

## INVERTERIO IMITACINIO MODELIO *MATLAB* APLINKOJE TYRIMAS

Edvardas Bielskis

*Šiaulių valstybinė kolegija / Higher Education Institution*  
<https://orcid.org/0000-0003-2907-9149>

Marius Kernagis

*Šiaulių valstybinė kolegija / Higher Education Institution*  
<https://orcid.org/0009-0002-3929-5398>

Remigijus Juknevičius

*Šiaulių valstybinė kolegija / Higher Education Institution*  
<https://orcid.org/0009-0001-5046-8520>

### Anotacija

Inverteris – tai elektroninis keitiklis, keičiantis nuolatinę elektros srovę į kintamą. Vienas iš pagrindinių reikalavimų, kuriuos turi atitikti inverteris, yra poreikis tiekti kintamąją srovę be ženklų harmoninių iškreipimų. Atlikto tyrimo tikslas – įvertinti siūlomo inverterio modelio veikimą *Matlab* virtualioje aplinkoje dviem atvejais: veikiant autonomiškai ir veikiant lygiagrečiai su elektros tinklu. Imituojant šiuos režimus siekiama įvertinti inverterio generuojamos srovės formos iškreipimą aukštesniosiomis harmonikomis.

**Pagrindiniai žodžiai:** galios elektronika, inverteris, keitiklis, imitacinis modelis, *Matlab*.

### Įvadas, aktualumas

Iš atsinaujinančių energijos šaltinių pagaminta nuolatinės srovės elektros energija nėra plačiai naudojama, nes visi tradiciniai prietaisai maitinasi kintamąją srove, todėl būtina nuolatinę srovę pakeisti į kintamąją. Elektros srovės rūšies keitimas vykdomas galios elektronikos komponentais – galios elektronikos raktais, kurie atitinkama sinchronizuota seka atlieka komutacijas dideliu dažniu. Iš šių raktų sudarytos galios elektronikos grandinės, keičiančios nuolatinę srovę į kintamąją, yra vadinamos inverteriais [1], [2]. Raktų vaidmenį atlieka valdomi elektronikos komponentai – dvipoliai, metalo oksido lauko arba izoliuotos užtūros dvipoliai lauko tranzistoriai. Dažniausiai inverteriai yra naudojami elektros srovei generuoti į vietinį elektros tinklą [3]. Inverteriai užima svarbų vaidmenį atsinaujinančios energetikos šakose – tai pagrindinis elementas, keičiantis saulės arba vėjo elektrinių pagamintą nuolatinę įtampą į kintamąją [4], [5], [6]. Pakeitus alternatyviųjų energijos šaltinių generuojamą elektros srovę į kintamąją, pastarąją galima naudoti visiems įprastiems prietaisams maitinti pramoniniu 50 Hz dažniu.

Inverterių veikimui su vietiniu elektros tinklu yra keliami kokybiniai reikalavimai [4], [7], [8]: išsijungti, jeigu tinkle įtampos nuostoliai peržengė standartais numatytas ribas; esant dideliame tinklo dažnio nuokrypiui nedelsiant sustoti veikti; esant kintamosios įtampos sinusoidės anomalijomis tinkle – nedelsiant sustoti veikti; generuojant srovę į elektros tinklą neperžengti standartų numatytų aukštesniųjų harmonikų lygio; turi atitikti elektromagnetinio suderinamumo sąlygą su vietiniu elektros tinklu [9]; turi būti maži energijos nuostoliai [10].

Vienas iš svarbiausių reikalavimų inverterio generuojamai srovei – aukštesniųjų harmonikų generavimo ribojimas į tinklą. Harmonikas svarbu riboti, nes jos sukelia keletą neigiamų pasekmių elektros tinkle [7], [8], [9]:

- laidininkuose didina galios nuostolius;
- ženkliai didina transformatorių ir variklių magnetolaidžiuose sukurinių srovių kuriamus galios nuostolius;
- nelyginių aukštesniųjų harmonikų suma gali perkrauti neutralės laidą, todėl laidas gali nudegti, vartotojų pusėje įtampa padidėja iki linijinės 400 V įtampos vertės;
- sukelia rezonansinius reiškinius tinkle;
- pablogina elektros energijos kokybę, nes iškreipiama sinusinė forma;
- generuoja elektromagnetinius trikdžius;

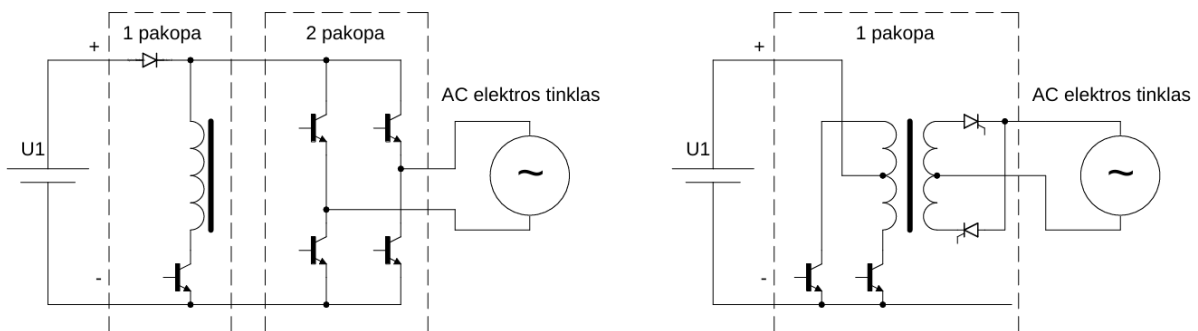
- jautriems elektros imtuvams, elektronikos prietaisams padidina elektros suvartojimą, t. y. mažina jų efektyvumą. Taip pat dėl didesnio energijos vartojimo mažėja įrangos ilgaamžiškumas ir patikimumas.

Dėl šių išvardintų pasekmių harmonikų ribojimas inverteriams yra aktualus.

Tipiniai inverteriai turi šias galios elektronikos tipines pakopas (1 pav.) [11]:

- įtampos lygio keitimo galios elektronikos dalis – šis lygis skirtas reikiamos amplitudės įtampai inverterio išėjime gauti;
- invertuojanti galios elektronikos dalis eina nuosekliai po įtampos lygio keitimo dalies. Šios dalies paskirtis – atkurti kintamosios įtampos signalą išėjime, pasiekiant reikiamą amplitudę ir signalo kokybę.

Tokie tipiniai inverteriai turi daugiau elektronikos komponentų, kurie sumažina paties inverterio efektyvumą ir visos sistemos atsiperkamumą [11]. Todėl šiame straipsnyje siūlomas kitokios topologijos inverteris, galintis su viena keitimo pakopa keisti signalo amplitudę ir pateikti kintamosios įtampos srovę. Toks inverteris turi mažiau galios elektronikos komponentų, o tai padidina jo patikimumą ir efektyvumą [11]. Tačiau siūlomo inverterio galios elektronikos trakto valdymas yra sudėtingesnis – reikalauja sinchroniškai valdyti aukštinančios keitiklio pakopos raktus, kurie kartu turi veikti ir kaip invertuojanti dalis. Tokiai sistemai valdyti reikalinga specifinė valdymo dalis [12], kuri aprašyta šiame straipsnyje. Tyrimo objektas – siūlomos topologijos inverterio veikimo stabilumas ir išėjimo signalo kokybė, kurią įvertins THD (angl. *total harmonic distortion*) analizė. Tam tikslui sukurtas virtualus *Matlab* modelis pasiūlytam inverterio veikimui analizuoti.



1. pav. Tipinės dviejų pakopų (kairėje) ir vienos pakopos (dešinėje) inverterių struktūros

Sudarytu imitaciniu modeliu *Matlab* aplinkoje ir jo valdymo blokais tiriama pasiūlyto inverterio išėjime generuojamos įtampos ir srovės atkūrimo kokybė. Bandymais norima ištirti siūlomo inverterio veikimo stabilumą ir adaptaciją inverteriui veikiant salos ir su vietiniu elektros tinklu susietu režimais. Kadangi inverteriams yra taikomi generuojamos srovės (veikiant sinchroniškai su tinklu) ir įtampos (veikiant salos režimu) aukštesniųjų harmoninių iškreipimų apribojimai, būtina ištirti pasiūlyto inverterio išėjimo signalų aukštesniųjų harmonikų vertes ir adaptaciją šiais atvejais:

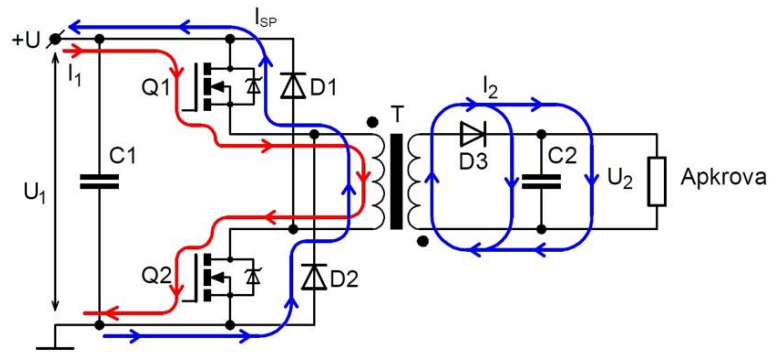
- esant netiesinėms apkrovoms veikiant salos režimu;
- esant iškreiptai tinklo įtampai veikiant sinchroniškai su elektros tinklu.

### Siūlomo inverterio struktūra ir veikimo principas

Pasiūlytos topologijos inverterio veikimo principas pagrįstas „pusės tiltelio“ keitiklio veikimo principu [13], veikiant dviem raktams – lauko tranzistoriams [14]. Šie raktai turi lygiagrečiai įjungtus diodus – nevaldomus raktus, kurie sujungti taip, kad jie nebūtų laidūs esant prijungtai pirminio maitinimo šaltinio kuriamai įtampai. Siūlomo keitiklio veikimo principas pagrįstas IPM (impulsų pločio moduliacija) dviem vyksmais per ciklą (2 pav.):

1. Kai valdomi raktai Q1 ir Q2 atsidaro (2 pav.), tuomet pirminis maitinimo šaltinis sujungiamas su transformatoriaus pirmine apvija. Transformatoriaus pirmine apvija ima tekėti srovė, o magnetiniame lauke kaupiama energija.

2. Kai valdomi raktai Q1 ir Q2 užsidaro (2 pav.), tuomet dėl saviindukcijos reiškinių pirminėje ir antrinėje apvijoje išlaisvinta magnetinio lauko energija sukuria saviindukcijos elektrovaras. Antrine apvija tekanti srovė įkrauna keitiklio išėjime esantį kondensatorių, kuris maitina apkrovą. Dėl atitinkamai parinkto santykio tarp pirminės ir antrinės transformatoriaus apvijų pirminėje apvijoje indukuota elektrovara tampa parazitiniu viršįtampiu, kurio sukurtos srovės įtaką mažina nevaldomi raktai – diodai D1 ir D2. Taip viršįtamčio energija grąžinama atgal į maitinimo šaltinį ir gali būti panaudota kituose energijos perdavimo cikluose.



2 pav. Siūlomo keitiklio principinė elektrinė schema ir srovių pasiskirstymas. Raudona – pirmojo veikimo ciklo kontūrinė srovė; mėlyna – antro veikimo ciklo kontūrinės srovės

Kadangi viršįtampis antrame veikimo cikle per nevaldomus raktus (diodus D1 ir D2) gesinamas aktyviai, siūlomoje keitiklio topologijoje lauko tranzistorių tiesioginė įtampa gali būti parenkama mažesnė negu tradiciniuose vieno rakto keitikliuose [15], [16], kur paprastai tranzistoriai parenkami daug didesnės įtampos nei pirminio maitinimo šaltinio įtampa. Tradiciniuose vieno rakto keitikliuose tranzistoriai parenkami taip, kad atlaikytų viršįtamčio ir antrinės įtampos atvaizdo amplitudinę vertę:

$$U_{maks} = U_1 + U_{SP} + U_2 \frac{n_1}{n_2}, \quad (1)$$

čia  $U_{maks}$  – maksimali indukuota įtampa;  $U_1$ ,  $U_2$  – keitiklio įėjimo ir išėjimo įtampos;  $U_{SP}$  – saviindukcijos kuriamas viršįtampis;  $n_1$  ir  $n_2$  pirminės ir antrinės apvijų vijų skaičius.

Kitas siūlomos šio keitiklio topologijos privalumas – parenkami žemesnės įtampos lauko tranzistoriai turi mažesnę laidžiojo kanalo santaka-ištaka elektrinę varžą, dėl to išskiriami galios nuostoliai tranzistoriuose sumažėja – padidėja keitiklio naudingumo koeficientas [15], [17].

Siūlomas keitiklis veikia kaip tipinis srovės šaltinis išėjime, jeigu tarp įėjimo  $U_1$  ir  $U_2$  išėjimo įtampų yra tenkinama sąlyga:

$$U_1 > U_2 \frac{n_1}{n_2}. \quad (2)$$

Jeigu ši sąlyga nėra tenkinama, keitiklis veikia kaip įprastas įtampos transformatorius – pirminėje apvijoje indukuotas antrinės apvijos įtampos atvaizdas nukreipiamas atgal į maitinimo šaltinį kaip saviindukcijos elektrovara. Tuomet antrinė indukuota įtampa priklausys nuo keitiklio maitinimo šaltinio amplitudės ir transformatoriaus apvijų santykio:

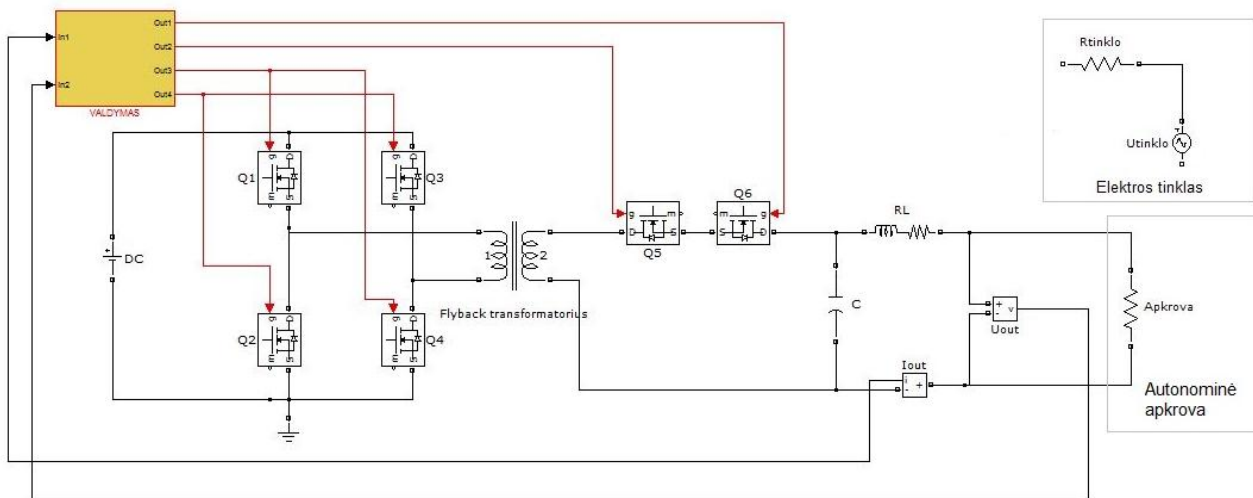
$$U_2 = U_1 \frac{n_2}{n_1}. \quad (3)$$

### Siūlomo inverterio, sudaryto iš dviejų pasiūlyto tipo keitiklių, modelis *Matlab* aplinkoje

Pagal pasiūlytą keitiklio modelį (2 pav.) *Matlab* aplinkoje sudarytas inverterio eksperimentinis imitacinis modelis (3 pav.), pirminėje grandinėje turintis dvi poras siūlomo tipo keitiklių, kurie sujungti priešpriešai.

Inverterio struktūra skiriasi nuo klasikinių tuo, kad ji yra vieno laipsnio [12]. Kitaip tariant, viena keitiklinė dalis atlieka keletą funkcijų: aukština įtampą iki tinklo amplitudinės vertės; sinchronizuotai tiekia kintamąją sinusinę srovę apkrovai arba vietiniam elektros tinklui; elektriškai izoluoja keitiklio įėjimo (pirminę) ir išėjimo (antrinę) grandines. Keitiklis generuoja teigiamą pusperiodį komutuojant sinuso impulso pločio moduliacijos signalais lauko tranzistorius Q2 ir Q3 įėjime ir per šį pusperiodį laikant atidarytą lauko tranzistorių Q5 (3 pav.). Tuomet Q6 tranzistorius nėra laidus, tačiau

lygiagrečiai Q6 įjungtu nevaldomu raktu – galios diodu perduodama teigiamo poliškumo elektros srovė. Komutuojant tokiu pat metodu priešingus raktus Q1, Q4, Q6, išėjime atkuriamas neigiamas pusperiodis.



3 pav. Inverterio imitacinis modelis Matlab aplinkoje

Inverterio raktams Q1-Q6 valdyti, sudarytas blokas VALDYMAS (3 pav.). Šio bloko paskirtis – sinchronizuotai valdyti lauko tranzistorius ir priimti neigiamą grįžtamąjį ryšį, kuris tiekia signalą sistemai apie atkuriamą parametą inverterio išėjime. Grįžtamuoju ryšiu, priklausomai nuo to, ar inverterio modelio veikimas bus tiriamas veikiant autonomiškai ar lygiagrečiai su elektros tinklo sistema, kontroliuojamas parametras bus skirtingas:

1. Imituojant inverterio veikimą autonomiškai (energetinėje saloje), kontroliuojamas parametras turi būti keitiklio išėjimo įtampa „In2“ (4 pav. a); elektros energijos šaltinis turi veikti kaip nustatytos amplitudės įtampos šaltinis.

2. Imituojant inverterio veikimą lygiagrečiai su elektros tinklu, kontroliuojamas parametras turi būti keitiklio išėjime generuojama srovė „In1“ (4 pav. b), t. y. inverteris turi veikti kaip kintamos srovės šaltinis. Tai pat sinchronizacijai su elektros tinklu vykdyti turi būti naudojamas tinklo įtampos grįžtamasis ryšys „In2“.

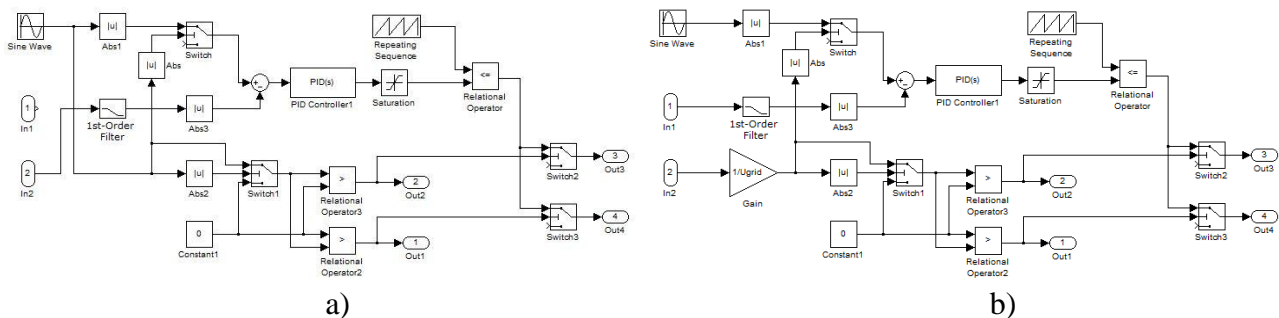
Inverterio išėjimo generuojamų parametų (įtampos ir srovės) signalams formuoti parinktas PID reguliatorius „PID Controller“, kurio koeficientų svoriai P, I ir D gauti testuojant keitiklį iteraciniu metodu. Testavimas atliekamas tol, kol gaunamas stabilus, sinusinei formai artimiausias išėjimo signalas. PID tolydaus signalo vertimui į impulsinį aukšto dažnio signalą panaudotas „Repeating Sequence“ blokas su komparatoriumi „Relational Operator“. Pjūklų formos signalas palyginamas su PID reguliatoriaus signalu ir išėjime gaunamas tranzistorių valdymo impulsinis signalas. „1st-Order Filter“ blokas naudojamas kaip žemo dažnio filtras siekiant eliminuoti liekamąsias impulsinio signalo nešlio dažnio pulsacijas išėjime. Pulsacijos kuriamos Q1–Q4 lauko tranzistorių. Sinusinės srovės arba įtampos pusperiodžiams (teigiamiems ir neigiamiems formuoti panaudoti „Switch1“, „Relational Operator2“ ir „Relational Operator2“ blokai, kuriais perjunginėjami atitinkami tranzistoriai pusperiodžiui sugeneruoti. Kaip sinusinio signalo šaltinis eksperimentui naudojamas „Sine Wave“ generatorius, pagal kurį generuojamas įtampos signalas išėjime veikiant salos režimu; generuojamas srovės signalas veikiant sinchroniškai su tinklu. Įtampos ir srovės išėjimo signalai pamatuojami modelyje (3 pav.) prijungtais matavimo blokais „Uout“ ir „Iout“. Gautais duomenų masyvais atvaizduojamos gautos įtampos ir srovės kreivės, atliekama išėjimo signalų THD analizė.

Sukurtas modelis (3 pav.) imituoja žemos įtampos iki 50 V įėjimo įtampos mažos galios vienfazio inverterio veikimą iki 350 W, kuris paprastai priskiriamas mikroinverteriams, veikiantiems individualiai su pavieniu fotovoltiniu moduliu. Žemos nuolatinės įtampos pusėje imituojami Q1–Q4 tipiniai lauko tranzistoriai, turintys mažą laidžiojo kanalo varžą  $R_{DS}=15 \text{ m}\Omega$  esant laidžiam kanalui,

ir tiesioginė įtampa  $U_{DS}=150V$  tranzistoriui esant nelaidžioje būsenoje. Aukštos įtampos pusėje (išėjime) imituojami Q5–Q6 lauko tranzistoriai, turintys laidžiojo kanalo varžą  $R_{DS}=0,53 \Omega$  esant laidžiam kanalui, ir tiesioginė įtampa  $U_{DS}=500 V$  tranzistoriui esant nelaidžioje būsenoje. Išėjime filtrą imituojančio RLC jungimo parametrai:  $R=0.072 \Omega$ ;  $C=0.15 \mu F$ , 400 V;  $L=34 mH$ . Imituojamo transformatoriaus „Flyback transformatorius“ bloko parametrai pateikti lentelėje:

1 lentelė. „Flyback transformatorius“ bloko parametrai

Parametras	Nominalas
Pirminė įtampa, V	55
Antrinė įtampa, V	340
Induktyvumas, $\mu H$	42
Pirminės apvijos varža, $\Omega$	0,008
Antrinės apvijos varža, $\Omega$	0,472
Pirminės ir antrinės apvijų santykis	1:12

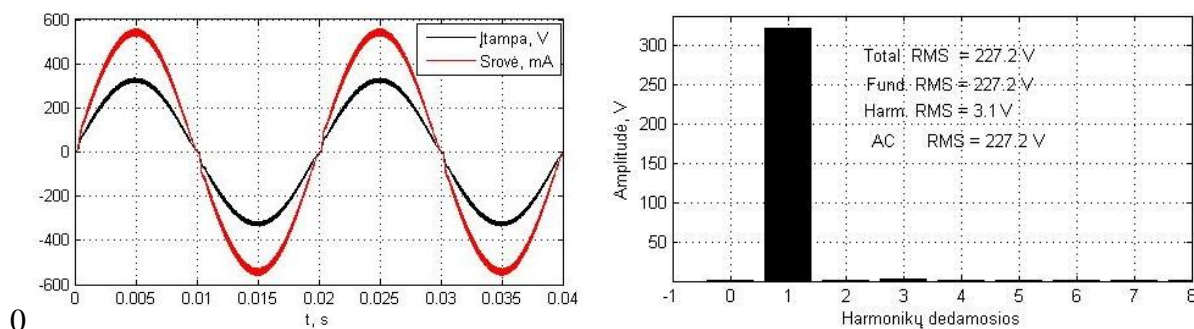


4 pav. Inverterio valdymo bloko modelis *Matlab* aplinkoje: a) – autonomiškai veikiančio keitiklio; b) keitiklio, veikiančio lygiagrečiai su elektros tinklu

### Autonomiškai veikiančio inverterio tyrimas *Matlab* aplinkoje

Autonomiškai veikiančiame tinkle inverteris turi palaikyti sinusinę išėjimo įtampą nepriklausomai nuo to, kokio pobūdžio yra apkrova: tiesinė ar netiesinė. Inverterio modelio eksperimentai atlikti naudojant 4 pav. a) valdymo modelį, kai sistemos grįžtamasis ryšys yra generuojama įtampa „In2“.

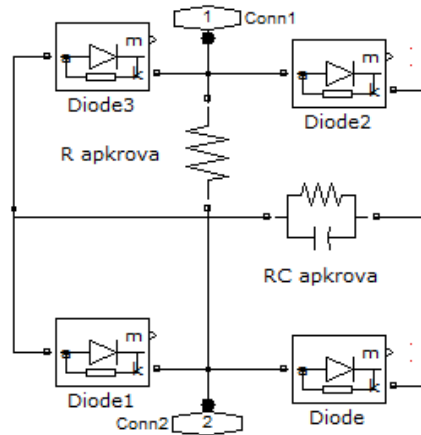
Imituotas inverterio modelio veikimas *Matlab* aplinkoje apkraunant  $600 \Omega$  aktyvine varža. Gautas inverterio įtampos ir srovės kreivės, atlikta greitosios Furjė transformacijos analizė (5 pav.). Inverteriu nuolatine 50 V įtampa įėjime pakeista į kintamąją 230 V įtampą išėjime, tam panaudojant 30 KHz nešlio dažnį (PID reguliatoriaus koeficientai bandymo metu:  $P=1$ ;  $I=4000$ ,  $D=0$ ).



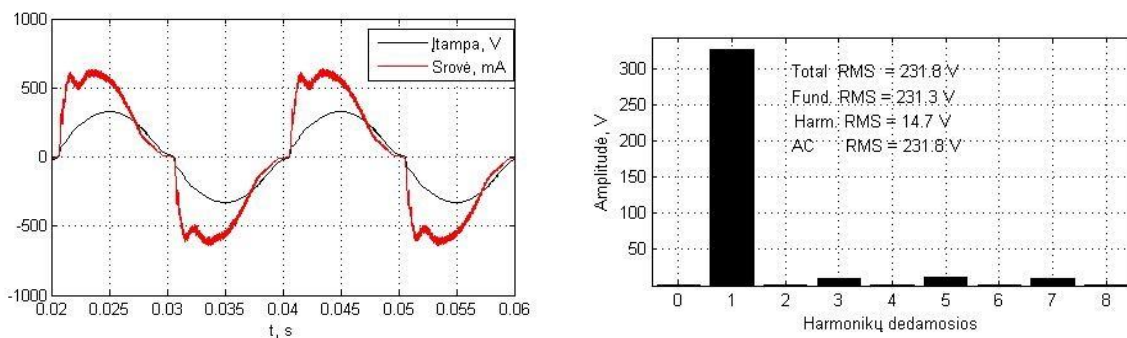
5 pav. Autonomiškai veikiančio inverterio eksperimento rezultatai, kai išėjime prijungta  $600 \Omega$  aktyvioji varža. Kairėje – įtampos ir srovės kreivės; dešinėje – harmonikų analizė.

Iš gautų eksperimento rezultatų matyti, kad keitiklis, veikdamas su tiesine aktyvine apkrova, išėjime kuria kokybišką sinusinės įtampos kreivę (5 pav.), tai įrodo gautas 3,1 V aukštesnių harmonikų svoris, t. y. tik 1,36 proc. didesnis, palyginti su fundamentaliąja 50 Hz harmonika. Labiausiai įtampos forma iškreipta laiko momentu pareinant per nulį, kai inverteris vykdo „dead time“ procesą, reikalingą raktų Q5 ir Q6 perjungimui.

Kitame eksperimente inverterio eksperimentinis modelis apkrautas lygiagrečiai sujungtomis dviem apkrovų rūšimis:  $1200 \Omega$  aktyvine tiesine varža ir srovės lyginimo tilteliu, kurio išėjime yra lygiagrečiai jungtas  $2 \mu\text{F}$  kondensatorius ir  $1200 \Omega$  aktyvinė apkrova (6 pav.). Inverterio veikimas imituotas tokiomis pačiomis sąlygomis kaip ir su tiesiniu elementu (5 pav.). Gautos inverterio įtampos ir srovės kreivės, atlikta greitosios Furjė transformacijos analizė (7 pav.).



6 pav. Netiesinės apkrovos modelis su srovės lyginimo tilteliu



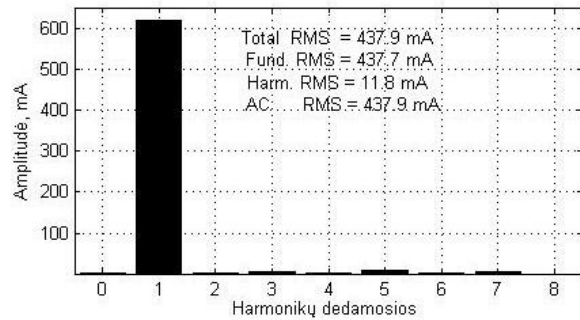
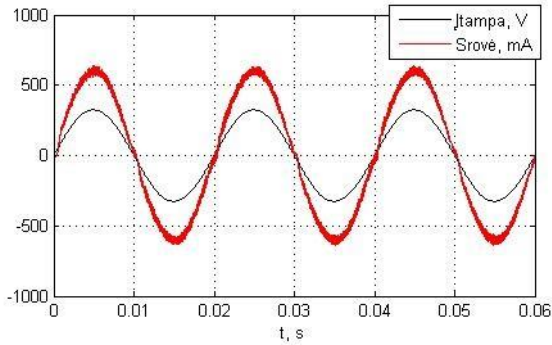
7 pav. Autonomiškai veikiančio inverterio eksperimento rezultatai, kai išėjime prijungta netiesinė apkrova. Kairėje – įtampos ir srovės kreivės; dešinėje – harmonikų analizė.

Netiesinis elementas – lyginimo tiltelis su RC apkrova – vartoja pulsuojančią inverterio srovę (6 pav.), tokia vartojimo srovė yra būdinga daugeliui tipinių elektronikos prietaisų. Lyginant 5 ir 7 pav. rezultatus, aukštesnių harmonikų svoris, palyginti su fundamentaliąja 50 Hz harmonika, padidėjo iki 14,7 V, t. y. 6,34 proc. Didžiausi išėjimo įtampos harmoniniai iškreipymai pasireiškė tais momentais, kai pareikalaujama srovė iš inverterio didėja maksimaliu tempu.

### Lygiagrečiai su elektros tinklu veikiančio inverterio tyrimas *Matlab* aplinkoje

Lygiagrečiai su elektros tinklu veikiantis inverteris turi adaptuotis prie tinklo įtampos kreivės formos ir sinchroniškai tiekti į tinklą sinusinę srovę, nepriklausomai nuo to, kiek tinklas yra užterštas aukštesnėmis harmonikomis. Inverteriui veikiant lygiagrečiai su tinklu kontroliuojamas parametras – tiekiamą į elektros tinklą srovę „In1“. Inverterio bandymai atlikti naudojant 4 pav. b) valdymo modelį. Išbandytas inverterio veikimas idealiam sinusinės kreivės 230 V įtampos tinkle, tiekiant tinklui 600 mA amplitudės srovę. Gautos inverterio įtampos ir srovės kreivės, atlikta greitosios Furjė transformacijos analizė (8 pav.).

Inverterio veikimas imituotas 30 KHz nešlio dažniu keičiant nuolatinę 50 V įtampą įėjime į kintamąją 230 V įtampą išėjime. PID regulatoriaus koeficientai bandymo metu:  $P=0,4$ ;  $I=4000$ ,  $D=0$ . Iš gautų rezultatų 8 pav. matyti, kad keitiklio srovės iškreipymas aukštesnėmis harmonikomis nėra žymus, palyginti su fundamentalia 50 Hz srovės harmonika, ir sudaro tik 11,8 mA, t. y. tik 2,6 proc.

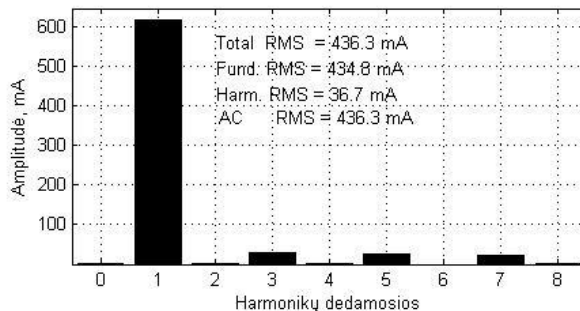
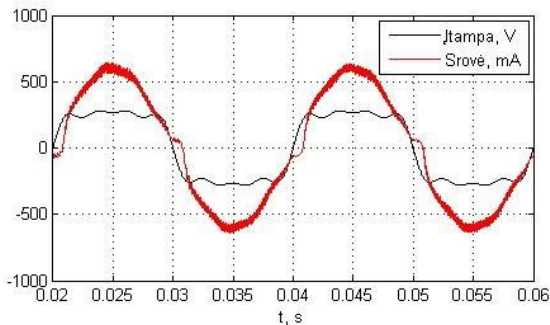


8 pav. Lygiagretaus inverterio darbo su idealaus sinuso elektros tinklu eksperimento rezultatai. Kairėje – įtampos ir srovės kreivės; dešinėje – harmonikų analizė

Kitame bandyme inverterio veikimas imituojamas dirbant lygiagrečiai su elektros tinklu, turinčiu kintamąją įtampą su aukštesnės 3, 5, 7 eilės harmonikomis. Bendra tinklo įtampos kreivės išraiška laiko atžvilgiu aprašoma pagal formulę:

$$u_{tinklo} = 325 \sin(2\pi f_1 t) + 80 \sin(2\pi f_3 t) + 50 \sin(2\pi f_5 t) + 30 \sin(2\pi f_7 t) \quad (5)$$

čia  $f_1$  – fundamentalioji harmonika 50 Hz;  $f_3, f_5, f_7$  – aukštesnės atitinkamai 150, 250, 350 Hz eilės harmonikos. Inverterio veikimas imituotas tokiu pat impulso pločio moduliacijos nešlio dažniu ir PID reguliatoriaus koeficientų nustatymais kaip ir idealaus tinklo atveju. Toks įtampos iškreipimas elektros tinkle praktiškai yra kritinis ir retai pasitaikantis, šiuo eksperimentu norima įvertinti siūlomo inverterio gebėjimą adaptuotis prie iškreiptos tinklo įtampos. Gautos tinklo įtampos ir keitiklio išėjimo srovės kreivės, atlikta greitosios Furjė transformacijos analizė (9 pav.).



9 pav. Lygiagretaus inverterio darbo su elektros tinklu, turinčiu kintamąją įtampą su aukštesnės eilės harmonikomis, eksperimento rezultatai. Kairėje – įtampos ir srovės kreivės; dešinėje – harmonikų analizė

Įvertinus ženkliai iškreiptą aukštesnių harmonikų tinklo įtampą (9 pav.), inverterio išėjimo srovė efektyviai adaptuojasi. Srovės iškreipimai, palyginti su fundamentaliaja 50 Hz harmonika, siekia tik 36,7 mA, t. y. 8,5 proc. fundamentaliosios harmonikos dydžio.

### Išvados

Atliktais eksperimentais nustatyta, kaip pasiūlyto inverterio valdymo modelis prisitaiko prie apkrovų veikdamas autonominiu režimu ir kaip adaptuojasi veikdamas lygiagrečiai su esamu elektros tinklu. Atlikus eksperimentus matyti, kad siūlomas inverteris ir jo valdymo modelis adaptuojasi prie tinklo iškraipytos įtampos formos. Parinktas valdymo dėsnis su PID reguliatoriumi geba atlikti korekcijas siekiant sumažinti generuojamos įtampos iškreipimus salos režime (7 pav.), kai veikia su apkrova autonomiškai; veikdamas sinchroniškai geba reaguoti į tinklo įtampos ženklus iškreipimus ir atkurti kokybišką srovę išėjime (9 pav.).

Atliktų eksperimentų rezultatai yra dėsningi ir panašūs, palyginti su klasikiniais tos pačios paskirties inverteriais. Todėl galima teigti, kad inverterio modelis veikia teisingai.

Inverteriui dirbant autonomiškai, išėjimo įtampos kreivės adaptuojasi prie apkrovos parametru. Tai matosi palyginus inverterio darbą su tiesine (4 pav.) ir netiesinė apkrovomis (6 pav.).

Ženkliai iškreipus aukštesnėmis harmonikomis apkrovos srovę, inverterio išėjimo įtampos iškreipimas aukštesnėmis harmonikomis padidėjo 4,98 proc. Tai įrodo rezultatų duomenys 5 ir 7 paveiksluose.

Lyginant inverterio darbą su idealios sinusinės elektros tinklu (8 pav.) ir su tinklu, kurio įtampos forma ženkliai iškreipta aukštesnės eilės harmonikomis (9 pav.), generuojamos srovės kreivės iškreipimas aukštesnės eilės harmonikomis padidėjo nežymiai – tik 5,9 proc. Tai įrodo 8–9 pav. gautų rezultatų duomenys.

Gauti rezultatai bus naudojami atliekant atliekant kitus tyrimus.

## Literatūra

1. P. P. Waghmare, S. Y. Gadgune and P. S. Rajmane, "Solar Energy Integration Using Grid Forming Inverter" 2023 IEEE Engineering Informatics, Melbourne, Australia, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/IEEECONF58110.2023.10520482.
2. S. Asapu, L. Juttiga, D. Bhuvanewari, S. S. Adabala, P. Apireddi and A. Bale, "Implementation of Seven-Level Asymmetrical Multilevel Inverter for Solar PV Application", 2024 International Conference on Distributed Computing and Optimization Techniques (ICDCOT), Bengaluru, India, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICDCOT61034.2024.10516167.
3. J. Lin et al., "Frequency Coupling Suppression Control Strategy for Single-Phase Grid-Tied Inverters in Weak Grid", in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 69, no. 9, pp. 8926-8938, Sept. 2022, doi: 10.1109/TIE.2021.3112989.
4. Vaidya, S., Prasad, K., & Kilby, J., The Role of Multilevel Inverters in Mitigating Harmonics and Improving Power Quality in Renewable-Powered Smart Grids: A Comprehensive Review. 2025 Energies, 18(8), 2065. <https://doi.org/10.3390/en18082065>.
5. D. Sun, S. Wang, L. Du and X. Lu, "Harmonic Compensation Control of Grid Interactive Inverters Based on Data-driven Harmonic State Space Modeling", 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Vancouver, BC, Canada, 2021, pp. 3134-3139, doi: 10.1109/ECCE47101.2021.9596003.
6. X. Xu et al., "Harmonic emission of PV inverters under different voltage supply conditions and operating powers", 2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Belo Horizonte, Brazil, 2016, pp. 373-378, doi: 10.1109/ICHQP.2016.7783394.
7. J. Kim et al., "Fault Contribution of Grid-Following and Grid-Forming Inverters Considering Generic Inverter Controls and Ride-through Requirements", IECON 2024 - 50th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Chicago, IL, USA, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/IECON55916.2024.10905413.
8. W. Wang and A. Huque, "Steady State Voltage Regulation Requirements for Grid-Forming Inverter based Power Plant in Microgrid Applications", 2023 IEEE PES Grid Edge Technologies Conference & Exposition (Grid Edge), San Diego, CA, USA, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/GridEdge54130.2023.10102737.
9. M. Schulz and M. Kopf, "Passive DC-input and DC-input/AC-output EMI filter for DC-AC inverter", 2024 14th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMC Compo), Torino, Italy, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/EMCCompo61192.2024.10742067.
10. B. Sun, Y. Qiu, D. Chen and L. Wu, "Boost Mode Single-Stage Multi-Input Current Source Inverter with High-Frequency Transformer", 2024 6th International Conference on Energy Systems and Electrical Power (ICESEP), Wuhan, China, 2024, pp. 1302-1307, doi: 10.1109/ICESEP62218.2024.10651720.
11. S. Ma, H. Wang, G. Zhu and H. Wang, "Power loss analysis and comparison of DC and AC side decoupling module in a H-bridge inverter", 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE).
12. T. B. Immanuel, P. Rathnavel, A. Arikesh, T. B. Steena, S. Kavitha and G. Ezhilarasi, "Performance Analysis of Single Stage Inverter Employing Fuzzy Controller", 2022 8th International Conference on Smart Structures and Systems (ICSSS), Chennai, India, 2022, pp. 01-05, doi: 10.1109/ICSSS54381.2022.9782180.
13. Y. Pirani and H. Salehfar, "Comparative Study of Single Source Boosted Bipolar PWM Half-Bridge Inverter and Single Source Boosted Bipolar PWM H-Bridge Inverter", 2023 North American Power Symposium (NAPS), Asheville, NC, USA, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/NAPS58826.2023.10318610.
14. Q. Song, W. Wang, S. Zhang, Y. Li and M. Ahmad, "The analysis of power losses of power inverter based on SiC MOSFETs", 2019 1st Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), Nevsehir, Turkey, 2019, pp. 152-157, doi: 10.1109/GPECOM.2019.8778499.
15. T. R. Amalraj, B. M. Jos and A. M. Kottalil, "Feed forward controlled dual buck full-bridge inverter", 2017 International Conference on Technological Advancements in Power and Energy (TAP Energy), Kollam, India, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/TAPENERGY.2017.8397368.

16. G. H. Kwon, S. W. Jeong, D. I. Lee and H. S. Youn, "Triple Planar Transformer-Based Active-Clamp Forward-Flyback Converter for High-Power LDC Applications", 2024 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Phoenix, AZ, USA, 2024, pp. 2756-2761, doi: 10.1109/ECCE55643.2024.10861854.
17. R. Kanthimathi and J. Kamala, "Analysis of different flyback Converter topologies", 2015 International Conference on Industrial Instrumentation and Control (ICIC), Pune, India, 2015, pp. 1248-1252, doi: 10.1109/IIC.2015.7150939.

### **Investigation Of Inverter Simulation Model In Matlab**

Paper describes simulation results of inverter model based on proposed converter with two transistor switch-es using Matlab. The aim of this research to investigate behavior of proposed model of the micro inverter based on proposed converter, when inverter operates autonomously (islanding) and running parallel in the local electricity network. The simulation of inverter's operation on autonomous mode using nonlinear load was performed, as well as it runs in parallel with the local power network polluted with harmonics. The main goal of these simulations is to observe the response of output current of inverter to the harmonical distortions of local grid. Examination of inverter model based on proposed converter in Matlab environment helps to determinate the resistance of inverter output signal to distortion in local electrical grid using two working modes: 1. the autonomous mode using nonlinear load; 2. the parallel mode with local electric grid polluted by higher order harmonics.

**Key words:** power electronics, inverter, converter, simulation model, Matlab.