



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

ELEKTROTECHNIKOS KATEDRA

Dmitrij Laneckij

H-TILTELIO TOPOLOGIJOS AC/AC KEITIKLIO TYRIMAS

**INVESTIGATION OF THE AC/AC CONVERTER BASED ON H-BRIDGE
TOPOLOGY**

Magistro baigiamasis darbas

Elektronikos ir elektros inžinerijos studijų kryptis

Elektros energetikos sistemų inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H62002

Elektros energetikos technologijų specializacija

Vilnius, 2017

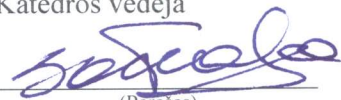
VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

ELEKTROTECHNIKOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėja



(Parašas)

Sonata Tolvaišienė

(Data)

Dmitrij LANECKIJ

H-TILTELIO TOPOLOGIJOS AC/AC KEITIKLIO TYRIMAS
INVESTIGATION OF THE AC/AC CONVERTER BASED ON H-BRIDGE
TOPOLOGY

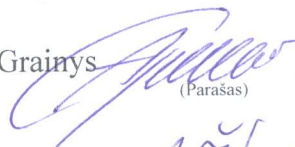
Magistro baigiamasis darbas

Elektronikos ir elektros inžinerijos studijų kryptis

Elektros energetikos sistemų inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H62002

Elektros energetikos technologijų inžinerijos specializacija

Vadovas doc. dr. Audrius Grainys



10.11.05-16

(Parašas)

(Data)

Konsultantė dr. Aušra Žemienė



2017-05-23

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2017

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROTECHNIKOS KATEDRA

Elektronikos ir elektros inžinerijos studijų kryptis

Elektros energetikos sistemų inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H62002

Elektros energetikos technologijų specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėja



(Parašas)

Sonata Tolvaišienė

(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

.....Nr.

Vilnius

Studentui Dmitrij Laneckij

Baigiamojo darbo tema: H-tiltelio topologijos AC/AC keitiklio tyrimas
Investigation of the AC/AC converter based on H-bridge topology

patvirtinta 2015 m. spalio 27 d. dekanų potvarkiu Nr. 213el.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2017 m. birželio 1 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Duomenys: 1. Vardinė maitinimo įtampa: 230 V AC 50 Hz. 2. Išėjimo įtampa: 50-230 VAC 50-100 Hz.
3. Nuolatinės srovės intarpas. 4. Apkrovos galia: ne mažiau 600 W. 5. H tiltelio topologija sudaryta iš
lauko tranzistorių. 6. Trijų lygių impulso pločio moduliacija.

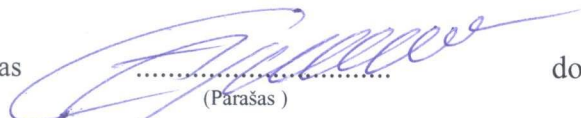
Aiškinamasis raštas:

IVADAS. 1. ANALITINĖ DALIS. 1.1. AC-DC keitiklių apžvalga. 1.2. DC-AC keitiklių apžvalga.
1.3. DC-DC keitiklių apžvalga. 1.4. AC-AC keitiklių apžvalga. 1.5. Keitiklių valdymo apžvalga.
1.6. Elementai sudarantys keitiklius. 2. PROJEKTINĖ DALIS. 2.1. Pusės tiltelio topologijos keitiklis.
2.2. H-tiltelio topologijos keitiklis. 3. APSAUGA NUO ELEKTROS. 3.1. Apsaugos laipsnio nustatymas.
3.2. Elektros įrenginių įžeminimas. IŠVADOS IR PASIŪLYMAI. LITERATŪROS SĄRAŠAS.

Priedai: 1. Principinė elektrinė schema.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai: dr. Aušra Žemienė

Vadovas



(Parašas)

doc. dr. Audrius Grainys

(Moksl. laipsnis/pedag.vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau



(Parašas)

Dmitrij Laneckij

(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas Elektronikos fakultetas Elektrotechnikos katedra	ISBN _____ ISSN _____ Egz. sk. Data-.....-.....
Antrosios pakopos studijų Elektros energetikos sistemų inžinerijos programos magistro baigiamasis darbas Pavadinimas H-tiltelio topologijos AC/AC keitiklio tyrimas Autorius Dmitrij Laneckij Vadovas Audrius Grainys	
Kalba: lietuvių	
Anotacija AC-AC galios keitiklių ir jų praktinio pritaikymo galimybėms ištirti baigiamajame darbe projektuojamas trijų grandžių kintamosios srovės keitiklis su nuolatinės įtampos grandimi. Suprojektuotas keitiklis, turintis nuolatinės srovės grandį, geba reguliuoti sistemos parametrus tokius kaip išėjimo įtampą ir jos dažnį. Suprojektuotas keitiklis pritaikytas naudoti nenutrūkstanto maitinimo grandinėse. Keitiklio valdymui sėkmingai pritaikyti MOSFET puslaidininkiai raktai, valdomi trijų lygių impulso pločio moduliacija. Baigiamajame darbe atlikta analitinė galios keitiklių topologijų, jų komponentų ir valdymo galimybių literatūros apžvalga. Projektuojant keitiklį sudaryta funkcinė schema pagal kurią parinkti konkretūs sistemos elementai bei principinė elektrinė schema su ryšiais tarp elementų. Naudojantis SPICE programiniu paketu, sudarytas kompiuterinis projektuojamo keitiklio modelis, ištirti pereinamieji vyksmai elektrinėse grandinėse. Taip pat darbe apžvelgiamas sistemos keitiklio pavojus žmogui ir jo išvengimo būdai. Darbą sudaro šios dalys: įvadas, analitinė, projektinė, apsauga nuo elektros, išvados ir pasiūlymai, literatūros sąrašas. Darbo apimtis – 73 p. teksto be priedų, 70 iliustr., 4 lent., 41 bibliografinis šaltinis. Prieduose pateikta keitiklio principinė elektrinė schema ir pažyma apie dalyvavimą konferencijoje.	
Prasminiai žodžiai: AC-AC keitiklis, DC intarpas, H tiltelis, kintamosios srovės keitiklis, MOSFET, trijų lygių impulso pločio moduliacija	

ISBN	ISSN
Copies No.	
Date-.....-.....	

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Dmitrij Laneckij, 20113184

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Elektros energetikos sistemų inžinerija, EETfm-15

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2017 m. gegužės 26 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „H-tiltelio topologijos AC/AC keitiklio tyrimas“ patvirtintas 2015 m. spalio 27 d. dekanų potvarkiu Nr. 213el, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Mano darbo vadovas dr. Audrius Grainys.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).



(Parašas)

Dmitrij Laneckij
(Vardas ir pavardė)

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	8
LENTELIŲ SĄRAŠAS	11
SANTRUMPOS	12
ĮVADAS.....	13
1. LITERATŪROS ANALIZĖ.....	15
1.1. AC-DC keitiklių apžvalga.....	16
1.2. DC-AC keitiklių apžvalga.....	19
1.3. DC-DC keitiklių apžvalga.....	21
1.4. AC-AC keitiklių apžvalga.....	31
1.5. Keitiklių valdymo apžvalga	33
1.6. Keitiklių elementai	40
2. PROJEK TINĖ DALIS.....	48
2.1. Pusės tiltelio topologijos keitiklis	49
2.2. H tiltelio topologijos keitiklis.....	52
3. APSAUGA NUO ELEKTROS	73
3.1. Apsaugos laipsnio nustatymas	73
3.2. Elektros įrenginių įžeminimas.....	74
IŠVADOS IR PASIŪLYMAI	75
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	76
PRIEDAI	79

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Elektros energijos gamybos ir perdavimo topologinė schema (Chakraborty 2013)	14
2 pav. Elektros energijos keitiklių klasifikavimo struktūrinė schema	15
3 pav. Vienfazio vienpusio nevaldomojo lygintuvo principinė schema (a),	17
4 pav. Vienfazio dvipusio nevaldomojo lygintuvo principinė schema (a), įėjimo (U_{in}) ir išėjimo (U_o) signalų kreivės (b)	17
5 pav. Vienfazio dvipusio nevaldomojo lygintuvo su talpiniu filtru principinė schema (a), išėjimo signalų kreivės (b) (Hart 2010)	18
6 pav. Pusės H tiltelio topologijos įtampos inverteris: a) grandinė, b) išėjimo signalas.....	20
7 pav. H tiltelio topologijos inverteris: a) grandinė, b) išėjimo signalas (Rashid 2014).....	21
8 pav. Bazinė žeminamojo keitiklio grandinė	22
9 pav. Žeminamojo keitiklio veikimo fazės: energijos kaupimas (a) ir energijos perdavimas apkrovai (b)	23
10 pav. Įtampos diode VD (viršuje) ir srovės induktyviajame elemente (apačioje) kreivės esant netrūkiųjų srovių (a) ir trūkiųjų srovių režimui (b) (B. Semenov 2005).....	23
11 pav. Bazinė aukštinamojo keitiklio grandinė	24
12 pav. Aukštinamojo keitiklio veikimo fazės: a) energijos kaupimo fazė, b) sukauptos energijos perdavimo fazė	25
13 pav. Aukštinamojo keitiklio veikimo charakteristikos esant netrūkiųjų srovių (a) ir trūkiųjų srovių režimui (b) (B. Semenov 2005).....	26
14 pav. Bazinė žeminamojo-aukštinamojo keitiklio grandinė	27
15 pav. Žeminamojo-aukštinamojo keitiklio veikimo fazės: a) energijos kaupimo fazė, b) sukauptos energijos perdavimo fazė	27
16 pav. Žeminamojo-aukštinamojo keitiklio veikimo charakteristikos esant netrūkiųjų srovių (a) ir trūkiųjų srovių režimui (b) (B. Semenov 2005).....	28
17 pav. Grįžtamojo keitiklio principinė schema	29
18 pav. Grįžtamojo keitiklio veikimo charakteristikos, kai darbo ciklas.....	31
19 pav. AC-AC keitiklis su nuolatinės srovės intarpu	32
20 pav. Ciklokonverteris (a) ir jo signalo charakteristika (b) (Chakraborty 2013).....	32
21 pav. Integralinio ciklo valdymas išėjime gaunant sudvigubintą įėjimo dažnį (Chakraborty 2013).....	32

22 pav. Kintamosios srovės keitiklio su izoliuotosios užtūros dvipoliais tranzistoriais grandinė	33
23 pav. Tipinė nuolatinės srovės keitiklio grandinė su grįžtamojo ryšio schema.....	34
24 pav. Tipinė aukštinamojo arba grįžtamojo keitiklio koregavimo grandinė	34
25 pav. Valdymo grandinė su impulso dažnio moduliavimu.....	35
26 pav. Valdymo keičiant įtampą grandinė su impulso pločio moduliavimu.....	35
27 pav. Keitiklio tranzistorinio rakto valdymo signalo formavimas (Mack 2005).....	36
28 pav. Valdymo keičiant srovę grandinė su impulso pločio moduliavimu	37
29 pav. Valdymo keičiant slydimą grandinė	37
30 pav. Trijų lygių inverterio, kuriame vidurinė atšaka sujungta per diodus, principinė schema	38
31 pav. Inverterio grandinė, valdoma trijų lygių impulso pločio moduliavimu (a), ir grandinėje generuojamų signalų kreivės (b) (Michal 2015)	39
32 pav. Realių nepolinio (a) ir polinio (b) kondensatorių ekvivalentinės grandinės	40
33 pav. Tranzistorinio rakto perjungimo formos	44
34 pav. Realaus transformatoriaus ekvivalentinė grandinė.....	44
35 pav. Supaprastinta įtampų keitimo struktūrinė schema.....	48
36 pav. Projektuojamo H tiltelio topologijos keitiklio funkcinė schema.....	49
37 pav. Projektuojamo AC-DC-AC įtampos keitiklio principinė schema.....	50
38 pav. AC-DC-AC keitiklio modelis „LTspice XVII“ aplinkoje.....	51
39 pav. Tinklo įtampa keitiklio įėjime (a) ir sumažėjusi įtampa po transformatoriaus (b).....	51
40 pav. Įtampa nuolatinės srovės grandyje po talpinio filtro ir prijungus galvaninį elementą (a)	52
41 pav. Pusės tiltelio keitiklio išėjimo įtampos kreivės veikiant 10 W (V_{out}) ir 100 W V_{out} apkrovai (a) bei išėjimo ir standartinės tinklo įtampos kreivės (b)	52
42 pav. Projektuojamo H tiltelio topologijos keitiklio funkcinė schema.....	53
43 pav. Kintamosios įtampos sinusoidės pirmojo (a) pusperiodžio ir antrojo (b) pusperiodžio veikimas diodų tiltelyje	54
44 pav. Aiškinamoji lygintuvo su talpiniu filtru principinė elektrinė schema (a) ir jame veikiančių įtampų (įėjimo U_{in} , išėjimo U_{out}) ir srovės kondensatoriuje (I_C) grafikas (b).....	54
45 pav. Dvipusio nevaldomojo lygintuvo modelis (a) ir jame veikiančių įtampų (įėjimo U_{in} , išėjimo U_{out}) ir srovės kondensatoriuje (I_C) grafikas (b).....	56
46 pav. Aiškinamoji H tiltelio topologijos inverterio principinė elektrinė schema	56
47 pav. Nuolatinės srovės keitiklio galios grandinės principinė elektrinė schema.....	57
48 pav. „LC filter 5.0.0.0.“ programinis langas	60

49 pav. Nuolatinės srovės keitiklio valdymo grandinės principinė elektrinė schema	60
50 pav. DC-AC-DC keitiklio galios grandinės modelis „LTspice XVII“ aplinkoje.....	62
51 pav. DC-AC-DC keitiklio valdymo modelis „LTspice XVII“ aplinkoje.....	62
52 pav. Tinklo įtampa tranzistorių valdymo grandinėje: A ir B valdymo signalai (a) bei C ir D valdymo signalai (b).....	63
53 pav. Įtampa pirminėje (a) ir antrinėje (b) transformatoriaus apvijos.....	63
54 pav. Įtampa projektuojamo keitiklio išėjime.....	63
55 pav. Įtampa keitiklio išėjime pakoregavus darbo ciklą	64
56 pav. Inverterio galios grandinės principinė elektrinė schema	65
57 pav. Inverterio valdymo grandinės principinė elektrinė schema.....	66
58 pav. DC-AC keitiklio galios grandinės modelis „LTspice XVII“ aplinkoje.....	66
59 pav. DC-AC-DC keitiklio valdymo modelis „LTspice XVII“ aplinkoje.....	67
60 pav. Sinusinės įtampos $U(\text{sine})$, pjūklinio valdymo signalo $U(\text{sign})$ ir raktų valdymo signalo $U(\text{negative})$ kreivės	67
61 pav. Trijų lygių impulsų pločio moduliavimo signalai ir keitiklio išėjimo įtampos kreivė ...	68
62 pav. Tinklo signalo kreivė ir į apkrovą išėjime prijungiamo signalo kreivė.....	68
63 pav. Projektuojamo AC-AC keitiklio įėjime veikiančio tinklo signalo kreivė ir keitiklio išėjimo įtampos kreivė esant 200 Hz dažniui	69
64 pav. Projektuojamo AC-AC keitiklio įėjime veikiančio tinklo signalo kreivė ir sumažintos keitiklio išėjimo įtampos kreivė esant 50 Hz dažniui	69
65 pav. Projektuojamo AC-AC keitiklio įėjime veikiančio tinklo signalo kreivė ir sumažintos keitiklio išėjimo įtampos kreivė esant 200 Hz dažniui	69
66 pav. Stačiakampių impulsų (U_1), pjūklinės (U_2) ir sinusinės (U_3) įtampų signalus generuojanti grandinė sudaryta „LM324N“ mikrograndyno pagrindu	70
67 pav. Bandymų stendo bendras vaizdas (a) ir bandymų lentoje surinktos valdymo grandinė (b)	71
68 pav. Stačiakampių impulsų <i>square</i> ir pjūklinės <i>triangle</i> (a) bei <i>triangle</i> ir sinusinės <i>sine</i> įtampų kreivės (b).....	71
69 pav. Stačiakampių impulsų įtampos <i>square</i> ir formuojamo signalo <i>sign</i> kreivės (a) ir sinusinės įtampos kreivės bei formuojamo <i>negative</i> valdymo signalo kreivės (b).....	72
70 pav. Tranzistorinių raktų valdymo signalų <i>negative</i> ir <i>negative_in</i> kreivės	72

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Trijų lygių impulso pločio moduliavimu valdomos grandinės tranzistorinių raktų galimų padėčių deriniai	39
2 lentelė. Puslaidininkinių raktų parametrai	43
3 lentelė. Pradiniai projektuojamo keitiklio duomenys	49
4 lentelė. Pradiniai projektuojamo transformatoriaus duomenys	57

SANTRUMPOS

AC (angl. *alternating current*) – kintamoji srovė;

DC (angl. *direct current*) – nuolatinė srovė;

MOSFET (angl. *metal-oxid-semiconductor field-effect transistor*) – metalo-oksido-puslaidininkio lauko tranzistorius;

IGBT (angl. *insulated-gate bipolar transistor*) – dvipolis tranzistorius su izoliuotąja užtūra;

GTO (angl. *gate turn-off thyristor*) – uždaromasis tiristorius;

SCR (angl. *silicon-controlled rectifier*) – valdomasis silicio lygintuvas;

BJT (angl. *bipolar junction transistor*) – dvipolis sandūrinis tranzistorius;

IGCT (angl. *integrated gate-commutated thyristor*) – integruotos sklendės valdomas tiristorius;

TRIAC (angl. *triode for alternating current*) – kintamosios srovės triodas;

PWM (angl. *pulse width modulation*) – impulso pločio moduliacija;

LED – (angl. *light-emitting diode*) – šviesos diodas;

Ch-tika – charakteristika.

IVADAS

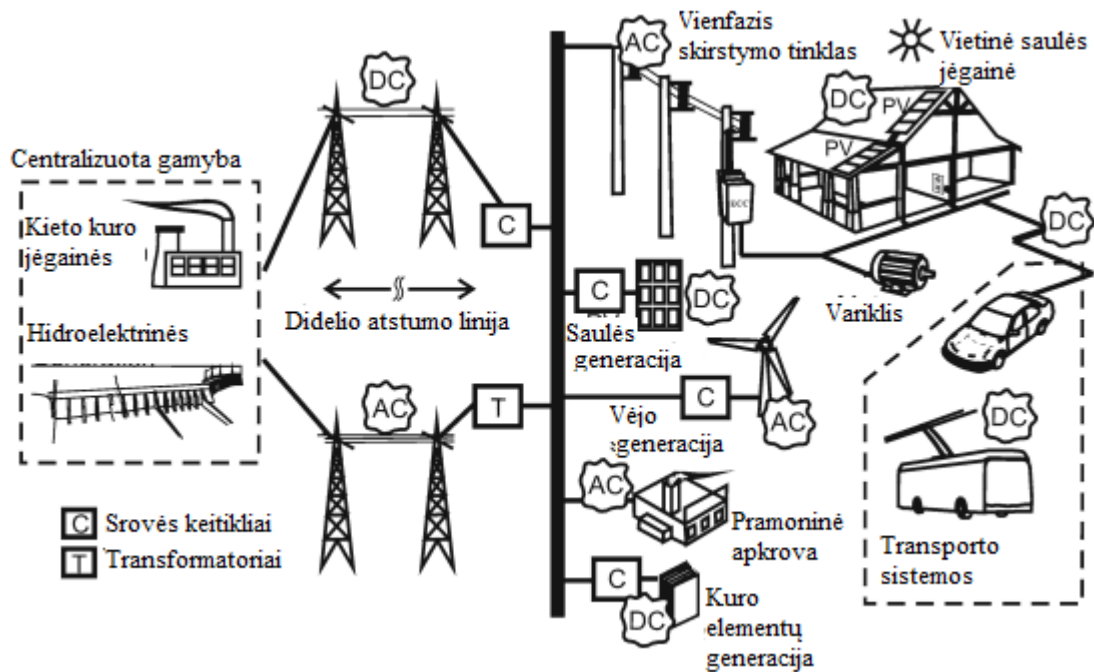
XIX a. pabaigoje Tomui Edisonui sukūrus ir užpatentavus elektros energijos gamybos bei perdavimo sistemą ir pristačius elektrinę kaitrinę lempuotę, elektros energetika ėmė itin sparčiai vystytis. Ankstyvuoju laikotarpiu elektrinėse buvo montuojami nuolatinės srovės generatoriai, kuriuos buvo nesudėtinga sujungti į vieną sistemą. Pirmose elektros perdavimo sistemose naudota vartotojams reikalinga 110 V nuolatinės srovės įtampa, tačiau sistema turėjo didžiulį trūkumą – dėl didelių perdavimo nuostolių elektrinės turėjo būti statomos ne didesniu kaip 1,5 km atstumu nuo vartotojų.

1886 m. pastatyta pirmoji elektrinė su kintamosios srovės generatoriumi. Kelerius metus prieš tai serbų kilmės mokslininkas Nikola Tesla pristatė pirmąją kintamosios srovės daugiafazį asinchroninį variklį. Nuo XX a. pradžios sparčiai populiarėjo trifazė elektros sistema su aukštinamaisiais ir žeminamaisiais transformatoriais, leidžianti perduoti elektros energiją dideliais atstumais. Tačiau nuolatinės srovės perdavimo sistemos įkūrėjui T. Edisonui dedant daug pastangų stabdyti kintamosios srovės sistemų plėtrą, XX a. pirmojoje pusėje buvo plačiai naudojamos abi sistemos – ir nuolatinės srovės, ir kintamosios srovės. Plėtojant kintamosios srovės perdavimo tinklą jau elektrifikuotose nuolatine srove vietose vartotojai prie tinklo pradėti jungti per pirmuosius AC-DC keitiklius – gyvsidabrinčius lygintuvus.

Šiandien didieji elektros energijos šaltiniai – elektrinės – statomi naudojant tik kintamosios srovės generatorius. Pagrindiniai elektros energijos vartotojai taip pat orientuoti į kintamosios srovės naudojimą. Pagal pasaulinius elektros generavimo, perdavimo ir transformavimo standartus naudojamas kintamosios srovės trifazis tinklas.

Elektros prietaisų funkcionavimui užtikrinti būtini elektros energijos šaltiniai, kuriais gali būti: elektros tinklas, lygintuvai, stabilizatoriai, inventoriai, keitikliai, akumuliatoriai, saulės baterijos, nuolatinės ar kintamosios srovės generatoriai. Elektros energijos gamybos, perdavimo ir vartojimo topologija pateikta 1 paveiksle.

Šio darbo **tikslas** yra sukurti savarankiškai veikiančią, patikimą jungiamą nuo standartinio elektros tinklo ir maitinančią įvairių charakteristikų elektros energijos vartotojus, kintamosios srovės keitiklį su nuolatinės srovės intarpu.



1 pav. Elektros energijos gamybos ir perdavimo topologinė schema (Chakraborty 2013)

Tikslui pasiekti išsikelti šie uždaviniai:

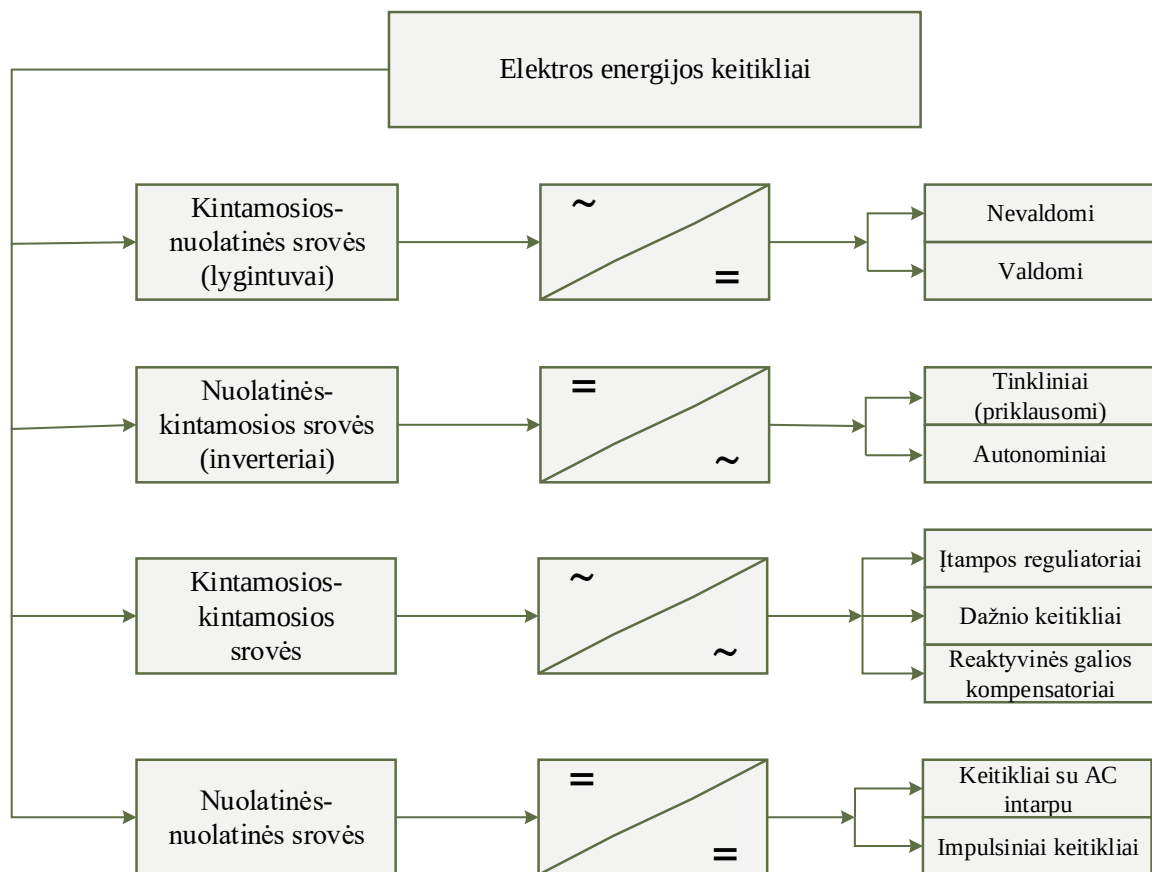
- 1) išanalizuoti skirtingų tipų visų rūšių elektros srovės keitikius, jų veikimą ir pritaikymo galimybes;
- 2) remiantis teorinės literatūros apie keitiklių veikimą analize, parinkti projektuojamo keitiklio topologiją ir elementus, gebančius užtikrinti visavertę sistemos funkcionavimą ir patikimumą, našumą, nedidelę kainą, patogumą naudoti;
- 3) sudaryti sistemos funkcionavimui reikalingą principinę schemą, ją sumodeliuoti programinėje aplinkoje;
- 4) įvertinti suprojektuoto keitiklio privalumus ir trūkumus, apibrėžti jo gamybos ir taikymo galimybes.

Šio projekto užduotys vykdomos šiuolaikiniais techniniais įrenginiais, elementais ir programine įranga. Keitiklio modeliavimui atlikti naudojama SPICE kompiuterinė modeliavimo programa. Kuriant funkcionuojantį keitiklį apžvelgiami esami įrenginiai, nustatomi įtaisui keliami reikalavimai ir pradedama projektuoti. Projektuojant keitiklį atsižvelgiama į saugumo reikalavimus, siekiant sukurti rinkoje konkurencingą įrenginį vertinami ekonominiai veiksniai.

1. LITERATŪROS ANALIZĖ

Skyriuje nagrinėjama elektros energijos perdavimo, inverterių, lygintuvų ir keitiklių temomis parašyta mokslinė literatūra, naujausios tendencijos ir priemonės.

Šiuo metu naudojami elektros energijos keitimo įtaisai skirstomi į elektromagnetinius ir elektroninius. Šiuolaikinėje galios elektronikoje dėl ekonomiško ir didelio patikimumo vis dažniau naudojami elektroniniai keitikliai, sudaryti iš diodų, tiristorių, galios tranzistorių. Tokie elektros energijos keitikliai vadinami puslaidininkiniais keitikliais. Kadangi elektros tinklas gali būti nuolatinės (DC) arba kintamosios srovės (AC), todėl egzistuoja keturi galimi srovės keitiklių tipai: AC-DC, DC-AC, AC-AC ir DC-DC. 2 paveiksle pateikiama elektros energijos keitiklių klasifikavimo struktūrinė schema (Burkov 2015).



2 pav. Elektros energijos keitiklių klasifikavimo struktūrinė schema

Grandinė, kuri nuolatinę šaltinio srovę keičia į sinusoidinę kintamąją srovę, skirtą kintamosios srovės apkrovai prijungti, vadinama inverteriu (DC-AC keitiklis). Inverteriai pagal išėjimo tipą gali būti vienfaziai arba trifaziai. Šie keitikliai plačiai naudojami saulės elektrinių sistemose, prijungiant nenutrūkstamo maitinimo šaltinius, automobiliuose.

Prietaisas, schema arba sistema, kuri jungiama į kintamosios srovės tinklą, o išėjime turi nuolatinę srovę, vadinama lygintuvu (AC-DC keitikliu). Šie keitikliai yra itin paplitę, nes elektros energija perduodama kintamąja srove, o įvairūs elektroniniai prietaisai naudoja nuolatinę srovę. Lygintuvai pagal jungimo į tinklą būdą gali būti vienfaziai, trifaziai arba daugiafaziai.

Nuolatinės įtampos (DC-DC) keitikliai maitinami nuo nuolatinės srovės šaltinio ir išėjime taip pat turi reikiamo įtampos lygio nuolatinę srovę. Šie keitikliai plačiai naudojami kompiuterinėje ir telekomunikacinėje technikoje (keičiant baterijų įtampos vertes), LED šviestuvų maitinimo grandinėse. Nuolatinės įtampos keitikliai, kuriuose yra kintamosios srovės intarpas (DC-AC-DC keitiklis), naudojami aukštai nuolatinei įtampai perduoti dideliais atstumais.

Kintamosios srovės (AC-AC) keitiklių schemas yra sudėtingesnės nei kitų keitiklių, nes norint keisti įtampą, dažnį ar bipolinį įtampos blokavimą reikia naudoti sudėtingas įrenginių topologijas. Įtaisai, įėjime ir išėjime turintys tą patį įtampos dažnį, yra vadinami nuolatinės srovės reguliatoriais ir nelaikomi keitikliais. Keitikliais vadinami įtaisai, kurie įėjime turi fiksuotą įtampą ir fiksuotą dažnį, o išėjime – kintančią įtampą ir fiksuotą dažnį. Tokie keitikliai naudojami šviesos reguliatoriuose (angl. *light dimmer*), buityje naudojamų vienfazių kintamosios srovės variklių valdymo srityje. Įtaisai, keičiantys ir įėjimo įtampą, ir tinklo dažnį, yra vadinami ciklokonverteriais. Keitikliai, konvertuojantys fiksuotą įtampą ir fiksuotą dažnį į kintamąją įtampą ir kintamąjį dažnį, kurių topologijoje naudojami visiškai valdomi raktai, vadinami adatiniais keitikliais (angl. *matrix converter*).

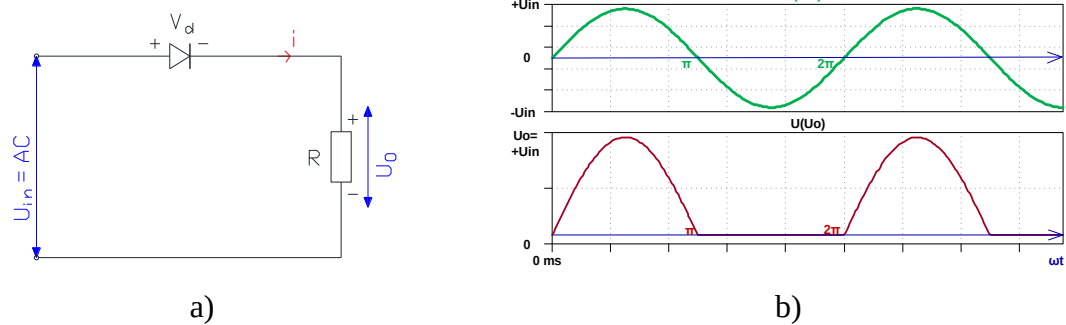
Kintamajai įtampai pakeisti naudojamas ir nuolatinės srovės intarpas – tokie įtaisai vadinami AC-DC-AC keitikliais. Šio tipo kombinuoti keitikliai yra sudėtingi įtaisai, nes reikia užtikrinti tinkamą nuolatinės srovės intarpo reguliavimą, galios perdavimą su numatytu galios koeficientu ir dvipusį energijos perdavimo srautą.

1.1. AC-DC keitiklių apžvalga

AC-DC keitikliai, vadinami lygintuvais, keičia kintamąją srovę grandinėje į nuolatinę srovę. Pagal kintamosios srovės pusbangių energijos keitimo galimybes lygintuvai skirstomi į vienpusius ir dvipusius, pagal keičiamos kintamosios srovės fazių skaičių – į vienfazių, trifazių ir daugiafazių, pagal galimybes keisti išlygintos įtampos vertę – į nevaldomuosius, pusiau valdomus (tiristorinius) ir valdomuosius (Udris 2008). Lygintuvų paskirtis gali būti tiek nuolatinės srovės išėjimo signalo gavimas, tiek įtampos arba srovės bangos, turinčios nustatytą pastoviąją dedamąją, sukūrimas (Hart 2010).

Prie paprasčiausių AC-DC keitiklių priskiriami vienpusiai nevaldomieji lygintuvai, dar vadinami pusės bangos lygintuvais (angl. *half-wave rectifier*). Šio tipo keitiklio principinė schema ir įėjimo bei

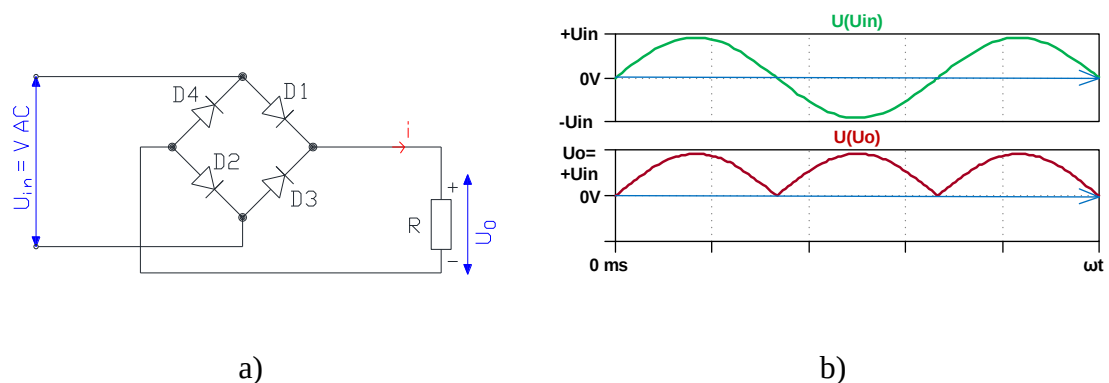
išėjimo signalų kreivės pateiktos 3 paveiksle. Praktikoje vienpusiai nevaldomieji lygintuvai dažniausiai naudojami mažos galios įtaisuose (Hart 2010).



3 pav. Vienfazio vienpusio nevaldomojo lygintuvo principinė schema (a), įėjimo (U_{in}) ir išėjimo (U_o) signalų kreivės (b)

Keitikliai, perduodantys į apkrovą sinusoidinės įėjimo įtampos abiejų pusperiodžių energiją, vadinami vienfaziais dvipusiais nevaldomaisiais lygintuvais arba visos bangos lygintuvais (angl. *full-wave rectifier*). Prie tokių keitiklių priskiriami lygintuvai su transformatoriaus vidurio atšaka ir tilteliniai lygintuvai (Udris 2008).

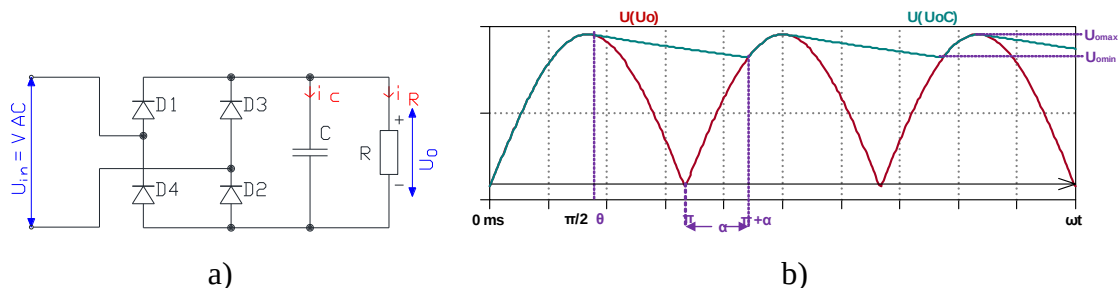
Šio tipo lygintuvams keliama reikalavimai išėjime gauti ištisą nuolatinę srovę ir įtampą arba nustatytą nuolatinę dedamąją. Dvipusiai lygintuvai, palyginti su vienpusiais, yra pranašesni ir plačiau naudojami, jų išėjimuose veikia mažesnės įtampos pulsacijos. Dvipusiame keitiklyje veikianti vidutinė elektros srovė lygi nuliui, todėl šiuose lygintuvuose gali būti jungiami transformatoriai (Hart 2010). 4 paveiksle pateikiama vienfazio dvipusio nevaldomojo lygintuvo principinė schema ir įėjimo bei išėjimo signalų kreivės.



4 pav. Vienfazio dvipusio nevaldomojo lygintuvo principinė schema (a), įėjimo (U_{in}) ir išėjimo (U_o) signalų kreivės (b)

Vis dėlto elektroniniuose įtaisuose dažniausiai naudojama nuolatinė elektros srovė, kuri laikui bėgant nekinta ir nepulsuoja. Kadangi dvipusių nevaldomųjų lygintuvų išėjime gaunamas

pulsuojantis signalas, nuolatinei srovei gauti naudojami išėjimo filtrai, dažniausiai – talpiniai. Didelės talpos kondensatoriaus įjungimas į grandinę iš esmės priartina išėjimo signalą iki nuolatinės srovės (Hart 2010). 5 paveiksle pateikiama vienfazio dvipusio nevaldomojo lygintuvo principinė schema ir išėjimo signalų kreivės prieš talpinį filtrą ir po jo.



5 pav. Vienfazio dvipusio nevaldomojo lygintuvo su talpiniu filtru principinė schema (a), išėjimo signalų kreivės (b) (Hart 2010)

Keitiklį prijungus prie tinklo įtampos, pirmajame pusperiodyje įėjimo įtampa įkrauna kondensatorių iki U_{0max} . Antrajame pusperiodyje kondensatoriuje sukaupta energija perduodama į apkrovą. Šio lygintuvo išėjimo įtampa kinta nuo U_{0min} iki U_{0max} , didžiausia išėjimo vertė lygi įėjimo įtampos amplitudei $U_{0max} = \sqrt{2}U_{in}$ (Udris 2008). Parenkant kondensatorių atsižvelgiama į jį veikiančią įtampą U_{0max} , didinant kondensatoriaus talpą, dvipusio nevaldomojo lygintuvo išėjime mažėja elektros srovės pulsavimai.

Projektuojant dvipusį nevaldomąjį lygintuvą su talpiniu filtru atliekami išėjimo įtampos pulsavimų amplitudės skaičiavimai pagal 1 formulę, randamas skirtumas tarp didžiausios ir mažiausios išėjimo verčių. Pagal 2 formulę skaičiuojama vidutinė išlyginta įtampa (Hart 2010).

$$U_{0pa} = U_{0max} - |U_{0max} \sin(\pi + \alpha)| = U_{0max} (1 - \sin \alpha), [V]; \quad (1)$$

čia: U_{0max} – didžiausia išėjimo vertė, V.

$$U_{0pa} \approx \frac{\sqrt{2}U_{in}\pi}{\omega RC} = \frac{\sqrt{2}U_{in}}{2fRC}, [V]; \quad (2)$$

čia: f – keitiklio įėjime veikiančios įtampos dažnis, Hz; R – apkrovos varža, Ω ; C – kondensatoriaus talpa, F.

Iš 2 lygties išreiškiamas ωRC . Skaičiavimams atlikti pagal 3 ir 4 formules nustatomas kampas, kuriuo įtampa iš kondensatoriaus pradeda atiduoti į apkrovą (θ), ir mažiausios įtampos vertės kampas α (Hart 2010).

$$(\sin \theta)e^{-(\pi + \alpha - \theta)/\omega RC} - \sin \alpha = 0; \quad (3)$$

čia: θ – užverstojo diodo kampas, rad; α – kampas, kuriame yra mažiausia keitiklio išėjimo vertė, rad.

$$\theta = \tan^{-1}(-\omega RC) = -\tan^{-1}(\omega RC) + \pi, [\text{rad}]. \quad (4)$$

Nevaldomuosiuose tilteliniuose keitikliuose trikdžiams ir pulsacijoms mažinti dažnai naudojamas žemųjų dažnių LC filtras. Projektuojant šį filtrą, kondensatorius parenkamas didesnės talpos, o induktyvumo ritė – itin nedidelė. Prie lygintuvo jungiant aktyviąją apkrovą, induktyvumo filtras L išėjimo signalui didelės įtakos neturi, tačiau lygintuvą naudojant sudėtingų topologijų keitikliuose žemųjų dažnių LC filtras tampa itin reikšminga grandinės dalimi. Vietoje aktyviosios apkrovos nevaldomąjį dvipusį lygintuvą jungiant prie DC-DC keitiklio, LC filtras būtinas elektromagnetiniams trikdžiams šalinti (Erickson 2012).

Diodų tiltelis pasižymi įtampos kritimu dioduose iki 1,5 V, o tai itin svarbu elektroniniuose įtaisuose. Įtampos kritimas tiltelyje gali būti mažinamas įprastinius keitiklius keičiant Šotkio diodais. Dvipusiame nevaldomajame lygintuve sugedus bent vienam iš tiltelio diodų, įtaisas pradeda veikti kaip vienpusis lygintuvas (Hart 2010).

Pusiau valdomų ir valdomųjų lygintuvų galios grandinės sudarytos analogiškai, kaip ir nevaldomųjų lygintuvų, tik vietoje diodų naudojami tiristoriai arba visiškai valdomi puslaidininkiniai raktai. Šių tipų lygintuvuose gali būti uždelsiamas įjungimo momentas reguliuojant laidumą, nustatoma ir vidutinė išėjimo įtampa. Valdomieji keitikliai, palyginti su pusiau valdomais, neiškreipia elektros šaltinio srovės, dėl to turi didesnę galios koeficientą (Udris 2008).

1.2. DC-AC keitiklių apžvalga

Grandinėse, kuriose elektros energijos šaltinis yra nuolatinės įtampos, pavyzdžiui, akumulatorius, nuolatinės srovės generatorius, saulės baterija, o elektros imtuvai – kintamosios įtampos, naudojami DC-AC keitikliai – inverteriai (Dokić 2015). Šio tipo keitikliai itin plačiai naudojami nenutrūkstamo maitinimo šaltiniuose, indukcinuose šildytuvuose, baterijų, saulės ar kuro elementų nuolatinę srovę keičiant varikliams ar perdavimui reikalinga kintamąja srove (RamaReddy 2013).

DC-AC keitiklius įprasta vadinti inverteriais, tačiau iš tiesų inverteris yra tik viena iš sudedamųjų DC-AC keitiklio dalių, nes pats savaime inverteris negali funkcionuoti ir atitikti techninių reikalavimų. Dėl šių priežasčių AC-DC keitikliai projektuojami iš šių sudedamųjų dalių: nuolatinės srovės šaltinio, valdymo bloko, inverterio, išėjimo filtro ir įtampos arba srovės regulatoriaus (Dokić 2015).

Pagal inverterių grandinėse vykstančius elektromagnetinius vyksmus šių keitiklių grandinės skirstomos į įtampos ir srovės inverterius.

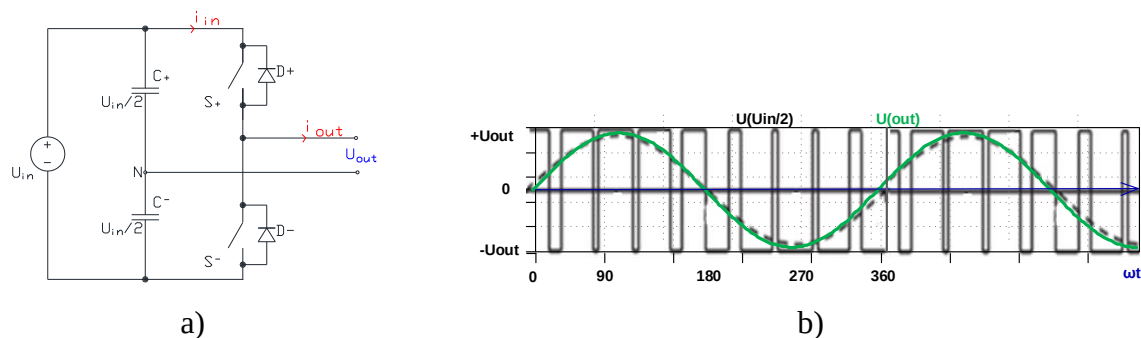
Grandinėse naudojant įtampos inverterius, įtampos forma ir dydis iš esmės nepriklauso nuo apkrovos pobūdžio. Šiuo atveju įtampos inverterio išėjimo varža artima nuliui, tad keitiklis apkrovą veikia kaip elektrovaros šaltinis.

Srovės inverteris prie keitiklio prijungtą apkrovą veikia kaip elektros srovės šaltinis, tai yra keitiklio išėjimo varža tampa gana didelė, o įtampos apkrovos prijungimo vietoje forma priklauso nuo apkrovos parametrų (Popkov 2010).

Vienfaziai įtampos inverteriai projektuojami pusės H tiltelio arba H tiltelio topologijos.

Pusės tiltelio įtampos inverterio galios grandinė ir išėjimo signalo kreivė pavaizduotos 6 paveiksle. Kintamosios įtampos neigiamai amplitudei formuoti pusės H tiltelio inverteryje numatoma vadinamoji vidurinė nulinė atšaka N. Ši atšaka suformuojama keitiklio įėjime lygiagrečiai nuolatinės srovės šaltiniui prijungus du nuosekliai sujungtus kondensatorius. Kiekvienas iš kondensatorių palaiko nuolatinę $U_{in} / 2$ įtampą. Sujungtoje grandinėje matoma, kad tranzistoriniai raktai $S+$ ir $S-$ negali būti sujungiami abu vienu metu, nes tai sukels trumpąjį jungimą grandinėje (Rashid 2014). Realiam šio tipo keitiklyje komutuojant tranzistorinius raktus, dėl laiko, kurio reikia perjungti raktams, abiem tranzistoriams nepraleidžiant srovės atsiranda vadinamasis „mirties laikas“ (angl. *death time*). Naudojant IGBT tipo raktus šis laikas siekia apie kelias mikrosekundes (Wilamowski 2011).

Pusės H tiltelio topologijos keitiklis išėjime komutuoja dviejų lygių (teigiamos arba neigiamos) įtampos signalus. Šio tipo keitiklio grandinė ir komutuojamų įtampų kreivės pateiktos 6 paveiksle (Rashid 2014).



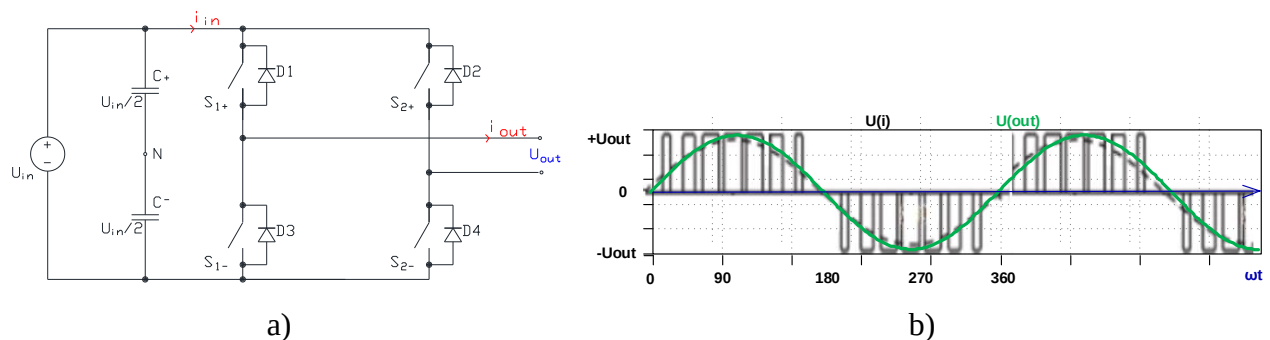
6 pav. Pusės H tiltelio topologijos įtampos inverteris: a) grandinė, b) išėjimo signalas

H tiltelio topologijos inverteris sudaromas kaip ir pusės tiltelio keitiklis, prie tranzistorinių raktų lygiagrečiai prijungiant dar du raktus. Papildomai prijungtų dešinės pusės raktų sandūroje užtikrinamas neutralus ir neigiamas signalai kintamosios srovės apkrovai.

H tiltelio tranzistoriniai raktai komutuojami įstrižomis poromis po du raktus (vienu metu įjungti $S1+ S2-$, $S1- S2+$ išjungti), taip pat gali būti kartu jungiami viršutiniai arba apatiniai raktai, taip užtikrinant nulinį išėjimo signalą. Siekiant išvengti trumpojo jungimo atsiradimo raktų valdymo

grandinėje užtikrinama vienos pusės viršutinio ir apatinio rakto viena laikio įsijungimo apsauginė blokuotė. Nagrinėjant H tiltelio topologijos inverterio grandinę, pastebima, kad keitiklio išėjime galima sudaryti nuolatinės srovės maitinimo šaltinio dydžio kintamąją įtampą, tai yra dukart daugiau nei pusės H tiltelio atveju (Rashid 2014). H tiltelio topologijos keitikliai projektuojami didesnės išėjimo galios nei pusės H tiltelio keitikliai (RamaReddy 2013).

H tiltelio topologijos keitiklis išėjime komutuoja trijų lygių (teigiamos, nulinės ir neigiamos) įtampos signalus. Šio tipo keitiklio grandinė ir komutuojamų įtampų kreivės pateiktos 7 paveiksle (Rashid 2014).



7 pav. H tiltelio topologijos inverteris: a) grandinė, b) išėjimo signalas (Rashid 2014)

Srovės inverteriai nuolatinės srovės elektros energiją konvertuoja į valdomojo dažnio, dydžio ir fazės sinusoidinę kintamąją srovę. Šių keitiklių išėjime jungiami talpiniai filtrai, tai leidžia išgauti itin artimą sinusoidai apkrovos įtampą. Praktikoje šie keitikliai naudojami tik trifazėse grandinėse variklių valdymui ir pramoniniuose įtaisuose, kuriuose išėjimo signalo forma ypač svarbi (Rashid 2014).

Šiuolaikiniuose inverteriuose naudojami šie perjungimo raktai: IGBT, MOSFET, SCR ir GTO tiristoriai, BJT, tačiau dėl savo galios diapazonų dažniausi yra IGBT ir MOSFET tipo raktai.

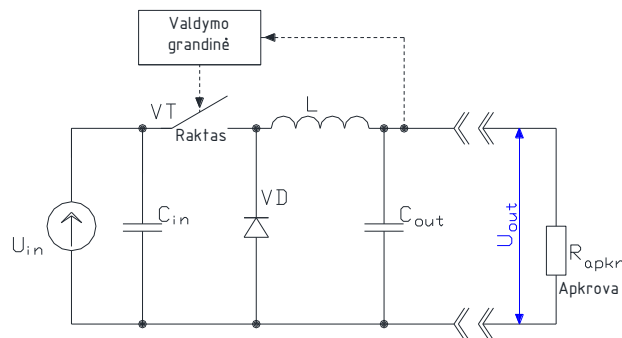
Trifaziai DC-AC keitikliai gali būti sudaromi tris vienfazius inverterius jungiant į vieną grandinę. Sujungtų keitiklių valdymo raktai paslenkami 120 laipsnių kampu ir išėjime gaunama sinusoidė, išėjimai gali būti jungiami trikampiui arba žvaigžde. Šio tipo keitikliuose raktų skaičių nuo dvylikos galima sumažinti iki šešių (Bose 2015).

1.3. DC-DC keitiklių apžvalga

Nuolatinės srovės keitikliai skirstomi į žeminamuosius, aukštinamuosius, žeminamuosius-aukštinamuosius bei grįžtamuosius.

1.3.1. Žeminamųjų keitiklių apžvalga

Lygiagreto jungimo žeminamasis stabilizatorius, dažniau vadinamas *buck* keitikliu arba pertraukikliu (angl. *chopper*), yra viena paprasčiausių ir labiausiai paplitusių grandinių. Šie keitikliai paprastai naudojami analoginiams stabilizatoriams pakeisti, kada pastarieji nebegeba perduoti didelių srovių išlikdami nedidelių matmenų. 8 paveiksle parodyti pagrindiniai žeminamojo keitiklio galios grandinės komponentai.



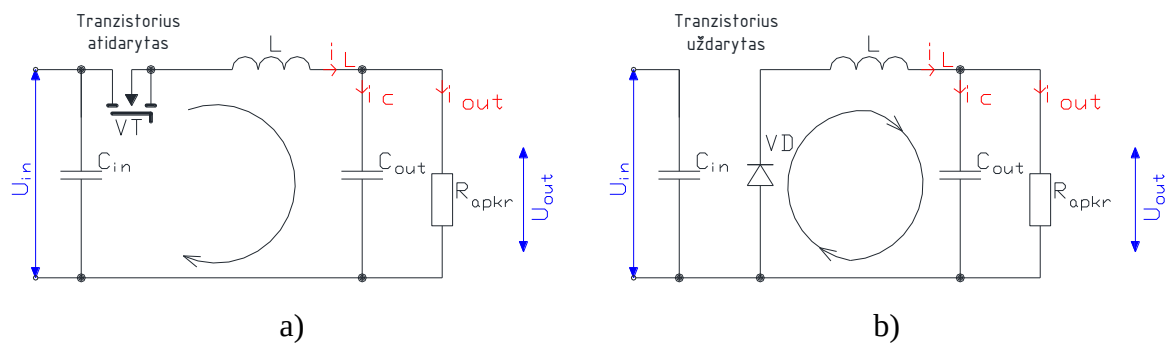
8 pav. Bazinė žeminamojo keitiklio grandinė

Žeminamajame keitiklyje elektros energija iš šaltinio apkrovai yra perduodama impulsais. Reguluojant impulso plotį ir delsimo laiką reguliuojama išėjimo įtampas vertė. Kadangi ta pati energija, gauta iš šaltinio, yra dalijama visam periodui, išėjime įtampas vertė visada bus mažesnė negu įėjime.

Žeminamojo keitiklio veikimo principas pavaizduotas 9 paveiksle. Įėjimo įtampa U_{in} paduodama į filtruojamąjį kondensatorių C_{in} . Raktas VT, kuriuo gali būti bet kurio tipo tranzistorius (dvipolis, MOSFET, IGBT), atlieka aukštadažnės srovės komutaciją. Taip pat žeminamajame keitiklyje naudojamas diodas VD, droselis L, kondensatorius C_{out} bei valdymo grandinė, stabilizuojanti išėjimo įtampą ar srovę ir apkrovą, R_{apkr} (Trzynadlowski 2016).

Raktu VT operuoja integruota valdymo grandinė, sprendžianti, kada prijungti ar atjungti maitinimo šaltinį. Paprastai valdymo grandinė analizuoja išėjimo įtampą kondensatoriuje C_{out} ir taikydama impulso pločio moduliaciją valdo raktą. Induktyvioji ritė ir išėjimo kondensatorius skirti padalyti įėjimo įtampai tam tikram laiko periodui.

Kai keitiklio raktas įjungia maitinimo šaltinį į grandinę, vyksta darbo ciklo įkrovos etapas, kurio metu elektros energija kaupiama ritės magnetiniame lauke ir išėjimo kondensatoriuje. Kai raktas atjungia keitiklį nuo maitinimo šaltinio, pradedamas darbo ciklo iškrovos etapas – sukaupta energija atiduodama apkrovai. Praėjus laikui T procesas kartojasi – vėl pradedama kaupti energija (B. Semenov 2005).

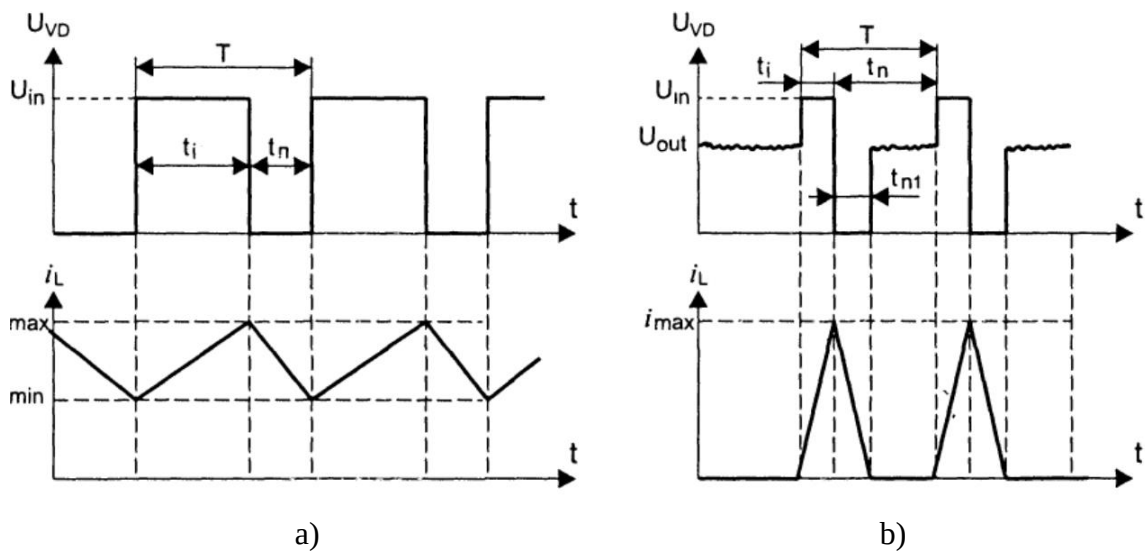


9 pav. Žeminamojo keitiklio veikimo fazės: energijos kaupimas (a) ir energijos perdavimas apkrovai (b)

Žeminamąjį keitiklį tikslinga naudoti siekiant stabilizuoti 2–3 A ir didesnę elektros srovę (B. Semenov 2005). Tipiniai šio tipo keitikliai jungiami prie 8–25 V šaltinio ir išėjime turi 0,5–5 V stabilizuotąją įtampą.

Žeminamieji keitikliai turi du – netrūkiųjų srovių ir trūkiųjų srovių – darbo režimus.

Keitikliui veikiant netrūkiųjų srovių režimu, elektros srovė per ritę nenutrūksta ir išėjimo įtampa proporcinga darbo ciklui. Toks keitiklis literatūroje vadinamas nuolatinės įtampos transformatoriumi. Trūkiųjų srovių režimas atsiranda tuomet, kai apkrovos srovė komutacijos pabaigoje tampa lygi nuliui arba pakeičia kryptį (Udris 2008). Žeminamojo keitiklio trūkiųjų srovių darbo režimas naudojamas itin retai, tik specifiniais atvejais (B. Semenov 2005).



10 pav. Įtampos diode VD (viršuje) ir srovės induktyviajame elemente (apačioje) kreivės esant netrūkiųjų srovių (a) ir trūkiųjų srovių režimui (b) (B. Semenov 2005)

Žeminamojo keitiklio grandinėje induktyvioji ritė ir kondensatorius C_{out} sudaro žemųjų dažnių filtrą. Jei grandinėje nebūtų šio filtro, prijungus apkrovą prie rakto ir diodo sujungimų, oscilografe būtų stebimas stačiakampis signalas, atkartojantis įėjimo signalo impulsus U_{vd} (10 pav.), kuris

netinkamas maitinti nuolatinės srovės elektros imtuvams. Tad šis signalas praleidžiamas per žemųjų dažnių filtrą ir iš nesimetrinio dvipolio signalo spektro išskiriama nuolatinė dedamoji. Žeminamuosiuose keitikliuose naudojamas Γ tipo grandinės LC filtras. Nuolatinė dedamoji padalijama per visą periodą T ir matematiškai išreiškiama 5 formule:

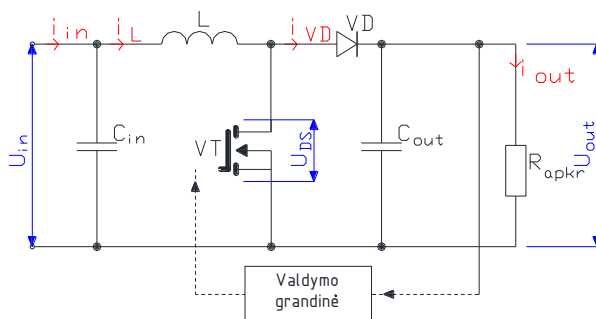
$$U_{\text{out}} = \frac{1}{T} \int_0^T U_{\text{in}}(t) dt = \frac{t_i}{T} U_{\text{in}} = D \cdot U_{\text{in}}; \quad (5)$$

čia: U_{out} – vidutinė išėjimo įtampa; $U_{\text{in}}(t)$ – momentinės (nustatytos konkrečiu momentu) į filtrą perduodamos įtampos reikšmė; t_i – impulso plotis; T – periodas.

Žemųjų dažnių LC filtrai projektuojami taip, kad filtro išėjime pulsacijos būtų kuo mažesnės. Ritės dažniausiai parenkamos su uždaru magnetolaidžiu siekiant mažinti induktyviosios ritės elektromagnetinio lauko įtaką kitiems grandinės elementams (Udris 2008). Iš 5 formulės matoma, kad išėjimo įtampa tiesiogiai proporcinga impulso pločiui t_i , taip pat darbo ciklui D . Mažinant arba didinant darbo ciklą, tai yra ilginant arba trumpinant laiką, kai komutacinis raktas yra atidarytas, reguliuojama įtampa apkrovoje. Iš tos pačios 5 formulės matoma, kad šiuo keitikliu galima gauti tik už įėjimo įtampą mažesnę arba jai lygią išėjimo įtampą.

1.3.2. Aukštinamųjų keitiklių apžvalga

Stabilizuojamasis keitiklis, išėjime turintis aukštesnę įtampą nei įėjime, vadinamas aukštinamuoju keitikliu (angl. *boost converter*). Šie keitikliai yra plačiai paplitę mažai elektros srovės vartojančiuose įtaisuose, kurie maitinami keliais 1,5 V galvaniniais elementais, tačiau reikalauja didesnės (5–15 V) stabiliosios įtampos. Aukštinamieji keitikliai taip pat naudojami aktyviesiems galios koeficientų korektoriams kurti. 11 paveiksle parodyti pagrindiniai aukštinamojo keitiklio komponentai.



11 pav. Bazinė aukštinamojo keitiklio grandinė

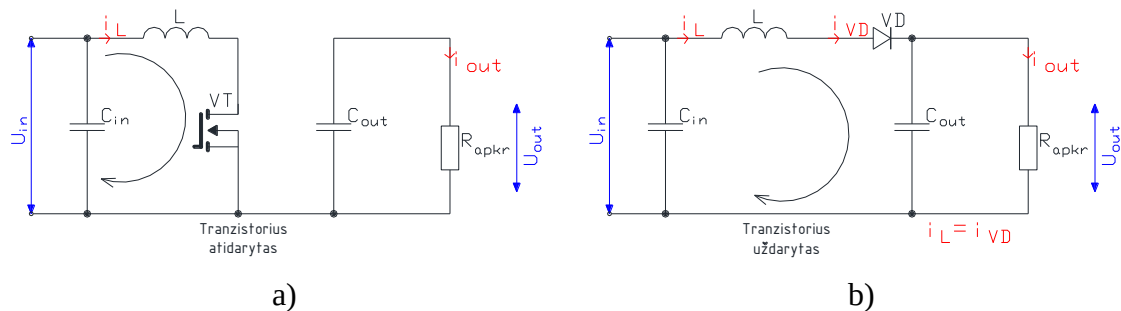
Aukštinamojo keitiklio įėjime įtampa pereina per filtruojamąjį įėjimo kondensatorių C_{in} ir per lygiagrečiai prijungtą induktyviąją ritę L paduodama į raktą VT. Šių elementų sujungimo viduriniame

taške prijungiamas diodas VD, prie šio diodo katodo jungiamas išėjimo kondensatorius C_{out} ir jį šuntuojanti apkrova R_{apkr} . Diodas VD tam tikrais laiko momentais blokuoja apkrovą ir išėjimo kondensatorių C_{out} nuo rakto (Trzynadlowski 2016).

Jeigu tranzistorinis raktas yra atidarytas, grandinėje kaupiama energija. Elektros srovė prateka iš elektros šaltinio per droselį L, šiuo laiko momentu energija yra kaupiama magnetiniame lauke. Diodas blokuodamas apkrovą neduoda išėjimo kondensatoriui išsikrauti per uždarą raktą. Elektros srove apkrovoje šiuo laiko momentu palaikoma tik ta elektros energijos dalis, kuri yra sukaupta kondensatoriuje C_{out} .

12 paveiksle pavaizduotas aukštinamojo keitiklio veikimo principas.

Kai valdymo grandinė uždaro tranzistorinį raktą, pereinama į droselyje sukauptos elektros energijos perdavimo apkrovai fazę. Šiuo atveju droselyje sukaupta elektros srovė pakrauna išėjimo kondensatorių, tad droselio saviindukcijos elektrovara ir išėjimo įtampa sumuojasi ir išėjimo įtampa U_{out} gali tapti didesnė už įėjimo įtampą U_{in} (6 formulė) (B. Semenov 2005).



12 pav. Aukštinamojo keitiklio veikimo fazės: a) energijos kaupimo fazė, b) sukauptos energijos perdavimo fazė

Esant energijos kaupimo fazei, didesnę srovę galima išgauti ilginant fazės trukmę. Tačiau realiomis sąlygomis fazės trukmei dažniausiai būna apribojimų, todėl reikiama srovės vertė gali būti gaunama parinkus tinkamo induktyvumo ritę L. Kuo mažesnio induktyvumo bus ritė, tuo greičiau ji pasikraus elektros srove.

$$i_L = \frac{U_{in} \cdot t}{L}; \quad (6)$$

čia: U_{out} – vidutinė išėjimo įtampa; $U_{in}(t)$ – momentinės (nustatytos konkrečiam momentui) į filtrą paduodamos įtampos reikšmė; t_i – impulso plotis; T – periodas.

Atidarius tranzistorinį raktą prasideda elektros energijos perdavimas į apkrovą. Šioje fazėje ritės droselio iškrovimo srovės kryptis sutampa su apkrovos įkrovimo srove ir kinta pagal 7 formulę:

$$i_L = \frac{U_{out} - U_{in} \cdot t}{L} \cdot (T - t); \quad (7)$$

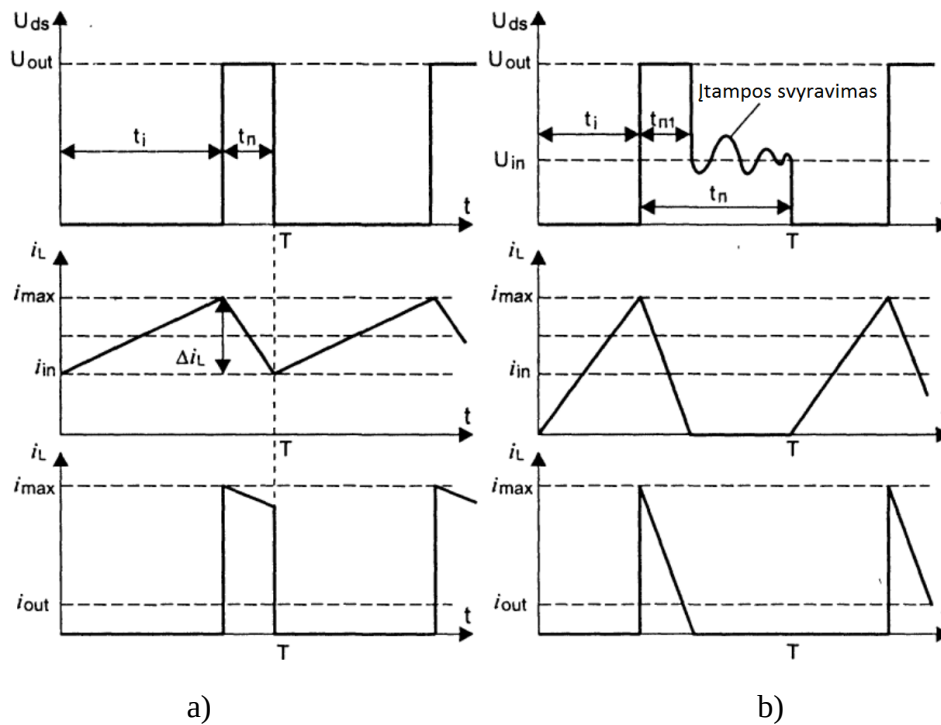
čia: U_{out} – vidutinė išėjimo įtampa; $U_{in}(t)$ – momentinės (nustatytos konkrečiam momentui) į filtrą paduodamos įtampos reikšmė; t_i – impulso plotis; T – periodas.

Aukštinamojo keitiklio vidutinė išėjimo įtampa apskaičiuojama pagal 8 formulę:

$$U_{out} = U_{in} \cdot \frac{1}{1-D}; \quad (8)$$

čia: D – darbo ciklas (angl. *duty cycle*).

Aukštinamojo keitiklio ritė, kaip ir žeminamojo keitiklio atveju, gali veikti netrūkiųjų srovių ir trūkiųjų srovių darbo režimais.

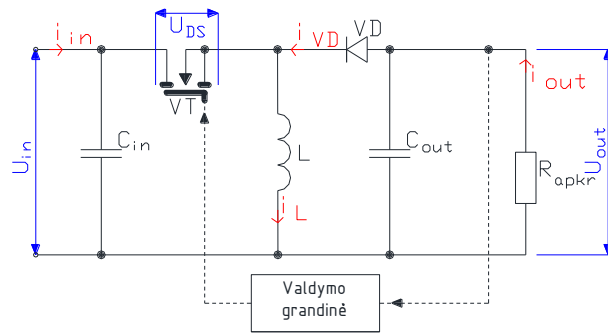


13 pav. Aukštinamojo keitiklio veikimo charakteristikos esant netrūkiųjų srovių (a) ir trūkiųjų srovių režimui (b) (B. Semenov 2005)

1.3.3. Žeminamųjų-aukštinamųjų keitiklių apžvalga

Trečioji paplitusi nuolatinės srovės keitiklių grupė – žeminamieji-aukštinamieji keitikliai, dar vadinami invertuojamaisiais. Šie keitikliai išėjime gali turėti žemesnę arba aukštesnę priešingo poliarumo įtampą negu įėjime (Udris 2008). Invertuojamieji keitikliai yra mažiau paplitę už žeminamuosius ir aukštinamuosius keitiklius.

Žeminamasis-aukštinamasis keitiklis gali būti dvipolės įtampos šaltiniu į grandinę įjungus žeminamąjį arba aukštinamąjį keitiklius (B. Semenov 2005). 14 paveiksle parodyta bazinė invertuojamojo keitiklio grandinė.

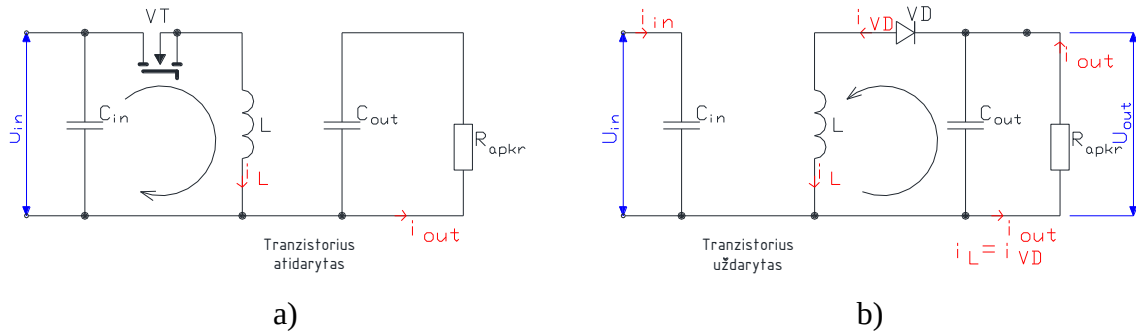


14 pav. Bazinė žeminamojo-aukštinamojo keitiklio grandinė

Invertuojamojo keitiklio grandinėje, palyginti su aukštinamojo keitiklio, droselis ir tranzistorinis raktas sukeisti vietomis, o diodas VD prijungtas priešinga kryptimi (Trzynadlowski 2016).

Žeminamasis-aukštinamasis keitiklis, kaip ir kiti keitikliai, turi dvi veikimo fazes – energijos kaupimo ir sukaustos energijos perdavimo apkrovai.

15 paveiksle pavaizduotas žeminamojo-aukštinamojo keitiklio veikimo principas.



15 pav. Žeminamojo-aukštinamojo keitiklio veikimo fazės: a) energijos kaupimo fazė, b) sukaustos energijos perdavimo fazė

Įėjimo įtampa U_{in} , filtruojama kondensatoriaus C_{in} , pereina iki tranzistorinio rakto VT. Kai tranzistorinis raktas sujungtas, keitiklis veikia energijos kaupimo magnetiniame lauke fazėje. Šioje fazėje įėjimo srovė pro raktą prateka iki ritės L ir joje yra kaupiama, tuo pat metu apkrovai perduodama energija iš išėjimo kondensatoriaus C_{out} (Udris 2008). Elektros srovė, kaupiama ritėje, apskaičiuojama pagal 6 formulę (B. Semenov 2005).

Valdymo grandinei išjungus tranzistorinį raktą, prasideda magnetinio lauko energijos perdavimo fazė. Šiuo atveju ritės saviindukcijos elektrovara per diodą VD perduodama apkrovai ir įkrauna išėjimo kondensatorių C_{out} neigiamo poliarumo įtampa (Udris 2008). Energijos perdavimo fazėje elektros srovė apskaičiuojama pagal 9 formulę:

$$i_L = -\frac{U_{out}}{L} \cdot (T - t); \quad (9)$$

Sulyginus 9 ir 6 formules gaunama keitiklio reguliavimo charakteristika:

$$i_L = -U_{in} \frac{D}{1-D}; \quad (10)$$

Kai darbo ciklas $D < 0,5$, invertuojamasis keitiklis veikia kaip žeminamasis – išėjimo įtampa yra mažesnė už įėjimo įtampą. Kai $D < 0,5$, keitiklis tampa aukštinamuoju, o kai $D = 0,5$, išėjimo įtampa apytiksliai lygi įėjimo įtampai (B. Semenov 2005).

Invertuojamasis keitiklis taip pat turi du veikimo režimus – netrūkiųjų srovių ir trūkiųjų srovių (16 pav.).

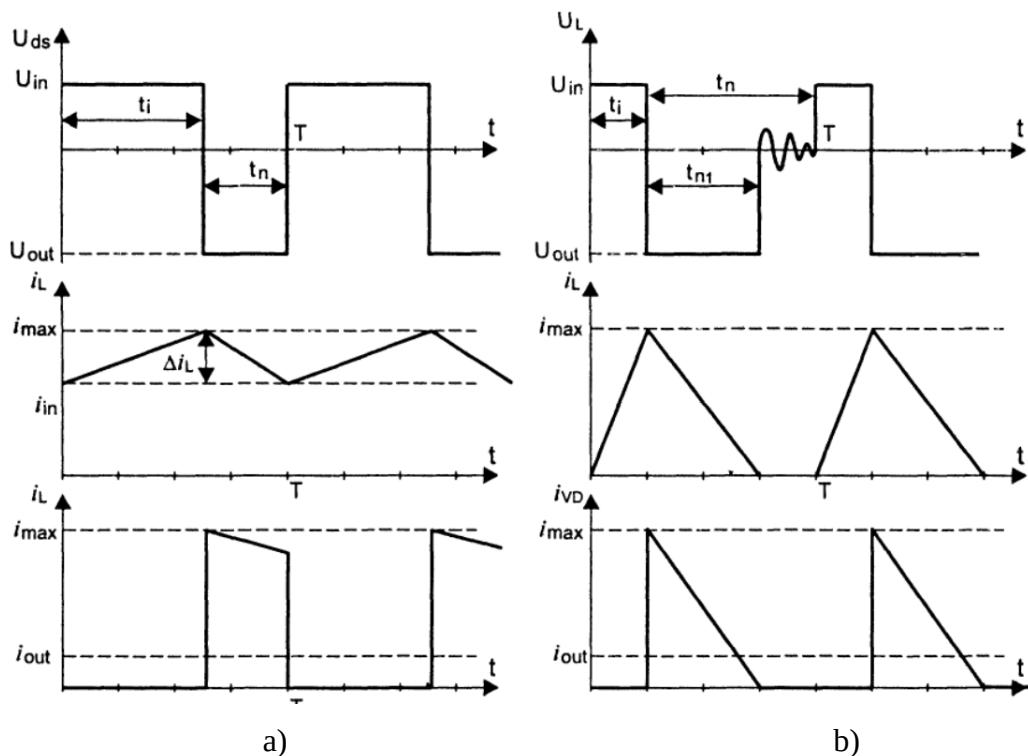
Keitikliui veikiant netrūkiųjų srovių režimu ritės srovių kitimo dydis skaičiuojamas pagal 11 formulę, o didžiausia galima elektros srovė – pagal 12 formulę:

$$\Delta i_L = \frac{1}{f} \cdot \frac{1}{L} \cdot \frac{U_{in} \cdot U_{out}}{U_{in} + U_{out}}; \quad (11)$$

$$i_{max} = i_L + \frac{1}{2} \Delta i_L. \quad (12)$$

Tranzistorinio rakto atidarymo impulso t_i trukmė nustatoma pagal 13 formulę:

$$t_i = \frac{1}{f} \cdot \frac{U_{out}}{U_{in} + U_{out}}. \quad (13)$$



16 pav. Žeminamojo-aukštinamojo keitiklio veikimo charakteristikos esant netrūkiųjų srovių (a) ir trūkiųjų srovių režimui (b) (B. Semenov 2005)

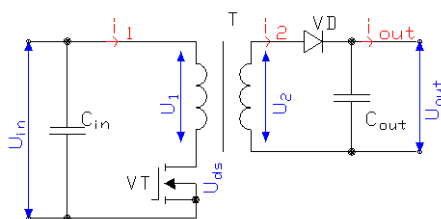
Keitikliui dirbant trūkiųjų srovių režimu, didžiausia ritės srovė apskaičiuojama pagal 14 formulę, impulso t_i trukmė – pagal 15 formulę:

$$i_{\max} = \frac{1}{L} \cdot U_{\text{in}} \cdot \frac{D}{f}; \quad (14)$$

$$t_i = \sqrt{2 \cdot i_{\text{out}} \cdot L \cdot \frac{U_{\text{out}}}{f \cdot U_{\text{out}}^2}}. \quad (15)$$

1.3.4. Grįžtamųjų keitiklių apžvalga

Aukštojo dažnio impulsinė grandinė vadinama grįžtamoju keitikliu (angl. *flyback converter*). Šie keitikliai sukurti siekiant sumažinti klasikinio 50 Hz dažnio transformatoriaus gabaritinius matmenis ir naudojami kaip standartiniai maitinimo šaltiniai televizoriuose, kompiuterinėje įrangoje, telekomunikacinėse sistemose (B. Semenov 2005). Šio keitiklio principinė schema parodyta 17 paveiksle.



17 pav. Grįžtamojo keitiklio principinė schema

Grįžtamajame keitiklyje elektros srovė prieš perdavimą apkrovai kaupiama magnetiniame dviejų apvijų ritės lauke. Atskyrus apvijas, keitiklis tampa atsparesnis apkrovos trumpajam jungimui, tačiau turi sugebėti sukaupti visą apkrovai reikalingą energiją droselyje (Udris 2008).

Grįžtamasis keitiklis veikia energijos kaupimo ir energijos perdavimo apkrovai fazėmis. Šios veikimo fazės skiriamos laiku, todėl induktyvinė ritė, paprastai vadinama transformatoriumi, iš tiesų yra dviejų apvijų droselis (B. Semenov 2005).

Energijos kaupimo fazėje tranzistorinis raktas VT yra atidarytas, ritės pirminėje apvijoje teka elektros srovė i_1 , droselis kaupia energiją. Elektros srovė šioje fazėje apskaičiuojama pagal 16 formulę:

$$i_1(t) = \frac{U_{\text{in}} \cdot t}{L_1}; \quad (16)$$

čia: L_1 – pirminės apvijos induktyvumas.

Uždarius tranzistorių VT pradedama energijos perdavimo apkrovai fazė. Šiuo momentu dėl saviindukcijos ritės išvaduose keičiasi įtampos poliškumas į priešingą. Atsidarius diodui VD, įtampa i_2 krauna išėjimo kondensatorių C_{out} . Antrinės apvijos srovės kitimas išreiškiamas 17 formule:

$$i_2(t) = \frac{w_1}{w_2} i_1 - \frac{U_{out} \cdot t}{L_2}; \quad (17)$$

čia: L_2 – antrinės apvijos induktyvumas.

Sklandžiam grįžtamojo keitiklio darbui procesai, vykstantys pirminėje apvijoje, turi būti susieti su reakcija į juos antrinėje apvijoje. Esant pakankamai didelės talpos išėjimo kondensatoriui C_{out} , užtikrinančiam kokybišką išėjimo įtampos filtraciją, apkrovos srovė apskaičiuojama pagal 18 formulę:

$$i_{out} = i_1 \frac{w_1}{w_2} - \frac{U_{out} \cdot t}{2}. \quad (18)$$

Manant, kad visa energija, sukaupta pirmojoje fazėje, perduodama į apkrovą (t. y. nėra energijos nuostolių), $L_1 \cdot i_1^2 = L_2 \cdot i_2^2$, o transformacijos koeficientas $k = w_2 / w_1$, apkrovos srovė skaičiuojama pagal 19 formulę (Udris 2008):

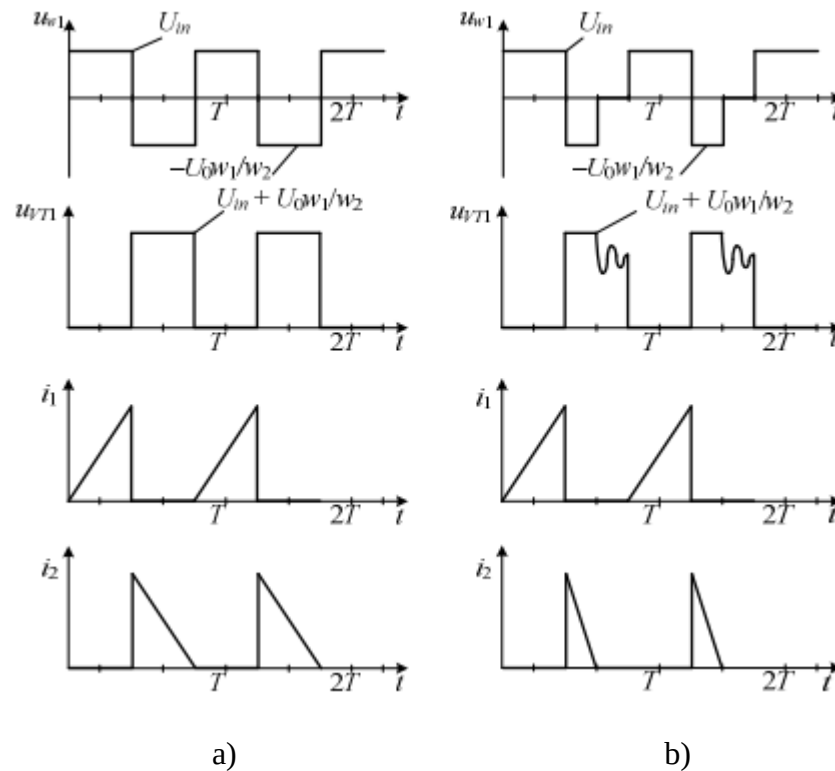
$$i_{out} = \frac{D \cdot (1 - D) \cdot U_{in}}{2 \cdot L_1 \cdot f \cdot k}. \quad (19)$$

Iš 15 formulės matoma, kad, esant nekintamai apkrovos varžai, pastoviai maitinimo įtampai, keitimo ir ritės induktyvumo dažniui, didžiausia įtampa apkrovoje gaunama, kai darbo ciklas $D = 0,5$. Vadinas, koeficientui esant arčiau 0 arba 1, įtampa apkrovoje gaunama artima 0. Praktikoje darbo ciklas reguliuojamas intervale nuo 0 iki 0,5, nes parinkus didesnę ciklą keitiklis pradeda dirbti nestabiliai (B. Semenov 2005). 18 paveiksle pateikiamos keitiklio veikimo charakteristikos esant darbo ciklui $D < 0,5$ ir $D = 0,5$.

Siekiant išvengti nepageidaujamų įtampos šuolių, atsirandančių atjungus apkrovą, į keitiklio grandinę jungiama aktyvioji apkrova, parenkama pagal mažiausią schemas darbo ciklą (Udris 2008).

Didžiausia galima įtampa apkrovoje nustatoma pagal 20 formulę:

$$U_{out} = U_{in} \cdot \frac{w_2}{w_1} \cdot \frac{D}{1 - D}. \quad (20)$$



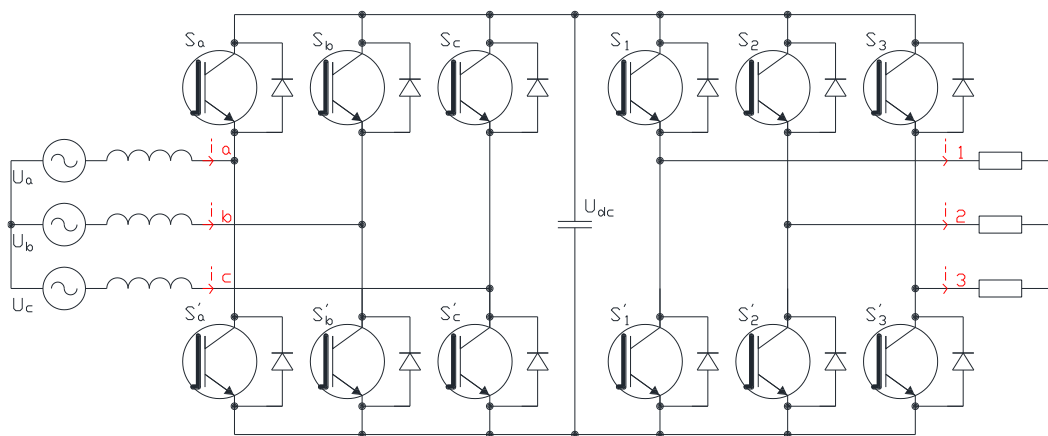
18 pav. Grįžtamojo keitiklio veikimo charakteristikos, kai darbo ciklas $D < 0,5$ (a) ir $D = 0,5$ (b) (B. Semenov 2005)

Kaip matyti 18 paveiksle, energijos perdavimo fazėje tranzistorinio rakto didžiausia įtampa U_{ds} gali būti dvigubai didesnė už įėjimo įtampą U_{in} . Šiems šuoliams riboti turi būti papildomai naudojamos viršįtampių grandys.

Visi apžvelgti DC-DC keitikliai veikia viename įtampos-srovės kvadrante, todėl energiją gali perduoti tik viena kryptimi. DC-DC keitikliuose perjungimai nesukelia įtampos ar srovės šuolių šaltiniuose. Šių keitiklių, veikiančių nustatytu režimu, grandinėje įjungti kondensatoriai gali būti naudojami kaip ekvivalentiniai įtampos šaltiniai, o induktyvumo ritės – kaip ekvivalentiniai srovės šaltiniai (Mohan 2003).

1.4. AC-AC keitiklių apžvalga

AC-AC keitiklis – tai įtaisas konvertuojantis kintamosios srovės maitinimo šaltinio parametrus (dažnį, fazių skaičių ar įtampos lygį) į kitokių parametrų kintamosios srovės įtampą. Šiuolaikiniuose keitikliuose keičiant tinklo įtampos fazių skaičių ir kitus parametrus naudojami nuolatinės srovės intarpai (19 pav.). Kintamosios srovės keitikliai su nuolatinės srovės intarpu projektuojami sujungiant atskiras keitiklių grandines – lygintuvą ir inverterį, jų valdymą pritaikant prie reikiamo keitiklio reikalavimų (Burkov 2015).



22 pav. Kintamosios srovės keitiklio su izoliuotosios užtūros dvipoliais tranzistoriais grandinė

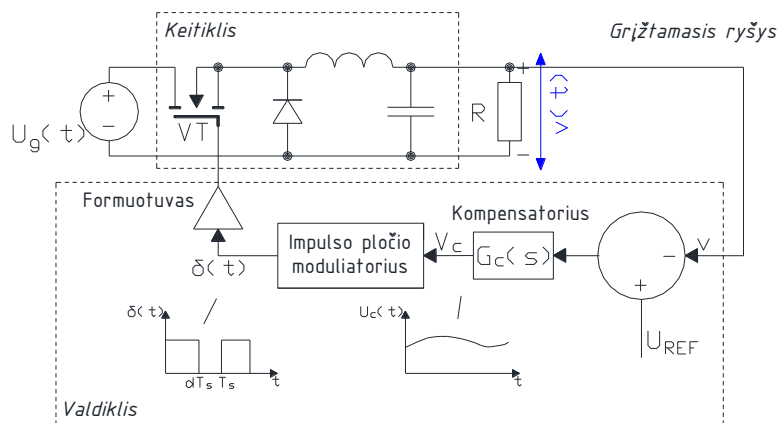
Kintamosios srovės AC-AC keitikliai plačiai naudojami asinchroninių mašinų pavarose, energijos saugojimo sistemose (pavyzdžiui, baterijose, nenutrūkstanto maitinimo šaltiniuose), sujungiant dvi nepriklausomos elektros perdavimo sistemas.

Kintamosios srovės AC-AC keitiklis panaudotas sujungiant Lietuvos ir Lenkijos elektros perdavimo tinklus. Lietuvos elektros perdavimo tinklas yra integruotas į IPS / UPS sistemos vadinamąjį BRELL (Baltarusija–Rusija–Estija–Lietuva–Latvija) žiedą ir veikia sinchroniškai su šių šalių elektros tinklais; Lenkijos elektros tinklai nuo 1995 m. veikia sinchroniškai su kontinentinės Europos elektros tinklais. 2015 m. įgyvendintas „LitPol Link“ projektas, kurio metu, pastačius 500 MW kintamosios srovės keitiklį su nuolatinės srovės intarpu Alytuje, sujungtos dvi tarpusavyje nesichronizuotos elektros sistemos. 500 MW „ABB“ gamybos keitiklis Alytaus pastotėje išlygina elektros energiją iš Lietuvos tinklų, tuoj pat ją vėl pakeičia į kintamąją, tačiau jau sinchronizuota su Lenkijos tinklais ir aukštos įtampos perdavimo linija perduoda ją į pastotę Elke, Lenkijoje. Ši jungtis leidžia perduoti elektros energiją tiek iš kontinentinės Europos į IPS / UPS sistemą, tiek atvirkščiai (LitPolLink 2016).

1.5. Keitiklių valdymo apžvalga

Projektuojant galios keitikius itin daug dėmesio skiriama išėjimo įtampos stabilizavimui. Tipiniame keitiklyje išėjimo įtampa turi būti nuolatinė, nepriklausomai nuo pokyčių keitiklio įėjime ar prijungtoje apkrovoje. Siekiant gauti įtampą, kiek įmanoma artimesnę numatytajai, į grandinę jungiamos grįžtamojo ryšio kilpos, kurios stebi išėjimo vertę ir reguliuoja ją. Inverteriuose grįžtamojo ryšio kilpa išėjimo įtampa lyginama su sinusoidine atskaitos įtampa.

Tipinė nuolatinės srovės žeminamojo keitiklio grandinė su grįžtamuuoju ryšiu pateikta 23 paveiksle.

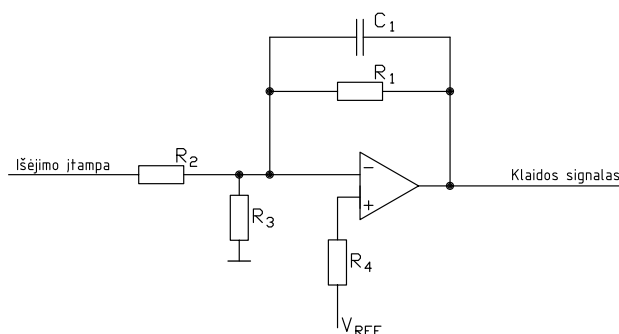


23 pav. Tipinė nuolatinės srovės keitiklio grandinė su grįžtamojo ryšio schema

Vienas svarbiausių grįžtamojo ryšio kilpos elementų – operacinis stiprintuvas, techninėje literatūroje dažnai vadinamas klaidos stiprintuvu. Siekiant gauti kuo stabilesnį išėjimo signalą ir tuo pat metu labai nedidinti keitiklio matmenų, stiprintuvui keliama itin daug reikalavimų. Vienas pagrindinių reikalavimų – perjungimų dažnis turi būti daug kartų aukštesnis už tinklo vardinį dažnį. Šis parametras per pastaruosius metus itin vystėsi, 1994 m. siekė apie 20 kHz, o jau 2011 m. – 20 MHz (Gottlieb 1994, Maity 2011).

Klaidos stiprintuvas impulso pločio moduliaciją naudojančiame valdiklyje nėra visiškai ekvivalentus operaciniam stiprintuvui. Operaciniai stiprintuvai paprastai turi vidinę korekcijos grandinę, kuria paveikiamos bendros stiprintuvo charakteristikos. Keitikliuose naudojamuose klaidos stiprintuvuose dažniausiai nėra vidinės koregavimo kilpos, o šias funkcijas atlieka išorinė grandinė (Mack 2005).

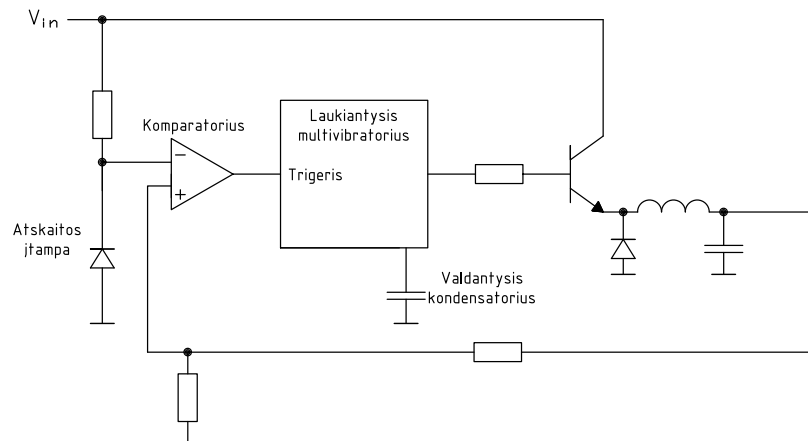
24 paveiksle pateikta tipinė grįžtamojo keitiklio koregavimo grandinė. Nuosekliai klaidos stiprintuvui į grandinę jungiami rezistorius ir kondensatorius. Šie elementai atlieka slopintuvų funkciją siekiant mažinti kokybės (Q) faktorių (Mack 2005)



24 pav. Tipinė aukštinamojo arba grįžtamojo keitiklio koregavimo grandinė

Taikomi trys nuolatinės srovės keitiklių išėjimo įtampos reguliavimo būdai: keičiama įtampa, srovė, slydimas.

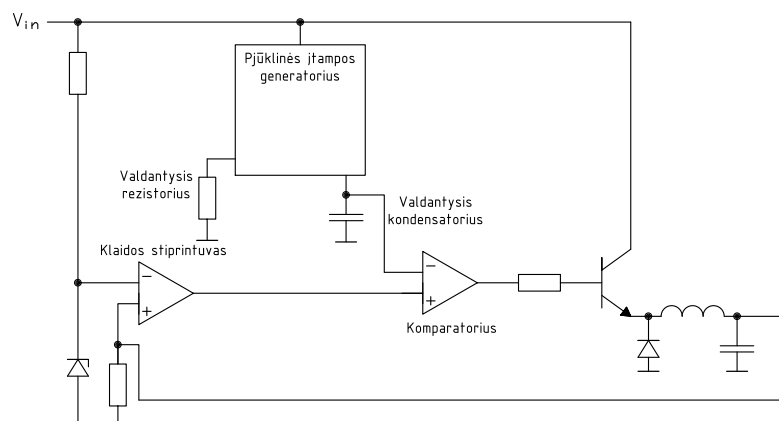
Paprastą valdymo įtaisą sudaro impulso dažnio moduliacija atliekanti grandinė. 25 paveiksle parodyta tokia grandinė, kurios pagrindą sudaro pastovaus pločio impulsus išduodantis generatorius (dažniausiai tai laukiantis multivibratorius). Komparatorius apdoroja valdymo įtampos ir atskaitos įtampos vertes ir perduoda signalą į generatorių. Jei valdymo įtampa komparatoriaus įėjime yra mažesnė už atskaitos įtampą antrajame įėjime, įtaisas persijungia ir paleidžia multivibratorių. Esant mažoms apkrovoms, generatoriaus išėjime bus mažo dažnio impulsinis signalas su mažu darbo ciklu. Augant apkrovai didėja ir dažnis, jo didžiausia vertė pasiekama esant 50 % darbo ciklui (Mack 2005).



25 pav. Valdymo grandinė su impulso dažnio moduliavimu

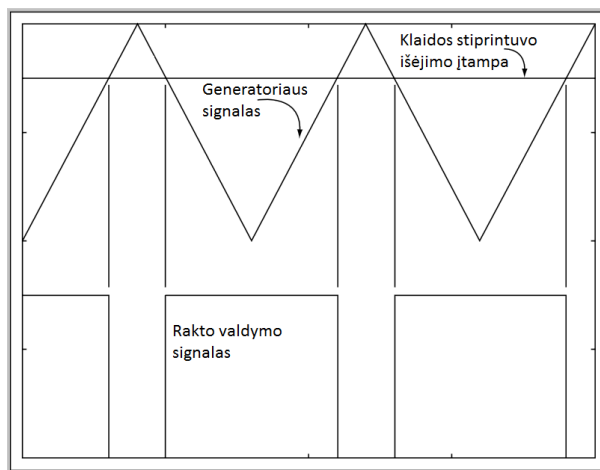
Šioje grandinėje impulsų dažnis keičiamas plačiame diapazone, dėl to atsiranda tikimybė prarasti elektromagnetinį suderinamumą. Todėl išėjime turi būti kontroliuojamos impulsų pulsacijos. Elektromagnetinį suderinamumą kur kas lengviau užtikrinti naudojant pastovaus dažnio kintamo pločio impulsus.

Grandinė, naudojanti impulso pločio moduliavimą, užtikrina valdomas ir nuspėjamas pulsacijas grandinės išėjime. Tokia grandinė, valdoma įtampa, parodyta 26 paveiksle.



26 pav. Valdymo keičiant įtampą grandinė su impulso pločio moduliavimu

Keitiklio įėjimo įtampa per įtampos daliklį paduodama į neinvertuojamą klaidos stiprintuvo įėjimą. Klaidos stiprintuvas savo išėjime atsižvelgdamas į atskaitos įtampą formuoja padidintą arba sumažintą klaidos signalą. Pjūkliniam signalui generuoti naudojamas multivibratorius. Kai įtampa laiką valdančiam kondensatoriuje pasiekia suveikimo ribą, įjungiamas generatoriaus sudėtyje esantis trigeris ir kondensatorius iškraunamas. Prie generatoriaus išėjimo jungiamas komparatorius, kurio neinvertuojamas įėjimas jungiamas prie klaidos stiprintuvo. Lygindamas pjūklinio signalo generatoriaus ir klaidos stiprintuvo signalus, komparatorius generuoja keitiklio rakto valdymo signalą. Šio signalo formavimo procesas vaizduojamas 27 paveiksle (Mack 2005).

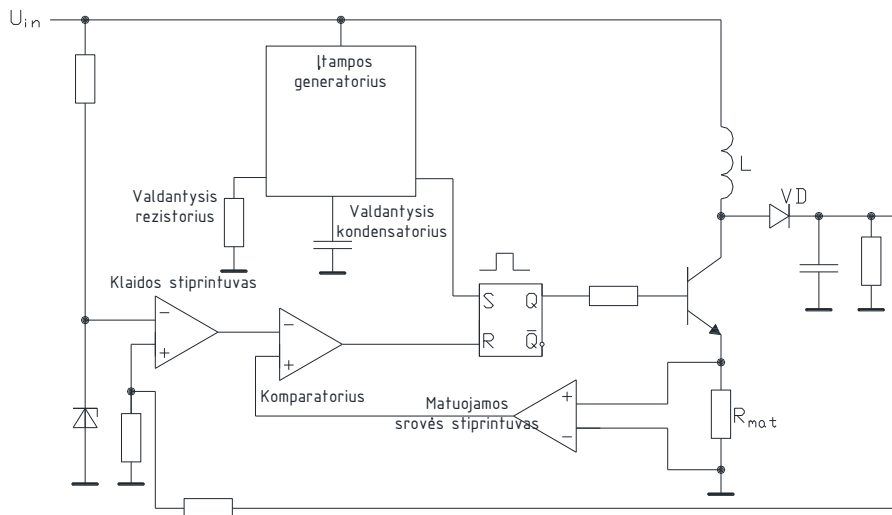


27 pav. Keitiklio tranzistorinio rakto valdymo signalo formavimas (Mack 2005)

Pjūklinės įtampos generatoriaus signalui esant mažesniai už klaidos stiprintuvo signalą, keitiklio valdymo raktas atidaromas (kontaktas sujungiamas). Generatoriaus signalui tapus didesniai už klaidos stiprintuvo signalą, kontaktas atjungiamas. Klaidos stiprintuvo įtampai esant mažesnei už minimalią pjūklinę įtampą, darbo ciklas lygus 100 %, klaidos stiprintuvo išėjimo įtampai viršijus maksimalią įtampą – 0 %.

Grįžtamuosiuose ir aukštinamuosiuose keitikliuose siekiant droselio energiją perduoti apkrovai turi būti išlaikomas tam tikras mažiausias intervalas tarp impulsų, tai yra darbo ciklas neturi pasiekti 100 %. Šiuolaikiniai impulso pločio moduliacijos valdikliai komplektuojami mechanizmu, užtikrinančiu užpildymo koeficientą, mažesnę už maksimalų, dažniausiai tai išorinis rezistorius (Mack 2005).

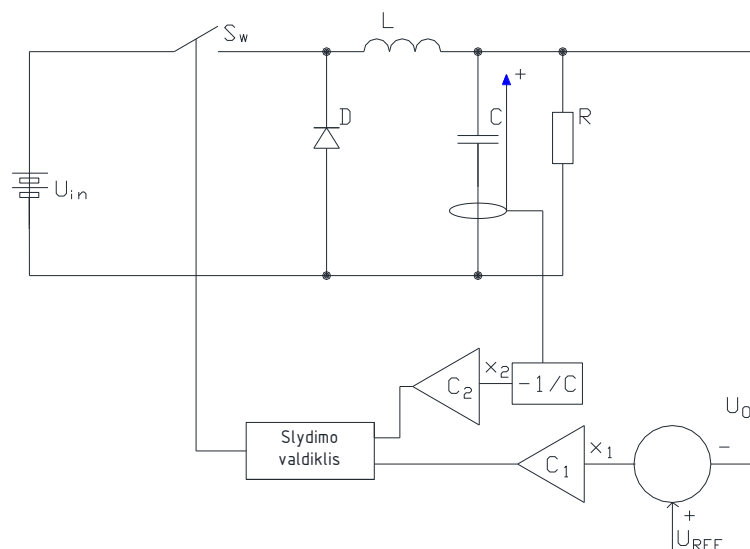
Impulsų pločio moduliacijos valdymas keičiant srovę turi pranašumų prieš valdymą keičiant įtampą. Prie tokių pranašumų priskiriamos geresnės perdavimo charakteristikos ir paprastesnis valdymo grandinės kontūras. Šios grandinės turi dvi grįžtamojo ryšio kilpas – srovės ir įtampos. Tipinė valdymo grandinė keičiant srovę parodyta 28 paveiksle (Shu 2012).



28 pav. Valdymo keičiant srovę grandinė su impulso pločio moduliavimu

Šioje grandinėje naudojamas nuolatinio dažnio impulsų generatorius. Generatoriaus išėjimo impulsas paduodamas į RS – trigerį, nustatydamas jame aukštą lygį išėjime ir atidarydamas prie trigerio prijungtą tranzistorinį raktą. Kai įtampa matavimo rezistoriuje R_{mat} pasiekia klaidos stiprintuvo nustatomos įtampos vertę, komparatorius suveikia ir grąžina trigerį kartu atjungdamas tranzistorinį raktą. Klaidos stiprintuvas suveikimo momentą reguliuoja taip, kad droselyje sukauptos elektros srovės užtekėtų išėjimo įtampai palaikyti. Išėjimo įtampai pasiekus varдинę reikšmę, klaidos signalas sumažina suveikimo srovę taip, kad vidutinė srovė droselyje liktų pastovi.

Trečiasis nuolatinės srovės keitiklių valdymo būdas – valdymas keičiant slydimą. Valdymo keičiant slydimą grandinės, palyginti su valdymu įtampa arba srove, gali reguliuoti išėjimo įtampą platesniame diapazone. Šio tipo valdymo grandinė pateikta 29 paveiksle (Shu 2012).



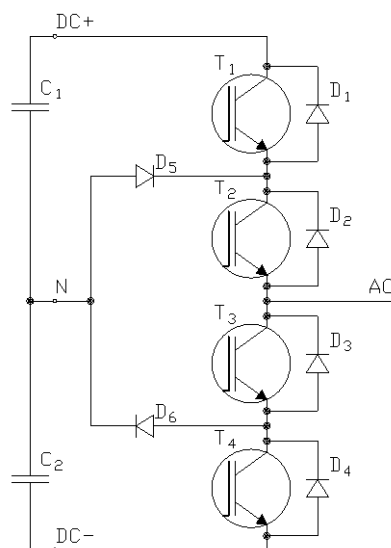
29 pav. Valdymo keičiant slydimą grandinė

Valdymo keičiant slydimą atveju keitikliuose naudojami tipiniai reguliuojamieji valdikliai, galintys veikti dviem režimais – srovės arba įtampos reguliavimo (atsižvelgiant į tai, kurio pastovaus dydžio keitiklio išėjime reikia). Siekiant, kad keitiklio išėjime būtų nuolatinės įtampos signalas, valdiklis veiks įtampos reguliavimo režimu ir apdoros išėjimo įtampos klaidos signalą bei įtampos klaidos dinaminį signalą (Shu 2012).

Trijų lygių impulso pločio moduliacija

Inverterių valdymo grandinėse taikoma kelių lygių impulso pločio moduliacija. Paprasčiausiu atveju, siekiant pusės H tiltelio topologijos inverterio išėjime gauti sinusoidinę įtampą, pakanka keitiklio įėjime turėti nuolatinės įtampos teigiamą dedamąją $+U$ bei neigiamą dedamąją $-U$. Taikant impulso pločio moduliaciją, inverterio išėjime iš $+U$ dedamosios formuojama teigiama sinusoidės banga (pusperiodis), iš $-U$ – neigiama banga. Kadangi naudojamos tik dvi dedamosios, šis impulso pločio moduliacijos lygis vadinamas dviejų lygių (Filatov 2012).

Vis plačiau keitikliuose naudojant impulso pločio moduliaciją, pradėta taikyti ir trijų lygių moduliacija. Toks valdymas realizuojamas vidurine atšaka per diodus arba T forma sujungus tranzistorinius raktus su nuliniu laidininku. 30 paveiksle pavaizduotas trijų lygių inverterio, kuriame vidurinė atšaka sujungta per diodus, principinė schema (Filatov 2012).

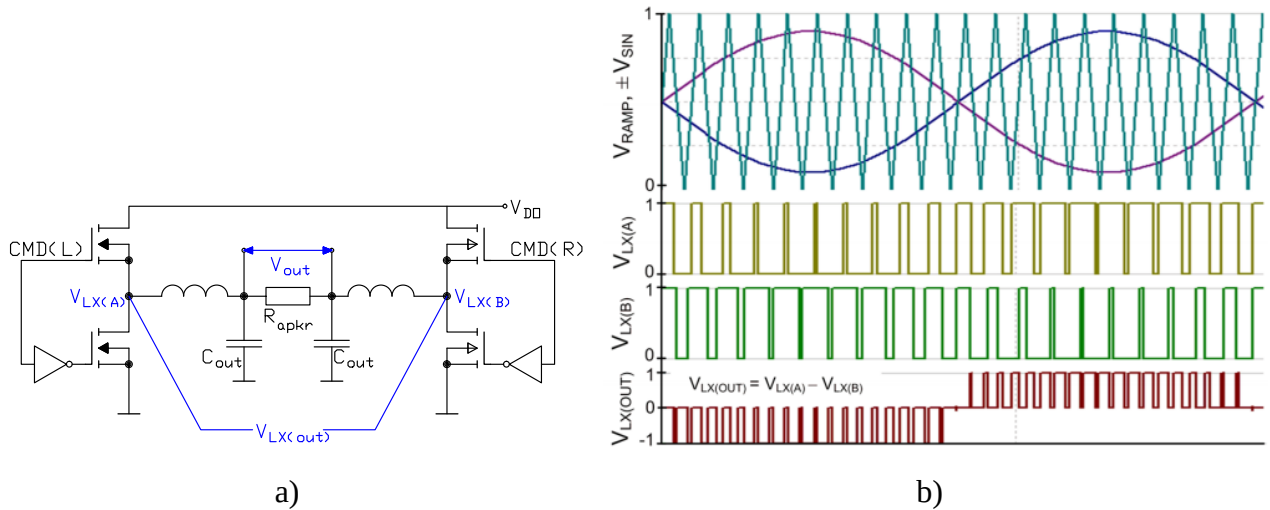


30 pav. Trijų lygių inverterio, kuriame vidurinė atšaka sujungta per diodus, principinė schema

Trijų lygių keitiklyje impulso pločio moduliacija formuoja fazinį poslinkį, sukurdamas asimetrinę darbinę srovę H tiltelio topologijos inverterio kairėje ir dešinėje pusėse. Šiame keitiklyje generuojama išėjimo įtampa apskaičiuojama pagal formulę:

$$V_{LX(OUT)} = V_{LX(A)} - V_{LX(B)}. \quad (21)$$

Šiame keitiklyje generuojama įtampa yra trijų reikšmių: 0, $-V_{DD}$ ir $+V_{DD}$, tai yra iš eilės jungiama kiekviena iš įėjimo įtampų. Keitiklyje naudojami tranzistoriniai raktai parenkami atsižvelgiant į santūros–ištakos pilnutinę įtampą, kuri turi būti $V_{DSS} - V_{DD}$. Šis būdas užtikrina mažesnę elektros srovę induktyvumo ritėje ir sumažina pulsacijų skaičių keitiklio išėjime (Michal 2015). 31 paveiksle pateikiama H tiltelio topologijos inverterio grandinė (a), valdoma trijų lygių impulso pločio moduliacija, ir šioje grandinėje generuojamų signalų kreivės.



31 pav. Inverterio grandinė, valdoma trijų lygių impulso pločio moduliavimu (a), ir grandinėje generuojamų signalų kreivės (b) (Michal 2015)

1 lentelėje pateikiami trijų lygių inverterio, kurio principinė schema pavaizduota 31 paveiksle, tranzistorinių raktų galimų padėčių deriniai. Raktų padėtys skirstomos į tris grupes:

- saugias;
- potencialiai nesaugias – kai grandinėje nepavyksta užtikrinti stabilaus veikimo;
- draudžiamas – kai sujungus tranzistorinius raktus grandinėje įvyksta trumpasis jungimas.

1 lentelė. Trijų lygių impulso pločio moduliavimu valdomos grandinės tranzistorinių raktų galimų padėčių deriniai

T1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1
T2	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1
T3	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
T4	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1
	Saugios						Potencialiai nesaugios						Draudžiamos			

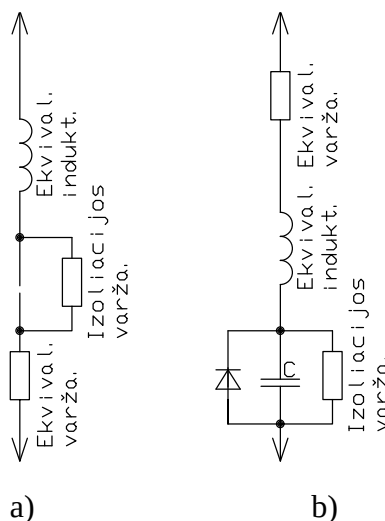
1.6. Keitiklių elementai

Galios keitikliuose naudojami elementai skirstomi į dvi dideles grupes – pasyviuosius ir puslaidininkinius. Prie pasyviųjų priskiriami įvairūs talpiniai (kondensatoriai), aktyvieji bei induktyvieji elementai.

Kondensatoriai

Kondensatoriaus paskirtis grandinėje yra veikiant įtampai savo magnetiniame lauke kaupti elektros srovę. Analoginėse grandinėse kondensatorius nagrinėjamas tik kaip talpa, tačiau galios keitiklių grandinėse jis yra varžos, talpos ir induktyvumo kombinuotas elementas, pritaikytas veikti esant aukštai elektros srovei ir dideliam dažniui. 32 paveiksle pateiktos realių polinio ir nepolinio kondensatorių grandinės. Polinio kondensatoriaus grandinėje jungiamas parazitinis diodas, leidžiantis pratekėti srovei kondensatorių prijungus atvirkštine kryptimi (Mack 2005).

Pagrindiniai kondensatoriaus rodikliai yra talpa, ekvivalentinė nuoseklioji varža ir ekvivalentinis nuoseklusis induktyvumas. Projektuojant šiuos įtaisus turi būti skiriama daug dėmesio per kondensatorių tekėjančios elektros srovės pulsacijoms. Būtent tinkamas atsparumas lemia kondensatoriaus, o kartu ir viso keitiklio patikimumą ir ilgaamžiškumą. Atsižvelgiant į tai kondensatoriai paprastai gaminami iš aliuminio arba tantalo metalų (Gottlieb 1994).



32 pav. Realių nepolinio (a) ir polinio (b) kondensatorių ekvivalentinės grandinės

Labiausiai paplitę yra aliumininiai kondensatoriai. Jų konstrukcija projektuojama sluoksninio tipo ir yra sudaryta iš aliuminio folijos (atliekančios anodo funkciją), popierinis tarpiklis, dar vienos aliuminio folijos (katodas) ir dar vieno sluoksnio popieriaus. Šios sudedamosios dalys talpinamos į

korpusą (konteinerį) su druskų tirpinių užpildu ir anodo bei katodo išvadais išorinei grandinei prijungti. Šiuolaikinių aliumininių kondensatorių metalo plotą apdirbant chemiškai labai pagerinamos įtaisų charakteristikos – aukštos įtampos kondensatorių talpa padidinama iki 20 kartų, o žemos įtampos – netgi iki 100 kartų (Mack 2005).

Kondensatoriaus gedimų pagrindinė priežastis – perkaitimas. Kaistant kondensatoriui dėl susidariusio slėgio per drenažines angas pradedamas mesti lauk elektrolitas, o tai sukelia dar didesnę kaitimą ir galiausiai grandinės nutrūkimą. Dėl šios priežasties aliumininiai kondensatoriai dažniausiai gaminami paviršiniam montavimui, siekiant išvengti pažeidimų įtaisus lituojant.

Galios keitikliuose elektros srovės pulsavimai veikia kondensatorius juos šildydami. Parenkant kondensatorius galios keitikliams svarbu numatyti vardines veikimo temperatūras, nes nuo to priklauso jų patikimumas. Skaičiuojama, kad jei kondensatorius veikia savo nominaliąja temperatūra, veikimo laikas yra apie 2000 valandų. Šį laiką galima gerokai pratęsti parinkus apie 30 % didesnės vardinės temperatūros kondensatorius (Mack 2005).

Kondensatoriai, gaminami iš tantalo metalo, labiausiai vertinami dėl galimybės išgauti didelę talpą ir temperatūrinio atsparumo lituojant. Tačiau šie elementai, priklausomai nuo gamybos technologijos, gali veikti tik ne didesne nei 30–50 V įtampa. Dažniausia šio tipo kondensatorių gedimo priežastis yra trumpieji jungimai, galintys sukelti degimą (Mack 2005).

Rezistoriai

Šiandieninėje rinkoje galima rinktis iš itin daug aktyviųjų elementų. Parenkant varžas galios keitikliams, daug dėmesio skiriama vardinei rezistoriaus galiai, kuri proporcinga įtampos arba srovės kvadratui. Klaidos parenkant varžos elementus lemia galios nuostolius rezistoriuje, pavyzdžiui, parinkus 50 % mažesnę varžą už vardinės galios varžą, išėjime gaunama 125 % didesnė galia. Techninėje literatūroje apibrėžiama vardinė rezistoriaus galia yra didžiausia galia, kurią rezistorius išsklaido esant 70 °C temperatūrai. Galios keitikliuose dažniausiai naudojami angliniai ir vieliniai rezistoriai (Mack 2005).

Anglinių rezistorių šerdis gaminama iš anglies, užpilamos specialia derva, ir patalpinama į izoliuotą korpusą. Šio tipo rezistoriai yra jautrūs aplinkos drėgnumui, ilgainiui veikiami drėgmės jie ima keisti savo varžą. Angliniai rezistoriai skleidžia gana didelį elektrinį triukšmą, kuris didėja augant temperatūrai. Šiuo metu jie dėl savo trūkumų vis rečiau naudojami galios elektronikoje (Mack 2005).

Vieliniai rezistoriai gaminami ir reikiamai varžai gauti pritaikomi naudojant lazerius. Šio tipo rezistorių charakteristikos yra itin plačios ir kiekvienu konkrečiu atveju įtaisai parenkami individualiai. Vieliniai rezistoriai gali būti gaminami specifiniams tikslams, pavyzdžiui, itin mažo induktyvumo, itin mažos varžos, skirti srovėms matuoti, skirtingų triukšmų ir panašiai (Mack 2005).

Droseliai

Droseliais vadinamos induktyvumo ritės, atskiriančios nuolatinę srovę nuo kintamosios arba dvi skirtingo dažnio sroves. Jie sudaro didelę varžą kintamajai srovei ir mažą varžą nuolatinei srovei (Čepulkauskas 1998).

Skaičiuojant tipines galios keitiklių grandines laikoma, kad naudojami idealūs induktyviniai elementai, dar vadinami droseliais. Tačiau projektuojant realius keitikius susiduriama su droselių induktyvumo, varžos ir talpumo savybėmis. Nuostoliai droselio šerdyje tampa ekvivalentūs papildomam rezistoriui. Svarbiausi keliama reikalavimai droseliams: induktyvumo ritė turi būti neprisotinama, be parazitinio tūrio tarp apvijų ir su nuliniu pasipriešinimu nuolatinei srovei (Gottlieb 1994). Taip pat svarbu atkreipti dėmesį į magnetinę skvarbą, magnetinius nuostolius (histerezė), didžiausią magnetinę indukciją (prisotinimą) ir šerdies temperatūrą (Mack 2005).

Viena pagrindinių realių droselių charakteristikų yra magnetinio lauko sklaida. Bet kuris magnetinis srautas, kuris nėra uždarytas į droselį, tampa potencialiu elektromagnetinio trikdžio šaltiniu.

Droseliai skirstomi į ekranuotuosius ir neekranuotuosius. Neekranuotajame droselyje naudojama magnetinė šerdis arba droselis vyniojamas be šerdies. Droseliai be šerdies naudojami itin aukšto dažnio keitikliuose, jie atitinka neprisotinimo reikalavimą. Vis dėlto daugumoje neekranuotųjų droselių naudojamos magnetinės šerdys, kurios mažina magnetinio lauko sklaidą, koncentruodamos didžiąją sklaidos dalį savyje (Mack 2005). Ekranuotajame droselyje magnetinė šerdis visiškai uždengia apvijų vielą.

Induktyvumo ritės šerdys gaminamos tik iš ferito ir miltelinės metalurgijos produkcijos.

Galingose ritėse šerdys sudaro uždara magnetinį kontūrą siekiant, kad magnetinis laukas būtų tik droselio viduje. Nuo medžiagos charakteristikų priklauso magnetinės indukcijos dydis ir atitinkamai energija, kuri gali būti saugoma šerdyje.

Puslaidininkiai

Galios keitikliuose perjungiklio funkcijai atlikti plačiai naudojami diskretiniai įrenginiai – puslaidininkiniai komponentai. Stabilizatoriuose, inventoriuose ir keitikliuose naudojami valdomieji silicio lygintuvai (santr. SCR), uždaromieji tiristoriai (santr. GTO), dvipoliai sandūriniai tranzistoriai (santr. BJT), metalo-oksido-puslaidininkio lauko tranzistoriai (santr. MOSFET), dvipoliai tranzistoriai su izoliuotąja užtūra (santr. IGBT), integruotos sklendės valdomi tiristoriai (santr. IGCT). Šiuolaikinių puslaidininkinių įtaisų perjungimo dažnis siekia nuo 1 kHz dideliuose

tiristoriuose ir GTO iki daugiau nei 1 MHz MOSFET įtaisuose (Trzynadlowski 2016). 2 lentelėje pateikiami pagrindiniai puslaidininkinių raktų parametrai (Rashid 2014).

2 lentelė. Puslaidininkinių raktų parametrai

Tipas	Perjungimo signalas	Perjungimo ch-tika	Perjungimo dažnis	Tiesioginė įtampa	Nurodytoji komutavimo įtampa	Nurodytoji komutavimo srovė
Diodas			20 kHz	1,2–1,7 V	6,5 kV	12 kA
SCR	Srovė	Trigeris	0,5 kHz	1,5–2,5 V	8,5 kV	9 kA
TRIAC	Srovė	Trigeris	0,5 kHz	1,5–2 V	1,4 kV	0,1 kA
GTO	Srovė	Trigeris	1 kHz	3–4 V	6 kV	6 kA
IGCY	Srovė	Trigeris	5 kHz	3–4 V	6,5 kV	6 kA
BJT	Srovė	Linijinis	20 kHz	1,5–3 V	1,7 kV	1,2 kA
IGBT	Įtampa	Linijinis	20 kHz	3–4 V	6,5 kV	3,6 kA
MOSFET	Įtampa	Linijinis	1 MHz	3–4 V	1,7 kV	1,8 kA

Nagrinėjant puslaidininkinių įtaisų parinkimą pastebima, kad didžiausios galios įtaisai, pavyzdžiui, tiristoriai, nepasižymi greitaveika, o sparčiausiai komutuojantys MOSFET raktai nėra itin galingi.

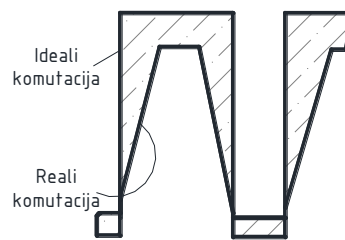
Įvairiu laikotarpiu galios keitikliuose naudota daugybė tranzistorinių elementų, neretai pagamintų sujungiant skirtingus jų tipus. Ne taip seniai pradėti naudoti kur kas spartesni MOSFET ir IGBT tranzistoriai. Šių tipų įtaisai, bendrai vadinami lauko tranzistoriais, yra dažniausiai naudojami galios keitiklių grandinėse (B. J. Semenov 2011).

Parentant lauko tranzistorinius raktus pirmiausia nustatomas reikiamas tipas (nnp ar pnp) ir apžvelgiami ypatingi veiksniai, pavyzdžiui: padidėjusi įtampa, komutacijos laikas, elektros srovės dydis ir elemento kaina. Tranzistorinių raktų žinyuose pateikiami šie parametrai: didžiausia įtampa tarp santakos ir ištakos $U_{ds\ max}$, kanalo varža esant atidarytam raktui $R_{dn(on)}$, didžiausia santakos srovė I_d , slenkstinė valdymo įtampa $U_{gs\ max}$, sklaidomoji galia P , kanalo tipas. Paprastai N kanalo įtaisai pasižymi mažesne kaina už P kanalo, tačiau pastarieji turi paprastesnę valdymo grandinę (Maniktala 2012).

Parentant dvipolius tranzistorius su izoliuotąja užtūra svarbiausiu parametru laikoma ilgalaikė nuolatinė kolektoriaus srovė. Šis dydis normuojamas esant normaliai korpuso temperatūrai (25 °C) ir aukštai temperatūrai – 100 °C. Kitas svarbus parametras – kolektoriaus-emiterio įtampa, žymima U_{ces} , kuri IGBT tranzistoriuose gali siekti 600, 1200, 2400 V ir daugiau. Žinyuose pateikiama ir emiterio-kolektoriaus įtampa, žymima U_{ecs} . Šis parametras charakterizuoja įtaiso gebą prijungti

grįžtamąją emiterio-kolektoriaus įtampą. Kiti žinyuose pateikiami IGBT parametrai – didžiausia valdymo įtampa $U_{gs\ max}$, kondensatorių talpos (B. J. Semenov 2011).

Nagrinėjant galios keitiklius raktai laikomi idealiais, kai akimirksniu keičia padėtį iš 0 į 1 ir atvirkščiai. Idealiame rakte perjungimas vyksta akimirka, tad nesusidaro nuostolių. Šiam raktui esant sujungtam, per jį prateka visa elektros srovė ir gnybtuose nesusidaro įtampos nuostolių; raktui esant atjungtam, gnybtuose yra visa įtampa, o srovė neteka. Realybėje stačiakampės perjungimo formos pasiekti neįmanoma, galima tik prie jos priartėti, tad perjungimo metu susidaro energijos nuostolių. 33 paveiksle pateiktos idealaus ir realaus perjungimo formos (Gottlieb 1994).

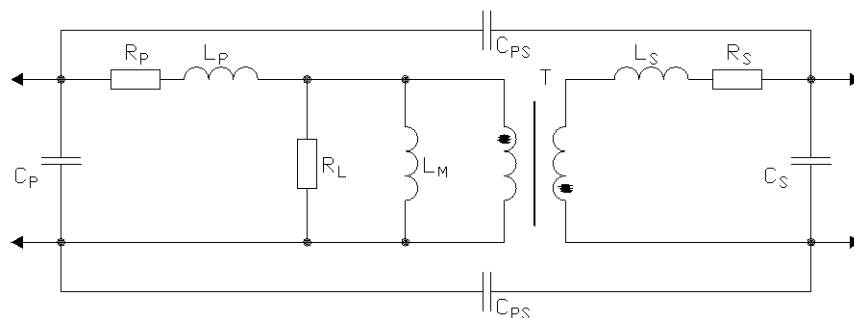


33 pav. Tranzistorinio rakto perjungimo formos

Transformatoriai

Žemadažniai galios transformatoriai dažniausiai naudojami įtampai aukštinti arba žeminti, atskiroms grandinės dalims izoliuoti, taip pat faziniam poslinkiui daugiafaziuose lygintuvuose. Šio tipo transformatorių šerdys gaminamos iš juostinio arba lakštinio plieno. Aukštadažniuose keitikliuose transformatoriai irgi naudojami įtampai keisti, galvaninei atsakai, taip pat energijai kaupti. Aukštadažniuose transformatoriuose, siekiant sumažinti nuostolius šerdyje, šerdžiai gaminti naudojamos miltelinės magnetinės medžiagos arba feritas (Melešin 2005).

Nagrinėjant teorinį keitiklių veikimą, dažniausiai laikoma, kad grandinėje veikia idealus transformatorius. Realuose transformatoriuose taip pat veikia induktyvumas, varža bei talpa, o nuostoliai šerdyje išreiškiami ekvivalentine varža. (Mack 2005).



34 pav. Realaus transformatoriaus ekvivalentinė grandinė

34 paveiksle pateikta realaus transformatoriaus ekvivalentinė grandinė. Čia: C_p – pirminės apvijos talpa, R_p – pirminės apvijos varža, L_p – pirminės apvijos induktyvioji sklaida, R_L – nuostolių šerdyje ekvivalentinė varža, L_M – įmagnetėjimo induktyvumas, C_{ps} – talpa tarp apvijų, C_s – antrinės apvijos talpa, R_s – antrinės apvijos varža, L_s – antrinės apvijos induktyvioji sklaida (Mack 2005).

Skiriami du transformatoriaus veikimo režimai (Melešin 2005):

- perduodamas energiją į apkrovą, transformatorius nenaudoja šerdyje kaupiamos energijos;
- transformatoriaus šerdyje tam tikru laiko intervalu sukaupia energija visiškai arba iš dalies perduodama į apkrovą.

Toliau skyriuje pateikiama tipinio dviejų apvijų transformatoriaus, veikiančio keitiklyje, parametrų apskaičiavimo metodika (Melešin 2005). Pirmiausia apibrėžiami pradiniai duomenys, būtini skaičiavimui: 1) įtampa pirminėje apvijoje U_1 , V; 2) išėjimo įtampa U_2 , V; 3) elektros srovė transformatoriaus išėjime (apkrovos) I_{apkr} , A; 4) dažnis f , Hz; 5) šerdies medžiaga; 6) šerdies forma; 7) didžiausia šerdies indukcija B_{max} , T; 8) transformatoriaus perkaitimo ribinė vertė ΔT , °C. Naudojant pradinius duomenis apskaičiuojami transformatoriaus parametrai:

1. Nustatoma transformatoriaus išėjimo galia (22 formulė):

$$P_{apkr} = (U_2 + k_1 \cdot U_{kr}) I_{apkr}, [W]; \quad (22)$$

čia: k_1 – koeficientas konkrečiai lygintuvo grandinei (nustatomas iš žinyno); U_{kr} – įtampos kritimas viename lygintuvo diode, įjungtame prieš transformatorių, V.

2. Pagal 23 formulę nustatoma transformatoriaus galia:

$$P_T = P_{apkr} \left(\frac{1}{\eta} + \sqrt{2} \right), [VA]; \quad (23)$$

čia: η – transformatoriaus naudingumo koeficientas, $\eta = 0,97...0,99$.

3. Šerdžiai parinkti pagal 24 formulę nustatoma šerdies ir kiaurymės plotų sandauga:

$$S_s S_k = \left(\frac{P_T \cdot 10^4}{4 \cdot k_f \cdot B_m \cdot f \cdot k_j \cdot k_i} \right)^{\frac{1}{1+y}}, [cm^4]; \quad (24)$$

čia: k_f – įėjimo įtampos signalo koeficientas, $k_f = 1,11$ esant sinusoidės formos signalui, $k_f = 1$ esant stačiakampių impulsų formos signalui; B_m – didžiausia šerdies medžiagos indukcija, T (nustatoma iš žinyno); f – įėjimo signalo dažnis, Hz; k_j – srovės apvijoje tankio koeficientas (nustatomas iš žinyno); k_i – šerdies kiaurymės naudojimo koeficientas, $k_f = 0,4$; y – lygio rodiklis, kurio teorinis dydis $y = -0,12$.

4. Naudojant žinynų duomenis parenkama standartiniu būdu gaminama šerdis, išlaikant būtinąją sąlygą, kad parinktos šerdies ir kiaurymės plotų sandauga $(S_s S_k)_{par} > (S_s S_k)_{teor}$. Iš žinynų nustatomas šerdies plotas S_s , kiaurymės plotas S_k , vidutinis apvijos ilgis l_{vid} .

5. Pagal 25 formulę apskaičiuojamas transformatoriaus pirminės apvijos vijų skaičius W_1 :

$$W_1 = \frac{U_1 \cdot 10^4}{4 \cdot k_f \cdot B_m \cdot f \cdot S_s}. \quad (25)$$

6. Naudojant 26 formulę nustatoma elektros srovė pirminėje apvijoje W_1 :

$$I_1 = \frac{P_{\text{apkr}}}{U_2 \cdot f \cdot S_s}, [\text{A}]. \quad (26)$$

7. Pagal 27 formulę nustatomas elektros srovės tankis apvijose:

$$j = k_j \cdot (S_s S_k)^y, [\text{A}/\text{cm}^2]. \quad (27)$$

8. Pagal 28 formulę apskaičiuojamas pirminės apvijos laidininko skerspjūvis:

$$S_{\text{pirm}} = \frac{k_2 \cdot I_1}{j}, [\text{cm}^2]; \quad (28)$$

čia: k_2 – koeficientas, išreiškiantis pirminės apvijos atlikimą. $k_2 = 1$ projektuojant dviejų apvijų transformatorių grandinėje su tilteline lygintuvu.

9. Naudojant žinyų duomenis parenkamas standartiniu būdu gaminamas varinis laidininkas. Iš žinyų nustatomas laidininko skersmuo d_1 , laidininko skerspjūvio plotas S_{1s} , laidininko skerspjūvio plotas su izoliacija $S_{1.iz}$, laidininko savitoji varža ϱ_{11} .

10. Pagal 29 formulę apskaičiuojama pirminės apvijos varža R_1 :

$$R_1 = l_{\text{vid}} \cdot W_1 \cdot \varrho_{11} \cdot 10^{-6}, [\Omega]. \quad (29)$$

11. Naudojant 30 formulę nustatomi nuostoliai pirminės apvijos variniame laidininke:

$$\Delta P_{M1} = k_3 \cdot (k_2 \cdot I_1)^2 \cdot R_1, [\text{W}]; \quad (30)$$

čia: k_3 – koeficientas, nustatomas iš žinyso pagal projektuojamo keitiklio topologiją. $k_3 = 1$ projektuojant dviejų apvijų transformatorių grandinėje su tilteline lygintuvu.

12. Pagal 31 formulę apskaičiuojamas transformatoriaus antrinės apvijos vijų skaičius W_2 :

$$W_2 = \frac{W_1 \cdot U_{W2}}{U_1}, [\text{V}]; \quad (31)$$

čia: U_{W2} – įtampa, veikianti antrinėje apvijoje, išreiškiama iš 22 formulės $U_{W2} = U_2 + k_1 \cdot U_{kr}$.

Analogiškai pirminei apvijai:

13. Naudojant 28 formulę nustatomas antrinės apvijos laidininko skerspjūvis.

14. Remiantis antrinės apvijos laidininko skerspjūvio apskaičiavimo duomenimis, iš žinyso parenkamas varinis laidininkas.

15. Pagal 29 formulę nustatoma antrinės apvijos varža R_2 .

16. Naudojant 30 formulę apskaičiuojami nuostoliai antrinės apvijos variniame laidininke ΔP_{M2} .

17. Pagal 32 formulę apskaičiuojami bendrieji nuostoliai variniuose laidininkuose:

$$\Delta P_M = \Delta P_{M1} + \Delta P_{M2}, [\text{W}]. \quad (32)$$

18. Nustatomi savitieji nuostoliai šerdyje, naudojant pasirinktos medžiagos parametrus:

$$P_{\text{sav}} = 1,64 \cdot 10^{-3} \cdot f^{1,31} \cdot B_m^{2,49}, [\text{W/kg}]. \quad (33)$$

19. Nustatomi suminiai nuostoliai šerdyje:

$$\Delta P_{\text{š}} = P_{\text{sav}} \cdot M, [\text{W}]; \quad (34)$$

čia: M – parinktos šerdies masė, nustatoma iš gamintojo žinyno, kg.

20. Pagal 35 formulę apskaičiuojami bendrieji nuostoliai transformatoriuje:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{š}} + \Delta P_{\text{M}}, [\text{W}]. \quad (35)$$

2. PROJEKTINĖ DALIS

Naujų elektros energetikos įrenginių ir sistemų projektavimą sudaro trys pagrindiniai etapai: funkcinės schemos sudarymas, principinės elektrinės schemos sudarymas ir veikimo modeliavimas.

Funkcinė schema – tai toks proceso ar sistemos pavaizdavimo būdas, kai kiekvieną sistemos ar proceso funkcinę komponentą atitinka apibrėžtas schemos elementas. Šia schema apibūdinamas elementų vaidmuo sistemoje, palengvinamas bendras sistemos modelio įsivaizdavimas, išsamiai pateikiamos duomenų ir informacijos perdavimo kryptys. Elementus jungiančios linijos rodo funkcijų tarpusavio ryšį. Funkcinėse schemose elementai vaizduojami stačiakampiais blokais ar sutartiniais grafiniais simboliais su įrašytais pavadinimais ar žymėjimais valdymo sistemos elementuose. Supaprastinta projektuojamo keitiklio įtampų keitimo struktūrinė schema pavaizduota 35 pav.



35 pav. Supaprastinta įtampų keitimo struktūrinė schema

Valdymo sistemos struktūrai ir veikimo principui apibūdinti braižoma principinė elektrinė schema. Jos sudarymas yra sudėtingas ir daug etapų apimantis procesas. Bendrieji schemų sudarymo reikalavimai ir sutartiniai grafiniai žymenys reglamentuoti ISO, DIN ir LST standartais. Principinę elektrinę schemą sudaro visų sistemos elementų sutartiniai grafiniai ženklai ir visi elektriniai ryšiai tarp jų.

Projektuojamo keitiklio veikimui išbandyti naudojama modeliavimo programa „LTspice XVII“, pasižyminti prieinamumu ir sąsajos paprastumu.

„LTspice XVII“ – tai įmonės „Linear Technology“ modeliavimo programa, skirta pirmiausia šios bendrovės puslaidininkiniams įtaisams bandyti. Vartotojų patogumui yra paruoštos bibliotekos su baziniais elementais, komandomis ir reikiama parametrais, tačiau susiduriama su kitų gamintojų produktų trūkumu standartinėse bibliotekose. Trūkstamų elementų „Spice“ modeliai papildomi iš konkrečius įtaisy gaminančių bendrovių elektroninių talpyklų.

„LTspice XVII“ modeliavimo aplinkoje elementai skirstomi į penkias pagrindines grupes: varžos, talpos, induktyvumo elementai, diodai ir kiti įtaisai. Naudojant įtaisy, nurodomi ir konkretūs gaminio tipai, gamintojai.

Remiantis baigiamojo darbo užduotyje nurodytais parametrais, keitiklis projektuojamas trijų grandžių: lygintuvas, nuolatinės srovės intarpas, inverteris. 3 lentelėje pateikiami projektuojamam keitikliui keliama reikalavimai ir pradiniai duomenys. Pradiniai standartinės tinklo įtamos parametrai numatyti vadovaujantis LST EN 50160:2010 ir IEC 60038 standartais.

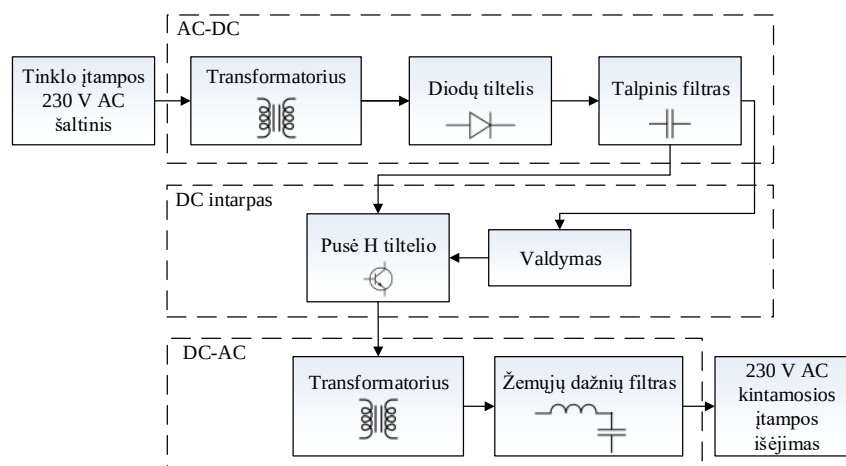
3 lentelė. Pradiniai projektuojamo keitiklio duomenys

Įėjimo parametrai	230 V AC, 50 Hz
Išėjimo parametrai	50–230 V AC, 50–200 Hz
Apkrovos galia	620 W
Didžiausia el. srovė	3 A

2.1. Pusės tiltelio topologijos keitiklis

2.1.1. Keitiklio grandinės aprašymas

Skyriuje projektuojamas pusės H tiltelio topologijos AC-AC keitiklis. Pirmajam modeliui parinkta grandinė, kurioje išėjimo signalą formuoja du multivibratoriumi valdomi MOSFET tipo tranzistoriniai raktai. Šis keitiklis sudaromas iš kelių pakopų įtampos keitimo grandžių – dvipusio nevaldomojo lygintuvo ir inverterio, įtampos žemėjimui ir augimui numatomi transformatoriai. 36 paveiksle pateikiama projektuojamo keitiklio funkcinė schema.



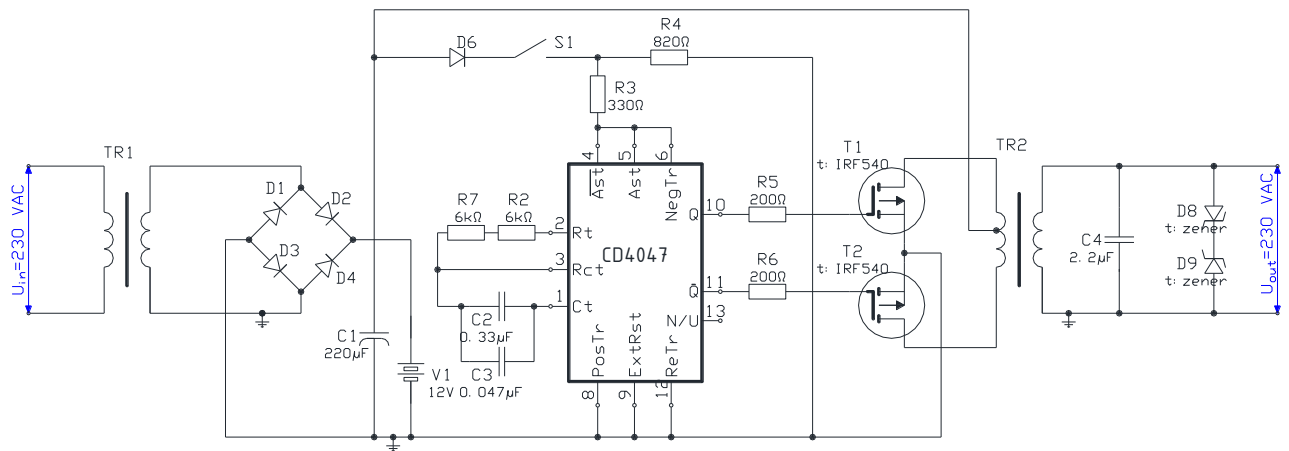
36 pav. Projektuojamo H tiltelio topologijos keitiklio funkcinė schema

Galios grandinė maitinama iš kintamosios srovės 50 Hz dažnio sinusoidinės įtampos šaltinio, prijungto prie žeminamojo transformatoriaus.

Nuolatinės srovės intarpą sudaro prie transformatoriaus žemosios pusės jungiamas nevaldomasis dvipusis diodų D1-D4 tiltelis ir talpinis filtras C1, išėjime duodantis nuolatinę 12 V įtampą. Nuolatinės srovės grandinės patikimumui užtikrinti lygiagrečiai į grandinę prijungiamas 12 V galvaninis elementas. Nuolatinės srovės intarpas naudojamas tranzistoriniams raktams valdyti, jų išėjime suformuojant 12 V kintamąją įtampą. Perjungiant raktus suformuota kintamoji įtampa prijungiama prie trijų apvijų aukštinamojo transformatoriaus. Jo išėjime gaunama 230 V kintamoji įtampa per filtrą ir stabilitroną prijungiama prie elektros energijos imtuvo. Numatomi projektuojamo

keitiklio parametrai: tinklo įtampa – 230 V, išėjimo įtampa – 230 V, nuolatinės srovės intarpas – 12 V.

AC-DC-AC keitiklio principinė elektrinė schema pateikiama 37 paveiksle.



37 pav. Projektuojamo AC-DC-AC įtampos keitiklio principinė schema

2.1.2. Keitiklio modelio sudarymas ir elementų apžvalga

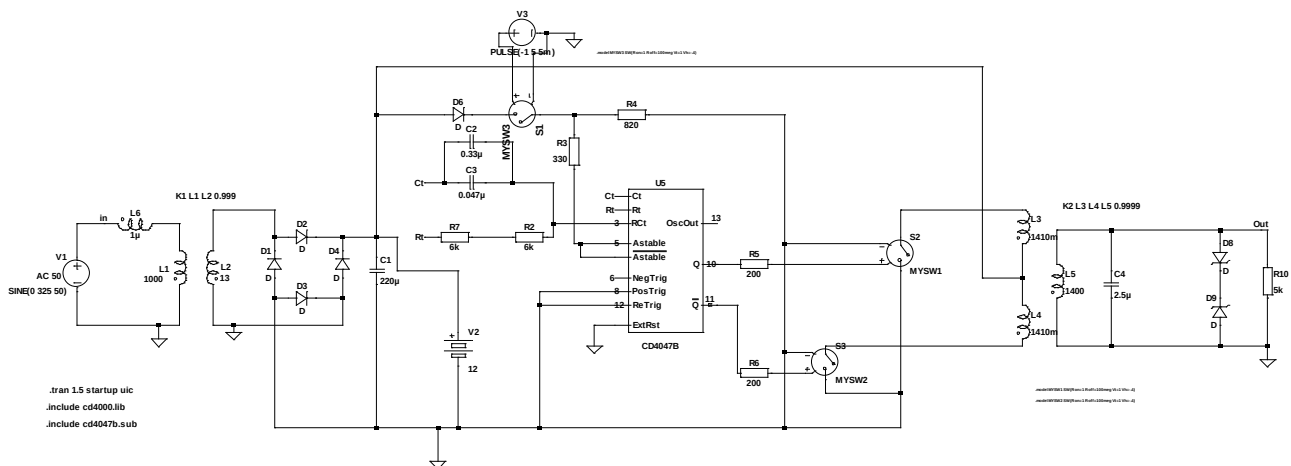
Remiantis 37 paveiksle pateikta principine elektrine schema, modeliavimo aplinkoje pasirenkami reikiami elementai, jie sujungiami elektriniais ryšiais ir nustatomi reikiami elementų parametrai. Direktyvomis taip pat nurodomas simuliacijos laikas, naudojamų raktų (kontaktų) valdymas, nuorodos į multivibratoriaus modelį saugančią biblioteką ir apibrėžiama šio įtaiso valdymo įtampa.

Modeliuojant AC-DC-AC keitiklį susiduriama su jį sudarančių elementų trūkumu standartinėje bibliotekoje. Joje nėra reikiamo multivibratoriaus grandyno CD4047 ir MOSFET tipo tranzistorinio rakto IRF540. Multivibratoriaus „Spice“ modelių ir jo veikimo pavyzdžių randama įtaiso gamintojo „Texas Instruments“ tinklalapyje.

Žeminamasis transformatorius sudaromas „Spice“ direktyva aprašius dvi induktyvumo rites transformacijos koeficientu, lygiu 0,99. Siekiant transformatoriaus išėjime gauti 12 V kintamąją įtampą ritei L1 nustatomas 1000 H induktyvumas, ritei L2 – 13 H. Aukštinamasis transformatorius sudaromas iš trijų apvijų, kurių pirminei nustatomas 1400 H, antrinei ir papildomai apvijoms – 1410 mH induktyvumas.

Jungiklių išėjimo signalai prijungiami prie trijų apvijų aukštinamojo transformatoriaus. Šio įtaiso pirminė apvija jungiama keitiklio išėjimo pusėje. Antrinės ir papildomos apvijos susijungimo vietoje prijungiama 12 V nuolatinės srovės valdymo įtampa. Keitiklio išėjime naudojamas kondensatorius, kurio talpa nustatoma $C = 2,2 \mu\text{F}$, ir du priešingai vienas kitam sujungti stabilitronai.

38 paveiksle pateikiamas projektuojamo keitiklio modelis, sudarytas „LTspice XVII“ modeliavimo aplinkoje.



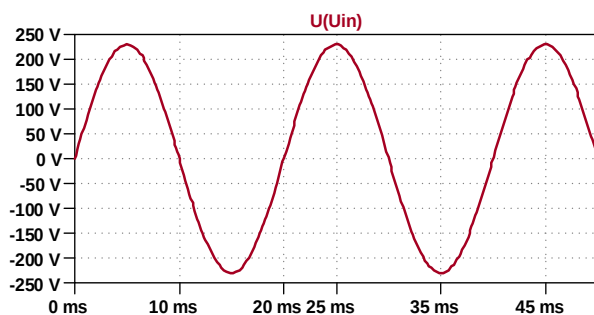
38 pav. AC-DC-AC keitiklio modelis „LTspice XVII“ aplinkoje

2.1.3. Modeliavimo rezultatai

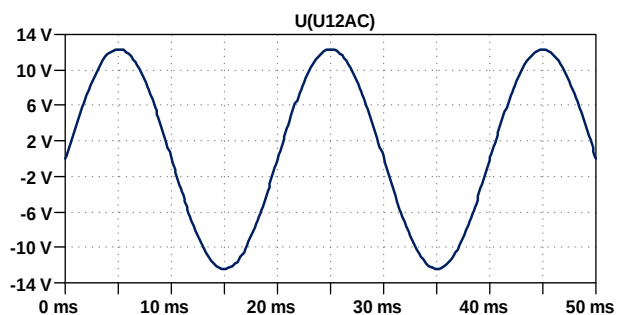
Modeliavimo programa „LTspice XVII“ surinkus projektuojamo keitiklio modelį, gali būti paleidžiama modeliavimo funkcija. Programa pirmiausia patikrina, ar projektuojamoje grandinėje nėra klaidų, ir paprašo suvesti modeliavimo parametrus. Nustatomi parametrai – modeliavimo trukmė 50 ms.

Grandinei imituoti vietoje tranzistorinių raktų naudojami įtampa valdomi jungikliai, kuriais operuoja multivibratorius, „Spice“ direktyva aprašomas jungiklio kontakto uždarymas veikiant didesnei nei 1 V įtampai. Trijų apvijų aukštinamasis transformatorius sudaromas iš trijų induktyvumo ričių. Pirmajai apvijai nustatomas 1400 H induktyvumas, antrajai ir papildomai apvijoms –1410 mH.

Modeliavimo metu matuojama įtampa pasirinktuose keturiuose taškuose: įėjime (kintamoji tinklo įtampa – 230 V AC, amplitudinė įtampa – 324 V), 39 pav., a); po pirmojo transformatoriaus (sumažėjusi kintamoji įtampa – 12 V AC, 39 pav., b); nuolatinės srovės grandinėje po diodų tilto (12 V DC, 40 pav., a) multivibratoriaus išėjime (kintamoji įtampa, 40 pav., b).

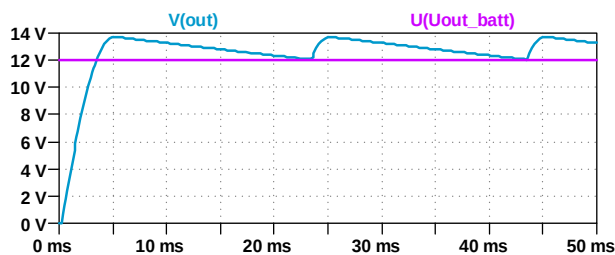


a)

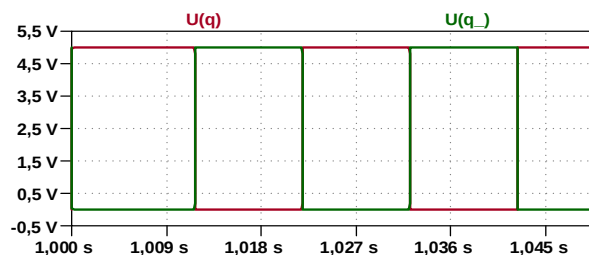


b)

39 pav. Tinklo įtampa keitiklio įėjime (a) ir sumažėjusi įtampa po transformatoriaus (b)



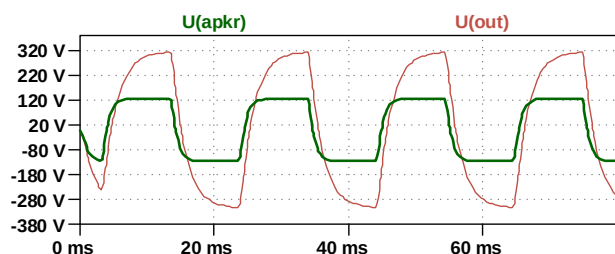
a)



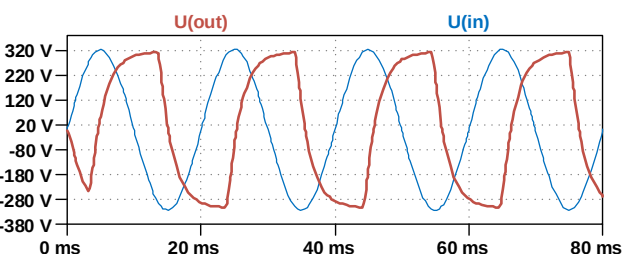
b)

40 pav. Įtampa nuolatinės srovės grandyje po talpinio filtro ir prijungus galvaninį elementą (a) ir raktų valdymo signalai multivibratoriaus Q ir $\bar{Q}$ išėjimuose (b)

Modeliuojant pasirinktą multivibratoriumi valdomą grandinę išėjime pavyko išgauti teigiamos ir neigiamos amplitudės 230 V kintamąją įtampą (amplitudinė įtampa 324 V), kurios forma panaši į tinklinės įtampos formą. 41 paveikslo b dalyje pateiktos tinklinės ir keitiklyje formuojamos įtampų kreivės.



a)



b)

41 pav. Pusės tiltelio keitiklio išėjimo įtampos kreivės veikiant 10 W ($V_{(out)}$) ir 100 W $V_{(out)}$ apkrovai (a) bei išėjimo ir standartinės tinklo įtampos kreivės (b)

Atliekant bandymus modeliavimo aplinkoje, pastebėta, kad surinktas modelis tinkamą išėjimo signalą formuoja tik veikdamas be apkrovos ar su maža, apie 10 W galios, apkrova. 41 paveikslo a dalyje pateikiamos kreivės keitikliui veikiant su $P = 10$ W ir $P = 100$ W apkrova.

Analizuojant gautus rezultatus akivaizdu, kad pusės tiltelio keitiklis neatitinka projektuojamam keitikliui keliamo reikalavimo išėjime užtikrinti bent 600 W apkrovos galią, taip pat išėjimo įtampa gali būti reguliuojama tik keičiant aukštinamąjį transformatorių. Įvertinus šias aplinkybės, tiriamas H tiltelio topologijos kintamosios srovės keitiklis.

2.2. H tiltelio topologijos keitiklis

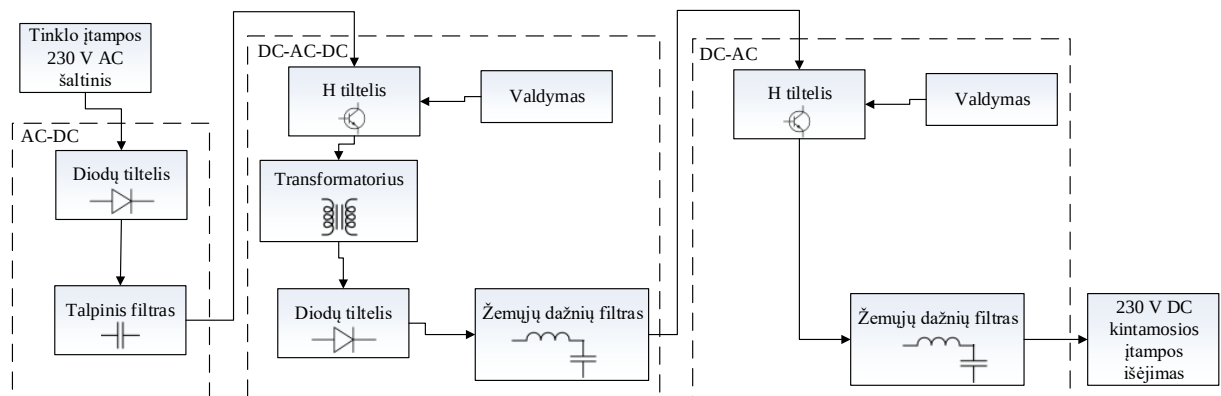
Skyriuje projektuojamas H tiltelio topologijos AC-AC keitiklis. Šio įtampos keitiklio funkcinę schemą sudaro šie pagrindiniai blokai: tranzistorinių raktų tilteliai, diodų tilteliai, filtrai, valdymo grandynai, transformatorius. H tiltelio topologijos keitiklį sudaro trys grandys.

Pirmoji keitiklio grandis AC-DC. Pirmasis blokas funkcinėje schemoje – prie tinklo įtampos šaltinio prijungtas diodų tiltelis, konvertuojantis kintamąją įtampą į pulsuojančiąją įtampą. Pulsuojančiajai įtampai išlyginti diodų tiltelio išėjime jungiamas talpinis filtras. Diodų tiltelis ir talpinis filtras sudaro projektuojamo keitiklio pirmąją grandį – lygintuvą.

Antroji keitiklio grandis DC-AC-DC. Prie lygintuvo išėjimo – talpinio filtro – jungiamas tranzistorinių raktų H tiltelis, jo komutacijai sudaroma valdymo grandinė. Tiltelyje generuojamas signalas jungiamas prie atskiriomojo transformatoriaus ir išlyginamas diodų tiltelyje. Grandies pabaigoje jungiamas žemųjų dažnių filtras, kuris pašalina trikdžius ir išlygina generuojamą signalą.

Trečioji keitiklio grandis DC-AC. Paskutinę keitiklio grandį sudaro valdymo grandine valdomas tranzistorinių raktų tiltelis, prijungtas prie antrosios grandies išėjimo. Tiltelyje generuojamas signalas perduodamas į žemųjų dažnių filtrą trikdžiams pašalinti. Prie žemųjų dažnių filtro išėjimo jungiami kintamosios srovės elektros energijos imtuvai.

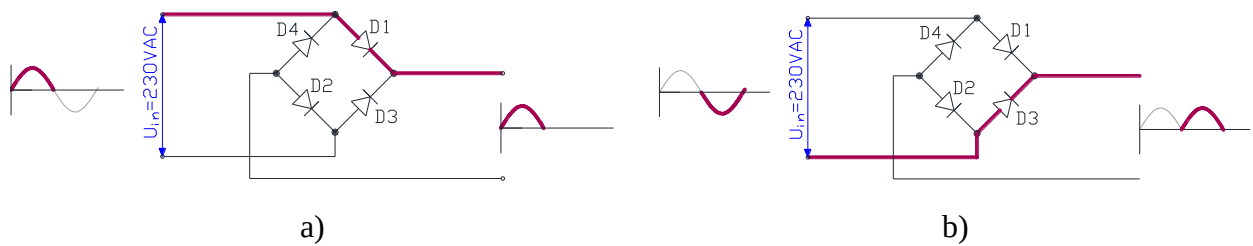
42 paveiksle pateikiama projektuojamo keitiklio funkcinė schema.



42 pav. Projektuojamo H tiltelio topologijos keitiklio funkcinė schema

2.2.1. Pirmoji grandis: lygintuvas

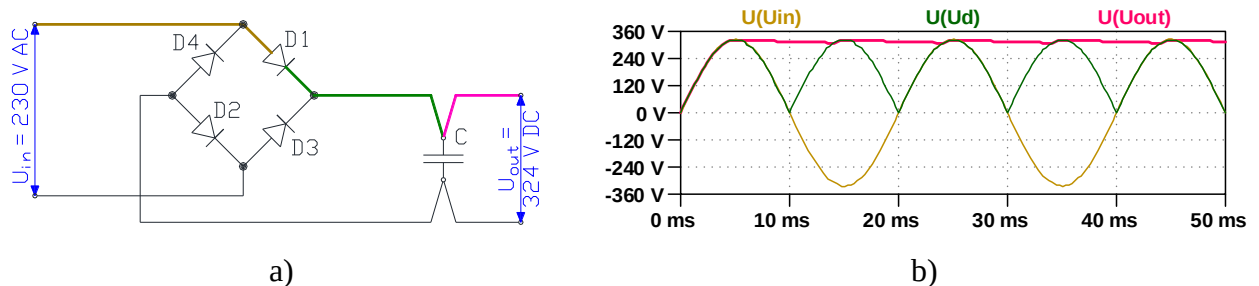
Projektuojamame kintamosios srovės keitiklyje tinklo įtampai išlyginti naudojamas įtampos lygintuvas. Pagrindinis reikalavimas šiam įtaisui yra grandinės paprastumas, prieinamumas ir patikimumas. Įtampos lyginimo funkcijai atlikti parenkamas dvipusis nevaldomasis lygintuvas, kurio bendroji principinė schema pateikta 4 pav. Atsižvelgiant į keitikliui keliamus reikalavimus parenkamas serijiniu būdu gaminamas vieno korpuso diodų tiltelis „Solid State KBPC3510“, kurio pagrindiniai parametrai, gamintojo duomenimis: vardinė išėjimo srovė (korpuso temperatūra 55 °C) $I_{\max DC} = 35 \text{ A}$, didžiausia veikiančios įtampos amplitudė $U_{\max} = 1000 \text{ V}$, įtampos kritimas viename diode $U_{\text{krit}} = < 1,1 \text{ V}$. Gamintojo nurodymu, diodų tiltelis temperatūriniam režimui užtikrinti turi būti montuojamas grandinėje kartu su aušintuvu (SolidState 2016).



43 pav. Kintamosios įtampos sinusoidės pirmojo (a) pusperiodžio ir antrojo (b) pusperiodžio veikimas diodų tiltelyje

43 paveiksle pateiktos dvipusio nevaldomojo lygintuvo aiškinamosios schemos. Iš pirmosios schemos (a) matoma, kad, veikiant pirmajam kintamosios įtampos sinusoidės pusperiodžiui, elektros srovė perleidžiama per D1 diodą. Tinklo įtampoje veikiant antrajam, neigiamam, sinusoidės pusperiodžiui, elektros srovė diodų tiltelyje prateka per D3 diodą, tiltelio išėjime atkartodama pirmąjį pusperiodį (b). Galiausiai dvipusio nevaldomojo lygintuvo diodų tiltelis išėjime duoda pulsuojančią teigiamą įtampą.

Tolesniam naudojimui keitiklyje reikalinga išlyginta nuolatinės srovės įtampa. Pulsuojančiajai įtampai išlyginti lygintuvo išėjime prijungiamas talpinis filtras – kondensatorius. Jis įkraunamas kiekvieno periodo teigiamos augančios sinusoidinės įtampos, sinusinei įtampai pradėdant mažėti kondensatoriuje sukaupia elektros srovę perduodama į apkrovą. Filtro įkrovimo metu pastebimas staigus elektros srovės šuolis kondensatoriuje. Šuolis gali būti glotninamas talpinį filtrą papildant induktyvumo rite. 44 paveiksle pateikta aiškinamoji dvipusio nevaldomojo lygintuvo su talpiniu filtru principinė elektrinė schema ir jame veikiančių įtampų ir srovių grafikas.



44 pav. Aiškinamoji lygintuvo su talpiniu filtru principinė elektrinė schema (a) ir jame veikiančių įtampų (įėjimo U_{in} , išėjimo U_{out}) ir srovės kondensatoriuje (I_C) grafikas (b)

Pagal projektuojamo keitiklio parametrus talpinio filtro funkcijai atlikti parenkamas didelės talpos serijiniu būdu gaminamas kondensatorius „ECAP (K50-35)“, kurio pagrindiniai parametrai: talpa $C = 1000 \mu\text{F}$, vardinė įtampa $U_{nom} = 400 \text{ V}$. Taikant 1.1 skyriuje aprašytus skaičiavimo metodus, atliekama lygintuvo išėjimo įtampos analizė.

Remiantis pradiniais duomenimis, didžiausia išėjimo vertė $U_{omax} = \sqrt{2} \cdot 230 \approx 324 \text{ V}$. Naudojantis 3formule išreiškiamas ωRC :

$$\omega RC = (2 \cdot \pi \cdot 50) \cdot 75 \cdot 0,003 = 70,65.$$

Naudojant 4 formulę nustatomas kampas θ :

$$U_{0\max} \sin \theta = 324 \text{ V.}$$

Pagal 3 formulę išreiškiamas kampas α :

$$(\sin 1,56)e^{-(\pi+\alpha-1,56)/70,65} - \sin \alpha = 0;$$

$$\alpha = 1,28 \text{ rad.} = 73^\circ.$$

Irašius reikšmes į 1 formulę gaunama įtampos pulsacijų amplitudė:

$$U_{0pa} = 324(1 - \sin 1,28) = 13 \text{ V.}$$

Atlikus pirminius skaičiavimus, pastebėta, kad į lygintuvo grandinę įjungus vieną 1000 μF vardinės talpos kondensatorių, lygintuvo išėjimo įtampos pulsacijų amplitudė siekia 35 V. Atsižvelgiant į nepriimtina didelę pulsaciją, efektyvesniam lyginimui į keitiklio grandinę lygiagrečiai jungiami trys vienodų charakteristikų kondensatoriai.

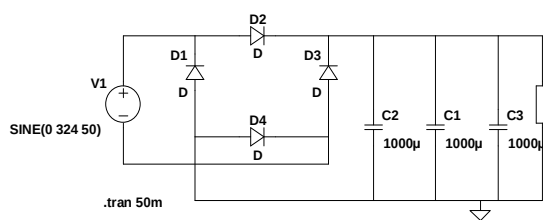
Pirmosios grandies modelis

Pirmajai projektuojamo keitiklio grandžiai (įtampai išlyginti) modeliuojamas AC-DC lygintuvas. Šiame skyriuje apžvelgiamas nevaldomojo dvipusio lygintuvo modelio kūrimas. Kaip bazinis modelis pasirenkamas ir modeliuojamas diodų tiltelio grandynas su talpiniu filtru, kurio principinė elektrinė schema pateikta 5 paveiksle.

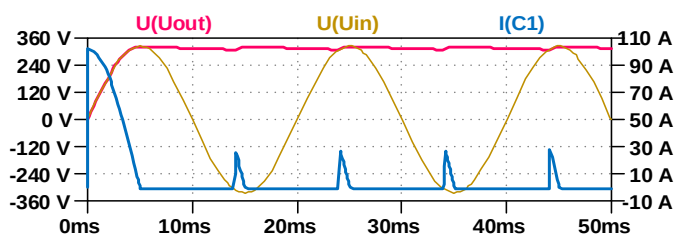
Modeliuojamas nevaldomasis lygintuvas, sudarytas tik iš galios grandinės, kurios pagrindą sudaro keturi diodai, sujungti į tiltelį. Jų išėjime prijungiamas kondensatorius įtampos pulsacijoms mažinti. Kondensatoriaus talpa nustatoma 1000 μF .

Siekiant sumažinti srovės šuolį kondensatoriuje, lygiagrečiai į lygintuvo grandinę gali būti jungiamas NTC tipo termistorius. Įjungus lygintuvą į tinklą, kurį laiką, kol įšils, termistorius turės didelę varžą krovimo srovės atžvilgiu, todėl jame bus užgesintas didelis srovės šuolis, matomas prijungus lygintuvą prie tinklo. Kai termistorius įšyla iki darbinės temperatūros, jo varža itin sumažėja ir įtampos bei srovės kritimo jame nebelieka. Šių įtaisų pagrindinis trūkumas toks, kad, išjungus keitiklį iš elektros tinklo, tiristorius kurį laiką dar vėsta. Pakartotinai prijungus keitiklį prie elektros tinklo, nespėjus atvėsti termistoriui srovės gesinimas nebeįvyksta.

45 paveiksle pateikta modeliuojamo keitiklio grandinė (a) ir signalų kreivės (b).



a)



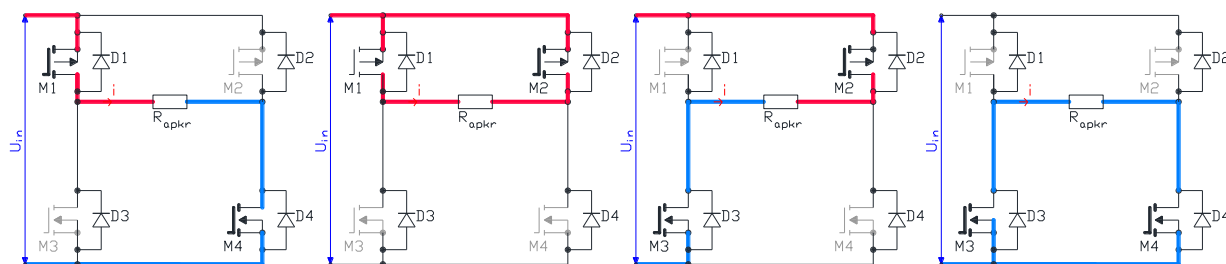
b)

45 pav. Dvипusio nevaldomоjo lygintuvo modelis (a) ir jame veikiančių įtampų (įėjimo U_{in} , išėjimo U_{out}) ir srovės kondensatoriuje (I_C) grafikas (b)

2.2.2. Antroji grandis: nuolatinės srovės keitiklis

Antrosios grandies keitiklyje įtampas amplitudei keisti naudojamas kintamosios srovės intarpas. Nuolatinės srovės keitiklio grandinę galima padalyti į dvi dalis – galios ir valdymo grandines. Galios grandinės pagrindiniai elementai: tranzistoriniai raktai, transformatorius, diodų tiltelis, žemųjų dažnių filtras. Valdymo grandinė sudaroma iš analoginių ir loginių elementų.

Kintamajai srovei generuoti projektuojamas H tiltelis, sudarytas iš keturių tranzistorinių raktų. Atsižvelgiant į projektuojamoje grandinėje komutuojamą 230 V įtampą, greitaveiką ir sąnaudas naudojami MOSFET tipo tranzistoriniai raktai. Du N kanalo raktai jungiami apatinėje tiltelio pusėje, santaką prijungiant prie žemės. Patikimam valdymo signalui užtikrinti sudarant įtampų skirtumą tarp veikiančios įtampos ir valdymo signalo viršutinėje tiltelio dalyje jungiami du P kanalo įtaisai, valdomi neigiamos amplitudės valdymo signalo. 46 paveiksle pateikta H tiltelio topologijos keitiklyje veikiančių srovių ir raktų komutavimo eiliškumo aiškinamoji schema.



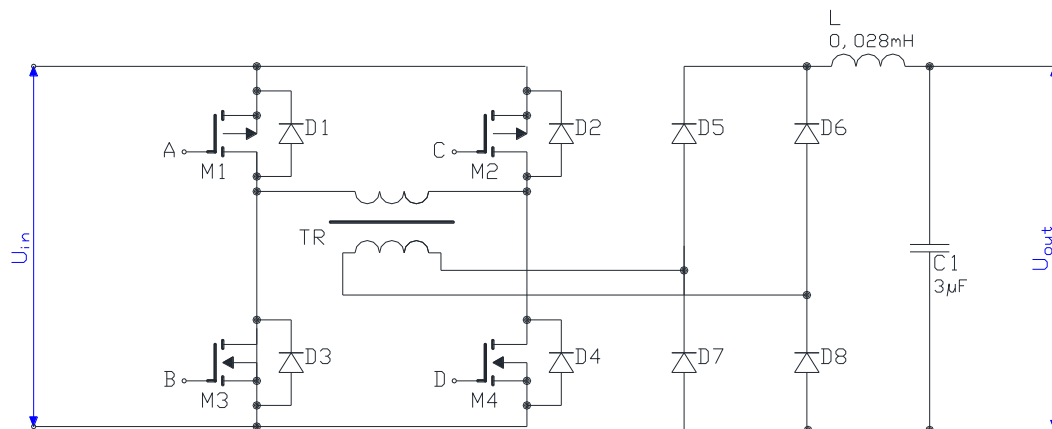
46 pav. Aiškinamoji H tiltelio topologijos inverterio principinė elektrinė schema

Atsižvelgiant į apžvelgtus reikalavimus, keitiklio raktų funkcijai atlikti parenkami serijiniu būdu gaminami:

- P kanalo MOSFET tipo tranzistorius, gaminamas „IXYS“, modelis „IXTP10P50P“, kurio pagrindiniai parametrai, gamintojo duomenimis: didžiausia įtampa tarp santakos ir ištakos $U_{ds\max} = 500\text{ V}$, kanalo varža esant atidarytam raktui $R_{dn(on)} \leq 1\ \Omega$, didžiausia srovė tarp santakos ir ištakos $I_d = 10\text{ A}$, didžiausia valdymo įtampa $U_{gs\max} = 30\text{ V}$.

- N kanalo MOSFET tipo tranzistorius, gaminamas „IXYS“, modelis „IXFH30N40Q“, kurio pagrindiniai parametrai, gamintojo duomenimis: didžiausia įtampa tarp santakos ir ištakos $U_{ds\ max} = 400\ V$, kanalo varža esant atidarytam raktui $R_{dn(on)} = 0,16\ \Omega$, didžiausia srovė tarp santakos ir ištakos $I_d = 5,5\ A$, didžiausia valdymo įtampa $U_{gs\ max} = 20\ V$.

Galios grandinės principinė elektrinė schema pateikta 47 paveiksle.



47 pav. Nuolatinės srovės keitiklio galios grandinės principinė elektrinė schema

4 lentelė. Pradiniai projektuojamo transformatoriaus duomenys

Įtampa pirminėje apvijoje U_1 , V	230
Išėjimo įtampa U_2 , V	230
Elektros srovė transformatoriaus išėjime (apkrovos) I_{apkr} , A	3
Dažnis f , Hz	$10 \cdot 10^4$
Transformatoriaus perkaitimo ribinė vertė ΔT , °C:	50

H tiltelio išėjime prijungiama atskiriamojo transformatoriaus pirminė apvija. 4 lentelėje pateikiami pradiniai transformatoriaus duomenys. Dviejų apvių transformatorius projektuojamo keitiklio grandinėje atskiria komutuojamas įtampas ir gali apsaugoti grandinės elementus galimo trumpojo jungimo metu. Transformatoriui parinkti turi būti apskaičiuojami įtaiso parametrai analitinėje dalyje pateikta seka.

1. Pirmiausia pagal 22 formulę nustatomas nuolatinės srovės keitiklyje komutuojamos įtampos dažnis:

$$P_{apkr} = (230 + 1 \cdot 0) \cdot 3 = 690\ W;$$

čia: k_1 – koeficientas, projektuojamai lygintuvo grandinei $k_1 = 1$ (Melešin 2005); U_{kr} – įtampos kritimas viename lygintuvo diode nevertinamas, nes diodų tiltelis jungiamas ne prieš transformatorių, V.

2. Pagal 23 formulę nustatoma transformatoriaus galia:

$$P_T = 690 \left(\frac{1}{0,98} + \sqrt{2} \right) = 1676,70 \text{ VA.}$$

3. Šerdžiai parinkti pagal 24 formulę nustatoma šerdies ir kiaurymės plotų sandauga:

$$S_{\text{š}} S_{\text{k}} = \left(\frac{1676,70 \cdot 10^4}{4 \cdot 1 \cdot 0,3 \cdot 10 \cdot 10^4 \cdot 590 \cdot 0,4} \right)^{\frac{1}{1-0,12}} = 0,54 \text{ cm}^4;$$

čia: k_f – įėjimo įtampos signalo koeficientas, $k_f = 1$ esant stačiakampių impulsų formos signalui; B_m – didžiausia šerdies medžiagos indukcija, $B_m = 0,3 \text{ T}$ nustatoma iš žinyno; k_j – srovės apvijoje tankio koeficientas; nustatomas iš žinyno esant $\Delta T = 50$; k_i – šerdies kiaurymės naudojimo koeficientas, žinyne nurodytas dydis $k_i = 0,4$; y – lygio rodiklis, kurio teorinis dydis $y = -0,12$. Žinyno duomenys (Melešin 2005).

4. Naudojant gamintojų duomenis parenkama standartiniu būdu gaminama šerdis „III 8×8“, kurios pagrindiniai parametrai: šerdies ir kiaurymės plotų sandauga $S_{\text{š}} S_{\text{k}} = 1,024 \text{ cm}^4$ šerdies plotas $S_{\text{š}} = 0,64 \text{ cm}^2$, kiaurymės plotas $S_{\text{k}} = 1,60 \text{ cm}^2$, vidutinis apvijos ilgis $l_{\text{vid}} = 6,80 \text{ cm}$. Išlaikoma būtinoji sąlyga $(S_{\text{š}} S_{\text{k}})_{\text{par}} > (S_{\text{š}} S_{\text{k}})_{\text{teor}}$.

5. Pagal 25 formulę apskaičiuojamas transformatoriaus pirminės apvijos vijų skaičius W_1 :

$$W_1 = \frac{230 \cdot 10^4}{4 \cdot 1 \cdot 0,3 \cdot 10 \cdot 10^4 \cdot 0,64} = 29 \text{ apvijos.}$$

6. Pagal 26 formulę apskaičiuojama elektros srovė pirminėje apvijoje W_1 :

$$I_1 = \frac{1676,70}{230 \cdot 10 \cdot 10^4 \cdot 0,64} = 3 \text{ A.}$$

7. Naudojant 27 formulę gaunamas elektros srovės tankis apvijoje:

$$j = 590 \cdot (1,024)^{-0,12} = 256,80 \text{ A/cm}^2.$$

8. Pagal 28 formulę apskaičiuojamas pirminės apvijos laidininko skerspjūvis:

$$S_{\text{pirm}} = \frac{1 \cdot 3}{256,80} = 0,0117 \text{ cm}^2 \rightarrow 1,17 \text{ mm}^2.$$

9. Parenkamas standartiniu būdu gaminamas varinis laidininkas „K-VL14“, kurio pagrindiniai parametrai, gamintojo duomenimis: laidininko skersmuo $d_1 = 1,4 \text{ mm}$, laidininko skerspjūvio plotas $S_{1\text{s}} = 1,54 \text{ mm}^2$, laidininko skerspjūvio plotas su izoliacija $S_{1\text{.iz}} = 1,79 \text{ mm}^2$, laidininko savitoji varža $\rho_{11} = 0,0113 \text{ } \Omega/\text{m} \rightarrow 113 \text{ } \mu\Omega/\text{cm}$.

10. Pagal 29 formulę apskaičiuojama pirminės apvijos varža R_1 :

$$R_1 = 6,8 \cdot 29 \cdot 113 \cdot 10^{-6} = 0,022 \text{ } \Omega.$$

11. Naudojant 30 formulę nustatomi nuostoliai pirminės apvijos variniame laidininke:

$$\Delta P_{M1} = 1 \cdot (1 \cdot 3)^2 \cdot 0,022 = 0,7 \text{ W.}$$

12. Pagal 31 formulę apskaičiuojamas transformatoriaus antrosios apvijos vijų skaičius W_2 :

$$W_2 = \frac{29 \cdot 230}{230} = 230 \text{ V.}$$

Pastaba: kadangi prieš projektuojamą transformatorių nuolatinės srovės keitiklio intarpe nejungiamas diodų tiltelis, įtampos kritimas diode nevertinamas.

Kadangi transformatoriaus pirminėje ir antrinėje apvijos veikia vienoda įtampa, analogiškai pirminei apvijai:

13. Apskaičiuojamas antrinės apvijos laidininko skerspjūvis ir parenkamas laidininkas, jame veikianti varža R_2 , nuostoliai antrinės apvijos variniame laidininke ΔP_{M2} tokie patys kaip ir pirminės apvijos.

14. Pagal 32 formulę apskaičiuojami bendrieji nuostoliai variniuose laidininkuose:

$$\Delta P_M = 0,7 + 0,7 = 1,4 \text{ W.}$$

15. Nustatomi savitieji nuostoliai šerdyje, naudojant pasirinktos medžiagos parametrus (33 formulė):

$$P_{sav} = 1,64 \cdot 10^{-3} \cdot (10 \cdot 10^4)^{1,31} \cdot 0,3^{2,49} = 14,22 \text{ W/kg.}$$

16. Naudojant 34 formulę nustatomi suminiai nuostoliai šerdyje:

$$\Delta P_\xi = 14,22 \cdot 0,036 = 0,511 \text{ W.}$$

17. Pagal 35 formulę apskaičiuojami bendrieji nuostoliai transformatoriuje:

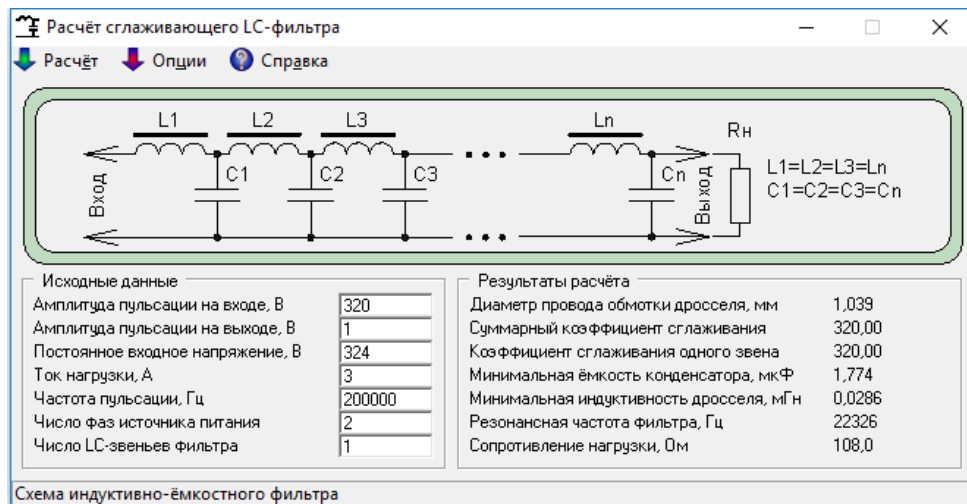
$$\Delta P_\Sigma = 0,511 + 1,4 = 1,9 \text{ W.}$$

Antrinė transformatoriaus apvija modifikuotai kintamajai įtampai lyginti jungiama prie dvipusio nevaldomojo tiltelinio lygintuvo. Pagal įtaisui keliamus reikalavimus ir įtampos bei srovės vertes parenkamas serijiniu būdu gaminamas vieno korpuso diodų tiltelis „Solid State KBPC3510“.

Projektuojamo keitiklio antrosios grandies galios grandinės išėjime trikdžiams šalinti ir įtampai stabilizuoti numatomas žemųjų dažnių LC filtras.

Žemųjų dažnių LC filtro parametrus apskaičiuoti parenkama laisvai platinama J. Moskatovo programa „LC filter 5.0.0.0.“. Ji skirta pasyviųjų LC filtrų elementų parametrus, droselio skerspjūvio plotui ir filtravimo koeficientui apskaičiuoti. „LC filter 5.0.0.0.“ programinis langas pavaizduotas 48 paveiksle (Moskatov 2013).

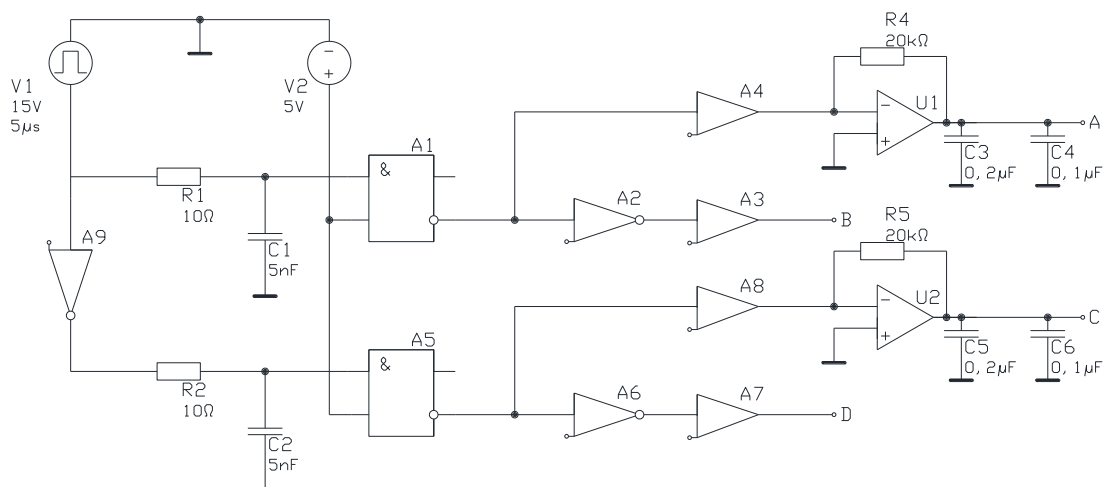
Pradiniai duomenys filtro elementų parametrus skaičiuoti: įėjimo įtampos pulsacijų amplitudė, išėjimo įtampos pulsacijų amplitudė, įėjimo įtampos vertė, apkrovos elektros srovė, įėjimo įtampos pulsacijų dažnis, fazių skaičius (tilteliniams lygintuvams fazių skaičius – 2), LC grandžių skaičius.



48 pav. „LC filter 5.0.0.0.“ programinis langas

Apdorojus duomenis programinėje įrangoje gaunami projektuojamo keitiklio LC filtro sudedamųjų elementų parametrai: mažiausia kondensatoriaus talpa $C = 1,7 \mu\text{F}$, mažiausias ritės induktyvumas $L = 0,028 \text{ mH} \rightarrow 20,8 \mu\text{H}$. Atsižvelgiant į skaičiavimus parenkami serijiniu būdu gaminami kondensatoriai „E*10/350“, kurio pagrindiniai parametrai: talpa $C = 10 \mu\text{F}$, vardinė įtampa $U_{\text{nom}} = 350 \text{ V}$, ir toroidinis droselis „TC-500M-10A-131“, kurio parametrai: induktyvumas $L = 50 \mu\text{H}$, vardinė srovė $I_{\text{nom}} = 10 \text{ A}$.

H tiltelio tranzistorinių raktų komutacijai sudaroma valdymo grandinė, kuri pavaizduota 49 paveiksle. Šiai grandinei keliamas reikalavimas vienu metu sujunti įstrižai esančius raktus (uždaryti kontaktus ir praleisti santakos-ištakos srovę), tuo pat metu užtikrinant, kad kiti du raktai yra atjungti. Viršutinėje tiltelio dalyje jungiami P kanalo raktai, valdomi neigiamos įtampos amplitudės, apatinėje tiltelio dalyje – N kanalo raktai, valdomi teigiamos įtampos amplitude. Raktai valdomi keturiais signalais A, B, C ir D, iš kurių A ir C skirti P kanalo raktams.



49 pav. Nuolatinės srovės keitiklio valdymo grandinės principinė elektrinė schema

Raktų valdymui numatoma 15 V 5 μ s trukmės stačiakampių impulsų įtampa. Valdymo įtampos šaltinyje formuojamas impulsas leidžiamas per darbo ciklą formuojančius valdantįjį rezistorių ir valdantįjį kondensatorių. Formuojant įėjimo įtampai lygų išėjimo signalą rezistoriui nustatoma 10 Ω varža, o kondensatoriui – 5 nF talpa. Valdančiųjų elementų signalas perduodamas į loginį elementą IR, į kurį taip pat prijungiamas nuolatinės srovės 5 V įtampos signalas. Apdorojamas du signalus loginis IR duoda valdymo signalą, o šis išskirstomas A ir B raktams valdyti. Abu signalai apdorojami buferiniame stiprintuve, o N kanalo rakto signalas B papildomai invertuojamas buferyje.

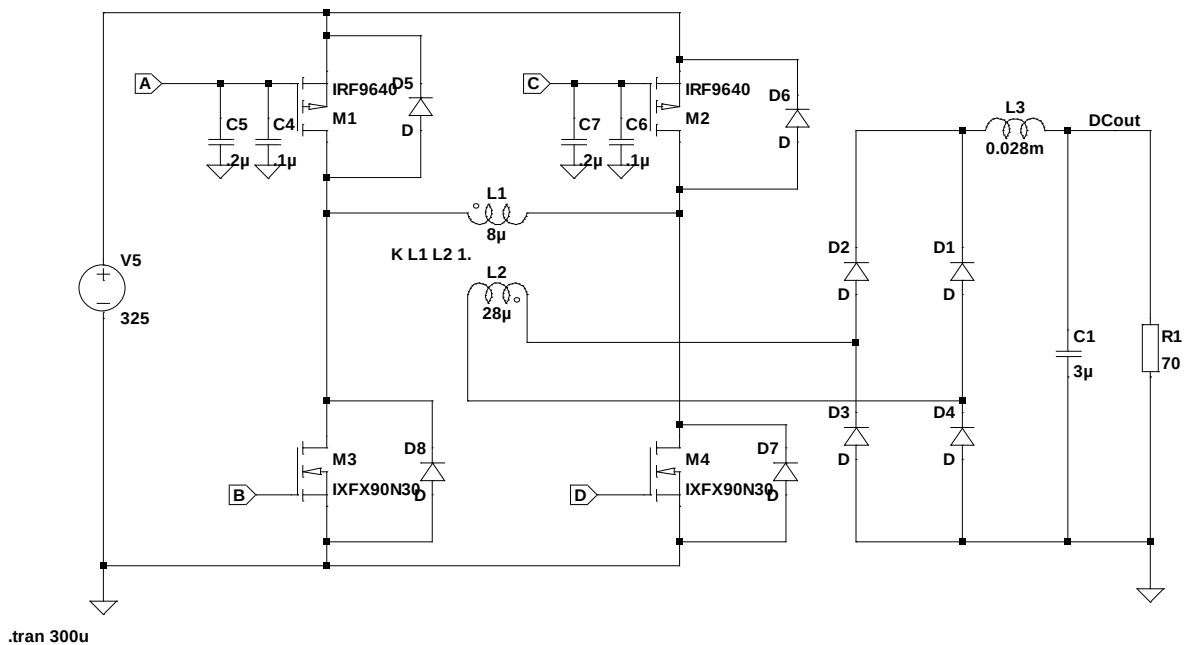
Likusių dviejų raktų signalo formavimo grandinė prijungiama prie impulsų šaltinio per invertuojamąjį buferį, siekiant išvengti tarpusavyje nesuderinamų padėties fazių skirtingo tipo raktuose. Po invertuojamojo buferio analogiškai pirmųjų raktų valdymo grandinei jungiami žemųjų dažnių filtras ir loginiai elementai. Visų valdymo signalų išėjimuose prijungiami glotninantys buferiai ir patikrinamas A ir D bei B ir C signalų sinchroniškumas.

Kadangi P kanalo raktai valdomi neigiamos įtampos amplitude, signalai A ir C apdorojami grįžtamojo ryšio operaciniuose stiprintuvuose.

Antrosios grandies modelis

Antrajai keitiklio grandžiai modeliuojamas sudėtingos topologijos valdomasis DC-AC-DC keitiklis. H tiltelyje sujungti valdomieji raktai generuoja kintamąją įtampą. H tiltelio išėjimas prijungiamas prie transformatoriaus, modeliavimo aplinkoje sudaryto iš dviejų induktyvumo ričių, tarpusavyje susietų „Spice“ direktyva ir nustatytu transformavimo koeficientu 1,0. Ritėje L1, prijungiamoje H tiltelio pusėje, nustatomas 8 μ H induktyvumas, ritėje L2 – 28 μ H.

Antrinė transformatoriaus apvija – induktyvumo ritė L2 – jungiama prie nevaldomojo dvipusio lygintuvo, kuriame modifikuota aukštadažnė kintamoji įtampa išlyginama. Diodų tiltelis prijungiamas prie apkrovos per žemųjų dažnių LC filtrą, mažinantį išėjimo pulsacijas. Droseliui L3, sudarančiam LC filtrą, nustatomas 50 μ H induktyvumas, kondensatoriui – 10 μ F. Modeliavimo aplinkoje raktų funkcijai atlikti parenkami standartinėje bibliotekoje esantys artimiausių charakteristikų tranzistoriniai raktai: P kanalo – „IRF9640“, N kanalo – „IXFX90N30“. Parinkto N kanalo įtaiso pagrindinės charakteristikos atitinka projektuojamo keitiklio duomenis, o P kanalo rakto charakteristikos netenkina sąlygų, todėl tranzistoriaus modelio parametrai programiniame aprašyme keičiami į šiuos: $U_{ds\ max} = 500\ V$, $R_{dn(on)} \leq 1\ \Omega$, mas $I_d = 10\ A$. 50 paveiksle pateikta modeliuojamo keitiklio galios grandinė.

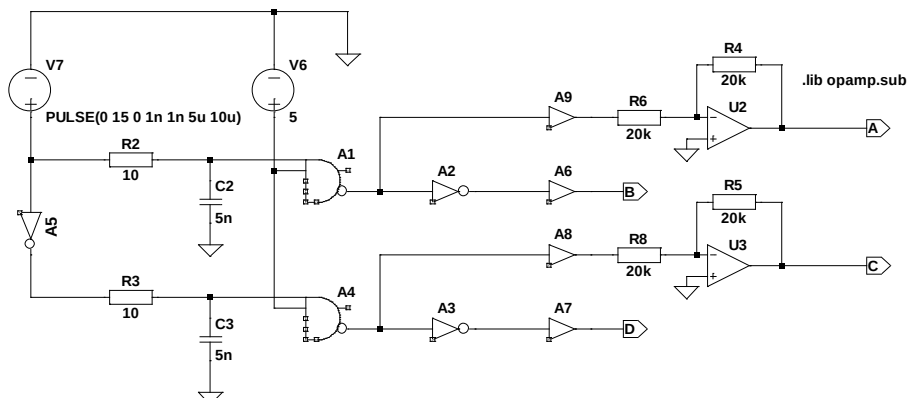


50 pav. DC-AC-DC keitiklio galios grandinės modelis „LTspice XVII“ aplinkoje

Raktams valdyti modeliavimo aplinkoje sudaroma valdymo grandinė. Raktai atidaromi įstrižai išsidėsčiusiomis poromis, P kanalo raktais operuoja neigiamos amplitudės įtampa, N kanalo – teigiamos.

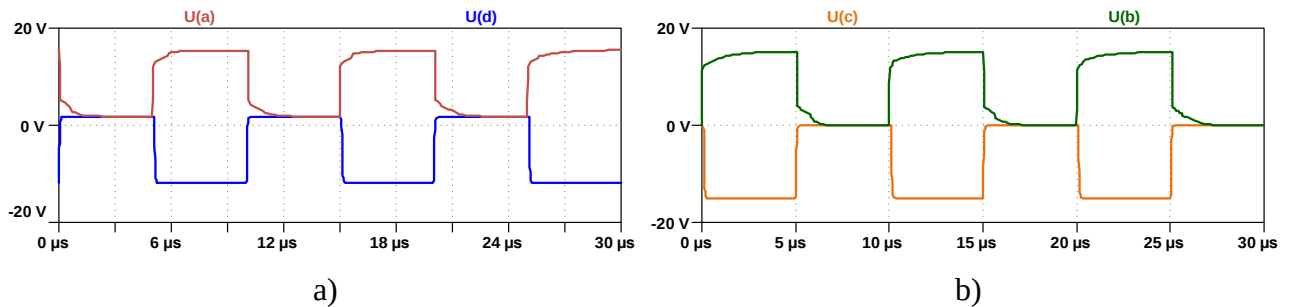
Valdymo signalams generuoti jungiamas 15 V 5 μs ilgio stačiakampio formos impulsus išduodantis įtampos šaltinis. Bėgant nustatytam laikui (kas 5 μs) dviejų įstrižai esančių raktų kontaktai atidaromi, o likusių uždaromi, šis procesas nenutrūkstamai vyksta visą modeliavimo laiką. Raktų atidarymo procesui vykdyti formuojami keturi kiekvieno rakto valdymo signalai A, B, C ir D. Signalai, skirti P kanalo raktams, grįžtamojo ryšio operaciniu stiprintuvu yra invertuojami.

Modeliavimo aplinkoje sudaryta valdymo grandinė pateikiama 51 paveiksle.

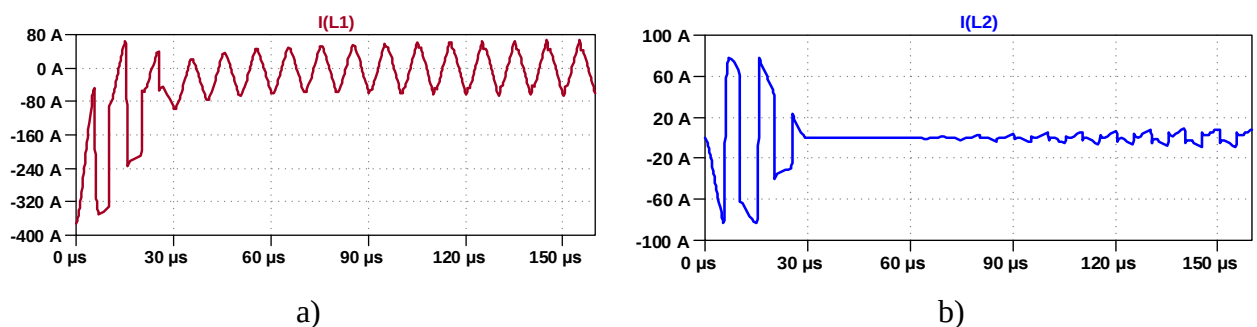


51 pav. DC-AC-DC keitiklio valdymo modelis „LTspice XVII“ aplinkoje

Surinkus projektuojamo keitiklio modelį „LTspice XVII“ aplinkoje, gali būti paleidžiama modeliavimo funkcija. Programa pirmiausia patikrina, ar projektuojamoje grandinėje nėra klaidų, ir paprašo suvesti modeliavimo parametrus. Nustatomi parametrai – modeliavimo trukmė 300 μ s.

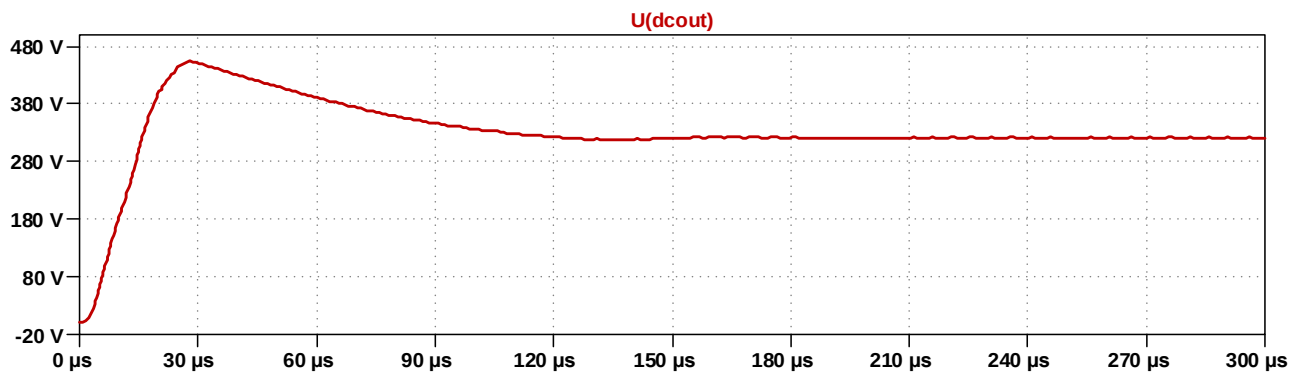


52 pav. Tinklo įtampa tranzistorių valdymo grandinėje: A ir B valdymo signalai (a) bei C ir D valdymo signalai (b)



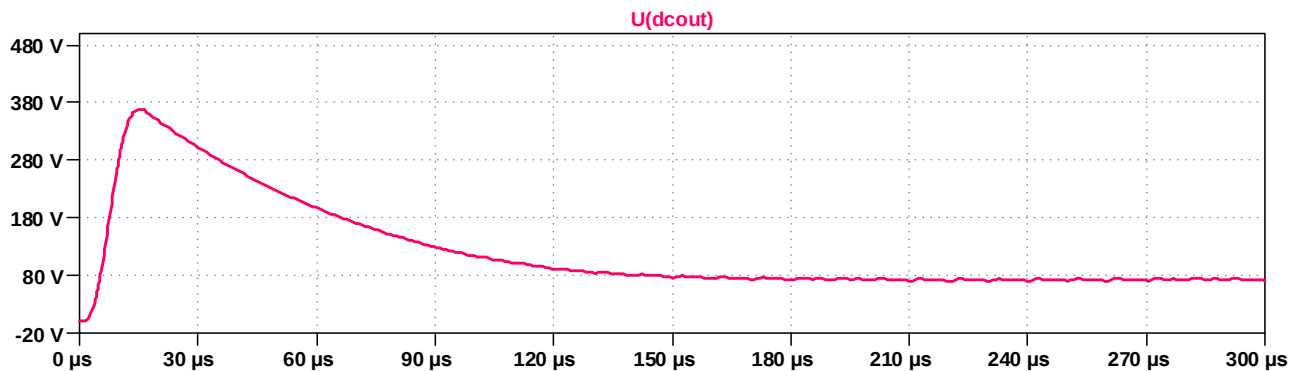
53 pav. Įtampa pirminėje (a) ir antrinėje (b) transformatoriaus apvijos

Modeliavimo metu matuojamos įtamos ir srovės vertės kontroliniuose valdymo ir galios grandinės taškuose. Valdymo grandinės raktų atidarymo A ir B signalų kreivės pateikiamos 52 pav. a dalyje, C ir D signalų kreivės – 52 pav. b dalyje. Galios grandinėje matavimai atliekami pirminėje ir antrinėje transformatoriaus apvijos bei keitiklio išėjime. Pirminės transformatoriaus apvijos srovės kreivė pateikiama 53 pav. a dalyje, antrinės antrosios apvijos – 53 pav. b dalyje. Keitiklio išėjimo įtamos kreivė po lygintuvo ir talpinio filtro pateikiama 54 paveiksle.



54 pav. Įtampa projektuojamo keitiklio išėjime

Projektuojamo keitiklio nuolatinės srovės intarpe reguliuojant darbo ciklą galima keisti išlygintą DC-DC keitiklio įtampą. Valdymo grandinėje keičiant valdančiojo rezistoriaus ir valdančiojo kondensatoriaus reikšmes kinta tranzistorinių raktų valdymo trukmė, o tai veikia ir komutuojamą įtampą. 55 paveiksle pateikiama keitiklio išėjimo įtampos kreivė valdymo grandinėje nustačius valdančiajam rezistoriui $R = 29 \Omega$, kondensatoriui – $C = 0,1 \mu\text{F}$.



55 pav. Įtampa keitiklio išėjime pakoregavus darbo ciklą

2.2.3. Trečioji grandis: inverteris

Kaip ir vidurinės grandies keitiklis, DC-AC keitiklis sudarytas iš galios ir valdymo grandinių. Trečiojoje keitiklio grandyje projektuojamas inverteris, valdomas trijų lygių impulso pločio moduliacija, išėjime gebantis išduoti standartinio tinklo parametrų 230 V sinusoidinę įtampą.

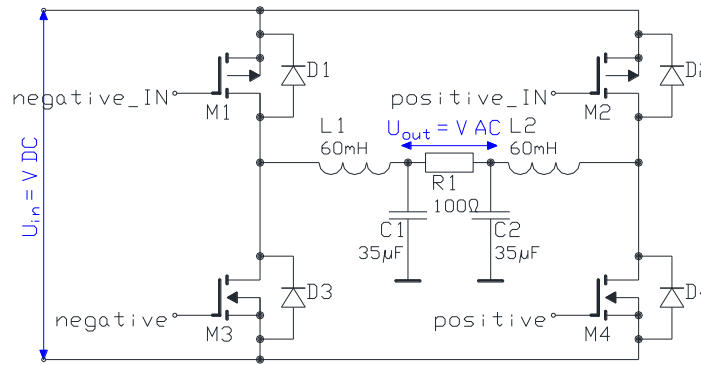
Kaip ir DC-AC-DC keitiklio atveju, galios grandinės pagrindą sudaro keturi MOSFET tipo tranzistoriai: du P kanalo ir du N kanalo raktai. Inverterio H tiltelyje generuojamas signalas per du žemųjų dažnių LC filtrus kiekvienoje tiltelio pusėje prijungiamas prie galutinės projektuojamo AC-AC keitiklio apkrovos. Keitiklio trečiosios grandies tiltelyje naudojami analogiški antrajai grandžiai raktai „IXTP10P50P“ ir „IXFH30N40Q“.

Tiltelio išėjime jungiamas žemųjų dažnių LC filtras, jo parametrai nustatyti „LC filter 5.0.0.0.“ programa ir vienai grandžiai yra lygūs: mažiausia kondensatoriaus talpa $C = 100 \mu\text{F}$, mažiausias ritės induktyvumas $L = 1 \text{ mH}$. Išėjimo filtro funkcijai atlikti parenkamas droselis „TC-102M-3A-57“, kurio vardinis induktyvumas $L = 1 \text{ mH}$, ir kondensatorius „RA.ELCO 105*“, kurio vardinė įtampa $U_{\text{nom}} = 400 \text{ V}$, talpa $C = 100 \mu\text{F}$.

Projektuojant realius galingus H tiltelio topologijos inverterius, tranzistorinių raktų patikimam valdymui, valdymo signalo sustiprinimui bei raktų apsaugai naudojamos MOSFET raktų pavaros.

H tiltelio tranzistorinių raktų komutacijai sudaroma valdymo grandinė. Šiai grandinei iškeliamas reikalavimas vienu metu sujunti abu dešinės H tiltelio pusės raktus, tuo pat metu užtikrinant, kad kitos tiltelio pusės du raktai yra atjungti. Trečiosios grandies keitiklis valdomas trijų lygių impulsų pločio moduliacijos.

56 pav. pateikta DC-AC keitiklio galios grandinės principinė elektrinė schema.



56 pav. Inverterio galios grandinės principinė elektrinė schema

Raktų valdymas užtikrinamas trimis operaciniais stiprintuvais su grįžtamaisiais ryšiais, formuojančiais signalus, ir dviem grįžtamaisiais operaciniais stiprintuvais, invertuojančiais signalus P kanalo raktams. Signalams generuoti numatomi šeši signalų generatoriai, išduodantys šiuos signalus:

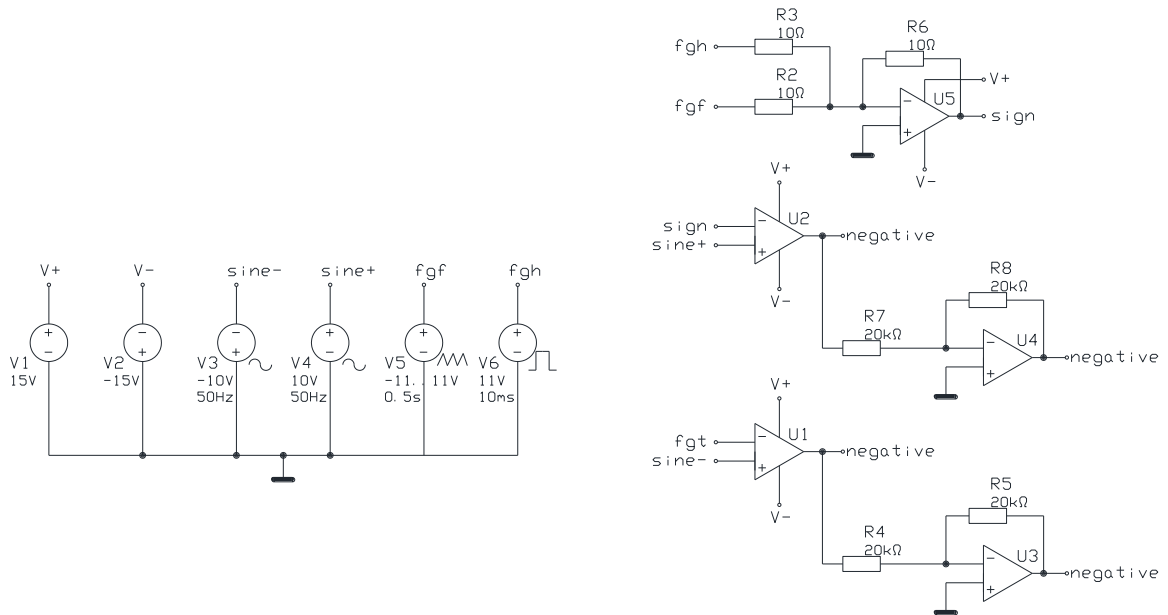
- nuolatinės srovės 15 V teigiamos amplitudės įtampą U_+ ;
- nuolatinės srovės 15 V neigiamos amplitudės įtampą U_- ;
- kintamosios srovės 10 V 50 Hz teigiamos amplitudės įtampą U_{sine+} ;
- kintamosios srovės 10 V 50 Hz neigiamos amplitudės įtampą U_{sine-} ;
- pulsuojančiosios srovės pjūklinę –11–11 V amplitudės įtampą, 0,5 ms periodo trukmės *triangle*;
- stačiakampius –11–11 V amplitudės įtampos, 10 ms periodo trukmės impulsus *square*.

Operacinis stiprintuvas U5 apdoroja pjūklinės įtampos *triangle* ir stačiakampių impulsų *square* signalus. Stiprintuve sudedami abu signalai ir išėjime išduodami tik stačiakampio signalo teigiamame pusperiodyje veikę teigiami pjūkliniai signalai ir tik neigiamame pusperiodyje veikę neigiami pjūkliniai signalai, šitaip suformuojant valdymo signalą *sign*. *Sign* signalas kartu su teigiamos amplitudės sinusiniu kintamosios srovės signalu jungiami į operacinį stiprintuvą U2. Šiame stiprintuve apdorojus signalus formuojamas „Negative“ raktų valdymo signalas. Operaciniame stiprintuve išėjimo signalas formuojamas lyginant *sine+* ir *sign* signalus: pjūkliniam įtampos signalui esant virš sinusoidės kreivės formuojamas neigiamos amplitudės išėjimo signalas. Šiuo būdu suformuojami asimetriniai išėjimo signalai, kai raktus valdančių impulsų pločiai nevienodi: krašutiniai – trumpo laiko tarpo, o viduriniai – ilgesnio laiko tarpo.

Analogiškai projektuojamas ir „Positive“ valdymo signalą generuojantis operacinis stiprintuvas, tik į jo apdorojimo kanalą prijungiamas neigiamos įtampos amplitudės sinusinis signalas *sine-*.

Operacinių stiprintuvų funkcijai atlikti parenkamas 4 kanalų operacinis stiprintuvas „LM324N“, kurio pagrindiniai parametrai: maitinimo įtampa $V_{CC} = \pm 6-36$ V, stiprinimo dažnis $F = 1$ MHz.

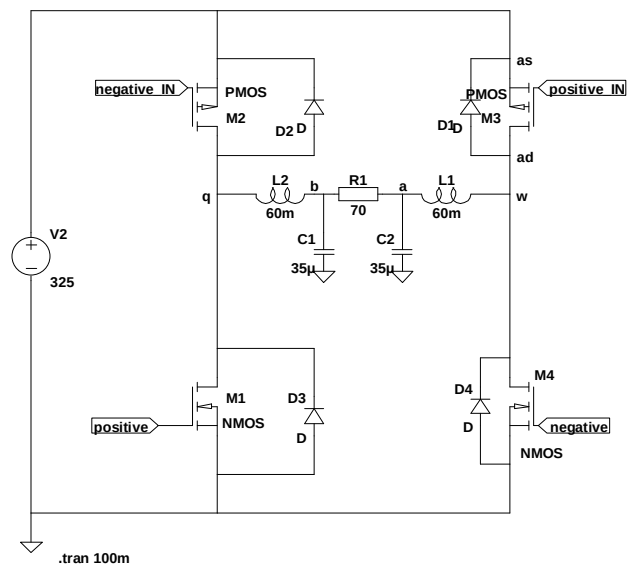
57 pav. pateikta DC-AC keitiklio valdymo grandinės principinė elektrinė schema.



57 pav. Inverterio valdymo grandinės principinė elektrinė schema

Trečiosios grandies modelis

Šiame skyriuje apžvelgiamas modelio, sudaryto H tiltelio topologijos inverterio pagrindu, kūrimas. 58 paveiksle pateikta tokio keitiklio galios grandinė sudaryta modeliavimo aplinkoje.



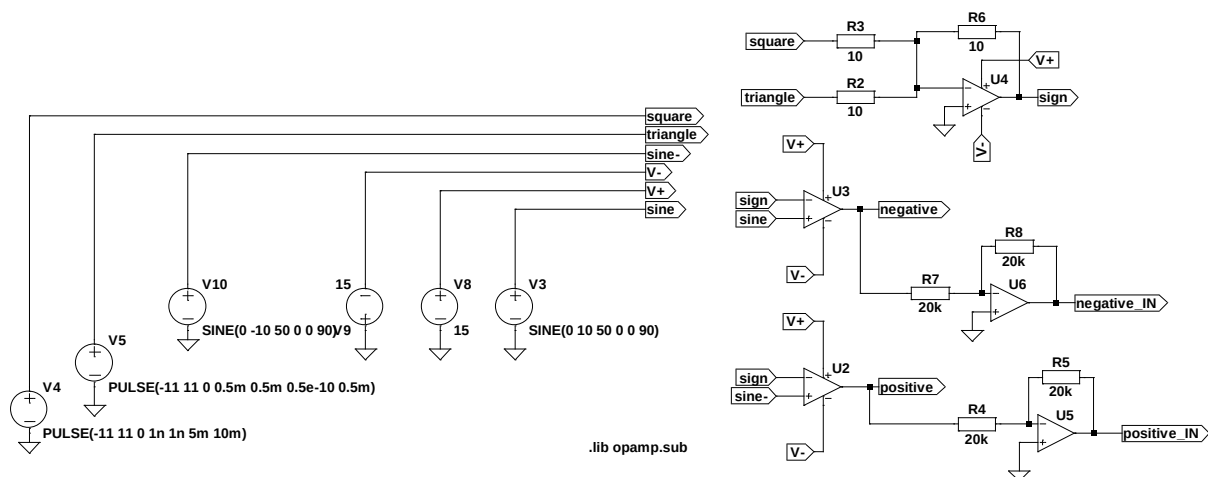
58 pav. DC-AC keitiklio galios grandinės modelis „LTspice XVII“ aplinkoje

Sudarant valdymo grandinės modelį naudojami standartinėje bibliotekoje esantys panašiausių charakteristikų tranzistoriniai raktai: P kanalo – „IRF9640“, N kanalo – „IXFX90N30“, ir juose analogiškai antrajai grandžiai modeliuoti pakeičiami parametrai. Abiejų keitiklio pusių išėjime numatomam žemųjų dažnių filtrui, remiantis projektine dalimi, nustatomi parametrai: ritėje L1

nustatomas 1000 μH induktyvumas, kondensatoriuje C1 – 100 μF . Analogiškai nustatomi parametrai ir dešinės tiltelio pusės elementuose L2 ir C2.

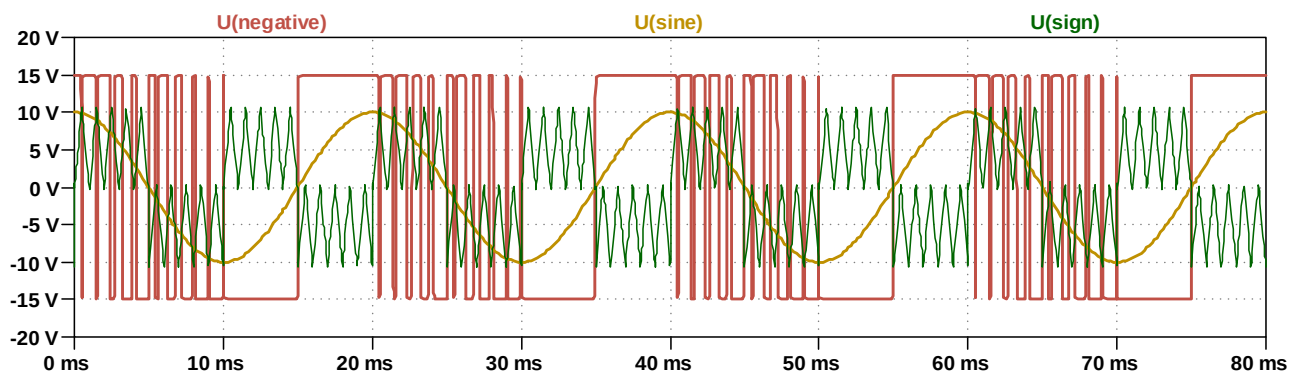
Grandinės parametrus stebėti nustatomi kontroliniai taškai – įtampa apkrovos prijungimo vietoje (a ir b taškai), įtampa prie žemųjų dažnių filtro (w ir q taškai).

59 paveiksle pateikiama inverterio tranzistorinių raktų valdymo grandinė. Valdymo grandinei modeliuoti naudojami tik standartiniai bibliotekose esantys elementai – operaciniai stiprintuvai – ir jiems valdyti „Spice“ direktyva aprašoma biblioteka „opamp“. Valdymo signalams formuoti naudojami įtampos šaltiniai, siekiant išgauti neigiamos amplitudės nuolatinės srovės signalą, įtampos šaltinio teigiamas polis prijungiamas prie žemės, o neigiamas polis – į grandinę. Valdymo įtampą formuojantys operaciniai stiprintuvai U2, U3 ir U4 prijungiami prie nuolatinės srovės 15 V maitinimo šaltinio.



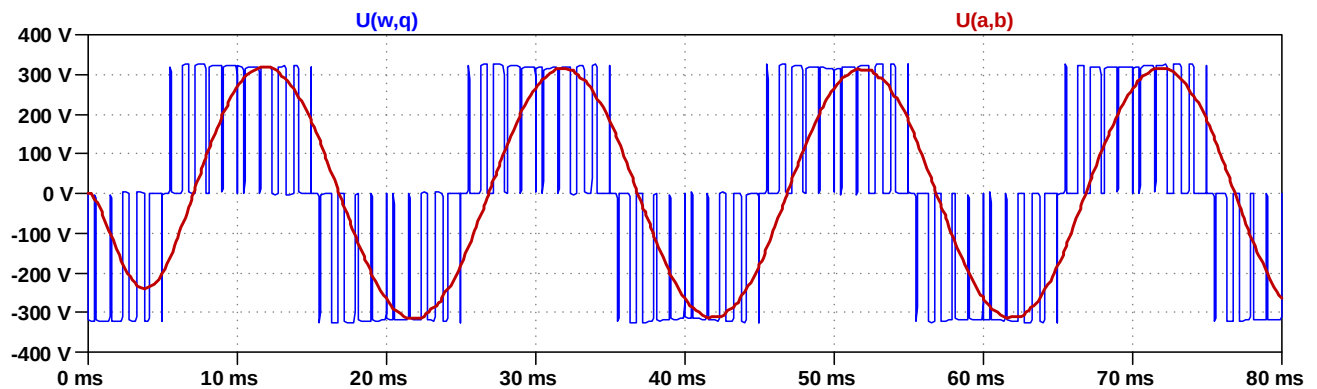
59 pav. DC-AC-DC keitiklio valdymo modelis „LTspice XVII“ aplinkoje

Raktų valdymo signalai operaciniuose stiprintuvuose nenutrūkstamai generuojami visą nustatytą modeliavimo laiką. Modeliavimo aplinkoje valdančiojo teigiamo sinusinio, pjūklinės įtampos signalo bei operacinio stiprintuvo į raktus siunčiamo signalo kreivės pavaizduotos 60 paveiksle.



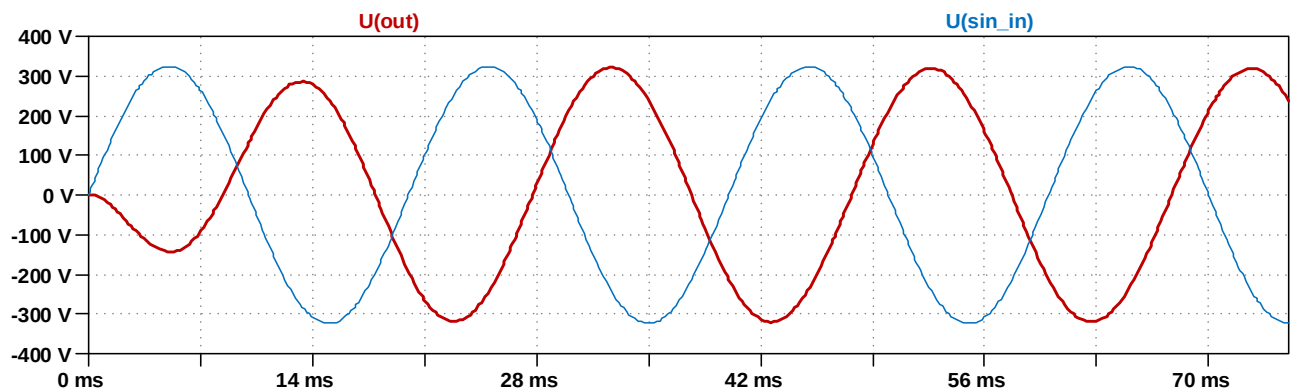
60 pav. Sinusinės įtampos $U(\text{sine})$, pjūklinio valdymo signalo $U(\text{sign})$ ir raktų valdymo signalo $U(\text{negative})$ kreivės

Inverterio išėjime matuojama valdymo signalų įtampa U_q-U_w ir į apkrovą perduodamas išėjimo signalas V_a-V_b . Išmatuotų signalų kreivės pateikiamos 61 paveiksle.



61 pav. Trijų lygių impulsų pločio moduliavimo signalai ir keitiklio išėjimo įtampų kreivė

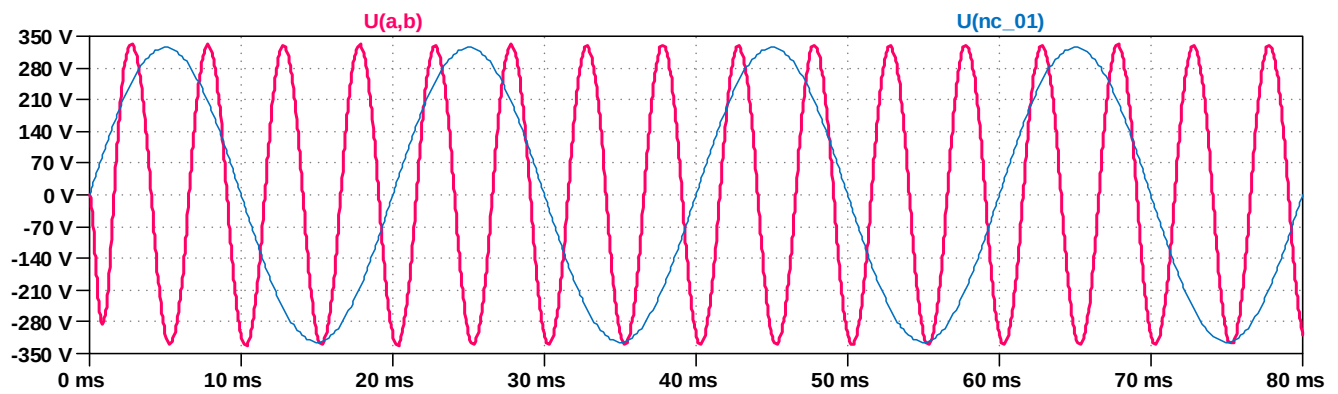
62 paveiksle pateikiama tinklo, prie kurio prijungtas projektuojamas AC-DC-AC keitiklis, ir keitiklio išėjime operuojamos įtampų kreivės.



62 pav. Tinklo signalo kreivė ir į apkrovą išėjime prijungiamo signalo kreivė

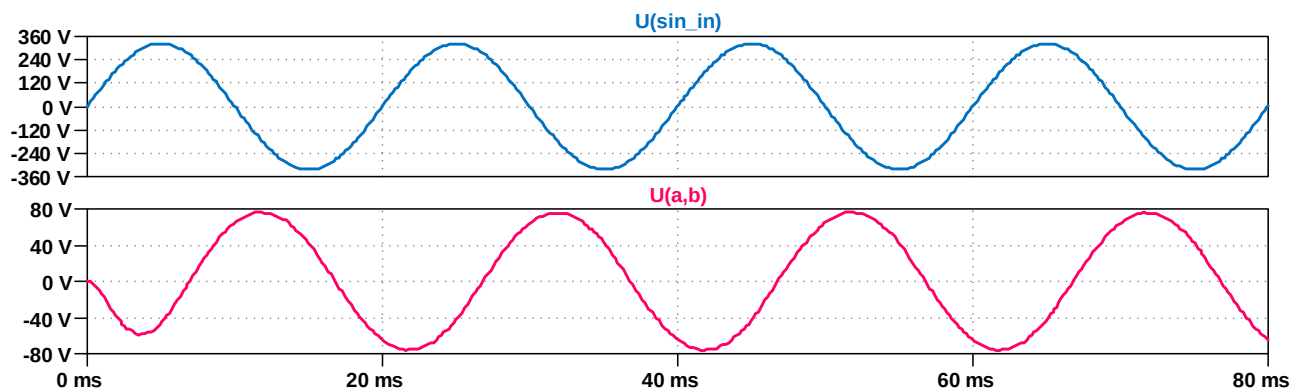
Keitiklio trečiosios grandies valdymo grandinėje operuojant valdymo signalais reguliuojamas viso keitiklio išėjimo signalo dažnis. Reguluojant sinusinės įtampos signalo dažnį bei pjūklinės įtampos *triangle* ir stačiakampių impulsų *square* signalų periodus formuojamas keitiklių raktų komutavimas ir veikiamas keitiklio išėjimo įtampos dažnis.

Siekiant išėjime gauti kintamosios srovės 230 V 200 Hz įtampą, inverterio valdymo grandinėje nustatomas sinusinės įtampos šaltinio dažnis 200 Hz, pjūklinės įtampos signalų periodas $T = 0,125$ ms, stačiakampių impulsų periodas $T = 2,5$ ms. 63 paveiksle pateikiama tinklo, prie kurio prijungtas projektuojamas AC-DC-AC keitiklis, ir keitiklio išėjime operuojamos įtampų kreivės.

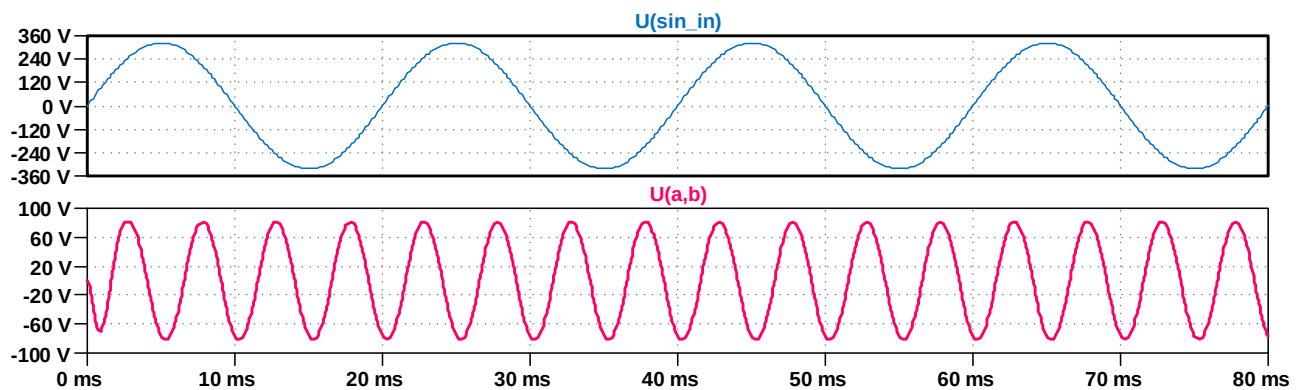


63 pav. Projektuojamo AC-AC keitiklio įėjime veikiančio tinklo signalo kreivė ir keitiklio išėjimo įtampos kreivė esant 200 Hz dažniui

Projektuojant keitiklio antrąją grandį – nuolatinės srovės intarpą – išnagrinėtas įtampos reguliavimas keičiant darbo ciklą valdymo grandinėje. 64 paveiksle pateikiamas sumažintos 80 V įtampos signalas, apdorotas inverteryje, o 65 paveiksle pateikiamos įtampų kreivės inverterio grandinėje padidinus dažnį.



64 pav. Projektuojamo AC-AC keitiklio įėjime veikiančio tinklo signalo kreivė ir sumažintos keitiklio išėjimo įtampos kreivė esant 50 Hz dažniui



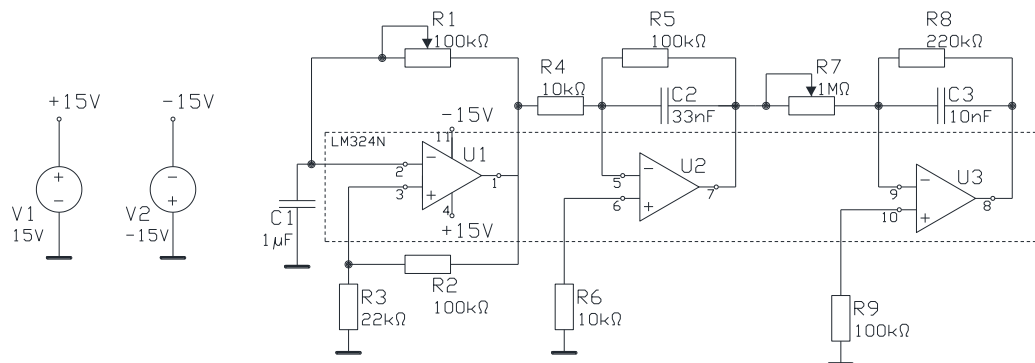
65 pav. Projektuojamo AC-AC keitiklio įėjime veikiančio tinklo signalo kreivė ir sumažintos keitiklio išėjimo įtampos kreivė esant 200 Hz dažniui

Trečiosios grandies eksperimentinis modelis

Šiame skyriuje apžvelgiamas projektuojamo keitiklio trečiosios grandies – H tiltelio topologijos inverterio – realaus eksperimentinio modelio sudarymas. Eksperimentinis modelis sudaromas realiai valdymo grandinei suderinti ir išbandyti, galios grandinėje komutuojuama 5–15 V įtampa.

Valdymo grandinė sudaroma iš dviejų puslaidininkinių raktų pavarų „Analog Devices ADuM 4223“, signalams formuoti naudojamų keturių operacinių stiprintuvų blokų „Texas Instruments LM324N“ bei aktyviųjų ir talpinių elementų.

Eksperimentinis modelis sudedamas *K&H MFG. Co.* kompanijos mokomajame stende, kurį sudaro maitinimo šaltinis „KL-200“ ir bandomoji lenta „KL AC 90001“. Keitiklyje veikiantys signalai stebimi dviejų kanalų skaitmeniniu oscilografu „OWON PDS5022S“.



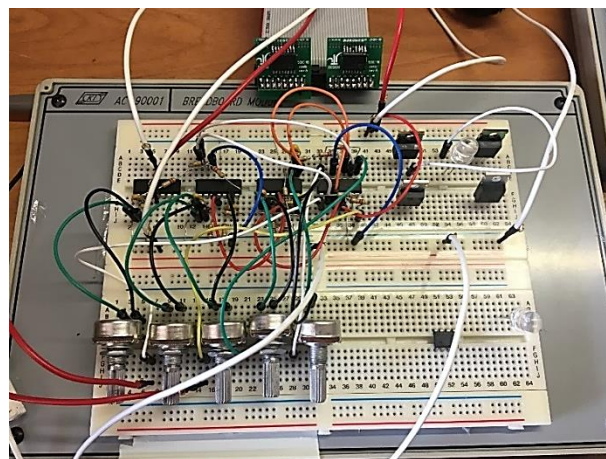
66 pav. Stačiakampių impulsų (U1), pjūklinės (U2) ir sinusinės (U3) įtampų signalus generuojanti grandinė sudaryta „LM324N“ mikrograndyno pagrindu

Teoriškai projektuojant ir kompiuterinėje aplinkoje modeliuojant inverterio valdymo grandinę, valdymo signalams formuoti naudojami įtampos šaltiniai. Siekiant sudaryti autonomiškai, be išorinių laboratorinių signalų formuotuvų veikiantį keitiklį, valdymo signalams generuoti naudojami operaciniai stiprintuvai. Eksperimentiniame modelyje naudojamas keturių kanalų operacinių stiprintuvų mikrograndynas „LM324N“, kurio tris kanalus sujungus į vieną grandinę formuojami stačiakampių impulsų, pjūklinės ir sinusinės įtampų signalai. Šiuos signalus generuojančios grandinės principinė elektrinė schema pateikta 66 paveiksle. Kadangi projektuojamam keitikliui reikalingi skirtingų dažnių signalai, valdymo impulsams generuoti naudojami trys mikrograndynai – po vieną kiekvienam signalui generuoti. Valdymo grandinei maitinti naudojama ± 15 V nuolatinės srovės įtampa, tačiau dėl nereguliuojamo stiprinimo koeficiento *square* impulsus formuojančiame operaciniame stiprintuve šis stiprintuvas prijungiamas prie ± 5 V įtampos.

Eksperimentinio modelio bandymų stendo ir bandomojoje lentoje surinktos grandinės bendras vaizdas pateikiamas 67 paveiksle.



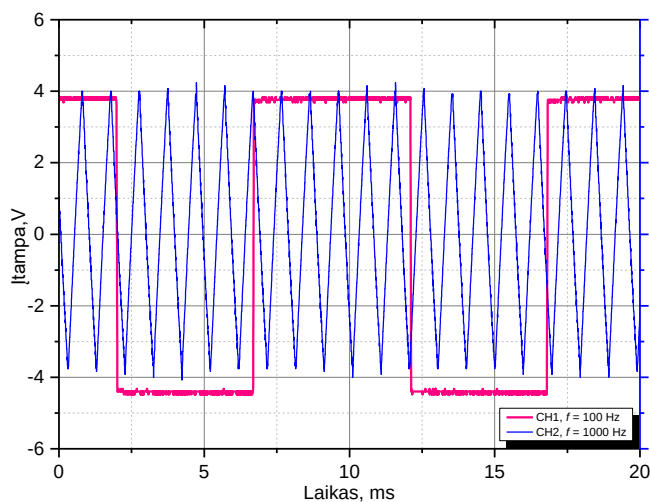
a)



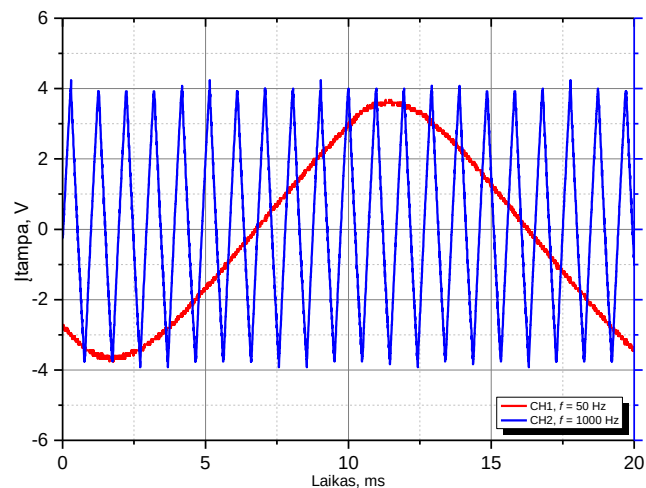
b)

67 pav. Bandymų stendo bendras vaizdas (a) ir bandymų lentoje surinkta valdymo grandinė (b)

Eksperimentinių bandymų metu oscilografu stebėtos signalų kreivės ir matavimų rezultatai pateikiami 68–70 paveiksluose. Visų atliktų matavimų duomenys importuoti į kompiuterį oscilografo gamintojo programine įranga „PC oscilloscope software 2.0.8.26“ ir apdoroti „Origin 9.0“ grafikų sudarymo programinėje aplinkoje.

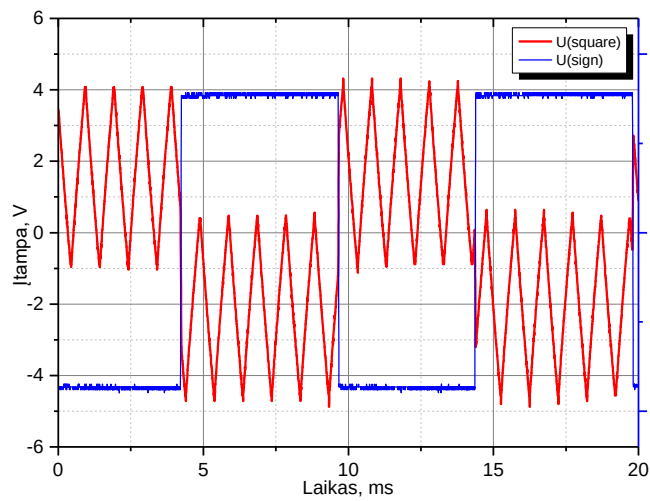


a)

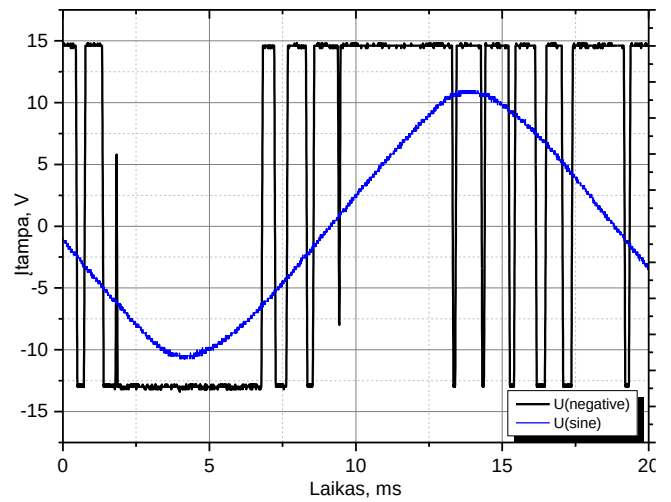


b)

68 pav. Stačiakampių impulsų *square* ir pjūklinės *triangle* (a) bei *triangle* ir sinusinės *sine* įtampų kreivės (b)

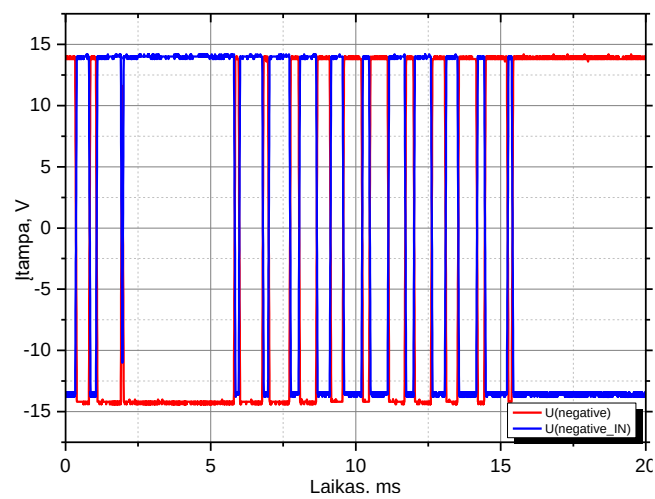


a)



b)

69 pav. Stačiakampių impulsų įtamos *square* ir formuojamo signalo *sign* kreivės (a) ir sinusinės įtamos kreivės bei formuojamo *negative* valdymo signalo kreivės (b)



70 pav. Tranzistorinių raktų valdymo signalų *negative* ir *negative_in* kreivės

3. APSAUGA NUO ELEKTROS

Spartus elektros tinklo populiarėjimas XX a. pradžioje lėmė apsaugos nuo elektros atsiradimą ir vystymą. Apsauga nuo elektros (elektroapsauga) – tai organizacinių ir techninių priemonių visuma, skirta apsaugoti žmonėms nuo žalingo ir pavojingo elektros srovės, elektromagnetinio lauko bei statinės elektros poveikio.

Elektros srovės poveikis žmogaus organizmui priklauso nuo daugybės veiksnių. Tai elektros srovės dydis, poveikio laikas, srovės dažnis, elektros įrenginiai, aplinka ir asmeninės žmogaus savybės.

Lietuvos Respublikos energetikos ministro įsakymu patvirtintose Elektros įrenginių įrengimo bendrosiose taisyklėse apibrėžiamos pavojingos įtampos ribinės reikšmės. Žmogaus sveikatai ir gyvybei pavojinga laikoma didesnė už 50 V kintamosios srovės ir didesnė už 75 V nuolatinės srovės įtampa.

Elektroapsaugoje taip pat vartojamos juntamos srovės ir raumenis paralyžiuojančios srovės sąvokos. Juntamoji srovė – tai elektros srovė, kurią prilietus pajuntamas dirginimas. Šios srovės dydis 0,5–1,5 mA. Raumenis paralyžiuojančia srove laikoma 10–15 mA srovė. Žmogui prilietus tokio dydžio srovės laidininką ranka, elektros srovė paralyžiuoja delno, kuriame laikomas laidininkas, raumenis, todėl žmogus laidininko negali paleisti. Mirtina srove laikoma didesnė už 100 mA elektros srovė.

E. Matkevičiaus ir L. Radzevičiaus metodiniuose nurodymuose (Matkevičius 2007) pabrėžiama, kad apsauga nuo elektros turi būti užtikrinama per šias sistemų kūrimo stadijas: projektavimo, gamybos, montavimo ir eksploatavimo. Kadangi projektuojamame keitiklyje operuojama pavojingomis srovėmis, šiame skyriuje išsamiai apžvelgiama apsauga nuo elektros.

Dažniausios priežastys, dėl kurių kyla grėsmė patirti elektros smūgį ir į kurias turėtų būti atsižvelgiama projektuojant sistemą: pažeista elektros laidininko izoliacinė medžiaga, vartotojų nerūpestingumas, neatsargumas bei patirties stoka, elektros įrenginių priėjimas vaikams, veiksmų nesuderinimas (pavyzdžiui, priešlaikinis maitinimo įjungimas) (Buivis 2007).

3.1. Apsaugos laipsnio nustatymas

Elektros įrenginių apsaugai nuo išorinio mechaninio poveikio ir drėgmės užtikrinti sukurtas ir standartizuotas IP (angl. *Ingress protection rating*) klasifikavimas. Apsaugos lygis suprantamas kaip įrenginio apsaugos būdas, kuris užtikrina išorinių kietųjų kūnų ir drėgmės patekimo prie įtampą turinčių dalių apribojimą. Apsaugomi įrenginiai žymimi tarptautiniu apsaugos kodu IP ir dviem

arabiškais skaitmenimis. Pirmasis skaičius rodo apsaugos nuo kietųjų kūnų lygį, antrasis – apsaugos nuo vandens lygį.

Apsaugos lygis projektuojam kintamosios srovės keitikliui nustatomas ne žemesnis nei IP31, t. y. keitiklis atsparus mechaniniam iki 2,5 mm skersmens daiktų poveikiui, tačiau skirta tik sausoms vidaus sąlygoms. Šioms sąlygoms užtikrinti keitiklio sudedamosios dalys turi būti talpinamos uždaro tipo korpuse.

3.2. Elektros įrenginių įžeminimas

Žmonių apsaugai nuo elektros srovės, vadovaujantis Elektros įrenginių įrengimo bendrosiomis taisyklėmis, aukštesnės kaip 50 V įtampos kintamosios srovės tinkluose būtina įžeminti visas metalines įrengimų, ant kurių pažeidus izoliaciją gali pakliūti įtampa, dalis, nepriklausomai nuo montavimo vietos.

Projektuojamo keitiklio numatoma elektros tinklo sistema TN-C-S, kai nulinio laidininko funkcijas atlieka vienas apsauginis nulinis laidininkas (PEN), išsišakojantis į nulinį laidininką (N) ir apsauginį laidininką (PE). Projektuojamoje sistemoje įžeminamas metalinis keitiklio korpusas, nes pažeidus laidininkų izoliaciją pavojinga elektros srovė tekėtų metalinėmis neapsaugotomis įrenginių dalimis keldama pavojų žmogaus sveikatai ar netgi gyvybei.

Žmogaus sveikatai pavojų keliančių veiksnių sumažinimui, tikslinga keitiklį talpinti į iš dielektrinių savybių turinčių medžiagų pagamintą korpusą.

IŠVADOS IR PASIŪLYMAI

1. Suprojektuotas H tiltelio topologijos AC-AC keitiklis, galintis keisti įėjimo įtampos amplitudę nuo 50 iki 230 V ir dažnį nuo 50 iki 200 Hz. Modeliavimo aplinkoje sudaryti visų keitiklio grandžių imitaciniai modeliai ir išbandytas jų veikimas. Remiantis tyrimo medžiaga, pagamintas realus inverterio valdymo grandinės eksperimentinis modelis.

2. Suprojektuoto keitiklio valdymui sudarytos dvi viena nuo kitos nepriklausančios valdymo grandinės. Nuolatinės srovės intarpo valdymo grandinė užtikrina įtampos amplitudės reguliavimą nuo 50 iki 230 V, keičiant darbo ciklą. Suprojektuota inverterio valdymo grandinė, naudojant trijų lygių impulsų pločio moduliaciją, užtikrina dažnio reguliavimą keitiklio išėjime diapazone nuo 50 iki 200 Hz.

3. Sudarius pusės H tiltelio ir H tiltelio topologijos keitiklių grandinių kompiuterinius modelius, ir atlikus grandinių analizę, nustatyta, kad naudojant pusės tiltelio topologiją keitiklio funkcionalumas gerokai nukenčia. Pusės H tiltelio topologijos keitiklyje nėra galimybės reguliuoti išėjimo įtampos amplitudės, o bendroji keitiklio galia siekia vos 100 W. Suprojektuoto ir modeliavimo aplinkoje išbandyto H tiltelio topologijos keitiklio galia siekia 650 W.

4. Siekiant patobulinti suprojektuotą AC-AC H topologijos įtampos keitiklį, galima nesunkiai į jau suprojektuotą trijų lygių impulsų pločio reguliatorių įdiegti grįžtamojo ryšio grandį, taip keitiklis veiks prisitaikydamas prie apkrovos dydžio, racionaliai panaudodamas šaltinio elektros energiją.

5. Keitiklio grandinė taip pat gali būti pildoma tinklo parametrų analizatoriumi, suvartojamos energijos apskaitos ir kitomis funkcijomis, leidžiančiomis taupyti žmogiškuosius ir ekonominius išteklius.

6. Projektuojamam keitikliui parenkami tik standartiniu būdu gaminami ir plačiai naudojami elementai. Projektuojant nebrangų ir konkurencingą produktą šie rodikliai yra itin svarbūs, nes tai leidžia sumažinti gamybos kainą ir didina ekonominį įtaiso patrauklumą. AC-AC keitiklis gali būti lengvai pritaikomas nenutrūkstamo maitinimo šaltiniuose, taip pat variklių greičiui valdyti.

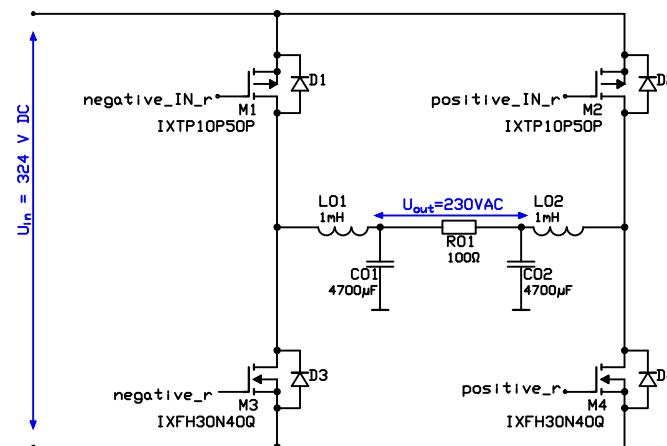
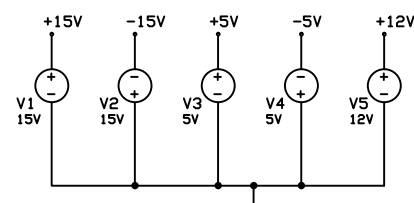
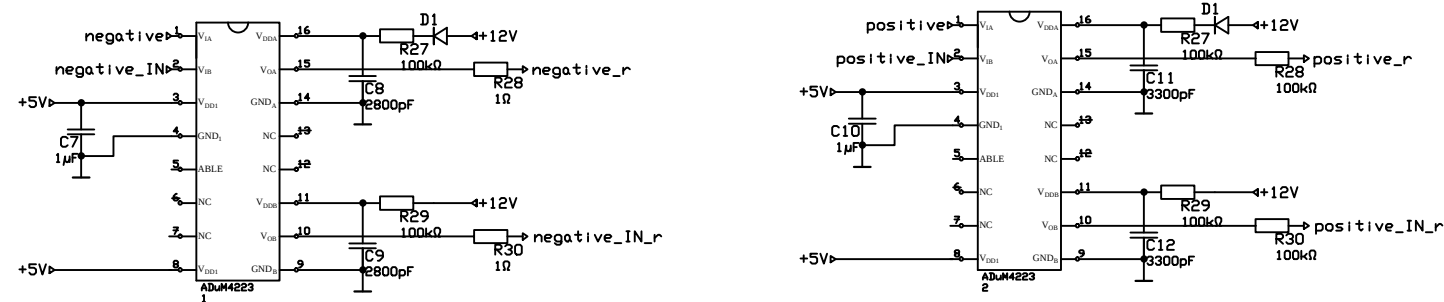
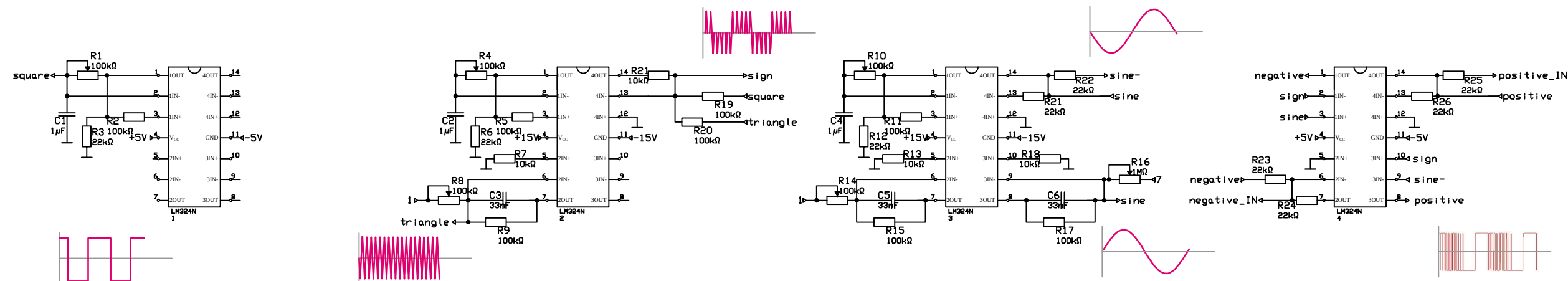
LITERATŪROS SĄRAŠAS

- 50160:2010, LST EN. Viešųjų elektros tinklų įtampos charakteristikos. European committee for standardization. Brussels. 2010-10-15.
- 60038:2009, IEC. IEC standard voltages. International Standard. International Electrotechnical Commission. London. 2009-06-17.
- 60529:1991/A1:2000, LST EN. Gaubtų sudaromos apsaugos laipsniai (IP kodas). Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius. 1999-07-01.
- Bose, B.K. *Modern Power Electronics And AC Drives*. New Delhi: Pearson Education India, 2015.
- Buivis, L. *Apsauga nuo elektros*. Šiauliai: Šiaulių universitetas, 2007.
- Burkov, A. *Электроника и преобразовательная техника: учебник: в 2 т. [Elektronika i preobrazovatel'naja tehnika: učebnik v 2 t.]*. 1. Москва: ФГБОУ Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2015.
- Chakraborty, S. *Power Electronics for Renewable and Distributed Energy*. London: Springer-Verlag, 2013.
- Čepulkauskas, A. *Radioelektronikos praktimumas*. Vilnius: VPU leidykla, 1998.
- Dokić, B. L. *Power Electronics: Converters and Regulators*. Third edition. New York: Springer, 2015.
- Erickson, R. *Fundamentals of Power Electronics*. New York: Springer, 2012.
- Filatov, Vladislav. *Двух- и трехуровневые инверторы на IGBT [Dviejų ir trijų lygių IGBT inverteriai]*. Санкт-Петербург: Силовая Электроника, 2012.
- Geleževičius, V.A. ir kiti. *Automatikos terminų žodynas*. Vilnius: VGTU leidykla Technika, 2004.
- Gerdžiūnas, P., ir V. Plakys. *Bendrieji akademinių darbų įforminimo reikalavimai*. Vilnius: Technika, 2007.
- Gottlieb, I. M. *Power Supplies Switching Regulatoris, Inverters, and Converters*. Blue Ridge Summit, PA: TAB Books, 1994.
- Hart, Daniel W. *Power Electronics*. 1st edition. New York: McGraw-Hill Education, 2010.
- Juška, A., ir G. Gedminienė. *Sudijų rašto darbai*. Vilnius: Technika, 2008.
- Kaulakienė, A. *Aiškinamasis elektrotechnikos ir elektronikos gaminių terminų žodynas*. Vilnius: Mokslo ir enciklopedijų leidybos centras, 2014.
- Kaulakienė, A. ir kiti. *Kalbininkų patarimai studentams: teorija ir praktika*. Vilnius: Technika, 2007.
- Keinys, S. *Dabartinės lietuvių kalbos žodynas*. VII. Vilnius: Lietuvių kalbos institutas, 2012.
- Laneckij, D. *Dirvos drėkinimo sistemos automatizavimas. Baigiamasis bakalauro darbas*. Vilnius: VGTU, 2015.

- LinearTechnology. *LTspice: Simple Steps to Import Third-Party Models*. [Interaktyvus], [žiūrėta 2017-01-25]. Prieiga per internetą: <http://www.linear.com/solutions/4678>, 2016.
- LitPolLink. *LitPol Link jungtis: Techninis sprendimas*. [Interaktyvus], [žiūrėta 2016-12-15]. Prieiga per internetą: <http://www.litpol-link.com/lt/apie-projekta/techninis-sprendimas/>, 2016.
- Mack, R. A. *Demystifying Switching Power Supplies*. Burlington: Newnes, 2005.
- Maity, A. „Design of a 20 MHz DC-DC Buck Converter with 84 Percent Efficiency for Portable Applications.“ Chennai: IEEE, 2011.
- Maniktala, S. *Switching Power Supplies A to Z*. Amsterdam: Newnes, 2012.
- Matkevičius, E. *Žmonių sauga*. Vilnius: Technika, 2007.
- Melešin, V. *Транзисторная преобразовательная техника [Tranzistornaja preobrazovatel'naja tehnika]*. Москва: Техносфера, 2005.
- Michal, Vratislav. *Three-Level PWM Floating H-Bridge Sinewave Power Inverter for High-Voltage and High-Efficiency Applications*. Piscataway: IEEE Transactions on Power Electronics 31(6), 2015.
- Mohan, N. *Power Electronics*. 3rd. New Jersey: John Wiley and Sons Ltd, 2003.
- Moskatov, J. A. *Силовая электроника. Теория и конструирование [Silovaja elektronika. Teorija i konstruirovanije]*. Киев: МК-Пресс, 2013.
- Popkov, O. Z. *Основы преобразовательной техники [Osnovy preobrazovatel'noj tehniki]*. 3-е издание. Москва: МЭИ, 2010.
- RamaReddy, S. *Fundamentals of Power Electronics*. 2nd revised edition. New Delhi: Alpha Science International Ltd, 2013.
- Rashid, M. H. *Power electronics handbook : devices, circuits, and applications handbook / edited by*. 4th etidion. London: Pearson, 2014.
- Semenov, B. J. *Силовая электроника: профессиональные решения [Silovaja elektronika: professionalnyje rešenija]*. Москва: Солон-пресс, 2011.
- Semenov, B. *Силовая электроника: от простого к сложному [Silovaja elektronika: ot prostogo k složnomu]*. 1. Москва: СОЛОН-Пресс, 2005.
- Shu, H. M., Khanna, R. *Various control methods for DC-DC buck converter*. Murthal: IEEE Fifth, 2012.
- SolidState. *KBPC35 Maximum ratings and electrical characteristics*. 2016.
- TexasInstruments. *SPICE Model Resources*. [Interaktyvus], [žiūrėta: 2017-01-25]. Prieiga per internetą: <http://www.ti.com/adc/docs/midlevel.tsp?contentId=31690>, 2017.
- Trzynadlowski, A. M. *Introduction to modern power electronics*. Third edition. New Jersey: Wiley, 2016.
- Udris, D. *Elektroniniai galios keitikliai*. Vilnius: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 2008.

Wilamowski, B. *Power Electronics and Motor Drives*. 2nd. Abingdon-on-Thames: Taylor & Francis, 2011.

PRIEDAI



Atsakinga žinyba ELETM	Konsultantas	Dokumento tipas Inverterio principinė elektrinė schema		Dokumento statusas Baigiamasis darbas	
Savininkas VG TU EETfm-15	Sudarė D. Laneckij Tikrino dr. A. Grainys	Pavadinimas H-tiltelio topologijos AC/AC keitiklis		Žymuo ELETM 17	
			Laida A	Data 2017-05-15	Kalba lt
				Lapas 1/1	



VILNIAUS GEDIMINO
TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

XX-toji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija
„MOKSLAS – LIETUVOS ATEITIS“
ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA

PAŽYMA

Dmitrij Laneckij

*Elektros inžinerijos (T190) ir Automatizavimo, robotikos,
valdymo inžinerijos (T125) jungtinėje sekcijoje
perskaitė pranešimą*

H TILTELIO TOPOLOGIJOS AC/AC KEITIKLIO TYRIMAS

Mokslo komiteto pirmininkas

prof. habil. dr. Romanas Martavičius

Sekcijos pirmininkas

doc. dr. Sonata Tolvaišienė

2017 m. kovo 17 d.
Vilnius