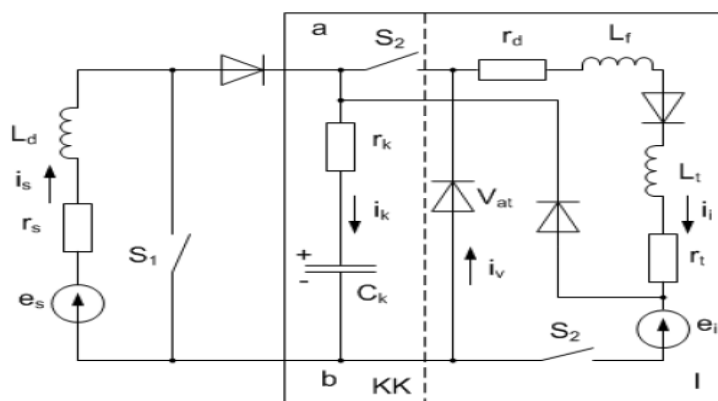
$$P_{total} = P_{switching} + P_{on}, \quad (3.3)$$

$$\eta = \frac{P_{in} - P_{total}}{P_{in}} \times 100, \quad (3.4)$$

čia:  $\eta$  – naudingumo koeficientas, %;  $P_{in}$  – įėjimo galia, W.

### 3.4. Inverterio ekvivalentinė schema

Įtampos šaltinio keitiklio sistema analizuojama naudojantis matematinio modeliavimu. Tikslus matematinis aprašymas elektromagnetinių procesų šio tipo keitikliuose yra gana sudėtingas, todėl analizuojamo straipsnio autorių [18] buvo atlikti supaprastinimai naudojantis keitiklių elektros grandinių teorija. Tokie supaprastinimai leidžia n-fazių keitiklių grandines pakeisti vienos fazės ekvivalentinėmis schemomis. Galios jungikliai gali būti laikomi idealiais, be nuostolių. Ši schema atvaizduojama pateiktame 3.6 paveiksle. Schemoje esantys neparazituoti diodai rodo šakų laidumo kryptį.



3.6 pav. Keitiklio ekvivalentinė schema [18]

Energija  $e_s$ ,  $r_s$  iš fotovoltinių modulių masyvo teka į ritę  $L_d$ , kai jungiklis  $S_1$  yra uždarytas. Energija teka į talpos kondensatorių  $C_k$ , kai jungiklis  $S_1$  yra atidarytas. Jei jungiklis  $S_2$  yra uždarytas, srovė  $i_i$  keitiklio yra tiekiamą į tinklą. Impulsų pločio moduliacija naudojama jungiklio  $S_2$  kontrolei, siekiant suderinti įtampą tarp fotovoltinių modulių masyvo ir elektros tinklu. Tokiu būdu keitiklio operacijos yra sinchronizuotos su elektros tinklu.

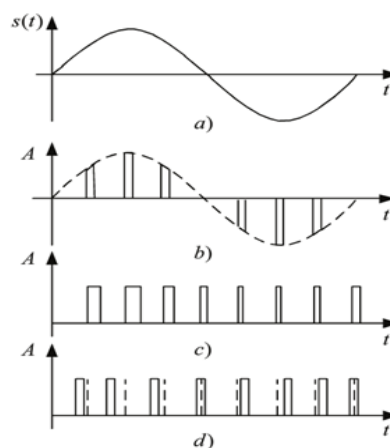
Taigi, tolimesniems tyrimams pasirinktas populiariausias – vienfazis pilno tiltelio topologijos inverteris, kurio tyrimo išvados gali būti taikomos ir trifaziams inverteriams. Tokie inverteriai yra pakankamai ekonomiškai, bet dėl savo techninių savybių, keisdami nuolatinę įtampą į kintamąją, sukuria ir aibę parazitinių harmonikų, kurios turi būti filtruojamos.

## 4. IMPULSŲ PLOČIO MODULIACIJA

Inverterių išėjimo įtampa gali būti reguliuojama trimis būdais [10]:

1. Amplitudiniu, kai keičiamas nuolatinės įtampos didumas keitiklio įėjime;
2. Faziniu, kai keičiama įtampos fazė;
3. Impulsiniu, kai kiekvienas išėjimo įtampos pusperiodis formuojamas iš keičiamos trukmės impulsų.

Šiomis dienomis inverterio išėjimo įtampa dažniausiai nustatoma impulsų pločio moduliacijos IPM (angl. PWM – Pulse Width Modulation) metodu [10] (4.1 pav., c), kur valdymo signalui parenkama proporcinga impulso įjungimo trukmė per komutacijos periodą. Komutacijos periodo metu impulso trukmė nustatoma tik vieną sykį, todėl tokių keitiklių, veikiančių impulso pločio moduliacijos metodu, darbo režimas yra diskretusis. Šio principo pagrindinis plusas yra jo paprastumas realizuojant ir maži galios nuostoliai, todėl šis būdas labiausiai paplitęs.



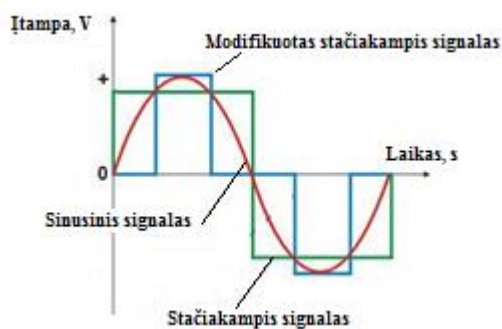
4.1 pav. Impulsų moduliacijų palyginimas[10]:

- a) nustatytasis signalas;
- b) impulsų amplitudės moduliacija (IAM);
- c) impulsų pločio moduliacija (IPM);
- d) impulsų dažnio moduliacija (IDM);

Impulsų pločiui generuoti dažniausiai taikomi trys metodai (4.2 pav.) [15]:

1. sinusinė impulsų pločio moduliacija;
2. modifikuota impulsų pločio moduliacija;
3. erdviškojo vektoriaus impulsų pločio moduliacija.

Praktikoje nuolatinės įtampos ar srovės keitimas į kintamąją atliekamas įvairaus tikslumo topologijos metodais. Tai gali būti atliekama paprastai, kaip vienodos įtampos amplitudė, priešingomis kryptimis per visą apkrovą generuojant stačiakampes bangas (4.2 pav., žalios spalvos signalas). Taip gaunama kintama įtampa, tačiau ji turi nemažai trūkumų.



4.2 pav. Impulsinės moduliacijos tipai

Daug tikslesnis įtampos konvertavimo metodas yra naudojant modifikuotą sinusinę bangą, kurioje papildomai prie stačiakampių bangų įvedama nulinė zona „*dead time*“, taip gaunant kokybiškesnę kintamąją įtampą. Šis metodas išskiria mažiau harmonikų nei stačiakampės moduliacijos metodas, tačiau vis tiek dar nėra tokia pati švari sinusoidė kaip gaunama iš kintamosios srovės šaltinio. Gaunamos harmonikos, esančios modifikuotoje sinusoidėje, lemia tai, kad modifikuotos sinusinės įtampos keitikliai netinkami naudoti, kai reikalingas kuo mažesnis elektrinis triukšmas įrenginiuose. Pavyzdžiui, medicinos prietaisuose, kurie stebi žmogaus gyvybines funkcijas. Triukšmas lemia didelius iškreipimus atvaizduojant gyvybines funkcijas. Grynos sinusinės bangos keitikliai sukuria mažesnę kiekį harmonikų elektros įrenginiuose, tačiau tokio metodo realizavimas pats brangiausias. Norint gauti švarią sinusinę bangą, elektroniniai jungikliai vis tiek reikalingi kaip ir kitų būdų moduliacijose. Vykstant perjungimams ir gaunama ši sinusoidė, tačiau reikalingas didesnis kiekis šių jungiklių, kurie ir lemia šio tipo keitiklių kainos didėjimą.

#### 4.1. Erdviškojo vektoriaus impulsų pločio moduliacija

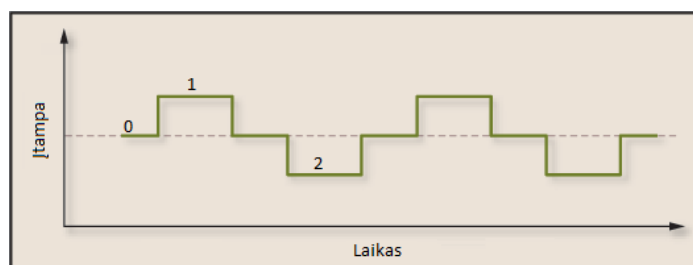
Nuolatinėi srovei ar įtampai keisti dažniausiai naudojami MOSFET arba IGBT lauko tranzistoriai keitikliuose, kurie gali perjunginėti įtampą visos apkrovos metu, taip sudarant skaitmeninio derinimo norimos kintamosios srovės ar įtampos signalą. Paprasčiausias tokio keitimo būdas yra stačiakampės sinusinės bangos derinimas. Stačiakampės sinusinės bangos apkrovos įtampa gali būti tik aukšta (teigiama) ir žema (neigiama). Negali būti tarpinių padėčių, pavyzdžiui, nulinės

padėties ( $0\text{ V}$ ). Norint pasiekti tokios pat vertės suderintą sinusoidę, stačiakampės bangos amplitudė turi būti kaip sinusinės bangos vidutinė kvadratinė įtampos vertė (angl. RMS – root mean square). Tokiu būdu vidutinė įtampa ir perduodama galia būtų tokia pat abiejų signalų.

Stačiakampių bangų keitikliai labai retai naudojami praktikoje, kadangi dauguma prietaisų sunkiai gali veikti su tokio tipo kintamosios įtampos bangomis.

#### 4.2. Modifikuota impulsų pločio moduliacija

Vienas pagrindinių stačiakampės bangos signalo keitiklio patobulinimų yra modifikuotos sinusoidės keitiklis. Modifikuotos sinusoidės keitiklio išėjimo signale yra trys įtampos lygiai (4.3 pav.): aukštas (1), žemas (2) ir nulinis (0).



4.3 pav. Modifikuota sinusoidė

Modifikuota sinusoidė yra kur kas arčiau klasifikuojamos tikrosios sinusinės bangos nei kad yra stačiakampės bangos ir gali būti naudojama daugumos buitinių elektros prietaisų, kurie nereikalauja aukštos kokybės įtampos. Gana dažnai šį įtampos keitimo būdą galima pamatyti komerciniuose kokybės keitikliuose. Nepaisant to, kad šio tipo moduliacija kur kas perspektyvesnė nei įprastų stačiakampių bangų moduliacija, modifikuotos sinusoidės turi ir keletą svarbių trūkumų. Kaip ir stačiakampės bangos, modifikuotos sinusinės bangos turi didelių energijos efektyvumo nuostolių. Nepaisant turimų trūkumų, dauguma įtaisų gali veikti naudodami modifikuotos sinusoidės šaltinį, todėl tai daro prieinamą pasirinkimą buitiniams įrenginiams, kuriems reikalingi nepertraukiami elektros maitinimo šaltiniai.

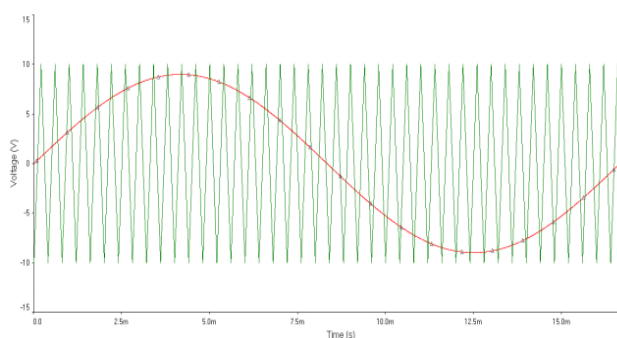
#### 4.3. Sinusinė impulsų pločio moduliacija

Dažniausias ir populiariausias grynos sinusinės bangos generavimo metodas – sinusinė impulsų pločio moduliacija SIPM (angl. SPWM – Sinusoidal Pulse Width Modulation). Šis moduliacijos metodas susideda iš skaitmeninio signalo generavimo, kurio darbo ciklas

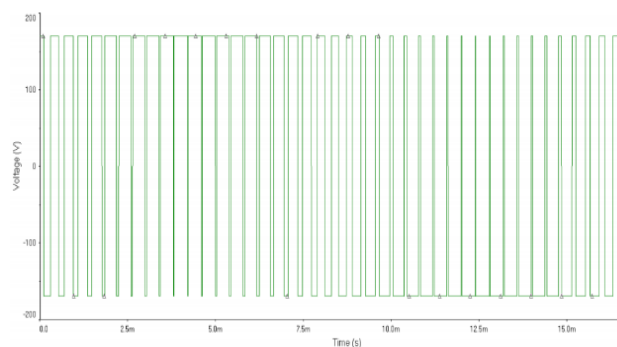


moduliuojamas taip, kad signalo vidutinė įtampa atitiktų gryną sinusinę bangą. Paprasčiausias būdas išskirti IPM signalą yra palyginant mažos galios standartinę sinusinę bangą su trikampės formos banga (4.4 pav., a). Naudojant šiuos du signalus kaip įėjimus į lygintoją, išėjime gaunamas IPM signalas (4.4 pav., b). Tuomet per žemų dažnių filtrą šis impulsų pločio moduliacijos signalas nufiltruojamas taip, kad būtų glaudžiai suderintas su sinusine banga (4.5 pav.).

Nors šis metodas išskiria žymiai švaresnį kintamosios srovės signalą nei stačiakampės ar modifikuotos sinusinės bangos metodai, tačiau spektrinė dažnio analizė rodo, kad pagrindinės harmonikos vis tiek sutrumpintos ir yra gana daug aukštesnio lygio harmonikų signale.

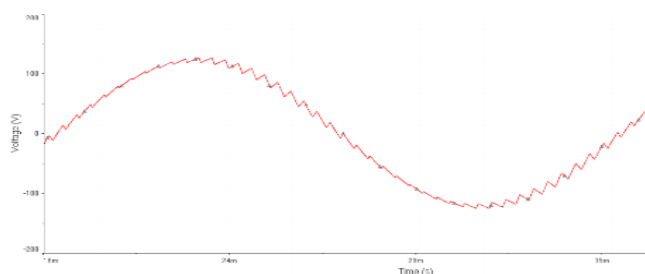


a



b

4.4 pav. a – Pjūklinė moduliacija; b – Impulsinė išėjimo įtampa [15]



4.5 pav. Nufiltruota išėjimo įtampa [15]

Taigi, tolimesniems mikrotinklo inverterio tyrimams pasirinktas inverteris, valdomas sinusinės impulsų pločio moduliacijos metodu, kuris sukuria mažiausią kuriamos pagrindinės harmonikos, įtampas iškraipymą.

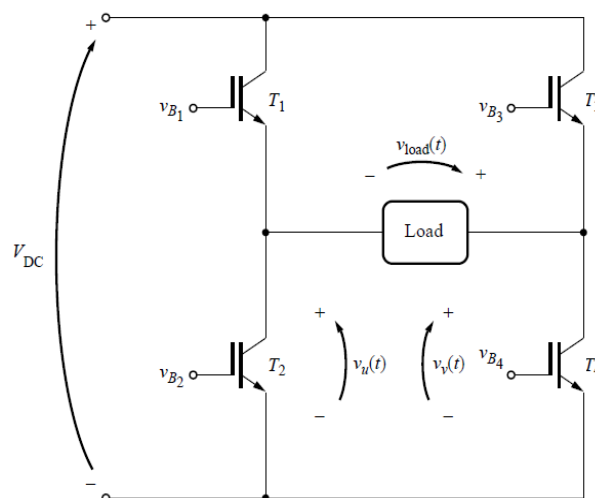
## 5. SINUSINĖS IMPULSŲ PLOČIO MODULIACIJOS INVERTERIAI

Impulsų pločio moduliacija yra procesas, kai keičiant impulsų plotį sudaromas proporcingas valdymo signalas [13]. Kuo didesnė valdymo įtampa, tuo impulsai gaunami platesni. Naudojant norimo dažnio sinusoidę kaip valdymo įtampą impulsų pločio moduliacijos grandinėse, įmanoma gauti didelės energijos signalą, kurio vidutinė įtampa sinusiniškai tinka kintamosios srovės elektros varikliams.

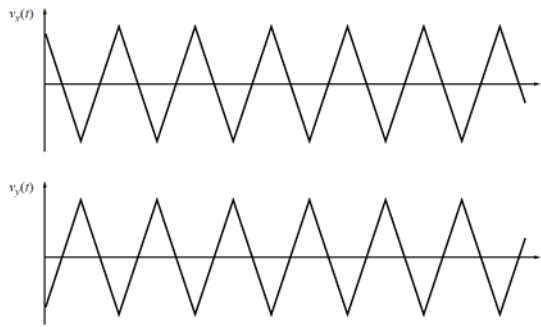
Pagrindines impulsų pločio moduliacijos sąvokas apibūdina žemiau pateikiami paveikslai (5.1, 5.2, 5.3 pav.). 5.1 paveikslas parodo vienfazio impulsų pločio moduliacijos keitiklio grandinę naudojant komutacinius raktus – IGBT tranzistorius. Tranzistoriai  $T_1 - T_4$  šioje grandinėje valdomi dviejų lygintojų kuriamų signalų. Lygintojai atvaizduoti pateiktame 5.3 paveiksle.

Lygintojas – tai įrenginys, kuris palygina įėjimo sinusinę įtampą  $v_{in}(t)$  su baziniu nešlio signalu ir tranzistorius išjungia arba įjungia įtampą atsižvelgiant į gaunamus rezultatus. Lygintojas „A“ palygina sinusinę įtampą  $v_{in}(t)$  su nešlio trikampė įtampa  $v_x(t)$  ir kontroliuoja tranzistorius  $T_1$  ir  $T_2$  atsižvelgiant į lygintojo gautus rezultatus. Lygintojas „B“ palygina sinusinę įtampą  $v_{in}(t)$  su nešlio trikampė įtampa  $v_y(t)$  ir kontroliuoja tranzistorius  $T_3$  ir  $T_4$  atsižvelgdamas į lygintojo gautus rezultatus. Jei įtampa  $v_{in}(t)$  yra didesnė už  $v_x(t)$  bet kuriuo laiko momentu  $t$ , tuomet lygintojas „A“ įjungia  $T_1$  ir išjungia  $T_2$  tranzistorius. Kitu atveju išjungia  $T_1$  ir įjungia  $T_2$ . Panašiai, jei  $v_{in}(t)$  yra didesnė už  $v_y(t)$  bet kuriuo laiko momentu  $t$ , tuomet lygintojas „B“ išjungia  $T_3$  ir įjungia  $T_4$  tranzistorius. Priešingu atveju įjungia  $T_3$  ir išjungia  $T_4$ . Trikampės nešlio įtampos  $v_x(t)$  ir  $v_y(t)$  atvaizduojamos 5.2 paveiksle.

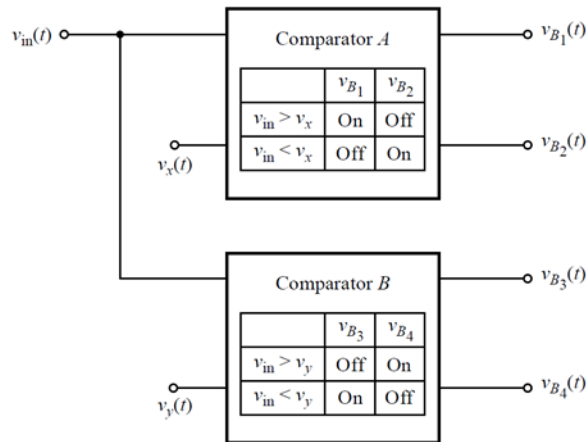
Toks pat valdymas gali būti atliekamas naudojant dvi sinusines  $v_{in}(t)$  įtampas, kurios tarpusavyje skiriasi  $180^\circ$ , ir vieną trikampę  $v_x(t)$  įtampą.



5.1 pav. Vienfazė pilno tiltelio grandinė su IGBT tranzistoriais [13]

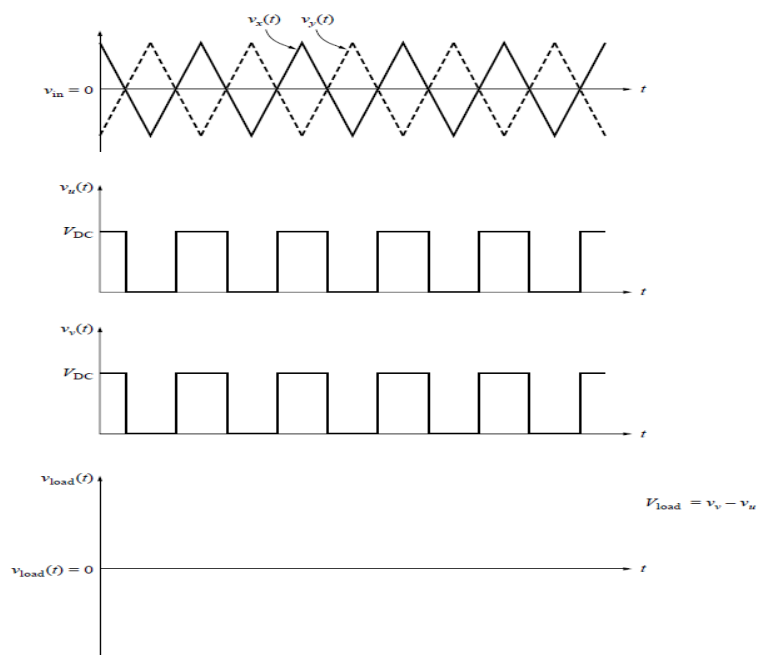


5.2 pav. Trikampės formos nešlio signalai [13]



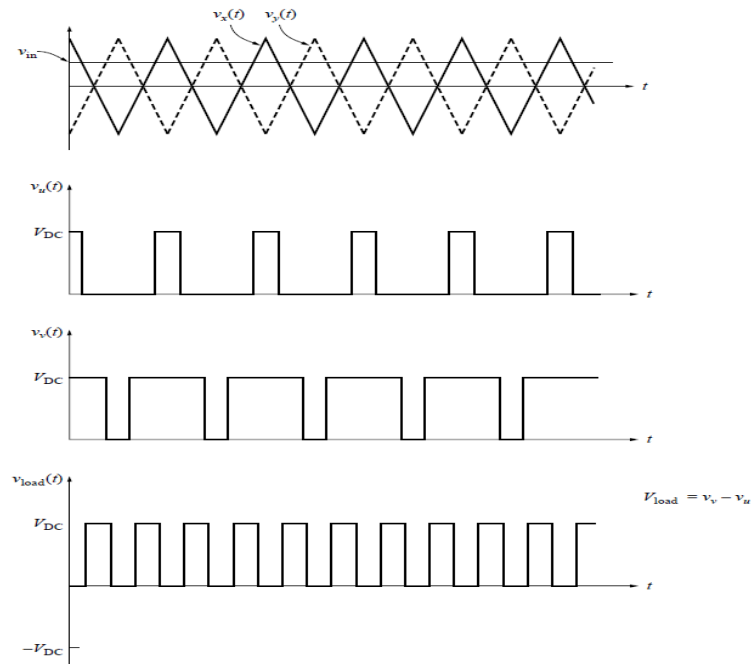
5.3 pav. Lygintojai [13]

Norint suprasti keitiklio grandinės visos eigos operacijas, panaudojamos skirtingos kontrolinės  $v_{in}(t)$  įtampos. Kai kontrolinė įtampa yra  $0\text{ V}$ , įtampos  $v_u(t)$  ir  $v_v(t)$  yra identiškos ir grandinės apkrovos įtampa  $v_{load}(t)$  lygi nuliui. Tai atvaizduojama 5.4 paveiksle.



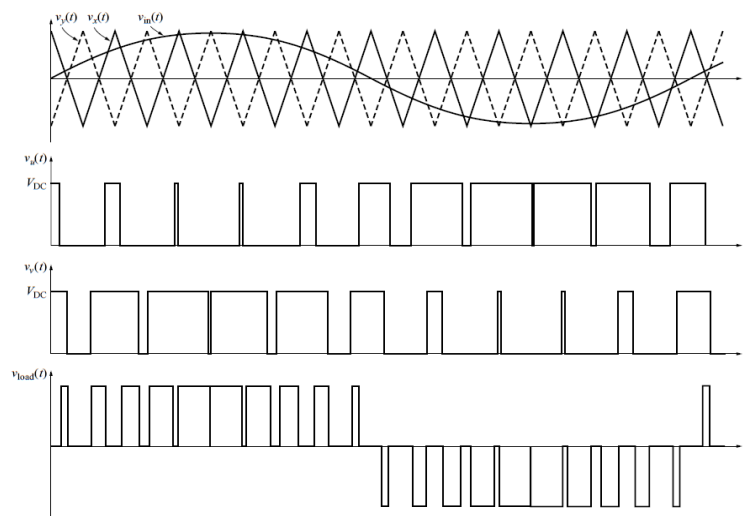
5.4 pav. Impulsų moduliacija [13]

Kitas etapas, kai pastovi teigiama valdymo įtampa  $v_{in}(t)$  lygi pusei nešlio  $v_x(t)$  įtampos, prijungtos prie grandinės. Rezultatas – išėjimo įtampos gauti impulsai, lygūs 50 proc., kurie atvaizduojami 5.5 paveiksle.



5.5 pav. Impulsų moduliacija 2 [13]

Galiausiai priimama sinusinė kontrolinė įtampa  $v_{in}(t)$  (5.6 pav.). Tuomet gautų impulsų plotis kinta sinusoidiškai kartu su kontroline įtampa. Gaunama didelės galios bangos forma, kurios vidutinė įtampa tiesiogiai proporcinga vidutinei tinklo įtampai. Gautos keitiklio išėjimo bangos dažnis yra toks pat kaip ir įėjimo kontrolinės  $v_{in}(t)$  įtampos dažnis. Žinoma, gaunamos ir harmonikų dedamosios išėjimo įtampoje. Inverterio išėjimo įtampos formavimas pateiktas 5.6 paveiksle.



5.6 pav. Keitiklio grandinės išėjimai su sinusine valdymo įtampa įėjime [13]

Inverterio raktų kontrolės impulsai  $v_u$  ir  $v_v$  yra formuojami lyginant švarios sinusoidės, standartinio 50 Hz dažnio, moduliacijos signalą  $v_{in}$  su aukšto dažnio, trikampio formos įtampos signalu  $v_x$ . Trikampio formos įtampos dažnis  $f_s$  apibūdina keitiklio tranzistorių komutavimą, todėl jis yra vadinamas nešlio dažniu. Valdymo signalas  $v_{in}$  naudojamas kontrolės impulsų moduliacijai ir jo dažnis  $f_l$  vadinamas moduliacijos dažniu. Tai atitinka keitiklio išėjimo įtampos dažnį. Trikampio formos įtampos amplitudė visada yra pastovi.

Amplitudinės moduliacijos koeficientas nustatomas naudojantis formule [19]:

$$m_a = \frac{v_{in}}{v_x} = \frac{v_{in}}{v_y}. \quad (5.1)$$

Dažninės moduliacijos koeficientas:

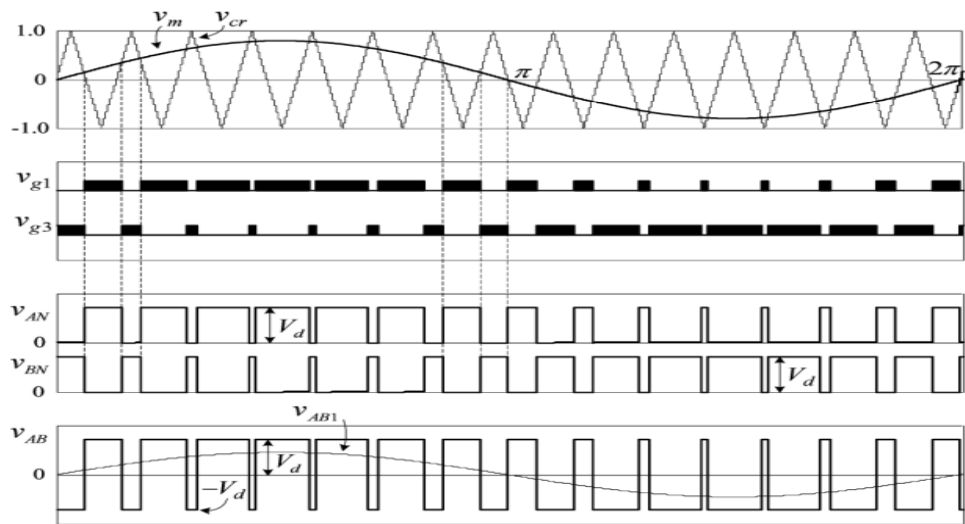
$$m_f = \frac{f_s}{f_l}, \quad (5.2)$$

čia:  $v_{in}$  – valdymo signalo piko amplitudė, V;  $v_x$ ,  $v_y$  – trikampio formos įtampos signalo amplitudė, V;  $f_s$  – nešlio dažnis, Hz;  $f_l$  – moduliacijos dažnis, Hz.

Atsižvelgiant į komutacinių raktų valdymo signalų skaičių, impulsų pločio moduliacija gali būti valdoma bipoliniu arba vienpoliniu būdu [20].

### 5.1. Bipolinė impulsų pločio moduliacija

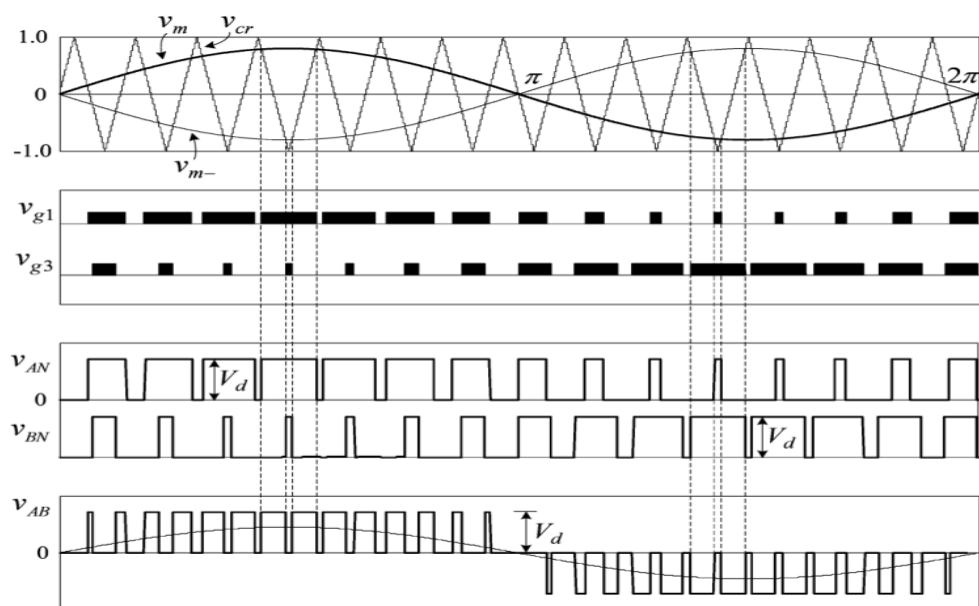
Bipolinės IPM moduliacijos [20] metu inverterio viršutinis ir apatinis komutaciniai raktai toje pačioje tiltelio šakoje jungiami lygiagrečiai, kai vienas įjungiamas ir tuo pačiu metu kitas išjungiamas. Kai  $T_1$  ir  $T_2$  raktai įjungiami,  $T_3$  ir  $T_4$  išjungiami, ir atvirkščiai. Taigi, galima atsižvelgti tik į dviejų nepriklausomų raktų signalus  $v_{g1}$  ir  $v_{g3}$ , kurie sukuriama lyginant sinusinę moduluojamą įtampą  $v_m$  ir trikampio formos nešlio bangą  $v_{cr}$ . Taip sukuriama raktų  $T_1$ ,  $T_3$  įtampos signalai, atitinkamai  $v_{AN}$  ir  $v_{BN}$ , o inverterio išėjimo įtampa  $v_{AB}$  lygi iš  $v_{AN}$  atėmus  $v_{BN}$  įtampos signalą. Ši moduliacija vadinama bipoline, kadangi įtampos signalas įgauna tik teigiamas arba neigiamas nuolatinės įtampos reikšmes (5.7 pav.).



5.7 pav. Bipolinės moduliacijos inverterio valdymas [20]

## 5.2. Vienpolinė impulsų pločio moduliacija

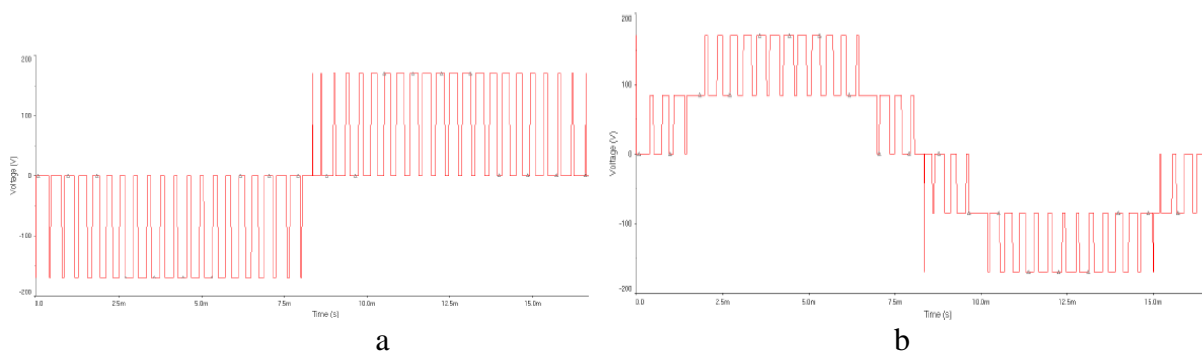
Vienpolinei moduliacijai [20] reikia dviejų sinusinių moduliacijos bangų  $v_m$  ir  $v_{m-}$ , kurių dydžiai yra vienodi, tik tarpusavyje skiriasi  $180^\circ$  laipsnių faze. Šios dvi moduliacinės bangos palyginamos su bendra trikampio formos nešlio banga  $v_{cr}$ . Taip sukuriami raktų  $T_1$ ,  $T_3$  įtampos signalai  $v_{AN}$  ir  $v_{BN}$ . Iš žemiau pateikto 5.8 paveikslo galima pastebėti, kad viršutiniai raktai nėra perjungiami tuo pačiu metu, kaip kad bipolinės moduliacijos metu, kur visi 4 raktai perjungiami vienu metu. Šiuo atveju inverterio išėjimo įtampa perjunginama tarp  $0$  ir  $+V_d$  įtampos verčių teigiamo pusperiodžio metu ir tarp  $0$  ir  $-V_d$  neigiamo pusperiodžio metu, todėl ši moduliacija vadinama vienpoline.



5.8 pav. Vienpolinės moduliacijos inverterio valdymas [20]

### 5.3. Daugiapakopė impulsų pločio moduliacija

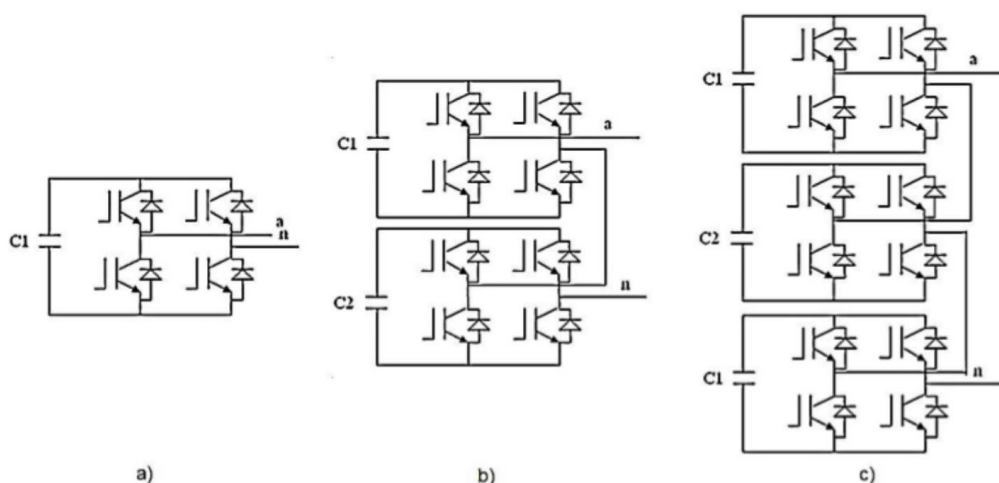
Siekiant sukurti IPM signalą, kuris būtų kuo artimesnis sinusiniam signalui, vienpolinės moduliacijos, trijų lygių signalas gali būti išplėstas iki penkių, septynių, devynių ir t. t. lygių [12, 15]. Skirtingų lygių impulsinio signalo pavyzdys pateikiamas 5.9 paveiksle.



5.9 pav. Daugiapakopės IPM moduliacijos įtampos signalas: a – 3 lygių, b – 5 lygių

Pridėjus papildomus 2 lygius prie 3 lygių IPM signalo, reikalingas dar vienas pilnas tiltelis. Struktūrinė 3, 5 ir 7 lygių IPM signalo generatorių modeliavimo schema, pateikta 5.10 paveiksle. Gaunant kuo didesnio lygio išėjimo įtampos signalą, sukuriama parazitinių harmonikų lygis mažėja, tačiau dėl išaugusių komutacinių raktų skaičiaus išauga keitiklio kaina bei didesni energijos nuostoliai, atsirandantys perjungimų metu.

Siekiant balanso tarp inverterio kainos ir energetinio efektyvumo, dažniausiai pasirenkami vienfaziai pilno tiltelio keitikliai, valdomi impulsų pločio vienpoliniu moduliacijos metodu. Tilteliai jungiami poromis, kai siekiama labai aukštos kokybės išėjimo įtampos.

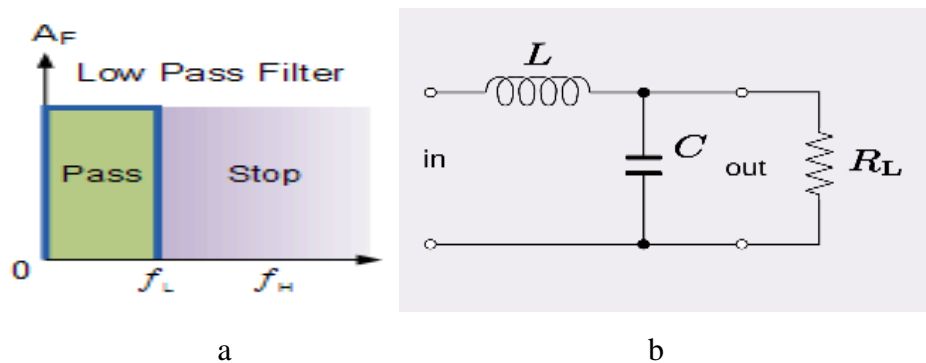


5.10 pav. Daugiapakopis inverteris: a – 3 lygių; b – 5 lygių; c – 7 lygių [21]

Mikrotinklo inverterio valdymui pasirinkta efektyviausia – vienpolinė impulsų pločio moduliacija.

## 6. ŽEMŲ DAŽNIŲ FILTRAS

Siekiant sumažinti inverterio kuriamų parazitinių harmonikų lygį, reikalingas filtras. Vienfaziuose keitikliuose dažniausiai naudojamas žemų dažnių LC filtras [11, 19], kurio paskirtis nufiltruoti parazitines aukštesnių dažnių harmonikas. Filto principinė elektrinė schema pateikta 6.1 paveikslo b dalyje. Jis praleidžia harmonikų dažnius, esančius žemesnius už filto ribinį dažnį. Jo veikimą iliustruoja žemiau pateikiamas paveikslas (6.1 pav., a).

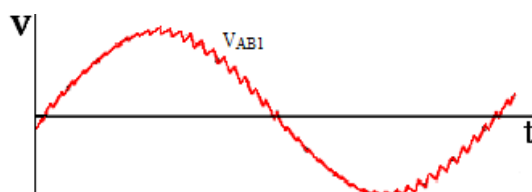


6.1 pav. Žemų dažnių filto: a – pralaidumo – slopinimo juosta; b – principinė elektrinė schema [19]

Inverterio išėjimo įtampa, panaudojus žemų dažnių filtrą, paprastai atrodo kaip atvaizduota 6.1 paveiksle, b dalyje. Pagal mokslines rekomendacijas filtras parenkamas taip [19], kad jo dažnis būtų kur kas didesnis už moduluojamą 50 Hz dažnį ir atitiktų 5-25% nešlio dažnio dydį. Filto ribinio dažnio apskaičiavimas:

$$f_c = \frac{1}{\sqrt{LC} \times 2\pi}, \quad (6.1)$$

čia:  $L$  – ritės induktyvumas, H;  $C$  – filto kondensatoriaus talpa, F.



6.2 pav. Inverterio išėjimo įtampa

Gauta sinusinė (6.2 pav.) įtampa dėl nepakankamo filto slopinimo paprastai nebūna visiškai švari, ją sudaro įvairūs harmoniniai iškraipymai. Tiek buitiniai, tiek pramoniniai mikrotinklo įrenginiai – energijos vartotojai dažniausiai inverteriui sudaro aktyvinio ir induktyvinio tipo apkrovas.



Tai įvairūs šildytuvai ir įranga, turinti transformatorius bei variklius, todėl kaip filtruojantys elementai geriausiai tinka kondensatoriai bei droseliai.

Parazitinių harmonikų lygį mikrotinkle galima vertinti kaip vieną iš svarbiausių įtampos kokybės rodiklių. Šį rodiklį apibūdina bendras harmoninis iškreipymas BHI (angl. THD – total harmonic distortion).

Žemų dažnių filtro paskirtis – filtruojant užtikrinti inverterio išėjimo įtampos kokybę keliamiems standartų reikalavimams. Mikrotinklo įtampos pagrindinės harmonikos iškreipymo lygį galima reguliuoti varijuojant filtro parametrais, tačiau tai turi įtakos slopinant ir pagrindinę harmoniką.

## 7. BENDRAS HARMONINIS IŠKRAIPYMAS

Dauguma fotovoltinių sistemų yra prijungtos prie bendrojo elektros tinklo. Daugeliu atvejų prie tinklo prijungtos atsinaujinančios energijos sistemos su keitikliais yra susijusios su nepageidaujamais elektromagnetiniais trikdžiais, kurie yra skleidžiami į elektros tinklą šių sistemų veikimo metu. Todėl bendras harmonikų iškraipymas BHI (angl. THD – total harmonic distortion) šioms sistemoms yra apribotas standartais (EN 50160: 2010). Daugumos šiuo metu prie tinklo prijungtų įtampos šaltinio keitiklių, kurie yra prieinami rinkoje, BHI siekia apie 3-5% [4].

Atsijauninančios energijos sistemų pagamintos elektros energijos parametrai turi atitikti standartų reikalavimus. Elektros energijos, tiekiamos į elektros tinklą, kokybė nustatoma pagal apibrėžtus parametrus standarte IEC 61400-21:2001. Vienas iš parametrų reguliuoja maksimalias harmonines sroves  $I_h$  esant nuolatiniam darbui, kas 10 minučių stebint kiekvienos harmonikos iki 50 vidutinius duomenis. Vidutinės kvadratinės įtampos vertės  $u_h$  harmonikos turi būti mažesnės nei 95% leidžiamos ribos per savaitę. Remiantis šiuo standartu, bendras harmonikų iškraipymo THD koeficientas yra naudojamas vertinant bendrą įtampos iškraipymo lygį. THD nustatomas naudojantis formule:

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} u_h^2} \times 100\%, \quad (7.1)$$

čia:  $h$  – harmonikos eilės numeris;  $u_h$  – lyginamosios amplitudės  $h$ -tosios eilės harmonikos įtampa:

$$u_h = \frac{U_h}{U_p}, \quad (7.2)$$

čia:  $U_p$  – 1-osios harmonikos amplitudė;  $U_h$  –  $h$ -tosios harmonikos amplitudė.

Analizuojant gautą įtampos signalą tenka pasinaudoti spektrine signalų analize. Signalų spektro gavimui pritaikome tiesioginę Furjė transformaciją [10], kuri aprašoma formule:

$$h_n = \left(4 \frac{V}{n\pi}\right) [1 - 2n \cos \alpha_1 + 2n \cos \alpha_2 - 2n \cos \alpha_3 + \dots 2n \cos \alpha_n], \quad (7.3)$$

čia:  $h_n$  apibūdina  $n$ -tosios eilės harmonikos amplitudę,  $V$  – pagrindinės harmonikos įtampa,

V.

Galimi inverterio išėjimo įtampos harmonikų sumažinimo būdai moduluojant sinusinę moduliacinę įtampą:

a) formuojant moduliacinę įtampą iš sinusinės įtampos pirmosios ir trečiosios harmonikos pagal formulę:

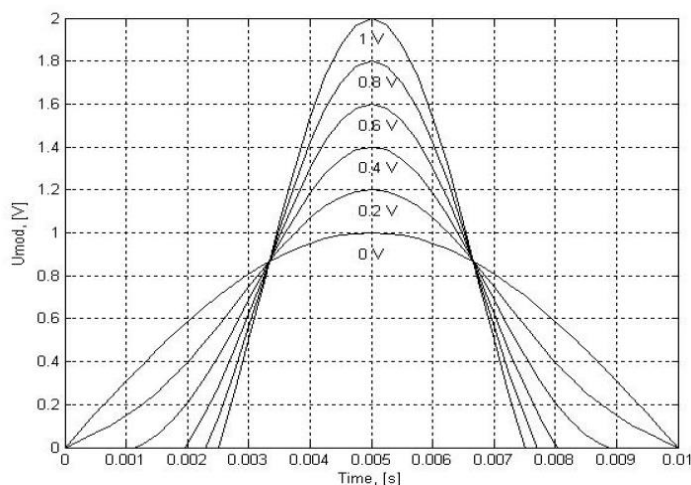
$$u_{mod} = k_{mod} \times (u_{1m} \sin wt + u_{3m} \sin 3wt). \quad (7.4)$$

b) formuojant moduliacinę įtampą iš sinusinės įtampos pakeltos  $n$  laipsniu.

$$u_{mod} = k_p \times (u_{1m} \sin wt)^n, \quad (7.5)$$

čia:  $u_{1m}$  – 1-osios harmonikos amplitudė;  $u_{3m}$  – 3-iosios harmonikos amplitudė;  $k_{mod}$  – moduliacijos koeficientas;  $k_p$  – atitikimo koeficientas;  $n$  – galios indeksas.

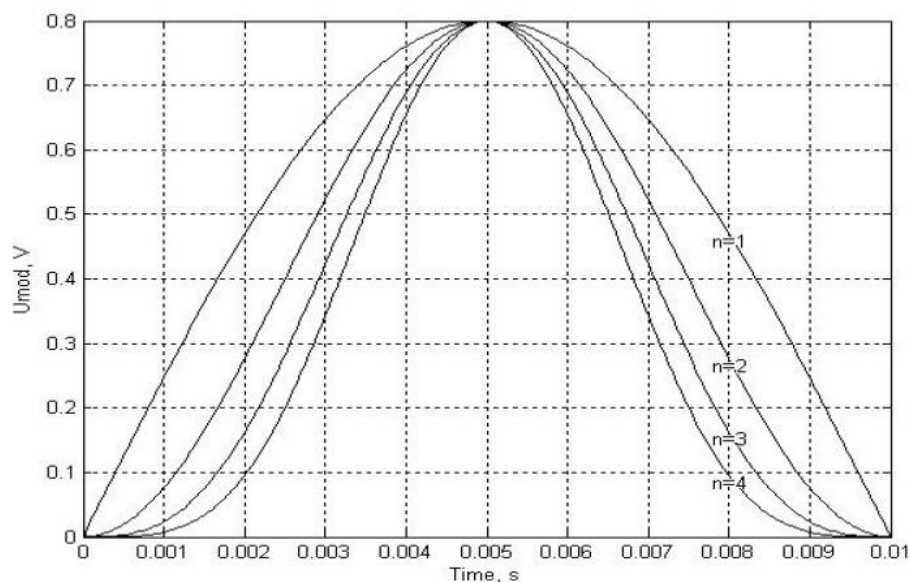
Moduliacinės įtampos kreivės forma pirmuoju atveju (a) kinta keičiant trečiosios harmonikos amplitudės vertes nuo 0 iki 1 V. Teigiamo pusperiodžio metu moduliacinės įtampos kreivės apibūdinamos žemiau pateiktame 7.1 paveiksle.



7.1 pav. Moduliacinės įtampos kreivės, suformuotos pirmosios ir trečiosios harmonikos sinusinės įtampos [4]

Moduliacinės įtampos neigiamų reikšmių apribojimas taikomas siekiant gauti kreivių formas kaip kad pateikta 7.1 paveiksle. Galime pastebėti, kad moduliacinės įtampos amplitudė keičiasi, todėl moduliacijos koeficientas  $k_{mod}$  turi būti keičiamas, kai tik pasikeičia trečiosios harmonikos  $u_{3m}$  įtampa, kad būtų išlaikyta moduliacinės įtampos amplitudės reikiama pastovi vertė. Be to, šis paveikslas rodo, kad moduliacijos įtampa keičiasi iš sinusinės bangos į periodinę netiesinę kreivę su laiko intervalais, kuriuose įtampa lygi nuliui, kai trečiosios harmonikos įtampos  $u_{3m}$  reikšmės kinta nuo 0 iki 1. Keitiklio kontrolės impulsai šiuose laiko intervaluose bus užblokuoti.

Netiesinė moduliacinės įtampos kreivė antruoju atveju (b) kinta keičiant koeficientą  $k_p$  ir galios indeksą  $n$ . Moduliacinės įtampos kreivės šiuo atveju teigiamame pusperiodyje atvaizduojamos 7.2 paveiksle.



7.2 pav. Moduliacinės įtampos kreivės, kai sinusinė įtampa yra laipsninė funkcija ( $k_p=0.4$ ) [4]

Kaip matoma 7.2 paveiksle, nulinės įtampos intervalai neegzistuoja moduliacinės įtampos kreivėse. Analizuojamos literatūros [4] tyrimai parodė, kad nulinės įtampos intervalai, kaip kad atvaizduota 7.1 paveiksle, turi didelį neigiamą poveikį konvertuotos srovės kreivės formai. Tačiau formuojant sinusinę moduliacinę įtampą iš sinusinės įtampos pirmosios ir trečiosios harmonikos, inverterio išėjimo įtampos bendras harmoninis iškraipymas gaunamas dvigubai mažesnis nei kad formuojant moduliacinę įtampą iš sinusinės įtampos, pakeltos  $n$  laipsniu.

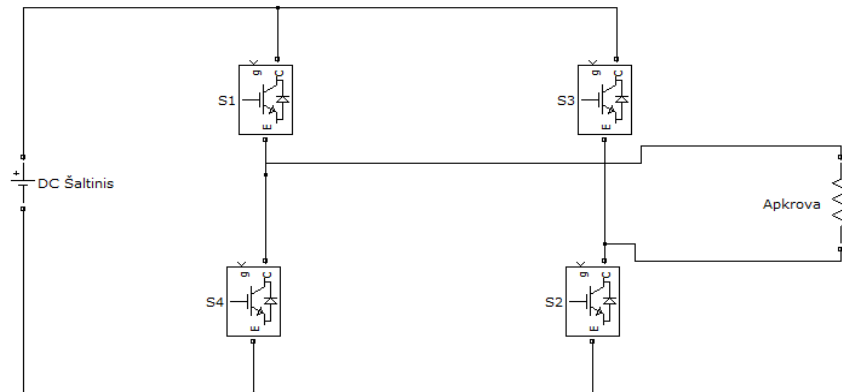
Bendras harmoninis iškraipymas puikiai atspindi sinusinio signalo iškraipymą, todėl BHI – geriausias kriterijus, apibūdinantis parazitinių harmonikų lygį.

Analizuojant inverterius ir nuolatinės įtampos keitimą į kintamąją, vienas svarbiausių parametrų yra bendras harmoninis iškraipymas, kuris apibūdina įtampos kokybę. Inverterių, prijungtų prie bendrojo elektros tinklo, kuriama įtampa turi atitikti keliamus įtampos kokybės standartus.

Atlikus literatūrinę analizę, atliekamas inverterio modeliavimas, siekiant ištirti skirtingų inverterio parametrų įtaką bendro harmoninio iškraipymo dydžiui.

## 8. INVERTERIO MODELIAVIMAS

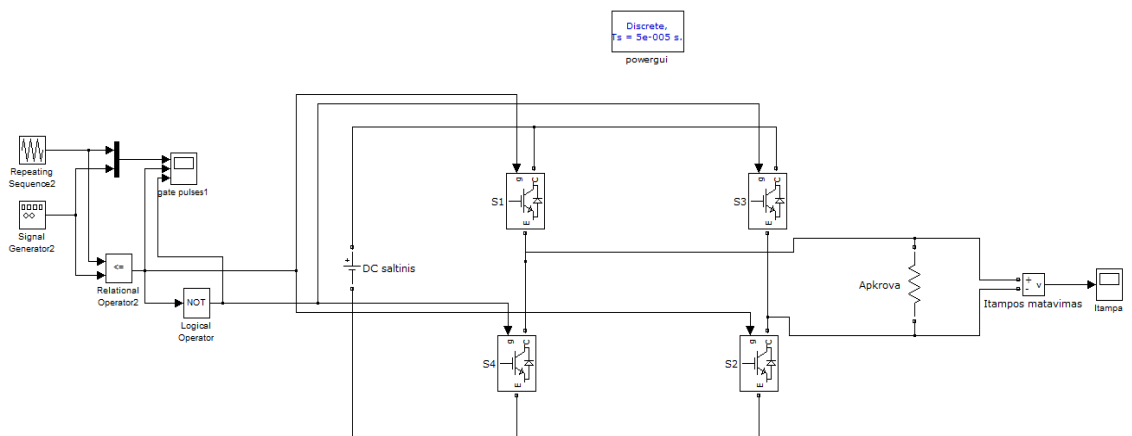
Inverterio modeliavimui pasirinktas *Matlab Simulink* programinis paketas. Jo aplinkoje sukuriamas vienfaziso pilno tiltelio topologijos inverterio modelis be išėjimo įtampos filtro (8.1 pav.), kurį sudaro keturi komutaciniai raktai  $S_1$ - $S_4$ , nuolatinės įtampos šaltinis  $V_{dc} = 200\text{ V}$  ir prijungta apkrova  $R = 1\ \Omega$ .



8.1 pav. Pilno tiltelio topologijos inverteris

Atlikus literatūros analizę, nustatyta, kad valdant inverterio tiltelio raktus impulsų pločio moduliacijos IPM metodu, išėjimo įtampa gali būti modeliuojama 2, 3, 5 ir t.t. lygių. Siekiant pasirinkti konkretų inverterio tiltelio valdymą, atliekamas modeliavimas esant skirtingų lygių išėjimo įtampai.

*Matlab Simulink* programiniame pakete pirmiausia sudaromas literatūroje nagrinėtos 2 lygių – bipolinės moduliacijos modelis (8.2 pav.).

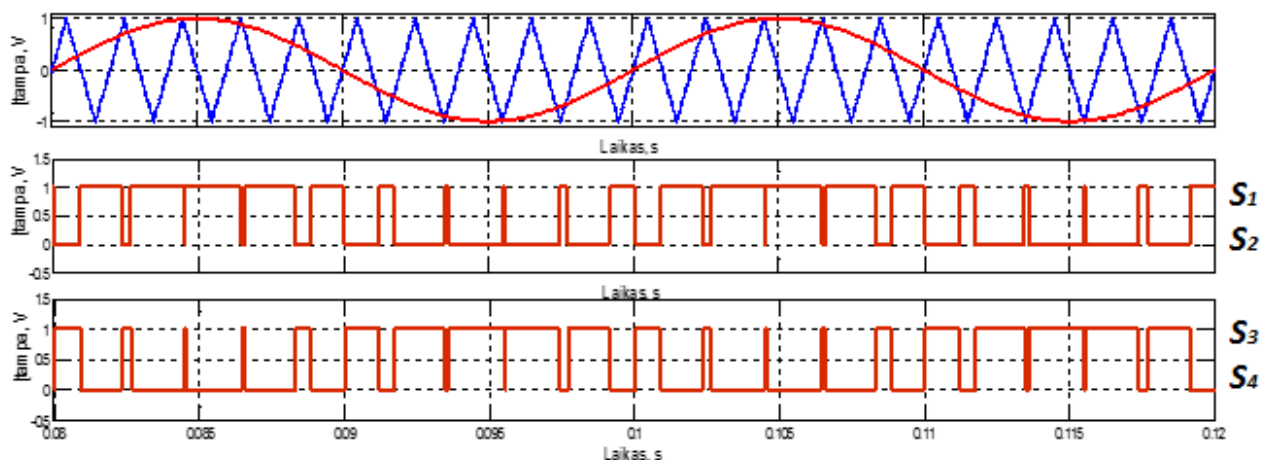


8.2 pav. Bipolinės IPM moduliacijos inverterio schema

Bipolinės impulsų pločio moduliacijos metu inverterio tiltelio raktai valdomi poromis.  $S_1$  ir  $S_2$  raktai valdomi vienu IPM signalu, o  $S_3$  ir  $S_4$  – antru. Sudaryto modelio signalo nešlio dažnis nustatytas  $f_s = 1\text{ kHz}$ , moduliacinės sinusinės įtampos dažnis  $f_l = 50\text{ Hz}$  ir moduliacijos indeksas (šių signalų įtampos santykis)  $m_a = 1$ .

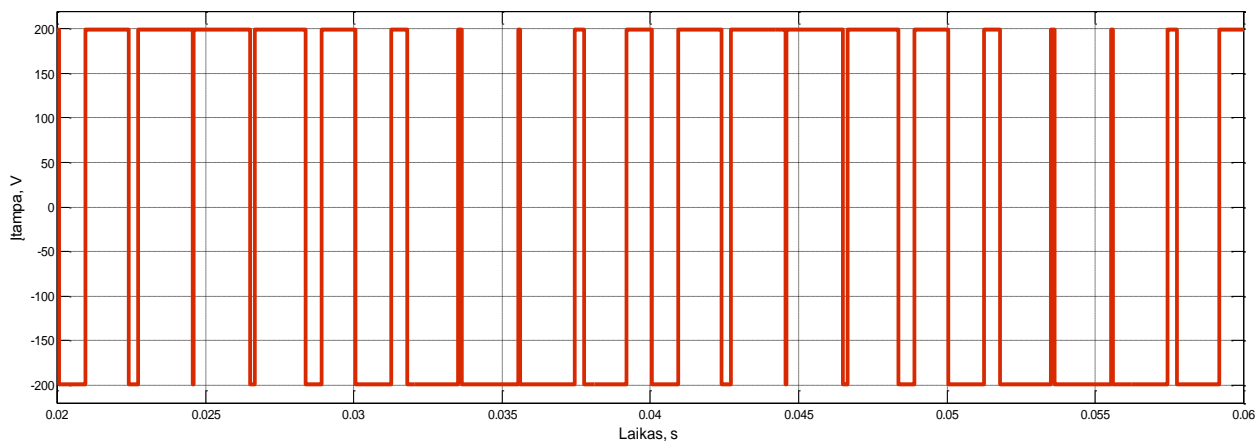
Pagal pasirinktus parametrus gaunami bipolinės moduliacijos grafikai:

- Inverterio raktų valdymo signalai (8.3 pav.);
- Inverterio nefiltruota išėjimo įtampa (8.4 pav.).



8.3 pav. Bipolinės IPM moduliacijos inverterio raktų valdymo signalų formavimas

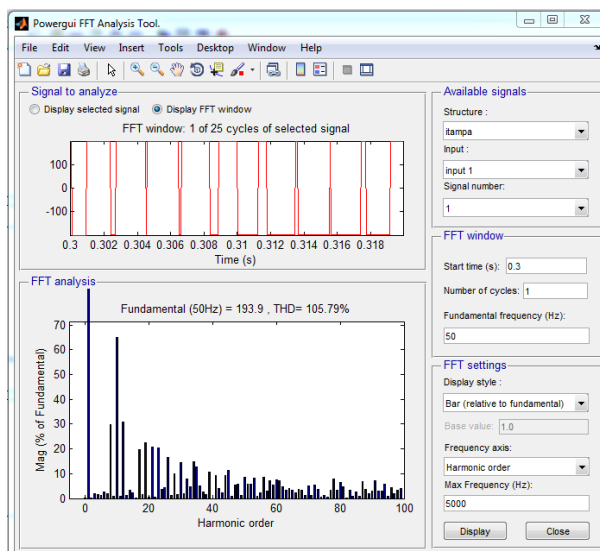
Iš gauto raktų valdymo grafiko (8.3 pav.) matoma, kad visi tiltelio raktai  $S_1$ - $S_4$  perjungiami tuo pačiu metu. Kai  $S_1$  ir  $S_2$  įjungiami,  $S_3$  ir  $S_4$  išjungiami bei atvirkščiai. Tokiu būdu kuriama bipolinė impulsų pločio moduliacijos inverterio išėjimo įtampa, kuri įgauna tik teigiamas arba tik neigiamas pastovias įtampos vertes (8.4 pav.).



8.4 pav. Bipolinės IPM moduliacijos inverterio išėjimo įtampa

## 8.1. Modelio tyrimo metodika

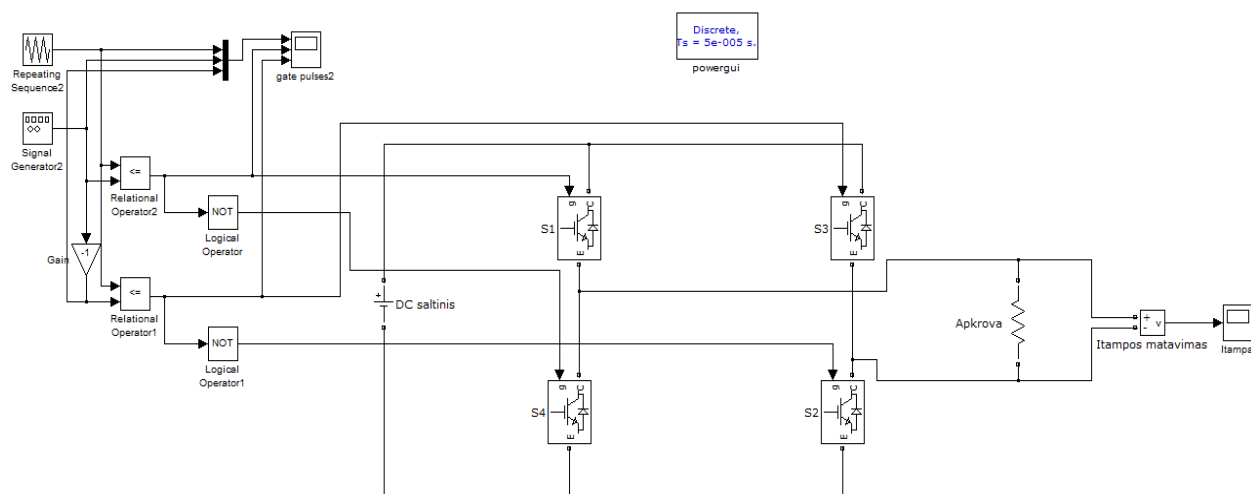
Atliekant modeliavimą inverterio išėjimo įtampos bendro harmoninio iškraipymo faktoriui fiksuoti, naudojama *Matlab Simulink* programinio paketo teikiama supaprastintos Greitosios Furjė transformacijos funkcija – *Powergui FFT Analysis*, kuri atvaizduoja išėjimo įtampos bendrą harmoninį iškraipymą (8.5 pav.).



8.5 pav. Bipolinės IPM moduliacijos be filtro bendras harmoninis iškraipymas

Iš gautų duomenų (8.5 pav.) nustatyta, kad bendro harmoninio iškraipymo dydis, 2 lygių išėjimo įtampos signalo, siekia 105,79 %.

Antru atveju, *Matlab Simulink* programinio paketo aplinkoje sudaromas vienpolinės moduliacijos modelis (8.6 pav.).

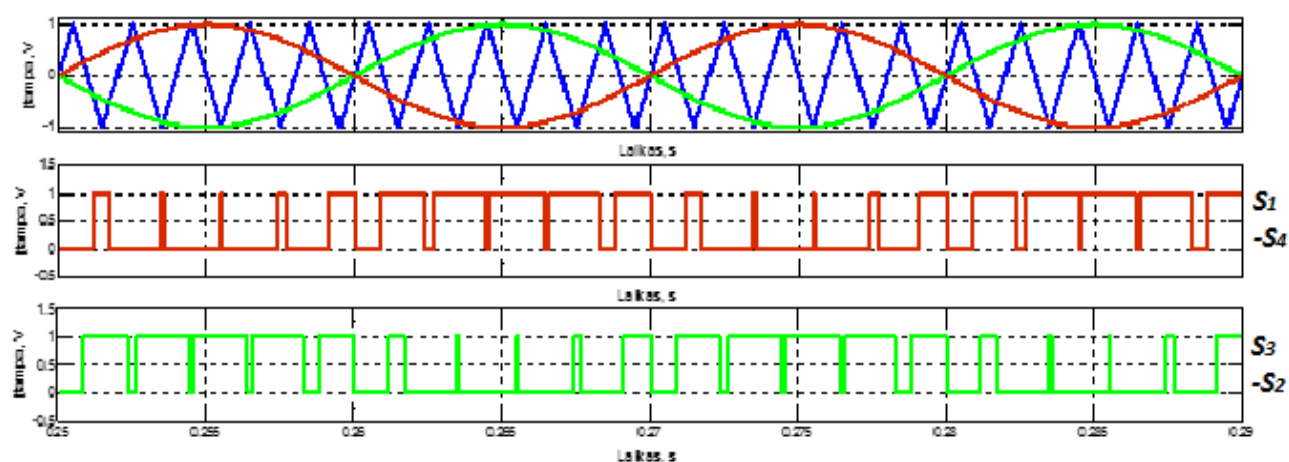


8.6 pav. Vienpolinės IPM moduliacijos inverterio schema

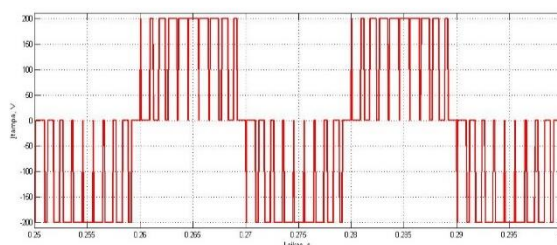
Atlikus inverterio su vienpoline IPM moduliacija modeliavimą, gauti inverterio raktų valdymo signalai (8.7 pav.) ir inverterio išėjimo įtampa (8.8 pav.).

Vienpolinės impulsų pločio moduliacijos metu visi tiltelio komutaciniai raktai  $S_1 - S_4$  valdomi skirtingais signalais. Raktas  $S_1$  valdomas gautu raudonu signalu,  $S_4$  atvirkštiniu šiuo signalu,  $S_3$  – žaliu signalu, o  $S_2$  atvirkštiniu žaliu signalu. Tokiu būdu kuriama 3 lygių vienpolinė inverterio išėjimo įtampa, kuri pateikta 8.8 paveiksle.

Atvirkštinis signalas – priešingas pirminiam signalui. Tai atitinka bipolinės moduliacijos principą, kai vienas raktas įjungiamas, kitas, esantis toje pačioje tiltelio šakoje, išjungiamas.



8.7 pav. Vienpolinės IPM moduliacijos inverterio raktų valdymo signalų formavimas

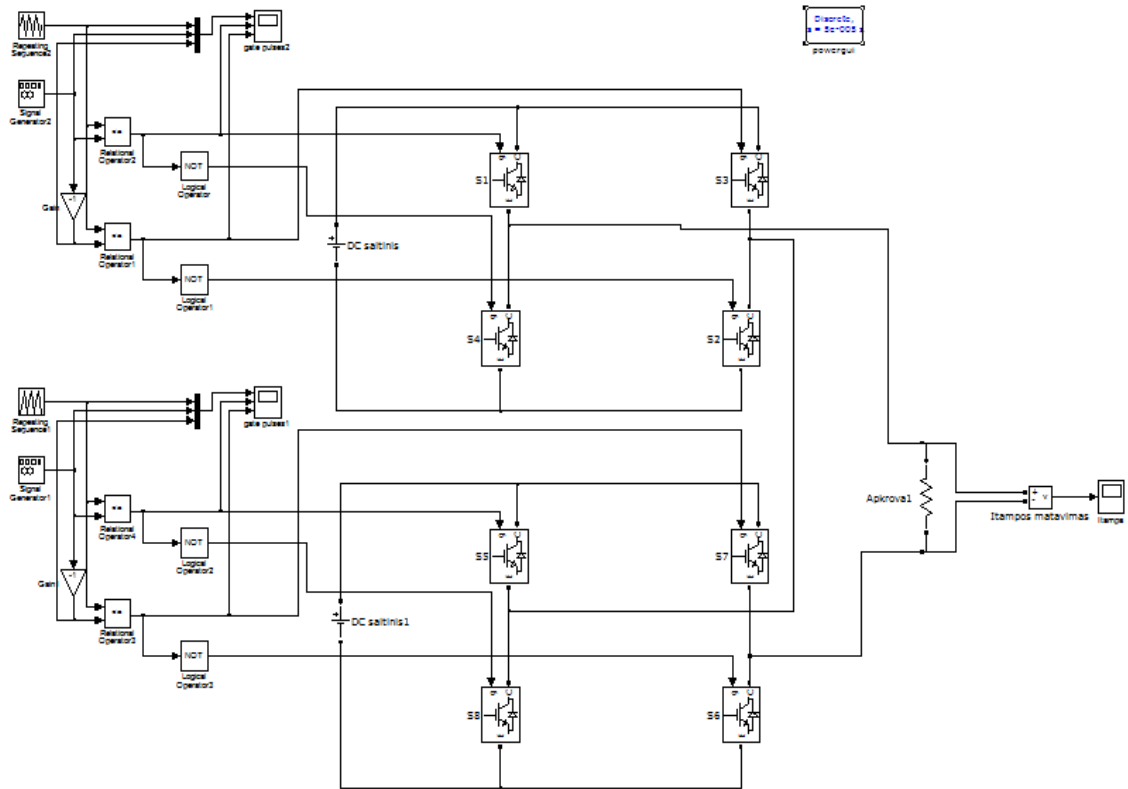


8.8 pav. Vienpolinės IPM moduliacijos inverterio išėjimo įtampa

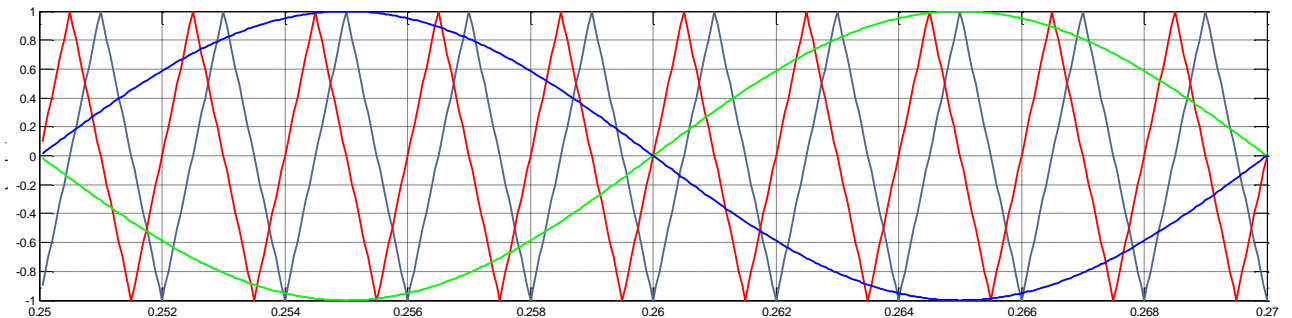
Vienpolinės impulsų pločio moduliacijos metu gautos 3 lygių išėjimo įtampos bendras harmoninis iškraipymas siekia 56,03%.

Trečiu atveju, *Matlab Simulink* programinio paketo aplinkoje sudaromas 5 lygių IPM moduliacijos modelis, kurio modeliavimo schema pateikta 8.9 paveiksle.





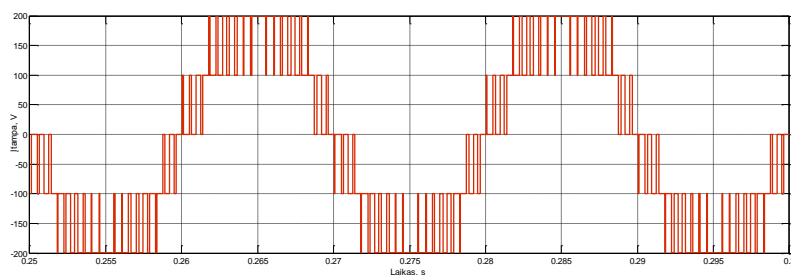
8.9 pav. 5 lygių IPM moduliacijos inverterio schema



8.10 pav. 5 lygių IPM moduliacijos inverterio raktų valdymo signalų formavimas

Norint gauti 5 lygių IPM signalą, reikalingas antrasis inverterio tiltelis. Abu tilteliai valdomi 3 lygių vienpolinės impulsų pločio moduliacijos metodu, tik antrojo tiltelio trikampės formos nešlio signalas pasislinkęs per 90 laipsnių, nei kad pirmojo tiltelio. Taip pat šaltinio įtampa dalinasi iš naudojamų tiltelių skaičiaus. Tokio inverterio tipo raktų valdymo signalų formavimas pateiktas 8.10 paveiksle.

Valdant tiltelių komutacinius raktus vienpoline IPM moduliacija, gaunama 5 lygių išėjimo įtampa, kuri pateikta 8.11 paveiksle.



8.11 pav. 5 lygių IPM moduliacijos inverterio išėjimo įtampa

5 lygių impulsų pločio moduliacijos metu gautos išėjimo įtampos bendras harmoninis iškraipymas, fiksuojant *Matlab Powergui FFT Analysis* funkcija, siekia 29,30%.

## 8.2. Modeliavimo rezultatai

5 lentelė

Bendro harmoninio iškraipymo dydis keičiant IPM įtampos lygį

	2 lygių IPM įtampa	3 lygių IPM įtampa	5 lygių IPM įtampa
THD, %	105,79 %	56,03 %	29,30 %

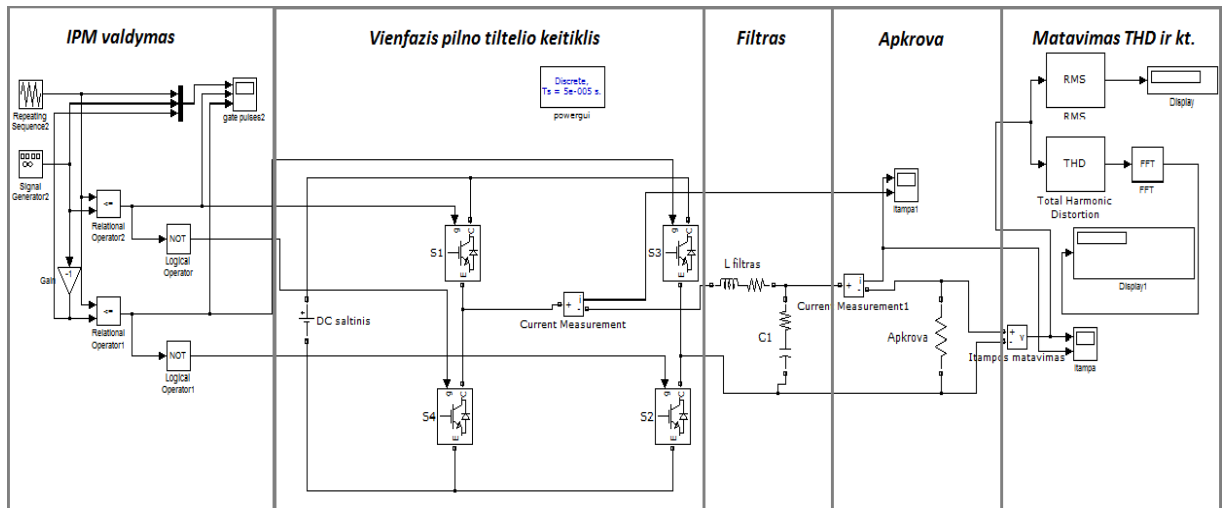
Inverterio tiltelio raktus valdant sinusinės impulsų pločio moduliacijos metodu bei modeliuojant nustatyta, kad išėjimo įtampos bendras harmoninis iškraipymas gali būti gerokai sumažinamas, kai išėjimo įtampa sudaroma iš kelių lygių. Skirtingo įtampos lygio bendras harmoninis iškraipymas pateiktas 5 lentelėje.

Skaidant įtampos lygį į didesnę nei 3 padėčių, reikalingas papildomas komutacinių raktų tiltelis, kuris lemia didesnius energijos keitimo nuostolius ir didesnę inverterio kainą. Todėl, siekiant balanso tarp inverterio kainos ir energetinio efektyvumo, pasirenkamas vienfazis pilno tiltelio topologijos įtampos šaltinio keitiklis, kuris valdomas vienpoliniu impulsų pločio moduliacijos metodu.

## 8.3. Inverterio modelio ir apkrovos struktūros sudarymas

Pasirinkus inverterį, valdomą vienpoliniu impulsų pločio moduliacijos metodu, programinio paketo *Matlab Simulink* aplinkoje sudaromas pilnas inverterio tyrimo modelis, kuris pateiktas 8.12 paveiksle. Jį sudaro keletas pagrindinių elementų:

- IPM valdymas – vienpolinė impulsų pločio moduliacija;
- Inverterio tiltelis – vienfazis pilno tiltelio topologijos įtampos šaltinio keitiklis, sudarytas iš IGBT tranzistorių;
- Filtras – žemų dažnių LC filtras;
- Apkrova – aktyvinė ir induktyvinė kintamo pobūdžio apkrova;
- Matavimas – bendro harmoninio iškraipymo ir įtampos matavimas.



8.12 pav. Pilno tiltelio inverterio ir apkrovos modeliavimo schema

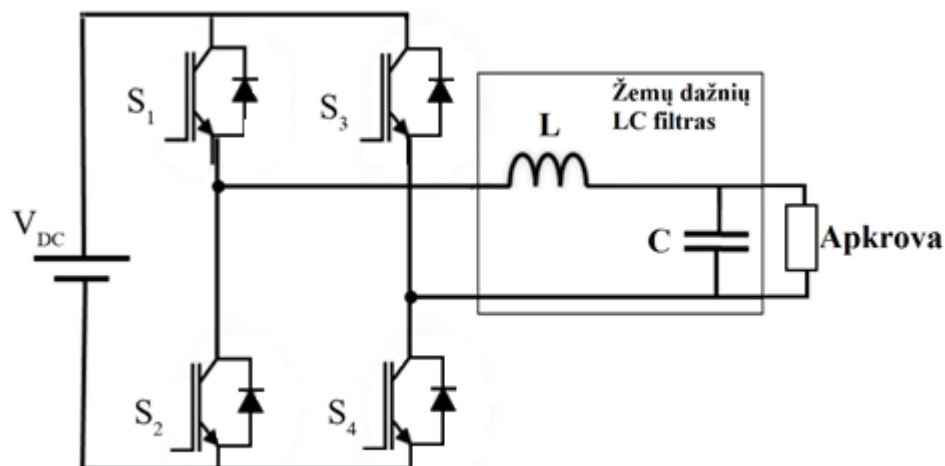
Tyrimo metodika: sudarius įtampos šaltinio keitiklio tyrimo modelį, tiriamos atskiros jo dalys, kaip ir kiek jos turi įtakos išėjimo įtampos bendram harmoniniam iškraipymui.

## 9. PASIRINKTO INVERTERIO MODELIO TYRIMAS

Mikrotinklo inverterio harmonikų valdymo tyrimui pasirinktas vienfazis pilno tiltelio topologijos įtampos šaltinio keitiklis, kurio principinė struktūrinė schema pateikta 9.1 paveiksle.

Atlikus literatūrinę analizę, nustatyti inverterio parametrai, kurie gali būti keičiami:

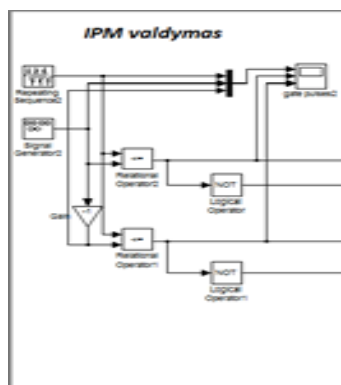
1. Impulsų pločio moduliacijos valdymo parametrai;
  - a. Nešlio dažnis;
  - b. moduliacijos koeficientas.
2. Filtro parametrai;
  - a. filtro induktyvumas;
  - b. filtro talpumas.



9.1 pav. Inverterio su išėjimo filtru bendra principinė struktūrinė schema

### 9.1. Inverterio parametrų valdymo galimybių tyrimas

Inverterio parametrų valdymo (9.2 pav.) galimybių tyrimo metu ištirtos bendro harmoninio iškreipimo priklausomybės nuo impulsų pločio moduliacijos IPM parametrų: nešlio signalo dažnio ir moduliacijos koeficiento.



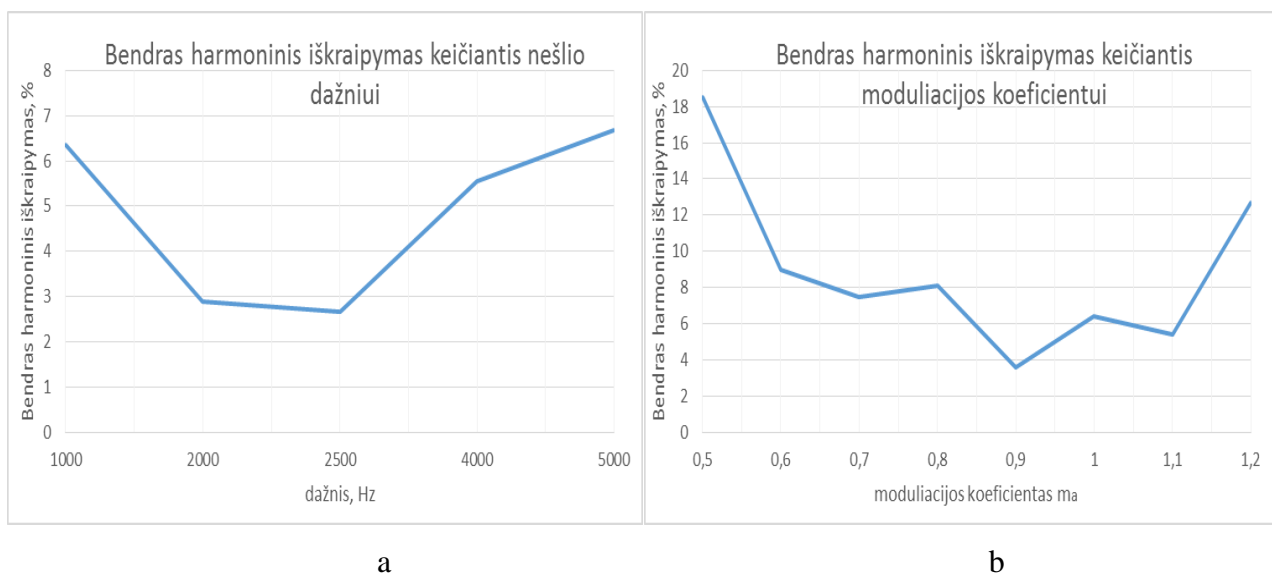
9.2 pav. Inverterio tiltelio valdymas

### Tyrimo rezultatai

Tiriant bendro harmoninio iškraipymo priklausomybes, buvo keičiamas nešlio signalo dažnis nuo 1 kHz iki 5 kHz, kurį, toliau didinant, gaunamas signalo iškraipymas. Iš gautų duomenų modeliuojant nustatyta, kad mažiausias signalo iškraipymo lygis pasiekiamas, kai nešlio dažnis – 2,5 kHz (9.3 pav. a).

Antruoju atveju buvo keičiamas moduliacijos koeficientas nuo 0,5 iki 1,2. Mažiausias bendras harmoninis iškraipymas pasiektas, kai moduliacijos koeficientas – 0,9 (9.3 pav. b).

Tolimesniems tyrimams parenkami pastarieji impulsų pločio moduliacijos parametrai, prie kurių gaunamas mažiausias iškraipymas.



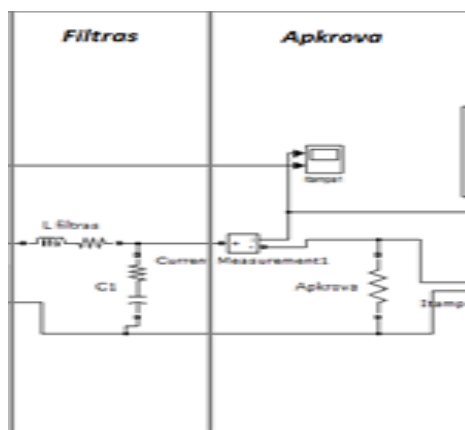
9.3 pav. Bendro harmoninio iškraipymo priklausomybė nuo: a – nešlio dažnio; b – moduliacijos koeficiento

## 9.2. Harmonikų valdymo tyrimas varijuojant apkrovos bei filtro parametrus

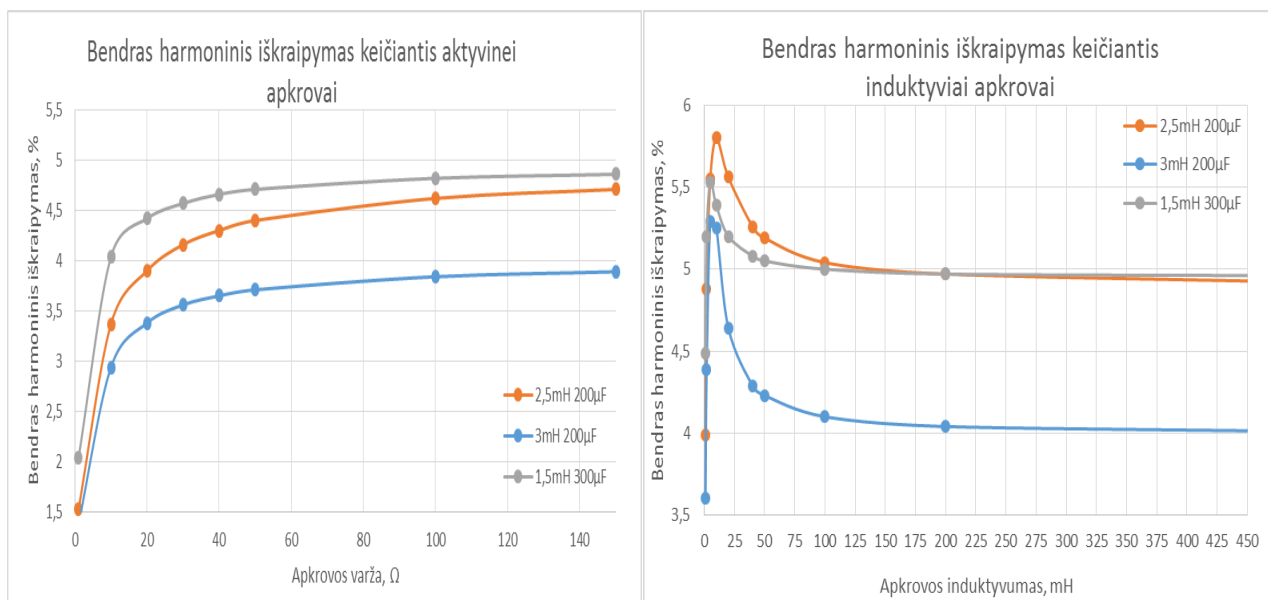
Atliekant harmonikų valdymo tyrimą, iširtos bendro harmoninio iškraipymo priklausomybės esant skirtingiems apkrovos ir filtro parametrams (9.4 pav.).

### Tyrimo rezultatai

Kaip jau nagrinėta literatūroje, talpinė apkrova pasitaiko retai, todėl tirtos tik aktyvinio ir induktyviojo pobūdžio apkrovos. Gautos priklausomybės atvaizduotos 9.5 paveiksle.



9.4 pav. Filtro ir apkrovos *Matlab Simulink* realizacija

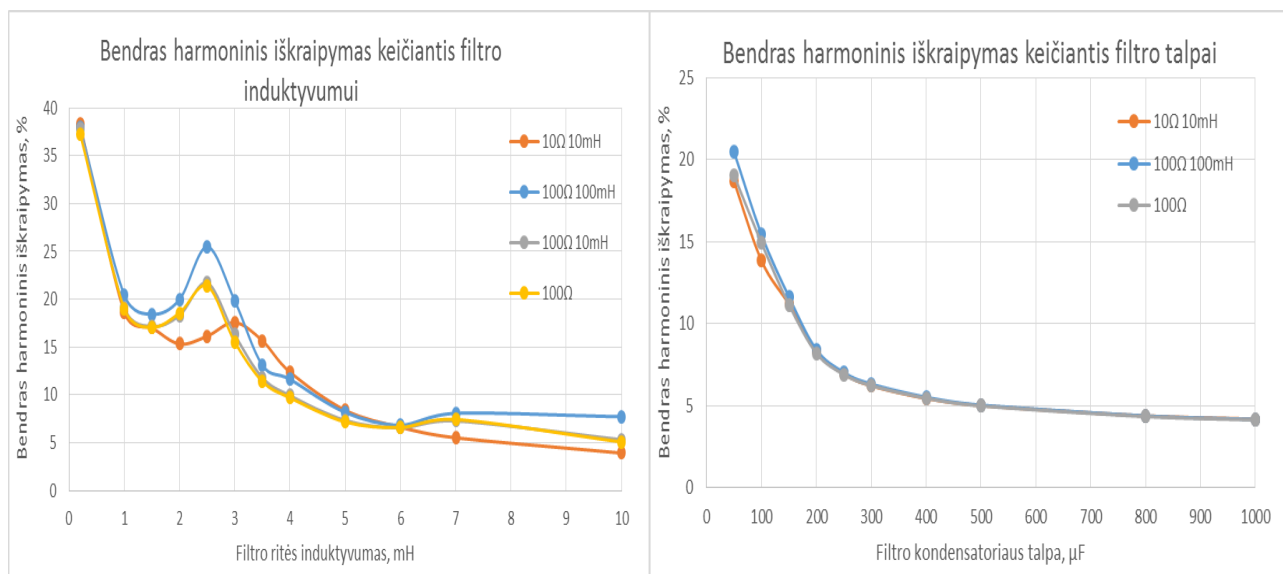


9.5 pav. Bendras harmoninis iškraipymas (%) esant: a – aktyvinei apkrovai,  $\Omega$ ; b – induktyviai apkrovai, mH

Bendro harmoninio iškraipymo dydis, priklausomai nuo apkrovos, kai ji aktyvinio pobūdžio ir kinta nuo 1  $\Omega$  iki 150  $\Omega$ , nuolat didėja. Kai apkrova induktyvinio pobūdžio ir ji kinta nuo 0 iki 20

mH, bendras harmoninis iškraipymas taip pat didėja, tačiau, didinant induktyvumą iki 450 mH, iškraipymas sumažėja ir praktiškai nusistovi. Procentinis bendro harmoninio iškraipymo dydis priklauso nuo filtro parametru, tačiau priklausomybių kreivei tai įtakos neturi (9.5 pav.).

Parinkus pastovių parametru apkrovą  $10 \Omega$  ir 10 mH, keičiami filtro parametrai ir fiksuojami bendri harmoniniai iškraipymai. Gauti rezultatai pateikti 9.6 paveiksle. Apkrova parinkta mišri, kadangi tik aktyvinė arba tik induktyvinė apkrova pasitaiko retai, o apkrovos dydis gaunamų priklausomybių kreivių kardinaliai nekeičia (9.6 pav.).



9.6 pav. Bendro harmoninio iškraipymo priklausomybė (%) nuo filtro parametru: a – ritės induktyvumo, mH; b – kondensatoriaus talpos,  $\mu\text{F}$

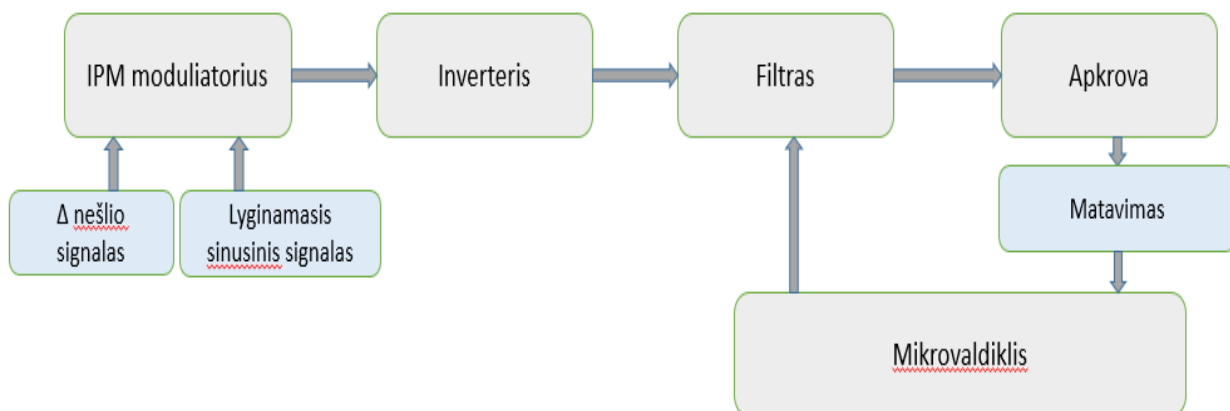
Atliekant modeliavimą nustatyta, kad reikiamas bendro harmoninio iškraipymo BHI dydis, ne didesnis nei 5%, pasiekiamas, kai filtro induktyvumas siekia bent 2 mH, o kondensatoriaus talpa – 200  $\mu\text{F}$ .

Sudarant 9.6 paveikslo a dalies kreives, kondensatoriaus talpa pastovi ir lygi 50  $\mu\text{F}$ , o sudarant b dalies kreives – filtro induktyvumas pastovus ir lygus 1 mH. Tokie dydžiai parinkti kaip atskaitos taškai, nuo kurių vyksta efektyvus bendro harmoninio iškraipymo mažinimas, ką galima pastebėti šiose filtro charakteristikose.

### 9.3. Inverterio valdymo schema

Atlikus inverterio filtro ir apkrovos tyrimą, nustatyta, kad didėjant apkrovai, reikalingas didesnių parametru filtras (6 lentelė), tačiau apkrovai sumažėjus, didesnio filtro naudojimas nėra

racionalus, kadangi tai lemia didesnius energijos nuostolius. Harmonikų lygio reguliavimui gali būti naudojamas mikrovaldiklis, kuris, naudodamas gautą informaciją apie inverterio apkrovos pasikeitimus, atitinkamai keičia filtro parametrus. Inverterio valdymo blokinė schema pateikta 9.7 paveiksle. Toks inverterio valdymas minimizuos parazitinių harmonikų lygį ir sumažins pagrindinės sinusinės tinklo įtampos nuostolius dėl nepagrįstai didelio filtro talpumo naudojimo, kai apkrovos lemia žemą harmonikų lygį.



9.7 pav. Inverterio harmonikų valdymo blokinė schema

6 lentelė

Bendro harmoninio iškraipymo dydis priklausomai nuo apkrovos ir filtro parametrų

Apkrovos parametrai:	10 Ω	150 Ω	150 Ω	20 mH	20 mH
Filtro parametrai:	2 mH 150 μF	2 mH 150 μF	2,5 mH 200 μF	2,5 mH 200 μF	2,5 mH 250 μF
Bendras harmoninis iškraipymas:	4,64%	6,28%	4,71%	5,60%	4,25%

### Tyrimo išvados

*Matlab Simulink* programiniame pakete atliktas inverterio modeliavimas, kurio metu nustatytas bendras harmoninis iškraipymas, esant skirtingiems modelio parametrams.

Nustatyta, kad bendro harmoninio iškraipymo dydis, priklausomai nuo apkrovos, kai ji aktyvinio pobūdžio ir kinta nuo 1 Ω iki 150 Ω, nuolat didėja. Kai apkrova induktyvinio pobūdžio ir ji kinta nuo 0 iki 20 mH, bendras harmoninis iškraipymas didėja. Toliau didinant induktyvumą iki 450 mH, iškraipymas sumažėja ir praktiškai nusistovi. Procentinis bendro harmoninio iškraipymo dydis priklauso nuo filtro parametrų, tačiau priklausomybių kreivei tai įtakos neturi. Keičiant filtro parametrus nuo 0,1 mH iki 10 mH ir nuo 50 μF ir 1000 μF, bendras harmoninis iškraipymas mažinamas. Tai leidžia daryti prielaidą, kad mikrovaldikliu valdant filtro parametrus, priklausomai nuo apkrovos dydžio, galima sumažinti gaunamos įtampos nuostolius dėl nepagrįstai didelio filtro talpumo naudojimo.



## IŠVADOS

1. Atlikus literatūrinę analizę išsiaiškinta, kad atsinaujinančių energijos šaltinių kuriama įtampa skiriasi nuo buityje naudojamos standartinės įtampos, todėl, jos suderinimui su viešuoju tinklu, naudojami įtampos šaltinio keitikliai – inverteriai.
2. Siekiant efektyviai išnaudoti skirtingus atsinaujinančius energijos šaltinius, kai atskirų energijos šaltinių efektyvumas nesutampa su energijos vartojimo poreikiu, jie jungiami į mikrotinklus.
3. Atlikus literatūrinę analizę išsiaiškinta, kad labiausiai paplitę įtampos šaltinio keitikliai su impulsų pločio moduliacija, o švariausia kintamosios įtampos sinusoidė gaunama naudojant sinusinę impulsų pločio moduliaciją.
4. Modeliuojant nustatyta, kad mažiausi bendri harmoniniai iškreipimai pasiekiami, kai impulsų pločio moduliacijos nešlio signalo dažnis – 2,5 kHz, moduliacijos koeficientas – 0,9 ir IPM atliekama vienpoliniu moduliacijos metodu.
5. Nustatyta, kad bendro harmoninio iškreipimo dydis, priklausomai nuo apkrovos, kai ji aktyvinio pobūdžio ir kinta nuo 1  $\Omega$  iki 150  $\Omega$ , nuolat didėja. Kai apkrova induktyvinio pobūdžio ir ji kinta nuo 0 iki 20 mH, bendras harmoninis iškreipimas didėja, didinant induktyvumą iki 450 mH, iškreipimas sumažėja ir praktiškai nusistovi.
6. Keičiant filtro parametrus nuo 0,1 mH iki 10 mH ir nuo 50  $\mu$ F ir 1000  $\mu$ F, bendras harmoninis iškreipimas mažinamas.
7. Tyrimo metu nustatyta, kad didėjant apkrovai reikalingas galingesnis filtras, siekiant išlaikyti įtampos kokybės reikalavimus. Tai leidžia daryti prielaidą, kad mikrovaldikliu valdant filtro parametrus, priklausomai nuo apkrovos dydžio, galima sumažinti gaunamos įtampos nuostolius dėl nepragrįstai didelio filtro talpumo naudojimo.
8. Mikrovaldiklio valdymas sudaromas pagal tyrimo metu gautas filtro ir apkrovos charakteristikas. Tokiu būdu sumažinami energijos nuostoliai filtre.

## LITERATŪRA

1. ADOMAVIČIUS, V., KHARCHENKO, V., VALICKAS, J., GUSAROV V. *RES-Based Microgrids for Environmentally Friendly Energy Supply in Agriculture*. Kauno technologijos universiteto mokslinės publikacijos, 2013. ISBN 9788021323889
2. ADOMAVIČIUS, V. *Mažosios atsinaujinančiųjų išteklių energijos sistemos*. 1st ed. KTU leidykla „Technologija“, 2013. ISBN 978-609-02-0945-5. p.17, 35-37, 147
3. Lietuvos Respublikos Energetikos Ministro įsakymas. *Dėl Elektros Įrenginių Įrengimo Bendrųjų Taisyklių Patvirtinimo*. [žiūrėta 2016-05-15]. Prieiga per internetą: <https://www.e-tar.lt/portal/legalAct.html?documentId=TAR.6AF8895BD875>
4. V. ADOMAVIČIUS, Č. RAMONAS and GEČYS S. *Research of Harmonic Minimization Possibilities in Grid-Tied Photovoltaic System*. [žiūrėta 2017-02-11]. Prieiga per internetą: <http://eejournal.ktu.lt/index.php/elt/article/view/9093/4418>
5. Europos aplinkos agentūra. *Oro Tarša*. [žiūrėta 2016-05-15]. Prieiga per internetą: <http://www.eea.europa.eu/lt/themes/air/intro>
6. D. JUKNEVIČIUS. *Atsinaujinantys Energijos Šaltiniai – Kas Tai?* [žiūrėta 2016-05-12]. Prieiga per internetą: [http://www.technologijos.lt/n/technologijos/energija\\_ir\\_energetika/S17805/straipsnis/Atsinaujinantys-energijos-saltiniai--kas-tai??l=2&p=1](http://www.technologijos.lt/n/technologijos/energija_ir_energetika/S17805/straipsnis/Atsinaujinantys-energijos-saltiniai--kas-tai??l=2&p=1)
7. CHOWDHURY, S., CROSSLEY, P. and CHOWDHURY, S.P. *Microgrids and Active Distribution Networks*. London: Institution of Engineering and Technology, 2009. ISBN 9781849190145; 9781849191029
8. New York State Smart Grid Consortium. *Microgrid - NYS SmartGrid Consortium*. [žiūrėta 2017-05-06]. Prieiga per internetą: <http://nyssmartgrid.com/microgrid/>
9. SIEMENS. *MICROGRIDS, White Paper*. [žiūrėta 2016-05-07]. Prieiga per internetą: [http://www.siemens.com/download?DLA17\\_8](http://www.siemens.com/download?DLA17_8)
10. LISIAUSKAS, S. *Šiuolaikinės Elektros Pavaros*. 1st ed. TEV, 2012. ISBN 978-609-433-097-1. p.21
11. BIJOYPRAKASH, M. *Analysis of Single-Phase SPWM Inverter*. [žiūrėta 2017-04-02]. Prieiga per internetą: <http://ethesis.nitrkl.ac.in/3464/1/Final025.pdf>
12. RASHID, M. H. *Power Electronics Handbook*. Third Edition ed. Pensacola: Electrical and Computer Engineering University of West Florida, 2011. ISBN 978-0-12-382036-5
13. CHAPMAN, S. *Electric Machinery Fundamentals*, 3rd ed. The McGraw-Hill Companies, *Introduction to Power Electronics*, 1999. ISBN 9780070119505. p. 189-195

14. PETRAUSKAS, G. and ADOMAVIČIUS, V. *Saulės energijos naudojimas elektrai gaminti*. 1st ed. KTU leidykla "Technologija", 2012. ISBN 978-609-02-0752-9. p.77
15. CROWLEY, I. F., LEUNG, H. F. *PWM Techniques: A Pure Sine Wave Inverter*. Major Qualifying Project ed. Worcester Polytechnic Institute, 2011 04 27
16. RF Wireless World. *MOSFET Vs IGBT*. [žiūrėta 2017-03-19]. Prieiga per internetą: <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/MOSFET-vs-IGBT.html>
17. ERIKSSON, J. *DC to AC Inverter Card with IGBTs*. Uppsala: Uppsala University, 2012. ISBN 1401-5757
18. ADOMAVIČIUS, V. and RAMONAS, Č. *Research of Emd in Small Scale Grid-Tied Pv System*. [žiūrėta 2017-04-11] Prieiga per internetą: [https://www.researchgate.net/publication/298030250\\_RESEARCH\\_OF\\_EMD\\_IN\\_SMALL\\_SCALE\\_GRID-TIED\\_PV\\_SYSTEM](https://www.researchgate.net/publication/298030250_RESEARCH_OF_EMD_IN_SMALL_SCALE_GRID-TIED_PV_SYSTEM)
19. BAILEY, D., HORNER, J., MARTIN, D. and WEE, M. *12 VDC/120 V AC Power Inverter*. Mississippi Stat: Mississippi State University, 2004. [žiūrėta 2017-03-03]. Prieiga per internetą: <https://www.scribd.com/doc/7378809/Power-Inverter-Hard-Ware-Design>
20. NAMBOODIRI, A. Unipolar and Bipolar PWM Inverter. *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*. 2014, vol. 1, no. 7. [žiūrėta 2017-04-29]. Prieiga per internetą: <http://www.ijirst.org/articles/IJIRSTV1I7111.pdf>
21. PATIL, A., KHOT, A., AWAGATHE, C., PILLAI, S., *Control Techniques for Multilevel H-Bridge Inverters*. Nagpur: Visvesvaraya National Institute of Technology, 2015. [žiūrėta 2017-03-20]. Prieiga per internetą: <https://www.slideshare.net/purushotamkumar127/final-thesis-of-control-technique-for-multilevel-hbridge-inverterspwmsvpwmapodpodipd>