



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

**Algirdas Buikys**

**ATSINAUJINANČIŲ IR REZERVINIŲ ENERGIJOS ŠALTINIŲ**  
**GALIŲ SUMAVIMO METODŲ TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Doc. dr. Ramūnas Ramanauskas

**KAUNAS, 2016**

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

**ATSINAUJINANČIŲ IR REZERVINIŲ ENERGIJOS ŠALTINIŲ  
GALIŲ SUMAVIMO METODŲ TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas  
Elektronikos inžinerija (621H61002)

**Vadovas**

Doc. dr. Ramūnas Ramanauskas

**Recenzentas**

Doc. dr. Mindaugas Knyva

**Projektą atliko**

Algirdas Buikys

**KAUNAS, 2016**



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Algirdas Buikys

(Studento vardas, pavardė)

Elektronikos inžinerija, 621H61002

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Atsinaujinančių ir rezervinių energijos šaltinių galių  
sumavimo metodų tyrimas“

### AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 \_\_\_\_ m. \_\_\_\_\_ d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Algirdo Buikio**, baigiamasis projektas tema „Atsinaujinančių ir rezervinių energijos šaltinių galių sumavimo metodų tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

\_\_\_\_\_  
(vardas, pavardė)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

Buikys, A. Atsinaujinančių ir rezervinių energijos šaltinių galių sumavimo metodų tyrimas. Elektronikos inžinerijos magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Ramūnas Ramanaukas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektronikos inžinerijos katedra.

Kaunas, 2016. 53 psl.

## SANTRAUKA

Magistro baigiamojo projekto tema – atsinaujinančių ir rezervinių energijos šaltinių galių sumavimo metodų tyrimas. Darbo tikslas – sukurti ir ištirti kelių įėjimų keitiklio raktų valdymo algoritmą, kuris derindamas atsinaujinančio ir rezervinio energijos šaltinių galias, prioritetu laikydamas atsinaujinantį energijos šaltinį, užtikrintų netrikdomą ir nenutrūkstamą apkrovos funkcionavimą. Darbe apžvelgiami lygiagretaus ir nuoseklaus kelių įėjimų keitiklių jungimo privalumai ir trūkumai. Pateiktos kelių įėjimų nuoseklaus jungimo keitiklių struktūrinės schemas, veikimo režimai bei laikinės diagramos. Sumodeliuotos dvi žeminamojo/žeminamojo ir žeminamojo/žeminamojo-aukštinamojo keitiklių schemas ir pateikti simuliacijos rezultatai. Sudaryti nagrinėjamų keitiklių skvebrčių valdymo algoritmai, kurių stabilumas ištirtas keičiant atsinaujinančio energijos šaltinio įtampą ir keitiklio apkrovą.

*Reikšminiai žodžiai: DC/DC keitikliai; kelių įėjimų keitikliai; atsinaujinanti energija; skvebrtis valdantis algoritmas; galių sumavimas.*

Buikys, Algirdas. Research of methods for renewable and reserve energy combining. Final project of electronics engineering master work / supervisor doc. dr. Ramūnas Ramanauškas; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electronics Engineering.

Kaunas, 2016. 53 p.

## SUMMARY

Master's final thesis topic – research of methods for renewable and reserve energy combining. The purpose of this paper is to create and analyze multi-input converter's switches control algorithm, preferring priority to the renewable energy source, which ensure undisturbed and continuous load operation by combining renewable and reserve energy sources. This paper describes advantages and disadvantages of overviewed parallel and sequential multi-input converters. Structural diagrams, operating modes and time diagrams of sequential multi-input converters are given. Simulation results of two buck/buck and one buck/buck-boost multi-input converters are presented. Converters, which control duty cycle algorithms was created, stability was investigated by changing a renewable power source voltage and converters load.

*Keywords: DC/DC converters; multi-input converters; renewable energy; duty cycle control algorithm; energy combining;*

## TURINYS

SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS .....	7
IVADAS .....	8
1. PROBLEMATIKA.....	9
1.1. Saulės elektrinės ir jų įranga.....	10
1.2. Keitiklio apkrovos.....	10
2. NUOLATINĖS ĮTAMPOS KEITIKLIŲ IR KELIŲ ĮĖJIMŲ KEITIKLIŲ APŽVALGA .....	12
2.1. Nuolatinės įtampos keitikliai .....	12
2.2. Kelių įėjimų keitikliai .....	12
2.2.1. Žeminamasis/žeminamasis keitiklis.....	14
2.2.2. Žeminamasis/žeminamasis-aukštinamasis keitiklis .....	18
2.2.3. Žeminamasis-aukštinamasis/žeminamasis-aukštinamasis keitiklis .....	21
2.2.4. Žeminamasis/žeminamasis keitiklis su didesniu žeminimo koeficientu .....	24
2.3. Skyriaus apibendrinimas .....	27
3. KELIŲ ĮĖJIMŲ KEITIKLIŲ MODELIAVIMAI.....	28
3.1. Žeminamojo/žeminamojo keitiklio modeliavimas.....	28
3.2. Didesnio žeminimo koeficiento žeminamojo/žeminamojo keitiklio modeliavimas .....	31
3.3. Žeminamojo/žeminamojo-aukštinamojo keitiklio modeliavimas.....	33
3.4. Žeminančiojo/žeminančiojo nuolatinės srovės keitiklio projektavimas .....	34
3.5. Skverbti valdančio algoritmo modeliavimas ir tyrimas .....	35
3.6. Žeminamojo/žeminamojo su padidintu žeminimo koeficientu skverbčių valdymo algoritmo modeliavimas ir tyrimas .....	45
3.7. Skyriaus apibendrinimas .....	50
IŠVADOS.....	51
INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS.....	52
PRIEDAI .....	54
Priedas 1. Suprojektuoto keitiklio spausdintinio montažo plokštė. ....	54
Priedas 2. Bendra simuliuojamo algoritmo struktūra.....	54
Priedas 3. Bloko, „Duty cycle to PWM“ turinys.....	55
Priedas 4. Apskaičiuotos skverbtiys ir suformuoti IPM signalai. ....	55
Priedas 5. Sudarytas raktų valdymo algoritmas. ....	56
Priedas 6. Bloko „duty cycle correction“ turinys. ....	57
Priedas 7. Algoritmas, papildytas „duty_cycle_correction“ bloku. ....	58
Priedas 8. Apskaičiuota ir pakoreguota skverbti $d_{harvest}$ kai kinta apkrova. ....	58
Priedas 9. Keitiklio naudingumo koeficiento priklausomybės nuo apkrovos galios. ....	58
Priedas 10. Sudarytas raktų valdymo algoritmas. ....	59
Priedas 11. MIC su didesniu žeminimo koeficientu sumodeliuota schema Simulink terpėje. ....	60
Priedas 12. Skverbti apskaičiuojantis ir pakoreguojantis algoritmas Simulink terpėje.....	61
Priedas 13. Keitiklio naudingumo koeficiento priklausomybės nuo apkrovos galios. ....	62

## SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS

USB	Universalioji jungtis (angl. <i>Universal Serial Bus (USB)</i> )
IPM	Impulso pločio moduliacija (angl. <i>Pulse-width modulation (PWM)</i> )
MIC	Kelių įėjimų keitikliai (angl. <i>multi-input converters (MICs)</i> )
DC/DC	Nuolatinės įtampos keitiklis (angl. <i>DC/DC converters</i> )
CCM	Netrūkiųjų srovių režimas (angl. <i>Continuous-Conduction Mode (CCM)</i> )
DCM	Trūkiųjų srovių režimas (angl. <i>Discontinuous-Conduction Mode (DCM)</i> )
MOSFET	Metalo, oksido ir puslaidininkio lauko tranzistorius (angl. <i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET)</i> )
EMI	Elektromagnetinė interferencija (angl. <i>Electromagnetic interference (EMI)</i> )
PI	Proporcinis integralinis (angl. <i>proportional integral</i> )
PCB	Spausdintinė montажinė plokštė (angl. <i>Printed Circuit Board (PCB)</i> )

## IVADAS

Norint sumažinti išlaidas už elektros energiją, galima galią apkrovai tiekti iš atsinaujinančių energijos šaltinių. Tačiau atsinaujinančių energijos šaltinių galia svyruoja priklausomai nuo paros laiko, debesuotumo (pvz. saulės panelės), vėjo srauto (vėjo jėgainės) ir pan. Todėl atsinaujinantys energijos šaltiniai negali užtikrinti nenutrūkstamos energijos tiekimo arba jų tiekiamos galios gali nepakakti. Tokiu atveju galima kombinuoti atsinaujinančio ir rezervinio energijos šaltinių galias. Jeigu atsinaujinančio energijos šaltinio galios neužtenka, ją apkrovai galima tiekti iš rezervinio šaltinio. Tokiose hibridinėse sistemose tinkami kelių įėjimų keitikliai, kurie gali tarpusavyje kombinuoti šaltinių galias ir vienu metu jas tiekti iš atsinaujinančio ir iš rezervinio energijos šaltinių.

Darbo tikslas – sukurti ir ištirti kelių įėjimų keitiklio raktų valdymo algoritmą, kuris derindamas atsinaujinančio ir rezervinio energijos šaltinių galias, prioritetu laikydamas atsinaujinantį energijos šaltinį, užtikrintų netrikdomą ir nenutrūkstamą apkrovos funkcionavimą. Šio tikslo įgyvendinimui iškelti šie uždaviniai:

- Apžvelgti galios sumavimo metodus panaudojant kelių įėjimų keitiklius;
- Sumodeliuoti keitiklių schemas;
- Realizuoti keitiklį;
- Sudaryti keitiklio raktų valdymo algoritmus;
- Ištirti keitiklių, su sudarytais skverbčių valdymo algoritmais, stabilumą.

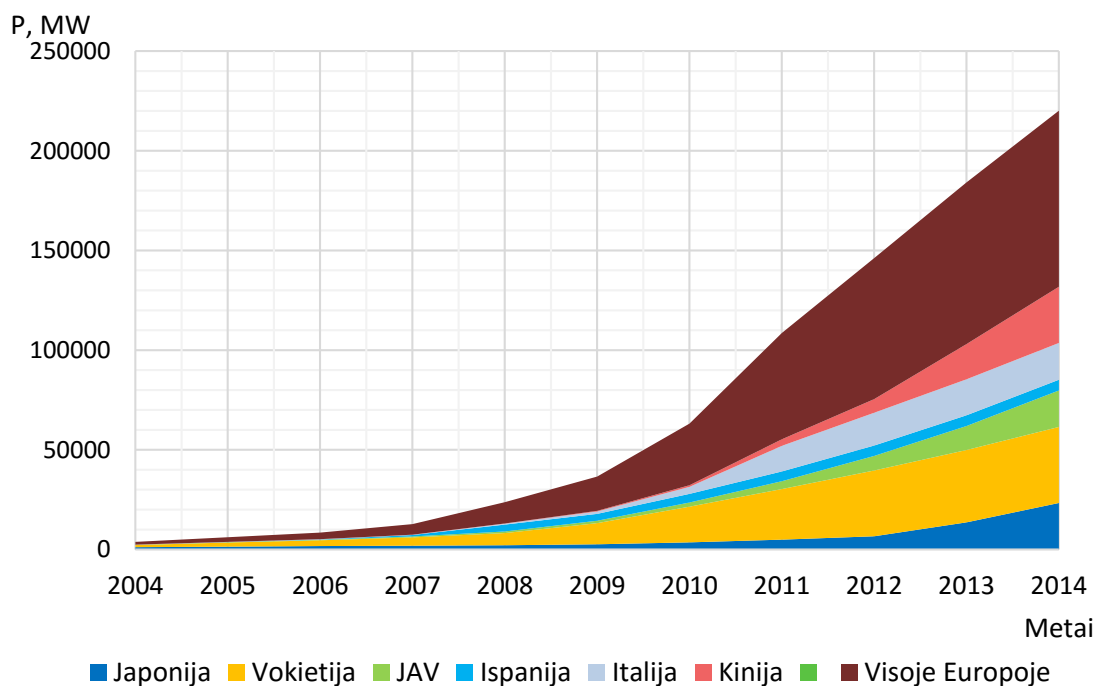


## 1. PROBLEMATIKA

Pasaulyje vis dar teikiama pirmenybė iš iškastinio kuro pagaminamai energijai, tačiau išgaunamos naftos, dujų ir net anglies rezervai gali išsekti per artėjančius dešimtmečius. Deginamas iškastinis kuras išskiria 74 % pasaulio CO<sub>2</sub> dujų. Didėjanti suvartojama elektros energija ir didėjantis užterštumas yra globalios pasaulio problemos. Didesnis atsinaujinančių išteklių energijos naudojimas bei energijos taupymas yra vienos iš svarbiausių, reikalingų sumažinti išmetamųjų šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekį. Todėl atsiranda poreikis aplinkos neteršiančiai elektros energijai. [1]

Į tai atsižvelgdamas Europos Parlamentas, 2009 m. priėmė direktyvą 2009/28/EB, skatinančią naudoti iš atsinaujinančių šaltinių išgaunamą energiją. Šioje direktyvoje nusakomi rodikliai, kuriais apibrėžiama, kokia bendro energijos suvartojimo dalis 2020 m. turi sudaryti atsinaujinanti energija kiekvienoje Europos Sąjungos valstybėje. Pagal šią direktyvą Lietuva turi užtikrinti, kad 2020 m. energija, gaunama iš atsinaujinančių energijos šaltinių, sudarytų 23 % visos suvartojamos energijos. [2]

Europoje didžiausią potencialą turi vėjo ir saulės atsinaujinantys energijos šaltiniai. Per pastaruosius metus saulės energijos išgavimas Europoje padidėjo 15,3 %. 1.1 paveiksle pateikta Japonijoje, Vokietijoje, JAV, Ispanijoje, Italijoje, Kinijoje ir visoje Europoje bendra įdiegtų saulės elektrinių pagaminama galia per pastarąjį dešimtmetį. [3]



1.1 pav. Saulės jėginių pagamina energija per pastarąjį dešimtmetį. [adaptuota pagal 3]

## 1.1. Saulės elektrinės ir jų įranga

Saulės elektrines galima skirstyti į autonomines ir integruotas į energetikos sistemą. Autonominės saulės elektrinės yra sąlyginai mažos galios ir dažniausiai naudojamos sodybose, atskiruose techninės paskirties objektuose. Šios elektrinės dažniausiai turi elektros kaupiklius (akumuliatorių baterijas ir jų įkroviklius). Didesnės galios saulės elektrinės dažniausiai integruojamos į energetikos sistemą.

Saulės elektrinės įrangos, skirtos elektros energijos vartojamos buityje generavimui, perteklinės elektros perdavimui į tinklą, komplektų kainos pateiktos 1.1 lentelėje. [4]

**1.1 lentelė.** Į tinklą jungiamos saulės elektrinės įrangos komplektų kainos [4].

Gamintojas	Galia, <i>kWp</i>	Kaina, €
UAB „Informacinių technologijų pasaulis“	0,080	190,09
	0,200	472,55
	1	2 111,45
	2	4 031,72

Lentelėje pateikti komplektai turi krovimo valdiklius (48 V, 40 A), DC/AC keitiklį, 12 V rozetes ir USB jungtis. Tačiau nuolatinės įtampos keitimas į kintančią, o po to vėl į reikiamo lygio nuolatinę yra brangu ir neefektyvu. Taip pat prie šių komplektų galima jungti tik tuos įrenginius, kuriems reikalingas fiksuotas 12 V maitinimas. Daugelio namų ūkyje naudojamų prietaisų maitinimo įtampa skirtinga, todėl reikalingas toks keitiklis, kuris automatiškai nustatytų, kokios maitinimo įtampos reikia prietaisui. Siekiant sumažinti elektros energijos sąnaudas, keitiklis turėtų kombinuoti atsinaujinančio ir rezervinio energijos šaltinių galias taip, kad kuo daugiau galios būtų naudojama iš atsinaujinančio energijos šaltinio, o trūkstamas galios kiekis paimamas iš rezervinio šaltinio.

## 1.2. Keitiklio apkrovos

Projektuojamo keitiklio apkrova – namų ūkyje naudojami prietaisai (pvz., nešiojami kompiuteriai, monitoriai, TV priedeliai ir t. t.). Jų maitinimo įtampos, įtampų tolerancijos ir srovės yra įvairios. Norint, kad keitiklis būtų universalus, jo išėjimo įtampų diapazonas turi būti platus, išėjimo įtampos tolerancija tenkinanti pateiktas prietaisų specifikacijose, o greitaveika užtikrinanti netrikdomą ir nenutrūkstamą apkrovos funkcionavimą. 1.2 lentelėje pateiktos kelių buityje naudojamų įrenginių specifikacijos.

**1.2 lentelė.** Įrenginių specifikacijos.

Įrenginys	Maitinimo įtampa, V	Tolerancija, %	Leistini viršįtampiai, %	Srovė, A
Nešiojamas kompiuteris Dell Vostro 1500 [5]	19,5	± 10	135	3,34
Monitorius Acer S231HL [6]	19	± 5	115-135	3,16
Nešiojamas kompiuteris XO [7]	13,5	± 5	-	2,5
Tipinis 45 W maitinimo šaltinis skirtas Notebook PC [8]	12	± 4	125	4
TV star-A557 [9]	12	± 4		2

Norint sumažinti išlaidas už elektros energiją, siekiama sukurti tokį keitiklio raktų valdymo algoritmą, kuris nustatytų, kokios įtampos reikia apkrovai (išmatuotų įrenginio AC/DC keitiklio išėjimo įtampą), kombinuodamas atsinaujinančio bei rezervinio energijos šaltinių įtampas (naudodamas kuo daugiau galios iš atsinaujinančio energijos šaltinio), užtikrintų netrikdomą ir nenutrūkstamą apkrovos funkcionavimą. Keitiklis, reaguodamas į atsinaujinančio energijos šaltinio įtampos ir apkrovos pokyčius, turi užtikrinti, kad išėjimo įtampa būtų lygi rezervinio energijos šaltinio įtampai ( $U_{atraminė} = U_{iš}$ ).

Atsižvelgiant į buityje naudojamos įrangos specifikacijas, keitikliui iškeliami reikalavimai: išėjimo įtampa – iki 20 V arba didesnė, paklaida – mažesnė nei ± 4 %, o pereinamųjų procesų viršįtampiai – mažesni nei 125 %.

## 2. NUOLATINĖS ĮTAMPOS KEITIKLIŲ IR KELIŲ ĮJĖIMŲ KEITIKLIŲ APŽVALGA

Skyriuje apžvelgiami lygiagretaus ir nuoseklaus nuolatinės įtampos keitiklių jungimo privalumai ir trūkumai bei kelių įėjimų keitikliai, sudaryti iš bazinių DC/DC keitiklių (žeminamojo, aukštinamojo, žeminamojo-aukštinamojo). Taip pat pateikti keitiklių veikimo režimai, laikinės diagramos.

### 2.1. Nuolatinės įtampos keitikliai

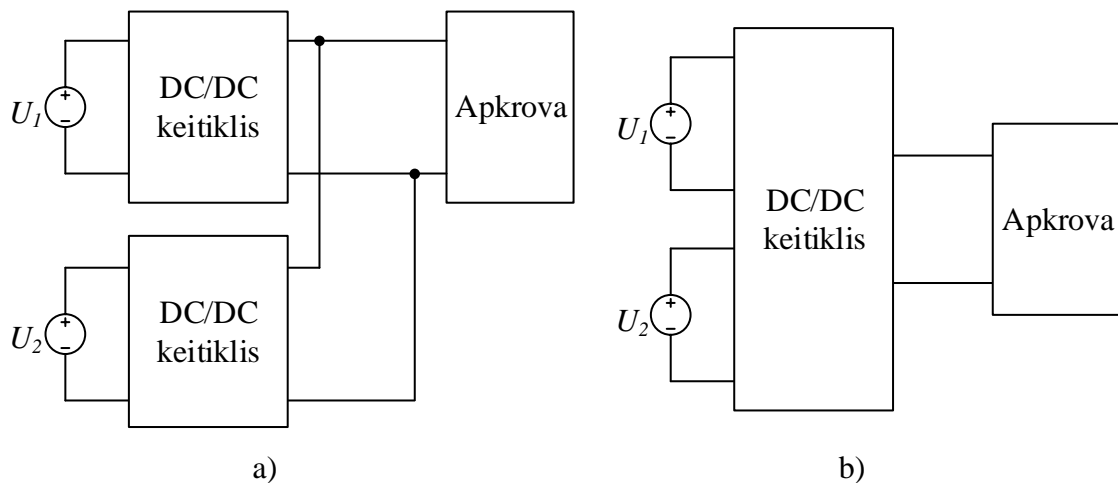
Nuolatinės įtampos keitikliais (angl. *DC/DC converters*) galima keisti nuolatinės įtampos lygį. Keitiklio išėjimo įtampa reguliuojama junginėjant raktą pastoviu dažniu  $f_{sw}$  ir keičiant raktą valdančiojo signalo skverbį (įjungto rakto trukmės  $t_{on}$  ir periodo  $T$  santykis  $d = t_{on}/T$ ). Toks valdymas vadinamas impulso pločio moduliacija (IPM) (angl. *Pulse Width Modulation (PWM)*).

Pagal šaltinio ir apkrovos ryšį keitikliai skirstomi į: galvaniskai susietus ir atskirtus (pvz.: transformatorinis atrišimas).

Galios tiekimą iš kelių energijos šaltinių galima realizuoti sujungiant kelis nuolatinės įtampos keitiklius (žeminamąjį (angl. *buck*), aukštinamąjį (angl. *boost*) ir žeminamąjį-aukštinamąjį (angl. *buck-boost*)).

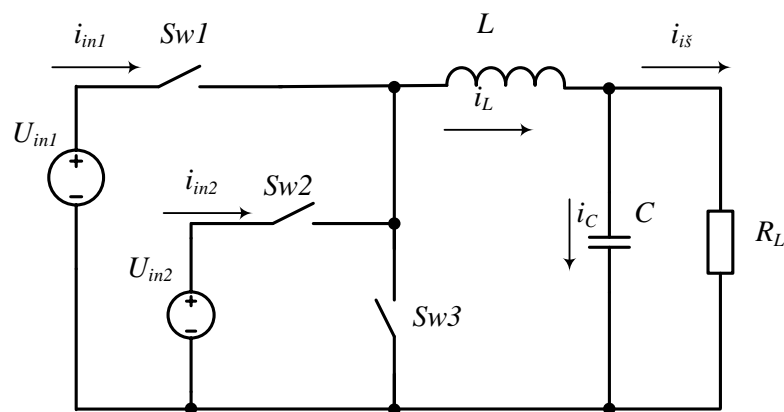
### 2.2. Kelių įėjimų keitikliai

Norint užtikrinti netrikdomą ir nenutrūkstamą apkrovos veikimą, galima energiją apkrovai tiekti iš kelių šaltinių. Struktūrinėje schemoje (žr. 2.1 a pav.) pavaizduota, kaip pora įtampos šaltinių per atskirus nuolatinės įtampos keitiklius prijungti prie apkrovos. Siekiant supaprastinti sistemą, sumažinti elementų skaičių ir jos kainą, naudojami kelių įėjimų keitikliai (angl. *multi-input converters (MICs)*) (žr. 2.1 b pav.). [10]



**2.1 pav.** a) Sistema su dviem atskirais DC/DC keitikliais; b) sistema su vienu bendru DC/DC keitikliu.

Kelių įėjimų įtampos keitikliai gali būti jungiami lygiagrečiai arba nuosekliai. Lygiagretusis keitiklių jungimas aptartas [11] šaltinyje. Naudojant tokį jungimą (žr. 2.2 pav.), dėl šaltinių įtampų amplitudžių skirtumo, raktai SW1 ir SW2 negali būti atidaryti vienu metu ir galią apkrovai gali perduoti tik vienas iš šaltinių (t. y. skverbtybs negali persidengti ir turi būti tenkinama sąlyga  $0 < d_1 + d_2 \leq 1$ , kitaip keitiklis neužtikrins reikiamos išėjimo įtampos). Jeigu šaltinių įtampų amplitudės skirsis ir raktai bus įjungti vienu metu, srovė gali pradėti tekėti iš didesnės įtampos šaltinio į mažesnės įtampos šaltinį taip jį sugadinama.



**2.2 pav.** Lygiagrečiai sujungti maitinimo šaltiniai. [11]

Siekiant naudoti kaip galima mažiau galios iš atraminio energijos šaltinio ir išpildyti sąlygą  $U_{i\text{is}} = U_{\text{atramin\acute{e}}}$ , šis keitiklis tinkamas tik tuo atveju, kai atsinaujinančio energijos šaltinio įtampa didesnė nei atraminio. Šiuo atveju žeminamasis keitiklis mažina atsinaujinančio energijos šaltinio įtampą iki norimo lygio ir atraminis energijos šaltinis yra atjungtas. Vos tik atsinaujinančio energijos šaltinio įtampa tampa mažesnė nei atraminio – rezervinis energijos šaltinis prijungiamas

prie apkrovos, o atsinaujinantis šaltinis atjungiamas. Tokiu atveju atsinaujinančio energijos šaltinio galia neišnaudojama optimaliai.

Norint mažinti suvartojamą tinklo energiją keitiklis turi perduoti kuo daugiau galios apkrovai iš atsinaujinančio energijos šaltinio ir tik tuo atveju kai galios nepakanka, jos stygių imti iš rezervinio energijos šaltinio (priimta, kad  $U_{i\bar{s}} = U_{atramin\bar{e}}$ ). Todėl labai svarbu, kad keitiklis turėtų galimybę galią iš šaltinių apkrovai perduoti vienu metu.

Šiuo atžvilgiu pranašesni keitikliai, kurie yra sujungti nuosekliai. Jungiant DC/DC keitikius nuosekliai, energijos šaltinių įtampų amplitudžių skirtumas nedaro įtakos sistemos veikimui. Tokie kelių įėjimų keitikliai gali tiekti galią apkrovai net ir tada, kai vienas iš šaltinių nebeveikia, taip pat galią apkrovai gali tiekti pasirinktinai vienas iš dviejų šaltinių. Jeigu vieno energijos šaltinio galios neužtenka pilnam ir netrikdomam apkrovos funkcionavimui, galima likusią reikalingą energijos dalį paimti iš antro energijos šaltinio. Kelių įėjimų keitikliai perduoda galią apkrovai netrikdydami vienas kito veikimo. [12]

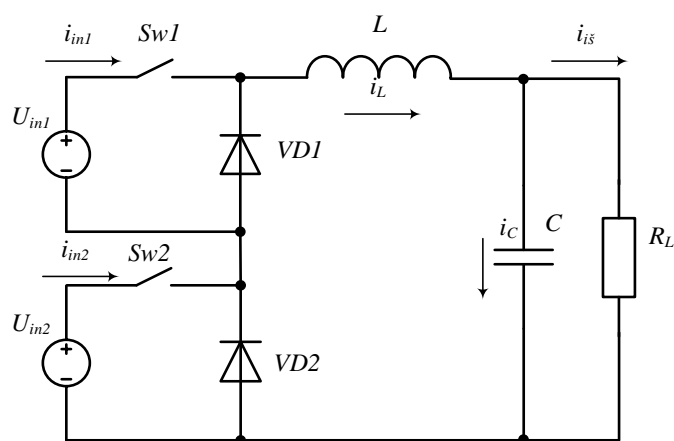
Kelių įėjimų įtampos keitikliai skirstomi į tris grupes: izoliuotus, neizoliuotus ir dalinai izoliuotus (dalinai izoliuoti keitikliai aptarti [13] šaltinyje). Iki šiol aptarti keitikliai yra neizoliuojantys. Šio trūkumo neturi izoliuojantys keitikliai su transformatoriniu ryšiu, nes juose energijos šaltinis yra galvaniskai atskirtas nuo apkrovos [14]. Tokie keitikliai plačiau aptarti [15] – [18] šaltiniuose.

Šiame skyrelyje apžvelgiamos tokios nuolatinių įtampų keitikių kombinacijos:

- Žeminamasis/žeminamasis keitiklis;
- Žeminamasis/žeminamasis-aukštinamasis keitiklis;
- Žeminamasis-aukštinamasis/žeminamasis-aukštinamasis keitiklis.

### **2.2.1. Žeminamasis/žeminamasis keitiklis**

Žeminamasis/žeminamasis keitiklis (žr. 2.3 pav.) gaunamas sujungus žeminamuosius nuolatinės įtampos keitikius. Abu keitikliai sujungti per diodus VD1 ir VD2 prie bendros ritės L ir kondensatoriaus C, taip pat pirmojo šaltinio  $U_{in1}$  neigiamo potencialo kontaktas prijungiamas per diodą VD2 prie antrojo šaltinio  $U_{in2}$  teigiamo potencialo kontakto. Tokiu būdu abu maitinimo šaltiniai sujungti nuosekliai ir keitiklis galią apkrovai gali perduoti vienu metu iš abiejų šaltinių arba atskirai.



2.3 pav. MIC sudarytas iš žeminamojo/žeminamojo nuolatinės įtampos keitiklių. [19]

Pagal raktų SW1 ir SW2 būsenas kelių įėjimų nuolatinės įtampos keitiklio veikimą galima suskirstyti į keturis režimus (žr. 2.1 lentelė).

2.1 lentelė. Žeminamojo/žeminamojo keitiklio darbo režimai.

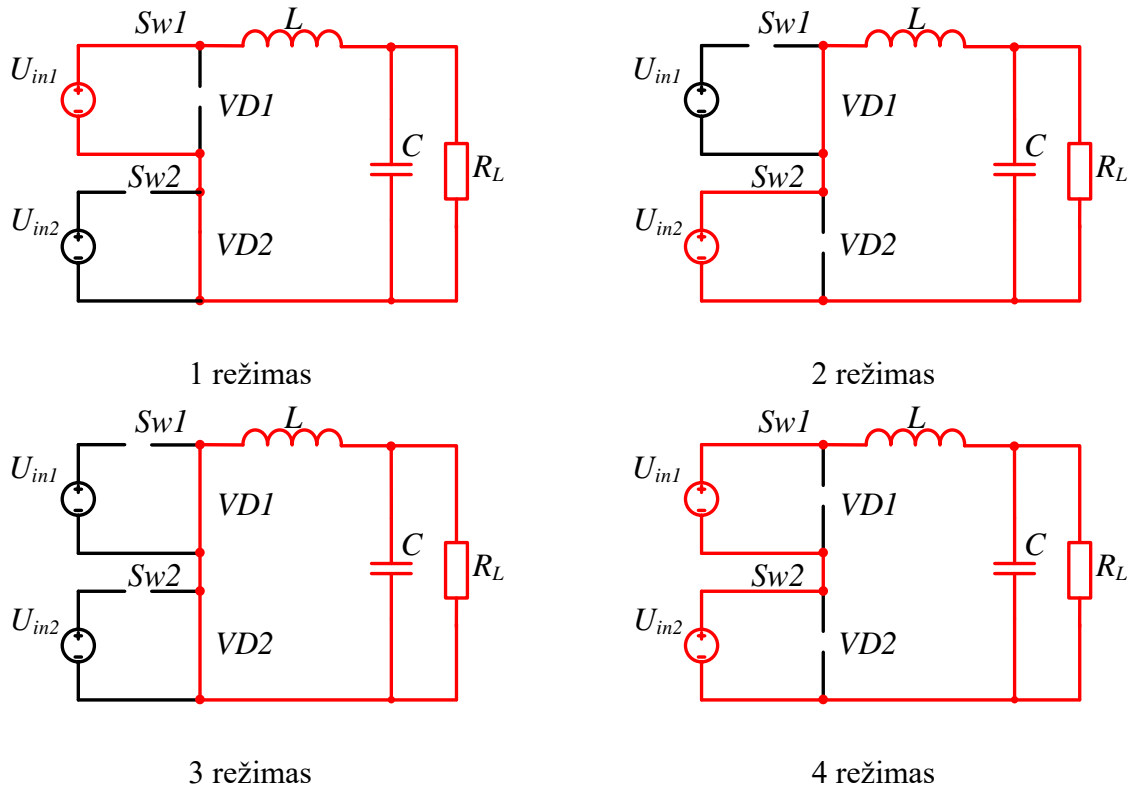
	Raktas SW1	Raktas SW2
1 režimas	Ijungtas	Išjungtas
2 režimas	Išjungtas	Ijungtas
3 režimas	Išjungtas	Išjungtas
4 režimas	Ijungtas	Ijungtas

**1 režimas.** Kai raktas SW1 įjungtas, o SW2 – išjungtas, energija apkrovai  $R_L$  perduodama tik iš pirmojo šaltinio  $U_{in1}$ . Teigiama maitinimo šaltinio įtampa, prijungta prie diodo VD1 katodo jį uždaro, todėl srovė  $i_{in1}$  teka per ritę  $L$  ir energija kaupiama ritės magnetiniame lauke, o kondensatorius  $C$  įsikrauna (žr. 2.4 pav. 1 režimas). Laikinėse diagramose (žr. 2.5 pav.) matyti, kad laiko momentu  $t_{on SW1}$  srovė  $i_L$  auga, o įtampa ant ritės yra lygi  $(U_{in1} - U_{is})$ .

**2 režimas.** Raktas SW1 išjungtas, SW2 – įjungtas, keitiklis energiją apkrovai atiduoda iš antrojo šaltinio  $U_{in2}$ . Šaltinio įtampa, prijungta prie diodo VD2 katodo jį uždaro, todėl srovė  $i_{in2}$  teka per ritę  $L$  ir energija toliau kaupiama ritės magnetiniame lauke, o kondensatorius  $C$  įsikrauna (žr. 2.4 pav. 2 režimas). Laikinėje diagramoje matyti, kad  $t_{on SW2}$  srovė  $i_L$  toliau auga, o įtampa ant ritės yra lygi  $(U_{in2} - U_{is})$ .

**3 režimas.** Raktai SW1 ir SW2 – išjungti, energija, sukaupta ritės  $L$  magnetiniame lauke, indukuoja elektrovarą, kurios kryptis priešinga magnetinį lauką indukavusiai srovei. Diodai VD1 ir VD2 atidaromi ir susidaro ritės energijos iškrovos grandinė, prijungta prie bendro laido. Ši srovė, kartu su kondensatoriaus  $C$  iškrovos srove, teka per apkrovą (žr. 2.4 pav. 3 režimas). Srovė  $i_L$  pradeda kristi ir krenta iki vienas iš raktų vėl įjungiamas. Įtampa ant ritės šiuo atveju lygi  $-U_{is}$ .

**4 režimas.** Raktai SW1 ir SW2 – įjungti. Abu energijos šaltiniai energiją perduoda apkrovai. Šaltinių įtamos uždaro abu diodus (žr. 2.4 pav. 4 režimas). Laikinėje diagramoje matyti, kad laiko momentu, kai abu raktai įjungti, srovės augimas didžiausias, o įtampa ant ritės lygi ( $U_{in1} + U_{in2} - U_{iš}$ ). [19]



**2.4 pav.** Keitiklio darbo režimai. [19]

Žeminamojo keitiklio apkrovos vidutinės įtamos priklausomybė nuo rakto skverbties pateikta (2.1) formulėje:

$$U_{iš} = \int_0^T U_{in}(t) dt = \frac{1}{T} \left( \int_0^{t_{on}} U_{in} dt + \int_{t_{on}}^T 0 \right) = U_{in} \cdot d, \quad (2.1)$$

čia  $U_{iš}$  – įtampa keitiklio išėjime, V;  $U_{in}$  – įtampa keitiklio įėjime, V;  $t_{on}$  – jungiklio įjungimo trukmė, s;  $T$  – stačiakampio signalo periodas, s;  $d$  – impulso skverbtis.

Jeigu jungikliai SW1 ir SW2 valdomi impulsų seka, kurių skverbtys atitinkamai  $d_1$  ir  $d_2$ , tai žeminamojo-žeminamojo keitiklio išėjimo įtampa apskaičiuojama sumuojant dviejų žeminamųjų keitiklių išėjimų įtampas (2.2):

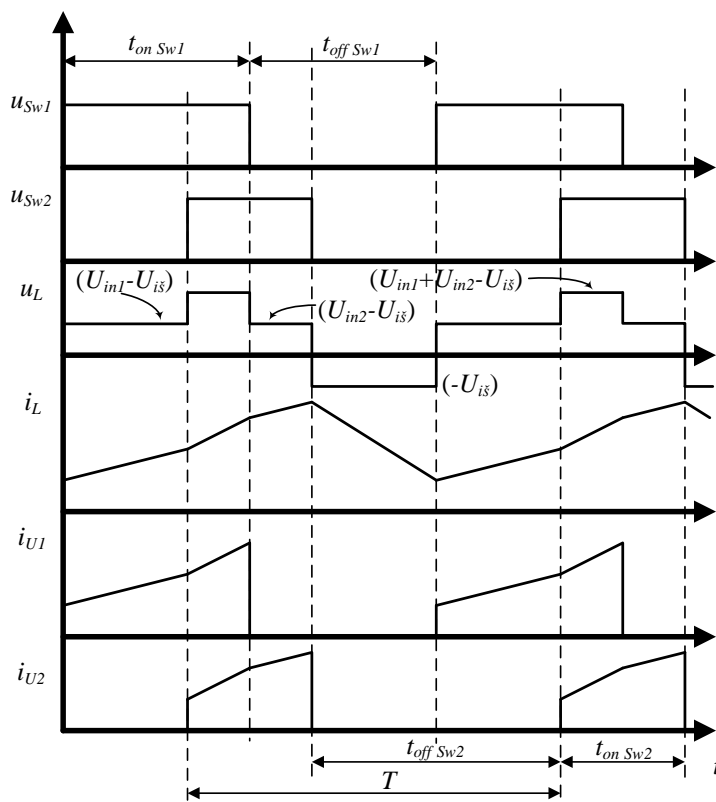
$$U_{iš} = U_{in1} \cdot d_1 + U_{in2} \cdot d_2, \quad (2.2)$$

čia  $U_{in1}$  – pirmo šaltinio įtampa, V;  $U_{in2}$  – antro šaltinio įtampa, V;  $d_1$  ir  $d_2$  impulsų sekų, valdančių atitinkamai SW1 ir SW2 jungiklius, skverbtys.



Keitiklio išėjimo įtampą galima skaičiuoti pagal (2.2) formulę tik tada, kai keitiklis veikia netrūkiųjų (angl. *Continuous-Conduction Mode (CCM)*) srovių režimu. Jeigu keitiklis veiktų trūkiųjų srovių režimu (angl. *Discontinuous-Conduction Mode (DCM)*), keitiklio ritės srovė periodo  $T$  pabaigoje taptų lygi nuliui. [20]

Laikinėse diagramose (nuo viršaus žemyn) pateikta: SW1 rakto IPM signalas; SW2 rakto IPM signalas; įtampa ant ritės L; srovė, tekanti per ritę L; šaltinio  $U_{in1}$  srovė; šaltinio  $U_{in2}$  srovė.



2.5 pav. Žeminamojo/žeminamojo keitiklio laikinės diagramos. [19]

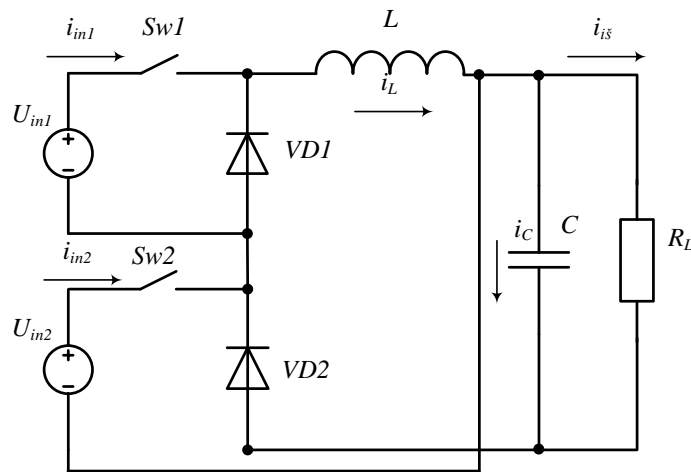
Labai svarbus parametras yra maksimali leidžiama srovė. Ją viršijus ritės magnetolaidis įsisotina ir induktyvumas staiga sumažėja, tai sukelia rakto bei diodo perkrovą ir sugadinimą.

Teoriškai raktų SW1 ir SW2 junginėjimo dažniai  $f_{sw}$  gali būti skirtingi. Tačiau, siekiant sumažinti elektromagnetinę interferenciją (angl. *Electromagnetic interference (EMI)*) bei palengvinti filtro projektavimą, raktų junginėjimo dažniai turi būti vienodi.

Ši topologija tinkama tais atvejais, kai įėjimo šaltinių įtampos yra didelės ir jas reikia žeminti tam, kad būtų gaunama norima išėjimo įtampa. Taip pat ši topologija tinkama projektuojamam keitikliui, nes atraminio (rezervinio) šaltinio įtampą reikia tik žeminti arba perduoti apkrovai tokią, kokia ji yra. Jeigu vieną iš šaltinių įtampų reikia aukštinti, galima naudoti žeminamąjį/žeminamąjį-aukštinamąjį keitiklį.

### 2.2.2. Žeminamasis/žeminamasis-aukštinamasis keitiklis

Žeminamasis/žeminamasis-aukštinamasis keitiklis (žr. 2.6 pav.) gaunamas sujungus žeminamąjį ir žeminamąjį-aukštinamąjį nuolatinės įtampos keitiklius. Sujungti keitikliai turi bendrą LC kontūrą, šaltinis  $U_{in1}$  prijungtas prie žeminamojo keitiklio, o  $U_{in2}$  – prie žeminamojo-aukštinamojo keitiklio. Diodai VD1 ir VD2 reikalingi tam, kad išjungus abu raktus sudarytų kontūrą nenutrūkstamam ritės srovės tekėjimui. Šio keitiklio maitinimo šaltiniai sujungti nuosekliai ir pageidautina, kad maitinimo šaltinių ir išėjimo įtampos tenkintų sąlygą:  $U_{in1} > U_{is} > U_{in2}$ . Raktus valdant IPM galima galią iš šaltinių į apkrovą perduoti iš abiejų šaltinių kartu arba atskirai.



2.6 pav. MIC sudarytas iš žeminamojo/žeminamojo-aukštinamojo nuolatinės įtampos keitiklių. [21]

Pagal raktų SW1 ir SW2 būsenas, keitiklio veikimą galima suskirstyti į keturis režimus (žr. 2.2 lentelė).

2.2 lentelė. Žeminamojo/žeminamojo-aukštinamojo keitiklio darbo režimai.

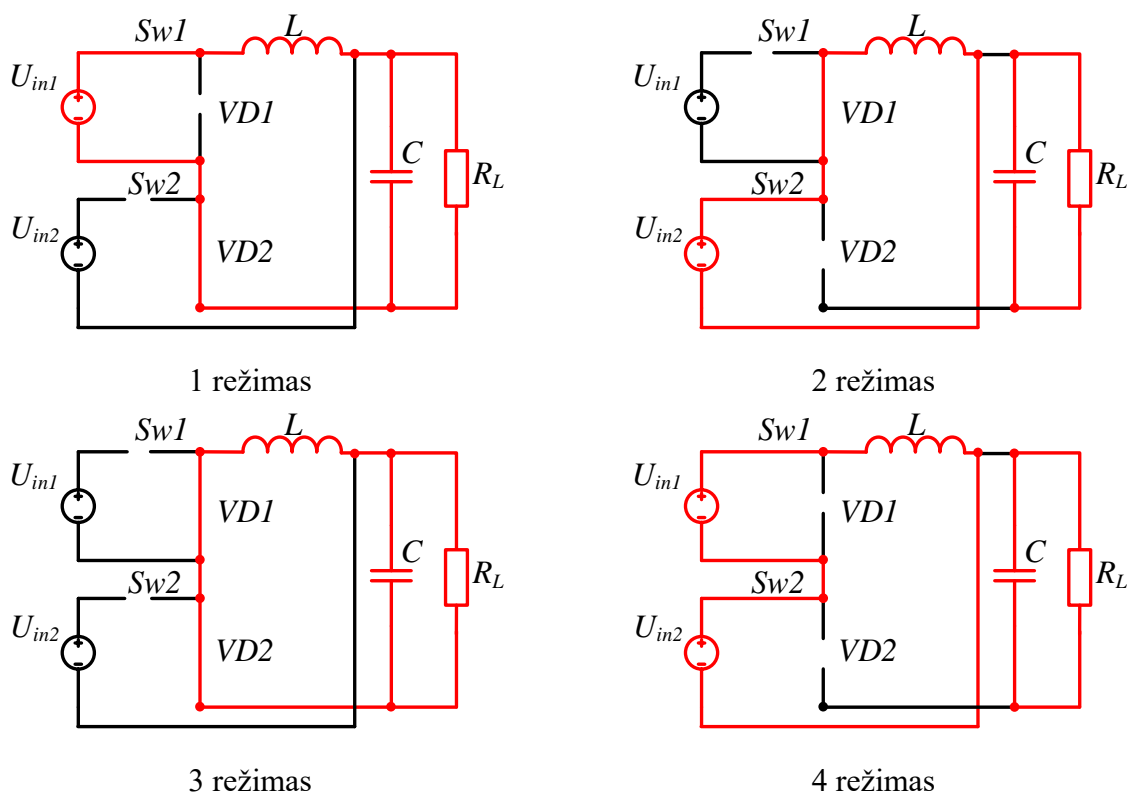
	Raktas SW1	Raktas SW2
1 režimas	Ijungtas	Išjungtas
2 režimas	Išjungtas	Ijungtas
3 režimas	Išjungtas	Išjungtas
4 režimas	Ijungtas	Ijungtas

**1 režimas.** Kai raktas SW1 įjungtas, o SW2 – išjungtas, energija apkrovai  $R_L$  perduodama tik iš pirmojo šaltinio  $U_{in1}$ . Teigiama maitinimo šaltinio įtampa, prijungta prie diodo VD1 katodo jį uždaro, todėl srovė  $i_{in1}$  teka per ritę  $L$  ir energija kaupiama ritės magnetiniame lauke (laikinėse diagramose (žr. 2.8 pav.) matyti, kad laiko momentu  $t_{on\ SW1}$  srovė  $i_L$  auga), o kondensatorius  $C$  įsikrauna (žr. 2.7 pav. 1 režimas).

**2 režimas.** Raktas SW1 išjungtas, SW2 – įjungtas. Šiuo atveju keitiklis energiją apkrovai atiduoda iš antrojo šaltinio  $U_{in2}$ . Šaltinio įtampa, prijungta prie diodo VD2 katodo jį uždaro, todėl srovė  $i_{in2}$  teka per ritę  $L$  ir energija toliau kaupiama ritės magnetiniame lauke, o nenutrūkstamą galios tiekimą apkrovai užtikrina kondensatorius  $C$  (žr. 2.7 pav. 2 režimas).

**3 režimas.** Raktai SW1 ir SW2 – išjungti. Energija, sukaupta ritės  $L$  magnetiniame lauke, indukuoja elektrovarą, kurios kryptis priešinga magnetinį lauką indukavusiai srovei. Diodai VD1 ir VD2 atidaromi ir susidaro ritės energijos iškvos grandinė, prijungta prie bendro laido. Šiuo atveju galia apkrovai atiduodama tiek iš ritės  $L$ , tiek iš kondensatoriaus srovė (žr. 2.7 pav. 3 režimas).

**4 režimas.** Raktai SW1 ir SW2 – įjungti. Abu šaltiniai  $U_{in1}$  ir  $U_{in2}$  sujungti nuosekliai, jų įtampos uždaro abu diodus ir bendra šaltinių srovė ( $i_{in1} + i_{in2}$ ) teka per ritę  $L$  ir energija kaupiama ritės magnetiniame lauke, o apkrovos funkcionavimą palaiko kondensatorius (žr. 2.7 pav. 4 režimas). [18]



**2.7 pav.** Žeminamojo/žeminamojo-aukštinamojo keitiklio darbo režimai. [21]

Jeigu jungikliai SW1 ir SW2 valdomi impulsų seka, kurių skverbtyms atitinkamai  $d_1$  ir  $d_2$ , tai trims žeminamojo/žeminamojo-aukštinamojo keitiklio režimams (žr. 2.8 pav. raktų IPM signalai) galima užrašyti įtampas ant ritės lygtį:

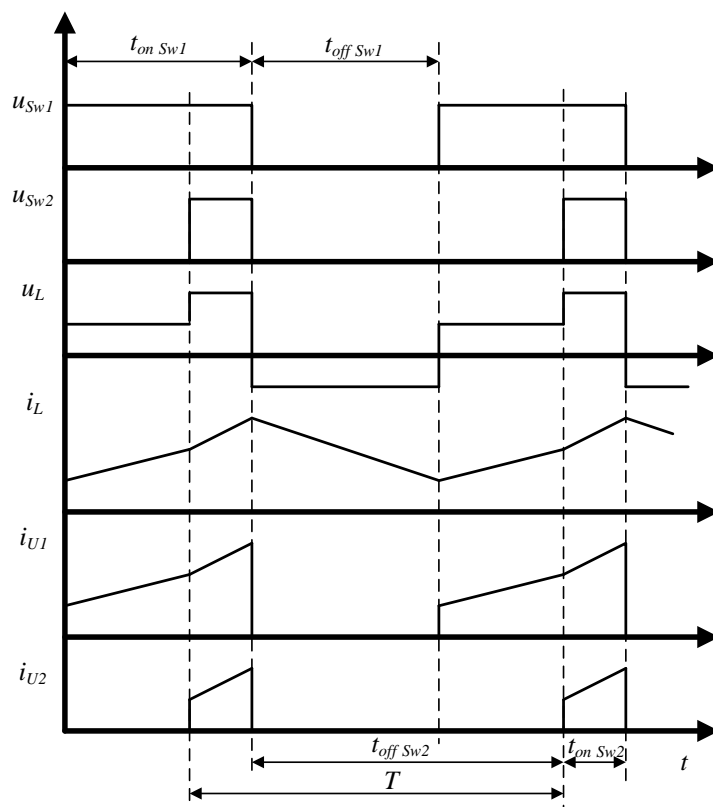
$$(d_1 - d_2)(U_{in1} - U_{iš}) + d_2(U_{in1} - U_{in2}) + (1 - d_1)(-U_{iš}) = 0. \quad (2.3)$$

čia  $U_{in1}$  – pirmo šaltinio įtampa, V;  $U_{in2}$  – antro šaltinio įtampa, V;  $d_1$  ir  $d_2$  impulsų sekų, valdančių atitinkamai SW1 ir SW2 jungiklius, skverbtyms.

Iš (2.3) galima išreikšti keitiklio išėjimo įtampą:

$$U_{iš} = U_{in1} \cdot \frac{d_1}{1-d_2} + U_{in2} \cdot \frac{d_2}{1-d_2}. \quad (2.4)$$

Laikinėse diagramose (nuo viršaus žemyn) pateikta: SW1 rakto IPM signalas; SW2 rakto IPM signalas; įtampa ant ritės L; srovė, tekanti per ritę L; šaltinio  $U_{in1}$  srovė; šaltinio  $U_{in2}$  srovė.

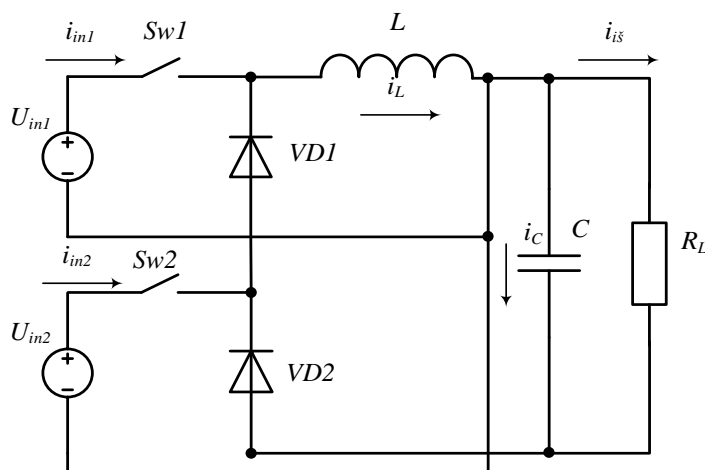


2.8 pav. Žeminamojo/žeminamojo-aukštinamojo keitiklio laikinės diagramos. [21]

Ši MIC topologija pranašesnė už anksčiau minėtą tuo, kad vieno energijos šaltinio įtampą keitiklis gali tiek žeminti, tiek aukštinti, o antrojo šaltinio įtampą mažinti. Tokia topologija puikiai tinkama tokiais atvejais, kai iš vieno šaltinio įtampą reikia kaip įmanoma labiau suaukštinti tam, kad išėjime būtų gauta norima įtampa.

### 2.2.3. Žeminamasis-aukštinamasis/žeminamasis-aukštinamasis keitiklis

Sujungiant du žeminamasis-aukštinamasis keitiklius prie bendro LC kontūro, gaunamas žeminamasis-aukštinamasis/žeminamasis-aukštinamasis kelių įėjimų keitiklis (žr. 2.9 pav.). Diodai VD1 ir VD2 reikalingi tam, kad išjungus abu raktus sudarytų kontūrą nenutrūkstamam ritės srovės tekėjimui. Nuo anksčiau aptartų kelių įėjimų keitiklių šis skiriasi tuo, kad galios apkrovai vienu metu iškart abu maitinimo šaltiniai perduoti negali.



2.9 pav. MIC sudarytas iš žeminamojo-aukštinamojo/žeminamojo-aukštinamojo nuolatinės įtampos keitiklių. [22]

Galia perduodama tik atskirai iš abiejų šaltinių, todėl raktai SW1 ir SW2 negali būti įjungti vienu metu ir šis keitiklis dirba tik trimis režimais (žr. 2.3 lentelė).

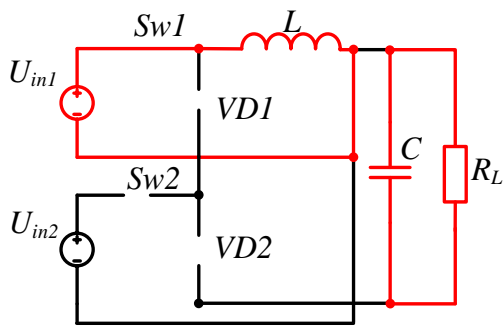
2.3 lentelė. Žeminamojo-aukštinamojo/žeminamojo-aukštinamojo keitiklio darbo režimai.

	Raktas SW1	Raktas SW2
1 režimas	Įjungtas	Išjungtas
2 režimas	Išjungtas	Įjungtas
3 režimas	Išjungtas	Išjungtas

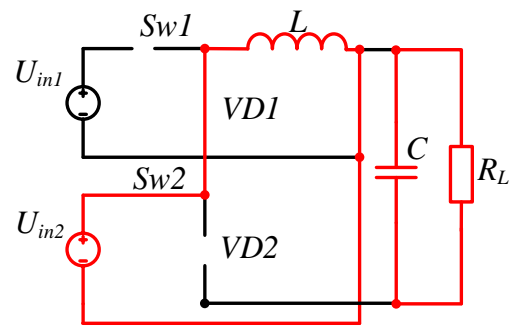
**1 režimas.** Raktas SW1 įjungtas, SW2 – išjungtas. Šaltinio  $U_{in1}$  teigiamo potencialo įtampa uždaro diodus VD1 ir VD2, todėl srovė  $i_{in1}$  teka per ritę L ir energija kaupiama ritės magnetiniame lauke (laikinėse diagramose (žr. 2.11 pav.) matyti, kad laiko momentu  $t_{on\ SW1}$  srovė  $i_L$  auga). Šio darbo režimo metu įtampa ant ritės lygi  $U_{in1}$ . Apkrovos veikimą užtikrina kondensatorius C (žr. 2.10 pav. 1 režimas).

**2 režimas.** Raktas SW1 išjungtas, o SW2 – įjungtas. Šis režimas analogiškas pirmajam, tik teigiamas šaltinio  $U_{in2}$  įtampos potencialas diodą VD1 atidaro, o VD2 – uždaro, taip srovė  $i_{in2}$  teka per ritę L ir energija toliau kaupiama magnetiniame lauke. Šio darbo režimo metu, įtampa ant ritės lygi  $U_{in2}$ . Apkrovos veikimą užtikrina kondensatorius C (žr. 2.10 pav. 2 režimas).

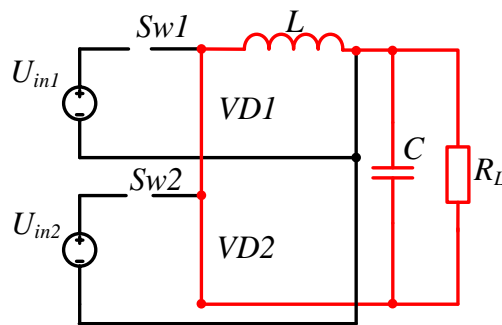
**3 režimas.** Kai raktai SW1 ir SW2 – išjungti, diodai VD1 ir VD2 atidaromi ir susidaro ritės energijos iškrovos grandinė. Šiuo atveju galia apkrovai perduodama tiek iš ritės L, tiek iš kondensatoriaus C. Taip pat šiuo momentu kondensatorius įsikrauna. Įtampa ant ritės šiuo momentu yra lygi  $-U_{i\bar{s}}$  (žr. 2.10 pav. 3 režimas).



1 režimas



2 režimas



3 režimas

**2.10 pav.** Žeminamojo-aukštinamojo/žeminamojo-aukštinamojo keitiklio darbo režimai. [22]

Jeigu jungikliai SW1 ir SW2 yra valdomi impulsų seka, kurių skverbtys atitinkamai  $d_1$  ir  $d_2$ , tai visiems trimis žeminamojo-aukštinamojo/žeminamojo-aukštinamojo keitiklio režimams galima užrašyti įtampos ant ritės lygtį:

$$U_{in1} \cdot d_1 + U_{in2} \cdot d_2 + (-U_{i\bar{s}})(1 - d_1 - d_2) = 0. \quad (2.5)$$

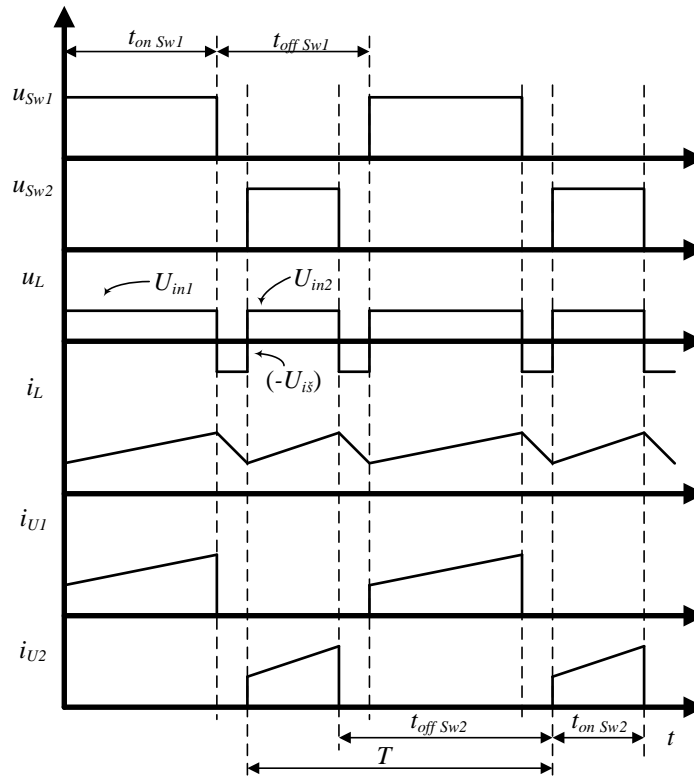
čia  $U_{in1}$  – pirmo šaltinio įtampa, V;  $U_{in2}$  – antro šaltinio įtampa, V;  $d_1$  ir  $d_2$  atitinkamai raktų SW1 ir SW2 skverbtys. [23]

Pertvarkius (2.5) lygtį, galima išreikšti keitiklio išėjimo įtampą:

$$U_{i\check{s}} = U_{in1} \cdot \frac{d_1}{1-d_1-d_2} + U_{in2} \cdot \frac{d_2}{1-d_1-d_2}. \quad (2.6)$$

čia  $d_1$  ir  $d_2$  impulsų sekų, valdančių atitinkamai SW1 ir SW2 jungiklius, skverbtytis.

Laikinėse diagramose, nuo viršaus žemyn, pateikta: SW1 rakto IPM signalas; SW2 rakto IPM signalas; įtampa ant ritės L; srovė tekanti per ritę L; šaltinio  $U_{in1}$  srovė; šaltinio  $U_{in2}$  srovė.



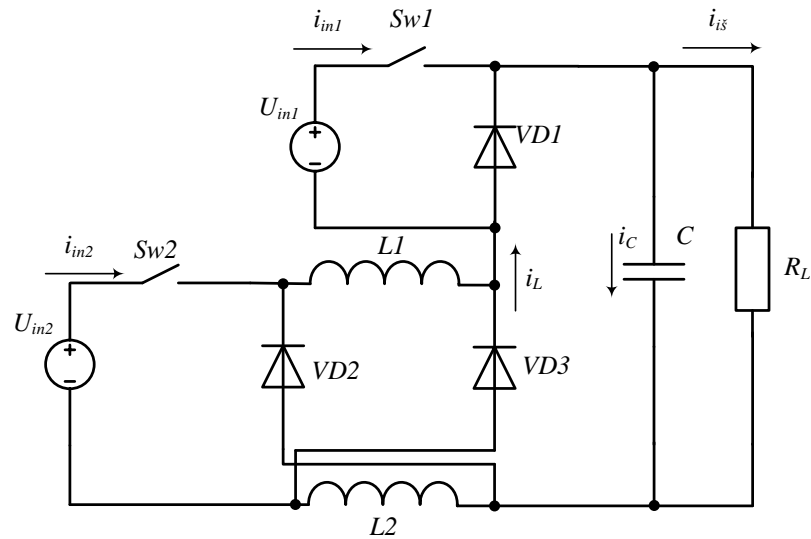
**2.11 pav.** Žeminamojo-aukštinamojo/žeminamojo-aukštinamojo keitiklio laikinės diagramos. [22]

Šis keitiklis tinkamas tuo atveju, kai galios perdavimas iš abiejų šaltinių vienu metu nėra būtinas, o išėjimo įtampa turi būti didesnė už įėjimo šaltinių įtampų sumą. Tada keitiklis gali suaukštinti  $U_{in1}$  ir  $U_{in2}$  įtampas iki reikiamo lygio. Tačiau projektuojamam keitikliui tokia topologija netinkama, nes atraminio šaltinio įtampos aukštinti nereikia.

## 2.2.4. Žeminamasis/žeminamasis keitiklis su didesniu žeminimo koeficientu

Daugelyje sistemų reikalingas aukštas įtampos žeminimo koeficientas, pavyzdžiui, keleto įėjimų keitiklio vienas energijos šaltinis aukštos įtampos, kitas – žemos. Todėl DC/DC keitikliai, turi turėti didesnį žeminimo koeficientą.

Didesnį žeminimo koeficientą turintis keitiklis (žr. 2.12 pav.) pasiūlytas [24] straipsnyje. Šis keitiklis skiriasi nuo 2.2.1 poskyryje aptartojo tuo, kad jame yra papildoma ritė L2 ir diodas VD3.



2.12 pav. Žeminamojo/žeminamojo keitiklio schema. [24]

Toks keitiklis, gali galią apkrovai perduoti tiek atskirai, tiek kartu iš abiejų šaltinių, todėl šis keitiklis dirba keturiais režimais (žr. 2.4 lentelė).

2.4 lentelė. Žeminamojo/žeminamojo keitiklio darbo režimai.

	Raktas SW1	Raktas SW2
1 režimas	Ijungtas	Išjungtas
2 režimas	Išjungtas	Ijungtas
3 režimas	Išjungtas	Išjungtas
4 režimas	Ijungtas	Ijungtas

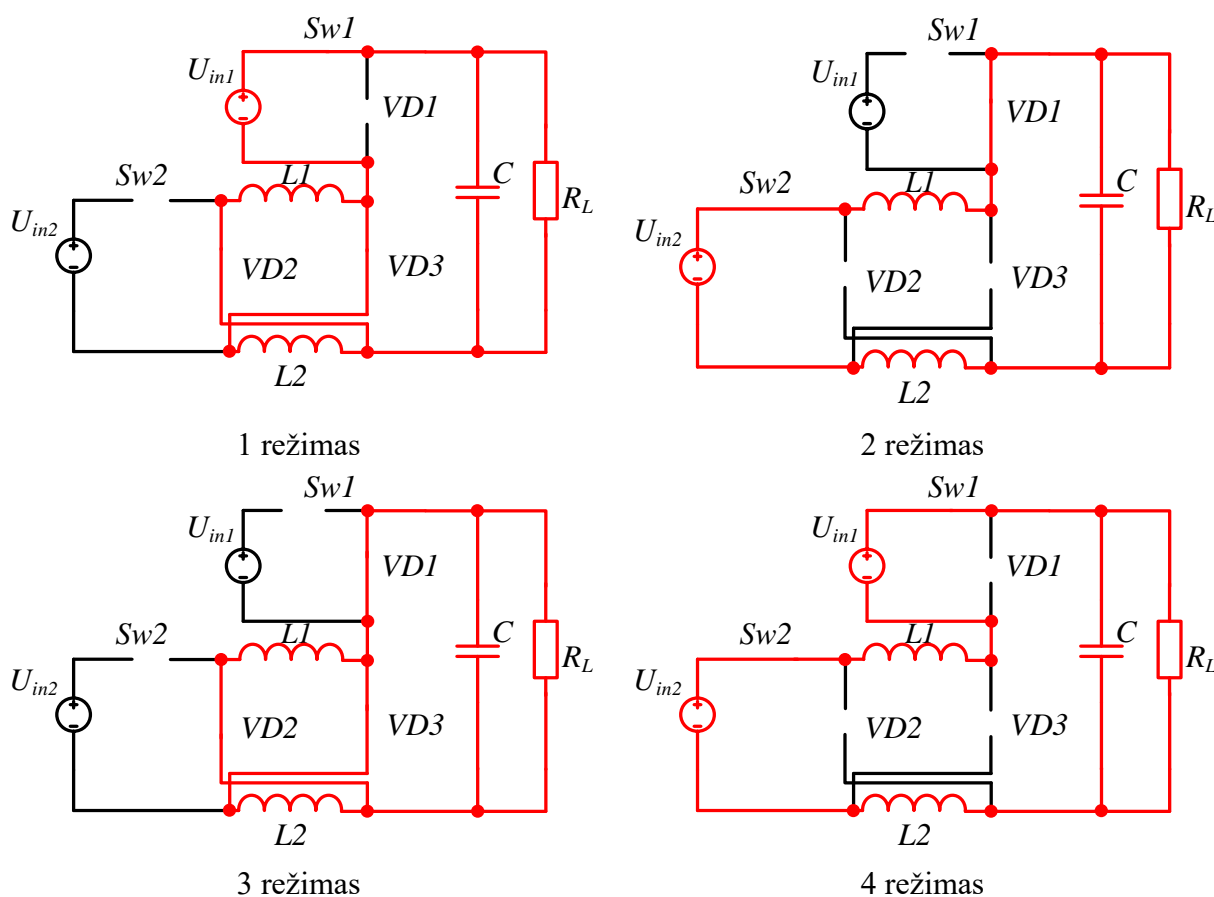
**1 režimas.** Kai raktas SW1 ijungtas, o SW2 – išjungtas, energija apkrovai  $R_L$  perduodama tik iš pirmojo šaltinio  $U_{in1}$ . Teigiama maitinimo šaltinio įtampa, prijungta prie diodo VD1 katodo jį uždaro, todėl srovė  $i_{in1}$  iš šaltinio teka per diodus VD2, VD3 ir rites L1 ir L2 ir energija kaupiama jų magnetiniuose laukuose (laikinėse diagramose (žr. 2.14 pav.) matyti, kad laiko momentu  $t_{on\ SW1}$  srovė  $i_L$  auga), o kondensatorius C įsikrauna (žr. 2.13 pav. 1 režimas). Šio režimo metu, įtampa ant ritės lygi  $(U_{in1} - U_{i\bar{s}})$ .



**2 režimas.** Raktas SW1 išjungtas, SW2 – įjungtas. Šiuo atveju keitiklis energiją apkrovai atiduoda iš antrojo šaltinio  $U_{in2}$ . Šaltinio įtampa, prijungta prie diodų VD2 ir VD3 katodų juos uždaro, todėl srovė  $i_{in2}$  teka per rites L1 ir L2, todėl energija toliau kaupiama ritės magnetiniame lauke (žr. 2.13 pav. 2 režimas). Šio režimo metu, įtampa ant ritės lygi  $1/2 (U_{in2} - U_{iš})$ .

**3 režimas.** Raktai SW1 ir SW2 – išjungti. Energija, sukaupta ričių magnetiniuose laukuose, indukuoja elektrovarą, kurios kryptis priešinga magnetinį lauką indukavusiai srovei. Diodai VD1, VD2 ir VD3 atidaromi ir susidaro ričių energijos išskrovos grandinė. Ši srovė, kartu su kondensatoriaus C išskrovos srove, teka per apkrovą (žr. 2.13 pav. 3 režimas). Srovė  $i_L$  pradeda kristi ir krenta iki vienas iš raktų vėl įjungiamas. Įtampa ant ritės šiuo atveju lygi  $-U_{iš}$ .

**4 režimas.** Raktai SW1 ir SW2 – įjungti. Abu energijos šaltiniai energiją perduoda apkrovai. Šaltinių įtampas uždaro visus diodus (žr. 2.13 pav. 4 režimas). Laikinėje diagramoje matyti, kad laiko momentu, kai abu raktai įjungti, srovės augimas didžiausias, o įtampa ant ritės lygi  $1/2 (U_{in1} + U_{in2} - U_{iš})$ . [24]

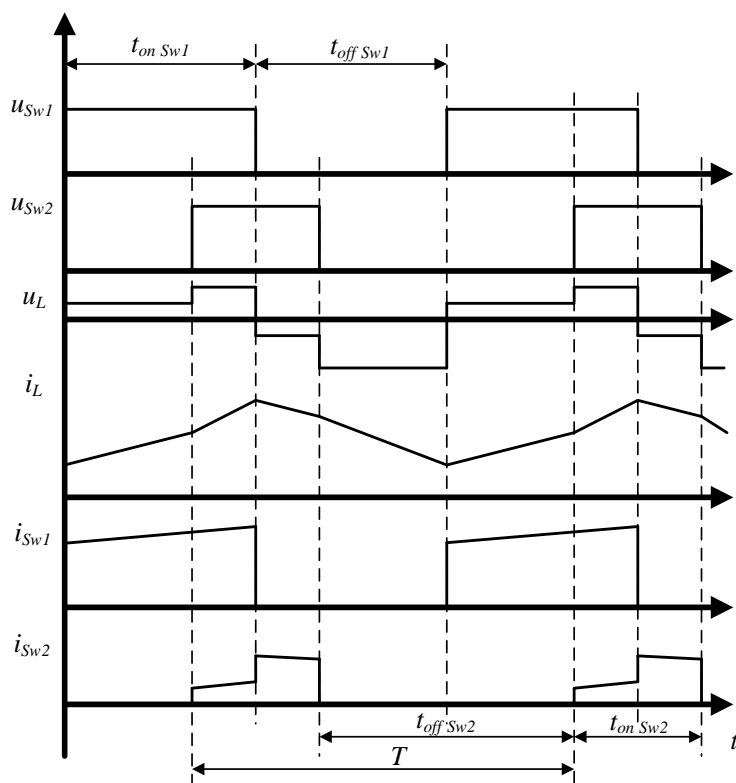


**2.13 pav.** Žeminamojo/žeminamojo keitiklio darbo režimai. [24]

Jeigu jungikliai SW1 ir SW2 valdomi impulsų seka, kurių skverbtyms atitinkamai  $d_1$  ir  $d_2$ , tai žeminamojo/žeminamojo keitiklio išėjimo įtampa apskaičiuojama pagal (2.18) formulę:

$$\begin{cases} U_{i\dot{s}} = U_{in1} \cdot \frac{2 \cdot d_1 - d_2}{2 - d_2} + U_{in2} \cdot \frac{d_2}{2 - d_2}, & \text{kai } d_1 > d_2 \\ U_{i\dot{s}} = U_{in1} \cdot \frac{d_1}{2 - d_2} + U_{in2} \cdot \frac{d_2}{2 - d_2}, & \text{kai } d_1 < d_2 \end{cases} \quad (2.7)$$

Laikinėse diagramose, nuo viršaus žemyn, pateikta: SW1 rakto IPM signalas; SW2 rakto IPM signalas; įtampa ant ritės L; srovė tekanti per ritę L; šaltinio  $U_{in1}$  srovė; šaltinio  $U_{in2}$  srovė.



**2.14 pav.** Žeminamojo/žeminamojo keitiklio laikinės diagramos. [24]

Ši keitiklio schema tinkama tuo atveju, kai vieno iš šaltinių įtampą reikia daug kartų žeminti. Tačiau pagrindinis šios schemos trūkumas – didesni nuostoliai dėl papildomų elementų.

### 2.3. Skyriaus apibendrinimas

Nuolatinės įtampos keitiklius galima suskirstyti į tris grupes: izoliuojančius, neizoliuojančius ir pusiau izoliuojančius. Šiame skyriuje apžvelgti ir pateikti bazinių neizoliuojančių nuolatinės įtampos keitiklių veikimo principai, jų laikinės diagramos.

Bazinius nuolatinės įtampos keitiklius galima sujungti nuosekliai arba lygiagrečiai ir gauti kelių įėjimų nuolatinės įtampos keitiklius. Skyriuje pateikti esminiai skirtumai tarp lygiagretaus ir nuoseklaus jungimo. Pateiktos trijų galimų kelių įėjimų keitiklių schemos, darbo režimai, laikinės diagramos.

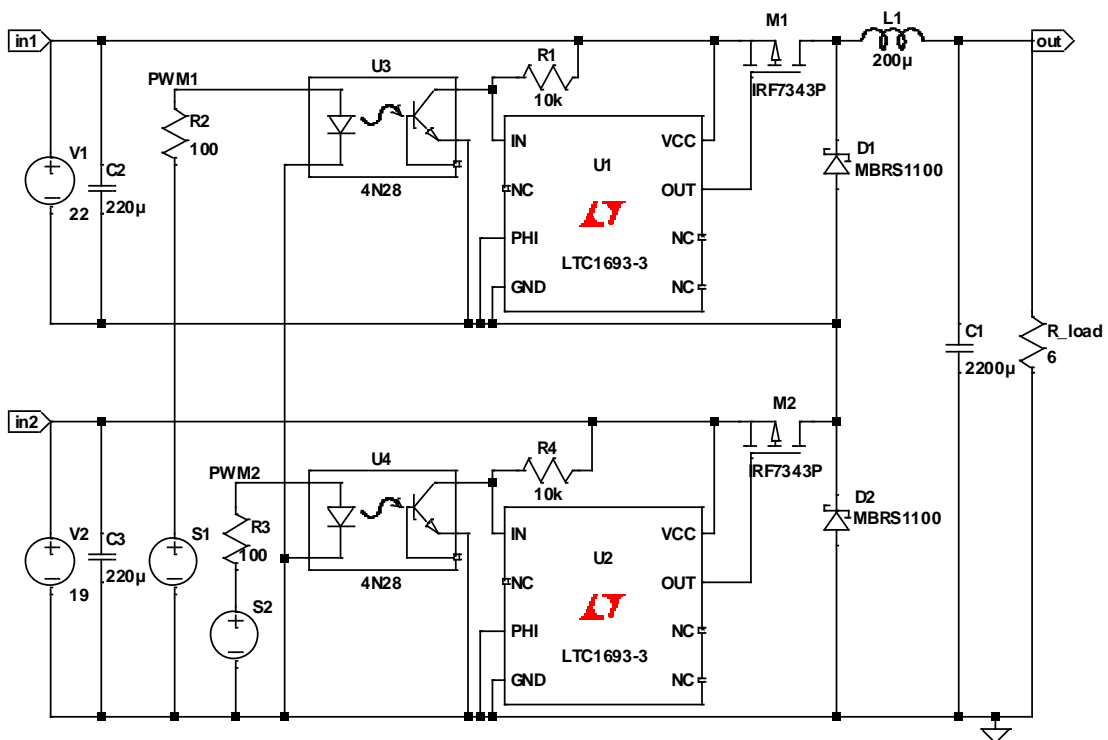
Kadangi vienas iš keitiklio šaltinių yra atraminis, o kitas – atsinaujinantis energijos šaltinis, tokio keitiklio realizavimui puikiai tinka žeminamasis/žeminamasis keitiklis, nes siekiant sumažinti energijos sąnaudas iš tinklo, reikia atraminio šaltinio galią žeminti, o iš atsinaujinančio energijos šaltinio paimti kaip galima daugiau galios, kad apkrova galėtų netrikdomai funkcionuoti.

### 3. KELIŲ ĮĖJIMŲ KEITIKLIŲ MODELIAVIMAI

Iš aptartų MIC modeliavimams pasirinktos dvi žeminamojo/žeminamojo ir žeminamojo/žeminamojo-aukštinamojo keitiklių topologijos. Skyriuje pateiktos sumodeliuotos schemos, jų simuliacijų rezultatai, apskaičiuotos teorinės keitiklių išėjimo įtampos prie atitinkamų skverbčių ir fiksuotų įėjimų įtampų. Taip pat skyriuje kuriami, modeliuojami ir tiriami algoritmai valdantys keitiklių raktų skverbčius.

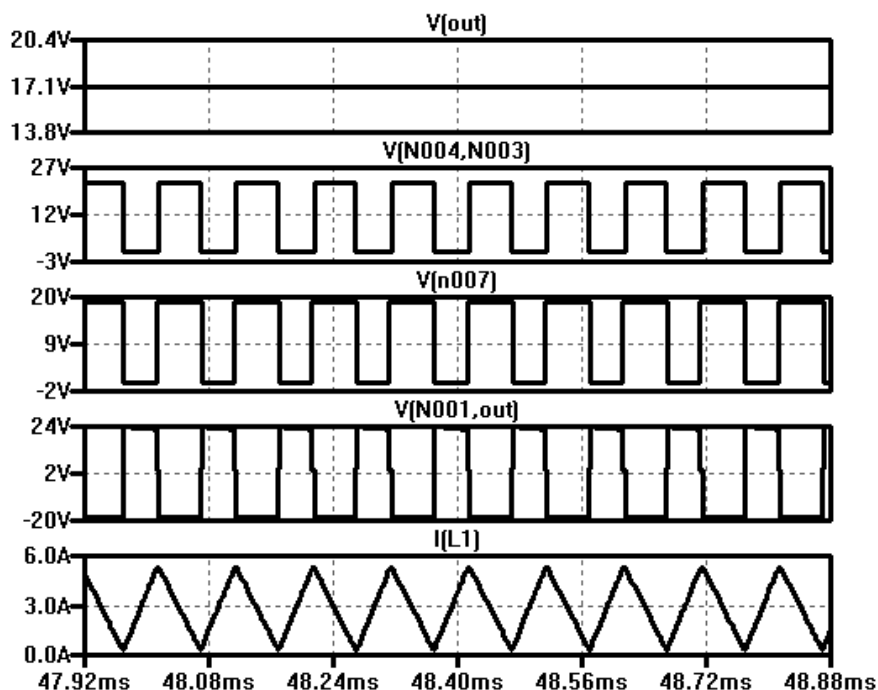
#### 3.1. Žeminamojo/žeminamojo keitiklio modeliavimas

MIC modeliuojamas ir simuliuojamas naudojantis elektroninio modeliavimo paketu LTSpice IV. 2.3 paveiksle pateikta žeminamojo/žeminamojo keitiklio schema papildoma optronais 4N28, galvaniškai atskiriančiais valdiklį nuo keitiklio. Taip pat vietoj idealių raktų naudojami P-kanalo lauko tranzistoriai IRF7343P, kurių valdymui naudojami valdikliai (angl. *drivers*) LTC1693-3. Modeliuojama schema pateikta 3.1 paveiksle.



3.1 pav. Žeminantis/žeminantis nuolatinės įtampos keitiklis.

MOSFET tranzistoriams suformuojamai 10 kHz IPM valdymo signalai, kurių skverbty  $d_1 = d_2 = 40\%$ . Laikinėse diagramose (žr. 3.2 pav.) pateikta (nuo viršaus žemyn): keitiklio išėjimo įtampa; rakto M1 valdymo signalas; rakto M2 valdymo signalas; įtampa ant ritės L1; srovė tekanti per ritę L1.

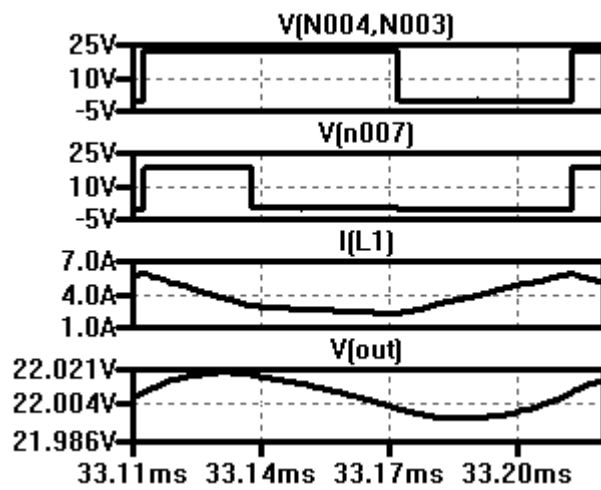


3.2 pav. Žeminamojo/žeminamojo keitiklio laikinės diagramos.

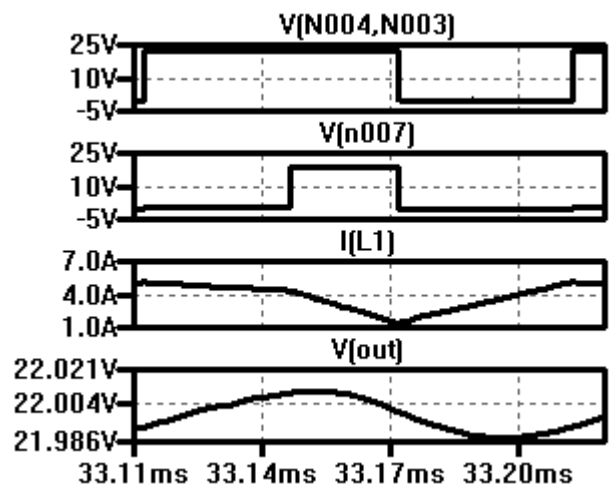
Atlikus simuliaciją, nustatyta, kad išėjimo įtampa lygi 17,22 V. Nuokrypis, nuo teorinės įtampos ( $U_{iš\ teorinė} = 16,4\text{ V}$ ) apskaičiuotos naudojantis (2.2) formule, yra 5 %.

Keitiklis gali veikti keturiais režimais (žr. 2.1 lentelė). Atliekamas tyrimas, kurio metu siekiama nustatyti, kokią įtaką keitiklio išėjimo signalams daro raktų IPM signalų sinchronizacija. Ištirti šeši atvejai (kai  $d_1 > d_2$ ): raktų M1 ir M2 IPM signalai sinchronizuoti pagal kylantį M1 rakto frontą; raktų M1 ir M2 IPM signalai sinchronizuoti pagal krentantį M1 rakto frontą; rakto M2 IPM signalo impulsas prasideda ir baigiasi laiko momentu  $t_{sw1\ on}$ ; rakto M2 IPM impulsas prasideda laiko momentu  $t_{sw1\ on}$  ir baigiasi momentu  $t_{sw1\ off}$ ; raktas M2 atidaromas detektavus M1 rakto valdymo signalo krentantį frontą; raktas M2 atidaromas ir uždaromas laiko momentu  $t_{sw1\ off}$ . Simuliacijos rezultatai pateikti 3.3 paveiksle.

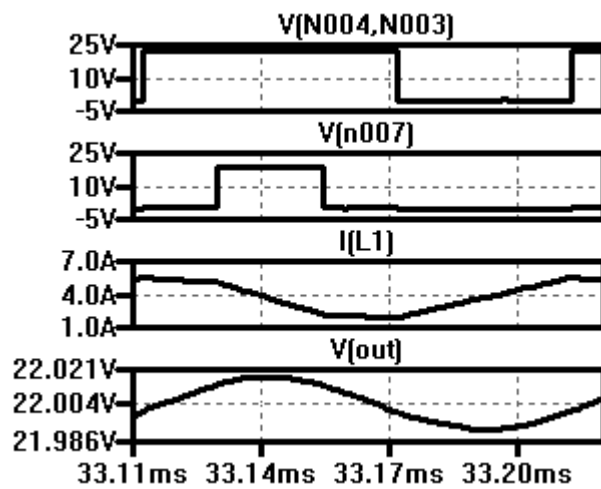
Atlikus tyrimą pastebėta, kad IPM signalų sinchronizacija daro įtaką išėjimo signalų svyravimams  $\Delta I_L$  ir  $\Delta v_{iš}$ . Didžiausi svyravimai pasireiškia tuo atveju, kai abu raktai yra atidaryti vienu metu. Tuo metu yra didžiausias srovės, tekančios per ritę, augimas. Mažiausi keitiklio išėjimo signalų svyravimai yra tuo atveju, kai raktai atidaromi vienas po kito.



Sinchronizacija pagal kylantį frontą

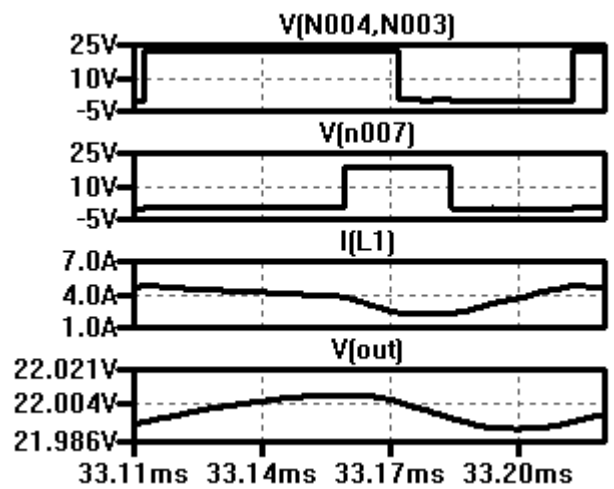


Sinchronizacija pagal krentantį frontą



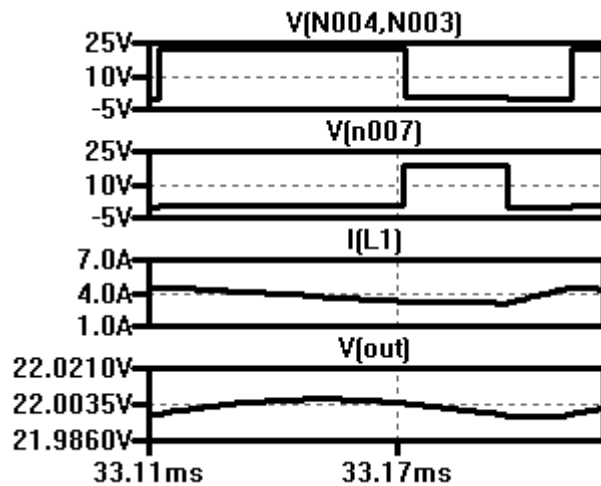
M2 įjungiamas ir išjungiamas laiko momentu

$t_{sw1\ on}$

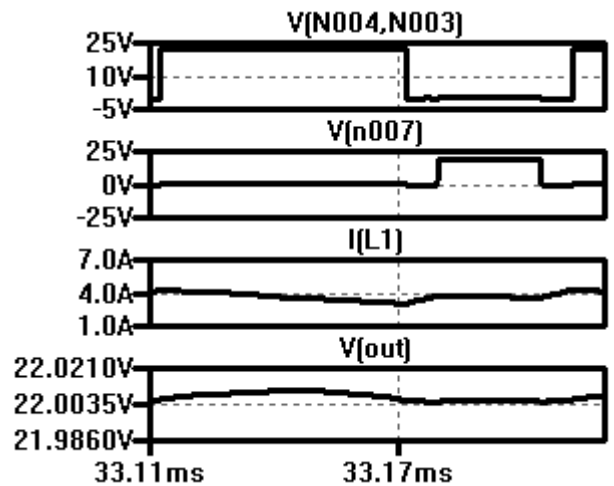


M2 įjungiamas momentu  $t_{sw1\ on}$  ir išjungiamas

momentu  $t_{sw1\ off}$



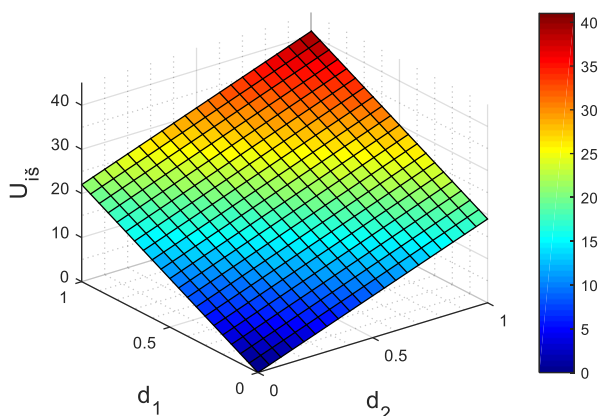
M2 įjungiamas detektavus M1 krentantį frontą



M2 įjungiamas ir išjungiamas momentu  $t_{sw1\ off}$

3.3 pav. Raktų IPM signalų sinchronizavimo variantai.

3.4 paveiksle pateikta keitiklio išėjimo įtampos priklausomybė nuo skverbčių  $d_1$  ir  $d_2$ , kai maitinimo šaltinių įtampos pastovios ( $U_{in1} = 22\text{ V}$ ,  $U_{in2} = 19\text{ V}$ ).



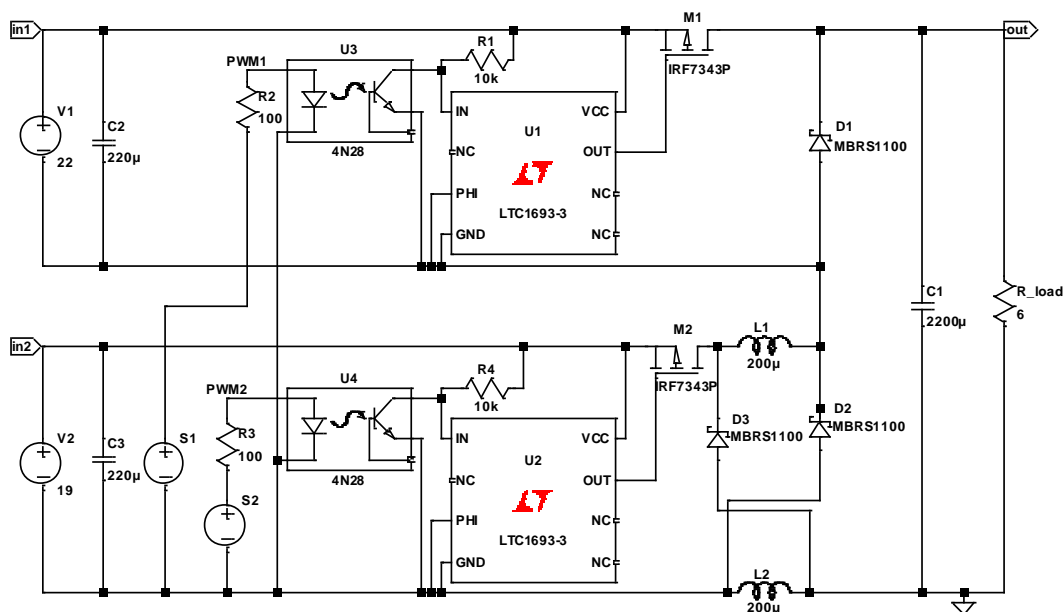
3.4 pav. Išėjimo įtampos priklausomybė nuo raktų skverbčių  $d_1$  ir  $d_2$ .

Matyti, kad pilnai atidarius abu keitiklio raktus išėjimo įtampa lygi abiejų maitinimo šaltinių įtampai (šiuo atveju 41 V). Valdant raktų skverbti, galima gauti išėjimo įtampą, grafike pavaizduotos plokštumos ribose.

### 3.2. Didesnio žeminimo koeficiento žeminamojo/žeminamojo keitiklio modeliavimas

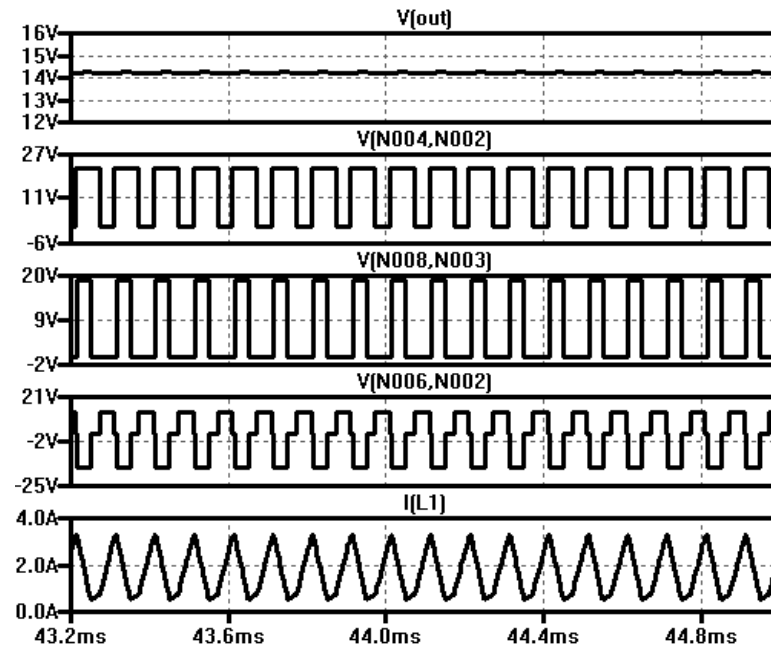
Modeliuojama ir simuliuojama 2.12 paveiksle pateikta žeminamojo/žeminamojo su didesniu žeminimo koeficientu MIC schema. Raktams M1 ir M2 suformuojami 10 kHz IPM valdymo signalai, kurių skverbtytis atitinkamai  $d_1 = 40\%$ ,  $d_2 = 60\%$ .

Atlikus simuliaciją, nustatyta, kad išėjimo įtampa lygi 14,66 V. Nuokrypis, nuo teorinės įtampos ( $U_{iš\ teorinė} = 14,43\text{ V}$ ) apskaičiuotos naudojantis (2.7) formule, yra 1,5 %.



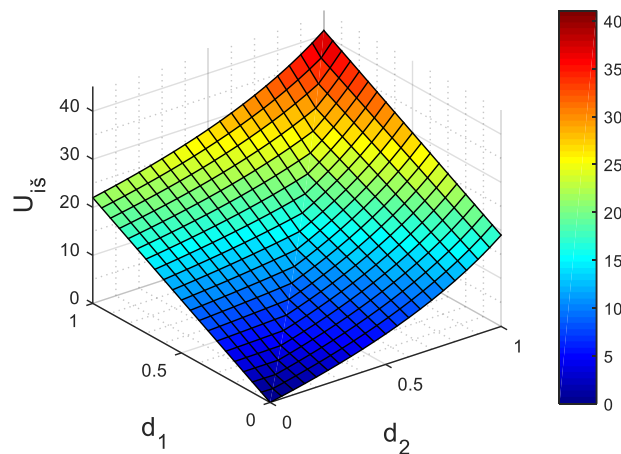
3.5 pav. Žeminamasis/žeminamasis nuolatinės įtampos keitiklis.

Laikinėse diagramose (žr. 3.6 pav.) pateikta (nuo viršaus žemyn): keitiklio išėjimo įtampa; rakto M1 valdymo signalas; rakto M2 valdymo signalas; įtampa ant ritės L1; srovė tekanti per ritę L1. Matyti, kad raktai atidaromi ne tuo pačiu metu, tam turi įtakos optronų vėlinimas.



3.6 pav. Žeminamojo/žeminamojo keitiklio laikinės diagramos.

3.7 paveiksle pateikta keitiklio išėjimo įtamos priklausomybė nuo skverbčių  $d_1$  ir  $d_2$ , kai maitinimo šaltinių įtamos pastovios ( $U_{in1} = 22$  V,  $U_{in2} = 19$  V).



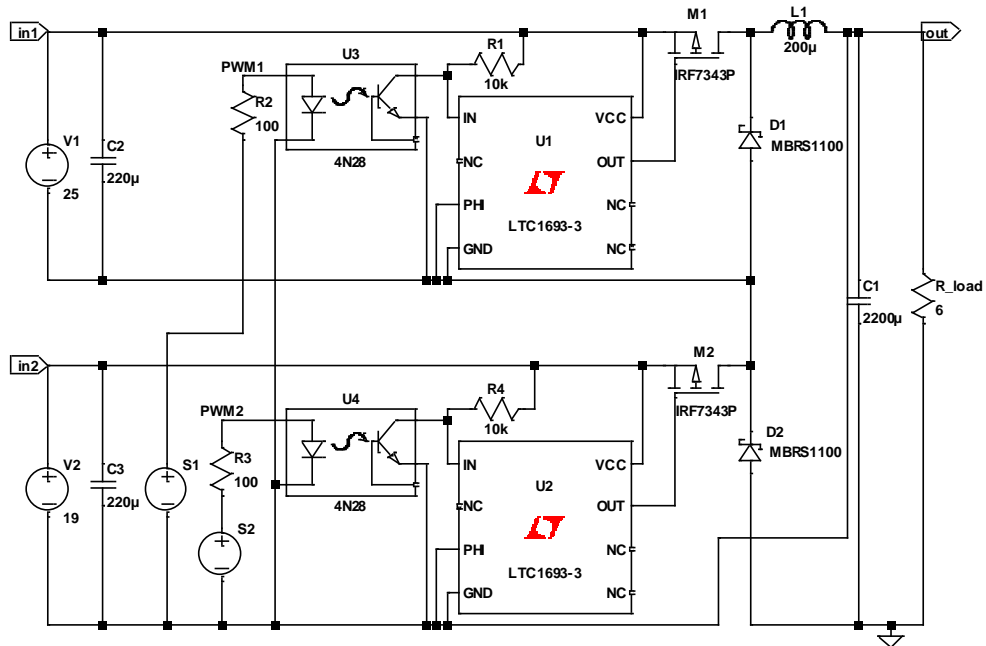
3.7 pav. Išėjimo įtamos priklausomybė nuo raktų skverbčių  $d_1$  ir  $d_2$ .



### 3.3. Žeminamojo/žeminamojo-aukštinamojo keitiklio modeliavimas

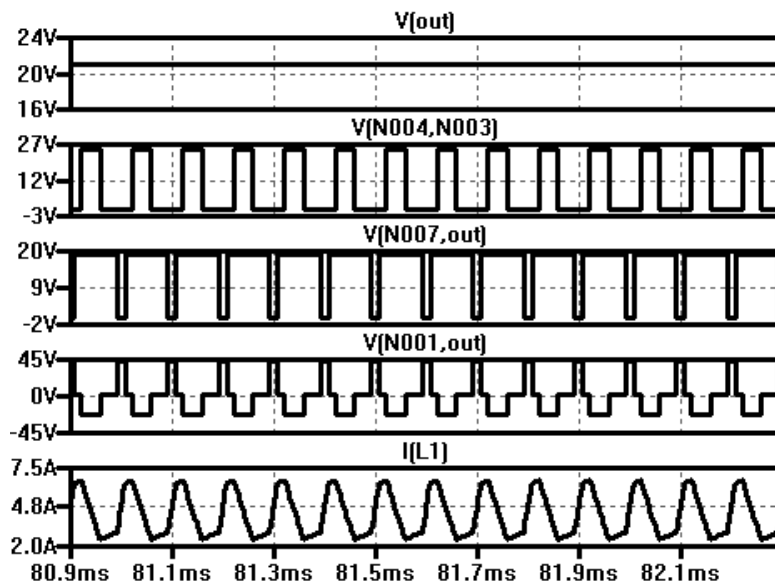
Modeliuojamo MIC keitiklio raktams suformuojami 10 kHz IPM valdymo signalai, kurių skverbtys  $d_1 = 50\%$   $d_2 = 20\%$ .

Atlikus simuliacijoms nustatyta, kad išėjimo įtampa lygi 20,98 V. Nuokrypis, nuo teorinės įtampos ( $U_{iš\ teorinė} = 20,38\text{ V}$ ) apskaičiuotos naudojantis (2.4) formule, yra 2,9 %.



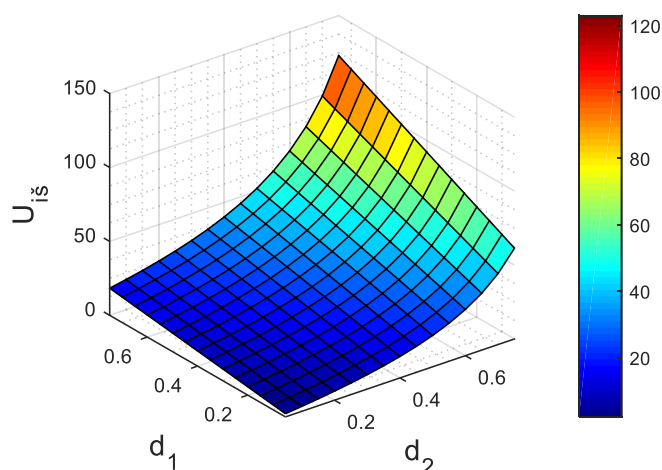
3.8 pav. Žeminamasis/žeminamasis-aukštinamasis nuolatinės įtampos keitiklis.

Laikinėse diagramose (žr. 3.9 pav.) pateikta nuo viršaus žemyn: keitiklio išėjimo įtampa; rakto M1 valdymo signalas; rakto M2 valdymo signalas; įtampa ant ritės L1; srovė tekanti per ritę L1.



3.9 pav. Žeminamojo/žeminamojo-aukštinamojo keitiklio laikinės diagramos.

3.10 paveiksle pateikta keitiklio išėjimo įtampos priklausomybė nuo skverbčių  $d_1$  ir  $d_2$ , kai maitinimo šaltinių įtampos pastovios ( $U_{in1} = 22\text{ V}$ ,  $U_{in2} = 19\text{ V}$ ).

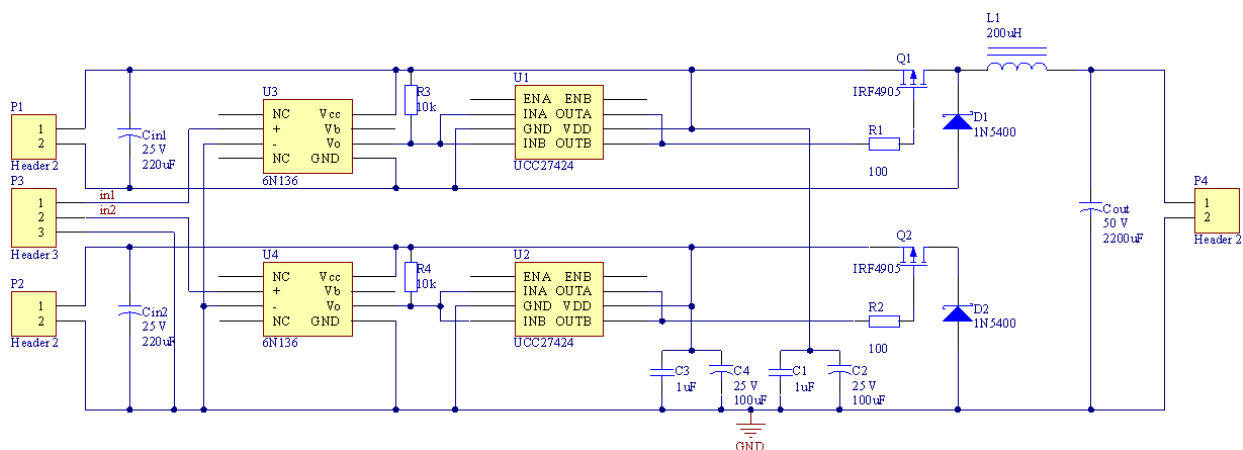


3.10 pav. Išėjimo įtampos priklausomybė nuo raktų skverbčių  $d_1$  ir  $d_2$ .

Grafike matyti, kad didesnę įtaką išėjimo įtampai daro skverbtis  $d_2$ . Taip yra todėl, kad ši skverbtis yra žeminamojo-aukštinamojo keitiklio rakto valdymo signalo skverbtis.

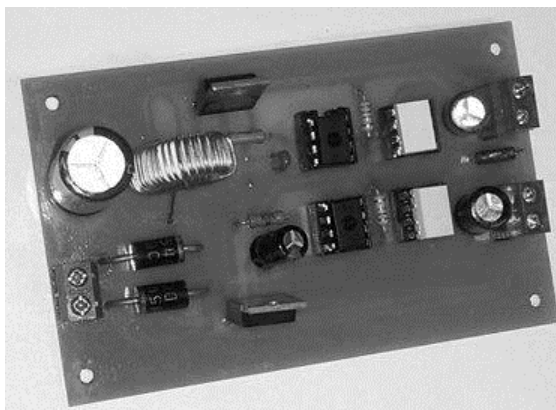
### 3.4. Žeminančiojo/žeminančiojo nuolatinės srovės keitiklio projektavimas

Modeliuota žeminamojo/žeminamojo keitiklio schema (žr. 3.1 pav.) projektuojama su Altium designer 15 programa (žr. 3.11 pav.). Prie P1 ir P2 jungčių jungiami maitinimo šaltiniai, kurių galios yra sumuojamos. P4 – keitiklio išėjimas. Į P3 jungtį jungiami valdymo signalai (IPM) iš maketinės plokštės su mikrovaldikliu MSP430G2553. U3 ir U4 yra optronai (modelis 6N136). P-kanalo MOSFET tranzistoriams (modelis IRF4905) naudojami UCC27424 neinvertuojantys draiveriai. Suprojektuotos vienusės spausdintinio montažo plokštės (angl. *Printed Circuit Board* (PCB)) vaizdas pateiktas 1 priede.



3.11 pav. Suprojektuota žeminančiojo/žeminančiojo nuolatinės srovės keitiklio schema.

Pagamintas žeminamasis/žeminamasis keitiklis (žr. 3.12 pav.) testuojamas su dvejais maitinimo šaltiniais. Vieno maitinimo įtampa 12 V, kito 6 V. P-kanalo MOSFET tranzistoriams suformuojami 50 % skverbties IPM signalai. Taigi, po žeminančiojo/žeminančiojo keitiklio grandies abiejų maitinimo šaltinių įtamos turėtų būti 6 V ir 3V, o keitiklio išėjime – 9 V įtampa. Testavimo metu išėjimo įtampa (8,59 V) buvo artima teoriniams skaičiavimams.

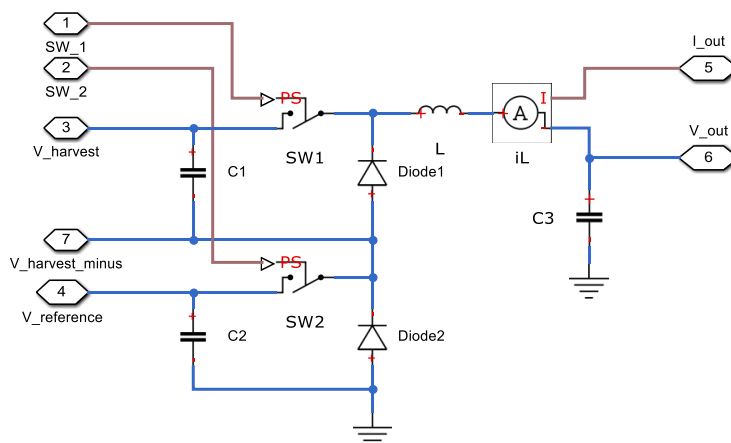


3.12 pav. Pagamintas žeminantysis/žeminantysis nuolatinės srovės keitiklis.

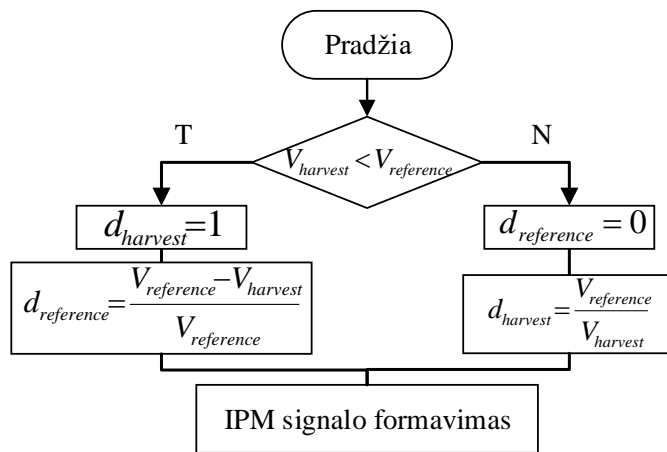
Kadangi keitiklio išėjimo įtampa nėra lygi teoriškai apskaičiuotai įtampai, reikia sukurti algoritmą, kuris automatiškai pakoreguotų raktų valdymo signalų skverbtis taip, kad išėjime būtų gauta norima įtampa.

### 3.5. Skverbtis valdančio algoritmo modeliavimas ir tyrimas

MATLAB Simulink programinėje terpėje modeliuojamas keitiklis (žr. 3.13 pav.) ir IPM signalų skverbtis valdantis algoritmas (žr. 3.14 pav.). Realizuotas bendras algoritmo vaizdas MATLAB Simulink aplinkoje pateiktas 3.15 paveiksle.

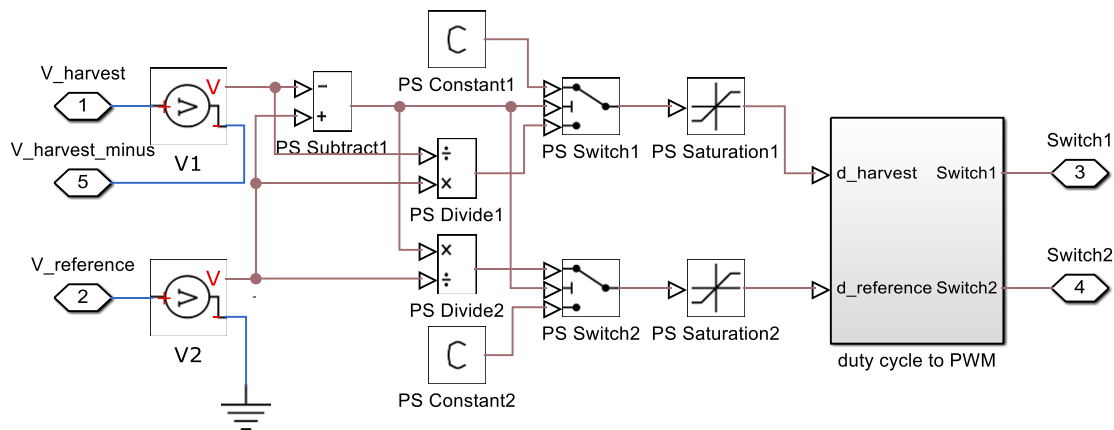


3.13 pav. MATLAB Simulink terpėje modeliuojama žeminamojo/žeminamojo keitiklio schema.



3.14 pav. Skverbtis apskaičiuojantis algoritmas.

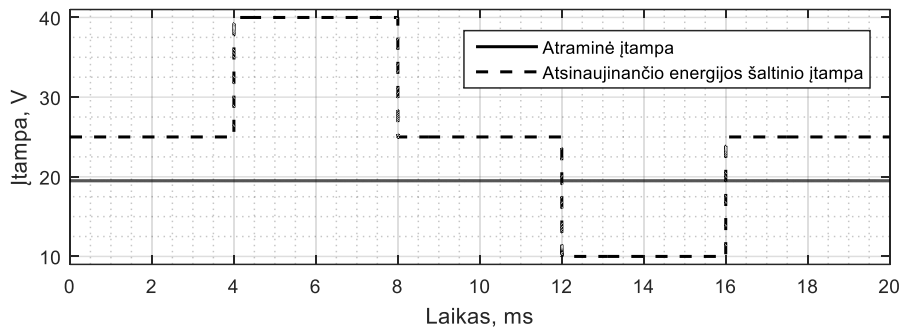
Bendroje struktūroje (žr. priedas 2) yra du pagrindiniai blokai „duty cycle controller“ (žr. 3.15 pav.) ir „Multi-input converter“ (žr. 3.13 pav.). Šiame modelyje yra du maitinimo šaltiniai, atraminis ( $V\_reference$ ) ir atsinaujinantis (imituojamas naudojant pora Voltage Source blokus).



3.15 pav. Realizuotas skverbčių apskaičiavimo algoritmas.

Aukščiau pateiktame paveiksle pateiktas realizuotas skverbtis apskaičiuojantis algoritmas. Apskaičiuotos skverbtys  $d_{harvest}$  ir  $d_{reference}$ , „duty cycle to PWM“ (žr. priedas 3) pagalba, transformuojamos į IPM signalus, kurie paduodami į keitiklio raktus SW1 ir SW2.

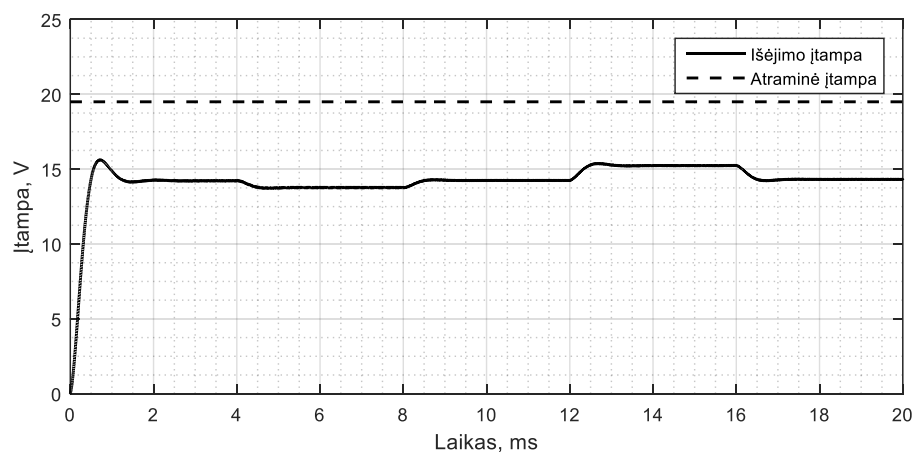
Sumodeliuotas algoritmas testuojamas į keitiklio prievadą  $V\_reference$  paduodant 19 V nuolatinę įtampą, o į  $V\_harvest$  – šuoliškai kintančią įtampą (žr. 3.16 pav.).



**3.16 pav.** Atraminio šaltinio ( $V_{reference}$ ) ir atsinaujinančio energijos šaltinio ( $V_{harvest}$ ) įtampos.

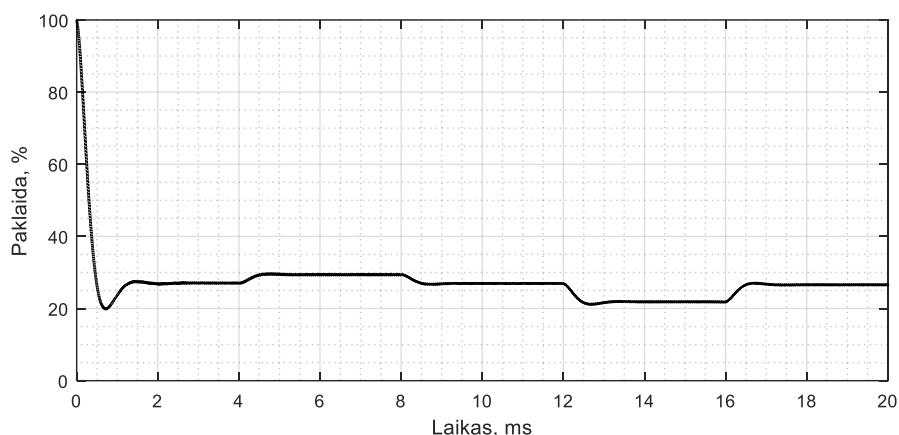
Algoritmas pagal (2.2) formulę apskaičiuoja tokias raktų skverbtis, kad keitiklis naudotų kaip galima mažiau atraminio šaltinio energijos. Tuo atveju, kai atsinaujinančio energijos šaltinio įtampa yra didesnė už atraminę įtampą, skverbtis  $d_{reference}$  lygi nuliui, taigi, visa energija paimama iš atsinaujinančio energijos šaltinio. Kai atsinaujinančio energijos šaltinio įtampa mažesnė už atraminio ( $V_{harvest} < V_{reference}$ ), rakto SW1 skverbtis nustatoma lygi 100 %, iš atraminio įtampos šaltinio paimama tiek energijos, kiek jos trūksta, kad išėjimo įtampa būtų lygi atraminei įtampai. Jeigu atsinaujinančio energijos šaltinio įtampa didesnė už atraminio ( $V_{harvest} > V_{reference}$ ), tada algoritmas rakto SW2 skverbtį nustato lygią 0 % ir atsinaujinančio energijos šaltinio įtampą nužemina iki reikiamo lygio. Laikinės diagramos, laiko momentu, kai įtampos  $V_{harvest} < V_{reference}$ , pateiktos priede 4.

3.17 paveiksle pateikti keitiklio simuliacijos rezultatai. Matyti, kad išėjimo įtampa yra mažesnė negu reikalaujama.



**3.17 pav.** Gauti modeliavimo rezultatai.

Apskaičiavus santykinę paklaidą (žr. 3.18 pav.) matyti, kad išėjimo įtampos paklaida didesnė nei 20 %.



**3.18 pav.** Keitiklio, su skverbtis valdančiu algoritmu, išėjimo įtampos paklaidos grafikas.

Algoritmas papildomas, kad automatiškai paskaičiuotų skirtumą tarp išėjimo įtampos ir atraminės šaltinio įtampos, pakoreguotų skverbtis  $d_{\text{harvest}}$  ir  $d_{\text{reference}}$  taip, kad keitiklio išėjimo įtampa būtų kuo artimesnė atraminei ir kad kaip įmanoma daugiau energijos būtų vartojama iš atsinaujinančio šaltinio (papildytas algoritmas pateiktas Priede 5).

Papildytame algoritme naudojamas PI (angl. *proportional integral*) valdiklis, kuris teoriškai (bet kuriuo laiko momentu) turėtų išlaikyti nulinę paklaidą tarp keitiklio išėjimo ir atraminės įtampos.

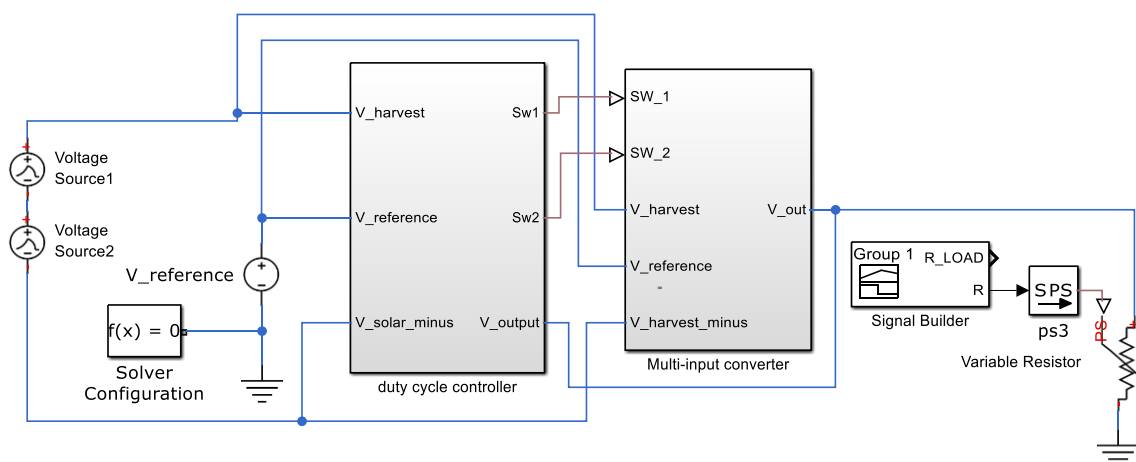
Šiuo papildytu algoritmu apskaičiuojamas skirtumas  $e$  tarp teorinės išėjimo įtampos, gautos naudojant apskaičiuotas teorines skverbtis  $d_{th}$  ir  $d_{tr}$ , ir keitiklio išėjimo įtampos. Tada su PI valdikliu skirtumas padauginamas iš koeficiento  $K_p$ ; skirtumas padauginamas iš koeficiento  $K_i$ , suintegruojamas, ir susumuojamos proporcinė ir integralinė dalys, taip gaunama vertė  $\Delta V_{out}$ . Tada patikrinama ar išėjimo įtampa mažesnė už atraminio energijos šaltinio. Jeigu taip, tikrinama ar apskaičiuota rakto SW1 skverbtis  $d_h$  neviršija 100 %. Jeigu skverbtis mažesnė nei 100 %, tai iš atsinaujinančio energijos šaltinio galima dar paimti energijos ir rakto SW1 skverbtis didinama dydžiu  $d_{\Delta h}$ , o atraminis šaltinis yra atjungtas. Jeigu išėjimo įtampa vis dar mažesnė už atraminio šaltinio, bet apskaičiuotos skverbties ir koreguojančios skverbties suma lygi 100 %, daugiau energijos iš atsinaujinančio šaltinio naudoti nebegalima, todėl įtampos skirtumui apskaičiuojama rakto SW2 koreguojanti skverbtis  $d_{\Delta r}$  ir pridedama prie  $d_{tr}$  skverbties.

Jeigu keitiklio išėjimo įtampa didesnė už atraminio energijos šaltinio, tikrinama sąlyga  $d_r \leq 0$ . Jeigu skverbtis didesnė už nulį, tai galios kiekį iš atraminio energijos šaltinio galima mažinti, mažinant atraminio šaltinio įtampos lygį valdančio rakto SW2 IPM signalo skverbtį

apskaičiuotu dydžiu  $d_{\Delta r}$ . Jeigu rakto SW2 skverbties mažinti nebegalima, mažinama rakto SW1 skverbtis  $d_h$ .

Šis algoritmas valdo raktų skverbtis taip, kad išėjimo įtampa svyruotų ties atraminės įtampos lygį.

Bendra simuliuojamo algoritmo struktūra, papildyta grįžtamoju ryšiu, kuris reikalingas paklaidos tarp atraminės ir išėjimo įtampos skaičiavimui, pateikta 3.19 paveiksle.



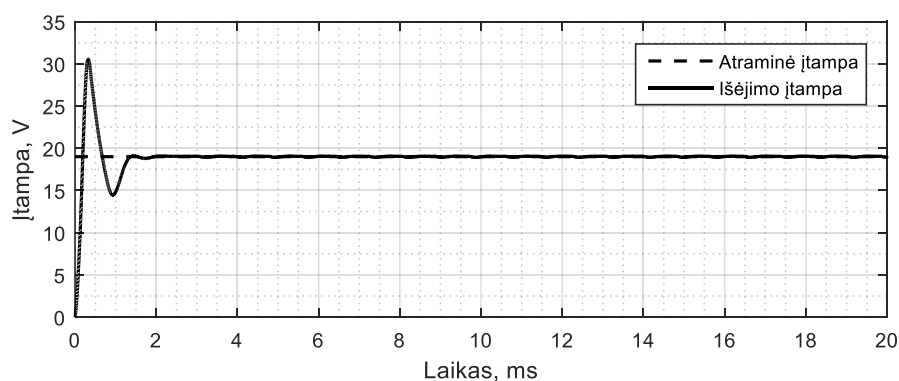
**3.19 pav.** Bendra struktūra papildyta grįžtamoju ryšiu.

Skverbčių korekcijai atlikti sukuriamas blokas „duty cycle correction“ (žr. *Priede 6.*). Kaip jis prijungtas prie bendro algoritmo pavaizduota priede 7.

Siekiant ištirti sumodeliuoto skverbtis valdančio algoritmo stabilumą keičiama atsinaujinančio energijos šaltinio įtampa ir keitiklio apkrova.

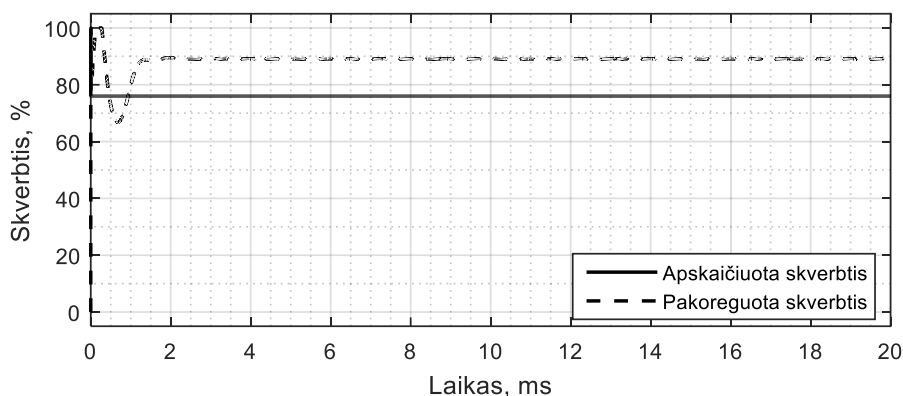
Pirmasis tyrimas atliekamas naudojant nekintančią  $V_{harvest}$  įtampą (25 V). Šiuo atveju  $V_{harvest} > V_{reference}$ . Keitiklio apkrova pastovi ir lygi 6  $\Omega$ .

Naudojant koreguojantį algoritmą ir stebint keitiklio išėjimo įtampą (žr. 3.20 pav.) matyti, kad ji artima atraminei įtampai, jos pulsacijos siekia  $\pm 0,8 \%$ . Akivaizdu, kad algoritmas su skverbčių korekcija daug tikslesnis.



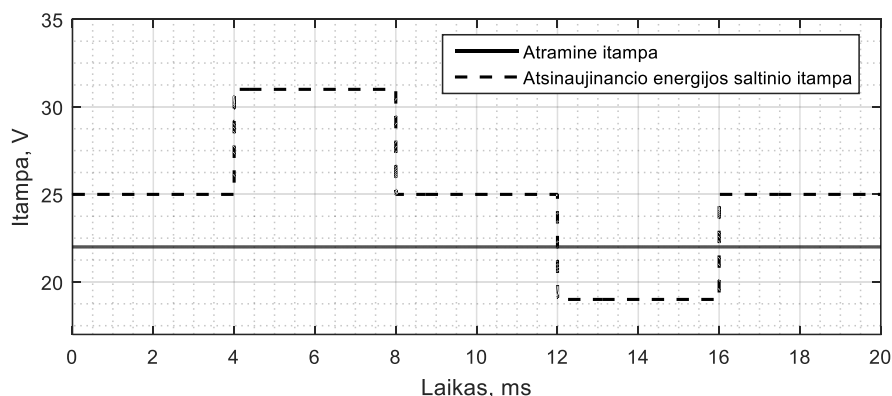
**3.20 pav.** Keitiklio išėjimo ir atraminė įtampos.

3.21 paveiksle pateiktos teorinės (pagal formulę apskaičiuota) ir pakoreguotos  $d_{\text{harvest}}$  skverbites laikinės diagramos. Teoriškai apskaičiuota skverbtis yra 76 %, o skverbtis su korekcija – 89,17 %. Diagramoje matyti, kad pradiniu laiko momentu skverbtis kurį laiką buvo lygi 100 %. Taip yra todėl, kad pradiniu laiko momentu skirtumas tarp atraminės ir išėjimo įtampos buvo didžiausias, algoritmas pilnai atidarė raktą tam, kad šis skirtumas kuo greičiau sumažėtų. Kai išėjimo įtampa tapo didesnė už atraminę, algoritmas pradėjo mažinti SW1 raktą valdančio IPM signalo skverbį.



**3.21 pav.** Teorinė ir pakoreguota  $d_{\text{harvest}}$  skverbitys.

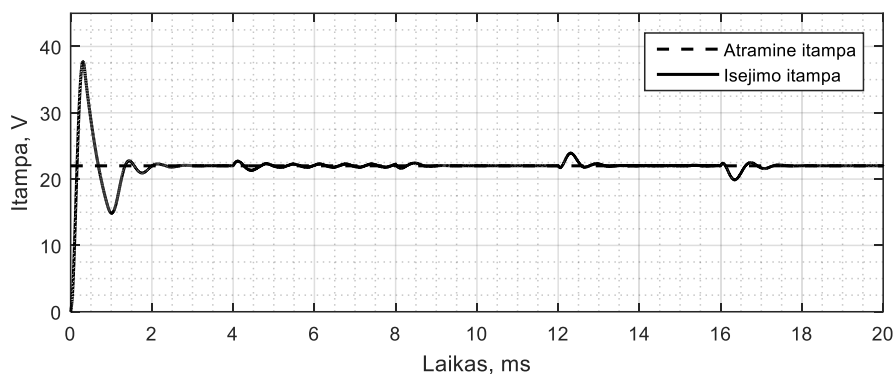
Algoritmo greitaveikos nustatymui šuoliškai keičiama keitiklio atsinaujinančio šaltinio įtampa ir stebimi keitiklio išėjimo įtampos laikinėje diagramoje pasireiškiantys pereinamieji procesai. Keitiklio apkrova yra pastovi ( $6 \Omega$ ). Atsinaujinančio energijos šaltinio šuoliškai kintanti įtampa  $V_{\text{harvest}}$  pateikta 3.22 paveiksle.



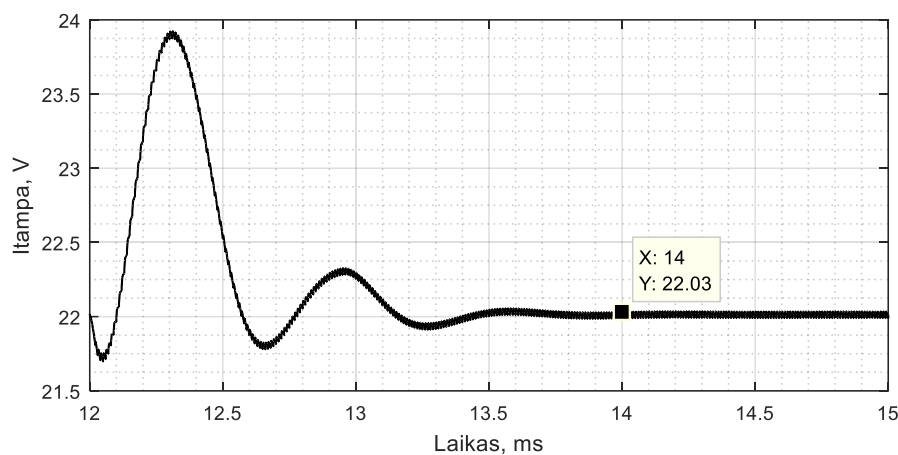
**3.22 pav.** Atraminio ir atsinaujinančio energijos šaltinių įtampos.



Keitiklio išėjimo įtampos laikinėje diagramoje matyti, kad didžiausi nuokrypiai nuo atraminės įtampos pasireiškia tuo momentu, kai  $V_{\text{harvest}}$  šuoliškai kinta nuo 25 V iki 19 V. Tuo metu galia apkrovai pradeda tiekti iš abiejų maitinimo šaltinių ir išėjimo įtampos nuokrypis nuo atraminės siekia 9 %.  $V_{\text{harvest}}$  pakitus nuo 25 V iki 31 V, pereinamojo proceso metu nuokrypis siekia 5 %.

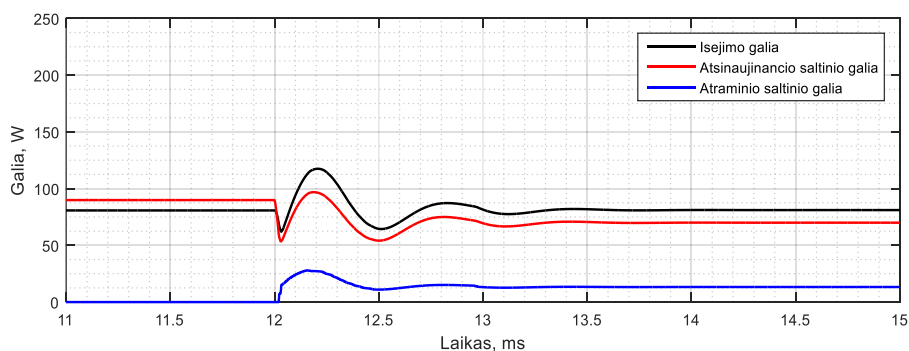


**3.23 pav.** Keitiklio išėjimo ir atraminė įtamos.



**3.24 pav.** Išėjimo įtampos reakcija į šuoliškai kintančią  $V_{\text{harvest}}$ .

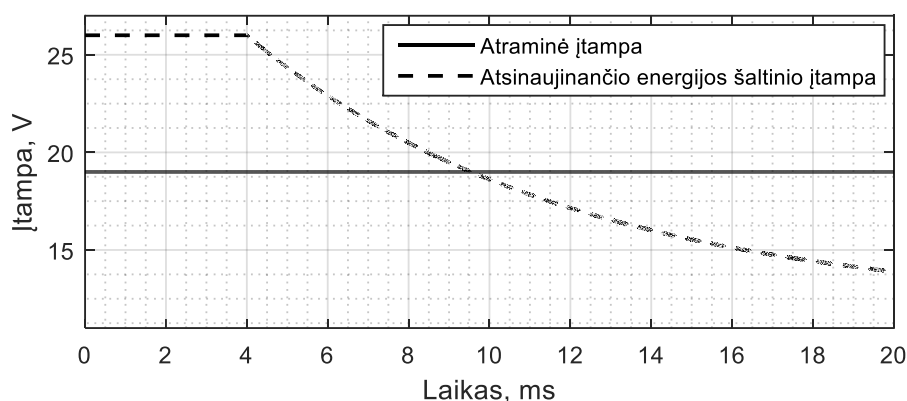
Atsinaujinančio energijos šaltinio įtampos šuolių metu keitiklio išėjimo įtampoje pasireiškę pereinamieji procesai trunka iki 2 ms (žr. 3.24 pav.).



**3.25 pav.** Keitiklio įėjimų ir išėjimo galių grafikai, laiko momentu, kai  $V_{\text{harvest}} < V_{\text{reference}}$ .

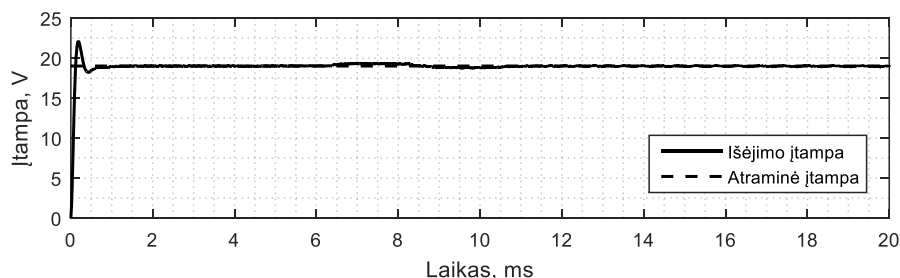
Matyti, kad laiko momentu, kai atsinaujinančio energijos šaltinio įtampa yra mažesnė už atraminę įtampą galios iš vieno šaltinio nebeužtenka ir galia pradeda imti iš atraminio energijos šaltinio. Grafike (žr. 3.25 pav.) matyti, kad galios trūkumas kompensuojamas atraminio šaltinio galia.

Realybėje atsinaujinančio energijos šaltinio išėjimo įtampa šuoliškai nekinta. Ji kinta tolygiai, pavyzdžiui, saulės elemento išėjimo galios pokytis priklauso nuo apšviestumo. Norint iširti, kaip algoritmas reaguotų į tolygius atsinaujinančio energijos šaltinio pokyčius, atliekamas tyrimas, kurio metu atsinaujinančio energijos šaltinio, prijungto prie MIC, įtampa kinta tolygiai. Keitiklio įėjimo įtampų laikinės diagramos pateiktos 3.26 paveiksle.

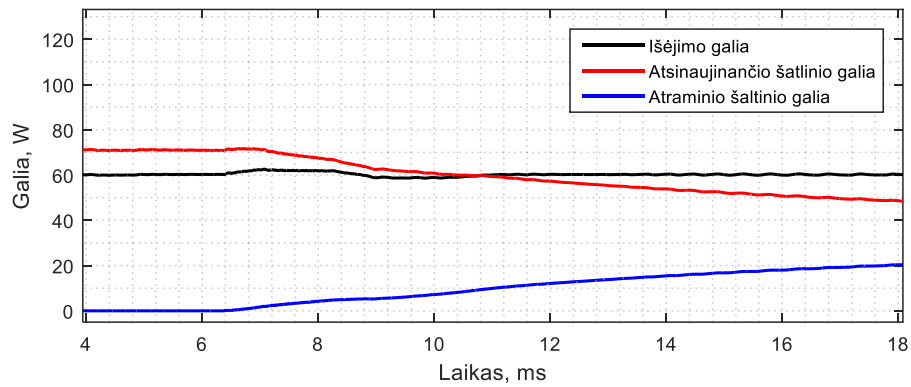


3.26 pav. Atraminio ir atsinaujinančio energijos šaltinių įtampos.

Kai atsinaujinančio energijos šaltinio įtampa mažėja tolygiai ir pasiekia atraminės įtampos lygį, priešingai nei tiriant keitiklį su šuoliškai kintančią įtampa, išėjimo įtampos laikinėje diagramoje (žr. 3.27 pav.) nepastebimi įtampos šuoliai. Galima daryti išvadą, kad keitiklis stabiliai funkcionuoja sąlygomis, panašiomis į realias.



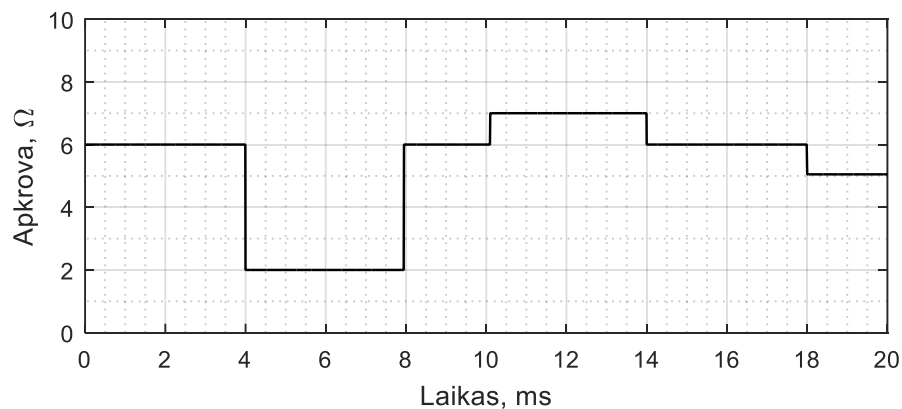
3.27 pav. Keitiklio išėjimo ir atraminė įtampos.



**3.28 pav.** Keitiklio išėjimo, atraminio ir rezervinio šaltinių galios.

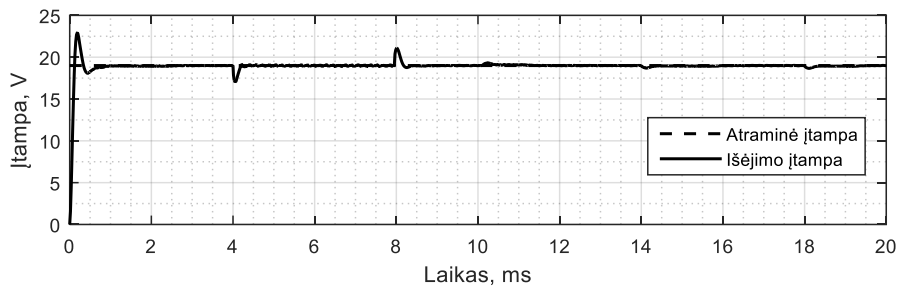
3.28 paveiksle matyti, kad tolygiai mažėjant atsinaujinančio energijos šaltinio galiai, išėjimo galia palaikoma stabili pradedant komutuoti raktą SW2 ir galios trūkumas imamas iš atraminio šaltinio.

Dažniausiai naudojamų prietaisų vartojama galia nėra pastovi. Jeigu prietaisas pereina iš budėjimo režimo į darbo, jo suvartojama galia išauga. Todėl atliekamas keitiklio reakcijos į apkrovos pokyčius tyrimas. Tam modeliuojamas šuoliškas apkrovos kitimas nuo  $6 \Omega$  iki  $2 \Omega$ , nuo  $6 \Omega$  iki  $7 \Omega$  ir nuo  $6 \Omega$  iki  $5 \Omega$  (žr. 3.29 pav.). Algoritmo simuliacijos rezultatai, kai atsinaujinančio energijos šaltinio įtampa (25 V) didesnė už atraminę įtampą (19 V),  $V_{\text{harvest}} > V_{\text{reference}}$ , o apkrova – kinta, pateikti 3.30 paveiksle.



**3.29 pav.** Modeliuojamas apkrovos kitimas.

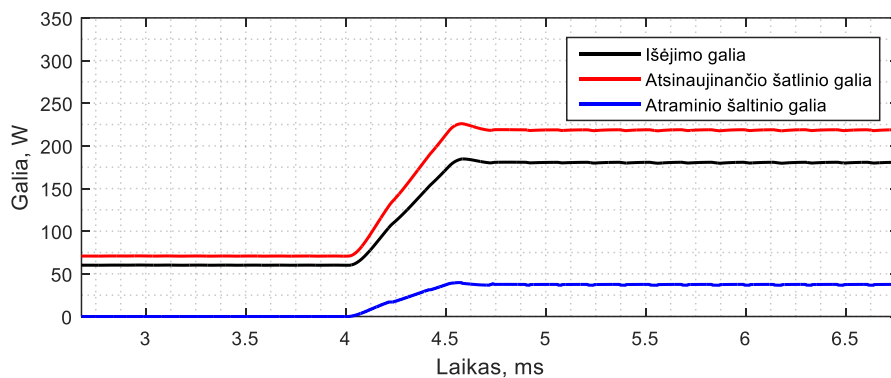
Priede 8 pateiktoje laikinėje skverbties  $d_{\text{harvest}}$  diagramoje matyti, kad algoritmas reaguoja į išėjimo įtampos nuokrypį nuo atraminės įtampos ir pakoreguoja skverbtį (nors pagal formulę apskaičiuojant skverbtį apkrovos pokytis neįvertinamas). Didžiausias išėjimo įtampos nuokrypis nuo atraminės įtampos pastebimas kai srovė, tekanti per apkrovą, šuoliškai padidėja.



**3.30 pav.** Keitiklio atraminės ir išėjimo įtampų laikinės diagramos.

Apkrovos šuolio metu  $6 \Omega - 7 \Omega$  nuokrypis 5 %;  $7 \Omega - 6 \Omega$  nuokrypis 4,3 %;  $6 \Omega - 2 \Omega$  nuokrypis 7 %;  $2 \Omega - 6 \Omega$ , nuokrypis 7 %.

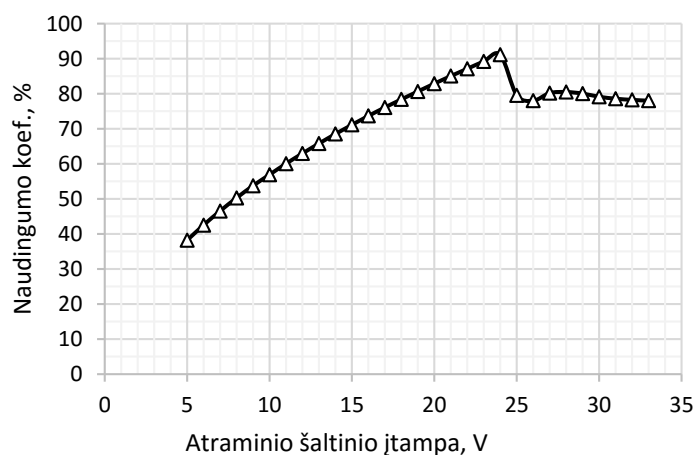
Nors keitiklio apkrovos pokyčio metu ir pasireiškė pereinamieji procesai, tačiau jie mažesni (3,4 karto) už įrenginių specifikacijose pateiktus leistinus nuokrypius.



**3.31 pav.** Keitiklio išėjimo, atraminio ir rezervinio šaltinių galios.

Pakitus apkrovai ir pradėjus vartoti didesnę srovę, vartojama galia padidėja (žr. 3.31 pav.). Kai atsinaujinančio energijos šaltinio galios nebeužtenka, algoritmas pradeda komutuoti raktą SW2.

Atsinaujinančio energijos šaltinio įtampą ir apkrovą laikant pastovią, o atraminio energijos įtampą keičiant diapazone nuo 5 V iki 33 V apskaičiuotas keitiklio keitimo naudingumo koeficientas (apskaičiuojamas keitiklio išėjimo galią dalinant iš įėjimo šaltinių galių sumos).



**3.32 pav.** keitiklio naudingumo koeficiento priklausomybė nuo atraminės įtampos.

Pateiktoje keitiklio naudingumo koeficiento priklausomybėje nuo atraminės įtampos (žr. 3.32 pav.) matyti, kad didinant keitiklio atraminės įtampos vertę, naudingumo koeficientas didėja, kai atsinaujinančio energijos šaltinio įtampa mažesnė už atraminio, naudingumo koeficientas sumažėja iki 80 %, nes tuo metu atsinaujinančio šaltinio energijos nebeužtenka ir pradedama naudoti atraminio energijos šaltinio galia. Keitiklio naudingumo koeficiento priklausomybės nuo apkrovos galios, kai  $V_{\text{harvest}} > V_{\text{reference}}$  ir  $V_{\text{harvest}} < V_{\text{reference}}$  pateiktos Priede 9.

Atlikus keitiklio, su skverbtis apskaičiuojančiu ir koreguojančiu algoritmu, schemos tyrimą daroma išvada, kad šis keitiklis tenkina užsibrėžtus parametrus. Keitiklio paklaida ( $\pm 0,8\%$ ) yra mažesnė už  $\pm 4\%$ , šuoliškai pakitus apkrovai arba atsinaujinančio keitiklio įtampai, pereinamojo proceso viršįtampiai siekia tik 9 % ir nusistovi iki reikalaujamos įtampos per 2 ms. Taip pat keitiklis stabiliai funkcionuoja, kai atsinaujinančio energijos šaltinio įtampa kinta tolygiai.

### **3.6. Žeminamojo/žeminamojo su padidintu žeminimo koeficientu skverbčių valdymo algoritmo modeliavimas ir tyrimas**

Sukurtas ir sumodeliuotas algoritmas skirtas antrajai žeminamojo/žeminamojo keitiklio schemai (žr. 2.12 pav.). Algoritmas, kuriuo apskaičiuojama ir pakoreguojama raktų skverbtis, kuriamas pagal (2.7) formulę, pats algoritmas pateiktas Priede 10, jo veikimas analogiškas anksčiau sumodeliuotam ir tirtam algoritmui, tik skiriasi formulės, pagal kurias algoritmas apskaičiuoja raktų skverbtis. Keitiklis, kuriam sukurtas šis algoritmas pateiktas priede 11.

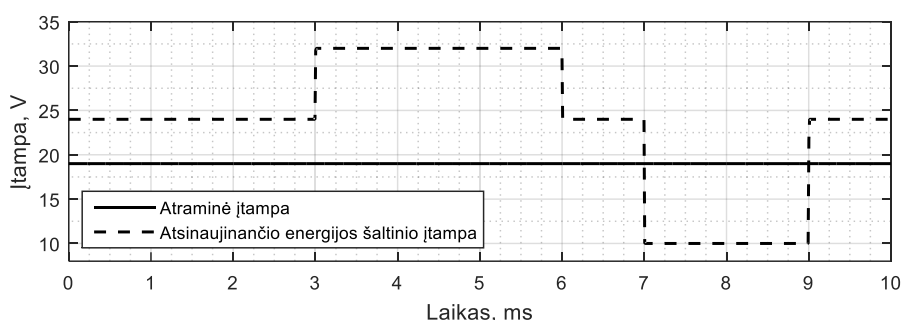
Algoritmas suskaičiuoja teorines raktų valdymo signalų skverbtis, tada su PI valdikliu suskaičiuojamas skirtumas tarp išėjimo įtampos ir atraminės įtampos. Po to tikrinama ar išėjimo įtampa mažesnė už atraminę įtampą. Jeigu raktą SW1 valdančio IPM signalo skverbtis mažesnė

už 100 %, išėjimo įtampos nuokrypis nuo atraminės įtampos kompensuojamas didinant atsinaujinančio energijos šaltinio įtampos lygį valdančio rakto SW1 skverbtį dydžiu  $d_{\Delta h}$ , o apskaičiuota rakto SW2 IPM signalo skverbtis nekeičiama. Kitu atveju, SW1 rakto skverbtis nustatoma lygi 100 %, o išėjimo įtampos nuokrypis nuo atraminės mažinamas didinant atraminio energijos šaltinio įtampos lygį valdančio rakto SW2 IPM signalo skverbtį  $d_{tr}$  dydžiu  $d_{\Delta h}$ .

Kai išėjimo įtampa viršija atraminio šaltinio įtampą, tikrinama, ar galima sumažinti atraminio energijos šaltinio įtampos lygį. Jei taip, atraminio energijos šaltinio įtampa mažinama, mažinant raktą SW2 valdančio IPM signalo skverbtį dydžiu  $d_{\Delta r}$ , o atsinaujinančio energijos šaltinio skverbtis nekeičiama. Jeigu atraminio energijos šaltinio įtampą valdančio rakto signalo skverbties mažinti nebegalima – mažinama atsinaujinančio energijos šaltinio įtampą valdančio rakto SW2 IPM signalo skverbtis. Simulink terpėje sukurtas algoritmas pateiktas Priede 12.

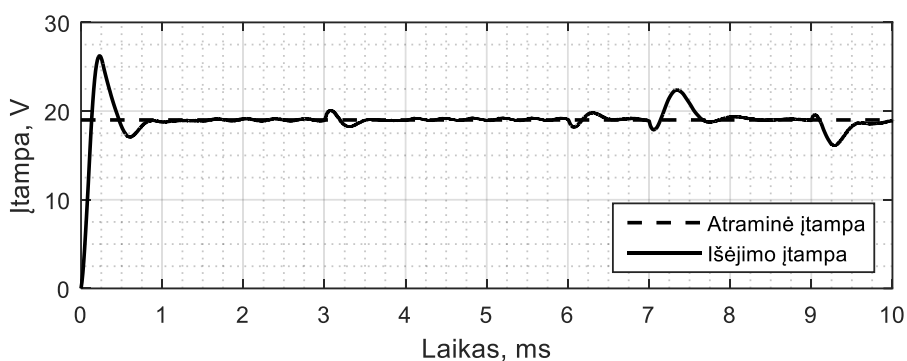
Algoritmo tyrimui naudojami tokio pat pobūdžio poveikiai (šuliškai kintanti atsinaujinančio energijos šaltinio įtampa (žr. 3.33 pav.) ir šuliškai kintanti apkrova (žr. 3.36 pav.)), kaip ir tiriant Priede 5 pateiktą algoritmą.

Tyrimo rezultatai, kai atsinaujinančio energijos šaltinio įtampa šuliškai kinta, o apkrova pastovi – 6  $\Omega$ , pateikti 3.34 paveiksle.



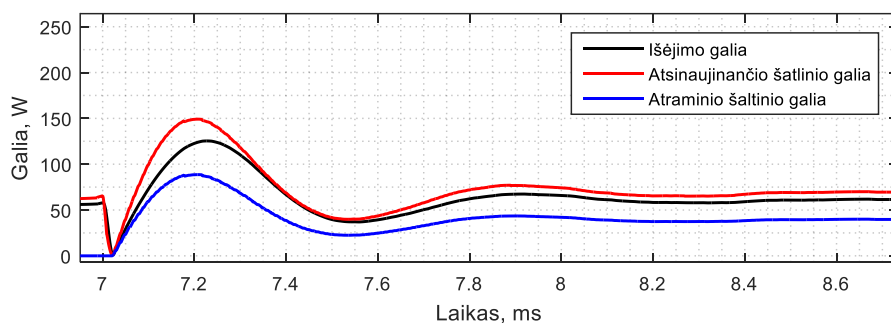
**3.33 pav.** Atraminio ir atsinaujinančio energijos šaltinių įtampos.

Įtampai  $V_{harvest}$  šuliškai pakitus nuo 24 V iki 10 V pastebimas didžiausias ir ilgiausiai trunkantis pereinamasis procesas (nuokrypis nuo  $V_{reference}$  siekia 37 %). Kaip ir ankstesniame algoritme, teigiamas įtampos  $V_{harvest}$  šuolis didelių paklaidų nesukelia (nuokrypiai siekia 5 ir 4 %).



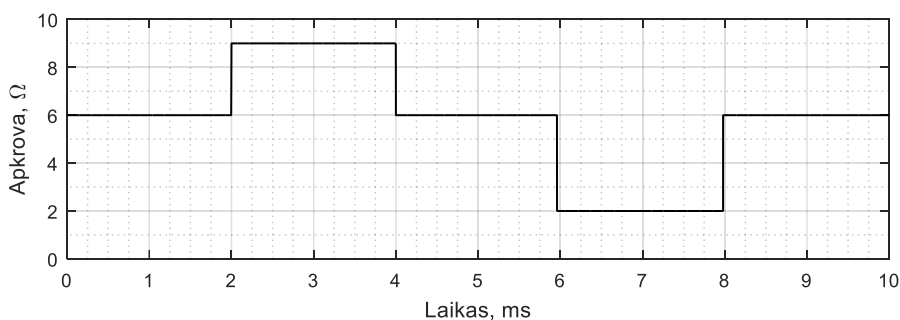
**3.34 pav.** Keitiklio išėjimo ir atraminė įtamos.

Galios laikinės diagramos (žr. 3.35 pav.) momentu, kai atsinaujinančio energijos šaltinio įtampa  $V_{\text{harvest}}$  tampa mažesnė už atraminio energijos šaltinio įtampą  $V_{\text{reference}}$ , matyti, kad algoritmas pradeda komutuoti raktą SW2 ir galios trūkumas paimamas iš atraminio šaltinio.



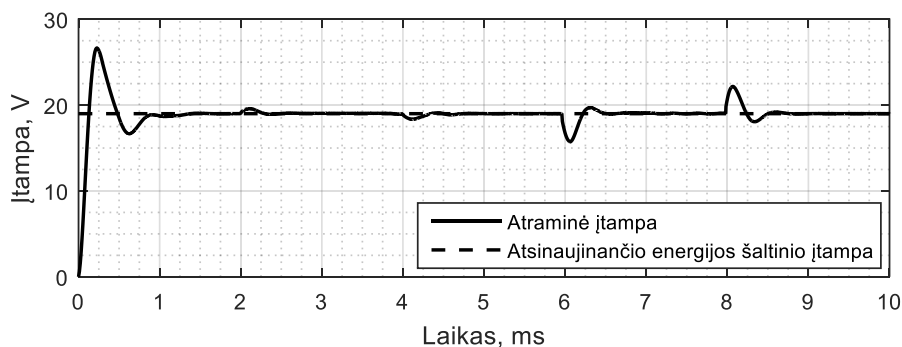
**3.35 pav.** Keitiklio išėjimo, atraminio ir rezervinio šaltinių galios.

Tiriama algoritmo reakcija į kintančią keitiklio apkrovą (sumodeliuotas apkrovos pokytis pateiktas 3.36 paveiksle). Algoritmo tyrimo rezultatai, kai atsinaujinančio energijos šaltinio įtampa 25 V, o apkrova kinta pateikti 3.37 paveiksle.



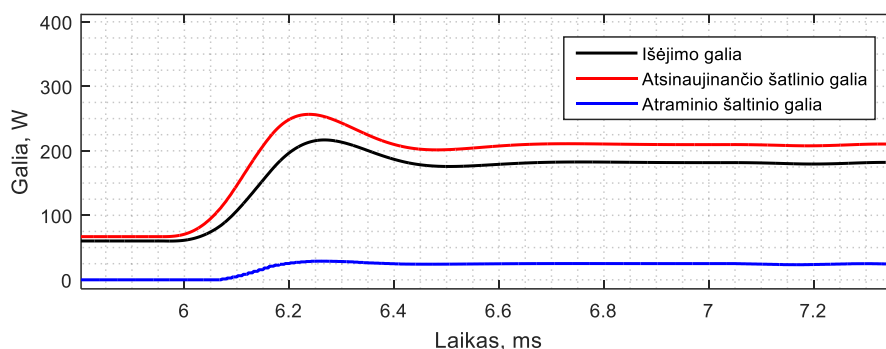
**3.36pav.** Modeliuojamas apkrovos kitimas.

Apkrovos šuolio metu  $6 \Omega - 9 \Omega$  nuokrypis – 5 %;  $9 \Omega - 6 \Omega$  nuokrypis – 5 %;  $6 \Omega - 4 \Omega$  nuokrypis – 13 %;  $4 \Omega - 6 \Omega$ , nuokrypis – 13 %.



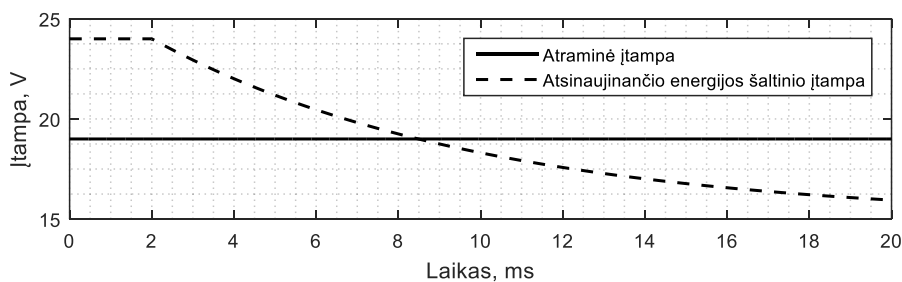
3.37 pav. Keitiklio išėjimo ir atraminė įtamos.

Galios laikinės diagramos (žr. 3.38 pav.) momentu, kai apkrova pradeda vartoti daugiau srovės, matyti, kad algoritmas pradeda komutuoti raktą SW2 ir galios trūkumas paimamas iš atraminio šaltinio.



3.38 pav. Keitiklio išėjimo, atraminio ir rezervinio šaltinių galios.

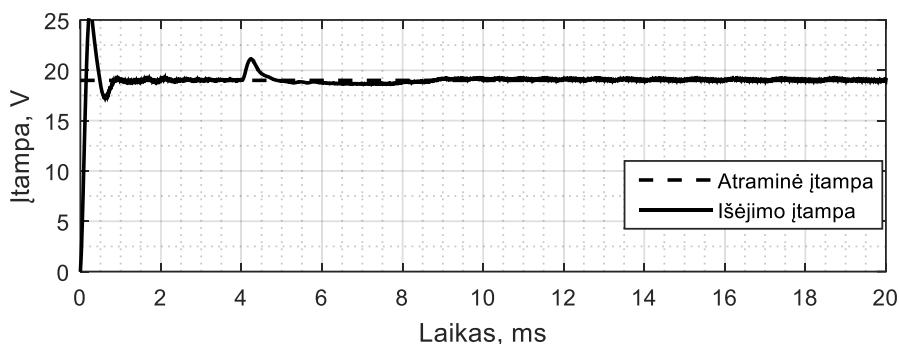
Tiriama keitiklio su skverbtiis koreguojančiu algoritmu reakcija į tolygiai kintančią atsinaujinančio energijos šaltinio įtampą. Keitiklio įėjimo įtampų laikinės diagramos pateiktos 3.39 paveiksle.



3.39 pav. Atraminio ir atsinaujinančio energijos šaltinių įtamos.

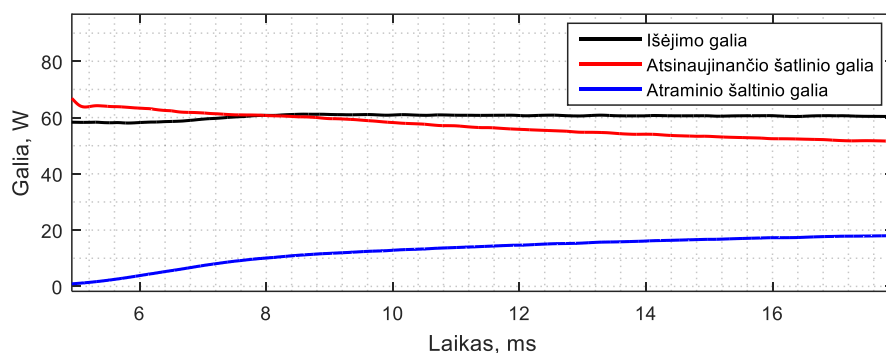


Kai atsinaujinančio energijos šaltinio įtampa mažėja tolygiai, pastebimas įtampos šuolis keitiklio išėjimo įtampos laikinėje diagramoje. Tuo momentu pradedamas komutuoti raktas SW2 (žr. 3.40 pav.).



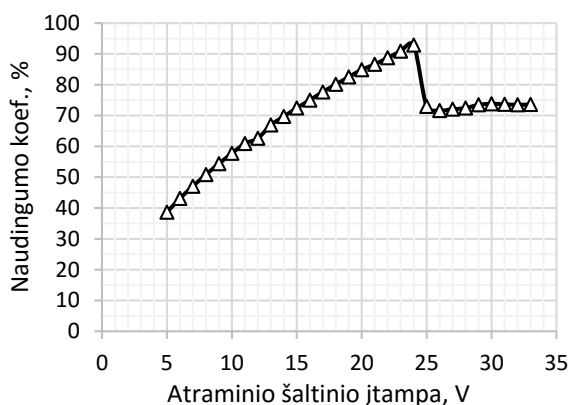
**3.40 pav.** Keitiklio atraminės ir išėjimo įtampų laikinės diagramos.

3.41 paveiksle matyti kaip kombinuojant atsinaujinančių energijos šaltinių galias išėjime palaikoma stabili galia.



**3.41 pav.** Keitiklio išėjimo, atraminio ir rezervinio šaltinių galios.

Atsinaujinančio energijos šaltinio įtampą ir apkrovą laikant pastovią, o atraminio energijos įtampą keičiant diapazone nuo 5 V iki 33 V apskaičiuotas keitiklio keitimo naudingumo koeficientas. Pateiktoje keitiklio naudingumo koeficiento priklausomybėje nuo atraminės įtampos (žr. 3.42 pav.) matyti, kad didinant keitiklio atraminės įtampos vertę, naudingumo koeficientas didėja, kai atsinaujinančio energijos šaltinio įtampa mažesnė už atraminio, naudingumo koeficientas sumažėja iki 73 %, nes tuo metu atsinaujinančio šaltinio energijos nebeužtenka ir pradedama naudoti atraminio energijos šaltinio galia. Keitiklio naudingumo koeficiento priklausomybės nuo apkrovos galios, kai  $V_{\text{harvest}} > V_{\text{reference}}$  ir  $V_{\text{harvest}} < V_{\text{reference}}$  pateiktos Priede 13.



**3.42 pav.** Keitiklio naudingumo koeficiento priklausomybė nuo atraminės įtampos.

Atlikus keitiklio, su skverbtiis apskaičiuojančiu ir koreguojančiu algoritmu, schemas tyrimą daroma išvada, kad šis keitiklis taip pat tenkina užsibrėžtus parametrus. Keitiklio paklaida ( $\pm 0,9\%$ ) yra mažesnė už buityje naudojamų prietaisų AC/DC keitiklių specifikacijose pateiktas paklaidas. Šuoliškai pakitus apkrovai, keitiklio išėjimo įtampos laikinėje diagramoje pasireiškia pereinamieji procesai, kurie nuo atraminės įtampos yra nukrypę  $13\%$ , o jų nusistovėjimo laikas –  $2\text{ ms}$ . Šuoliškai pakitus atsinaujinančio energijos šaltinio įtampai, nuokrypis, nuo atraminės įtampos, pasiekia  $37\%$ , tačiau realybėje atsinaujinančių energijos šaltinių įtampa kinta tolygiai.

### 3.7. Skyriaus apibendrinimas

Šiame skyriuje pateiktos sumodeliuotos keitiklių schemas ir jų simuliacijos rezultatai. Pateiktos MIC keitiklių išėjimo įtampų priklausomybės nuo raktų skverbčių, kai maitinimo šaltinių įtampos fiksuotos. Tolimesni simuliacijai atlikti su LTSpice IV programa. Ištirta IPM signalų sinchronizavimo įtaka keitiklio išėjimo signalams. Taip pat įsitikinta, kad keitiklių išėjimo įtampa neatitinka teoriškai apskaičiuotų. Todėl keitikliams sukurti raktų skverbtiis koreguojantys algoritmai, kurie sumodeliuoti ir simuliuoti naudojant Simulink programinę terpę.

## IŠVADOS

- Darbe apžvelgti lygiagretūs ir nuoseklūs nuolatinės įtampos kelių įėjimų keitiklių jungimo būdai. Lygiagretaus jungimo keitikliai, dėl maitinimo šaltinių įtampų amplitudžių skirtumo, galios apkrovai tiekti negali. Todėl išsamiau apžvelgti nuosekliai sujungti keitikliai, kurie galią apkrovai gali perduoti vienu metu arba atskirai.
- Sumodeliavus ir atlikus keitiklių simuliacijas iširta IPM signalų sinchronizavimo įtaka keitiklių išėjimo signalams. Nustatyta, kad mažiausi išėjimo įtampos svyravimai yra tada, kai keitiklio raktai atidaromi ne vienu metu.
- Suprojektavus ir pagaminus žeminamąjį/žeminamąjį keitiklį ir jį ištestavus, pastebėta, kad išėjimo įtampos nuokrypis nuo teorinės yra 4,6 %. Siekiant sumažinti paklaidą sukurti du skverbtis valdantys algoritmai.
- Tiriant žeminamąjį/žeminamąjį keitiklį su suprojektuotu algoritmu nustatyta, kad keitiklio išėjimo įtampos pulsacijos siekia 0,8 % (žymiai mažesnės už daugelio AC/DC keitiklių išėjimo įtampų tolerancijas). Šuoliškai keičiant keitiklio apkrovą pereinamieji procesai trunka 2 ms. Apkrovos šuolių metu, pereinamųjų procesų nuokrypis nuo atraminės įtampos siekia 7 %.
- Tiriant keitiklio, su skverbtis valdančio algoritmu, reakciją į tolygiai kintančius atsinaujinančio energijos šaltinio įtampos pokyčius pastebėta, kad keitiklis funkcionavo stabiliai ir laiko momentu, kai atsinaujinančio energijos šaltinio įtampa tapo mažesnė už atraminio šaltinio įtampą, išėjimo laikinėse diagramose pereinamieji procesai nepasireiškė.
- Apskaičiuotas keitiklio keitimo naudingumo koeficientas. Atraminio šaltinio įtampai tapus lygiai atsinaujinančio šaltinio įtampai, koeficientas didžiausias (91 %), vos tik atraminio šaltinio įtampa tampa didesnė už atsinaujinančio šaltinio, koeficientas sumažėja iki 80 %. Taip yra todėl, kad tuo momentu galia apkrovai tiekama iš abiejų energijos šaltinių.
- Tiriant antrojo žeminamojo/žeminamojo keitiklio skverbtis valdančią algoritmą gauti panašūs rezultatai: keitiklio išėjimo įtampos pulsacijos siekia 0,9 %; pereinamieji procesai trunka 2 ms; šuoliškai kintant atsinaujinančio energijos šaltinio įtampai pereinamųjų procesų nuokrypis siekia 37 %, o šuoliškai kintant apkrovai nuokrypis – 13 %.
- Antrojo keitiklio keitimo naudingumo koeficientas yra didžiausias (93 %), kai atraminio ir atsinaujinančio energijos šaltinių įtampos artimos. Kai atraminio šaltinio įtampa tampa didesnė – koeficientas sumažėja iki 73 %.
- Pateiktose galių laikinėse diagramose matyti, kad galios trūkumas, atsiradęs dėl apkrovos pokyčių arba atsinaujinančio energijos šaltinio galios svyravimų, paimamas iš atraminio energijos šaltinio.

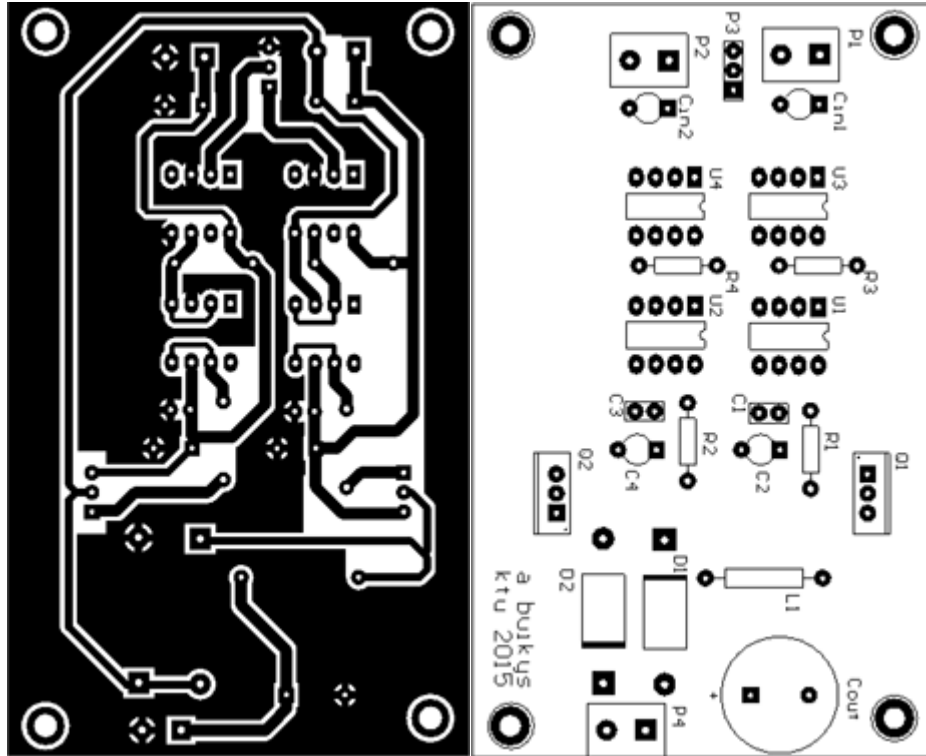
## INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. MORIARTY, P. and HONNERY, D. What is the Global Potential for Renewable Energy?. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012, vol. 16, no. 1. pp. 244-252. ISSN 1364-0321.
2. EUROPOS PARLAMENTO IR TARYBOS DIREKTYVA 2009/28/EB. Dėl skatinimo naudoti atsinaujinančių išteklių energiją, iš dalies keičianti bei vėliau panaikinanti Direktyvas 2001/77/EB ir 2003/30/EB.
3. *BP Statistical Review of World Energy June 2015*. 64-th ed. London, UK, 2015.
4. Autonominės saulės elektrinės. [interaktyvus], [žiūrėta 2014-11-26]. Prieiga per internetą: <http://www.sauleselektrines.lt/lt/produktai/autonominės-saulės-elektrinės>
5. Dell Vostro 1500 owner's manual. [interaktyvus], [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per internetą: [www.siue.edu/lovejoylibrary/pdf/DELL\\_VOSTRO\\_1500.pdf](http://www.siue.edu/lovejoylibrary/pdf/DELL_VOSTRO_1500.pdf)
6. Monitor/notebook universal ac adapter. [interaktyvus], [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per internetą: <http://diablotek.com/v2.0/phocadownload/userupload/AC%20Adapter%20User%20Manual.pdf>
7. Engineering specification XO laptop power ac adapter. [interaktyvus], [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per internetą: [http://wiki.laptop.org/images/d/d3/XO-1.5\\_Adapter\\_Spec.pdf](http://wiki.laptop.org/images/d/d3/XO-1.5_Adapter_Spec.pdf)
8. A 45 watt adapter power supply. [interaktyvus], [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per internetą: [http://www.nxp.com/documents/application\\_note/AN01033.pdf](http://www.nxp.com/documents/application_note/AN01033.pdf)
9. Digital terrestrial receiver TV star T7200 CX HD. [interaktyvus], [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per internetą: <http://www.tvstar.eu/assets/Uploads/T7200ENG.pdf>
10. CHEN, Y. M., LIU, Y. C. and LIN, S. H. Double-Input PWM DC/DC Converter for High-/Low-Voltage Sources. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2006, vol. 53, no. 5. pp. 1538-1545 ISSN 0278-0046.
11. NAKUTIS, Ž., RAMANAUSKAS, R., KAŠKONAS, P., KNYVA, V., SAUNORIS, M. and KNYVA, M. Modeling of Steady State Operation of Two-Input DC-DC Converter for Combining of Harvested and Reserve Powers. *Elektronika Ir Elektrotechnika*. 2013, vol. 19, no. 9. pp. 57-60 ISSN 1392-1215.
12. LIU, Y. C. and CHEN, Y. M. A Systematic Approach to Synthesizing Multi-Input DC-DC Converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2009, vol. 24, no. 1. pp. 116-127 ISSN 0885-8993.
13. AL-ATRASH, H., PEPPER, M. and BATARSEH, I. A Zero-Voltage Switching Three-Port Isolated Full-Bridge Converter. *INTELEC 06 – Twenty-Eighth International Telecommunications Energy Conference*. 2006 ISBN 0275-0473. DOI 10.1109/INTLEC.2006.251647.

14. WU, H. et al. Multiport Converters Based on Integration of Full-Bridge and Bidirectional DC–DC Topologies for Renewable Generation Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2014, vol. 61, no. 2. pp. 856-869 ISSN 0278-0046.
15. FALCONES, S., AYYANAR, R. and MAO, X. A DC–DC Multiport-Converter-Based Solid-State Transformer Integrating Distributed Generation and Storage. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2013, vol. 28, no. 5. pp. 2192-2203 ISSN 0885-8993.
16. DHIVYA, B. and DHAMODHARAN, S. Analysis of Multiport DC-DC Converter in Renewable Energy Sources. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2013, vol. 02, no. 10. pp. 181-184 ISSN 2319-1163.
17. TAO, H., KOTSOPOULOS, A., DURATE, J. L. and HENDRIX, M. A. M. Family of Multiport Bidirectional DC-DC Converters. *IEE Proceedings - Electric Power Applications*. 2006, vol. 153, no. 3. pp. 451-458 ISSN 1350-2352.
18. RAMU, G. Analysis and Design of a Isolated Bidirectional DC-DC Converter for Hybrid Systems. *Middle-East Journal of Scientific Research*. 2014, vol. 19, no. 7. pp. 960-965.
19. YALAMANCHILI, K. P. FERDOWSI, M. and CORZINE K. New Double Input DC-DC Converters for Automotive Applications. *2006 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. 2006 ISBN 1938-8756. DOI 10.1109/VPPC.2006.364366.
20. UDRIS, D. Nuolatinės įtampos keitikliai. In: *Elektroniniai Galios Keitikliai. Mokomoji Knyga [interaktyvus]*. Vilnius: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 2008, pp. 56-123 [žiūrėta 2014-11-26]. ISBN 9955-25-20-288-2. Prieiga per: <https://www.ebooks.ktu.lt/eb/435/elektroniniai-galios-keitikliai/>
21. SUBBARAO, M., BABU, C.S. and SATYNARAYANA, S. Analysis and Control of Double-Input Integrated Buck-Buck-Boost Converter for Hybrid Electric Vehicles. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*. 2011, vol. 1, no. 4. pp. 40-46. ISSN 2231-1963.
22. REHMAN, Z., AL-BAHADLY, I. and MUKHOPADHYAY, S. Multiinput DC–DC Converters in Renewable Energy Applications – an Overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015, vol. 41. pp. 521-539. ISSN 1364-0321.
23. KRISHNA, P. Y., FERDOWSI M., LU S. , XIAO P and CORZINE K. Derivation of Double-input DC-DC Power Electronic Converters. *Electric Power Components and Systems*. 2011, vol. 39, pp. 478-490. ISSN: 1532-5008
24. MUNTEAN, N., GAVRIS, M. and CORNEA O. Dual Input Hybrid DC-DC Converters. *EUROCON - International Conference on Computer as a Tool (EUROCON)*. 2011, DOI 10.1109/EUROCON.2011.5929268.

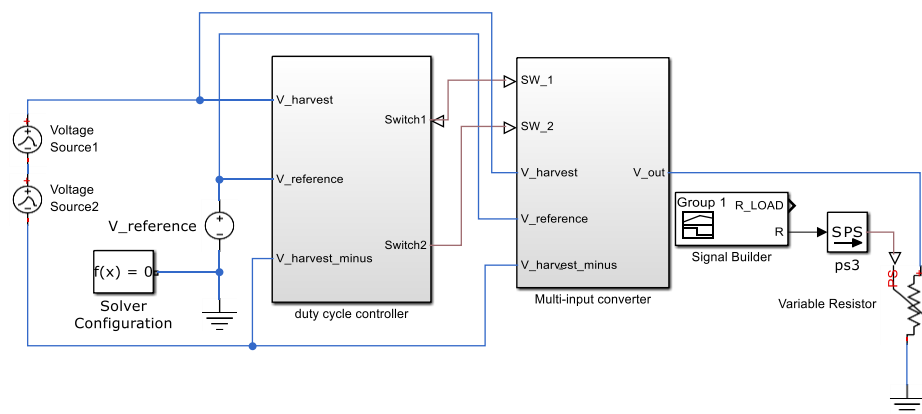
## PRIEDAI

Priedas 1. Suprojektuoto keitiklio spausdintinio montažo plokštė.



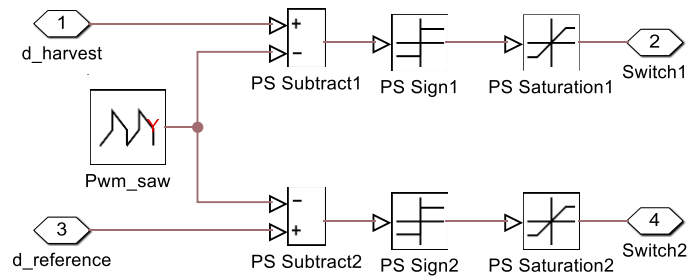
1 pav. Suprojektuoto keitiklio spausdintinio montažo plokštė ir elementai.

Priedas 2. Bendra simuliuojamo algoritmo struktūra.



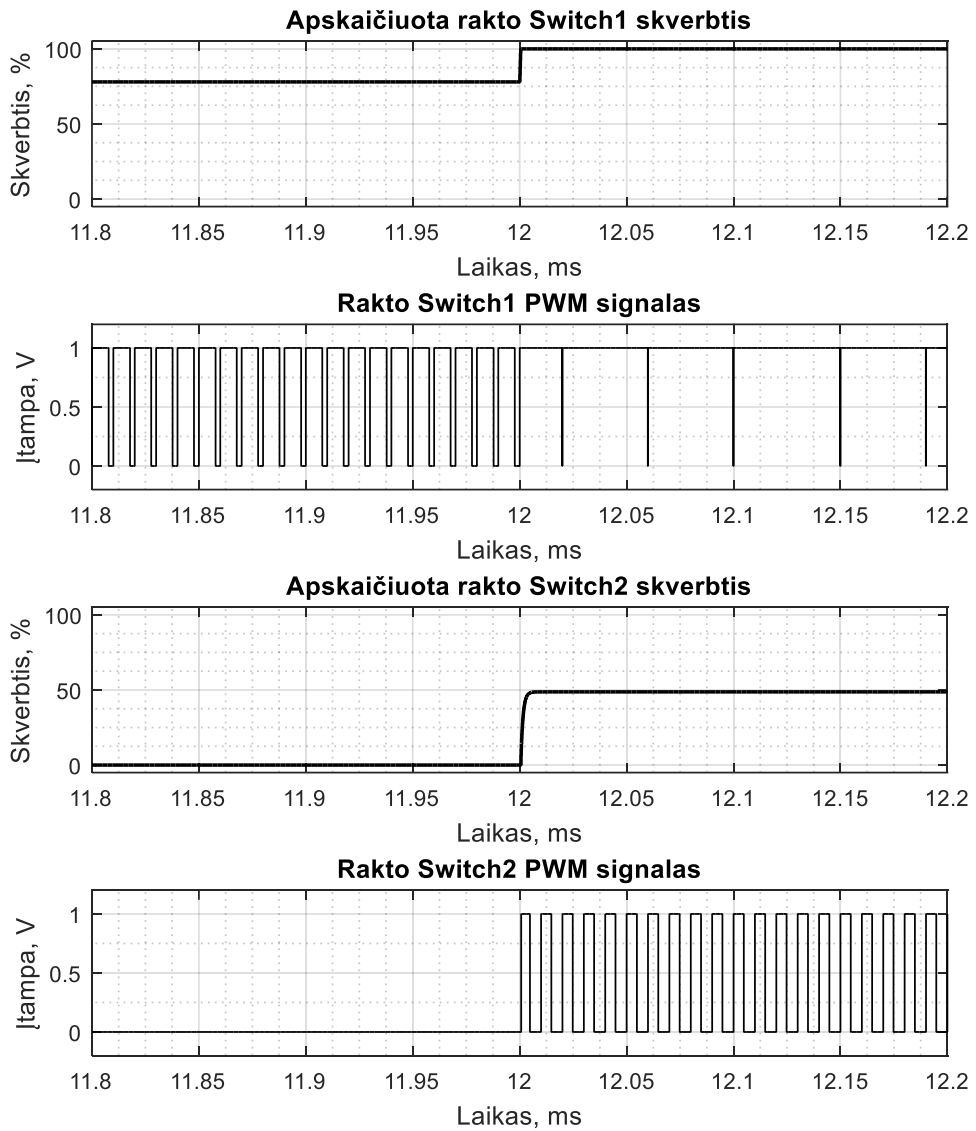
2 pav. Bendra „Simulink“ terpėje modeliujamo algoritmo struktūra.

Priedas 3. Bloko „Duty cycle to PWM“ turinys.



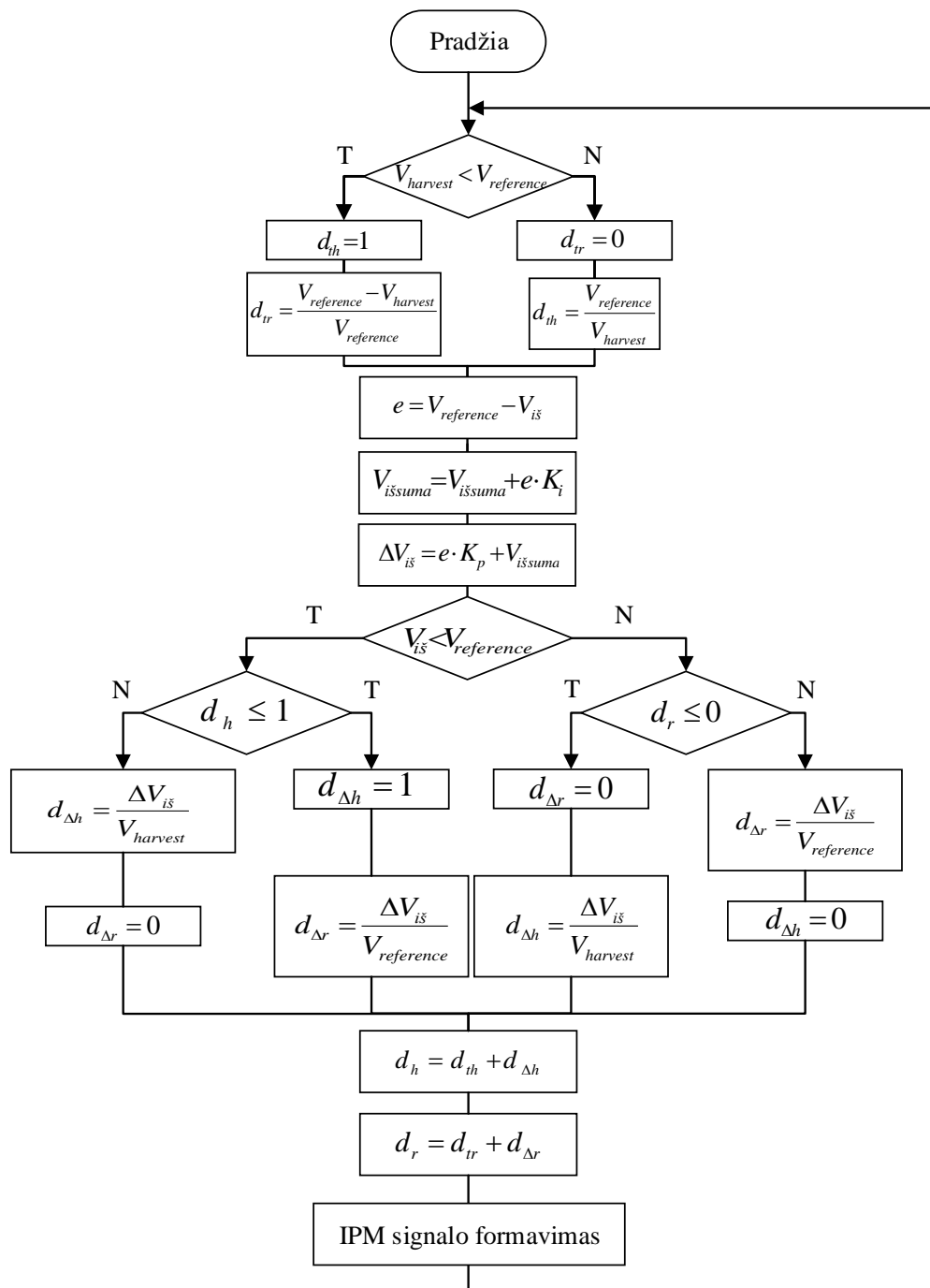
3 pav. PWM signalų formavimas iš apskaičiuotų skverbčių.

Priedas 4. Apskaičiuotos skverbtyys ir suformuoti IPM signalai.



4 pav. Laiko momentas, kai skverbtyys  $d_1$  100 %, o  $d_2$  50 %.

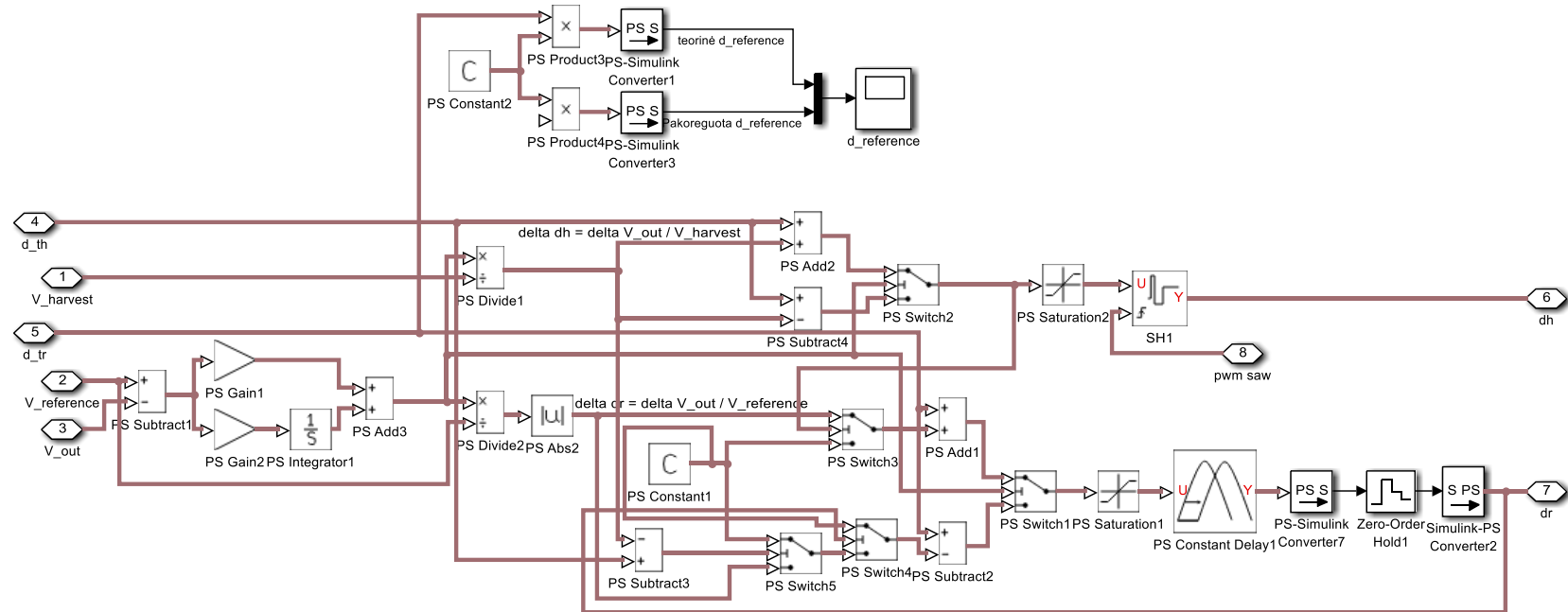
Priedas 5. Sudarytas raktų valdymo algoritmas.



5 pav. Papildytas, skverbtiis apskaičiuojantis, algoritmas.

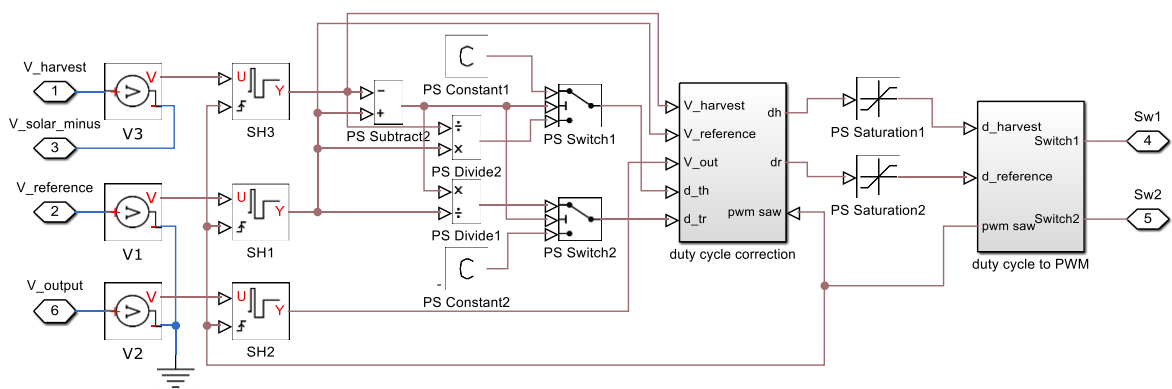


Priedas 6. Bloko „duty cycle correction“ turinys.



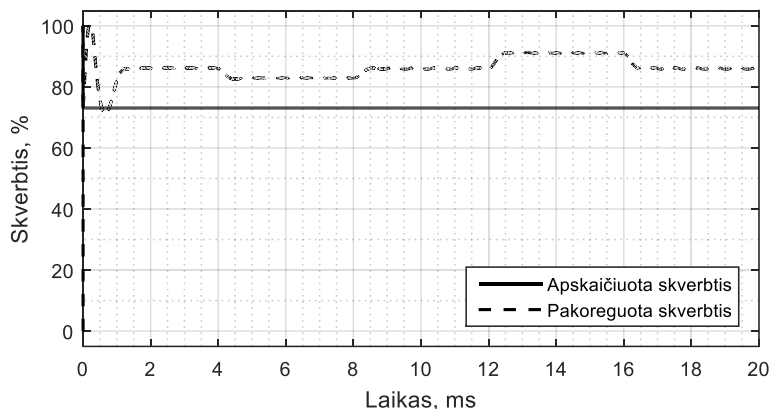
6 pav. Bloko „duty cycle correction“ turinys.

Priedas 7. Algoritmas, papildytas „duty\_cycle\_correction“ bloku.



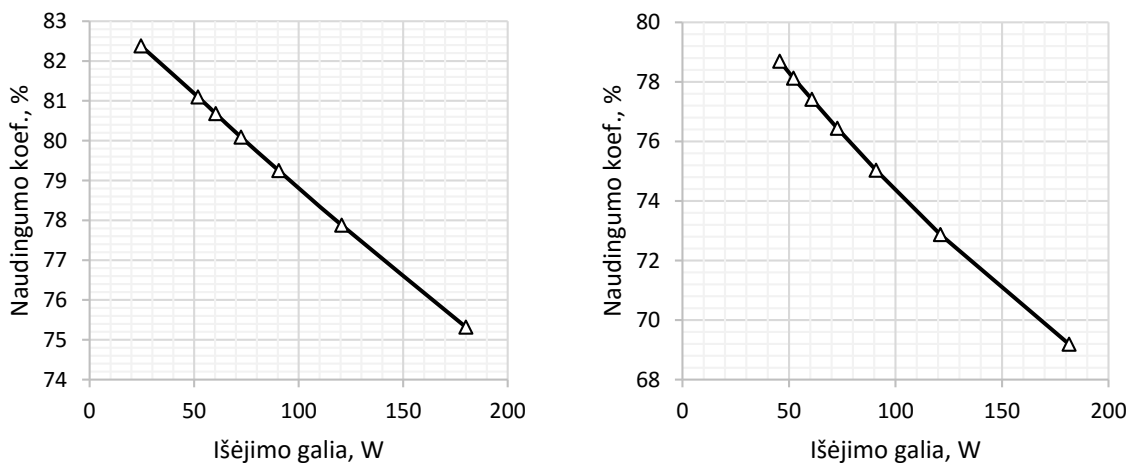
7 pav. Algoritmas, papildytas „duty\_cycle\_correction“ bloku.

Priedas 8. Apskaičiuota ir pakoreguota skverbtis  $d_{harvest}$  kai kinta apkrova.



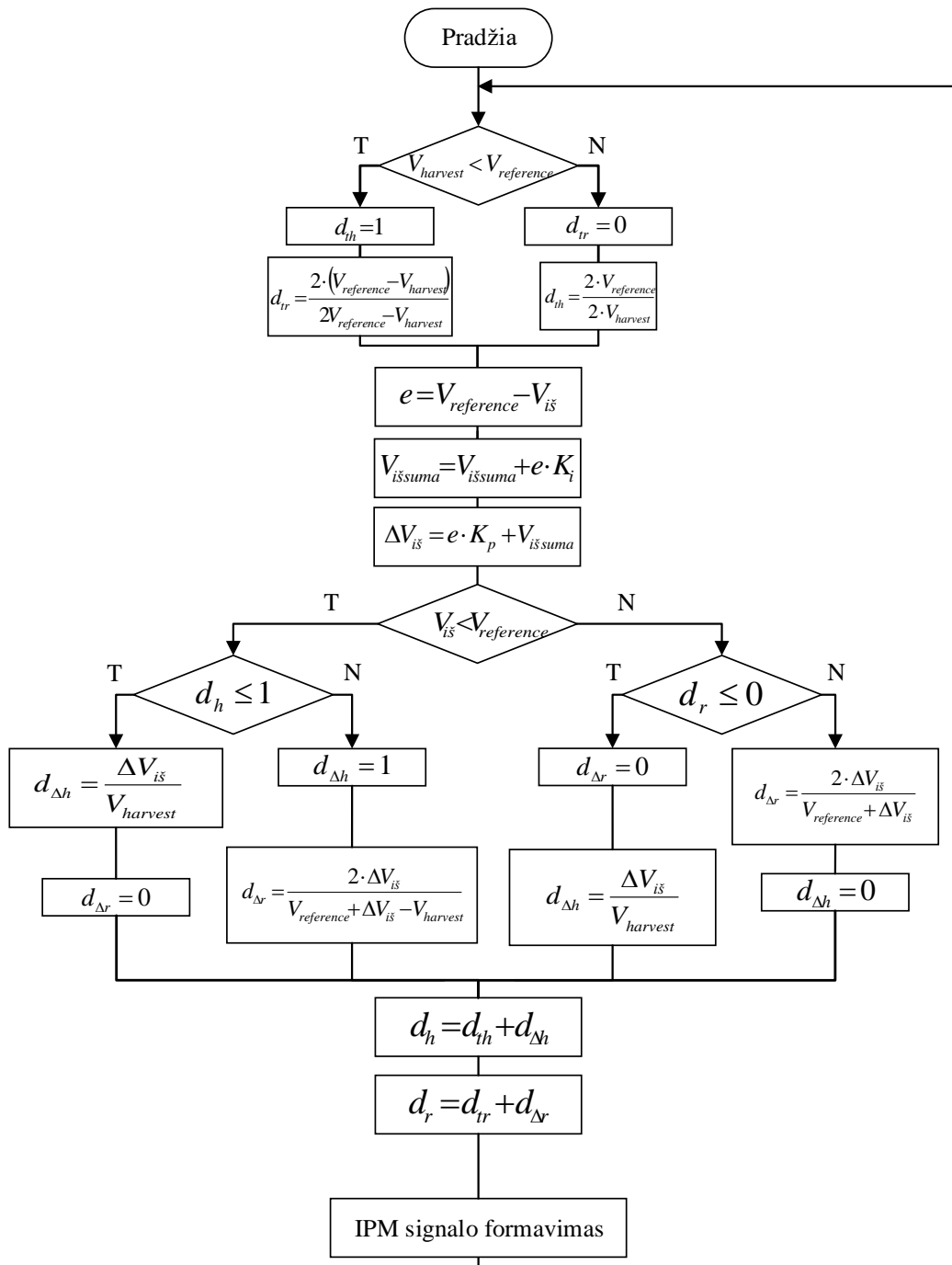
8 pav. Apskaičiuota ir pakoreguota skverbtis  $d_{harvest}$  kai kinta apkrova.

Priedas 9. Keitiklio naudingumo koeficiento priklausomybės nuo apkrovos galios.



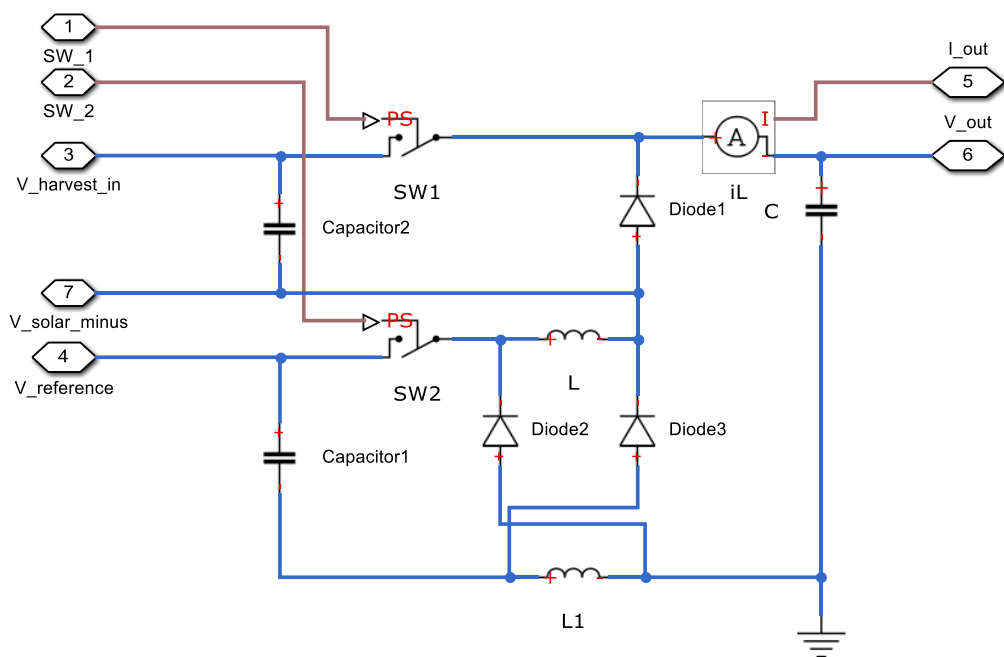
9 pav. Keitiklio naudingumo koeficiento priklausomybe nuo apkrovos galios kai šaltinių įtampa pastovios ir  $V_{harvest} > V_{reference}$  (kairėje);  $V_{harvest} < V_{reference}$  (dešinėje).

Priedas 10. Sudarytas raktų valdymo algoritmas.



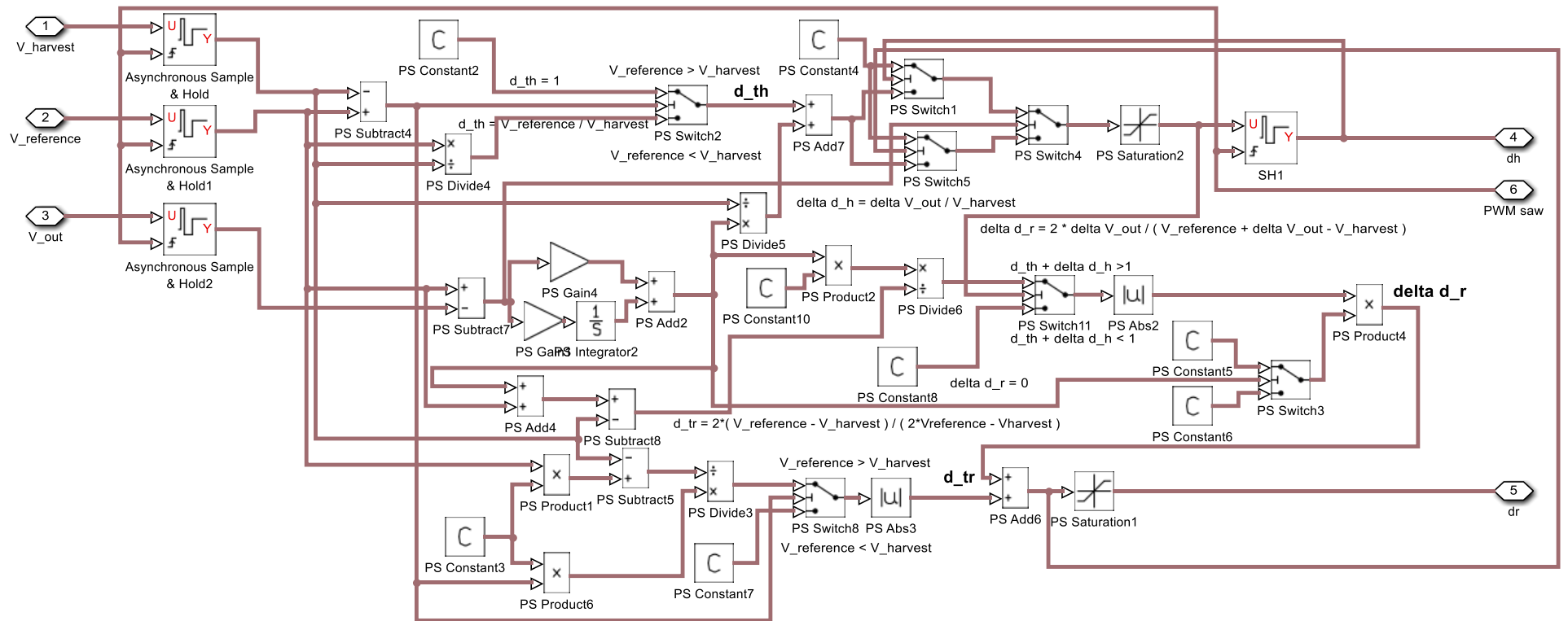
10 pav. Skverbtis apskaičiuojantis algoritmas.

Priedas 11. MIC su didesniu žeminimo koeficientu sumodeliuota schema Simulink terpėje.



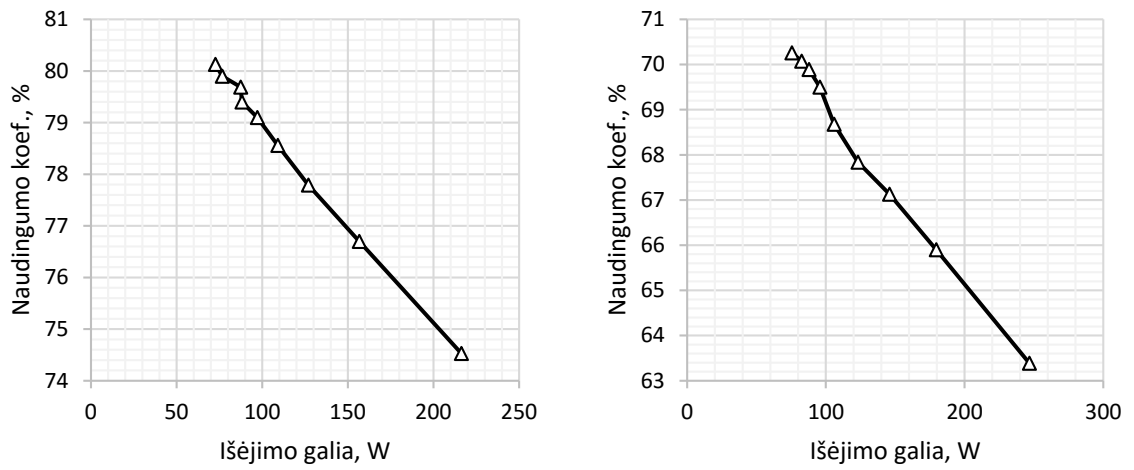
**11 pav.** MIC keitiklis sumodeliuotas Simulink terpėje.

Priedas 12. Skverbtis apskaičiuojantis ir pakoreguojantis algoritmas Simulink terpėje.



12 pav. Skverbtis apskaičiuojančio ir pakoreguojančio algoritmo realizacija Simulink terpėje.

Priedas 13. Keitiklio naudingumo koeficiento priklausomybės nuo apkrovos galios.



**13 pav.** Keitiklio naudingumo koeficiento priklausomybe nuo apkrovos galios kai šaltinių įtampos pastovios ir  $V_{\text{harvest}} > V_{\text{reference}}$  (kairėje);  $V_{\text{harvest}} < V_{\text{reference}}$  (dešinėje).