



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

KOMPIUTERIJOS IR RYŠIŲ TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Lukas Šalavėjus

**ĮTAMPĄ ŽEMINANČIO NUOLATINĖS ĮTAMPOS KEITIKLIO SU
INTEGRUOTU LIČIO JONŲ BATERIJOS KROVIKLIU PROJEKTAVIMAS
IR TYRIMAS**

**DESIGN AND RESEARCH OF DC-DC BUCK CONVERTER WITH
INTEGRATED LI-ION BATTERY CHARGER**

Baigiamasis magistro darbas

Elektronikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX050

Pažangios elektronikos projektavimo specializacija

Elektronikos ir elektros inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2023



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

KOMPIUTERIJOS IR RYŠIŲ TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Lukas Šalavėjus

**ĮTAMPĄ ŽEMINANČIO NUOLATINĖS ĮTAMPOS KEITIKLIO SU
INTEGRUOTU LIČIO JONŲ BATERIJOS KROVIKLIU PROJEKTAVIMAS
IR TYRIMAS**

**DESIGN AND RESEARCH OF DC-DC BUCK CONVERTER WITH
INTEGRATED LI-ION BATTERY CHARGER**

Baigiamasis magistro darbas

Elektronikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX050

Pažangios elektronikos projektavimo specializacija

Elektronikos ir elektros inžinerijos studijų kryptis

Vadovas dr. Vaidotas Barzdėnas
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Konsultantai dr. Karolis Kiela, dr. Marijan Jurgo
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Vilnius, 2023

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
KOMPIUTERIJOS IR RYŠIŲ TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Studijų kryptis: Elektronikos inžinerija

Studijų programa: Elektronikos inžinerija , valstybinis kodas 6211EX050

Specializacija: Pažangiosios elektronikos projektavimas

TVIRTINU

Katedros vedėjas

Vaidotas Barzdėnas

2023-05-29

MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS

Nr. MNEfm-21-1081

Vilnius

Studentas (-ė): Lukas Šalavėjus

Baigiamojo darbo tema: Įtampą žeminančio nuolatinės įtampos keitiklio su integruotu ličio jonų baterijos krovikliu projektavimas ir tyrimas

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas pagal numatytą studijų kalendorinį grafiką.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Baigiamojo darbo tikslas: suprojektuoti ir ištirti įtampą žeminantį keitiklį su integruotu ličio jonų baterijos krovikliu.

Baigiamojo darbo užduotis:

1. Apžvelgti įtampą žeminančių keitiklių ir ličio jonų baterijų kroviklių veikimo teoriją ir naudojamas architektūras, sudaryti kuriamos sistemos blokinę diagramą.
2. Parinkti įrenginio projektavimui tinkamą IG technologiją, suprojektuoti principinę elektrinę schemą ir atlikti jos tyrimą.
3. Suprojektuoti įrenginio topologiją, atlikti jos tyrimą, palyginti topologijos ir elektrinės principinės schemos modeliavimo rezultatus bei pateikti išvadas apie sistemos tobulinimo galimybes.
4. Suprojektuota ir modeliavimo programinėje įrangoje ištirta sistema, kurios įėjimo įtampa yra bent 10-100 V, išėjimo įtampa konfigūruojama bent 3-20 V režiuose, išėjimo srovė yra bent 2 A, o kroviklis krauna vienos celės ličio jonų bateriją bent 100 mA srove.

Vadovas docentas Vaidotas Barzdėnas

Vilniaus Gedimino technikos universitetas Elektronikos fakultetas Kompiuterijos ir ryšių technologijų katedra		ISBN Egz. sk. Data-.....-.....	ISSN
Antrosios pakopos studijų Elektronikos inžinerijos programos magistro baigiamasis darbas			
Pavadinimas	Įtampą žeminančio nuolatinės įtampos keitiklio su integruotu ličio jonų baterijos krovikliu projektavimas ir tyrimas		
Autorius	Lukas Šalavėjus		
Vadovas	Vaidotas Barzdėnas		
		Kalba: lietuvių	
Anotacija Šiame darbe suprojektuotas ir kompiuterinio modeliavimo programinėje įrangoje ištirtas integrinis grandynas, skirtas maitinti 4 V elektronikos įrenginius 10–100 V sistemose. Suprojektuotą integrinį grandyną sudaro impulsinis įtampą žeminantis keitiklis, ličio jonų baterijos kroviklis ir maitinimo šaltinio perjungimo grandinė. Atlikta impulsinių įtampą žeminančių keitiklių ir ličio jonų baterijų kroviklių veikimo principų analizė. Suprojektuota ir ištirta integrinio grandyno elektrinė principinė schema bei topologija. Atliktas topologijos ir schemos parametų palyginimas. Pateikti tyrimo rezultatai ir tobulinimo pasiūlymai tolesniam integrinio grandyno. Darbo apimtis – 91 p. teksto be priedų, 61 paveikslas, 15 lentelių, 12 literatūros šaltinių. Pridėti darbo priedai.			
Prasminiai žodžiai: Impulsinis įtampą žeminantis keitiklis, integrinio grandyno projektavimas, ličio jonų baterijos kroviklis			

Vilnius Gediminas Technical University		ISBN	ISSN
Faculty of Electronics		Copies No.	
Department of Computer Science and Communications Technologies		Date-.....-.....	

Master Degree Studies Electronics Engineering study programme Master Graduation Thesis	
Title	Design and Research of DC-DC Buck Converter with Integrated Li-Ion Battery Charger
Author	Lukas Šalavėjus
Academic supervisor	Vaidotas Barzdėnas

	Thesis language: Lithuanian
--	------------------------------------

Annotation In this paper, an integrated circuit was designed which purpose is to supply energy for 4 V devices in 10-100 V systems. The integrated circuit has three functional blocks – DC-DC buck converter, lithium-ion battery charger and power supply switch. Analyzed working principles of DC-DC buck converter and lithium-ion battery charger. Designed and analyzed electrical schematics and layout of integrated circuit. Compared schematics and layout simulation results. Results and propositions about system improvements are given in the final chapters. The thesis consists of: 91 p. text without appendixes, 61 pictures, 15 tables, and 12 sources. Appendixes are added.

Keywords: DC-DC buck converter, integrated circuit design, lithium-ion battery charger

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

	Lukas Šalavėjus, 20162880	
	(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)	
	Elektronikos fakultetas	
	(Fakultetas)	
	Elektronikos inžinerija, MNEfm-21	
	(Studijų programa, akademinė grupė)	

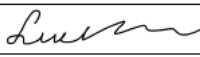
BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO) SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2023 m. gegužės 29 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Įtampą žeminančio nuolatinės įtampos keitiklio su integruotu ličio jonų baterijos krovikliu projektavimas ir tyrimas“ yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Prenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: daktaras Karolis Kiela, daktaras Marijan Jurgas. Mano darbo vadovas docentas daktaras Vaidotas Barzdėnas.

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

			Lukas Šalavėjus
	(Parašas)		(Vardas ir pavardė)

TURINYS

Paveikslų sąrašas	9
Lentelių sąrašas	11
Įvadas. Darbo aktualumas ir tikslas	12
Darbo uždaviniai	13
Naudoti tyrimo ir analizės metodai	13
Darbo naujumas ir praktinė nauda	13
1. LITERATŪROS IR TEORIJOS APŽVALGA	15
1.1. Įtampą žeminančių keitiklių veikimo principai	15
1.2. Įtampą žeminančių keitiklių architektūros tipų apžvalga	18
1.2.1. Įtampa valdomų keitiklių architektūra	18
1.2.2. Srove valdomų keitiklių architektūra	19
1.2.3. Įtampos histereze valdomų keitiklių architektūra	20
1.2.4. Pastovaus įjungimo laiko keitiklių architektūra	22
1.3. Ličio jonų baterijų kroviklių apžvalga	23
1.4. Skyriaus apibendrinimas	25
2. SISTEMOS PROJEKTAVIMAS	27
2.1. Sistemos blokinių diagramų sudarymas	27
2.1.1. Bendrosios sistemos blokinės diagramos sudarymas	27
2.1.2. Įtampą žeminančio keitiklio blokinės diagramos sudarymas	28
2.1.3. Ličio baterijos kroviklio blokinės diagramos sudarymas	30
2.2. Sistemos principinių elektrinių schemų projektavimas ir tyrimas	31
2.2.1. Technologijos parinkimas integrinio grandyno projektavimui	31
2.2.2. Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio schemos projektavimas	31
2.2.2.1. Atraminės įtampos ir srovės bloko projektavimas	37
2.2.2.1. Tiesinio įtampą žeminančio keitiklio projektavimas	44
2.2.2.2. Vidinio impulsų generatoriaus projektavimas	45
2.2.2.3. Loginio sistemos valdymo bloko projektavimas	48
2.2.2.4. Išėjimo srovės ribojimo bloko projektavimas	51
2.2.2.5. Išėjimo įtampos impulsų generatoriaus projektavimas	53
2.2.2.6. Elementarių loginių elementų projektavimas	55
2.2.2.7. SR trigerio projektavimas	56
2.2.2.8. Komparatoriaus projektavimas	57
2.2.3. Ličio baterijos kroviklio projektavimas	58
2.2.4. Įtampos šaltinio perjungimo grandinės projektavimas	61
2.3. Visos sistemos elektrinė principinė schema ir jos tyrimas	63
2.4. Skyriaus apibendrinimas	65
3. TOPOLOGIJOS PROJEKTAVIMAS IR SISTEMOS TYRIMAS	67
3.1. Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio topologijos projektavimas ir tyrimas	67
3.1.1. Atraminės įtampos ir srovės šaltinio topologijos projektavimas	72
3.1.2. Tiesinio įtampą žeminančio keitiklio topologijos projektavimas	74
3.1.3. Vidinio impulsų generatoriaus topologijos projektavimas	75
3.1.4. Loginio sistemos valdymo bloko topologijos projektavimas	76
3.1.5. Išėjimo srovės ribojimo bloko topologijos projektavimas	77
3.1.6. Išėjimo įtampos impulsų generatoriaus topologijos projektavimas	78
3.2. Ličio baterijos kroviklio topologijos projektavimas	79
3.3. Įtampos šaltinio perjungimo grandinės topologijos projektavimas	81
3.4. Visos sistemos topologijos projektavimas ir tyrimas	84
3.5. Sistemos tobulinimo galimybės	85
3.6. Skyriaus apibendrinimas	86
Išvados	88

Literatūra	90
Priedai	92
Priedas A. Suprojektuotų elementų elektrinės principinės schemos	93
Priedas A1. Inverterio elektrinė principinė schema	93
Priedas A2. Loginio IR-NE elektrinė principinė schema	94
Priedas A3. Loginio ARBA-NE elektrinė principinė schema	95
Priedas A4. Loginio IR elektrinė principinė schema	95
Priedas A5. Loginio ARBA elektrinė principinė schema	96
Priedas A6. SR trigerio elektrinė principinė schema	96
Priedas A7. Komparatoriaus elektrinė principinė schema	97
Priedas A7.1. Komparatoriaus diferencinės įėjimo tranzistorių poros elektrinė principinė schema	97
Priedas A7.2. Komparatoriaus elektrinė principinė schema su diferencine įėjimo tranzistorių pora	97
Priedas A8. Vidinio impulsų generatorius	98
Priedas A8.1. Vidinio impulsų generatoriaus simbolis	98
Priedas A8.2. Vidinio impulsų generatoriaus elektrinė principinė schema	98
Priedas A8.3. Komparatoriaus su įėjimo įtampos daliklio koeficiento keitikliu elektrinė principinė schema	99
Priedas A9. Loginio sistemos valdymo bloko principinė elektrinė schema	99
Priedas A10. Išėjimo srovės ribojimo bloko principinė elektrinė schema	100
Priedas A11. Išėjimo įtampos impulsų generatoriaus principinė elektrinė schema	100
Priedas A11.1. Išėjimo įtampos impulsų valdiklio principinė elektrinė schema	100
Priedas A11.2. Išėjimo įtampos impulsų valdiklio ir išėjimo signalą generuojančio tranzistoriaus principinė elektrinė schema	100
Priedas A12. Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio principinė elektrinė schema	101
Priedas A13. Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio išėjimo įtampos svyravimas	101
Priedas A13.1. Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio išėjimo įtampos maksimumai	101
Priedas A13.2. Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio išėjimo įtampos minimumai	101

Paveikslų sąrašas

1 pav. Pirmas keitiklio veikimo etapas – jungiklis įjungtas	15
2 pav. Antras keitiklio veikimo etapas – jungiklis išjungtas	15
3 pav. Pagrindinės keitiklio veikimą apibūdinančios charakteristikos	16
4 pav. Įtampa valdomo žeminančio keitiklio a) struktūrinė schema ir b) laikinės diagramos	19
5 pav. Srove valdomo įtampą žeminančio keitiklio a) struktūrinė schema ir b) laikinės diagramos	20
6 pav. Įtampos histereze valdomo keitiklio a) struktūrinė schema ir b) laikinės diagramos	21
7 pav. Pastovaus įjungimo laiko architektūros keitiklio a) struktūrinė schema ir b) laikinės diagramos	22
8 pav. Baterijos kroviklio veikimo etapai	25
9 pav. Bendroji sistemos blokinė diagrama	28
10 pav. Įtampą žeminančio keitiklio blokinė diagrama	29
11 pav. Ličio baterijos kroviklio blokinė diagrama	30
12 pav. Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio schema su išoriniais komponentais	31
13 pav. Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio elektrinė principinė schema	33
14 pav. Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio veikimą iliustruojančios laikinės diagramos	34
15 pav. Įtampą žeminančio keitiklio efektyvumas, kai išėjimo įtampa lygi 3 V	35
16 pav. Įtampą žeminančio keitiklio efektyvumas, kai išėjimo įtampa lygi 6 V	35
17 pav. Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio tyrimo laikinės diagramos, kai išėjimo įtampa yra 20 V	37
18 pav. Elementarios atraminės srovės ir įtampos generatoriaus schemas pagrindas	38
19 pav. Atraminės srovės ir įtampos šaltinio schema	39
20 pav. Pagrindinio atraminės įtampos ir srovės šaltinio schema	40
21 pav. Atraminės įtampos ir srovės šaltinio operacinio stiprintuvo schema	40
22 pav. Vidinių atraminių srovių blokas	41
23 pav. Atraminės įtampos ir srovės bloko paleidimo grandinė	42
24 pav. Atraminės įtampos ir srovės šaltinio išėjimo charakteristikos, įėjimo įtampa 120 V	43
25 pav. Tiesinio įtampą žeminančio keitiklio elektrinė principinės schemas keturi lygmenys	45
26 pav. RC grandinėlė prijungta prie komparatoriaus (A), RC grandinėlė su dažnio valdymu (B)	46
27 pav. Vidinių impulsų generatoriaus elektrinė principinė schema	47
28 pav. Komparatoriaus su įėjimo įtampos daliklio koeficiento keitikliu elektrinė principinė schema	48
29 pav. Loginio sistemos valdymo bloko simbolis	49
30 pav. Loginio sistemos valdymo bloko elektrinė principinė schema	50
31 pav. Išėjimo srovės ribojimo bloko simbolis	51
32 pav. Išėjimo srovės ribojimo bloko elektrinė principinė schema	52

33 pav. Išėjimo srovės ribojimo bloko elektrinės principinės schemos laikinė diagrama	53
34 pav. Išėjimo įtampos impulsų generatoriaus simbolis	54
35 pav. Inverterio simbolis elektrinėje principinėje schemoje	55
36 pav. Loginių a) IR-NE, b) ARBA-NE, c) IR, d) ARBA simboliai	56
37 pav. SR trigerio elektrinė principinė schema	57
38 pav. Komparatoriaus elektrinė principinė schema	58
39 pav. Ličio baterijos kroviklio principinė elektrinė schema	59
40 pav. Kroviklio testavimo elektrinė principinė schema	60
41 pav. Ličio baterijos kroviklio veikimo laikinės diagramos	61
42 pav. Įtampos šaltinio perjungimo grandinės elektrinė principinė schema	61
43 pav. Šaltinio perjungimo grandinės laikinės diagramos	62
44 pav. Visos sistemos elektrinė principinė schema	63
45 pav. Pilnos sistemos tyrimo elektrinė principinė schema	64
46 pav. Visos sistemos veikimą iliustruojanti laikinė diagrama	65
47 pav. Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio topologija	68
48 pav. Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio veikimo dažnis, kai įėjimo įtampa lygi 10 V	70
49 pav. Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio efektyvumas, kai įėjimo įtampa lygi 10 V	70
50 pav. Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio veikimo dažnis, kai įėjimo įtampa lygi 100 V	71
51 pav. Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio efektyvumas, kai įėjimo įtampa lygi 100 V	72
52 pav. Atraminės įtampos ir srovės šaltinio topologija	73
53 pav. Tiesinio įtampą žeminančio keitiklio topologija	74
54 pav. Vidinio impulsų generatoriaus topologija	76
55 pav. Loginio sistemos valdymo bloko topologija	77
56 pav. Išėjimo srovės ribojimo grandinės topologija	78
57 pav. Išėjimo įtampos impulsų generatoriaus topologija	79
58 pav. Ličio baterijos kroviklio topologija	80
59 pav. Įtampos šaltinio perjungimo topologija	82
60 pav. Įtampos šaltinio perjungimo grandinės tyrimo rezultatai	84
61 pav. Visos sistemos topologijos vaizdas	84

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Keitiklio išėjimo įtampos svyravimo priklausomybė nuo išėjimo srovės	36
2 lentelė. Pagrindiniai atraminės įtampos ir srovės bloko operacinio stiprintuvo parametrai	41
3 lentelė. Atraminės įtampos ir srovės šaltinio pagrindiniai išėjimo charakteristikų parametrai	43
4 lentelė. Išmatuoti tiesinio keitiklio išėjimo įtampos svyravimai	45
5 lentelė. Išmatuoti vidinio impulsų generatoriaus veikimo periodas ir dažnis prie skirtingų įėjimo įtampų	48
6 lentelė. Loginio sistemos valdymo bloko teisingumo lentelė	51
7 lentelė. Loginių IR-NE, ARBA-NE, IR, ARBA elementų teisingumo lentelės	56
8 lentelė. SR trigerio teisingumo lentelė	57
9 lentelė. Komparatoriaus teisingumo lentelė	58
10 lentelė. Atraminės įtampos ir srovės šaltinio topologijos tyrimo rezultatai, įėjimo įtampa 9 V	73
11 lentelė. Atraminės įtampos ir srovės šaltinio topologijos tyrimo rezultatai, įėjimo įtampa 120 V	74
12 lentelė. Tiesinio įtampą žeminančio keitiklio tyrimo rezultatai	75
13 lentelė. Išėjimo srovės ribojimo grandinės tyrimo rezultatai (amperais)	78
14 lentelė. Išėjimo įtampos impulsų generatoriaus tranzistoriaus varžos tyrimo rezultatai (omais)	79
15 lentelė. Ličio baterijos kroviklio elektrinės principinės schemos ir topologijos modeliavimo palyginimas	81

Įvadas. Darbo aktualumas ir tikslas

Darbo metu projektuojamas ir tiriamas integrinis grandynas (IG), kurio paskirtis – tiekti energiją 4 V sistemai. Integrinis grandynas atlieka tris pagrindines funkcijas:

- Žemina įėjimo įtampą iš 10–100 V į 4 V lygį.
- Įkrauna atsarginę ličio jonų bateriją.
- Atlieka automatinį įtampos šaltinio perjungimą, kad apkrova būtų maitinama iš baterijos, kai išorinė įtampa yra neprieinama.

4 V maitinimas yra itin plačiai naudojamas ryšio technologijose nuo 2G iki 5G. Šių ryšio technologijų modemai dažniausiai gali būti maitinami nuo 3,3 V iki 4,3 V, todėl sukonfigūravus įtampą žeminantį keitiklį taip, kad išėjimo įtampa būtų lygi 4 V – suprojektuotas IG puikiai tiktų šiems modemams maitinti.

Vienos celės ličio baterijos nominali įtampa yra 3,7 V. Pilnai įkrautos baterijos įtampa yra 4,2 V. Dėl standartinių ličio baterijų įtampų, anksčiau minėti ryšio technologijų modemai gali būti tiesiogiai maitinami iš baterijos – nereikia papildomo įtampos keitiklio baterijos įtampai žeminti ar aukštinti.

Norint, kad įrenginys, kuriame būtų naudojamas šis IG, veiktų optimaliai, antrinis įtampos šaltinis (baterija) turi būti pakraunama. Siekiant padidinti integracijos laipsnį sistemoje, į projektuojamą IG įtraukiamas ličio baterijos kroviklis. Kai prie sistemos yra prijungta tinkamo lygio išorinė įtampa, įjungiamas įtampą žeminantis keitiklis, kuris tiekia energiją įrenginiui. Tuo pačiu metu įjungiamas IG integruotas ličio baterijos kroviklis. Taip užtikrinama, kad atjungus pirminį įtampos šaltinį, sistema dar kurį laiką galėtų veikti naudojant antrinį įtampos šaltinį.

Integriniame grandyne suprojektuota įtampos šaltinio perjungimo grandinė. Kai prie įrenginio prijungta išorinė įtampa, 4 V įtampa apkrovai yra tiekama iš impulsinio įtampą žeminančio keitiklio. Kai išorinis maitinimas nutrūksta, šis IG blokas pakeičia įtampos šaltinį, kuris yra prijungtas prie apkrovos – šiuo atveju apkrovai energiją tiekia baterija.

Suprojektuotas IG leidžia sumažinti įrenginių matmenis dėl to, kad viename IG integruojama visa įrenginiui reikalinga maitinimo sistema. Toks IG automatiškai prijungia atsarginį įtampos šaltinį prie sistemos, kai pagrindinis šaltinis yra nepasiekiamas – įrenginyje naudojamam mikrovaldikliui ar mikroprocesoriui nereikia stebėti ir valdyti maitinimo grandinių.

Projektuojant elektrinę principinę schemą konsultavo dr. Karolis Kiela, o projektuojant IG topologiją – dr. Marijan Jurgo.

Darbo tikslas – suprojektuoti ir ištirti IG, sudarytą iš įtampą žeminančio keitiklio, ličio jonų baterijos kroviklio ir įtampos šaltinio perjungimo grandinės.

Darbo uždaviniai

1. Apžvelgti įtampą žeminančių keitiklių ir ličio jonų baterijų kroviklių veikimo teoriją ir naudojamą architektūrą, sudaryti kuriamos sistemos blokinę diagramą.
2. Parinkti įrenginio projektavimui tinkamą IG technologiją, suprojektuoti principinę elektrinę schemą ir atlikti jos tyrimą.
3. Suprojektuoti įrenginio topologiją, atlikti jos tyrimą, palyginti topologijos ir elektrinės principinės schemos modeliavimo rezultatus bei pateikti išvadas apie sistemos tobulinimo galimybes.
4. Suprojektuoti ir modeliavimo programinėje įrangoje ištirti sistemą, kurios įėjimo įtampa yra bent 10–100 V, išėjimo įtampa konfigūruojama bent 3–20 V režiuose, išėjimo srovė yra bent 2 A, o kroviklis krauna vienos kelės ličio jonų bateriją bent 100 mA srove.

Naudoti tyrimo ir analizės metodai

Įtampą žeminančio keitiklio su integruotu ličio jonų baterijos krovikliu sistemai projektuoti bei tirti taikyti analitiniai, matematiniai ir kompiuterinio modeliavimo tyrimo metodai. Analitiniai metodai buvo taikomi analizuojant mokslinę literatūrą, įtampą žeminančių keitiklių veikimo principus ir skirtingas architektūras, ličio baterijos kroviklių veikimo principus. Matematiniai ir kompiuteriniai modeliavimo tyrimo metodai buvo taikomi projektuojant integrinio grandyno elektrinę principinę schemą, topologiją ir atliekant sistemos parametrų tyrimus. Integrinio grandyno projektavimui naudota AMS H35B4D3 0,35 μm 120 V KMOP gamybos proceso technologinės bibliotekos. Suprojektuota sistema buvo modeliuojama ir tiriama naudojant Cadence IG projektavimo programų paketą.

Darbo naujumas ir praktinė nauda

Suprojektuotas plačios įėjimo įtampos diapazono impulsinis žeminantysis įtampos keitiklis su integruotu ličio baterijos krovikliu. Šiuo metu rinkoje galima rasti tokio integracijos laipsnio integrinių grandynų, kurių įėjimo įtampa yra iki 15 V. Norint naudoti aukštesnę nuolatinę įtampą sistemoje, reikia naudoti atskirus integrinius grandynus ir iš jų ant spausdintinės plokštės suprojektuoti įtampą žeminantį keitiklį, ličio baterijos kroviklį bei perjungimo grandinę tarp dviejų įtampos šaltinių. Inžinieriai projektuodami įrenginius, kurie naudoja platų įėjimo įtampos diapazoną, neturi galimybės naudoti vieno integrinio grandyno sistemos maitinimo grandinėms įgyvendinti. Dėl to projektuojamų įrenginių spausdintinių plokščių plotas didėja, sistemose naudojama daugiau pavienių komponentų. Šiame darbe suprojektuotoje IG sistemoje įgyvendintas plačios įėjimo įtampos (nuo 10 V iki 100 V) impulsinis įtampą žeminantis keitiklis ir integruotas

ličio baterijos kroviklis. IG integruotas automatinis įtampos šaltinio perjungimas, kuris sumažina išorinių komponentų naudojimo poreikį.

Naudojant šiame darbe suprojektuotą IG sistemą įrenginiuose yra sumažinamas maitinimo grandinėms reikalingas plotas, sumažinamas reikalingų komponentų kiekis. Dėl to įrenginiai gali būti mažesnių matmenų ir sutrumpėja jų gamybos procesas.

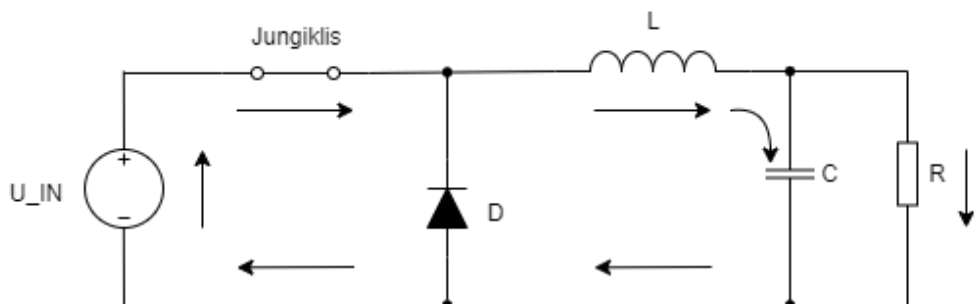
Sistemoje suprojektuotas impulsinis įtampą žeminantis keitiklis veikia nuo 10 V iki 100 V. Šis įtampos diapazonas itin aktualus šiais laikais norint pagaminti įrenginį, kuris galėtų būti naudojamas įvairiose transporto priemonėse. Standartiniai lengvieji automobiliai dažniausiai naudoja 12 V akumulatorius. Didesnių gabaritų automobiliai, profesionali technika dažniau naudoja 24 V akumulatorius. Šiuo metu populiarūs hibridiniai automobiliai – jų akumulatorius dažnu atveju yra 48 V. Vis labiau populiarėja ir kitos elektrinės transporto priemonės. Pavyzdžiui, elektriniai dviračiai tam tikrais atvejais naudoja 72 V ar net 84 V įtampos akumulatorius. Reikia nepamiršti, kad šios įtampos – tai nominalios akumuliatorių įtampos. Dėl ličio jonų ir nikelio-metalo hidrido elektrocheminių savybių (tai dvi populiariausios akumuliatorių rūšys transporto priemonėse), pilnai įkrauto 84 V akumulatoriaus įtampa siekia 96,6 V. Norint pagaminti universalų įrenginį, kuris galėtų veikti su bet kokia šiuo metu rinkoje esančia transporto priemone, maitinimo įtampos diapazonas turėtų būti bent nuo 10 V iki 100 V.

Kadangi ryšio modemų (nuo 2G iki 5G) nominali maitinimo įtampa yra 4 V, dingus išorinio įtampos šaltinio įtampai, modemas galėtų būti maitinamas iš vienos celės ličio jonų baterijos (kurios nominali įtampa yra 3,7 V). Tam Tikrais atvejais transporto priemonėse svarbu turėti atsarginę energijos šaltinį naudotojo sumontuotai papildomai elektronikai. Dažnu atveju ši elektronika – GPS sekimo įranga ar kita komunikacinė ryšio technologijų įranga. Dažnai automobilių vagystės atveju vagys tikisi, kad automobilyje yra sumontuota GPS sekimo įranga, dėl to vagys bando įrangą atjungti nuo transporto priemonės akumulatoriaus. Atjungus tokį įrenginį, jis toliau galėtų veikti dėl vidinės baterijos, kuri tiekia įrenginiui energiją. Šiuo atveju GPS sekimo įranga net ir atjungta nuo išorinio maitinimo, galėtų siųsti GPS koordinates ir pranešti apie transporto priemonės vagystę savininkui. Dėl to suprojektuotoje sistemoje integruotas ličio baterijos kroviklis ir automatinis įtampos šaltinio jungiklis.

1. LITERATŪROS IR TEORIJOS APŽVALGA

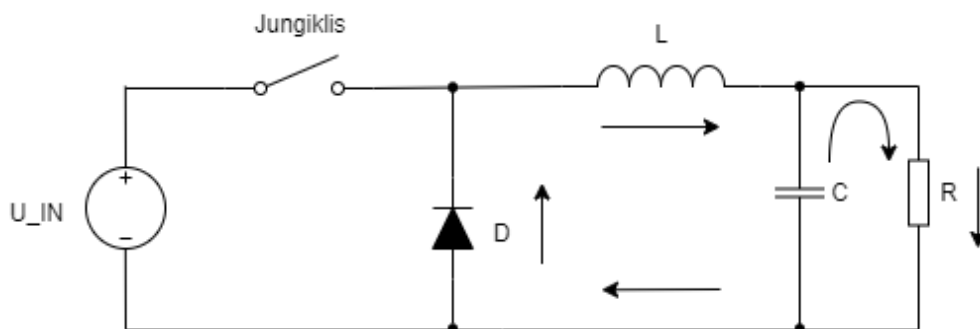
1.1. Įtampą žeminančių keitiklių veikimo principai

Šiame skyriuje apibūdinami impulsiniai įtampą žeminantys keitikliai (angl. *switching buck converters*) ir jų veikimo principai. Pagrindinės paprasčiausio įtampą žeminančio keitiklio sudedamosios dalys – jungiklis, diodas, induktyvumo ritė, kondensatorius ir apkrova, kuriai maitinti yra naudojama sugeneruota įtampa. Vietoje jungiklio integriniuose grandynuose naudojamas tranzistorius, tačiau paprastumo dėlei šiuo metu schema analizuojama tranzistorių pakeičiant mechaniniu jungikliu. Prie tokios grandinės prijungiamas nuolatinės įtampos šaltinis, iš kurio įtampos generuojama žemesnio potencialo įtampa. Keitiklio veikimą galima paaikškinti analizuojant grandinę dviem etapais.



1 pav. Pirmas keitiklio veikimo etapas – jungiklis įjungtas

Pirmas etapas pavaizduotas 1 paveiksle – jungiklis yra įjungtas. Rodyklėmis pavaizduota srovės tekėjimo kryptis. Nuolatinė įtampa yra prijungiamą prie induktyvumo ritės. Induktyvumo rite tekanti srovė didėja, dėl to didėja ir induktyvumo ritėje sukaupiamas magnetinio lauko stipris. Kitaip tariant, induktyvumo ritėje yra kaupiama energija magnetinio lauko pavidalu. Tuo pat metu yra įkraunamas kondensatorius, kuriame energija yra sukaupiamą elektrinio lauko pavidalu. Ant rezistoriaus krintanti įtampa yra lygi $U_{IN} - I \cdot L$. Diodas šioje grandinėje yra atvirkščias įtampos poliarumui, todėl juo srovė neteka.

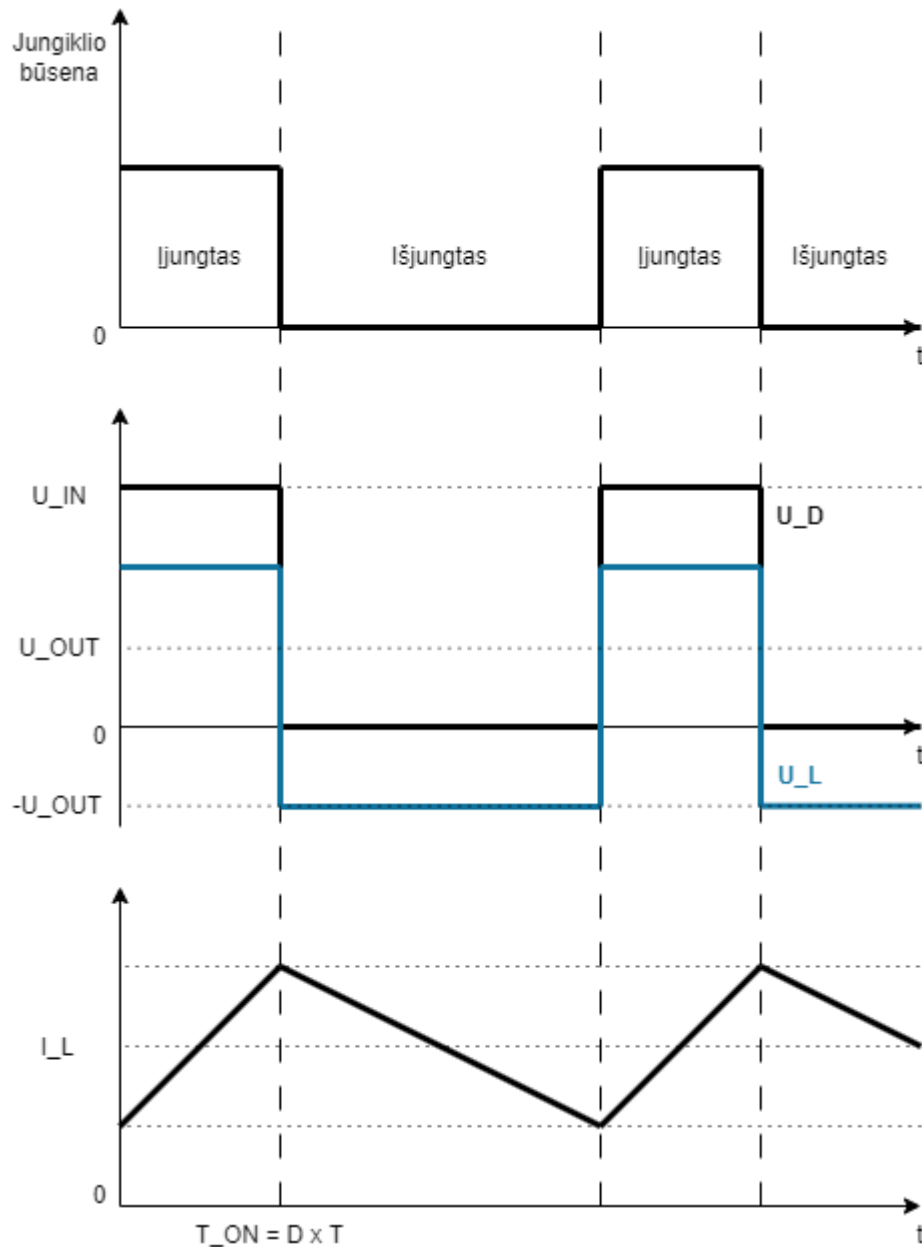


2 pav. Antras keitiklio veikimo etapas – jungiklis išjungtas

Antras etapas pavaizduotas 2 paveiksle – jungiklis yra išjungtas. Nuolatinė įtampa yra atjungiamą nuo induktyvumo ritės. Ritė šiuo atveju veikia kaip srovės šaltinis. Sukaupia magnetinė

energija yra verčiama elektrine srove, kuri teka per apkrovą. Kondensatorius šiuo atveju yra iškraunamas. Srovė teka per diodą, kadangi jo poliarumas atitinka srovės tekėjimo kryptį. Sistemoje sukaupta energija yra naudojama apkrovos įtampai ir srovei palaikyti.

Norint pasirinkti konkrečių įtampos keitiklio komponentų nominalus ir pagrindinius veikimo parametrus, reikia detaliau nagrinėti keitiklio veikimą. Šiame skyriuje skaičiavimai atliekami priimant, kad keitiklis veikia nepertraukiamos srovės režimu (angl. *Continuous Current Mode*) ir, kad keitiklio vidutinės vertės per periodą yra stabilios būsenų (angl. *Steady State*). 3 paveiksle pavaizduoti pagrindinių keitiklio parametrų kitimo grafikai [2].



3 pav. Pagrindinės keitiklio veikimą apibūdinančios charakteristikos

Kai jungiklis yra įjungtas, induktyvumo rite tekanti srovė I_{L1} didėja. I_{L1} statumą galima užrašyti formule:

$$I_{L1} = \frac{U_{IN} - \overline{U_{OUT}}}{L}. \quad (1)$$

Išjungus jungiklį induktyvumo rite tekanti srovė mažėja. Kadangi priimta, jog keitiklio vidutinės vertės per periodą yra stabilios būsenos, periodo pabaigoje ritės srovė pasiekia pradinį tašką. Šiuo atveju ritės srovė I_{L2} galima aprašyti formule:

$$I_{L2} = \frac{-\overline{U_{OUT}}}{L}. \quad (2)$$

Santykinį keitiklio įjungimo laiką per periodą pažymėjus D , o periodą T , galima užrašyti keitiklio vieno periodo balanso lygtį:

$$\frac{U_{IN} - \overline{U_{OUT}}}{L} DT = \frac{\overline{U_{OUT}}}{L} (1 - D)T. \quad (3)$$

Supaprastinus ir pertvarkius šią lygtį, galima išreikšti santykinį keitiklio įjungimo laiką per įėjimo ir išėjimo įtampas:

$$D = \frac{\overline{U_{OUT}}}{U_{IN}}. \quad (4)$$

Iš lygties galima išreikšti vidutinę išėjimo įtampą $\overline{U_{OUT}}$. Matoma, kad projektuojamas IG turi valdyti jungiklį ir parinkti santykį D taip, kad priklausomai nuo įėjimo įtampos U_{IN} , būtų tinkamai sugeneruojama išėjimo įtampa $\overline{U_{OUT}}$.

$$\overline{U_{OUT}} = D \cdot U_{IN}. \quad (5)$$

Pagal darbo užduotį įėjimo įtampa gali būti bent nuo 10 V iki 100 V, o išėjimo įtampa konfigūruojama režiuose bent nuo 3 V iki 20 V. Taigi projektuojamas keitiklis turi tinkamai parinkti D visais atvejais, kad išėjimo įtampa būtų stabili. Daroma prielaida, kad sistema yra sukonfigūruota taip, kad norima išėjimo įtampa yra 5 V. Prie sistemos prijungus 10 V įėjimo įtampą, keitiklis turi parinkti koeficientą D lygų 0,5, kad būtų tenkinama (4) lygties sąlyga ir išėjimo įtampa būtų stabili. Kitaip tariant, jungiklis turi būti įjungtas pusę periodo. Įėjimo įtampai pakilus iki 100 V, keitiklis turi sureaguoti ir pakeisti koeficientą D į 0,05. Šiuo atveju jungiklis įjungiamas tik 1/20 periodo dalį. Šis koeficiento D kitimas turi vykti pakankamai greitai, kad staiga pakitus įėjimo įtampai, išėjimo įtampa išliktų stabili.

Atliekant suprojektuotos sistemos tyrimą, svarbu tinkamai parinkti prie IG prijungtus išorinius komponentus. Pagrindiniai komponentai be kurių impulsinis įtampą žeminantis keitiklis negali veikti – išėjimo grandinėje prijungta induktyvumo ritė ir kondensatoriai. Induktyvumo ritė kaupia magnetinio lauko energiją – nuo ritės induktyvumo priklauso rite tekančios srovės dydis ir srovės kitimo greitis. Standartinis ričių induktyvumas tokio tipo keitikliuose yra nuo 1 μH iki 150

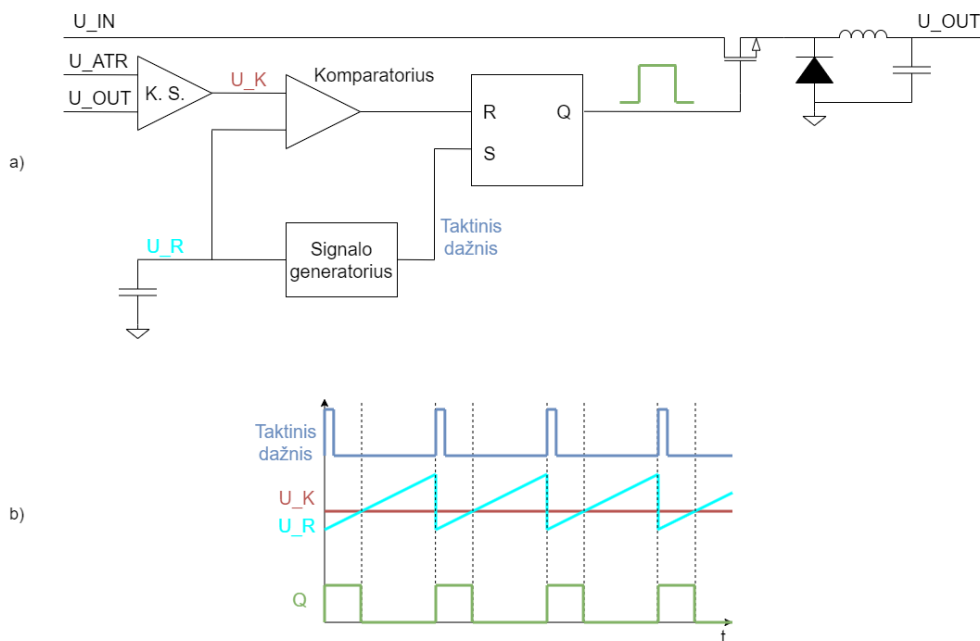
μH . Išėjimo grandinėje prijungti kondensatoriai kaupia elektrinio lauko energiją. Išėjimo grandinės talpa gali būti nuo kelių dešimčių iki kelių tūkstančių μF . Parenkant tinkamą išėjimo induktyvumą ir talpą galima optimizuoti sistemos veikimą – nuo šių parametru priklauso sistemos efektyvumas ir išėjimo įtampos svyravimas. Sistemos efektyvumas ir išėjimo įtampos svyravimas yra du pagrindiniai parametrai, kurie nusako, ar tinkamai veikia impulsinis įtampą žeminantis keitiklis, dėl to atliekant tyrimą būtina vertinti šiuos parametrus.

1.2. Įtampą žeminančių keitiklių architektūros tipų apžvalga

Ankstesniame poskyryje aptarti bendri įtampą žeminančių keitiklių veikimo principai. Projektuojant realų įtampos keitiklį, vietoje minėtojo jungiklio naudojamas tranzistorius. Yra daug praktikoje naudojamų būdų, kaip ir pagal kokius parametrus galima valdyti šį tranzistorių. Priklausomai nuo parinkto valdymo signalo formavimo būdo bus parenkamas skirtingas įtampos keitiklio architektūra. Šiame poskyryje apžvelgiami įvairūs žeminančių įtampos keitiklių architektūros tipai. Apibendrinamos jų stiprybės ir silpnybės bei galimos problemos projektuojant sistemą. Atlikus įvairių keitiklių tipų architektūros apžvalgą bus parenkama tinkama architektūra šiam darbui.

1.2.1. Įtampa valdomų keitiklių architektūra

Vienas populiariausių įtampą žeminančių keitiklių architektūros tipų – įtampa valdomo keitiklio architektūra (angl. *Voltage mode buck converters*). Tokio keitiklio architektūros pagrindinės valdymo dalys ir veikimą apibūdinančios laikinės diagramos pavaizduotos 4 paveiksle [6].



4 pav. Įtampa valdomo žeminančio keitiklio a) struktūrinė schema ir b) laikinės diagramos

Įtampa valdomų keitiklių tranzistorius yra valdomas SR tipo trigeriu. SR trigeris turi du valdymo signalus – S nustatymo signalą (angl. *set*) ir R išvalymo signalą (angl. *reset*). Kai į trigerį siunčiamas aukšto lygio S signalas, išėjimas Q yra nustatomas į aukštą lygį, o kai siunčiamas aukšto lygio R signalas, Q yra išvalomas į žemą lygį. Nustatymo signalas S yra sukuriamas IG viduje esančio signalų generatoriaus kuriamo periodinio taktinio dažnio signalo (angl. *clock signal*). Signalų generatorius turi ir antrą paskirtį – jis įkrauna kondensatorių skirtą periodiniam išvalymo signalui generuoti. Periodo pradžioje yra sukuriamas trumpas aukšto lygio S signalas ir iškraunamas kondensatorius prijungtas prie U_R tinklo. Viso periodo metu, U_R tinklo kondensatorius yra įkraunamas taip sukuriant pjūklo formos signalą. Kai U_R įtampa viršija klaidos stiprintuvo kuriamą įtampą U_K , komparatorius sukuria išvalymo signalą R . SR trigerio išėjimo signalas Q yra išvalomas į žemą lygį ir tranzistorius yra uždaromas. Klaidos stiprintuvas sukuria išėjimo įtampą U_K tik tada, jei išėjimo įtampa U_{OUT} yra žemesnė už vidinę atraminę įtampą U_{ATR} . Jei išėjimo įtampa U_{OUT} viršija U_{ATR} , tuomet klaidos stiprintus uždraudžia tranzistoriaus įjungimą laikydamas įtampą U_K žemo lygio būsenoje. Kai U_K įtampa yra žemo lygio, komparatorius visada laiko nustatytą aukšto lygio R ir neleidžia įjungti tranzistoriaus iki kol išėjimo įtampa nukris iki per žemo lygio. Taip sistema užtikrina stabilią norimą išėjimo įtampą. [3]

Įtampa valdomo keitiklio privalumai:

- Nesudėtinga grįžtamojo ryšio grandinė;
- Gana atsparus triukšmams išėjimo įtampos tinkle.

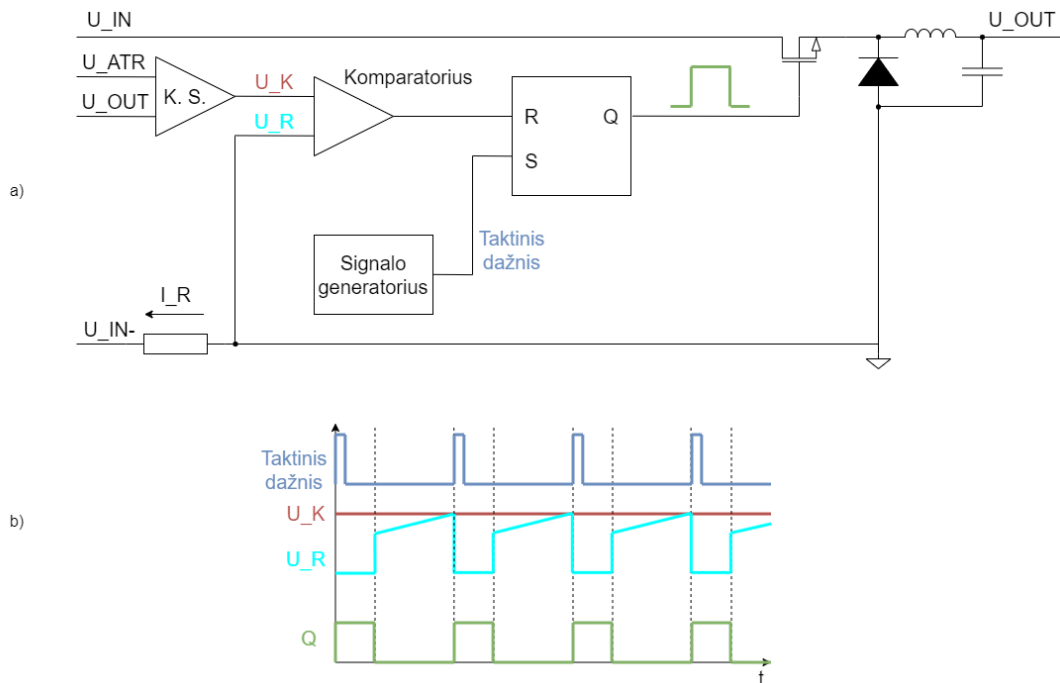
Įtampa valdomo keitiklio trūkumai:

- Reikalauja palyginti daug išorinių komponentų. Kad keitiklis veiktų stabiliai, reikalingas grįžtamojo ryšio grandinės kompensavimas;
- Gana lėtai reaguoja į pasikeitusią apkrovos srovę;
- Reikia atskiros grandinės siekiant apsaugoti nuo per didelės apkrovos srovės.

1.2.2. Srove valdomų keitiklių architektūra

Srove valdomas įtampą žeminantis keitiklis (angl. *Current mode buck converter*) veikia panašiai kaip ir įtampa valdomas keitiklis. Tokio keitiklio pagrindinės valdymo dalys ir veikimą apibūdinančios laikinės diagramos pavaizduotos 5 paveiksle [6]. Kai išėjimo įtampa U_{OUT} yra mažesnė nei atraminė įtampa U_{ATR} , keitiklis generuoja signalą, kuris pastoviu dažniu prijunginėja įėjimo įtampą U_{IN} prie induktyvumo ritės. Pagrindinis skirtumas nuo įtampa valdomo keitiklio – pastovus įjungimo dažnis yra generuojamas naudojant ne vidinį pjūklo formos signalą, o matuojant išėjimo srovę. Išėjimo įtampai nukritus žemiau leistinos ribos, prie ritės prijungiama įėjimo įtampa.

Išėjime srovė teka į žemąjį grandinės potencialo tašką per mažos vertės rezistorių. Didėjant srovei I_R , didėja ant rezistoriaus krintanti įtampa. Kai ant rezistoriaus krintanti įtampa U_R yra didesnė už klaidos stiprintuvo išėjimo įtampą U_K , įėjimo įtampa U_{IN} yra atjungžiama nuo ritės. Tranzistoriaus valdymui naudojamas SR trigeris, analogiškai kaip ir įtampa valdomo keitiklio atveju. Taip formuojamas pastovaus dažnio valdymo signalas matuojant srovę. [4]



5 pav. Srove valdomo įtampą žeminančio keitiklio a) struktūrinė schema ir b) laikinės diagramos

Srove valdomo keitiklio privalumai:

- Nereikia atskiros srovės matavimo grandinės;
- Greitesnis atsakas į įėjimo įtampos pasikeitimus, kadangi induktyvumo ritės srovė yra proporcinga įėjimo įtampai;
- Reikia paprastesnės grįžtamojo ryšio kompensavimo grandinės.

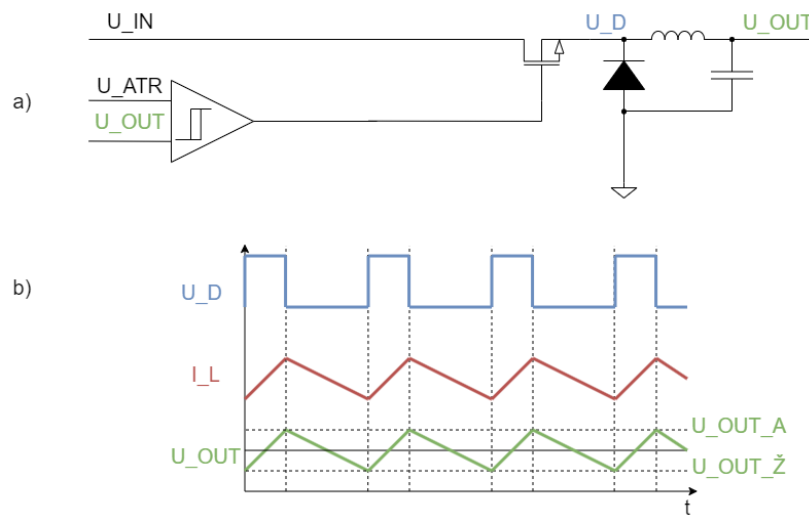
Srove valdomo keitiklio trūkumai:

- Sudėtingesnė keitiklio matematinė analizė dėl dviejų grįžtamojo ryšio grandinių;
- Tranzistoriaus įjungimo metu atsiranda srovės šuolis, kuris gali sugeneruoti klaidų kuriamoje sistemoje.

1.2.3. Įtampos histereze valdomų keitiklių architektūra

Šiek tiek supaprastinus įtampa valdomo keitiklio architektūrą yra sukurta įtampos histereze valdomo keitiklio (angl. *Hysteretic control buck converter*) architektūra. Šio keitiklio pagrindinės dalys ir veikimą apibūdinančios laikinės diagramos pateiktos 6 paveiksle [6]. Šiuo atveju keitiklis neturi vidinio taktinio dažnio generatoriaus ir pjūklo formos signalo generatoriaus. Dėl to, kai

išėjimo įtampa U_{OUT} nukrinta žemiau už keitiklio vidinę atraminę įtampą U_{ATR} , komparatoriaus išėjimo įtampa įjungia įtampos valdymo tranzistorių. Kai U_{OUT} pasiekia norimą lygį (viršija U_{ATR}), tranzistorius yra išjungiamas. Projektuojant tokio tipo keitiklį yra parenkama histerezė, kurios režiuose dirba keitiklis. Histerezę sudaro dvi įtampos, U_{OUT_A} – aukštesnioji histerezės režio įtampa ir $U_{OUT_Ž}$ – žemesnioji histerezės režio įtampa. Tokio tipo keitiklio veikimą supaprastintai galima paaiškinti – kai U_{OUT} pasiekia U_{OUT_A} , keitiklis atjungia tranzistorių, kai U_{OUT} nukrenta iki $U_{OUT_Ž}$, keitiklis įjungia tranzistorių. [5]



6 pav. Įtampos histereze valdomo keitiklio a) struktūrinė schema ir b) laikinės diagramos

Tokio keitiklio pagrindiniai privalumai:

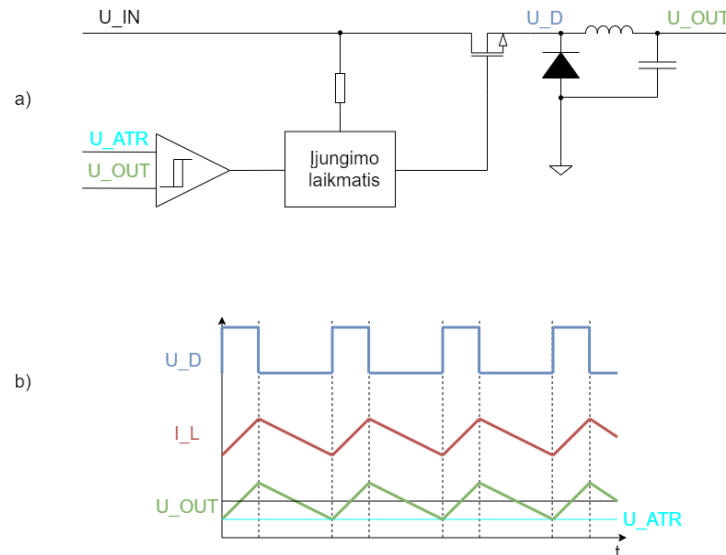
- Lengvai įgyvendinama architektūra (dėl santykinai mažai vidinių reikalingų elementų);
- Greitas keitiklio atsakas į pasikeitusią apkrovos srovę arba įėjimo įtampą;
- Dėl nepastovaus valdymo dažnio, esant mažoms apkrovos srovėms, keitiklio veikimo dažnis sumažėja, dėl to efektyvumas yra didesnis lyginant su įtampa valdomu keitikliu esant mažai išėjimo srovei.

Tokio keitiklio pagrindiniai trūkumai:

- Dėl nepastovaus veikimo dažnio, yra rizika, kad valdymo tranzistorius bus įjungtas pakankamai ilgą laiką ir induktyvumo ritė spės įsisotinti;
- Kadangi veikimas pagrįstas išėjimo įtampos svyravimais, tinkamam keitiklio veikimui reikalinga palyginti didesnė nuoseklioji parazitinė varža (angl. *Equivalent Series Resistance, ESR*);
- Keitiklis yra jautrus triukšmams išėjimo įtampos linijoje. Atsiradus triukšmams išėjimo įtampoje, keitiklio komparatorius gali sureaguoti į triukšmą ir netinkamai įjungti ar išjungti tranzistorių.

1.2.4. Pastovaus įjungimo laiko keitiklių architektūra

Siekiant kovoti su problemomis, kylančiomis naudojant histereze valdomo įtampos keitiklio architektūrą, sukurtas pastovaus įjungimo laiko keitiklis (angl. *Constant on-Time converter*). Tokio keitiklio pagrindinės architektūros dalys ir veikimą apibūdinančios laikinės diagramos pavaizduotos 7 paveiksle. [6]



7 pav. Pastovaus įjungimo laiko architektūros keitiklio a) struktūrinė schema ir b) laikinės diagramos

Šio keitiklio pagrindą sudaro histereze valdomo įtampos keitiklio architektūra. Sistemoje papildomai integruojamas tranzistoriaus įjungimo laikmatis. Taip yra apsaugoma nuo per ilgo tranzistoriaus įjungimo laiko ir neleidžiama induktyvumo ritei įsisotinti. Įjungimo laikas yra tiesiškai priklausomas nuo įėjimo įtampos, dėl to galima matematiškai įrodyti, jok esant stabiliai įėjimo įtampai, toks keitiklis veikia pastoviu dažniu [7].

Pastovaus įjungimo laiko architektūros įtampą žeminančio keitiklio privalumai:

- Visi privalumai kaip ir įtampos histereze valdomo keitiklio;
- Apsauga nuo induktyvumo ritės įsisotinimo;
- Paprasčiau apibrėžtas keitiklio veikimas dėl pastovaus veikimo dažnio (esant pastoviai įėjimo įtampai);

Pastovaus įjungimo laiko architektūros įtampą žeminančio keitiklio trūkumai:

- Kadangi veikimas pagrįstas išėjimo įtampos svyravimais, tinkamam keitiklio veikimui santykinai didesnė nuosekioji parazitinė varža;
- Keitiklis yra jautrus triukšmams išėjimo įtampos linijoje. Atsiradus triukšmams išėjimo įtampoje, keitiklio komparatorius gali sureaguoti į triukšmą ir netinkamai įjungti ar išjungti tranzistorių.

1.3. Ličio jonų baterijų kroviklių apžvalga

Kiekvienais metais ličio baterijos tampa vis populiareesnės dėl didelio energijos tankio ir ilgos gyvavimo trukmės. Baterijos yra santykinai mažos ir gali būti įkraunamos bei iškraunami tūkstančius kartų. Norint užtikrinti ličio baterijų ilgaamžiškumą ir saugumą, reikia taikyti specialius įkrovimo metodus. Tam naudojami ličio baterijų kroviklių integriniai grandynai, kurie leidžia kompaktiškame dydyje užtikrinti šiuos krovimo metodus [8].

Ličio baterijos kroviklio integrinis grandynas yra mažas elektronikos komponentas, reguliuojantis ličio polimerų baterijų įkrovimą. Jis užtikrina reikiamą įkrovimo srovę ir įtampą, kartu stebėdamas baterijos būklę, kad būtų išvengta per didelio įkrovimo, per didelio iškrovimo ir perkaitimo. Priklausomai nuo taikymo srities, kroviklio integrinis grandynas gali būti integruotas į atskirą įkrovimo įrenginį arba įmontuotas į pačią bateriją.

Ličio baterijų kroviklių integriniai grandynai paprastai turi loginį bloką, kuris valdo įkrovimo procesą. Šis blokas reguliuoja įkrovimo srovę ir įtampą pagal baterijos poreikius ir sukurtos sistemos nustatymus. Loginis blokas taip pat stebi baterijos temperatūrą, kad būtų užtikrintas saugus ir efektyvus įkrovimas.

Ličio baterijų kroviklių integriniai grandynai užtikrina tikslų ir patikimą įkrovimą. Baterija visada įkraunama tinkamu lygiu, o tai maksimaliai padidina jos tarnavimo laiką ir našumą. Ličio baterijų kroviklių integriniai grandynai sukurti taip, kad neleistų baterijai būti perkrautai ar perkaisti. Perkraunant ličio bateriją, ji gali išsipūsti ar net užsidegti, todėl svarbu apsaugoti bateriją, tuo pačiu apsaugant įrenginį ir jo vartotoją. Kadangi šie krovikliai yra kompaktiški ir efektyvūs, juos galima integruoti į mažus prietaisus ir jie suvartoja labai mažai energijos, o tai labai svarbu nešiojamojoje elektronikoje.

Ličio baterijų kroviklių integriniai grandynai naudojami įvairiose srityse – gaminant buitine elektroniką ir net medicinos prietaisus. Kelios dažniausiai pasitaikančios taikymo sritys – mobilieji telefonai, planšetiniai kompiuteriai, dronai, medicinos prietaisai, elektromobiliai ir t.t.

Tam tikruose elektronikos įrenginiuose ličio baterijos naudojamos kaip antriniai energijos šaltiniai. Šios sistemos skirtos veikti naudojant išorinį maitinimo šaltinį, o baterija naudojama tik tuomet, kai išorinis šaltinis yra atjungtas ar neveikiantis. Tokie įrenginiai gali būti automobilyje naudojama elektronika, pavyzdžiui, GPS sekimo įranga, vairuotojo identifikavimo įranga, jutikliai ir pan. Daugelyje medicinos prietaisų naudojamos ličio baterijos kaip atsarginis energijos šaltinis, jei netikėtai nutrūktų elektros energijos tiekimas iš pagrindinio šaltinio.

Būtent tokiam panaudojimo būdui kuriama sistema šio darbo metu. Integrinis grandynas skirtas naudoti įrenginiuose su išoriniu maitinimo šaltiniu, tačiau kaip atsarginis energijos šaltinis naudojama ir ličio baterija. Šioje sistemoje ličio baterijos kroviklis yra integruotas į bendrą integrinį grandyną su įtampą žeminančiu keitikliu. Be to sistemoje yra integruotas jungiklis, kuris

automatiškai prijungia bateriją kaip maitinimo šaltinį tuo metu, kai pagrindinio maitinimo šaltinio nėra prijungto. Kadangi sistemoje visos trys funkcijas atliekančios posistemės yra integruotos į vieną IG, produktas, kuriame būtų naudojama ši sistema gali būti mažesnių matmenų.

Pagrindiniai du ličio baterijų kroviklių architektūros tipai – linijinis ir impulsinis krovikliai. Kuriamoje sistemoje naudojamas linijinis ličio baterijų kroviklis. Tokio tipo kroviklis yra paprastesnis, mažesnių matmenų, lengviau integruojamas į bendrą sistemą. Linijiniai krovikliai puikiai tinka sistemoms, kuriose naudojamos nedidelės ličio baterijos (iki 1000 mAh), krovimo srovės nėra didelės (iki 500 mA). Impulsiniai krovikliai pasižymi didesniu energijos efektyvumu, jie yra tinkami sistemoms su didelės talpos baterijomis, tačiau tokie krovikliai yra didesnių matmenų ir jiems reikia daugiau išorinių pasyviųjų komponentų norint integruoti šį kroviklį į didesnę sistemą ar įrenginį.

8 paveiksle pateikiamas projektuojamo baterijos kroviklio veikimo etapus vaizduojantis grafikas. Grafike pavaizduoti 5 kroviklio veikimo etapai:

1. Bandomasis įkrovimas. Ličio polimerų baterijos dažniausiai viduje turi apsaugos grandinę, kuri gali suveikti ir atjungti bateriją nuo išorinių įrenginių. Bandomojo įkrovimo metu kroviklis iki 3 sekundžių bando krauti bateriją 10 mA srove. Jei po šio bandymo kroviklis vis dar nepamatuoja pakankamai aukštos baterijos įtampos (bent 2 V), tuomet kroviklis supranta, kad baterijos apsauga vis dar veikia arba baterija nėra prijungta. Šis patikrinimas yra periodinis ir atliekamas kas 20 sekundžių iki kol baterijos įtampa yra aptinkama ir kroviklis gali pereiti į kitą krovimo etapą.

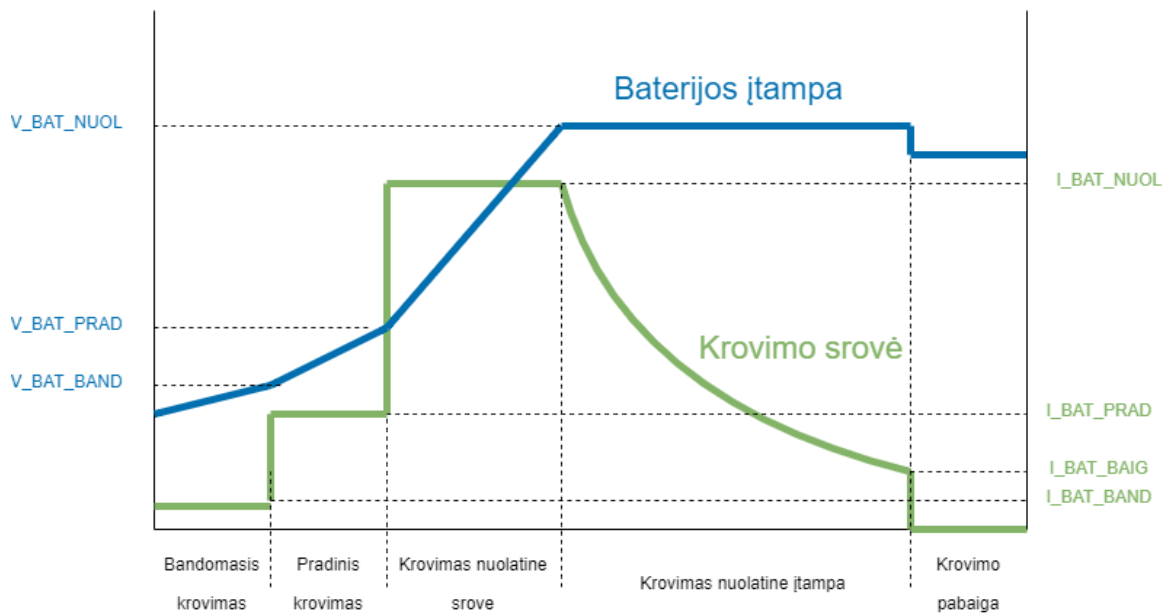
2. Pradinis įkrovimas – šio etapo metu kroviklis 20 mA srove krauna bateriją iki 3 V įtampos lygio. Šis krovimas yra svarbus, jei kraunama itin giliai iškrauta baterija arba baterija, kuri ilgą laiką buvo nenaudota ir dėl savaiminio išsikrovimo smarkiai išsikrovė.

3. Krovimas nuolatine srove – tai greitojo krovimo etapas. Kroviklis bateriją krauna maksimalia leidžiama srove, kuri yra konfigūruojama prie projektuojamo integrinio grandyno prijungiant parinktą rezistorių. Šio etapo metu baterijos įtampa sparčiai kyla ir pasiekus 4,2 V lygį (tai yra ličio polimerų baterijos maksimali įtampa) - kroviklis pereina į kitą krovimo etapą.

4. Krovimas nuolatine įtampa – šio etapo metu kroviklis bateriją krauna nuolatine 4,2 V įtampa. Šio etapo metu baterija yra kraunama lėčiau, tačiau dėl nuolatinės įtampos krovimo yra maksimaliai išnaudojamos baterijos energijos kaupimo savybės – baterija yra maksimaliai pakraunama. Krovimo srovė po truputį mažėja ir kai krovimo srovė yra lygi 1/10 maksimalios leistinos krovimo srovės, tuomet kroviklis nustoja krauti ir pereina į kitą veikimo etapą.

5. Krovimo pabaiga – kai krovimo srovė yra maža, kroviklis nustoja krauti bateriją. Šio etapo metu įsijungia laikmatis, kuris neleidžia krauti baterijos bent 30 sekundžių. Ši apsauga reikalinga, kadangi nustojus krauti bateriją, dėl jos cheminių savybių, baterijos įtampa gali šiek tiek

nukristi (iki 4,1–4,15 V lygio). Kuo senesnė baterija, tuo daugiau ši įtampa nukrinta dėl su laiku didėjančios vidinės varžos. Kad kroviklis nepradėtų vėl iš karto krauti baterijos, yra įvedama ši apsauga.



8 pav. Baterijos kroviklio veikimo etapai

Pagrindiniai funkciniai baterijos kroviklio veikimo etapai yra krovimas nuolatine srove ir krovimas nuolatine įtampa. Įgyvendinus šiuos du etapus sistema geba pilnai įkrauti ličio jonų bateriją. Kiti trys etapai yra skirti sistemos energetinio efektyvumo didinimui. Šio darbo metu suprojektuotas baterijos kroviklis įgyvendina krovimo nuolatine srove ir įtampa etapus. Pagrindinis kroviklio parametras, kuris yra siekiamas šio darbo metu – krovimo srovė turi būti bent 100 mA, dėl to, kad būtų pakankamai greitai pakraunama baterija. Kiti kroviklio veikimo etapai yra viena iš sistemos tobulinimo krypčių.

1.4. Skyriaus apibendrinimas

Atlikta impulsinių įtampų žeminančių keitiklių veikimo principų apžvalga. Tolesniuose skyriuose aprašyto tyrimo metu būtina tinkamai parinkti prie keitiklio prijungtus išorinius komponentus (induktyvumo ritę ir kondensatorius). Nuo suprojektuotos sistemos ir parinktų išorinių komponentų priklauso pagrindiniai analizuojami keitiklio parametrai – keitiklio efektyvumas ir išėjimo įtampos svyravimas.

Aptarti keturi įtampų žeminančių keitiklių architektūros tipai – valdomų įtampa, srove, įtampos histereze ir pastovaus įjungimo laiko. Baigiamajam magistro darbui parinkta pastovaus įjungimo laiko architektūra kaip pagrindas, tačiau siekiant išspręsti tam tikras problemas ir pagerinti keitiklio veikimą, siūlomi sprendimai naudoti ir iš kitų keitiklių architektūros tipų. Pagrindinės pastovaus įjungimo laiko architektūros pasirinkimo priežastys – dinamiškas veikimo dažnis

(priklausantis nuo įėjimo įtampos) ir palyginti geras efektyvumas, kai išėjimo srovė yra maža, greitas atsakas į pasikeitusią apkrovos srovę ir gana paprastas keitiklio architektūros įgyvendinimas. Projektuojant šį keitiklį nereikia projektuoti vidinio signalų generatoriaus, tačiau reikia atidžiai stebėti keitiklio veikimo dažnį, nes pastovaus įjungimo laiko architektūros tipo keitiklio veikimo dažnis priklauso nuo įėjimo įtampos. Projektuojamo keitiklio užduotis yra veikti nuo 10 V iki 100 V. Kadangi tarp minimalios įtampos ir maksimalios veikimo įtampos yra 10 kartų skirtumas, naudojant šią architektūrą, veikimo dažnis keičiasi 10 kartų. Siekiant išvengti tokio didelio pokyčio, keitiklyje projektuojami jungikliai, kurie esant tam tikroms įėjimo įtampos vertėms pakeičia veikimo dažnį. Dėl tokio sprendimo keitiklis veikia siauresniame dažnių ruože ir keitiklio veikimas yra mažiau priklausomas nuo įėjimo įtampos. Siekiant apsaugoti induktyvumo ritę nuo įsisotinimo, keitiklyje yra suprojektuota srovės matavimo grandinė, kuri išmatavus per didelę srovę atjungia įėjimo įtampą nuo ritės. Šie ir kiti keitiklio architektūros bei veikimo sprendimai detaliau aprašyti antrame skyriuje.

Atlikta ličio jonų baterijos kroviklių apžvalga. Aprašyti impulsinių ir tiesinių kroviklių privalumai, trūkumai ir panaudojimo sritys. Aprašyti standartiniai ličio jonų baterijos kroviklio veikimo etapai. Baigiamajam magistro darbui parinktas tiesinio kroviklio tipas – šis keitiklio tipas yra paprastesnis, tinkamas nedidelėms baterijoms krauti (iki 1000 mAh) ir tinkamas, kai krovimo srovė nėra didelė (iki 500 mA). Parinkta projektuoti kroviklį, kuris įgyvendina du pagrindinius kroviklio veikimo etapus – krovimą nuolatine srove ir krovimą nuolatine įtampa. Įgyvendinus šiuos du etapus sistema gebės pilnai įkrauti ličio jonų bateriją. Kitų kroviklio veikimo etapo įgyvendinimas yra viena iš sistemos tobulinimo krypčių, tačiau jos nėra projektuojamos šio darbo metu.

2. SISTEMOS PROJEKTAVIMAS

Šiame skyriuje pateikiamas kuriamos sistemos projektavimo aprašymas. Sudaromos sistemos blokinės diagramos, pagal kurias kuriama sistema. Pagal sudarytas blokines diagramas projektuojami atskiri principinės elektrinės schemos blokai. Šie blokai tiriami ir jungiami į didesnius blokus siekiant sukurti bendrą sistemą pagal darbo užduotyje numatytus parametrus. Skyriuje pateikiami principinės elektrinės schemos veikimo paaiškinimai ir kompiuterinių modeliavimų rezultatai.

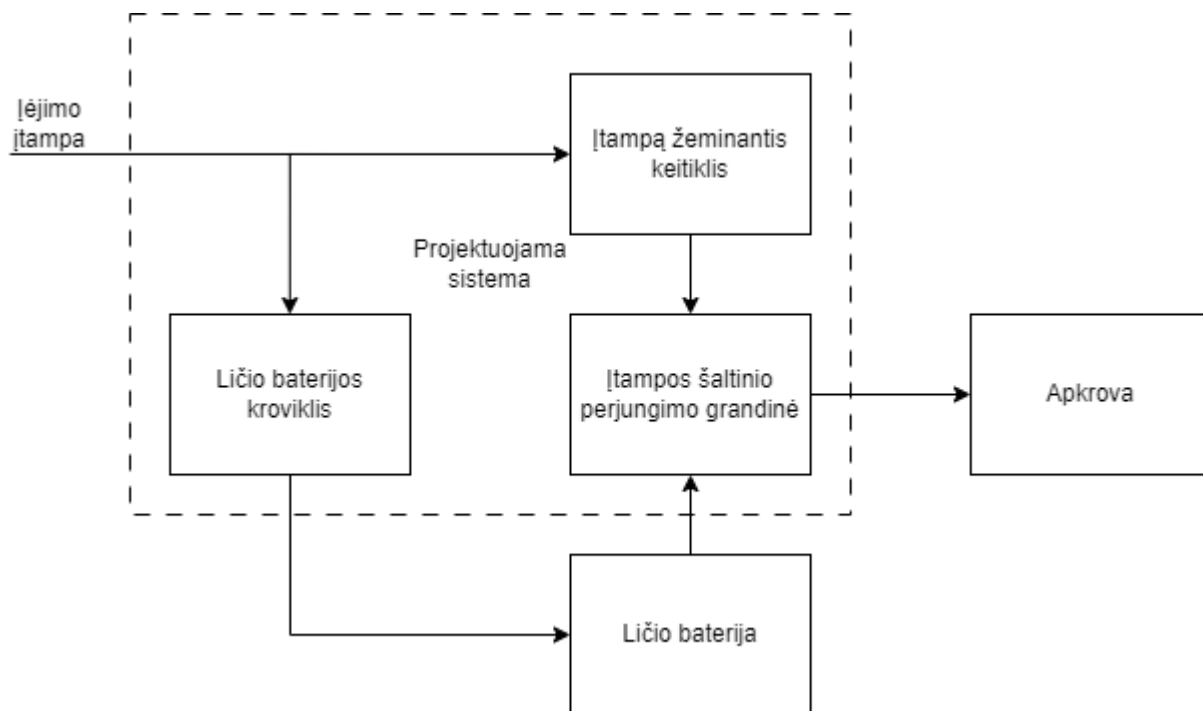
2.1. Sistemos blokinių diagramų sudarymas

Šiame poskyryje sudaromos kuriamos sistemos blokinės diagramos. Iš pradžių sudaroma bendroji diagrama, kuri skirta apžvelgti visą sistemą ir paaiškinti jos veikimo principus. Toliau sudaromos kiekvienos sistemai sukurti reikalingos dalies blokinės diagramos.

2.1.1. Bendrosios sistemos blokinės diagramos sudarymas

Siekiant apibrėžti konkrečią IG sandarą sudaroma blokinė diagrama, atvaizduojanti įrenginio funkcijų įgyvendinimo būdus. 9 paveiksle pavaizduota bendroji sistemos blokinė diagrama. Sistemos pagrindinės funkcijos:

- Sistema turi įėjimo įtampą (kuri gali būti nuo 10 V iki 100 V) žeminti ir generuoti išėjimo įtampą (kuri gali būti nuo 3 V iki 20 V). Išėjimo įtampa skirta tiekti energiją apkrovai. Keitiklis turi gebėti tiekti bent 2 A elektros srovę apkrovai.
- Jei nuo sistemos yra atjungiamas įėjimo įtampa, projektuojama sistema turi atlikti perjungimą ir tiekti energiją apkrovai iš prie IG prijungtos ličio baterijos.
- Projektuojama sistema turi gebėti įkrauti ličio bateriją. Krovimo srovė turi siekti bent 100 mA.



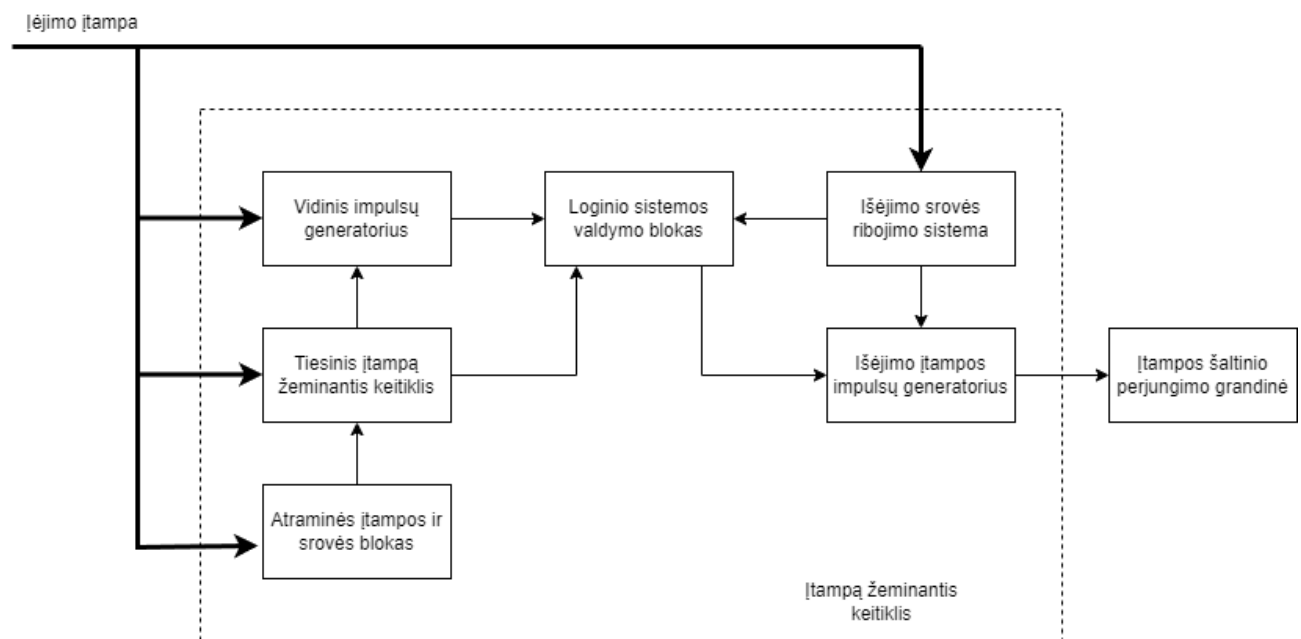
9 pav. Bendroji sistemos blokinė diagrama

Tolesniuose poskyriuose pateikiami detalesni kiekvieno iš blokų aprašymai ir detalizuojama, kaip bus šie blokai įgyvendinami projektuojant IG.

2.1.2. Įtampą žeminančio keitiklio blokinės diagramos sudarymas

Šiame poskyryje aprašoma sudaryta įtampą žeminančio keitiklio blokinė diagrama, kuri yra pavaizduota 10 paveiksle. Pagrindinė šio bloko funkcija – sukurti išėjimo įtampą, kuri galėtų užtikrinti pakankamą išėjimo srovę apkrovai. Naudojamas impulsinio keitiklio tipas – toks keitiklis yra efektyvesnis lyginant su tiesiniu keitikliu. Impulsinis keitiklis veikia ne pilnu periodu – įtampos impulsais yra įkraunama induktyvumo ritė, kuri kaupia magnetinio lauko energiją. Ši energija yra verčiama elektrinio lauko energija įkraunant su rite sujungtus kondensatorius. Ritėje ir kondensatoriuose sukaupta energija sukuria išėjimo įtampą ir srovę, kuri naudojama apkrovai.

1.2. poskyryje apžvelgus impulsinių įtampą žeminančių keitiklių architektūras, šiai sistemai parinkta pastovaus įjungimo laiko architektūra kaip sistemos pagrindas. Tokia sistema neturi pastovaus dažnio impulsų generatoriaus, o impulsų dažnis priklauso nuo įėjimo įtampos.



10 pav. Įtampą žeminančio keitiklio blokinė diagrama

Projektuojamo impulsinio įtampą žeminančio keitiklio dalys ir jų atliekamos funkcijos:

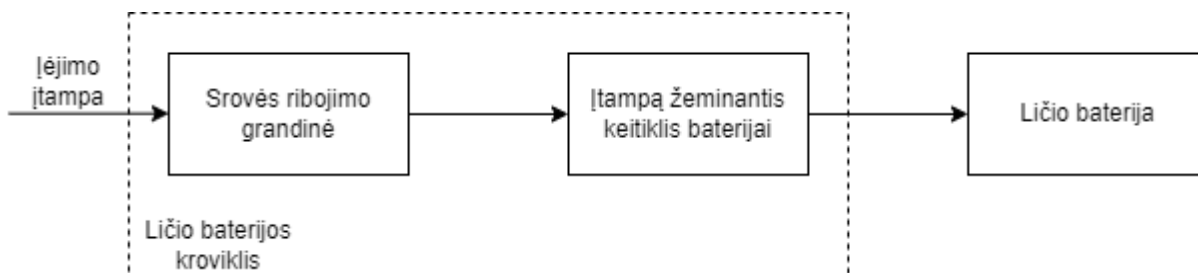
- Atraminės įtampos ir srovės blokas. Jis yra tiesiogiai sujungtas su įėjimo įtampa. Bloko paskirtis – sugeneruoti stabilią atraminę įtampą ir srovę, kurios galėtų būti naudojamos kaip atramos taškai visoje sistemoje. Ši posistemė turi stabiliai veikti visame įėjimo įtampos diapazone (nuo 10 V iki 100 V). Be to, šis blokas turi stabiliai veikti ir plačiuose temperatūros režimuose (nuo -40°C iki $+125^{\circ}\text{C}$). Kadangi visos sistemos minimali išėjimo įtampa gali būti 3 V, atraminė įtampa turi būti bent šiek tiek žemesnė, todėl projektuojant parinkta 2.8 V atraminė įtampa. Atraminė srovė tolimesnių blokų testavimo metu parinkta 40 μA . Ši srovė leidžia sistemos grandinėms tinkamai veikti ir užtikrina pakankamai mažą vidinių sistemos grandinių energijos suvartojimą.
- Tiesinis įtampą žeminantis keitiklis. Šio funkcinio bloko paskirtis žeminti įėjimo įtampą ir generuoti vidinę sistemos maitinimo įtampą. Projektuojant sistemą parinkta 7 V tiesinio įtampą žeminančio keitiklio išėjimo įtampa. Tokia įtampa parinkta, kad sistema tinkamai veiktų. Visų svarbiausia, kad loginis sistemos valdymo blokas, kuris yra maitinimas šia 7 V įtampa galėtų tinkamai valdyti išėjimo įtampos impulsų generatorių.
- Vidinis impulsų generatorius. Ši posistemė skirta generuoti impulsus, kurie suaktyvina sistemą. Vidinis impulsų generatorius sukuria impulsus naudojant kondensatorių, kuris yra sujungtas su įėjimo įtampa nuosekliai prijungtu rezistoriumi. Kondensatorius yra įkraunamas per rezistorių. Kai kondensatoriaus

įtampa viršija atraminę įtampą – sugeneruojamas impulsas. Sugeneravus impulsą kondensatorius yra staigiai iškraunamas ir vėl prasideda lėtas kondensatoriaus įkrovimas per rezistorių.

- Loginis sistemos valdymo blokas. Tai iš loginių elementų sudarytas blokas, kurio paskirtis apdoroti iš kitų posistemių gaunamą informaciją ir tinkamai valdyti išėjimo įtampos impulsų generatorių. Šis blokas laukia impulsų iš vidinio impulso generatoriaus. Gavus impulsą, blokas tikrina, ar išėjimo įtampa jau yra pasiekus reikalingą įtampos lygį. Jei ne – tuomet blokas siunčia impulsą į išėjimo įtampos impulsų generatorių. Jei šio impulso metu išėjimo srovės ribojimo sistema aptinka per aukštą išėjimo srovę, tuomet loginis blokas nutraukia išėjimo įtampos impulsą.
- Išėjimo srovės ribojimo sistema. Ši sistema skirta stebėti išėjimo srovę. Jei srovė viršija numatytą ribą, tuomet sistema praneša apie tai loginiam blokui ir loginis blokas nutraukia išėjimo įtampos impulsą.
- Išėjimo įtampos impulsų generatorius. Tai blokas, kuris sukuria išėjimo įtampą generuodamas impulsus, kurie įkrauna išėjimo grandinėje esančią induktyvumo ritę.

2.1.3. Ličio baterijos kroviklio blokinės diagramos sudarymas

Šiame poskyryje aprašoma ličio baterijos kroviklio blokinė diagrama, kuri yra pateikta 11 paveiksle. Kroviklis naudoja įėjimo įtampą ir ją žemina iki 4,2 V įtampos lygio. Tam yra projektuojamas įtampą žeminantis tiesinis keitiklis. Kad baterija būtų kraunama saugiai – krovimo srovė neviršytų leistinos maksimalios ribos, sistemoje yra projektuojama srovės ribojimo grandinė. Kadangi sistema gali būti naudojama su skirtingomis ličio baterijomis, ličio baterijos kroviklio ribojama maksimali krovimo srovė negali būti nustatyta sistemoje. Sistema turi galimybę laisvai keisti maksimalią krovimo srovę panaudojant išorinius prie sistemos prijungtus komponentus. Suprojektavus šiuos du blokus, sistemoje įgyvendintas elementarus ličio baterijos kroviklis su apribota išėjimo srove.



11 pav. Ličio baterijos kroviklio blokinė diagrama

2.2. Sistemos principinių elektrinių schemų projektavimas ir tyrimas

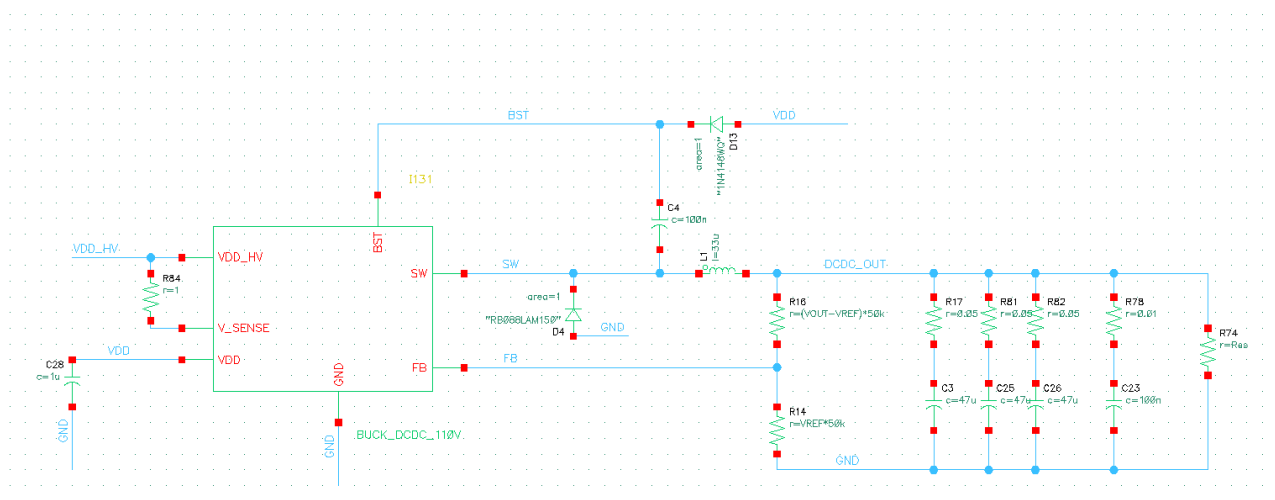
Sudarius blokines diagramas toliau yra projektuojama elektrinė principinė schema. Siekiant suprojektuoti aprašytus blokus, visų pirma projektuojamos ir tiriamos elementarių elementų principinės elektrinės schemas. Iš elementarių elementų kuriami sudėtingesni blokai. Šiame skyriuje aprašomas principinių elektrinių schemų skirtų sistemai projektavimas ir tyrimas.

2.2.1. Technologijos parinkimas integrinio grandyno projektavimui

Prieš pradėdant projektuoti elektrinę principinę schemą, parinkta integrinių grandynų technologija. Technologija pritaikyta IG projektavimui pagal užduoties reikalavimus. Užduotyje numatytas IG veikimas iki 100 V, dėl to parinkta *Austria Microsystems (AMS) H35B4D3* technologija. Ši technologija leidžia naudoti aukštos įtampos p ir n kanalų KMOP tranzistorius – *pmos120h* ir *nmosi120*. Šių tranzistorių santakos – ištakos įtampa gali siekti iki 120 V, o užtūros – ištakos įtampa gali siekti 20 V. Kadangi šios įtampos nėra vienodos, projektuojant ir tiriant IG užtikrinama, kad dirbant su aukštomis įtampomis nėra viršyta maksimali užtūros – ištakos įtampa. Projektuojant IG reikalingi ir rezistoriai bei kondensatoriai. Naudojami šios technologijos elementai – *rpolyh* aukštos įtampos polisilicio rezistoriai ir *cpoly* polisiliciniai kondensatoriai.

2.2.2. Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio schemos projektavimas

Šiame poskyryje pateiktas impulsinio įtampą žeminančio keitiklio elektrinės principinės schemos projektavimo aprašymas. 12 paveiksle pavaizduotas impulsinio įtampą žeminančio keitiklio simbolis ir su juo sujungti tipiniai išoriniai komponentai, kurių reikia tinkamam keitiklio veikimui.



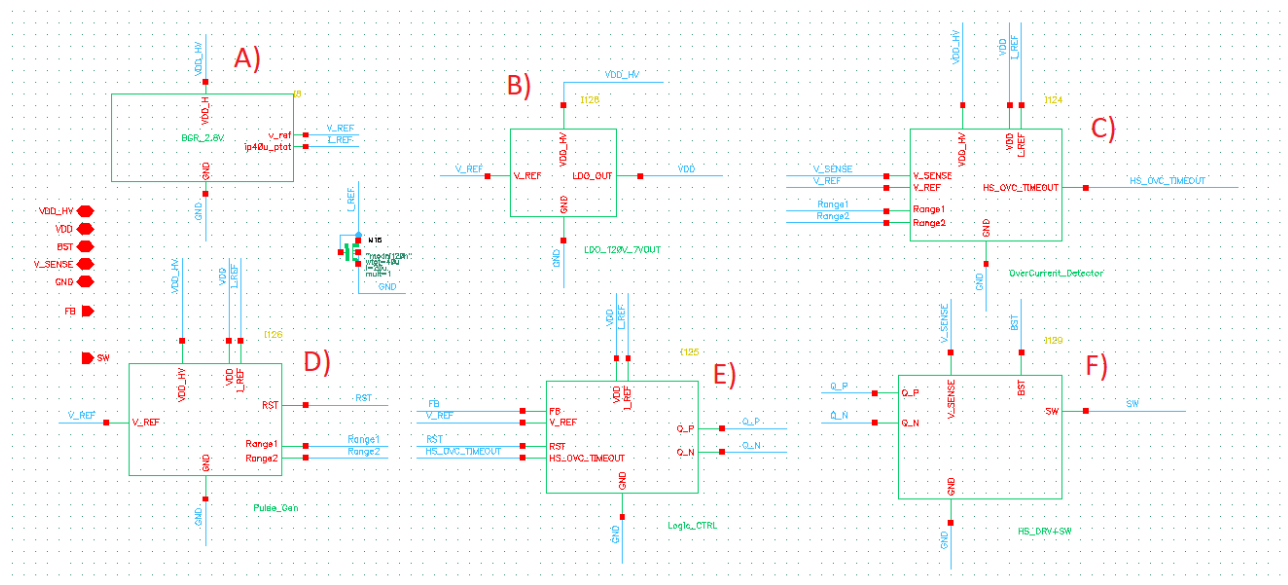
12 pav. Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio schema su išoriniais komponentais

Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio elektriniai signalai ir jų funkcijos:

- *VDD_{HV}* – tai 10–100 V signalas, kuriuo yra tiekiamas maitinimas vidinės atraminės įtampos ir srovės blokui bei vidiniam tiesiniam įtampą žeminančiam keitikliui.
- *V_{SENSE}* – tai įėjimo signalas, iš kurio yra formuojami išėjimo įtampos impulsai. Signalas prijungiamas per 1 Ω rezistorių, kad išėjimo srovės ribojimo blokas galėtų nustatyti per didelę išėjimo srovę.
- *VDD* – tai vidinio tiesinio įtampą žeminančio keitiklio išėjimo signalas. Šis keitiklis sugeneruoja 7 V signalą, kuris yra naudojamas vidinėms grandinėms maitinti. Projektuojamos sistemos išorėje prie šio keitiklio išėjimo įtampos signalo prijungiamas 1 μ F kondensatorius. Šio kondensatoriaus reikia, kad sugeneruotas 7 V įtampos signalas būtų atsparus apkrovos srovės pasikeitimui ir vidinės sistemos grandinės veiktų stabiliai.
- *BST* – tai signalas, kuris yra skirtas išėjimo įtampos impulsus generuojančio tranzistoriaus valdymo maitinimui. Per diodą *D13* yra įkraunamas kondensatorius *C4*. Įkrovimo įtampa lygi *VDD* įtampai sumažintai per diodo įtampos kritimą. Kai pradedama generuoti išėjimo įtampos impulsą *SW* tinkle, *BST* įtampa kyla atitinkamai. Taigi *BST* įtampa visada yra aukštesnė už *SW* įtampą. *D13* diodas yra parinktas *1N4148WQ*, kurio gamintojas yra *Diodes Incorporated*. *D4* diodas yra parinktas *RB088LAM150*, kurio gamintojas yra *ROHM Semiconductor*.
- *SW* – tai išėjimo įtampos impulsų signalas. Išėjimo impulsai yra perduodami į induktyvumo ritę. Ritė kaupia magnetinio lauko energiją. Prie ritės prijungti kondensatoriai kaupia energiją elektrinio lauko pavidalu. Kuo daugiau impulsų yra perduodama į ritę, tuo didesnė srovė teka rite ir tuo didesnė įtampa yra sukaupiama kondensatoriuose. [11]
- *FB* – grįžtamojo ryšio signalas. Šiuo signalu yra matuojama išėjimo įtampa, kuri sukurta ant išėjimo kondensatorių. Kai išėjimo įtampa pasiekia norimą lygį, sistema nustoja generuoti išėjimo įtampos impulsus. Kai išėjimo įtampa nukrinta žemiau norimo lygio, sistema vėl generuoja išėjimo įtampos signalus. *FB* įtampa yra lyginama su vidine atramine 2,8 V įtampa. Sujungiant išėjimo įtampos ir *FB* signalus per rezistorių daliklį, galima sukonfigūruoti norimą išėjimo įtampą. Norint pakeisti išėjimo įtampą, reikia pakeisti varžų daliklio santykį.

13 paveiksle pavaizduota keitiklio elektrinė principinė schema sudaryta iš funkcinių blokų. Kiekvienas iš blokų aprašytas detaliai tolesniuose poskyriuose. Impulsinį įtampą žeminantį keitiklį sudaro šeši blokai:

- A) Atraminės įtampos ir srovės šaltinis
- B) Tiesinis įtampą žeminantis keitiklis
- C) Išėjimo srovės ribojimo blokas
- D) Vidinis impulsų generatorius
- E) Loginis sistemos valdymo blokas
- F) Išėjimo įtampos impulsų generatorius



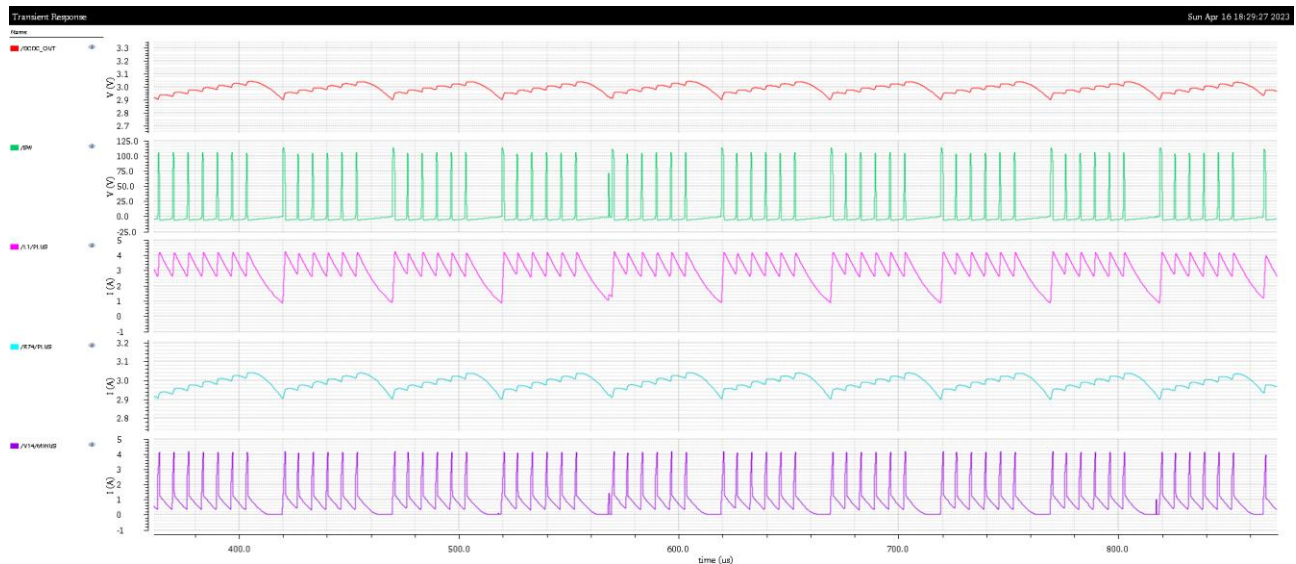
13 pav. Impulsinio įtampa žeminančio keitiklio elektrinė principinė schema

Keitiklio veikimą iliustruojanti laikinė diagrama pavaizduota 14 paveiksle. Šiame pavyzdyje – įėjimo įtampa yra 120 V, išėjimo įtampa yra 3 V. Prie keitiklio prijungta apkrova lygi $1\ \Omega$, taigi išėjimo srovė apytiksliai lygi 3 A. Grafike pavaizduoti penki signalai:

- Raudonas signalas – $DCDC_OUT$ – tai ant apkrovos krentanti įtampa. Šiuo atveju suprojektuotas keitiklis yra sukonfigūruotas taip, kad apkrovos įtampa būtų 3 V. Grafike matomas išėjimo įtampos svyravimas tarp 2,9091 V minimumo ir 3,0325 V maksimumo.
- Žalias signalas – SW – keitiklio išėjimo impulsų įtampa. Tai įtampa, kuri periodiškai yra prijungiama prie induktyvumo ritės, esančios išėjimo grandinėje.
- Rožinis signalas – I_L1 – išėjimo grandinėje esančios induktyvumo ritės srovė. Kai prie ritės prijungtas signalas SW yra aukšto lygio, rite tekanti srovė didėja – rite įsikrauna. Ritėje kaupiama energija, kuri yra naudojama apkrovai maitinti. Šiuo

atveju eksperimentiniu būdu parinkta 33 μH induktyvumo ritė. Didinant ritės induktyvumą, mažėja rite tekanti srovė, šiek tiek pagerėja keitiklio efektyvumas, tačiau didėja išėjimo įtampos svyravimai, ypač, kai apkrovos srovė yra maža.

- Mėlynas signalas – I_{R74} – apkrova tekanti srovė. Šiuo atveju apkrovos varža yra 1 Ω , todėl apkrovos srovė yra apytiksliai 3 A.
- Violetinis signalas – I_{IN} – įėjimo srovė. Tai srovė, kuri teka iš išorinio 120 V įtampos šaltinio per suprojektuotą įtampą žeminantį keitiklį.

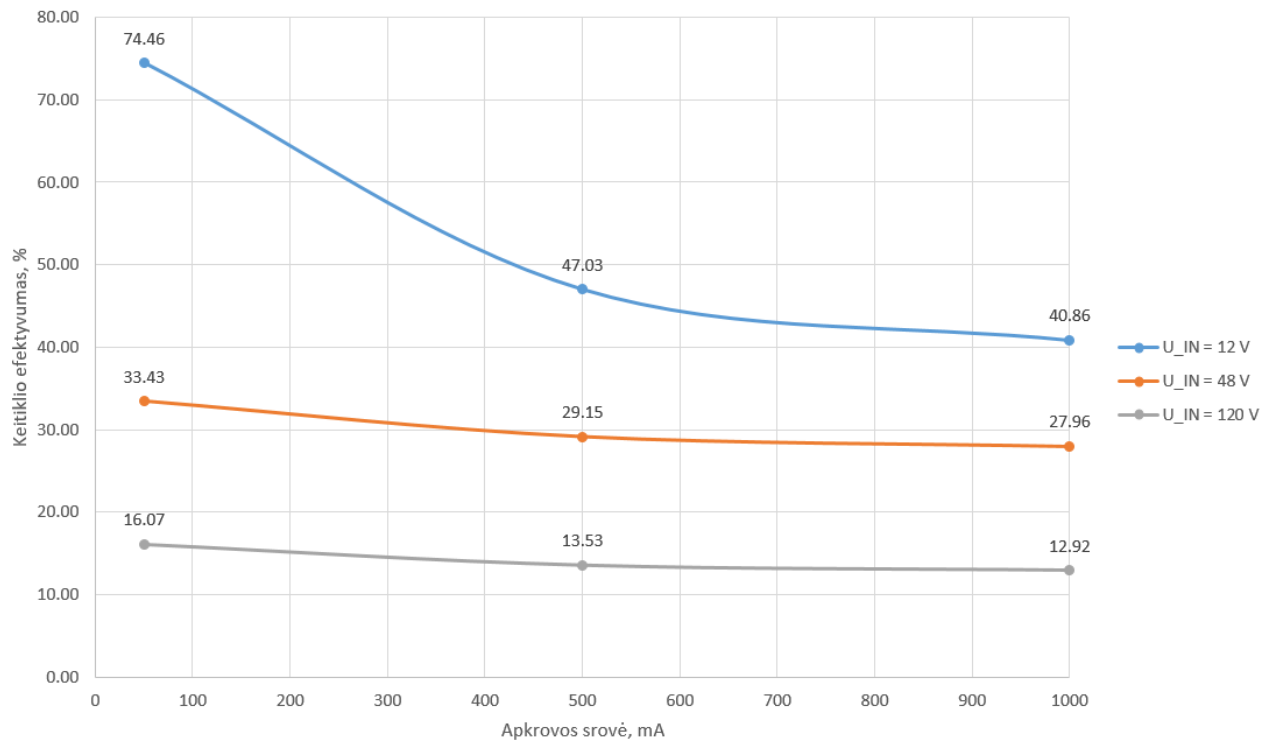


14 pav. Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio veikimą iliustruojančios laikinės diagramos

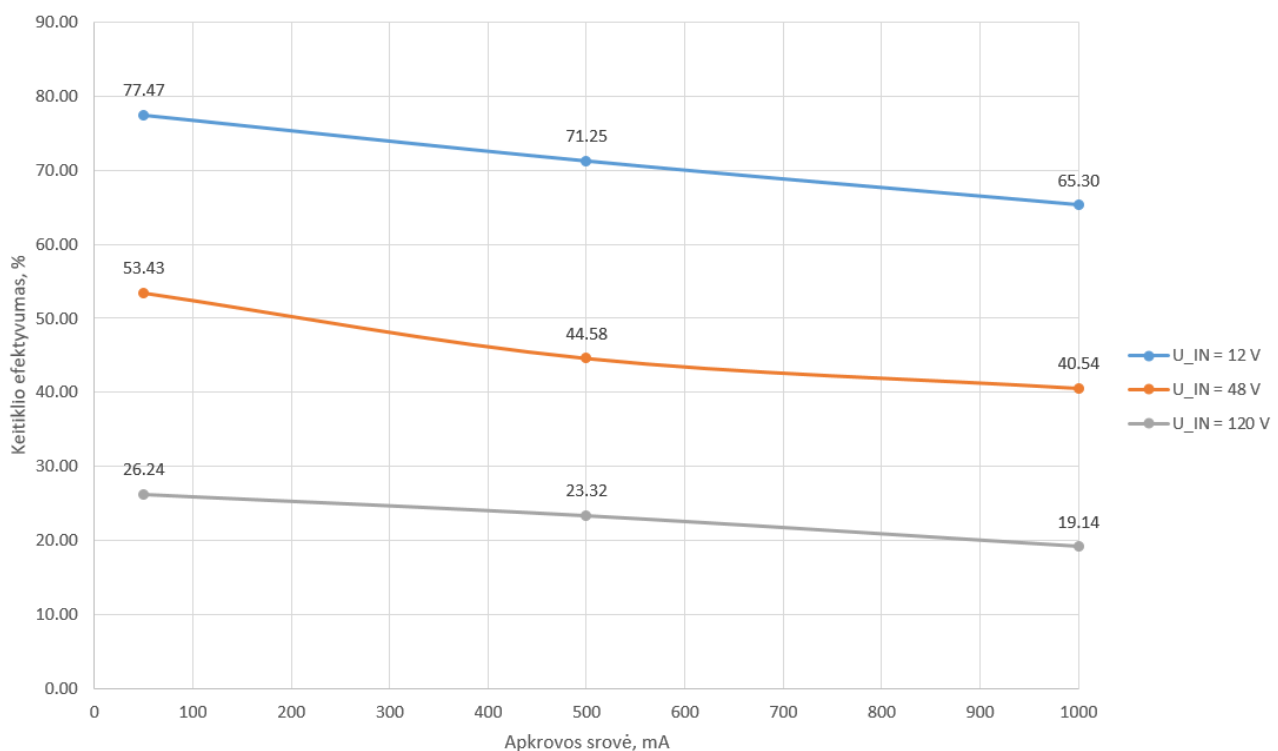
Vienas iš svarbiausių impulsinį keitiklį apibūdinančių parametrų yra keitiklio efektyvumas. Keitiklio efektyvumą galima apskaičiuoti pagal formulę:

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} = \frac{I_{OUT}U_{OUT}}{I_{IN}U_{IN}}. \quad (6)$$

Keitiklio efektyvumas η yra lygus išėjimo ir įėjimo galios santykiui. Žinant įėjimo ir išėjimo sroves ir įtampas galima apskaičiuoti galias. Šiuo atveju apskaičiuotas keitiklio efektyvumas yra 8,451 %, kai įėjimo įtampa yra 120 V, išėjimo įtampa yra 3 V, o apkrovos srovė yra 3 A. Kintant šiems trimis parametrams, kinta ir keitiklio efektyvumas. Siekiant įvertinti, kaip keitiklio pagrindiniai parametrai priklauso nuo minėtųjų trijų parametrų, atliktas tyrimas – keistos visų trijų parametrų vertės ir sudarant įvairius testavimo scenarijus surinkti duomenys. 15 ir 16 paveiksluose pavaizduota keitiklio efektyvumo priklausomybė nuo įėjimo įtampos, apkrovos srovės ir išėjimo įtampos. Atliktas tyrimas naudojant trijų verčių įėjimo įtampas – 12 V, 48 V ir 120 V, trijų verčių apkrovos sroves – 50 mA, 500 mA ir 1000 mA bei dvejų verčių išėjimo įtampas – 3 V ir 6 V. Apibendrinant tyrimo rezultatus, matoma, kad didėjant išėjimo įtampai, keitiklio efektyvumas didėja. Didėjant apkrovos srovei – efektyvumas mažėja. Didėjant įėjimo įtampai – efektyvumas mažėja.



15 pav. Įtampą žeminančio keitiklio efektyvumas, kai išėjimo įtampa lygi 3 V



16 pav. Įtampą žeminančio keitiklio efektyvumas, kai išėjimo įtampa lygi 6 V

Kitas svarbus parametras skirtas apibūdinti keitiklio efektyvumą – santykinis išėjimo įtampos svyravimas. Šis parametras priklauso nuo įėjimo įtampos, apkrovos srovės ir išėjimo įtampos. Siekiant apskaičiuoti šį parametrą, naudojama formulė:

$$\Delta U_{OUT(\%)} = \frac{U_{OUT(MAX)} - U_{OUT(MIN)}}{U_{OUT(NOM)}}. (7)$$

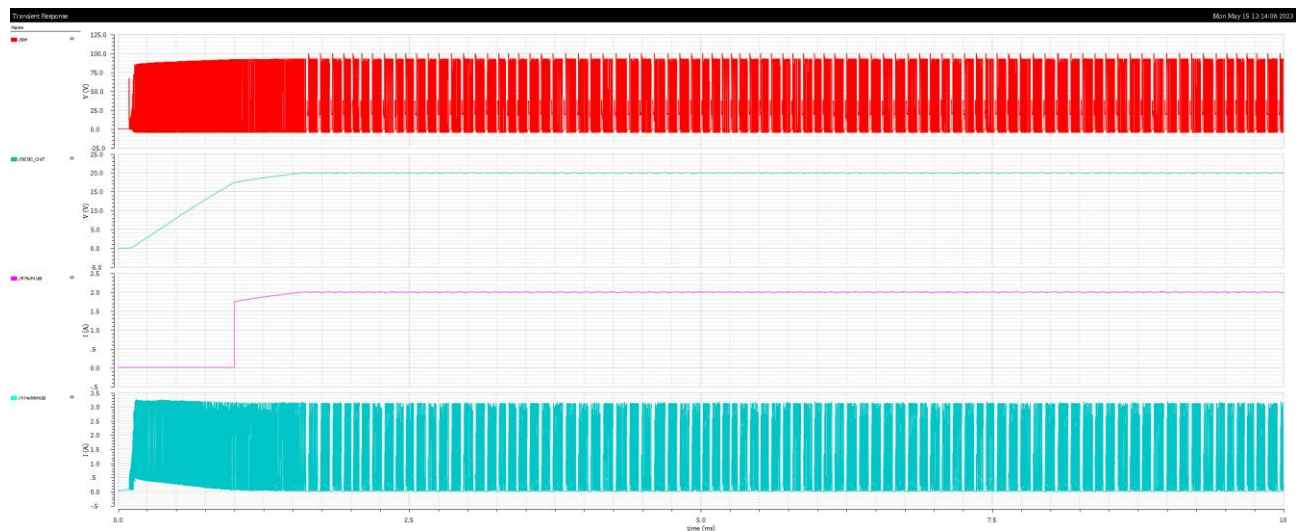
Šis parametras apskaičiuojamas išėjimo įtampos maksimumo ir minimumo skirtumą padalinant iš nominalios išėjimo įtampos, kuri yra sukonfigūruota testavimo metu. Skaičiavimams naudoti duomenys pateikti A13 priede, o rezultatai – 1 lentelėje. Iš lentelės duomenų matoma, kad didėjant apkrovos srovei – išėjimo įtampos svyravimas didėja. Didėjant įėjimo įtampai – išėjimo įtampos svyravimas didėja. Didėjant išėjimo įtampai – išėjimo įtampos svyravimas mažėja.

1 lentelė. Keitiklio išėjimo įtampos svyravimo priklausomybė nuo išėjimo srovės

	I _{OUT} = 50 mA	I _{OUT} = 500 mA	I _{OUT} = 1000 mA
U _{IN} = 12 V, U _{OUT} = 3 V	2,27%	4,36%	4,98%
U _{IN} = 48 V, U _{OUT} = 3 V	5,69%	5,55%	5,95%
U _{IN} = 120 V, U _{OUT} = 3 V	6,49%	6,88%	7,07%
U _{IN} = 12 V, U _{OUT} = 6 V	1,40%	1,61%	2,74%
U _{IN} = 48 V, U _{OUT} = 6 V	1,91%	2,34%	3,41%
U _{IN} = 120 V, U _{OUT} = 6 V	3,46%	2,83%	3,77%

Darbo užduotyje numatyta, kad impulsinio keitiklio išėjimo įtampa turi būti nuo 3 V iki 20 V. Toliau atliekamas tyrimas siekiant įsitikinti, kad keitiklis tinkamai veikia, kai išėjimo įtampa yra lygi 20 V, o išėjimo srovė 2 A. Naudojama panaši testavimo elektrinė principinė schema pavaizduota 12 paveiksle, tačiau rezistoriais R16 ir R14 sukonfigūruota išėjimo įtampa yra 20 V, o induktyvumo ritės L1 indutyvumas yra 100 μH. Induktyvumo ritės nominalas šio testo metu yra pakeistas, nes reikalinga išėjimo galia yra didesnė. Didinant induktyvumą galima gauti didesnę išėjimo galią, geresnį efektyvumą, tačiau dėl tokio pakeitimo didėja išėjimo įtampos svyravimai. Testavimo rezultatai pateikti 17 paveiksle. Paveiksle pavaizduoti keturi signalai – išėjimo įtampos impulsai (raudona spalva), išėjimo įtampa (žalia spalva), apkrovos srovė (rožinė spalva) ir įėjimo srovė (mėlyna spalva).

Testo pradžioje apkrova yra 10 kΩ, tačiau po 1 ms apkrova pakeičiama į 10 Ω (išėjimo srovė atitinka 2 A, kai išėjimo įtampą yra 20 V). Testo metu naudota įėjimo įtampa yra 100 V. Apskaičiuotas keitiklio efektyvumas 52,43 %, o išėjimo įtampa svyruoja nuo 19,835 V iki 20,049 V. Šis svyravimas sudaro 1,07 %.

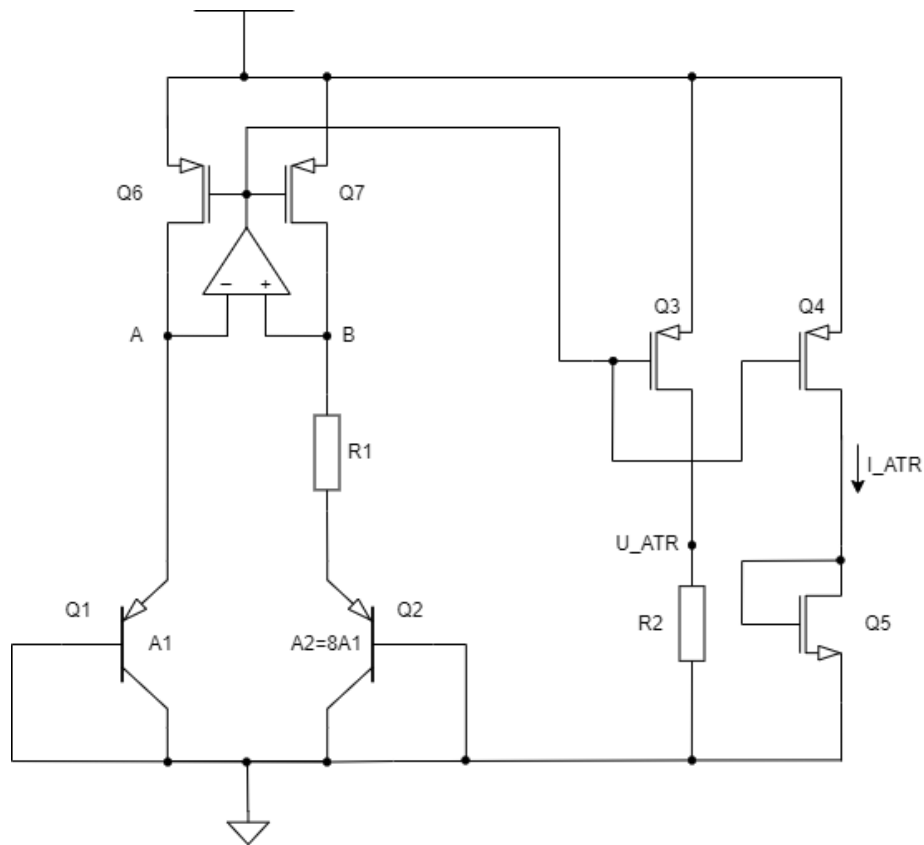


17 pav. Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio tyrimo laikinės diagramos, kai išėjimo įtampa yra 20 V

Šiame poskyryje pateiktas impulsinio įtampą žeminančio keitiklio elektrinės principinės projektavimo aprašymas. Atlikus schemos tyrimą įsitikinta, kad elektrinė principinė schema atitinka užduotyje numatytus keitiklio parametrus. Tolesniuose poskyriuose aprašomos keitiklį sudarančių blokų elektrinės principinės schemos.

2.2.2.1. Atraminės įtampos ir srovės bloko projektavimas

Projektuojamas atraminės įtampos ir srovės blokas. Šio bloko paskirtis – sugeneruoti stabilią atraminę įtampą ir srovę, kuri nepriklauso nuo įėjimo įtampos ar temperatūros. Visų elementų parametrai yra priklausomi nuo temperatūros. Didėjant temperatūrai vienu elementų elektrinė srovė didėja – jų elektrinė srovė vadinama proporcinga absoliučiai temperatūrai (angl. *Proportional to absolute temperature, PTAT*). Kitų elementų elektrinė srovė mažėja didėjant temperatūrai – jų elektrinė srovė vadinama atvirkščia absoliučiai temperatūrai (angl. *Complementary to absolute temperature, CTAT*). Siekiant užtikrinti stabilų veikimą plačiame temperatūros diapazone, reikia sukurti elektrinę principinę grandinę, kuri išnaudoja abiejų tipų elementų (*PTAT* ir *CTAT*) parametrus. Sumuojant sroves, kurios yra priešingai priklausomos nuo temperatūros, galima gauti elektrinę srovę, kuri yra nepriklausoma nuo temperatūros arba ši priklausomybė yra maža. [10]



18 pav. Elementarios atraminės srovės ir įtampos generatoriaus schemas pagrindas

PTAT tipo elementas, kuris yra naudojamas elektrinei principinei schemai projektuoti – rezistorius, o *CTAT* elementas – PNP tranzistorius. Elementari schema skirta paaiškinti bloko veikimui pavaizduota 18 paveiksle. *Q6* ir *Q7* tranzistoriai yra vienodų matmenų, todėl srovės tekančios per juos yra lygios. Srovė tekanti per *Q1* ir yra *CTAT* pobūdžio. Srovė tekanti per *R1* ir *Q2* yra *PTAT* pobūdžio, nes rezistoriaus srovės temperatūrinė priklausomybė yra *PTAT*. Tranzistoriaus *Q2* plotas *A2* yra aštuonis kartus didesnis už tranzistoriaus *A1* plotą. Operacinis stiprintuvas užtikrina, kad taškuose *A* ir *B* įtampos būtų lygios. Srovė tekanti per *Q1* ir *Q2* gali būti išreikšta formule:

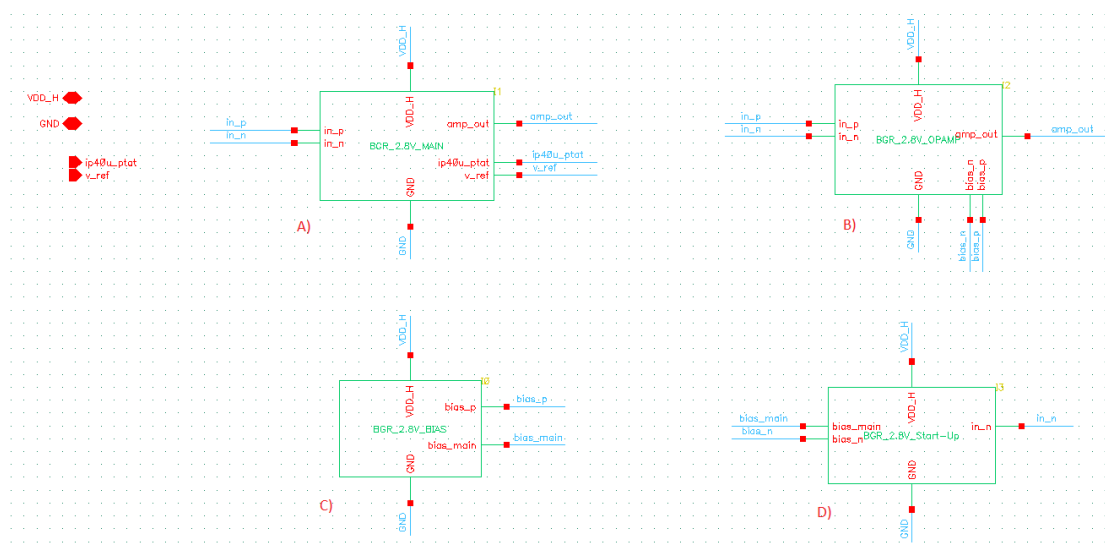
$$I_0 = \frac{V_T \ln\left(\frac{A_2}{A_1}\right)}{R_1}. \quad (8)$$

I_0 yra srovė tekanti per *Q1* ir *Q2* šakas, V_T yra šiluminė įtampa. Kylant temperatūrai, įtampa taške *B* mažėja. Mažėjant įtampai taške *B*, operacinio stiprintuvo išėjimo įtampa mažėja, todėl tranzistoriaus *Q7* praleidžiama srovė didėja. Didėjant šiai srovei, įtampa taške *B* didėja. Taip užtikrinama stabili įtampa, kintant temperatūrai.

Sujungiant operacinio stiprintuvo išėjimo signalą su *Q3* ir *Q4* tranzistorių užtūromis, kurių matmenys yra tokio pačio dydžio kaip ir *Q6* bei *Q7*, galima atkartoti tą pačią elektrinę srovę keliose šakose. Šiuo atveju *Q4* ir *Q5* tranzistorių šakoje yra generuojama stabili atraminė srovė I_{ATR} .

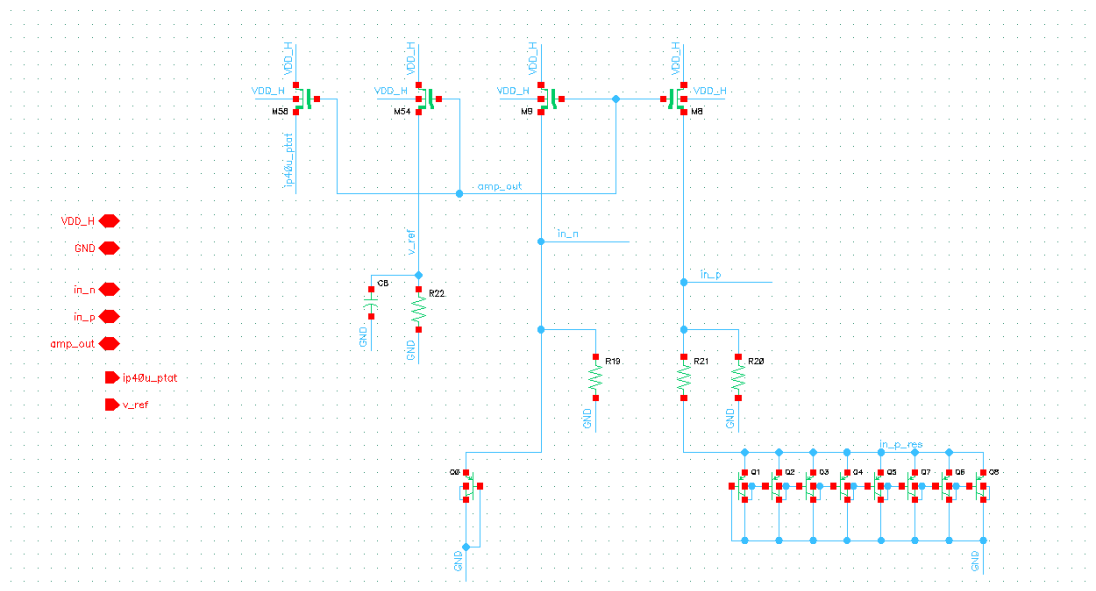
Šakoje su $Q3$ tranzistoriumi srovė yra leidžiama per rezistorių $R2$ ir taip sugeneruojama atraminė įtampa U_{ATR} . Reikia paminėti, kad rezistorius $R2$ taip pat yra $PTAT$ pobūdžio, todėl U_{ATR} bent minimaliai bus $PTAT$ pobūdžio.

Taikant šiuos principus projektuojama konkreti principinė elektrinė schema. Schema padalinta į keturis blokus, kurie yra pavaizduoti 19 paveiksle. Schemą sudaro pagrindinis blokas (A), operacinis stiprintuvas (B), bloko vidinių atraminės srovės generatorius (C) ir paleidimo grandinė (D).



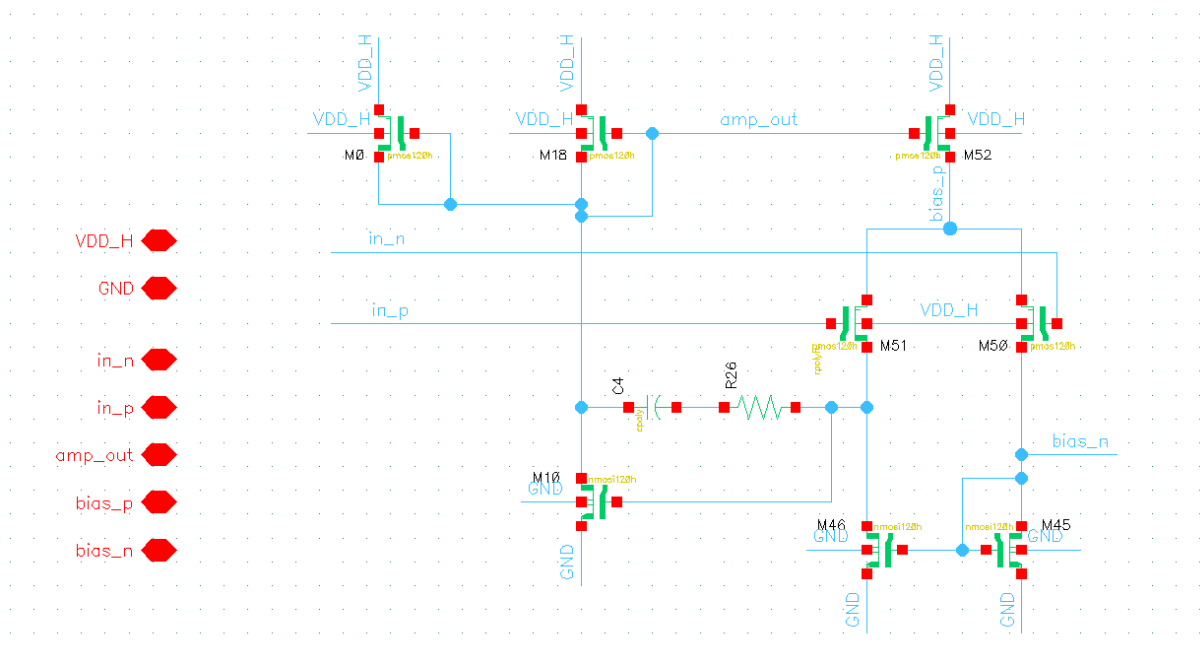
19 pav. Atraminės srovės ir įtampos šaltinio schema

Pagrindinė atraminės įtampos ir srovės šaltinio elektrinė principinė schema pateikta 20 paveiksle. Šioje schemoje yra naudojami $PTAT$ ir $CTAT$ elementų veikimo principai, kurie buvo aprašyti anksčiau. Dvi pagrindinės šakos, kaip ir ankstesniame pavyzdyje – PNP tranzistoriaus šaka ir aštuonių PNP tranzistorių bei nuosekliai prijungto $R21$ $3\text{ k}\Omega$ rezistoriaus šaka. Projektuojant principinę elektrinę schemą abiejose šakose papildomai prijungti $R19$ ir $R20$ - $30\text{ k}\Omega$ rezistoriai lygiagrečiu jungimu, siekiant norimų schemos parametrų. Abi šios šakos sujungtos su operacinio stiprintuvo įėjimo signalais. Operacinio stiprintuvo išėjimo signalas valdo PMOP tranzistorius, kuriais teka vienoda srovė. Vienas PMOP tranzistorius skirtas atraminei srovei generuoti, kitas tranzistorius prijungtas prie $70,5\text{ k}\Omega$ rezistoriaus ir generuoja atraminę įtampą.



20 pav. Pagrindinio atraminės įtampos ir srovės šaltinio schema

Toliau projektuojamas operacinis stiprintuvas. Stiprintuvo elektrinė principinė schema pateikta 21 paveiksle. Operacinio stiprintuvo schema turi du stiprintuvo įėjimo signalus ir vieną išėjimo signalą. Schema turi maitinimo įtampos kontaktus – įtampa gali būti prijungiama nuo 10 V iki 100 V. Be to, stiprintuvas turi du atraminius signalus. Signalas *bias_p* reikalingas tam, kad stiprintuvas būtų nuvedamas į darbinį tašką – tai apie 15 μA srovės signalas. Signalas *bias_n* reikalingas, kad paleidimo grandinė būtų išjungta, kai stiprintuvas pasiekia darbinį tašką. Įvedus bloką į darbinį tašką, šiuo signalu srovė neteka.



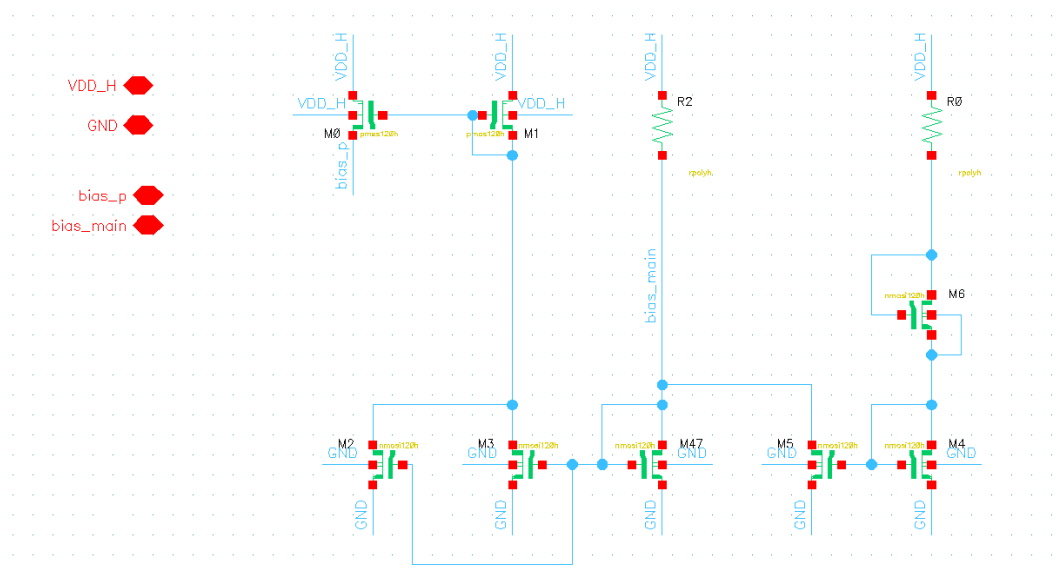
21 pav. Atraminės įtampos ir srovės šaltinio operacinio stiprintuvo schema

Pagrindiniai šio operacinio stiprintuvo parametrai keliuose darbinuose taškuose pateikti 2 lentelėje. Lentelėje pateikti rezultatai prie įvairių maitinimo įtampų VDD_H . Minimali maitinimo įtampa, su kuria veikia stiprintuvas yra 6 V, o maksimali – 120 V. Kiti taškai parinkti tokie, kad atitiktų realias sistemos panaudojimo situacijas – tai standartinės transporto priemonių akumuliatorių įtampos. Toliau pateikti žemųjų ir vidutinių dažnių srities perdavimo koeficientai K_0 . Šie koeficientai išmatuoti su 10 kHz dažnio signalu. Pateikiami vienetiniai stiprinimo dažniai f_{0dB} , kurie yra nustatomi ties 0 dB. Matoma, kad viso maitinimo įtampos ruožo pagrindiniai parametrai yra pakankamai stabilūs. Žemųjų ir vidutinių dažnių srities perdavimo koeficientas K_0 šiek tiek mažėja, o vienetinis stiprinimo dažnis f_{0dB} šiek tiek didėja, didėjant maitinimo įtampai VDD_H .

2 lentelė. Pagrindiniai atraminės įtampos ir srovės bloko operacinio stiprintuvo parametrai

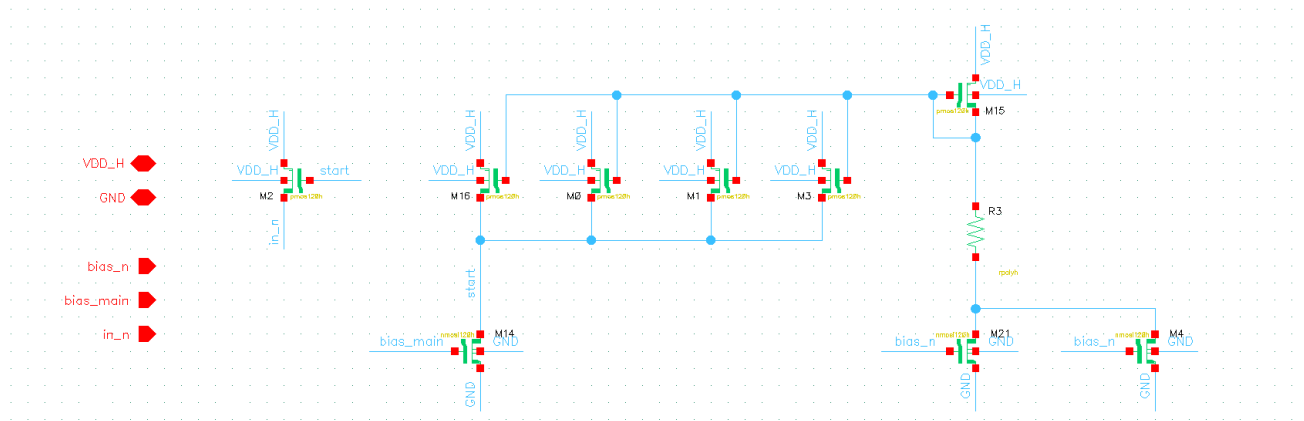
Maitinimo įtampa VDD_H , V	K_0 , dB	f_{0dB} , Mhz
6	58,207	2,492
12	58,819	2,896
24	58,529	3,054
48	57,525	3,132
72	56,619	3,123
120	55,582	3,143

Operaciniam stiprintuvui reikia atraminės srovės, kad blokas tinkamai veiktų. Atraminės srovės generavimo bloko elektrinė principinė schema pateikta 22 paveiksle. Operacinio stiprintuvo atraminė srovė $bias_p$ yra 15 μA dydžio. Šis blokas turi dar vieną išėjimo signalą pavadintą $bias_main$. Šis signalas skirtas paleidimo grandinės įjungimui sistemos darbo pradžioje.



22 pav. Vidinių atraminių srovių blokas

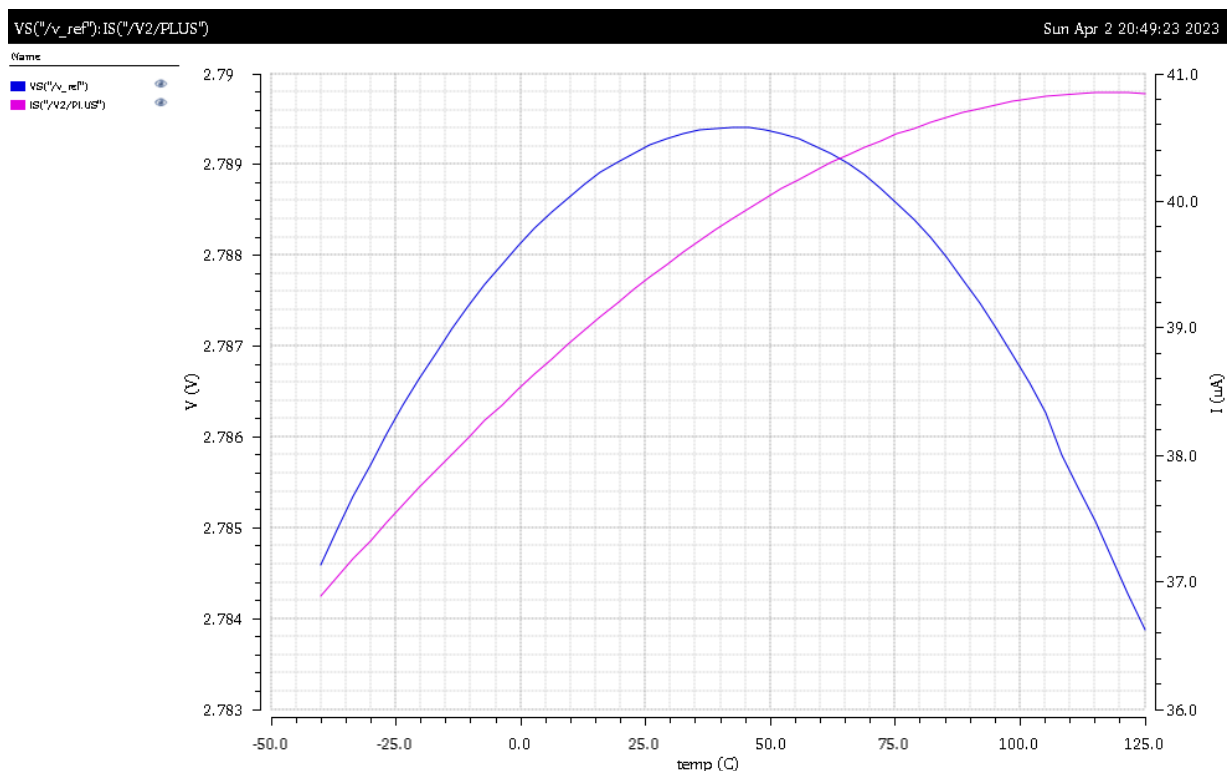
Išorinės įtampos prijungimo metu atraminės įtampos ir srovės blokas nepradedą savaime veikti. Aprašant 18 paveikslą paminėta, kad įtampa tarp taškų A ir B yra lygi, o operacinis stiprintuvas palaiko šių įtampų balansą. Reikia pastebėti, kad įtampų balansas egzistuoja ir tuo metu, kai abi šios įtampos yra lygios nuliui. Dėl to blokui reikalinga paleidimo grandinė, kuri įveda operacinį stiprintuvą į darbinį tašką, kuris nėra lygus 0 V. Paleidimo elektrinė principinė schema pavaizduota 23 paveiksle. Ši grandinė paleidimo metu leidžia elektrinę srovę į neigiamą operacinio stiprintuvo įėjimo signalą in_n ir didina įtampą šiame tinkle. Kylant in_n įtampai, operacinis stiprintuvas išėjime pradeda mažinti įtampą taip vis daugiau atidarydamas PMOP tranzistorius esančius pagrindiniame bloke (20 pav.). Didėjant operacinio stiprintuvo išėjimo įtampai, didėja ir teigiamo operacinio stiprintuvo įėjimo signalo įtampa. Taip stiprintuvas yra įvedamas į darbinį tašką. Pasiekus darbinį tašką, paleidimo grandinė yra išjungiamo naudojant $bias_n$ signalą. Taip yra sumažinamas bendras sistemos energijos suvartojimas viso sistemos darbo metu.



23 pav. Atraminės įtampos ir srovės bloko paleidimo grandinė

Suprojektavus šiuos keturis blokus atliekamas atraminės įtampos ir srovės šaltinio elektrinės principinės schemos tyrimas. Svarbiausia, kad šis šaltinis stabiliai veiktų plačiuose įėjimo įtampos ir temperatūros diapazonuose. 24 paveiksle pateiktos suprojektuoto atraminės įtampos ir srovės šaltinio išėjimo charakteristikos, kai įėjimo įtampa yra 120 V. Mėlyna kreivė vaizduoja generuojamą atraminę įtampą, o violetinė – atraminę srovę. Pateiktos šaltinio išėjimo charakteristikos temperatūros režimuose nuo -40°C iki 125°C . Iš grafiko matoma, kad esant 120 V įėjimo įtampai, įtampa svyruoja nuo 2,7838764 V iki 2,7894043 V. Įtampos maksimumas pasiekiamas esant $42,5^{\circ}\text{C}$ temperatūrai. Atraminė srovė didžiaja dalimi yra PTAT pobūdžio ir kinta nuo $36,8840\ \mu\text{A}$ iki $40,8463\ \mu\text{A}$. Atraminės srovės maksimumas pasiekiamas esant $118,4^{\circ}\text{C}$ temperatūrai. Daugiau išėjimo charakteristikų parametrų prie tipinių įėjimo įtampos verčių pateikiama 3 lentelėje. Lentelėje matomi išėjimo parametrai, kai įėjimo įtampa kinta nuo 7 V iki 120 V. Didėjant įėjimo įtampai, išėjimo įtampos stabilumas gerėja ir esant 120 V įėjimo įtampai, skirtumas tarp išėjimo įtampos minimumo ir maksimumo pasiekia 5,5279 mV. Mažėjant įėjimo įtampai išėjimo įtampos

stabilumas prastėja. Esant 8 V įėjimo įtampai, svyravimas pasiekia 30,383 mV, o esant 7 V įėjimo įtampai, išėjimo įtampos svyravimas siekia 144,232 mV, todėl galima teigti, kad šio sistemos bloko minimali veikimo įtampa yra 8 V. Išėjimo srovės svyravimas prastėja didėjant įėjimo įtampai. Geriausias rezultatas pasiekiamas esant 8 V įėjimo įtampai. Svyravimas šiuo atveju siekia 3,7862 μA .



24 pav. Atraminės įtampos ir srovės šaltinio išėjimo charakteristikos, įėjimo įtampa 120 V

3 lentelė. Atraminės įtampos ir srovės šaltinio pagrindiniai išėjimo charakteristikų parametrai

Įėjimo įtampa, V	Išėjimo įtampos minimumas, V	Išėjimo įtampos maksimumas, V	Skirtumas tarp išėjimo įtampos minimumo ir maksimumo, mV	Išėjimo srovės minimumas, μA	Išėjimo srovės maksimumas, μA	Skirtumas tarp išėjimo srovės minimumo ir maksimumo, μA
7	2,646564	2,790796	144,232	36,9631	40,5893	3,6262
8	2,760865	2,791248	30,383	36,9647	40,7509	3,7862
9	2,778954	2,791844	12,890	36,9662	40,8174	3,8512
12	2,781666	2,792642	10,976	36,9664	40,8452	3,8788
24	2,783237	2,792995	9,758	36,9573	40,8554	3,8981
48	2,783502	2,792113	8,611	36,9372	40,8494	3,9122
72	2,783073	2,790863	7,790	36,9161	40,8391	3,9230
120	2,783876	2,789404	5,5279	36,8840	40,8463	3,9623

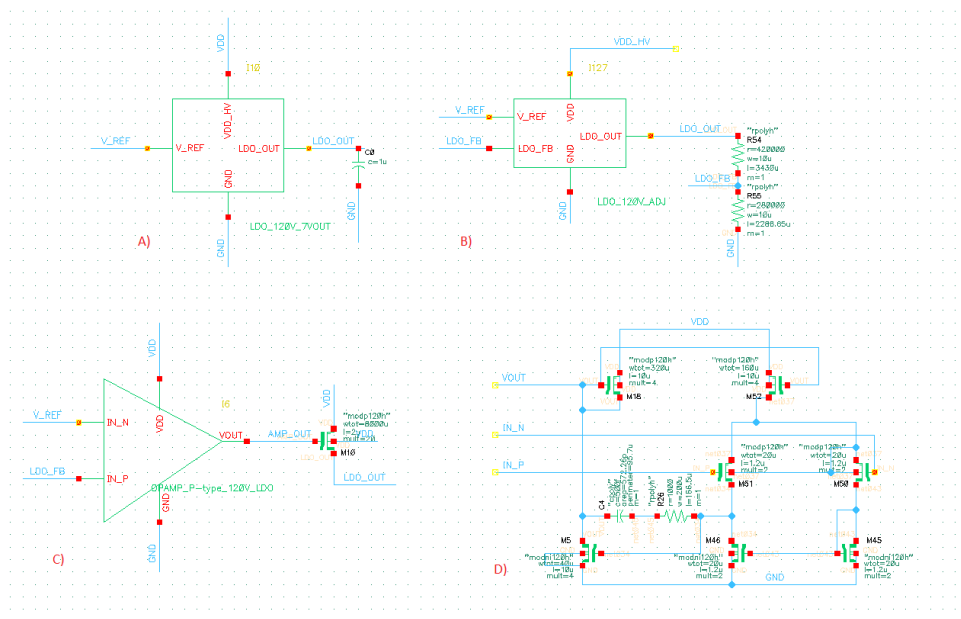
2.2.2.1. Tiesinio įtampą žeminančio keitiklio projektavimas

Projektuojama tiesinio įtampą žeminančio keitiklio elektrinė principinė schema. Šio keitiklio funkcija – žeminti įėjimo įtampą ir tiekti maitinimą vidinėms sistemos grandinėms. Projektuojant sistemą, parinkta keitiklio išėjimo įtampa yra 7 V. Keitiklio elektrinė principinė schema pateikta 25 paveiksle. Paveiksle pavaizduota:

- A) Tiesinis įtampą žeminantis keitiklis, kurio išėjimo įtampa yra 7 V. Šio keitiklio išėjime prijungtas išorinis 1 μF kondensatorius, kuris padeda užtikrinti stabilią išėjimo įtampą.
- B) Tiesinis įtampą žeminantis keitiklis, kurio išėjimo įtampa yra konfigūruojama. Išėjimo įtampa yra konfigūruojama rezistorių dalikliu. Suprojektuoto atraminės įtampos šaltinio išėjimo įtampa yra 2,8 V. Parinkti išėjimo įtampą konfigūruojantys rezistoriai yra 420 k Ω ir 280 k Ω . Žinant šias vertes, galima apskaičiuoti keitiklio išėjimo įtampą pagal formulę:

$$U_{OUT} = 2,8 V \frac{280 k\Omega + 420 k\Omega}{280 k\Omega} = 7 V. (9)$$

- C) Tiesinio įtampą žeminančio keitiklio su konfigūruojama išėjimo įtampa vidinė elektrinė principinė schema. Ši schema sudaryta iš operacinio stiprintuvo ir tranzistoriaus. Operacinis stiprintuvas lygina atraminę įtampą su grįžtamojo ryšio įtampa ir valdo tranzistorių taip, kad išėjimo įtampa būtų tinkamame lygyje.
- D) Operacinio stiprintuvo principinė elektrinė schema. Šis stiprintuvas yra šiek tiek paprastesnis už atraminės įtampos ir srovės šaltinio operacinį stiprintuvą. Šiam stiprintuvui nenaudojama atraminės srovės grandinė.



25 pav. Tiesinio įtampą žeminančio keitiklio elektrinė principinės schemos keturi lygmenys

Atliekamas tiesinio įtampą žeminančio keitiklio elektrinės principinės schemos modeliavimas ir tyrimas. Tikrinamas išėjimo įtampos svyravimas ΔU_{OUT} – matuojamas skirtumas tarp maksimalios ir minimalios išėjimo įtampos. Tyrimo metu keičiama įėjimo įtampa U_{IN} ir išėjimo srovė I_{OUT} . 4 lentelėje pateikti šio tyrimo rezultatai. Matoma, kad didėjant įėjimo įtampai, išėjimo įtampos nestabilumas didėja. Didėjant išėjimo srovei, išėjimo įtampos svyravimai mažėja. Pateikti rezultatai su išėjimo srove kintančia nuo 1 mA iki 25 mA. Geriausi rezultatai pasiekiami esant 25 mA. Jei išėjimo srovė yra dar labiau didinama, tai išėjimo įtampa pradeda mažėti ir keitiklis tampa nebetinkamas stabiliam sistemos veikimui.

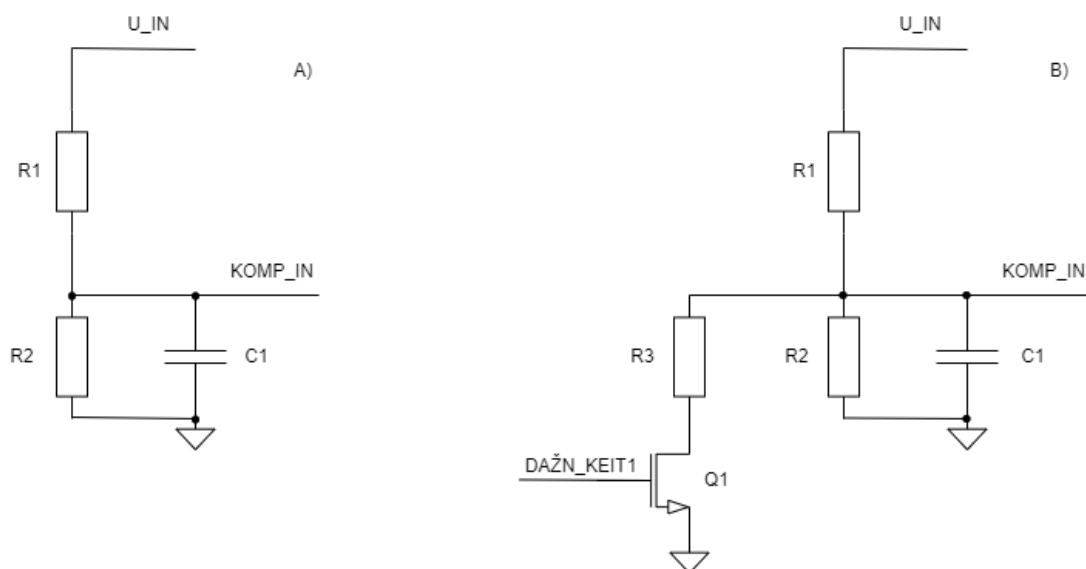
4 lentelė. Išmatuoti tiesinio keitiklio išėjimo įtampos svyravimai

	$I_{OUT} = 1 \text{ mA}$	$I_{OUT} = 10 \text{ mA}$	$I_{OUT} = 25 \text{ mA}$
$U_{IN} = 8 \text{ V}$	$\Delta U_{OUT} = 228,65 \text{ mV}$	$\Delta U_{OUT} = 33,41 \text{ mV}$	$\Delta U_{OUT} = 1,76 \text{ mV}$
$U_{IN} = 12 \text{ V}$	$\Delta U_{OUT} = 253,17 \text{ mV}$	$\Delta U_{OUT} = 67,84 \text{ mV}$	$\Delta U_{OUT} = 1,82 \text{ mV}$
$U_{IN} = 48 \text{ V}$	$\Delta U_{OUT} = 297,64 \text{ mV}$	$\Delta U_{OUT} = 139,58 \text{ mV}$	$\Delta U_{OUT} = 3,54 \text{ mV}$
$U_{IN} = 72 \text{ V}$	$\Delta U_{OUT} = 320,83 \text{ mV}$	$\Delta U_{OUT} = 146,81 \text{ mV}$	$\Delta U_{OUT} = 4,13 \text{ mV}$
$U_{IN} = 120 \text{ V}$	$\Delta U_{OUT} = 364,15 \text{ mV}$	$\Delta U_{OUT} = 163,36 \text{ mV}$	$\Delta U_{OUT} = 5,41 \text{ mV}$

2.2.2.2. Vidinio impulsų generatoriaus projektavimas

Projektuojamas vidinis impulsų generatorius. Kadangi impulsiniui įtampos keitikliui parinkta pastovaus įjungimo laiko architektūra, vidiniai impulsai yra sukuriama panaudojant kondensatorių sujungtą su išorine įtampa U_{IN} per rezistorių. Supaprastinta impulsų generatoriaus schema pavaizduota 26 paveikslo A) dalyje. Rezistoriai $R1$ ir $R2$ bei kondensatorius $C1$ sukuria grandinę, kurios įsikrovimo laikas priklauso nuo kondensatoriaus talpos ir rezistorių varžų. Kondensatoriaus įtampa $KOMP_{IN}$, kuri yra prijungta prie komparatoriaus, viršijus atraminę įtampą, kondensatorius yra iškraunamas ir taip prasideda kitas periodas. Tokiu būdu yra generuojami vidiniai impulsai. Jei šioje schemoje įėjimo įtampa didėja tiesiškai, tai ir impulsų dažnis tiesiškai didėja. Kadangi projektuojamos sistemos įėjimo įtampos režiai yra nuo 10 V iki 100 V, vadinasi sistemos veikimo dažnis kis 10 kartų. Tokį pokytį yra sunku suvaldyti, dėl to sistemos veikimas visame įėjimo įtampos diapazone gali būti nestabilus. Dėl to šiame darbe siūloma įvesti pastovaus įjungimo laiko architektūros patobulinimą, kuris leidžia bent iš dalies valdyti impulsinio keitiklio dažnį. Dažnio suvaldymui parenkami keli įėjimo įtampos taškai, kuriuose suveikia vidiniai sistemos jungikliai, keičiantys RC grandinės vertes ir taip keičiantys sistemos veikimo dažnį. Tokia

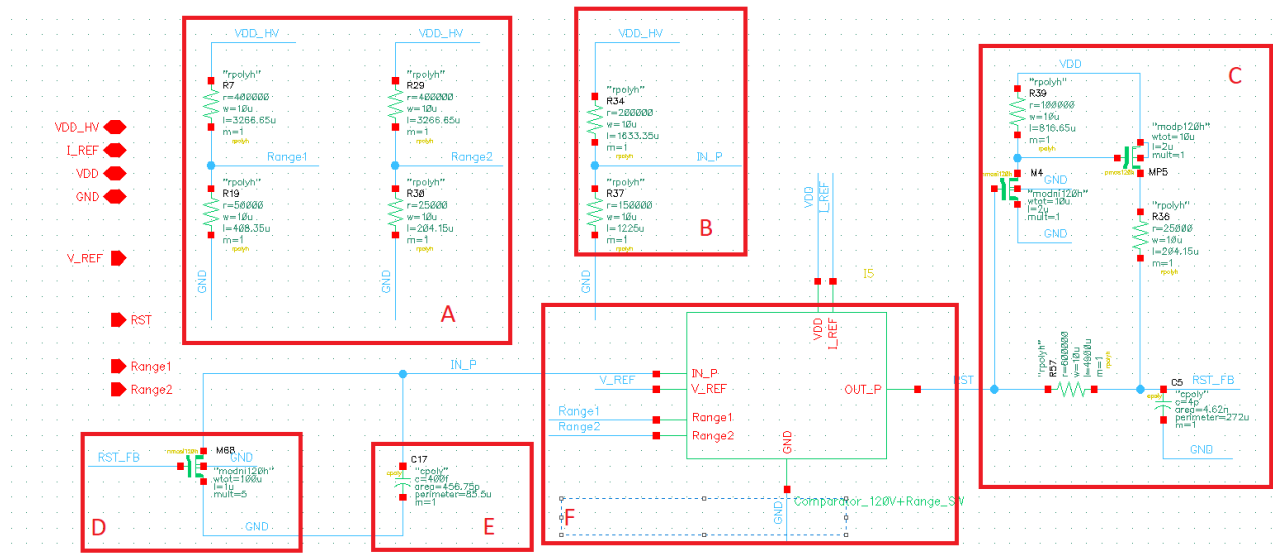
schema pavaizduota 26 paveikslo B) dalyje. Kai įėjimo įtampa pasiekia tam tikrą lygį, įjungiamas Q1 tranzistorius panaudojant *DAŽN_KEIT* signalą. Įjungus šį tranzistorių, R2 rezistorius yra lygiagrečiai sujungiamas su R3 rezistoriumi dėl to bendra šio jungimo varža sumažėja. Dėl tokio pokyčio, *KOMP_IN* įtampa lėčiau pasiekia atraminę įtampą – sumažėja generatoriaus dažnis. Projektuojamoje sistemoje parinkti du taškai, kuriuose yra perjungiamas veikimo dažnis. Taip sistema tampa stabilesnė plačiame įėjimo įtampos diapazone. Projektuojamoje elektrinėje principinėje schemoje parinkta R1 varža – 200 kΩ, R2 varža 150 kΩ, C1 talpa – 400 fF. Kai įėjimo įtampa pasiekia 26,5 V, R2 rezistoriui prijungiamas papildomas 150 kΩ rezistorius. Kai įėjimo įtampa pasiekia 55,5 V, lygiagrečiai prijungiamas 50 kΩ rezistorius.



26 pav. RC grandinėlė prijungta prie komparatoriaus (A), RC grandinėlė su dažnio valdymu (B)

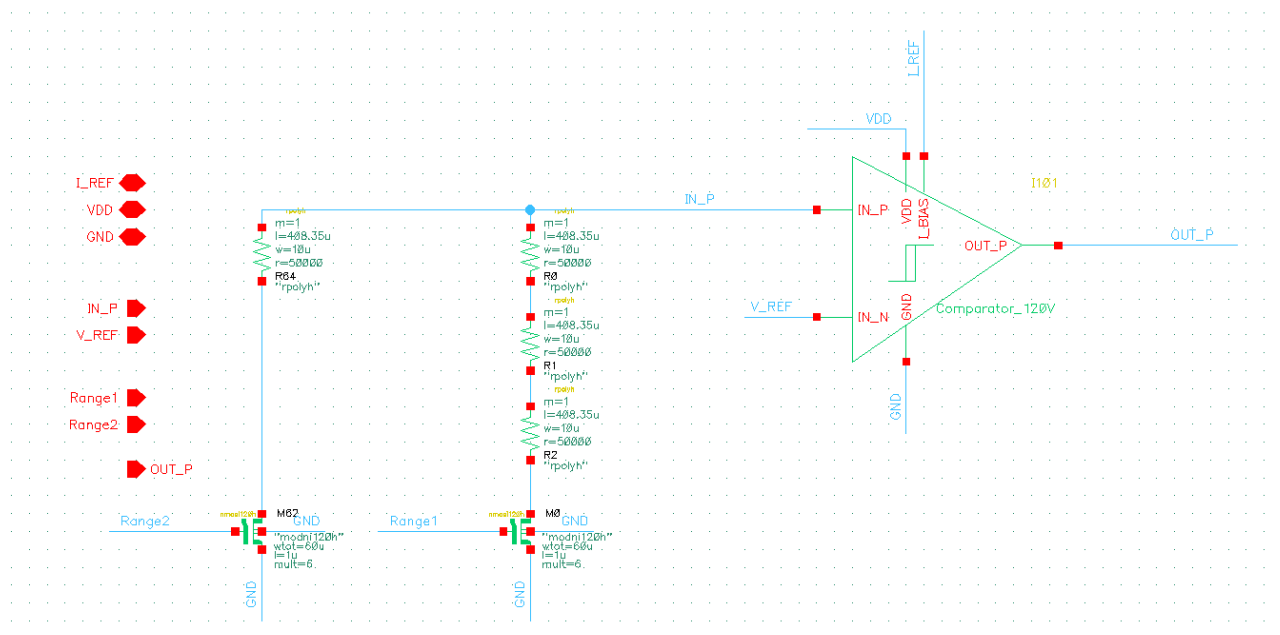
Vidinio impulsų generatoriaus pilna principinė elektrinė schema pateikta 27 paveiksle. Schema sudaryta ir šešių dalių. Rezistoriai (A) sudaro įtampos daliklius, kurie detektuoja dažnio keitimo poreikį. Rezistoriai (B) ir kondensatorius (E) sudaro RC grandinę – kai kondensatoriaus įtampa viršija atraminę 2,8 V įtampą, komparatorius (F) sugeneruoja aukšto lygio impulsą *RST* – tai loginio bloko taktinis dažnis. Aukšto įtampos lygio impulsas *RST* įkrauna 4 pF kondensatorių *C5* per 500 kΩ rezistorių – tai grįžtamojo ryšio įtampa *RST_FB*. Be to, komparatoriaus išėjime (C) papildomai suprojektuota greitesnio įkrovimo grandinė ir M4 ir MP5 tranzistorių bei R39 ir R36 rezistorių. Įkrovimo metu tranzistoriai yra atviri, todėl kondensatorius *C5* yra lygiagrečiai įkraunamas per 25 kΩ rezistorių. *RST_FB* įtampa didėja iki kol pasiekia M68 tranzistoriaus (D) atidarymo įtampą. Atsidarius M68 tranzistoriui, kondensatorius (E) yra iškraunamas, komparatoriaus išėjimo signalas nukrinta į žemą lygį. Kondensatorius *C5* esantis *RST_FB* tinkle yra lėtai iškraunamas per R57 500 kΩ rezistorių. Iškrovimo metu tranzistoriai esantys (C) bloke yra

uždaryti, dėl to kondensatoriaus iškrovimas yra ženkliai lėtesnis nei įkrovimas. Dėl to generuojami taktinio dažnio impulsai yra trumpi. Išsikrovus C5 kondensatoriui baigiasi vienas sistemos periodas ir pradedamas naujas.



27 pav. Vidinių impulsų generatoriaus elektrinė principinė schema

28 paveiksle pavaizduota komparatoriaus su įėjimo įtampos daliklio koeficiento keitikliu elektrinė principinė schema. Šioje schemoje pavaizduotas komparatorius ir du tranzistoriai, kurie sujungti su 27 paveikslo (A) įtampos dalikliais. Kai įtampos daliklių įtampa pasiekia tranzistorių atidarymo įtampą, pasikeičia įtampos daliklio koeficientas, kuris yra pavaizduotas 27 paveikslo (B) dalyje. Pasikeitus įtampos daliklio koeficientui sumažėja generatoriaus veikimo dažnis – sistema veikia stabiliau plačiuose įėjimo įtampos režiuose.



28 pav. Komparatoriaus su įėjimo įtampos daliklio koeficiento keitikliu elektrinė principinė schema

5 lentelėje pateikti vidinio impulsų generatoriaus veikimo dažniai prie įvairių įėjimo įtampų. Matoma, kad keitiklio taktinis dažnis kinta nuo 200,8 kHz iki 293,43 kHz, kai įėjimo įtampa keičiasi nuo 8 V iki 120 V. Dažnio kitimas yra mažesnis nei 50 % nuo mažiausios iki didžiausios įėjimo įtampos, dėl to sistema veikia stabiliai.

5 lentelė. Išmatuoti vidinio impulsų generatoriaus veikimo periodas ir dažnis prie skirtingų įėjimo įtampų

	T, μ s	f, kHz
U_IN = 8 V	4,980	200,80
U_IN = 10 V	4,631	215,94
U_IN = 12 V	4,561	219,25
U_IN = 24 V	4,236	236,07
U_IN = 28 V	4,140	241,55
U_IN = 36 V	4,023	248,57
U_IN = 48 V	3,876	258,00
U_IN = 53 V	3,863	258,87
U_IN = 60 V	3,766	265,53
U_IN = 72 V	3,649	274,05
U_IN = 90 V	3,531	283,21
U_IN = 120 V	3,408	293,43

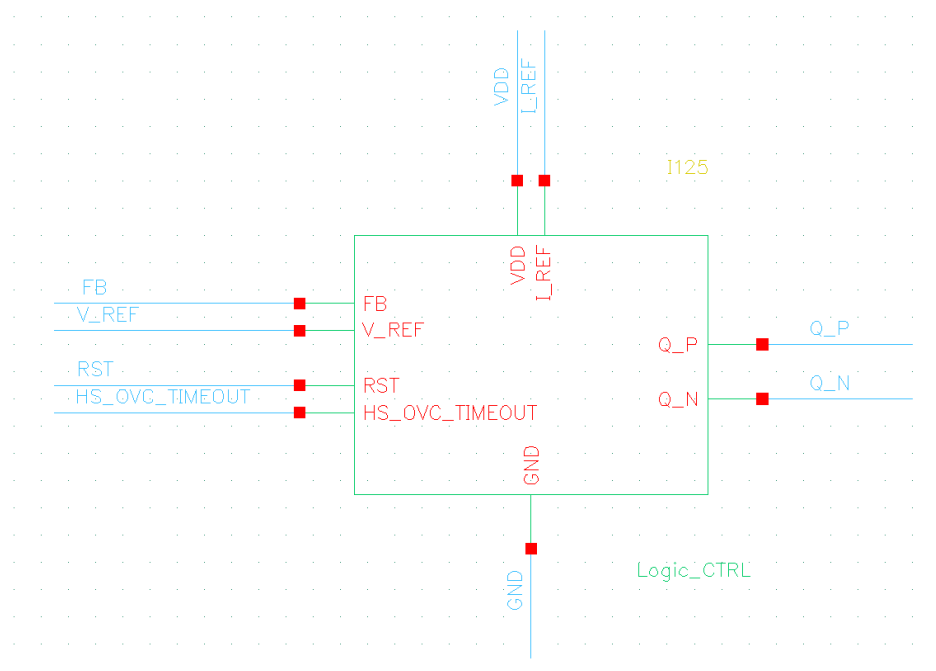
2.2.2.3. Loginio sistemos valdymo bloko projektavimas

Projektuojamas loginio sistemos valdymo blokas. Šio bloko pagrindinė funkcija – tinkamai valdyti impulsinį išėjimo įtampos signalą. Išėjimo įtampos impulsai yra generuojami tik tam tikromis sąlygomis:

- Prijungta įėjimo įtampa ir vidinis impulsų generatorius sukuria vidinius impulsus.
- Išėjimo įtampa yra žemesnė nei nustatyta norima išėjimo įtampa.
- Išėjimo srovė neviršija leistinos maksimalios ribos.
- Tiesinio įtampą žeminančio keitiklio išėjimo įtampa pakankamai aukšto lygio.

Jei šios sąlygos yra tenkinamos, loginis sistemos valdymo blokas siunčia signalus išėjimo impulsų generatoriui, kad reikia generuoti išėjimo įtampos impulsus. Loginio sistemos valdymo bloko simbolis pavaizduotas 29 paveiksle. Prie bloko prijungti signalai:

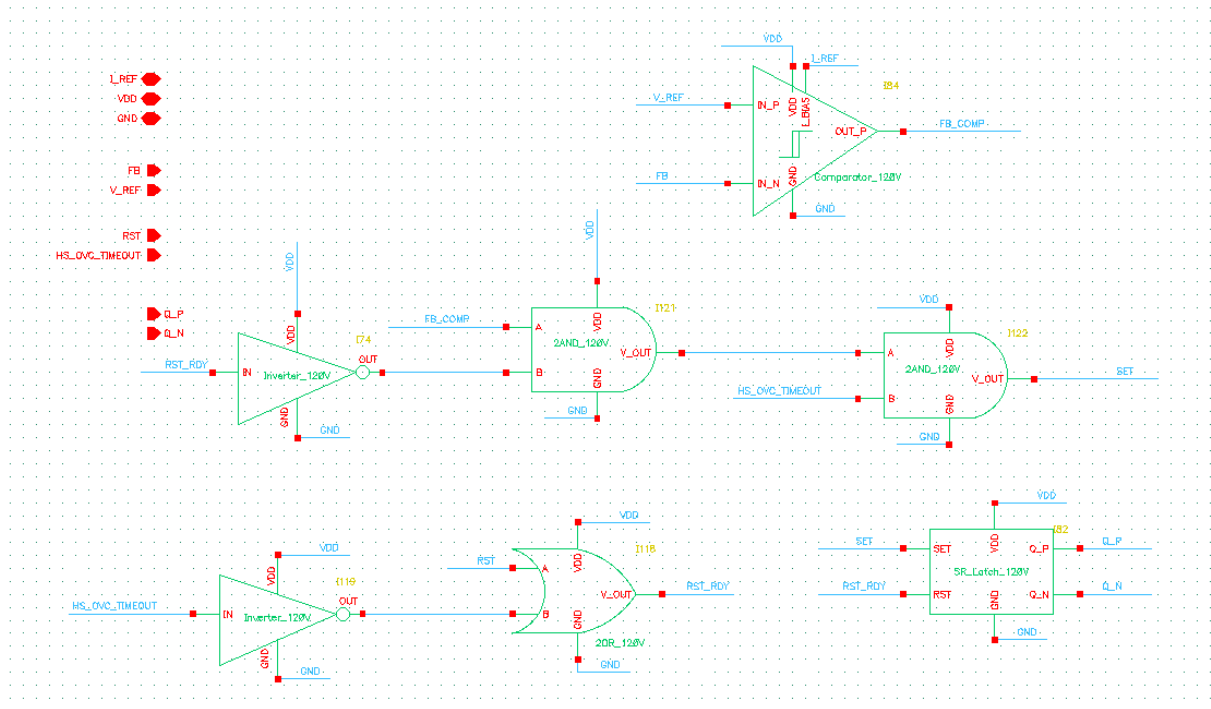
- VDD – 7 V maitinimo įtampa iš tiesinio įtampą žeminančio keitiklio.
- I_{REF} – atraminė 40 μA srovė.
- V_{REF} – atraminė 2,8 V įtampa.
- FB – grįžtamojo ryšio signalas. Šis signalas matuoja išėjimo įtampą.
- RST – iš vidinių impulsų generatoriaus gaunami impulsai.
- $HS_OVC_TIMEOUT$ – signalas iš srovės ribojimo grandinės, kuriuo yra pranešama apie per didelę išėjimo srovę.
- Q_P – išėjimo impulsų generatoriui skirtas signalas įjungiantis išėjimo įtampos impulsą.
- Q_N – išėjimo impulsų generatoriui skirtas signalas išjungiantis išėjimo įtampos impulsą.



29 pav. Loginio sistemos valdymo bloko simbolis

Sistemos darbo pradžioje įsijungia atraminės įtampos ir srovės šaltinis, kuris sukuria V_{REF} ir I_{REF} signalus. Po to įsijungia vidinis tiesinis įtampą žeminantis keitiklis, kuris sukuria signalą VDD . Vidinis impulsų generatorius pradeda generuoti periodinį signalą RST . Loginis blokas lygina FB įtampą su V_{REF} . Jei FB įtampa yra mažesnė už V_{REF} , tuomet Q_P signalas atkartoja RST signalą – kai RST pakyla į aukštą lygį, Q_P signalo įtampa taip pat pakyla į aukštą lygį. Jei

HS_OVC_TIMEOUT signalas pakyla į aukštą lygį, tuomet loginis blokas supranta, kad yra viršyta išėjimo srovė ir *Q_P* signalą nustato į žemą lygį nepriklausomai nuo *RST* signalo lygio, o *Q_N* signalą nustato į aukštą lygį – nutraukia išėjimo įtampos impulsą. Pilna loginio bloko principinė elektrinė schema pateikta 30 paveiksle.



30 pav. Loginio sistemos valdymo bloko elektrinė principinė schema

Loginio sistemos valdymo bloko elektrinė principinė schema sudaryta iš elementarių skaitmeninių loginių elementų – inverterio, 2-IR, 2-ARBA, SR trigerio ir komparatoriaus (šių elementarių elementų projektavimas ir veikimas aprašytas tolimesniuose poskyriuose). Loginio bloko teisingumo lentelė pateikta 6 lentelėje, kuri paaiškina grandinės veikimą. Pateiktos visos galimos loginio bloko būsenos:

- 1) Vidinis taktinio impulso signalas *RST* žemo lygio. Grįžtamojo ryšio signalas *FB* yra žemo lygio – išėjimo įtampa nesiekia norimos įtampos lygio. *HS_OVC_TIMEOUT* signalas yra aukšto lygio – išėjimo srovė neviršija leistino lygio. *Q_P* aukšto lygio, o *Q_N* žemo lygio – generuojamas aukšto lygio išėjimo įtampos impulsas.
- 2) Vidinis taktinio impulso signalas *RST* aukšto lygio. Grįžtamojo ryšio signalas *FB* yra žemo lygio – išėjimo įtampa nesiekia norimos įtampos lygio. *HS_OVC_TIMEOUT* signalas yra aukšto lygio – išėjimo srovė neviršija leistino lygio. *Q_P* žemo lygio, o *Q_N* aukšto lygio – išėjimo įtampos impulsas krenta į žemą lygį.

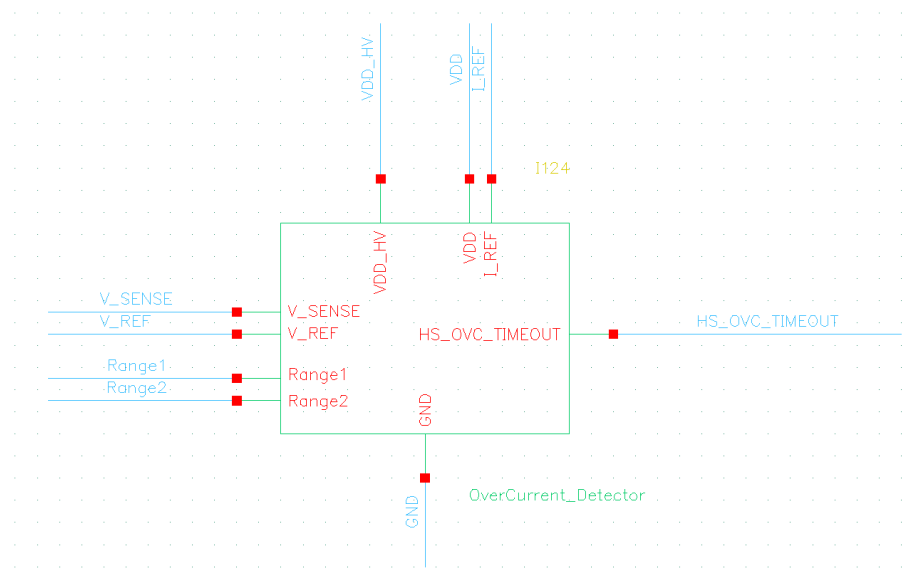
- 3) *HS_OVC_TIMEOUT* signalas yra žemo lygio – išėjimo srovė viršija leistiną lygį. Nepriklausomai nuo *RST* ir *FB* signalų lygių – išėjimo įtampos impulsas nėra generuojamas.
- 4) *FB* signalas yra aukšto lygio – išėjimo įtampa pasiekė norimą įtampos lygį. Nepriklausomai nuo *RST* ir *HS_OVC_TIMEOUT* signalų lygių – išėjimo įtampos impulsas nėra generuojamas. Šiuo atveju keitiklis laukia iki kol išėjimo įtampa nukris žemiau leistino lygio.

6 lentelė. Loginio sistemos valdymo bloko teisingumo lentelė

Eil. Nr.	RST	FB	HS_OVC_TIMEOUT	Q_P	Q_N
1	0	0	1	1	0
2	1	0	1	0	1
3	X	X	0	0	1
4	X	1	X	0	1

2.2.2.4. Išėjimo srovės ribojimo bloko projektavimas

Siekiant apsaugoti projektuojamą sistemą, prie sistemos prijungtą apkrovą ir tiksliau valdyti išėjimo signalą [12], projektuojama išėjimo srovės ribojimo elektrinė principinė schema. Šio bloko principinės elektrinės schemos simbolis pavaizduotas 31 paveiksle.



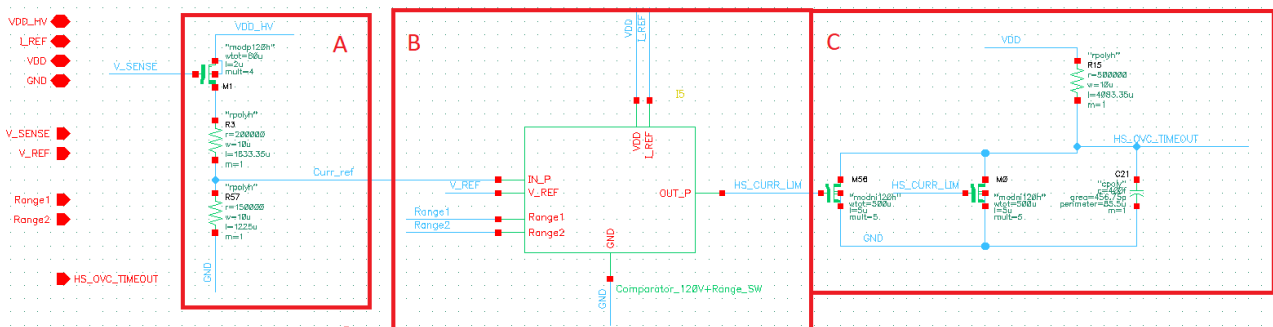
31 pav. Išėjimo srovės ribojimo bloko simbolis

Šio schemos bloko simbolio signalai:

- *VDD_HV* – išorinės įtampos įėjimo signalas (nuo 10 V iki 100 V).
- *VDD* – 7 V vidinės įtampos signalas.

- I_{REF} – 40 μA atraminės srovės signalas
- V_{SENSE} – signalas, kuriuo yra aptinkama per didelė išėjimo srovė. Tarp VDD_{HV} ir V_{SENSE} signalų prijungiamas 1 Ω rezistorius. Jei išėjimo srovė yra per didelė, ant rezistoriaus krenta įtampa, kuri sistemai praneša apie viršytą išėjimo srovę.
- V_{REF} – 2,8 V atraminės įtampos signalas.
- $Range1$ ir $Range2$ – įėjimo signalai, kuriais sistema sužino, kad reikia pakeisti matavimo režius. Šie režių perjungimo ribos sutampa su vidinių impulsų generatoriaus perjungimo ribomis, kurios aprašytos 2.2.2.2. poskyryje.
- $HS_OVC_TIMEOUT$ – signalas, kuriuo loginiam blokui yra pranešama apie viršytą išėjimo srovę.

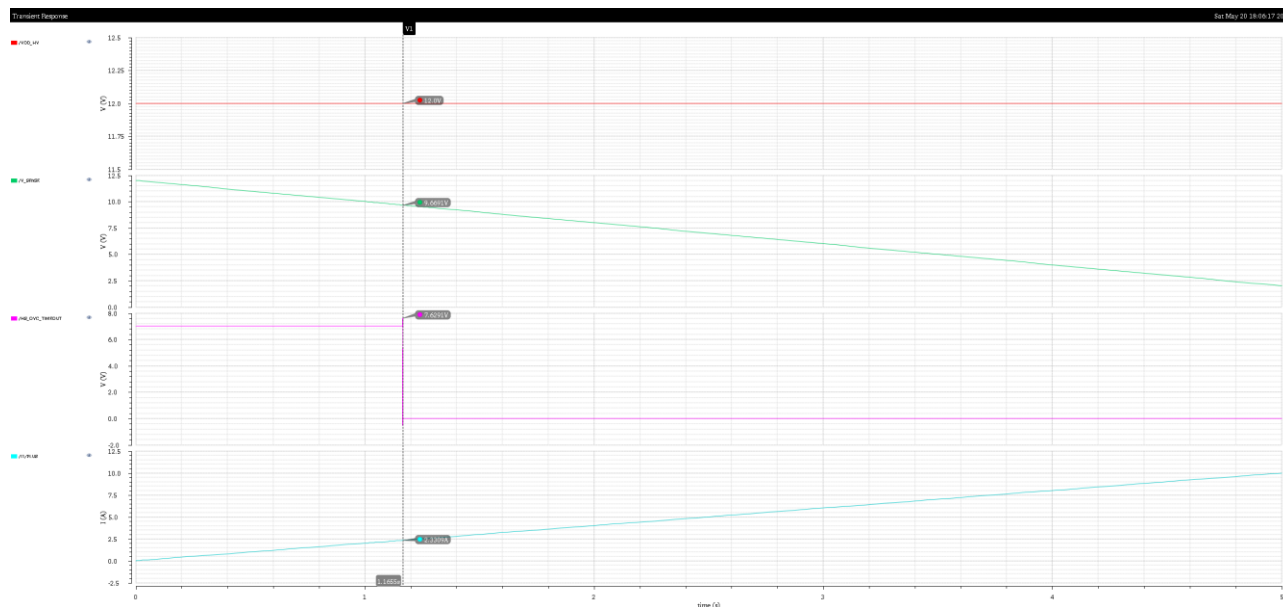
32 paveiksle pateikta išėjimo srovės ribojimo bloko elektrinė principinė schema. Šią schemą sudaro trys dalys. Schemos pagrindą sudaro komparatorius su intergruota režių keitimo schema (B). Tai tas pats schemos elementas, kurio elektrinė principinė schema naudojama vidinių impulsų generatoriui ir yra pavaizduota 28 paveiksle. Schemos dalis (A) detektuoja per aukštą išėjimo srovę. Kuo didesnė yra išėjimo srovė, tuo didesnis įtampos skirtumas tarp V_{SENSE} (sujungto su $M1$ užtūra) ir VDD_{HV} (sujungto su $M1$ ištaka) tinklų. Kai skirtumas pakankamai didelis, tranzistorius $M1$ atsidaro ir srovė teka per $R3$ bei $R57$ rezistorius. Įtampa krintanti ant $R57$ rezistoriaus didėja. Kai ji viršija atraminę 2,8 V įtampą, grandinė detektuoja, kad išėjimo srovė yra per didelė. Grandinė (C) invertuoja komparatoriaus išėjimo signalą ir sukuria vėlinimą, kuris neleidžia generuoti išėjimo srovės kelias dešimtis mikrosekundžių po viršsrovio detektavimo.



32 pav. Išėjimo srovės ribojimo bloko elektrinė principinė schema

33 paveiksle pateikta laikinė diagrama iliustruojanti bloko veikimą. Paveiksle pavaizduotas bloko veikimas esant 12 V įėjimo įtampai, 27°C aplinkos temperatūrai, modeliavimui naudoti tipiniai elementų modeliai. Pavaizduotos keturių signalų laikinės diagramos – įėjimo įtampa (raudona), V_{SENSE} signalo įtampa (žalia), viršytą srovę aptinkantis signalas (violetinė), išėjimo srovė (mėlyna). Matoma, kad viršyta išėjimo srovė nustatoma esant 2,3309 A išėjimo srovei. Atliekant tyrimą įsitikinta, kad viršytos išėjimo srovės lygis nepriklauso nuo įėjimo įtampos. Atlikti

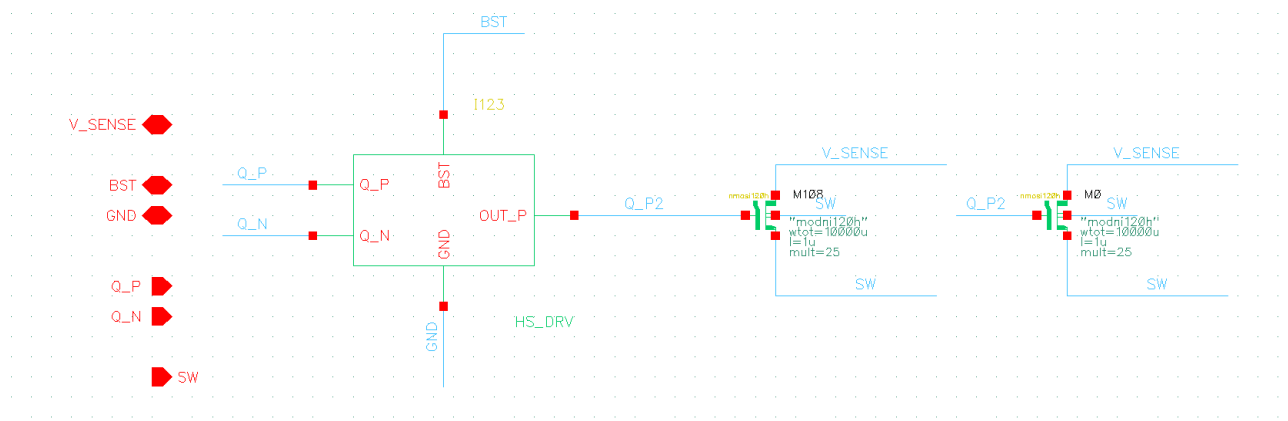
matavimai prie skirtingų aplinkos temperatūrų. Esant -40°C temperatūrai, viršyta išėjimo srovė nustatoma esant 2,45802 A, o esant 125°C temperatūrai ši srovė yra 2,13372 A. Daugiau tyrimo rezultatų pateikta 3.1.5. poskyryje, kuriame atliktas šio bloko tyrimas su skirtingais elementų modeliais ir elektrinės principinės schemos modeliavimo rezultatai palyginti su topologijos modeliavimo rezultatais.



33 pav. Išėjimo srovės ribojimo bloko elektrinės principinės schemos laikinė diagrama

2.2.2.5. Išėjimo įtampos impulsų generatoriaus projektavimas

Projektuojama išėjimo įtampos impulsų generatoriaus principinė elektrinė schema. Ši schema skirta sugeneruoti išėjimo signalą. Ji reikalinga dėl to, kad sistemos viduje generuojami signalai yra 7 V įtampos lygio, o išėjimo signalas pagal darbo užduotį gali būti bent nuo 10 V iki 100 V. Vidiniai sistemos signalai yra perduodami nuo kelių mikroamperų iki kelių miliamperų lygyje. Išėjimo signalai gali būti iki kelių amperų lygio. Taigi ši projektuojama sistemos dalis turi atlikti signalų transformacijas ir suderinti vidinius bei išorinius signalus. Išėjimo įtampos impulsų generatoriaus principinė elektrinė schema pateikta 34 paveiksle. Detalesnė elektrinė principinė schema pateikta A11 priede.



34 pav. Išėjimo įtampos impulsų generatoriaus simbolis

Išėjimo įtampos impulsų generatoriaus išoriniai signalai ir jų paskirtis:

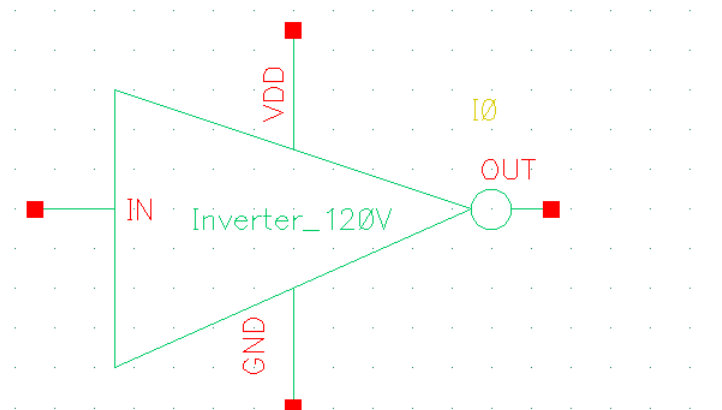
- Q_P – signalas, kuris praneša blokui, kad reikia įjungti išėjimo įtampos impulsą
- Q_N – tai invertuotas Q_P signalas. Kai Q_N signalas yra pakeliamas į aukštą įtampos lygį, išėjimo įtampos impulsas yra išjungiamas.
- V_SENSE – tai įėjimo įtampos signalas. Įėjimo įtampa yra prijungta per $1\ \Omega$ rezistorių. Srovės ribojimo blogas stebi įtampos kritimą ant rezistoriaus ir praneša loginiam blokui apie per didelę išėjimo srovę.
- SW – tai išėjimo įtampos impulsų signalas. Šis signalas yra prijungtas prie induktyvumo ritės. Generuojami išėjimo įtampos ir srovės impulsai įkrauna ritę. Ritė ir išėjimo grandinėje esantys kondensatoriai išlygina impulsus iki nuolatinės įtampos.
- BST – išėjimo įtampos impulsus generuojančio tranzistoriaus atidarymo grandinės maitinimo signalas. Ši įtampa yra visada 7 V didesnė už SW signalo įtampą. Tokia logika reikalinga, nes išėjimo tranzistorius yra $NMOP$. Tokio tipo tranzistoriui atidaryti reikia, kad užtūros įtampa būtų didesnė už ištakos įtampą bent per slenkstinę tranzistoriaus įtampą U_{SL} . Jei būtų naudojama ta pati V_SENSE įtampa tranzistoriaus valdymui, kai SW signalas būtų lygus V_SENSE , tranzistorius užsidarytų ir išėjimo impulsai būtų generuojami nestabiliai. [9]

Siekiant įvertinti šio bloko veikimą, atliktas tyrimas, kurio metu matuota išėjimo signalą generuojančio tranzistoriaus varža. Kuo didesnė tranzistoriaus kanalo varža – tuo didesni nuostoliai išėjimo grandinėje. Tyrimo metu Q_P signalas nustatytas į aukštą lygį – išėjimo tranzistorius atidarytas. Prie SW signalo prijungtas $0,5\text{ A}$ srovės šaltinis, kuriuo imituojama apkrova. Tyrimo metu matuotas įtampos kritimas ant tranzistoriaus kanalo ir pagal šią įtampą išskaičiuota tranzistoriaus kanalo varža. Išmatuota tranzistoriaus varža 27°C temperatūroje yra $2,06756\ \Omega$, -40°C temperatūroje $1,1721\ \Omega$, o 125°C temperatūroje $3,478492\ \Omega$. Matoma, kad temperatūrai

kylant, tranzistoriaus varža didėja. Šio tyrimo metu naudoti tipiniai elementų modeliai. Kraštutinių elementų modelių rezultatai ir palyginimas su topologijos modeliavimų rezultatais pateiktas 3.1.6. poskyryje.

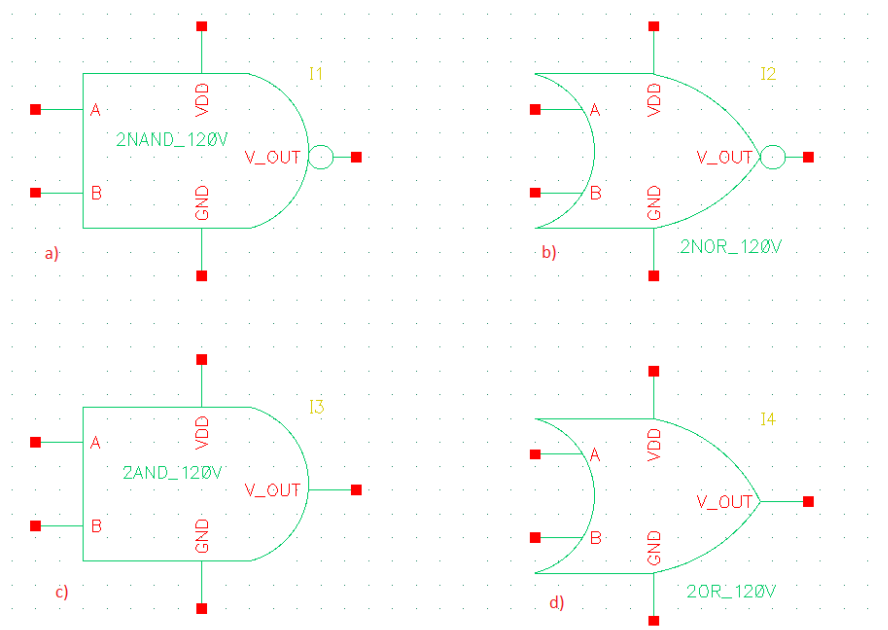
2.2.2.6. Elementarių loginių elementų projektavimas

Šiame poskyryje aprašomas elementarių loginių elementų projektavimas ir paaiškinamas jų veikimas. Pats paprasčiausias loginis elementas – inverteris, kurio simbolis pavaizduotas 35 paveiksle. Inverteris turi keturis kontaktus – du iš jų skirti maitinimui, du – signalų apdorojimui. Maitinimo kontaktai yra prijungiami įtampa skirta elemento veikimui užtikrinti, o signaliniais kontaktai yra apdorojama informacija. Šis elementas skirtas invertuoti įėjimo signalą. Pavyzdžiui, jei įėjimo signalas *IN* yra aukšto lygio, tuomet išėjimo signalas *OUT* yra žemo lygio. Šio inverterio projektavimui naudojami 120 V tranzistoriai. Inverterio principinė elektrinė schema pateikta A1 priede.



35 pav. Inverterio simbolis elektrinėje principinėje schemoje

Toliau projektuojami šiek tiek sudėtingesni loginiai elementai. 36 paveiksle pateikiami IR-NE, ARBA-NE, IR bei ARBA loginių elementų elektrinės principinės schemos simboliai. Šių elementų veikimas paaiškintas 7 lentelėje pateiktomis teisingumo lentelėmis. Lentelėje A ir B yra lygiaverčiai įėjimo signalai, pagal kuriuos elementai formuoja išėjimo signalus. Lentelėje aukštas signalo lygis žymimas vienetu, o žemas – nuliu. IR-NE elementas išėjime sukuria žemą lygį išėjime tik tada, kai abu įėjimo signalai yra aukšto lygio. ARBA-NE elementas išėjime sukuria žemą lygį išėjime, kai bent vienas įėjimo signalas yra aukšto lygio. IR elementas yra invertuotas IR-NE, o ARBA elementas yra invertuotas ARBA-NE. Šių loginių elementų principinės elektrinės schemos pateiktos prieduose A2–A5.



36 pav. Loginių a) IR-NE, b) ARBA-NE, c) IR, d) ARBA simbolių

7 lentelė. Loginių IR-NE, ARBA-NE, IR, ARBA elementų teisingumo lentelės

A signalo reikšmė	B signalo reikšmė	IR-NE išėjimo signalo reikšmė	ARBA-NE išėjimo signalo reikšmė	IR išėjimo signalo reikšmė	ARBA išėjimo signalo reikšmė
0	0	1	1	0	0
0	1	1	0	0	1
1	0	1	0	0	1
1	1	0	0	1	1

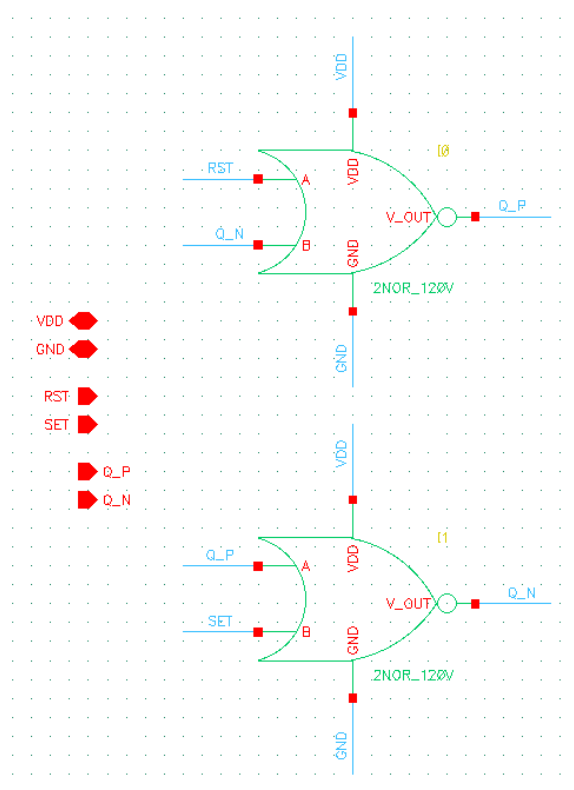
2.2.2.7. SR trigerio projektavimas

Toliau projektuojamas sudėtingesnis loginis elementas – SR trigeris, kurio elektrinė principinė schema yra pavaizduota 37 paveiksle. Elementas sudarytas iš dviejų ARBA-NE elementų. 2.2.2.6. poskyryje projektuotų loginių elementų išėjimo signalas visada yra susietas su įėjimo signalais realiuoju laiku, o SR trigeris veikia kaip atminties ląstelė. Trigeris valdomas nustatymo signalu *SET* ir išvalymo signalu *RST* (angl. *Reset*). Trigeris turi du išėjimo signalus – *Q_P* ir *Q_N*, kurie visada yra vienas kitam priešingi. SR trigerio teisingumo lentelė su visomis galimomis loginėmis reikšmėmis pateikta 8 lentelėje. Kai nustatymo signalas *SET* yra aukštame lygyje, tuomet išėjimo signalas *Q_P* yra nustatomas į aukštą lygį. Kai išvalymo signalas *RST* yra aukštame lygyje, tuomet išėjimo signalas *Q_N* yra nustatomas į aukštą lygį. Jei abu įėjimo signalai yra žemame lygyje, tuomet vyksta atminties saugojimas – abu išėjimo signalai nekinta ir saugo

prieš tai turėtas vertes. Įėjimo signalų kombinacija, kai abu signalai yra aukštame lygyje nėra galima. Tokiu atveju išėjimo signalų lygiai yra neapibrėžti, todėl naudojant SR trigerį sistemoje būtina užtikrinti, kad įėjimo signalai niekada vienu metu nebūtų aukštame lygyje.

8 lentelė. SR trigerio teisingumo lentelė

SET signalo reikšmė	RST signalo reikšmė	Q_P signalo reikšmė	Q_N signalo reikšmė
0	0	Nekinta	Nekinta
0	1	0	1
1	0	1	0
1	1	Negalima	Negalima



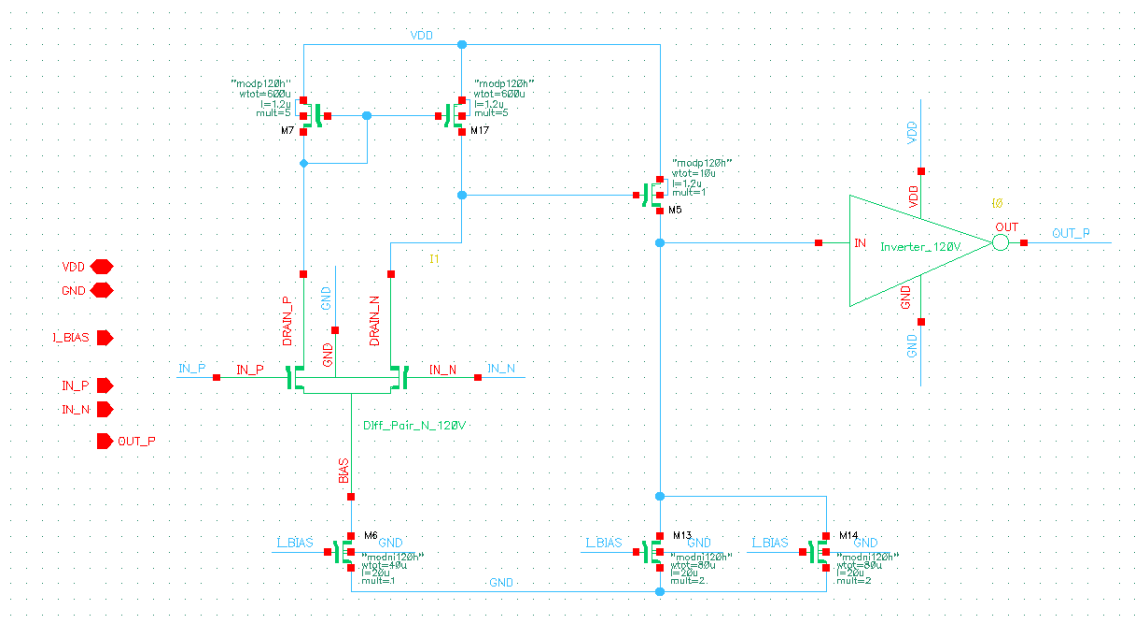
37 pav. SR trigerio elektrinė principinė schema

2.2.2.8. Komparatoriaus projektavimas

Šiame poskyryje aprašomas suprojektuotas komparatorius, kurio principinės elektrinės schemos simbolis pateiktas 38 paveiksle. Komparatoriaus pagrindinė funkcija – palyginti du įėjimo signalus. Komparatoriaus veikimą paaiškinanti teisingumo lentelė pateikta 9 lentelėje. Kai įėjimo signalas IN_P yra aukštesnis už IN_N , tuomet išėjimo signalas Q_P yra aukštame lygyje. Kai IN_N yra aukštesnis už IN_P , tuomet išėjimo signalas Q_P yra žemame lygyje. Komparatoriaus veikimui reikia ne tik maitinimo įtampos signalų VDD ir GND , bet ir atraminės srovės I_{BIAS} – tai iš

atraminio srovės šaltinio gaunama 40 μA srovė. Pilna komparatoriaus elektrinė principinė schema pateikta A7 priede.

Schemos veikimą nesunku paaiškinti analizuojant įėjimo signalus, kurie yra prijungti prie diferencinės tranzistorių poros. Kai signalas IN_P yra aukštesnis už IN_N signalą, didžioji dalis srovės teka per kairįjį tranzistorių. Dešinysis diferencinės poros tranzistorius yra uždarytas, todėl $M5$ tranzistoriaus užtūros įtampa yra aukšto lygio. $M5$ tranzistorius yra uždarytas, todėl inverterio įėjimo signalas IN yra žemo lygio, o išėjimo signalas OUT_P yra aukšto lygio.



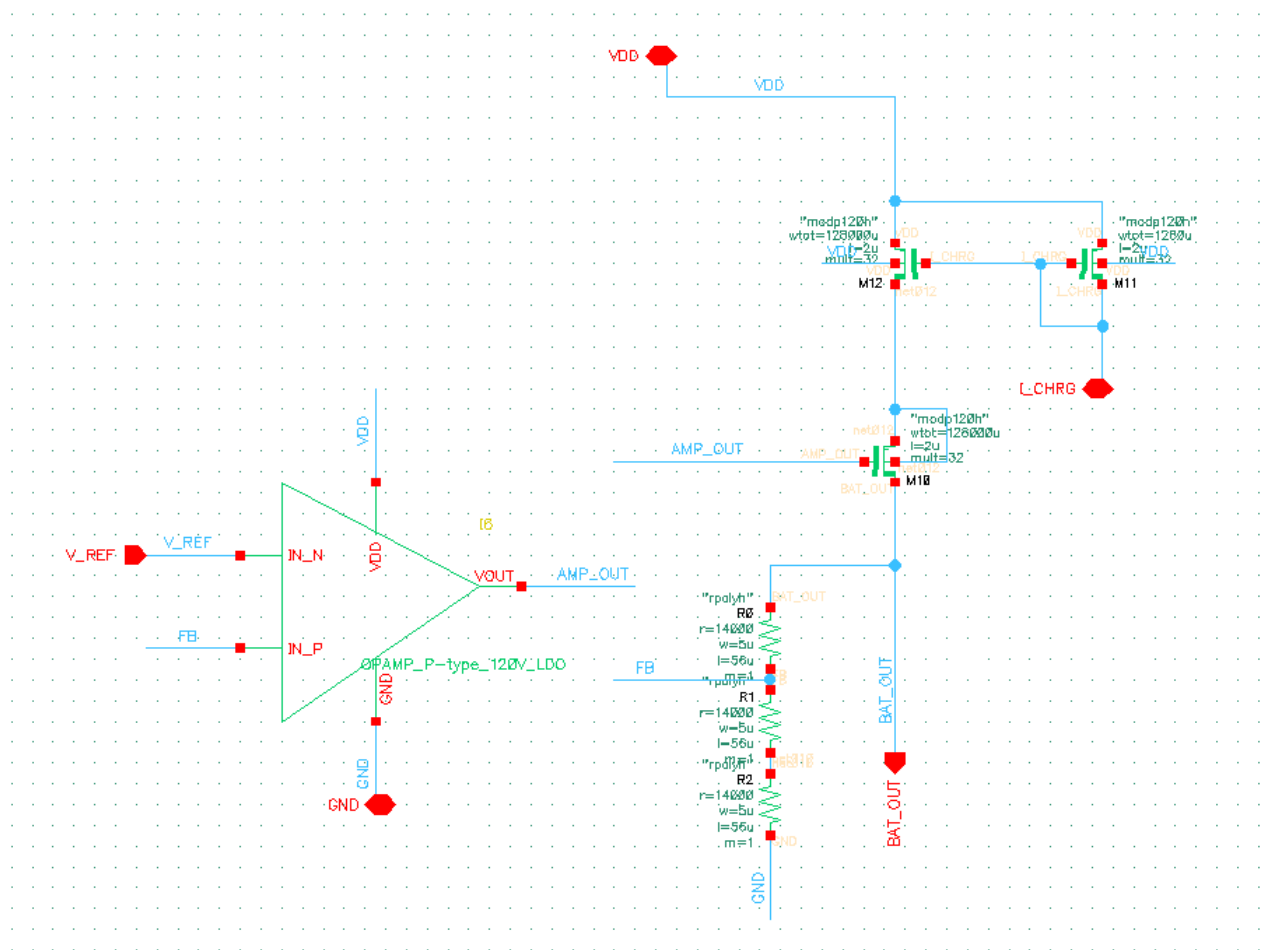
38 pav. Komparatoriaus elektrinė principinė schema

9 lentelė. Komparatoriaus teisingumo lentelė

	OUT_P signalo reikšmė
$IN_P < IN_N$	0
$IN_P > IN_N$	1

2.2.3. Ličio baterijos kroviklio projektavimas

Projektuojama ličio baterijos kroviklio elektrinė principinė schema. Kaip numatyta užduotyje, kroviklis turi gebėti krauti ličio bateriją bent 100 mA srove. Projektuojant blokinę schemą numatyta, kad krovikliui reikalingi du schemos blokai – tiesinis įtampą žeminantis keitiklis ir srovės ribojimo grandinė. Suprojektuoto kroviklio principinė elektrinė schema pateikta 39 paveiksle.



39 pav. Ličio baterijos kroviklio principinė elektrinė schema

Įtampą žeminantis keitiklis yra įgyvendintas naudojant operacinį stiprintuvą ir *M10* tranzistorių. Naudojamas tas pats operacinis stiprintuvas, kuris yra naudojamas ir impulsinio įtampą žeminančio keitiklio vidinę 7 V įtampą generuojančio tiesinio įtampos keitiklio schemoje. Prie operacinio stiprintuvo neigiamo įėjimo signalo prijungta atraminė 2,8 V įtampa. Prie teigiamo stiprintuvo įėjimo signalo prijungta grąžtamojo ryšio įtampa *FB*. Šis signalas yra sujungtas su kroviklio išėjimo signalu per rezistorių daliklį. Daliklis parinktas taip, kad maksimali kroviklio išėjimo įtampa būtų 4,2 V. Jei kroviklio išėjimo įtampa yra žemesnė, už 4,2 V, operacinis stiprintuvas atidaro *M10* tranzistorių ir išėjimo įtampa kyla. Kai išėjimo įtampa pasiekia 4,2 V, operacinis stiprintuvas uždaro *M10* tranzistorių ir išėjimo įtampa nebedidėja.

Siekiant apsaugoti bateriją ir užtikrinti norimą krovimo srovę, suprojektuota srovės ribojimo grandinė. Srovės ribojimas yra įgyvendintas dviem PMOP tranzistoriais. Tranzistorius *M11* yra sukuria atraminę srovę – jo užtūra ir santaka yra sujungtos bei prijungtos prie išorinio rezistoriaus. Srovė tekanti per šį rezistorių valdo įtampą, kuri krenta ant *M11* tranzistoriaus užtūros. Prie tranzistoriaus *M11* užtūros prijungta tranzistoriaus *M12* užtūra. *M12* tranzistoriaus plotis yra 100 kartų didesnis už tranzistoriaus *M11* plotį. Dėl tokios matmenų proporcijos, maksimali srovė, kuri

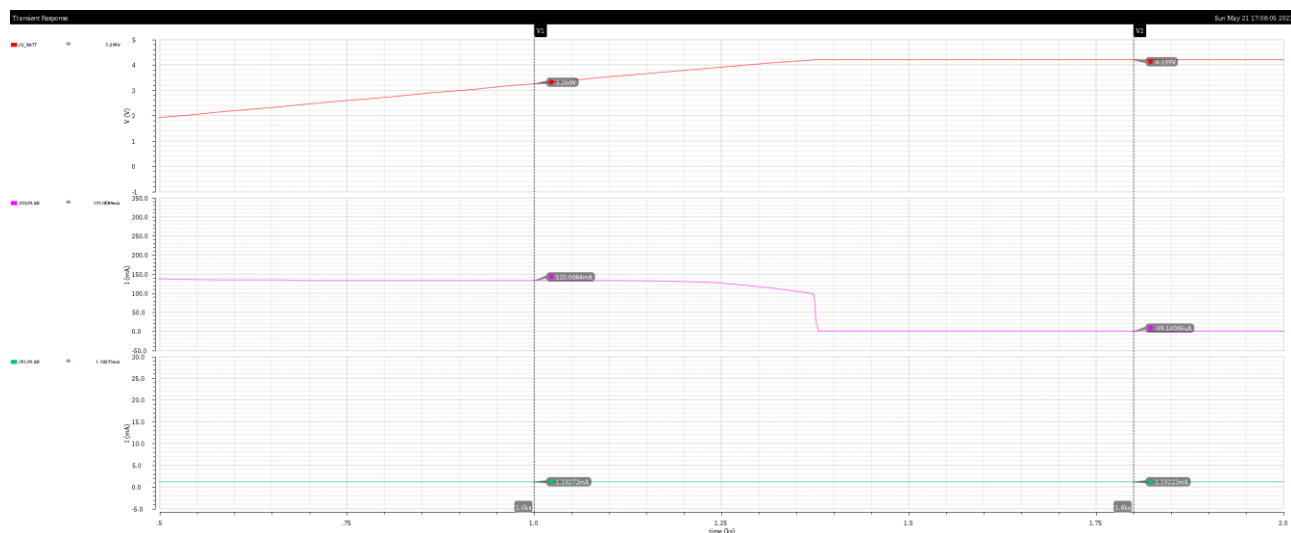
gali tekėti per tranzistoriaus *M12* kanalą yra apytiksliai 100 kartų didesnė už srovę, kuri teka per išorinį rezistorių prijungtą prie *M11*.

40 paveiksle pavaizduota kroviklio testavimui skirta elektrinė principinė schema. Kroviklio maitinimui VDD yra naudojama 5 V įtampa. Atraminė įtampa V_{REF} yra 2,8 V lygio – tai ta pati atraminė įtampa, kuri naudojama ir impulsinio įtampą žeminančio keitiklio projektavime. Prie kroviklio prijungtas R1 rezistorius, kuriuo yra valdoma krovimo srovė. Didėjant rezistoriaus varžai, krovimo srovė mažėja. Šiuo atveju prijungtas 2 k Ω rezistorius, kuris nustato apytiksliai 133 mA krovimo srovę (27°C temperatūroje). Baterija yra imituojama 50 F kondensatoriumi, kurį įkrauna suprojektuotas baterijos kroviklis.

40 pav. Kroviklio testavimo elektrinė principinė schema

41 paveiksle pavaizduotos laikinės diagramos iliustruojančios kroviklio veikimą. Paveiksle pavaizduoti signalai:

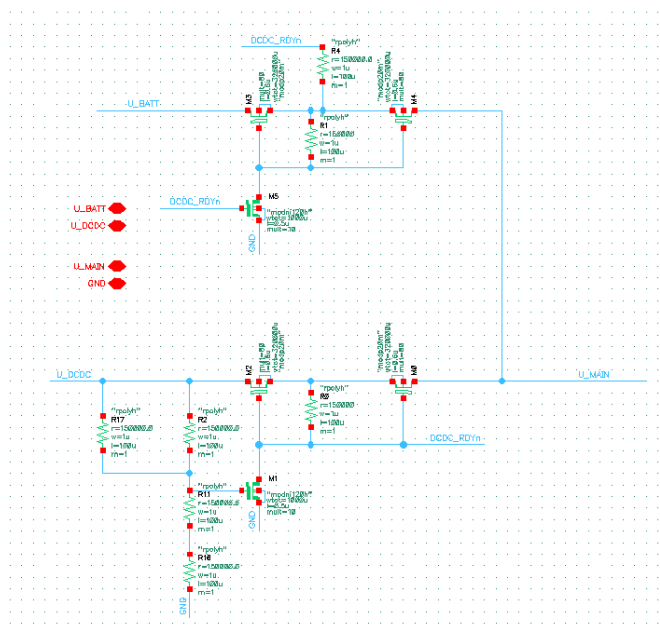
- Raudonas signalas - baterijos įtampa. Baterijos įtampa kyla, nes kroviklis krauna bateriją. Kai įtampa pasiekia 4,2 V, kroviklis nustoja krauti bateriją.
- Rožinis signalas – baterijos krovimo srovė. Šiuo krovimo srovė yra apie 133 mA.
- Žalias signalas – krovimo srovės valdymo rezistoriumi tekanti srovė. Šiuo atveju srovė apytiksliai lygi 1,19 mA ir yra apie 100 kartų mažesnė už baterijos krovimo srovę, kaip ir buvo numatyta projektuojant kroviklį.



41 pav. Ličio baterijos kroviklio veikimo laikinės diagramos

2.2.4. Įtampos šaltinio perjungimo grandinės projektavimas

Projektuojamos sistemos tikslas – tiekti nepertraukiamą energiją apkrovai. Apkrovos pagrindinis maitinimo šaltinis – impulsinis įtampą žeminantis keitiklis, kuris įėjimo įtampą konvertuoja į žemesnę tinkamo lygio įtampą skirtą apkrovos maitinimui. Jei įėjimo įtampa dingsta, sistemoje yra numatytas atsarginis energijos šaltinis – ličio baterija. Šiame poskyryje aprašytas įtampos šaltinio perjungimo grandinės projektavimas, kuri užtikrina, kad dingus išorinei įtampai, apkrova būtų toliau maitinama naudojant ličio bateriją. Tokios perjungimo grandinės elektrinė principinė schema pateikta 42 paveiksle.



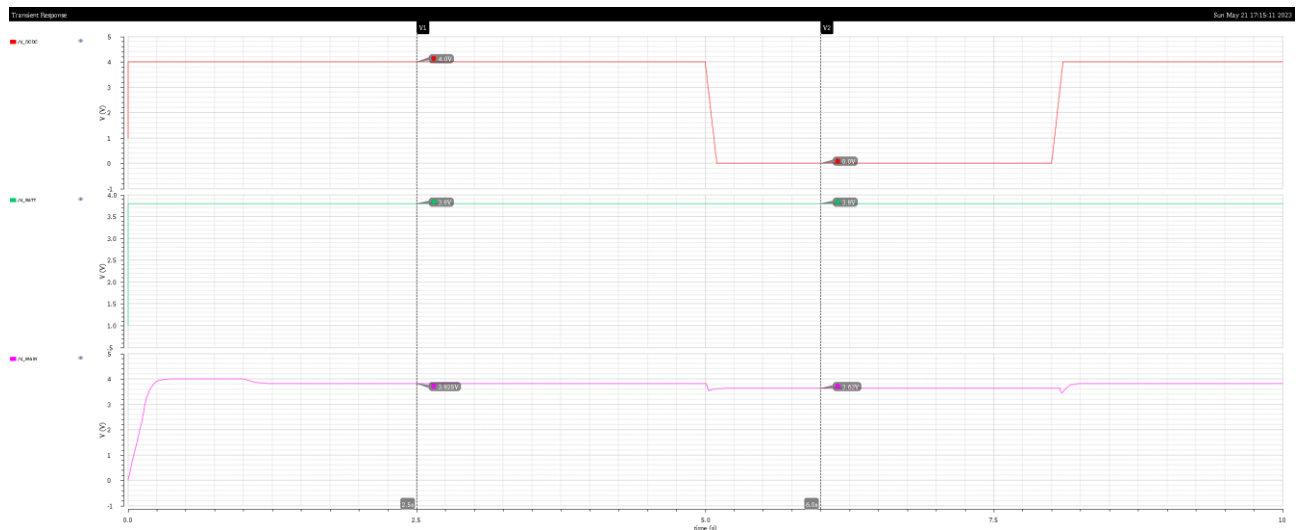
42 pav. Įtampos šaltinio perjungimo grandinės elektrinė principinė schema

Schemoje esantys trys pagrindiniai signalai:

- U_{DCDC} – tai impulsinio įtampą žeminančio keitiklio išėjimo įtampos signalas.
- U_{BATT} – tai ličio baterijos įtampa.
- U_{MAIN} – tai įtampos šaltinio perjungimo schemos išėjimo įtampa.

Schema atlieka gana paprastą funkciją. Kai prie projektuojamo IG prijungta išorinė įtampa ir impulsinis įtampą žeminantis keitiklis generuoja išėjimo įtampą, ši schema prijungia keitiklio išėjimo įtampą ir išorinę apkrovą. Kai nutrūksta įėjimo įtampa iš išorinio maitinimo šaltinio, šis schemas blokas perjungia maitinimo šaltinį apkrovai. Šiuo atveju apkrovos maitinimui naudojama energija iš ličio baterijos.

43 paveiksle pavaizduota įtampos šaltinio perjungimo grandinės tyrimo laikinė diagrama. Sistemos darbo pradžioje prijungtas 4 V išorinis įtampos šaltinis (grafike pažymėta raudona spalva), kuris imituoja impulsinio įtampą žeminančio keitiklio generuojamą įtampą ir 3,8 V įtampos šaltinis (grafike pažymėta žalia spalva), kuris atitinka prijungtą ličio jonų bateriją. Darbo pradžioje prie sistemos prijungta apkrova yra 1 k Ω dydžio, tačiau po 1 sekundės ji pakinta į 2 Ω . Pradžioje apkrovai maitinimas yra tiekiamas iš impulsinio įtampą žeminančio keitiklio. Po 5 sekundžio impulsinio keitiklio įtampa yra atjungiamą ir sistema perjungia maitinimo šaltinį apkrovai – šiuo atveju apkrova maitinama iš baterijos įtampos. Po 8 sekundžių išorinė įtampą yra vėl prijungiamą ir apkrova toliau maitinama iš įtampos keitiklio. Viso sistemos darbo metu išėjimo įtampa yra tiekiamą nepertraukiamai (grafike pažymėta rožine spalva).



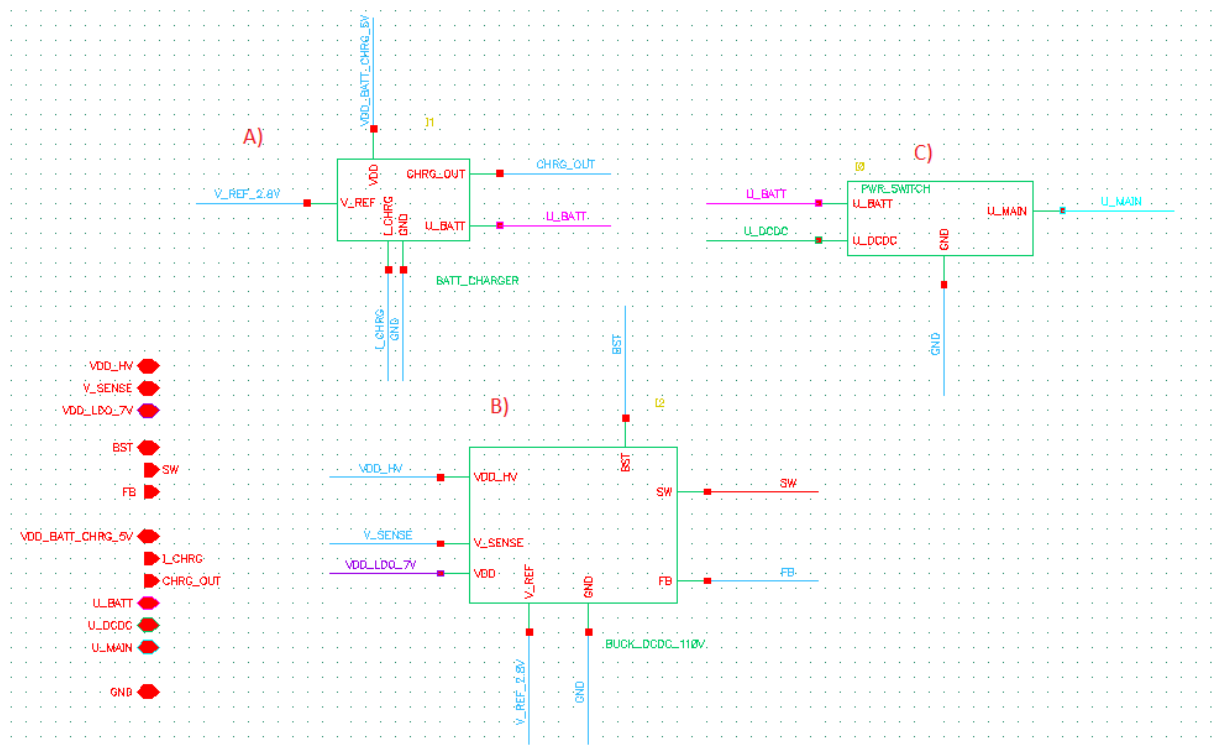
43 pav. Šaltinio perjungimo grandinės laikinės diagramos

Pagrindinis šios grandinės tyrimo objektas – įtampą prijungiančių tranzistorių varža. Visi keturi tranzistoriai, kurie prijungia ir atjungia maitinimo įtampas yra vienodų matmenų. Dėl to pateikiami tik vienos iš tranzistorių porų varžų matavimo rezultatai. Išmatuota tranzistorių M4 ir M3 poros varža yra 78 m Ω esant -40°C temperatūrai, 109 m Ω esant 27°C temperatūrai ir 152 m Ω esant

125°C temperatūrai. Matoma, kad tranzistorių varža didėja, kai didėja aplinkos temperatūra. Aukštoje temperatūroje energijos nuostoliai įtampos šaltinio perjungimo grandinėje yra didžiausi.

2.3. Visos sistemos elektrinė principinė schema ir jos tyrimas

Suprojektuota sistema yra apjungta iš trijų funkcinių bloků, kurie yra pavaizduoti 44 paveiksle – ličio baterijos kroviklio (A), impulsinio įtampą žeminančio keitiklio (B) ir įtampos šaltinio perjungimo grandinės (C). Ličio baterijos kroviklis naudoja išorinį 5 V įtampos šaltinį ir įkrauna bateriją iki 4,2 V lygio. Įtampą žeminanti keitiklis naudoja išorinę 8–120 V įtampą ir žemina ją iki numatyto lygio. Keitiklis geba nustatyti išėjimo įtampą nuo 2,8 iki 20 V, tačiau naudojant keitiklį bendroje sistemoje logiška naudoti nuo 3,4 iki 4,2 V išėjimo įtampą. Taip yra dėl to, kad keitiklio išėjimo įtampa yra naudojama apkrovai maitinti. Ta pati apkrova gali būti maitinama iš vienos celės ličio baterijos. Tokios baterijos nominali įtampa yra 3,7 V, maksimali įtampa yra 4,2 V. Maitinimo šaltinio perjungimą vykdo įtampos šaltinio perjungimo blokas.

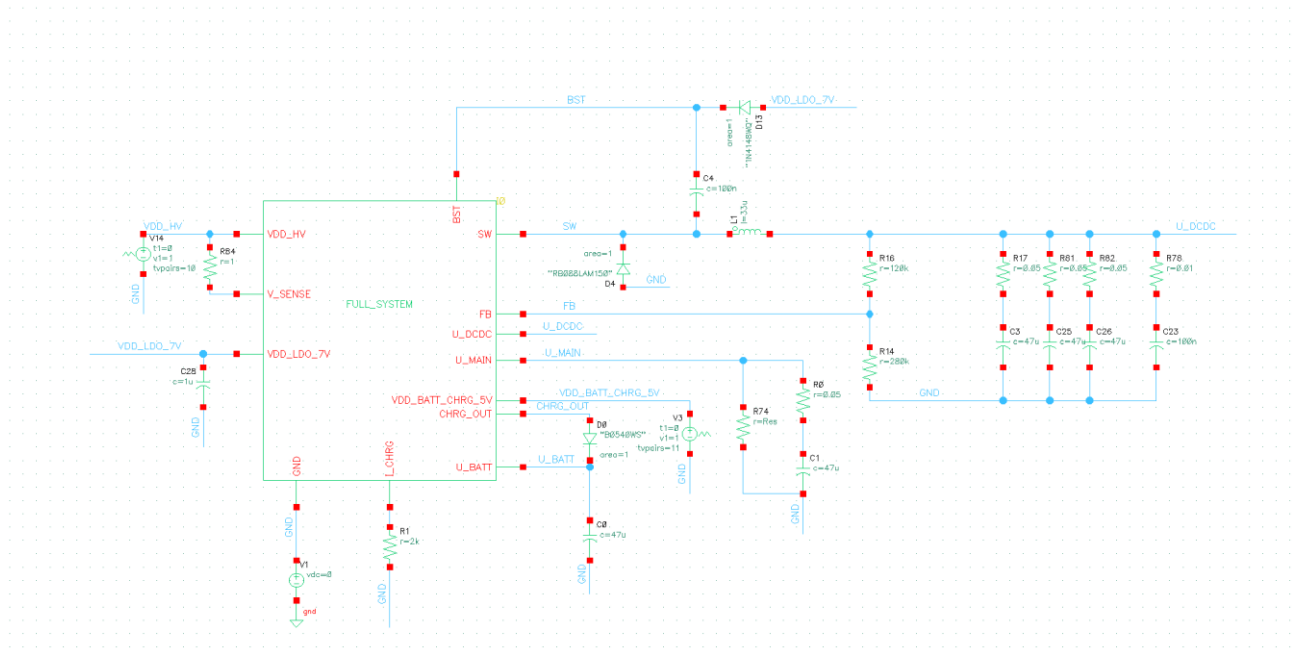


44 pav. Visos sistemos elektrinė principinė schema

45 paveiksle pavaizduota visos sistemos tyrimui naudojama elektrinė principinė schema. Suprojektuotam IG reikia papildomų komponentų, kad sistema tinkamai veiktų. Tyrimo metu parinktos rezistorių, kondensatorių ir induktyvumo ritės vertės. Grandinėje naudojami išoriniai diodai naudoja gamintojų aprašytus kompiuterinius modelius.

Tyrimo metu impulsinis įtampą žeminantis keitiklis yra sukonfigūruotas taip, kad jo išėjimo įtampa lygi 4 V. Keitiklio išėjimo grandinėje naudojama 33 μH induktyvumo ritė, trys 47 μF kondensatoriai ir vienas 100 nF kondensatorius. Šie komponentai parinkti tyrimo metu, siekiant užtikrinti stabilią išėjimo įtampą.

Baterijos kroviklio tyrimui vietoje baterijos yra naudojamas 47 μF kondensatorius, kuris imituoja baterijos įkrovimą ir iškrovimą. Baterijos krovimo srovę nustatantis rezistorius yra parinkta 2 k Ω varžos – maksimali krovimo srovė šiuo atveju yra 133 mA (kai modeliavimas atliekamas 27°C aplinkoje).

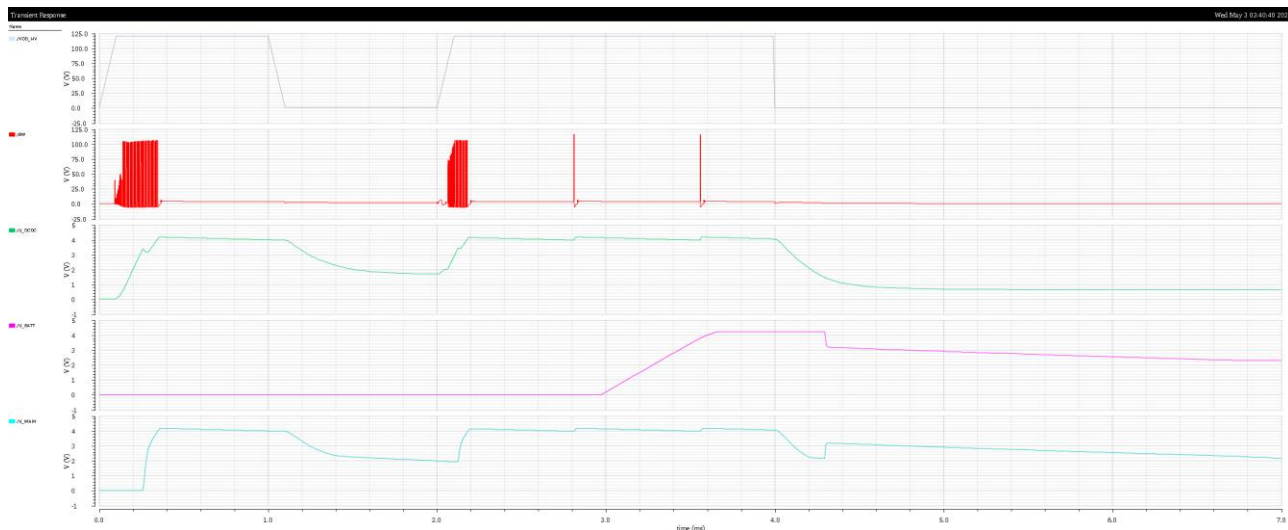


45 pav. Pilnos sistemos tyrimo elektrinė principinė schema

Sistemos veikimą iliustruojanti laikinė diagrama pavaizduota 46 paveiksle. Paveiksle pavaizduoti penki signalai:

- Įėjimo įtampa. Šio testo metu prijungiama 120 V įėjimo įtampa. (Grafike pavaizduota pilka spalva).
- Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio išėjimo impulsų signalas. Tai keitiklio generuojami impulsai, kurie įkrauna išoriškai prijungtą 33 μH induktyvumo ritę. (Grafike pavaizduota raudona spalva).
- Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio sugeneruota 4 V įtampa. (Grafike pavaizduota žalia spalva).
- Baterijos įtampa. Po 3 ms nuo sistemos darbo pradžios sistema įkrauna bateriją, o nuo 4 ms atjungus išorinę įtampą, baterijos įtampa naudojama apkrovos maitinimui. (Grafike pavaizduota rožine spalva).

- Apkrovos maitinimo įtampa. Tai pagrindinė sistemos išėjimo įtampa. Po 1 ms nuo sistemos darbo pradžios atjungiamas išorinė įtampa, tačiau baterija nėra įkrauta, dėl to ši apkrovą maitinanti įtampa nukrenta į žemą lygį. Kai išorinė įtampa atjungiamas kitą kartą (po 4 ms) – baterija jau yra įkrauta ir baterijos įtampa naudojama apkrovai maitinti iki kol baterija išsikrauna. (Grafike pavaizduota mėlyna spalva).



46 pav. Visos sistemos veikimą iliustruojanti laikinė diagrama

Iš laikinės diagramos matoma, kad įtampos šaltinio perjungimo momentu išėjimo įtampa pakrinta – perjungimas nėra visiškai sklandus. Tobulinant sistemą, reikėtų įvertinti šią problemą ir suprojektuoti greitesnį perjungimą, kuris užtikrintų stabilią išėjimo įtampą.

2.4. Skyriaus apibendrinimas

Sudarytos sistemą apibūdinančios blokinės diagramos. Sudaryta bendra blokinė diagrama, kuri vaizduoja tris sistemos blokus – impulsinį įtampą žeminantį keitiklį, ličio baterijos kroviklį ir įtampos šaltinio perjungimo bloką. Sudarytos detalesnės blokinės diagramos impulsinio įtampą žeminančio keitiklio ir ličio jonų baterijos kroviklio funkcinėms dalims apibūdinti. Pagal sudarytas blokinės diagramas suprojektuotos principinės elektrinės schemos.

Suprojektuota impulsinio įtampą žeminančio keitiklio elektrinė principinė schema. Atliktas visos impulsinio keitiklio ir pavienių keitiklių sudarančių funkcinį blokų elektrinių principinių schemų tyrimai. Tyrimo metu įsitikinta, kad suprojektuotas keitiklis atitinka užduotyje numatytus parametrus. Keitiklio išėjimo įtampa gali būti konfigūruojama nuo 2,8 V iki 20 V. Keitiklio išėjimo srovė gali būti iki 2 A. Keitiklio įėjimo įtampa gali būti nuo 8 V iki 120 V. Atliktas keitiklio efektyvumo ir išėjimo įtampos tikslumo tyrimas.

Suprojektuota ličio baterijos kroviklio elektrinė principinė schema. Atlikto tyrimo metu parodyta, kad kroviklis gali įkrauti bateriją 133 mA srove. Suprojektuotas kroviklis įgyvendina du

standartinius ličio baterijos krovimo etapus – krovimą nuolatine srove ir krovimą nuolatine įtampa. Kroviklis įkrauna bateriją iki 4,2 V įtampos lygio.

Suprojektuota įtampos šaltinio perjungimo grandinė ir visi blokai apjungti į bendrą sistemą. Atliktas įtampos šaltinio perjungimo grandinės tranzistorių porų varžos tyrimas ir įsitikinta, kad sistemos elektrinė principinė schema veikia tinkamai kompiuterinio modeliavimo metu. Tolesniame skyriuje atliekamas elektrinės principinės schemos tyrimo rezultatų palyginimas su topologijos tyrimo rezultatais siekiant įsitikinti, kad suprojektuota sistema veikia tinkamai.

3. TOPOLOGIJOS PROJEKTAVIMAS IR SISTEMOS TYRIMAS

Suprojektavus principines elektrines schemas, projektuojamos šių schemų topologijos. Pavienių elementų topologijos jungiamos į didesnius blokus taip, kaip buvo numatyta projektuojant principines elektrines schemas. Suprojektuotose didelių blokų topologijose yra sumodeliuojami parazitiniai elementai. Kontaktiniai metaliniai takeliai ir kiaurymės sukuria parazitines varžas, o gretimi laidininkai sudaro parazitines talpas. Sumodeliavus parazitinius parametrus, pakartotinai tiriami suprojektuoti blokai ir visa sistema, siekiant įsitikinti, kad sistemos veikimas vis dar tinkamas ir ženkliai nepasikeitė dėl parazitinių elementų įtakos. Pirmoji šio skyriaus dalis skirta suprojektuotų topologijų aprašymui ir tyrimui.

AMS H35B4D3 technologija leidžia naudoti 4 metalizuotus sluoksnius, kurie IG pjūvyje yra išdėstyti vienas virš kito. Naudojant metalo sluoksnius yra kuriami sujungimai tarp elementų, blokų ir sistemų. Siekiant sujungti skirtingus metalo sluoksnius tarpusavyje, naudojamos metalizuotos kiaurymės.

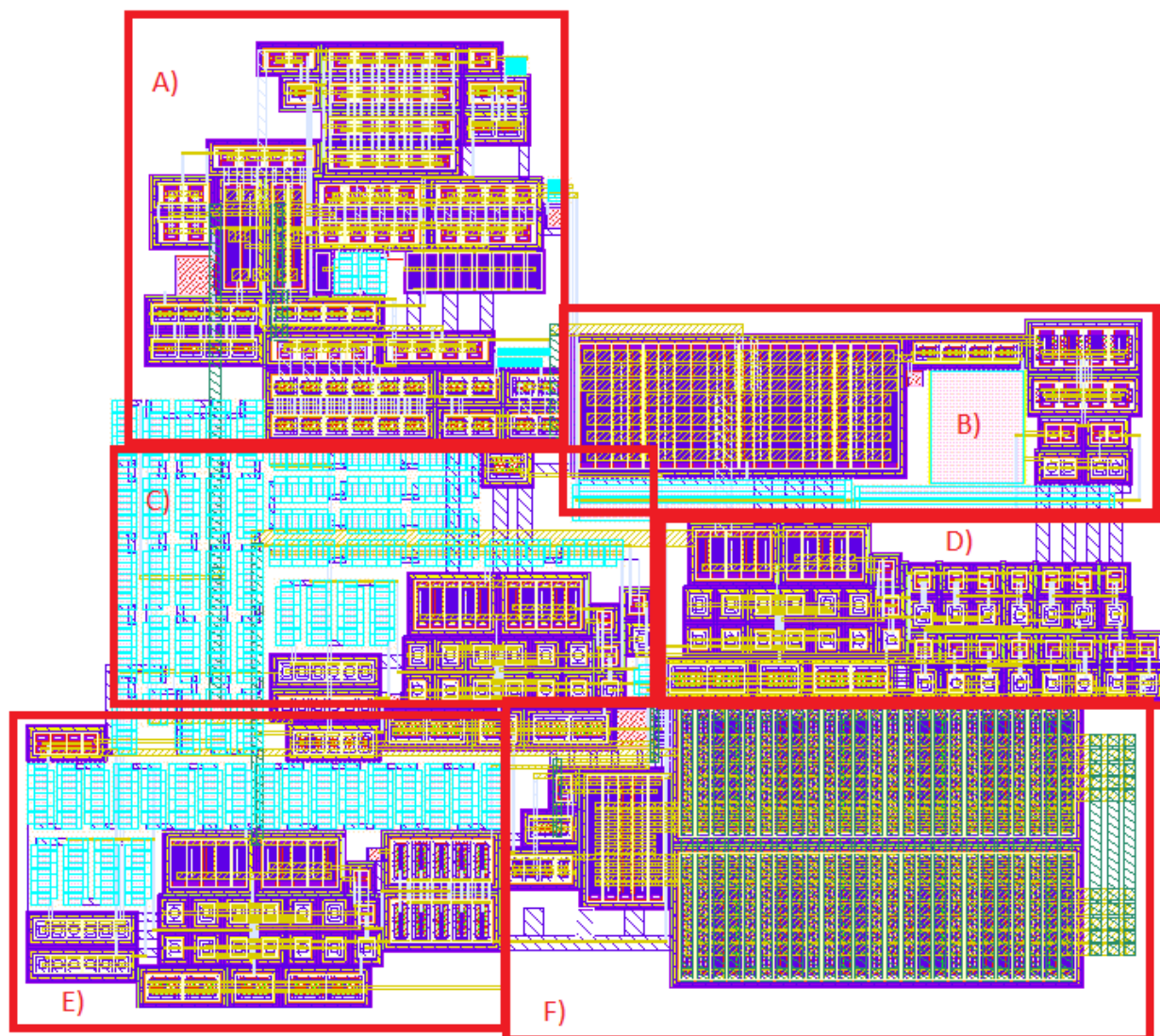
Projektuojant IG laikomasi tokių pagrindinių principų siekiant tinkamai ir tvarkingai sujungti visus reikiamus IG tinklus – pirmame ir trečiame metalo sluoksniuose sujungimai projektuojami tik horizontalia kryptimi. Antrame ir ketvirtame sluoksniuose metaliniai sujungimai projektuojami tik vertikalia kryptimi.

Pagamintų integrinių grandynų elementai nėra idealūs. *AMS H35B4D3* technologijos bibliotekoje pateikti ne tik nominalūs elementų modeliai, bet ir ribiniai modeliai. Šie ribiniai modeliai leidžia įvertinti, kaip integrinis grandynas veiks, jei silicis bus legiruotas stipriau ar silpniau – leidžiamose gamintojo numatytose ribose. Tyrimo metu naudojami trys kompiuterinių modelių tipai - tipiniai (angl. *Typical mean, tm*), didžiausių galios nuostolių (angl. *Worst case power, wp*) ir lėčiausio veikimo (angl. *Worst case speed, ws*). Tipiniai modeliai naudoja dažniausiai gaunamų elementų parametrus, didžiausių galios nuostolių modeliai naudoja greičiausius galimus NMOP ir PMOP tranzistorių parametrus, o lėčiausio veikimo modeliai naudoja lėčiausius galimus NMOP ir PMOP tranzistorių parametrus. Vertinant ribinių elementų modelių įtaką sistemai reikia įvertinti jų poveikį prie įvairių temperatūrų. Dėl to antra šio skyriaus dalis yra skirta detaliam sistemos tyrimui prie įvairių temperatūrų ir ribinių elementų parametrų vertinimui.

3.1. Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio topologijos projektavimas ir tyrimas

Pagal suprojektuotą impulsinio įtampą žeminančio keitiklio elektrinę principinę schemą projektuojama keitiklio topologija. Topologija projektuojama pradedant nuo mažiausių keitiklio blokų – loginių elementų. Toliau maži blokai jungiami į didesnius blokus pagal tai, kaip buvo

suprojektuota elektrinė principinė schema. Galiausiai visi blokai apjungiami į bendrą impulsinį įtampą žeminantį keitiklį. Suprojektuoto keitiklio topologija pateikta 47 paveiksle.



47 pav. Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio topologija

Paveiksle pažymėtos šešios impulsinio įtampą žeminančio keitiklio dalys:

- A) Atraminės įtampos ir srovės šaltinis
- B) Tiesinis įtampą žeminantis keitiklis
- C) Vidinis impulsų generatorius
- D) Loginis sistemos valdymo blokas
- E) Išėjimo srovės ribojimo blokas
- F) Išėjimo įtampos impulsų generatorius

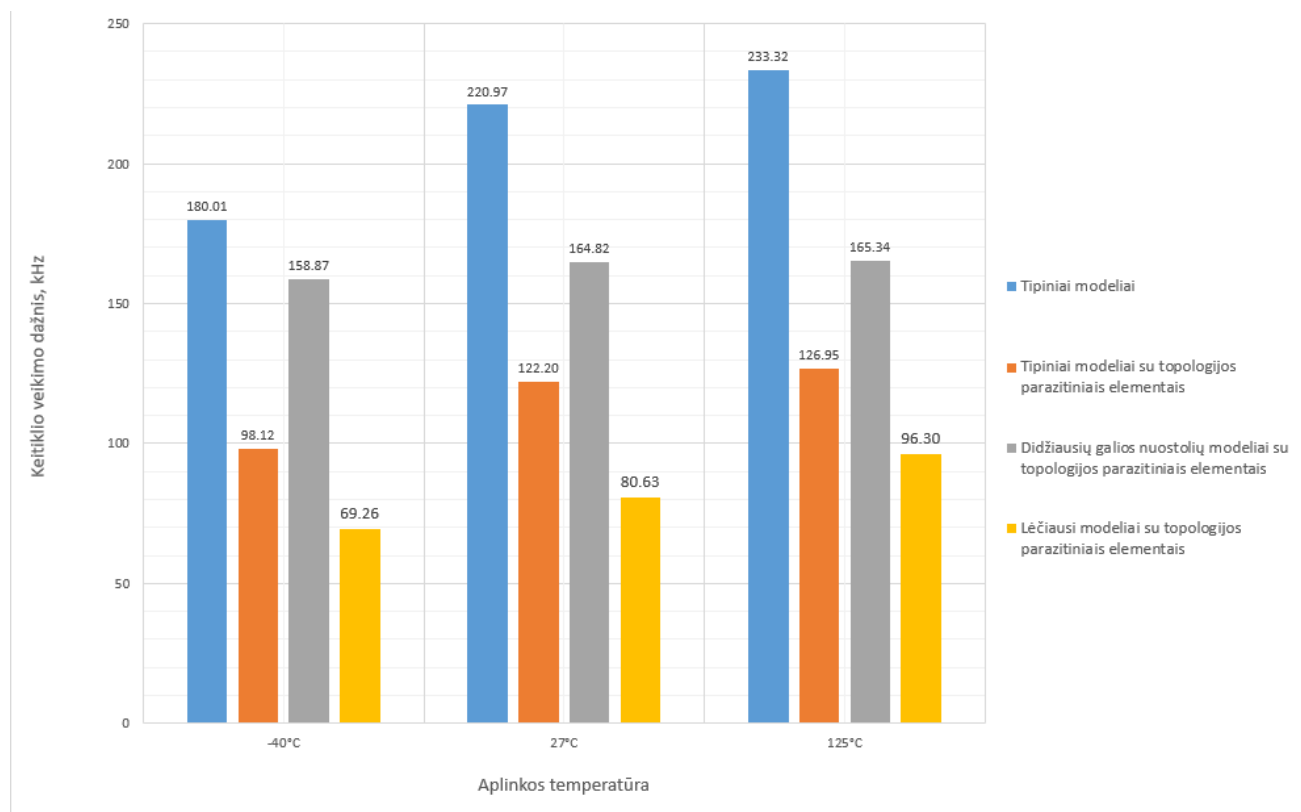
Norint įsitikinti, kad suprojektuota sistema veikia tinkamai nepriklausomai nuo leistinų gamybos paklaidų ir temperatūros, atliekami detalesni sistemos tyrimai. Pagrindiniai parametrai

pagal kuriuos vertinamas įtampą žeminančio keitiklio stabilumas – keitiklio veikimo dažnis ir efektyvumas.

Tyrimo metu naudojami parametrai:

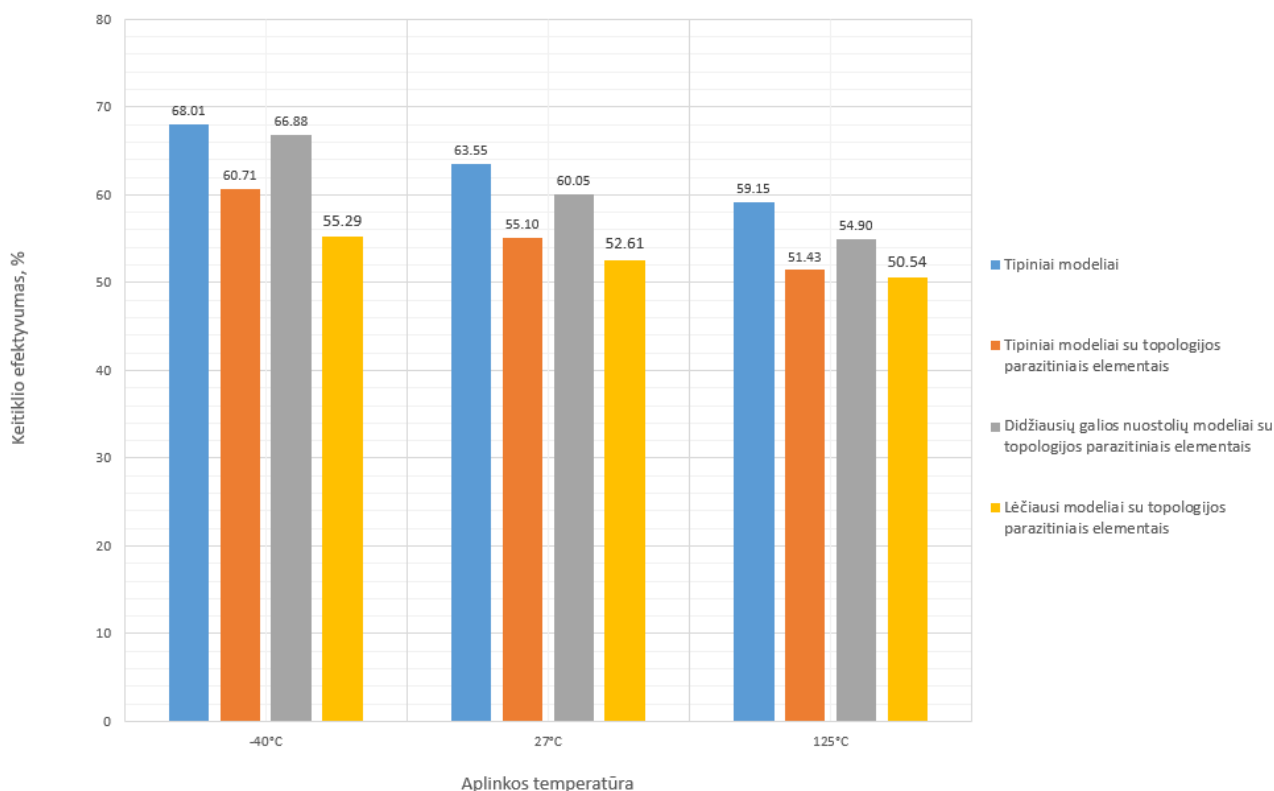
- Temperatūra – tikrinamas veikimas esant -40°C , 27°C ir 125°C aplinkos temperatūrai.
- Įėjimo įtampa – naudojamos kraštutinės įtampos – 10 V ir 100 V.
- Išėjimo srovė – 2 A.
- Išėjimo įtampa – 4 V.
- Gamybiniai elementų modeliai – tipiniai, didžiausių galios ir lėčiausio veikimo.

48 paveiksle pavaizduoti impulsinio įtampą žeminančio keitiklio veikimo dažnio tyrimo rezultatai, kai įėjimo įtampa yra lygi 10 V. Keitiklio veikimo dažnis didėja, kai didėja aplinkos temperatūra. Lyginant elektrinės principinės schemos modeliavimo rezultatus (paveiksle mėlyna spalva) ir topologijos modeliavimo rezultatus (paveiksle oranžinė spalva), suprojektuotos keitiklio topologijos veikimo dažnis yra beveik du kartus mažesnis. Mažiausias veikimo dažnis (69,26 kHz) yra pasiekiamas, kai aplinkos temperatūra -40°C ir modeliavimui naudojami lėčiausi elementų modeliai. Didžiausias keitiklio topologijos veikimo dažnis (165,34 kHz) pasiekiamas, kai aplinkos temperatūra 125°C , o elementų modeliavimui naudojami didžiausių galios nuostolių modeliai.



48 pav. Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio veikimo dažnis, kai įėjimo įtampa lygi 10 V

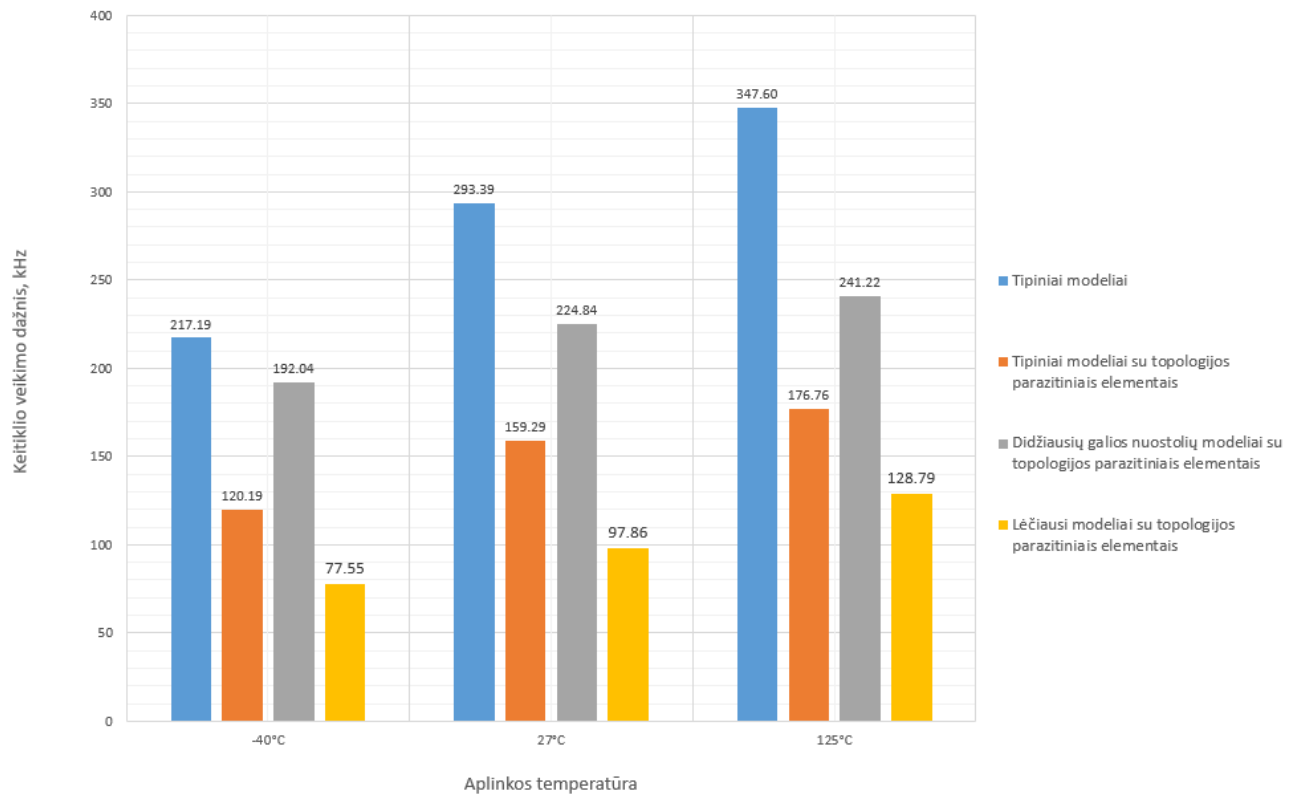
49 paveiksle pavaizduotas impulsinio įtampą žeminančio keitiklio efektyvumo tyrimo rezultatai, kai įėjimo įtampa yra lygi 10 V. Keitiklio efektyvumas mažėja, kai didėja aplinkos temperatūra. Lyginant elektrinės principinės schemos modeliavimo rezultatus (paveiksle mėlyna spalva) ir topologijos modeliavimo rezultatus (paveiksle oranžinė spalva), suprojektuotos keitiklio topologijos efektyvumas yra apie 8 % mažesnis. Mažiausias keitiklio efektyvumas (50,54 %) yra pasiekiamas, kai aplinkos temperatūra 125°C ir modeliavimui naudojami lėčiausi elementų modeliai. Didžiausias keitiklio topologijos veikimo efektyvumas (66,88 %) pasiekiamas, kai aplinkos temperatūra -40°C, o elementų modeliavimui naudojami didžiausių galios nuostolių modeliai.



49 pav. Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio efektyvumas, kai įėjimo įtampa lygi 10 V

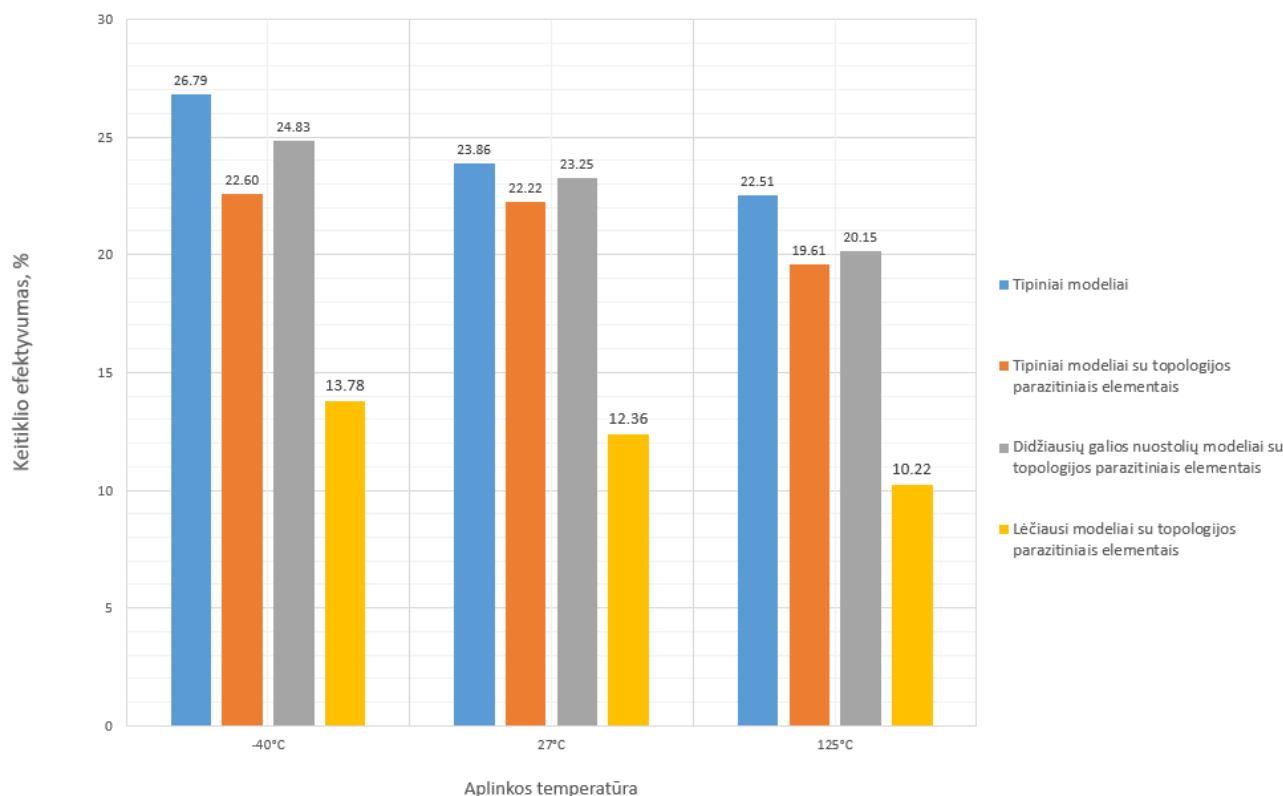
50 paveiksle pavaizduotas impulsinio įtampą žeminančio keitiklio veikimo dažnio tyrimo rezultatai, kai įėjimo įtampa yra lygi 100 V. Keitiklio veikimo dažnis didėja, kai didėja aplinkos temperatūra. Lyginant elektrinės principinės schemos modeliavimo rezultatus (paveiksle mėlyna spalva) ir topologijos modeliavimo rezultatus (paveiksle oranžinė spalva), suprojektuotos keitiklio topologijos veikimo dažnis yra beveik du kartus mažesnis. Mažiausias veikimo dažnis (77,55 kHz) yra pasiekiamas, kai aplinkos temperatūra -40°C ir modeliavimui naudojami lėčiausi elementų

modeliai. Didžiausias keitiklio topologijos veikimo dažnis (241,22 kHz) pasiekiamas, kai aplinkos temperatūra 125°C, o elementų modeliavimui naudojami didžiausių galios nuostolių modeliai.



50 pav. Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio veikimo dažnis, kai įėjimo įtampa lygi 100 V

51 paveiksle pavaizduotas impulsinio įtampą žeminančio keitiklio efektyvumo tyrimo rezultatai, kai įėjimo įtampa yra lygi 100 V. Keitiklio efektyvumas mažėja, kai didėja aplinkos temperatūra. Lyginant elektrinės principinės schemos modeliavimo rezultatus (paveiksle mėlyna spalva) ir topologijos modeliavimo rezultatus (paveiksle oranžinė spalva), suprojektuotos keitiklio topologijos efektyvumas yra keliais procentais mažesnis. Mažiausias keitiklio efektyvumas (10,22 %) yra pasiekiamas, kai aplinkos temperatūra 125°C ir modeliavimui naudojami lėčiausi elementų modeliai. Didžiausias keitiklio topologijos veikimo efektyvumas (24,83 %) pasiekiamas, kai aplinkos temperatūra -40°C, o elementų modeliavimui naudojami didžiausių galios nuostolių modeliai.



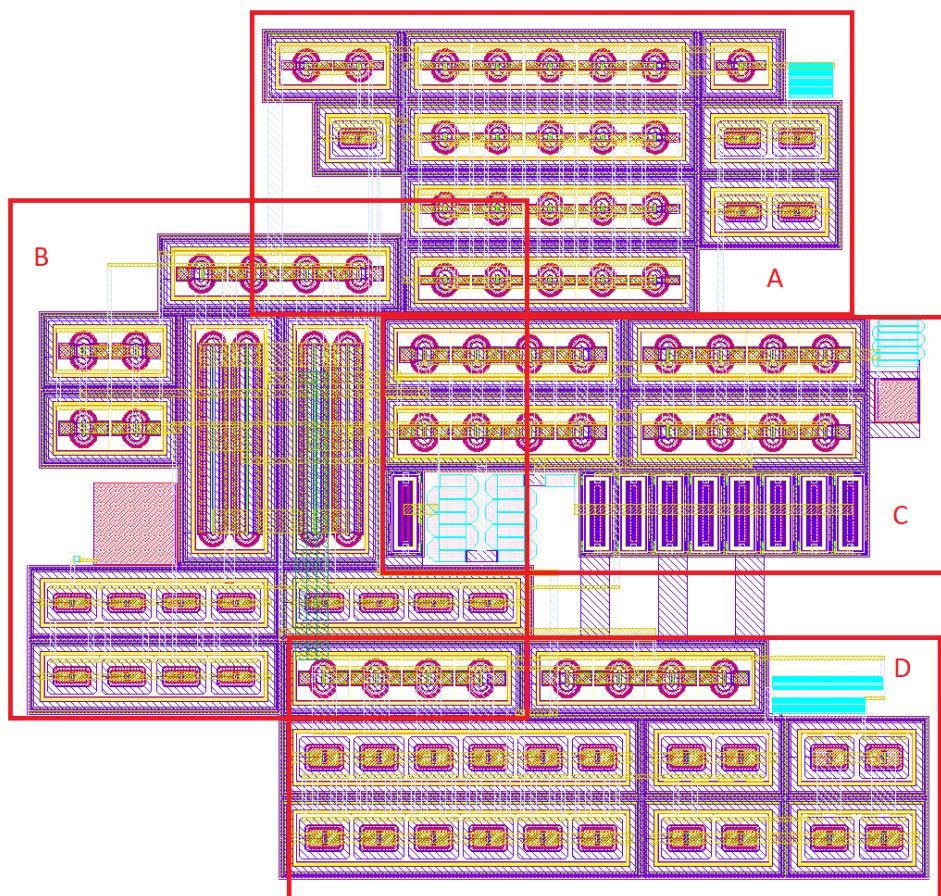
51 pav. Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio efektyvumas, kai įėjimo įtampa lygi 100 V

Atlikus impulsinio įtampą žeminančio keitiklio tyrimą įsitikinta, kad keitiklis visomis numatytais sąlygomis veikia tinkamai ir atitinka užduotyje numatytus parametrus. Topologijos modeliavimo rezultatai yra šiek tiek prastesni už elektrinės principinės schemos modeliavimo rezultatus, tačiau gauti keitiklio parametrai tenkina sistemai keliamus reikalavimus. Toliau pateikiami impulsinio įtampą žeminančio keitiklio blokų topologijos projektavimo aprašymai.

3.1.1. Atraminės įtampos ir srovės šaltinio topologijos projektavimas

Suprojektuota atraminės įtampos ir srovės šaltinio topologija pavaizduota 52 paveiksle. Topologiją sudaro keturios dalys:

- A – šaltinio paleidimo grandinė.
- B – operacinis stiprintuvas.
- C – pagrindinis atraminę įtampą ir srovę generuojantis blokas.
- D – bloko vidinių atraminių srovių generatorius.



52 pav. Atraminės įtampos ir srovės šaltinio topologija

Atraminės įtampos ir srovės šaltinio tyrimo rezultatai pateikti 10 ir 11 lentelėse. Tyrimo metu modeliuotas veikimas nuo -40°C iki 125°C ir matuoti pagrindiniai šaltinį apibūdinantys parametrai. Atliktas elektrinės principinės schemos modeliavimo rezultatų palyginimas su topologijos. Tyrimo metu naudotos dvi krašutinės įėjimo įtampos vertės – 9 V ir 120 V. Tyrimo metu naudoti tipiniai, didžiausių galios nuostolių ir lėčiausi elementų kompiuterinio modeliavimo modeliai. Iš pateiktų rezultatų matoma, kad atraminės įtampos ir srovės šaltinis visais atvejais veikia tinkamai. Topologijos ir elektrinės principinės schemos modeliavimo rezultatai yra artimi. Naudojant lėčiausius elementų modelius, atraminė srovė sumažėja, tačiau atlikus viso impulsinio įtampą žeminančio keitiklio modeliavimą įsitikinta, kad net ir mažesnės srovės užtenka tinkamam sistemos veikimui. Atraminė įtampa yra stabili visais tyrimo metu analizuotais atvejais.

10 lentelė. Atraminės įtampos ir srovės šaltinio topologijos tyrimo rezultatai, įėjimo įtampa 9 V

U _{IN} = 9 V							
	Elementų modeliai	Išėjimo įtamos minimumas, V	Išėjimo įtamos maksimumas, V	Skirtumas tarp išėjimo įtamos minimumo ir maksimumo, mV	Išėjimo srovės minimumas, μ A	Išėjimo srovės maksimumas, μ A	Skirtumas tarp išėjimo srovės minimumo ir maksimumo, μ A
Elektrinė principinės schemos modeliavimas	Tipiniai	2.77895	2.79184	12.89000	36.96620	40.81740	3.85120
	Didžiausių galios nuostolių	2.76496	2.79040	25.43890	45.25340	50.23710	4.98370
	Lečiausi	2.77949	2.80552	26.02840	31.32522	34.40703	3.08181
Topologijos modeliavimas	Tipiniai	2.78335	2.79624	12.88660	37.02255	40.88089	3.85834
	Didžiausių galios nuostolių	2.76940	2.79572	26.32090	45.33610	50.33040	4.99430
	Lečiausi	2.78329	2.80928	25.99010	31.36665	34.45307	3.08642

11 lentelė. Atraminės įtamos ir srovės šaltinio topologijos tyrimo rezultatai, įėjimo įtampa 120 V

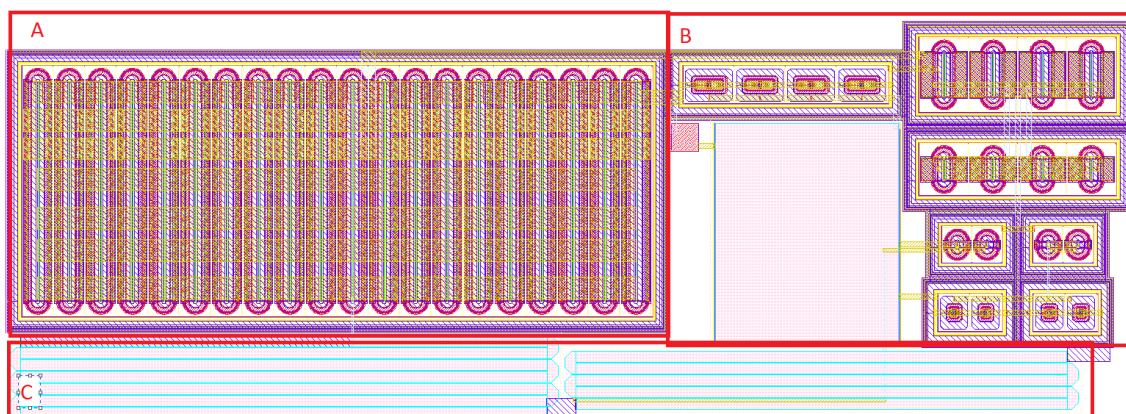
U _{IN} = 120 V							
	Elementų modeliai	Išėjimo įtamos minimumas, V	Išėjimo įtamos maksimumas, V	Skirtumas tarp išėjimo įtamos minimumo ir maksimumo, mV	Išėjimo srovės minimumas, μ A	Išėjimo srovės maksimumas, μ A	Skirtumas tarp išėjimo srovės minimumo ir maksimumo, μ A
Elektrinė principinės schemos modeliavimas	Tipiniai	2.78388	2.78940	5.52800	36.88400	40.84630	3.96230
	Didžiausių galios nuostolių	2.77283	2.79850	25.67260	45.16340	50.48450	5.32110
	Lečiausi	2.78089	2.80083	19.94730	31.25233	34.38872	3.13639
Topologijos modeliavimas	Tipiniai	2.78811	2.79369	5.57930	36.39300	40.90730	4.51430
	Didžiausių galios nuostolių	2.77772	2.80360	25.88860	45.24370	50.57550	5.33180
	Lečiausi	2.78457	2.80453	19.96150	31.29293	34.43322	3.14029

3.1.2. Tiesinio įtampą žeminančio keitiklio topologijos projektavimas

Suprojektuota tiesinio įtampą žeminančio keitiklio topologija pavaizduota 53 paveiksle.

Topologiją sudaro trys dalys:

- A – išėjimo įtampą generuojantis tranzistorius.
- B – operacinis stiprintuvas, kuris valdo išėjimo tranzistorių.
- C – neigiamo grįžtamojo ryšio grandinė sudaryta iš rezistorių daliklio. Rezistorių varža parinkta taip, kad tiesinio įtampą žeminančio keitiklio išėjimo įtampa būtų lygi 7 V.



53 pav. Tiesinio įtampą žeminančio keitiklio topologija

Tiesinio įtampą žeminančio keitiklio tyrimo rezultatai pateikti 12 lentelėje. Tyrimo metu matuota išėjimo įtampa prie skirtingų aplinkos temperatūrų, naudoti skirtingi elementų modeliai ir

kraštutinės įėjimo įtampos (9 V ir 120 V). Tyrimo metu naudota 25 mA išėjimo srovė. Lentelėje matoma, kad išėjimo įtampa yra stabili visais tyrimo metu analizuotais atvejais, o elektrinės principinės schemos ir topologijos tyrimo rezultatai yra panašūs. Prasčiausi rezultatai gaunami, kai aplinkos temperatūra yra 125°C, įėjimo įtampa yra 9 V ir naudojami lėčiausi elementų modeliai – šiuo atveju išėjimo įtampa nukrinta į 6,25 V lygį. Visos sistemos tyrimo metu įsitikinta, kad tokios veikimo įtampos užtenka, dėl to galima teigti, jog suprojektuotas tiesinis įtampą žeminantis keitiklis veikia tinkamai.

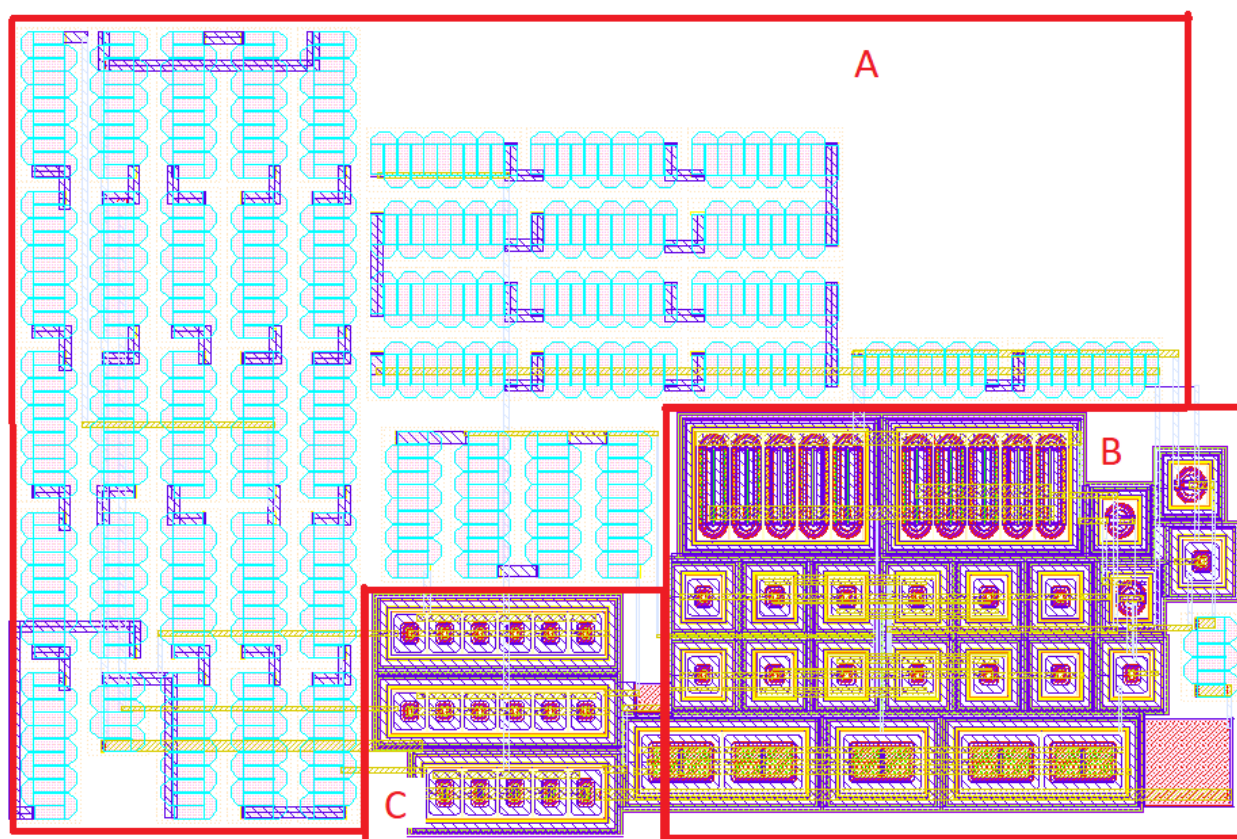
12 lentelė. Tiesinio įtampą žeminančio keitiklio tyrimo rezultatai

		Elementų modeliai	-40°C	27°C	125°C
U _{IN} = 9 V	Elektrinės principinės schemos modeliavimas	Tipiniai	6.991	6.985	6.532
		Didžiausių galios nuostolių	6.992	6.988	6.905
		Lėčiausi	6.988	6.956	6.249
	Topologijos modeliavimas	Tipiniai	6.929	6.991	6.536
		Didžiausių galios nuostolių	6.932	6.96	6.906
		Lėčiausi	6.986	6.956	6.242
U _{IN} = 120 V	Elektrinės principinės schemos modeliavimas	Tipiniai	6.992	6.988	6.903
		Didžiausių galios nuostolių	6.994	6.99	6.978
		Lėčiausi	6.988	6.983	6.866
	Topologijos modeliavimas	Tipiniai	6.91	6.963	6.903
		Didžiausių galios nuostolių	6.964	6.975	6.978
		Lėčiausi	6.94	6.982	6.869

3.1.3. Vidinio impulsų generatoriaus topologijos projektavimas

Suprojektuota vidinio impulsų generatoriaus topologija pavaizduota 54 paveiksle. Topologiją sudaro trys dalys:

- A – rezistoriai, kurie yra naudojami impulsų generavimui ir dažnio keitimui.
- B – komparatorius, kuris generuoja vidinį impulsų signalą.
- C – dažnio keitimo grandinė. Ši dalis pakeičia dažnį, kai įėjimo įtampa pasiekia kritinius įtampos taškus aprašytus elektrinės principinės schemos projektavimo dalyje.



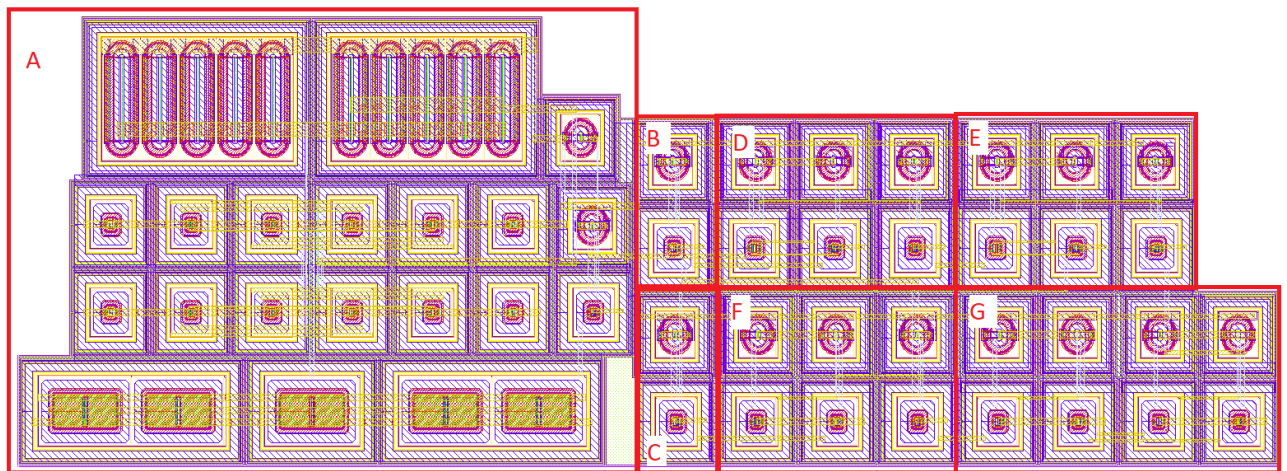
54 pav. Vidinio impulsų generatoriaus topologija

Vidinio impulsų generatoriaus tyrimo rezultatai sutampa su 3.1. poskyryje pateiktais veikimo dažnio tyrimo rezultatais (48 ir 50 paveiksluose). Resultatuose pateiktas keitiklio veikimo dažnis. Dažnis kinta priklausomai nuo modeliavimui naudojamų elementų modelių, tačiau įsitikinta, kad visais atvejais impulsinis įtampą žeminantis keitiklis veikia tinkamai. Dėl to galima teigti, jog vidinio impulsų generatoriaus veikimas yra tinkamas.

3.1.4. Loginio sistemos valdymo bloko topologijos projektavimas

Suprojektuota loginio sistemos valdymo bloko topologija pavaizduota 55 paveiksle. Topologiją sudaro septynios dalys:

- A – komparatorius.
- B ir C – inverteriai.
- D ir E – 2-IR elementai.
- F – 2-ARBA elementas.
- G – SR trigeris.



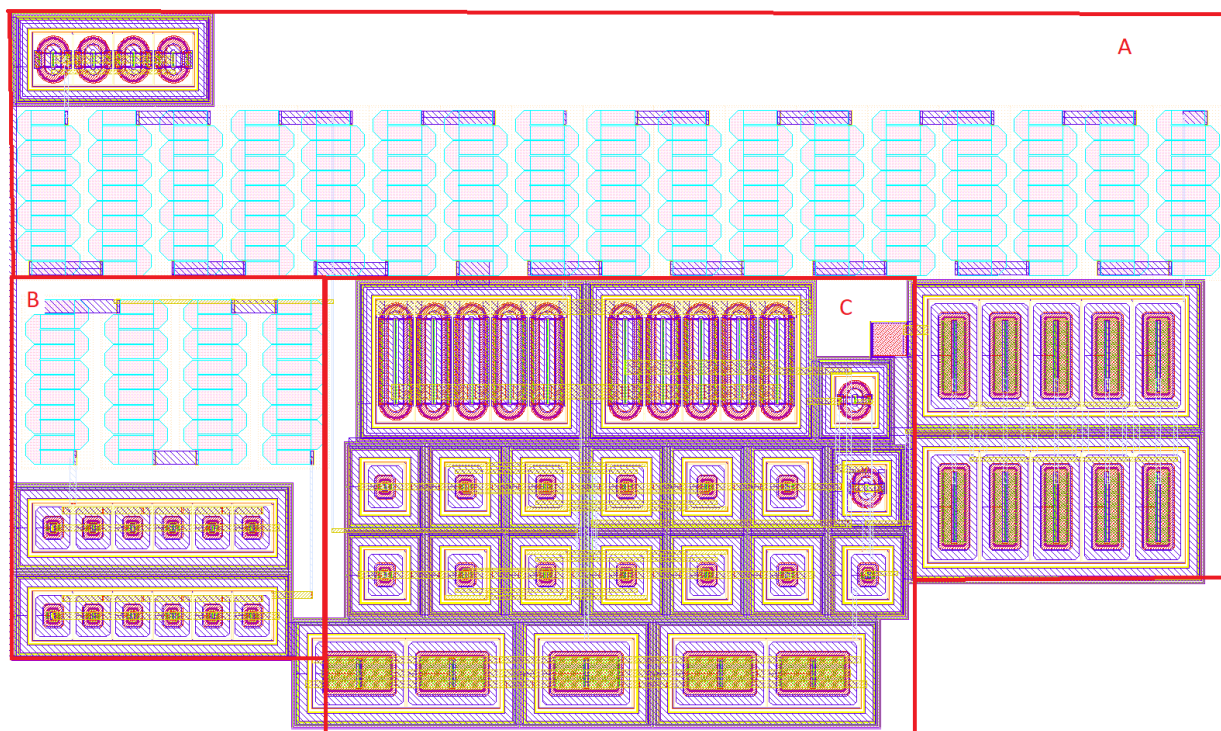
55 pav. Loginio sistemos valdymo bloko topologija

Atskiras tyrimas loginio sistemos valdymo blokui nėra atliekamas. Bloko teisingumo lentelė pateikta kartu su elektrinės principinės schemos aprašymu. Kadangi impulsinis įtampą žeminantis keitiklis veikia tinkamai, galima teigti, jog ir loginis sistemos blokas veikia tinkamai.

3.1.5. Išėjimo srovės ribojimo bloko topologijos projektavimas

Suprojektuota išėjimo srovės ribojimo bloko topologija pavaizduota 56 paveiksle. Topologiją sudaro trys dalys:

- A – elementai skirti generuoti signalą, kuris įspėja valdymo bloką apie viršytą leistiną išėjimo srovę.
- B – komparatoriaus apsaugos grandinė. Komparatoriaus maksimali įėjimo įtampa yra 20 V, todėl sistemai suprojektuota apsauga, riboja komparatoriaus įėjimo įtampą, kai visos sistemos įėjimo įtampa viršija 20 V.
- C – komparatorius, kuris lygina išėjimo srovės stiprį su atramine verte. Jei išėjimo srovė viršija leistiną, komparatorius sugeneruoja signalą, kuris praneša apie viršytą išėjimo srovę.



56 pav. Išėjimo srovės ribojimo grandinės topologija

Norint įsitikinti, kad suprojektuota topologija tinkamai veikia, atliekamas tyrimas, kurio metu matuojama grandinės ribinė srovė, prie kurios suveikia viršytos srovės apsauga. 13 lentelėje pateiktas topologijos tyrimo rezultatų palyginimas su elektrinės principinės schemos rezultatais (rezultatai pateikti amperais). Matoma, kad didėjant aplinkos temperatūrai, ribojama srovė mažėja. Ženklaus skirtumo tarp topologijos tyrimo ir elektrinės principinės schemos tyrimo rezultatų nėra. Suprojektuota topologija veikia tinkamai. Išėjimo srovės ribojimo režiai yra nuo 1,94 A iki 2,69 A.

13 lentelė. Išėjimo srovės ribojimo grandinės tyrimo rezultatai (amperais)

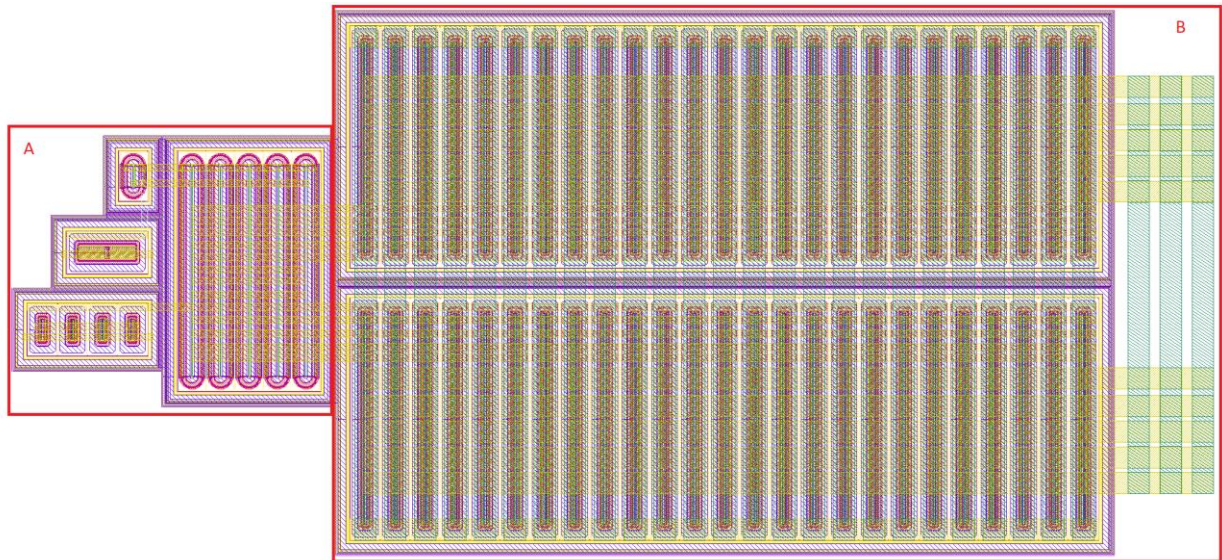
	Elementų modeliai	-40°C	27°C	125°C
Elektrinė principinės schemos modeliacija	Tipiniai	2.45802	2.3309	2.13372
	Didžiausių galios nuostolių	2.22854	2.11948	1.93931
	Lėčiausi	2.68374	2.55572	2.34708
Topologijos modeliacija	Tipiniai	2.45262	2.33069	2.1331
	Didžiausių galios nuostolių	2.23746	2.12219	1.93524
	Lėčiausi	2.68552	2.55895	2.35319

3.1.6. Išėjimo įtampos impulsų generatoriaus topologijos projektavimas

Suprojektuota išėjimo srovės ribojimo bloko topologija pavaizduota 57 paveiksle. Topologiją sudaro trys dalys:

- A – tranzistoriai, kurie apdoroja iš loginio bloko gautą 7 V signalą ir paverčia jį aukštos įtampos signalu, skirtu išėjimo signalą formuojančių tranzistorių valdymui.

- B – išėjimo įtampos impulsus generuojantys tranzistoriai.



57 pav. Išėjimo įtampos impulsų generatoriaus topologija

Norint įsitikinti, kad suprojektuota topologija tinkamai veikia, atliekamas tyrimas, kurio metu matuojama išėjimo signalą formuojančio tranzistoriaus kanalo varža. Kuo didesnė tranzistoriaus varža, tuo didesni nuostoliai grandinėje. Tyrimo rezultatai pateikti 14 lentelėje. Matoma, kad didėjant temperatūrai, didėja tranzistoriaus kanalo varža (keitiklio efektyvumas aukštoje temperatūroje yra mažesnis). Ženklaus skirtumo tarp topologijos tyrimo ir elektrinės principinės schemos tyrimo rezultatų nėra. Suprojektuota topologija veikia tinkamai.

14 lentelė. Išėjimo įtampos impulsų generatoriaus tranzistoriaus varžos tyrimo rezultatai (omais)

	Elementų modeliai	-40°C	27°C	125°C
Elektrinė principinės schemos modeliacija	Tipiniai	1.1721	2.06756	3.478492
	Didžiausių galios nuostolių	0.76608	1.62686	2.95992
	Lėčiausi	1.50498	2.48788	4.119456
Topologijos modeliacija	Tipiniai	1.18952	2.08556	3.49797
	Didžiausių galios nuostolių	0.78316	1.64448	2.97868
	Lėčiausi	1.52282	2.5066	4.1409

3.2. Ličio baterijos kroviklio topologijos projektavimas

Pagal suprojektuotą elektrinę principinę schemą projektuojama ličio baterijos kroviklio topologija. Suprojektuota topologija pateikta 58 paveiksle. Paveiksle pažymėtos kroviklio dalys:

A – M12 tranzistorius, kuris riboja išėjimo srovę.

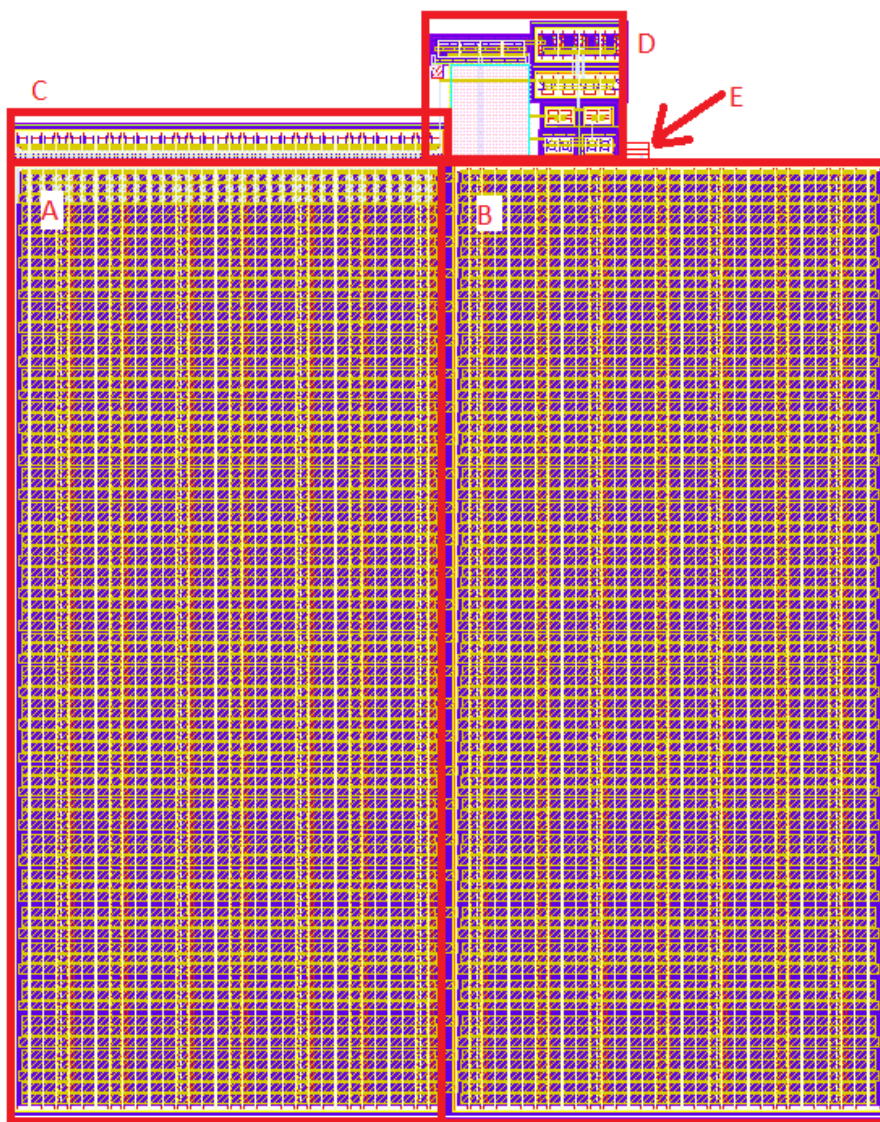
B – M10 tranzistorius, kurį valdo operacinis stiprintuvas ir reguliuoja išėjimo įtampą.

C – M11 tranzistorius, prie kurio jungiamas išorinis rezistorius ir taip nustatoma leistina maksimali išėjimo srovė, kuri gali tekėti M12 tranzistoriumi.

D – Operacinis stiprintuvas, kuris yra skirtas M10 tranzistoriaus valdymui. Stiprintuvas lygina išėjimo įtampą su vidine atramine įtampa. Jei išėjimo įtampa yra per maža, tuomet stiprintuvas atidaro M10 tranzistorių ir išėjimo įtampa kyla.

E – grįžamojo ryšio rezistorių daliklis. Šie rezistoriai sudaro grįžtamąjį ryšį tarp išėjimo įtampos ir operacinio stiprintuvo.

Didžiąją dalį kroviklio ploto užima išėjimo srovės ribojimo tranzistorius M12 ir išėjimo įtampos valdymo tranzistorius M10. Šie tranzistoriai yra vienodi ir sudaryti iš 32 mažesnių tranzistorių. Bendras kiekvieno tranzistoriaus plotis yra 128 mm. Ličio baterijos kroviklis užima 4,38 mm² plotą.



58 pav. Ličio baterijos kroviklio topologija

Atliekamas suprojektuotos topologijos kompiuterinio modeliavimo palyginimas su elektrinės principinės schemos modeliavimu siekiant ištirti, ar parazitiniai topologijos elementai

neturi ženkliausio neigiamo poveikio bloko veikimui. Tyrimo metu matuota ličio baterijos krovimo srovė. Šio tyrimo rezultatai pateikti 15 lentelėje. Tyrimo metu naudoti parametrai:

- Temperatūra – tikrinamas veikimas esant -10°C , 0°C ir 55°C aplinkos temperatūrai. Šie tyrimo parametrai parinkti dėl to, kad tipinė ličio jonų baterija gali būti kraunama nuo 0° iki 45°C . Atliekant tyrimą šiek tiek platesniuose režimuose yra įvertinamas sistemos veikimas kritinėmis sąlygomis.
- Baterijos krovimo srovę nustatančio rezistoriaus varža – $2\text{ k}\Omega$.
- Gamybiniai elementų modeliai – tipiniai, didžiausių galios nuostolių ir lėčiausio veikimo.

15 lentelė. Ličio baterijos kroviklio elektrinės principinės schemos ir topologijos modeliavimo palyginimas

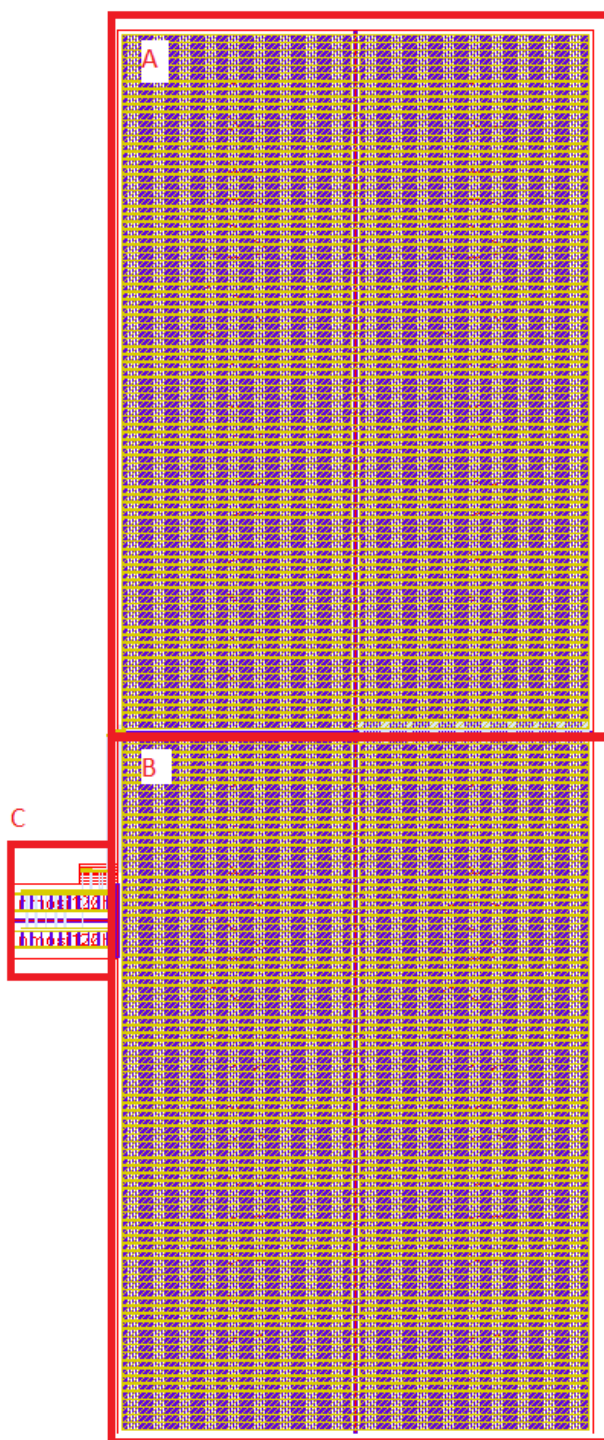
Temperatūra, $^{\circ}\text{C}$	Elementų modeliai	Schemos modeliavimo rezultatai, mA	Topologijos modeliavimo rezultatai, mA
-10	Tipiniai modeliai	131,8678	131,9128
27	Tipiniai modeliai	133,0684	133,0923
55	Tipiniai modeliai	132,9740	133,2428
-10	Didžiausių galios nuostolių	146,5272	146,6182
27	Didžiausių galios nuostolių	147,7366	147,8021
55	Didžiausių galios nuostolių	148,3720	148,4157
-10	Lėčiausi	115,2966	115,2180
27	Lėčiausi	113,2901	113,0874
55	Lėčiausi	110,5232	110,2590

Atlikus ličio jonų baterijos kroviklio tyrimą, matoma, kad elektrinės principinės schemos ir topologijos kompiuterinių modeliavimų rezultatai yra panašūs. Atliekant modeliavimą 27°C temperatūroje ir naudojant tipinius elementų modelius, kroviklis bateriją krauną 133 mA srove. Didžiausia krovimo srovė išmatuota naudojant didžiausių galios nuostolių modelius 55°C temperatūroje (148 mA). Mažiausia srovė išmatuota naudojant lėčiausius elementų modelius 55°C temperatūroje (110 mA). Atlikus modeliavimą įsitikinta, kad suprojektuotas ličio jonų baterijos kroviklis veikia tinkamai.

3.3. Įtampos šaltinio perjungimo grandinės topologijos projektavimas

Šiame poskyryje pateiktas įtampos šaltinio perjungimo grandinės topologijos projektavimo aprašymas. Šios topologijos vaizdas pateiktas 59 paveiksle. Paveiksle pavaizduotos trys pagrindinės dalys – baterijos įtampą prijungiantys tranzistoriai (A), įtampą žeminančio keitiklio įtampą prijungiantys tranzistoriai (B) ir valdymo grandinė (C). A ir B dalys sudarytos iš vienodo dydžio

tranzistorių. Kiekvienas iš tranzistorių yra padalintas į 80 dalių. Tranzistorių dalinimas į mažesnius tranzistorius atliekamas siekiant sumažinti technologinio proceso paklaidų įtaką galutiniam IG.



59 pav. Įtampos šaltinio perjungimo topologija

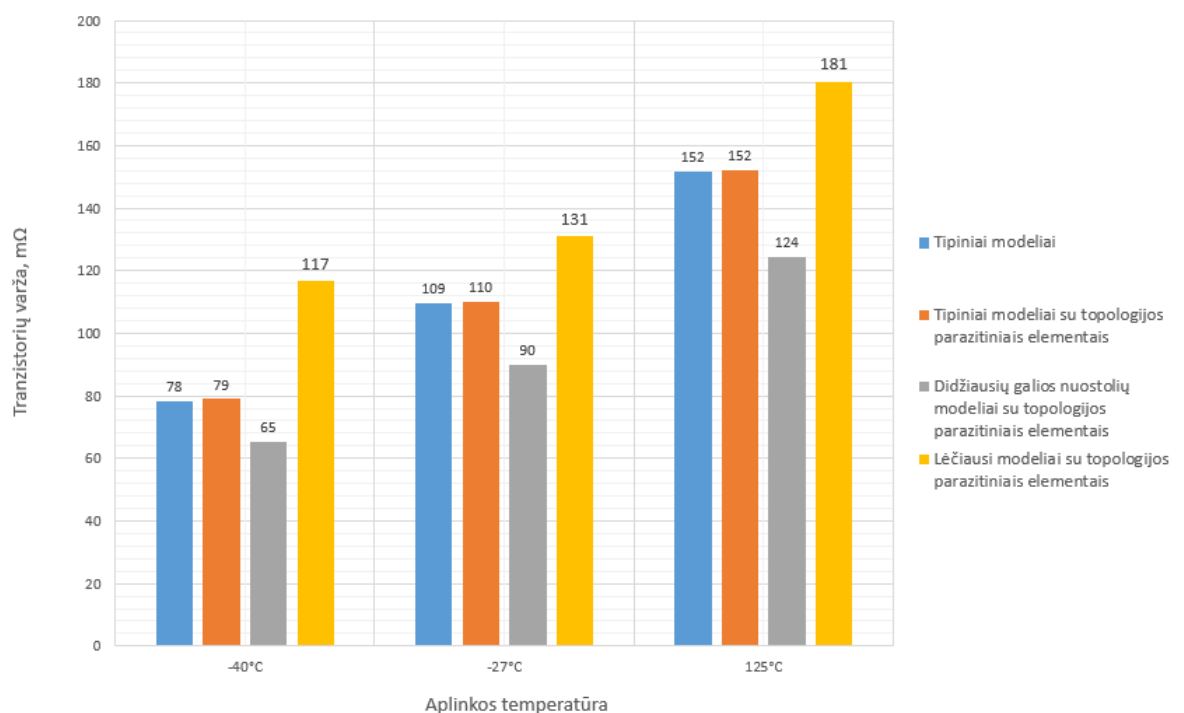
Siekiant įvertinti grandinės parametrus atliekamas įtampos šaltinio perjungimo grandinės topologijos tyrimas. Keičiami aplinkos, sistemos ir technologiniai parametrai siekiant įvertinti. Dvi pagrindinės funkcinės grandinės dalys – baterijos ir įtampos keitiklio įtampų prijungimo tranzistoriai. Siekiant įvertinti grandinės priklausomybę nuo minėtų parametru, matuojamas įjungtų

tranzistorių varža. Kuo didesnė tranzistorių varža, tuo didesnis įtampos kritimas ir tuo didesni energijos nuostoliai grandinėje. Tyrimo metu naudoti parametrai:

- Temperatūra – tikrinamas veikimas esant -40°C , 27°C ir 125°C aplinkos temperatūrai.
- Įtampą žeminančio keitiklio ir baterijos įtampos – 4 V.
- Išėjimo srovė – 2 A.
- Gamybiniai elementų modeliai – tipiniai, didžiausių galios nuostolių ir lėčiausio veikimo.

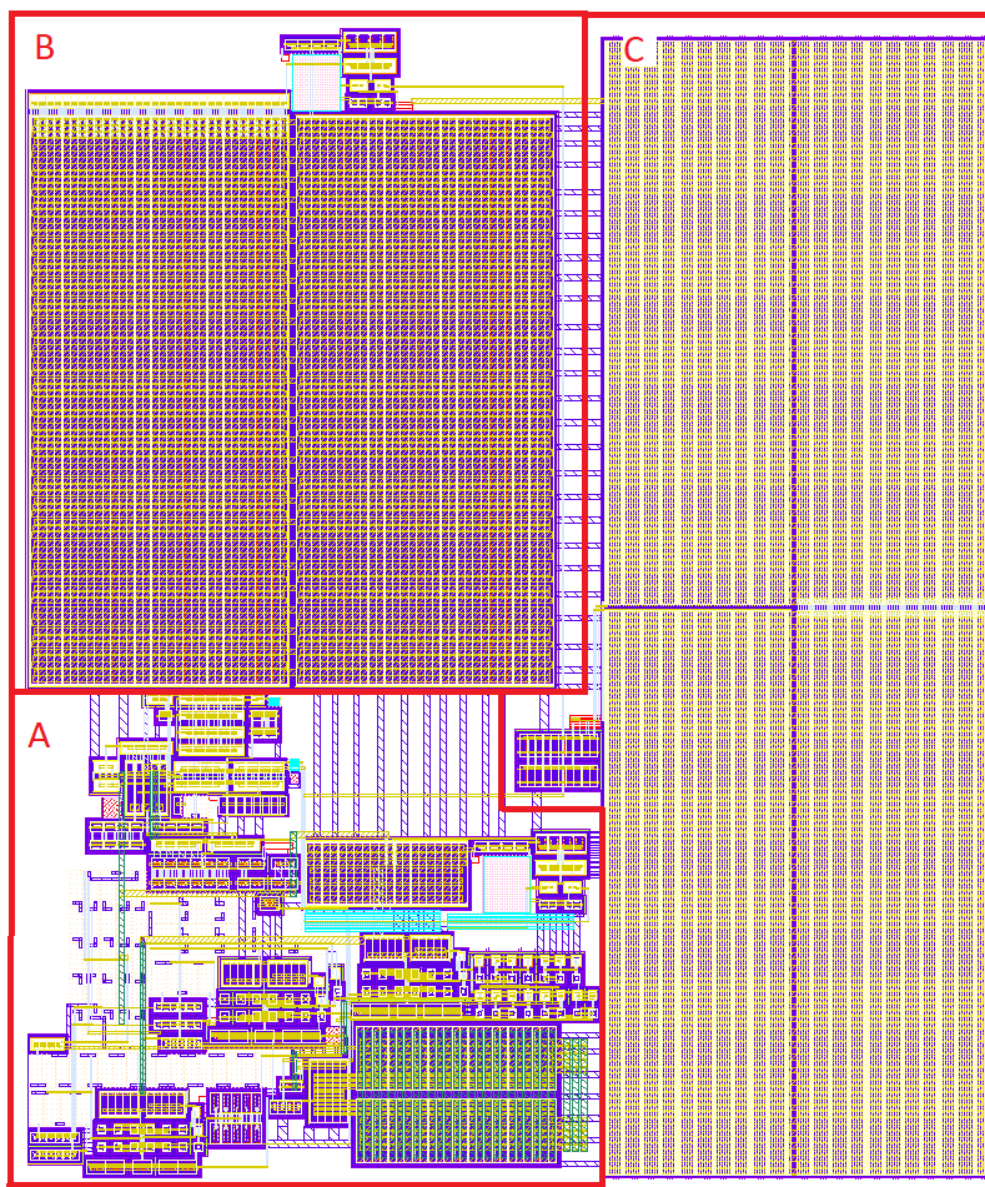
Tyrimo rezultatai pavaizduoti 60 paveiksle. Tyrimo metu išmatuota įtampą prijungiančių tranzistorių varža. Baterijos įtampą iš įtampą žeminančio keitiklio įtampą prijungiantys tranzistoriai yra vienodų matmenų, o topologija suprojektuota simetriškai. Dėl to tranzistorių varžos yra beveik vienodos. Tyrimo rezultatuose pateikti šių dviejų grandinės blokų tranzistorių varžų vidurkiai.

Schemos modeliavimo rezultatai (paveiksle pavaizduoti mėlyna spalva) yra artimi topologijos modeliavimo rezultatams (paveiksle pavaizduoti oranžine spalva). Blogiausias rezultatas yra pasiekiamas, kai aplinkos temperatūra 125°C ir naudojami lėčiausi elementų modeliai – šiuo atveju tranzistorių varža yra $181\text{ m}\Omega$. Esant šioms sąlygoms, įtampos kritimas atsirandantis ant perjungimo grandinės tranzistorių yra didžiausias. Geriausias rezultatas pasiekiamas, kai aplinkos temperatūra yra -40°C ir naudojami didžiausių galios nuostolių elementų modeliai. Šiuo atveju tranzistorių varža yra $65\text{ m}\Omega$. Esant šioms sąlygoms, įtampos kritimas atsirandantis ant perjungimo grandinės tranzistorių yra mažiausias – grandinės energetiniai nuostoliai yra mažiausi.



3.4. Visos sistemos topologijos projektavimas ir tyrimas

Suprojektuoti trys sistemos blokui – impulsinis įtampą žeminantis keitiklis, ličio baterijos kroviklis ir maitinimo šaltinio perjungimo grandinė. Šių blokų topologijos sujungtos į bendrą sistemą, kurios vaizdas pateiktas 61 paveiksle. Suprojektuota sistema užima 13,84 mm² plotą. Impulsinis įtampą žeminantis keitiklis (A) užima 3,55 mm², baterijos kroviklis (B) 4,38 mm², o maitinimo šaltinio perjungimo grandinė (C) 5,91 mm².



61 pav. Visos sistemos topologijos vaizdas

Siekiant įvertinti bendros sistemos veikimą, reikia vertinti visų blokų veikimą. Pavyzdžiui, kai įėjimo įtampa yra 100 V, išėjimo įtampa yra 4 V, o išėjimo srovė yra 2 A, impulsinio įtampą

žeminančio keitiklio efektyvumas yra 22,22 % (27°C temperatūroje). Papildomus nuostolius sistemoje įneša maitinimo šaltinio perjungimo grandinė. Žinant, kad tranzistorių poros, kurie prijungia keitiklio išėjimo įtampą prie apkrovos, varža yra lygi 110 mΩ, galima apskaičiuoti papildomai susidarancius nuostolius. Šiuo atveju įtampos kritimas ant tranzistorių poros yra 0,22 V, tranzistorių išsklaidoma galia yra 0,44 W. Impulsinio keitiklio išėjimo galia yra 8 W, įėjimo galia 36 W. Pridėjus papildomus galios nuostolius, apskaičiuojama visos sistemos įėjimo galia – 36,44 W. Keitiklio efektyvumas visoje sistemoje sumažėja iki 21,95 %. Analogiški nuostoliai atsiranda ir kai apkrova yra maitinama iš baterijos – dėl maitinimo šaltinio perjungimo grandinės tranzistorių poros varžos dalis baterijos energijos yra paverčiama šiluma. Skaičiavimams naudoti rezultatai, gauti atliekant modeliavimą su tipiniais elementų modeliais.

3.5. Sistemos tobulinimo galimybės

Suprojektuota sistema ir ištirti jos parametrai. Šiame poskyryje pateikiama sistemos tobulinimo galimybių apžvalga. Sistemos tobulinimo galimybės suskirstytos į tris dalis pagal tris sistemą sudarančius blokus. Tai impulsinio įtampą žeminančio keitiklio, ličio jonų baterijos kroviklio ir maitinimo šaltinio perjungimo blokų tobulinimas.

Pagrindinės impulsinio įtampą žeminančio keitiklio tobulinimo kryptys – užimamo ploto mažinimas ir efektyvumo didinimas. Siekiant sumažinti keitiklio užimamą plotą, reikėtų pakeisti vidinių grandinių veikimo įtampą iš 7 V į 5 V. Tokiu atveju galima perprojektuoti vidines keitiklio valdymo grandines naudojant mažesnių geometrinių matmenų tranzistorius, kurie yra skirti darbui su 5 V įtampa. Siekiant padidinti keitiklio efektyvumą, galima:

- Didinti keitiklio veikimo dažnį.
- Tobulinti išėjimo srovės ribojimo grandinę – šiuo metu išėjimo srovė yra matuojama prie sistemos prijungiant 1 Ω rezistorių ir matuojant įtampos kritimą ant šio rezistoriaus. Pavyzdžiui, kai išėjimo srovė siekia du amperus, rezistorius neefektyviai panaudoja du vatus galios. Siekiant sumažinti rezistoriaus varžą, reikia didinti išėjimo srovės ribojimo grandinės jautrumą.
- Mažinti išėjimo tranzistoriaus varžą. Atlikus šį pakeitimą padidėtų keitiklio užimamas plotas, tačiau sumažėtų nuostoliai išėjimo impulsų generavimo grandinėje.

Pagrindinės ličio jonų baterijos kroviklio tobulinimo kryptys:

- Pilnų penkių krovimo ciklų įgyvendinimas (kurie yra aprašyti 1.3. poskyryje).
- Baterijos neigiamo temperatūrinio koeficiento rezistoriaus stebėjimo grandinė. Daugelis ličio jonų baterijų turi integruotus rezistorius, kurių varža priklauso nuo temperatūros. Suprojektavus šio rezistoriaus varžos matavimo grandinę būtų galima

įgyvendinti automatinį baterijos krovimo sustabdymą, kai baterijos temperatūra pasiekia kritines vertes.

- Baterijos krovimo įjungimo signalas – būtų naudinga turėti galimybę įjungti ir išjungti baterijos krovimą. Tokį valdymą galėtų atlikti aukštesnio lygio sistemoje naudojamas mikrovaldiklis.

Maitinimo šaltinio perjungimo grandinė šiuo metu yra suprojektuota optimali dabartiniam sistemos panaudojimo scenarijui, tačiau galima keisti išėjimo tranzistorių geometrinius parametrus siekiant optimizuoti sistemą:

- Didinant tranzistorių geometrinius matmenis galima sumažinti tranzistorių varžą ir padidinti sistemos efektyvumą.
- Mažinant tranzistorių geometrinius matmenis galima sumažinti IG plotą.

3.6. Skyriaus apibendrinimas

Šiame skyriuje suprojektuota ir ištirta sistemos ir jos blokų topologija pagal elektrinių principinių schemų brėžinius. Projektavimui ir tyrimui naudotas *Cadence* IG projektavimo programinis paketas. Suprojektuotų topologijų tyrimo rezultatai palyginti su elektrinių principinių schemų modeliavimo rezultatais. Tyrimams atlikti naudoti kraštutiniai sistemos reikalavimuose numatyti parametrai – aplinkos temperatūra (nuo -40°C iki 125°C), kritinės užduotyje numatytos įėjimo ir išėjimo įtampos, išėjimo srovė. Tyrimo metu naudoti kraštutiniai elementų modeliai, kurie skirti įvertinti sistemos veikimą priklausomai nuo IG gamintojo nurodomų kraštutinių elementų parametrų verčių. Suprojektavus ir ištyrus sistemą, matoma, kad sistema veikia tinkamai ir atitinka užduotyje numatytus reikalavimus.

Suprojektuota ir ištirta impulsinio įtampą žeminančio keitiklio topologija. Tyrimo metu įsitikinta, kad keitiklis atitinka užduotyje numatytus parametrus. Keitiklis veikia, kai įėjimo įtampa yra nuo 10 V iki 100 V, išėjimo srovė gali siekti 2 A, o išėjimo įtampa yra konfigūruojama nuo 2,8 V iki 20 V. Atliktas pavienių impulsinį keitiklį sudarančių topologijų tyrimas, kurio metu įsitikinta, kad pavieniai keitiklio blokai veikia tinkamai net ir kritinėse sąlygose.

Suprojektuota ir ištirta ličio jonų baterijos kroviklio topologija. Pagrindinis kroviklio tyrimo parametras – baterijos krovimo srovė. Kroviklio srovė yra valdoma išoriškai prijungtu rezistoriumi. Tyrimo metu naudotas 2 k Ω rezistorius. Su šia konfigūracija krovimo srovė svyruoja nuo 110 mA iki 148 mA (priklausomai nuo temperatūros ir modeliavimo metu naudojamų elementų modelių). Šį krovimo srovės svyravimą būtina įvertinti integruojant suprojektuotą sistemą į įrenginius. Kroviklio srovės valdymo rezistorių parinkti taip, kad jokiais atvejais nebūtų viršyta leistina ličio jonų baterijos krovimo srovė.

Suprojektuota ir ištirta maitinimo šaltinio topologija. Atliktas maitinimo šaltinius prijungiančių tranzistorių porų varžų tyrimas. Tranzistorių porų varža svyruoja nuo 65 m Ω iki 181 m Ω priklausomai nuo temperatūros ir modeliavimui naudojamų elementų modelių. Kuo didesnė tranzistorių varža, tuo didesni nuostoliai maitinimo šaltinio perjungimo grandinėje – tai būtina įvertinti integruojant suprojektuotą sistemą į aukštesnio lygio įrenginius.

Suprojektavus ir ištyrus sistemos blokus, pateikti pasiūlymai blokų tobulinimui. Pasiūlymus galima skirstyti į dvi grupes. Pirmoji – funkciniai patobulinimai – tai nauji architektūros sprendimai, kuriuos įgyvendinus būtų išplėstos sistemos galimybės. Antra patobulinimų grupė – sistemos optimizavimas. Sistemą galima pagerinti didinant impulsinio įtampą žeminančio keitiklio efektyvumą, mažinant nuostolius įvairiose grandinėse bei mažinant topologijos užimamą plotą.

Išvados

Baigiamojo magistro darbo metu suprojektuotas ir ištirtas integrinis grandynas, skirtas maitinti 4 V elektronikos įrenginius 10–100 V sistemose. IG sudarytas iš trijų blokų:

- Įtampą žeminančio keitiklio, kurio įėjimo įtampa yra 10–100 V, išėjimo įtampa 2,8–20 V, o išėjimo srovė yra 2 A.
- Maitinimo šaltinio perjungimo grandinės, kuri prie apkrovos prijungia atsarginį įtampos šaltinį – ličio jonų bateriją, kai išorinė įtampa yra nepasiekiamo.
- Ličio jonų baterijos kroviklio – sistemos dalies, kuri skirta įkrauti atsarginį įtampos šaltinį (bateriją).

Toks IG tinkamas integruoti į elektronikos įrenginius, kurie yra naudojami įvairiose transporto priemonėse. Lengvieji automobiliai naudoja 12 V akumulatorius, o tam tikros elektrinės transporto priemonės (dviračiai, mopedai) gali turėti akumulatorius, kurių nominali įtampa siekia 84 V. Dėl to suprojektuotas IG leidžia kurti universalius elektronikos prietaisus. 4 V įtampa naudojama ryšio technologijų modemams nuo 2G iki 5G maitinti, todėl suprojektuotas IG tinka GPS sekimo ir ryšio įrangai.

Siekiant suprojektuoti impulsinį įtampą žeminantį keitiklį, atlikta impulsinių keitiklių veikimo principų ir architektūros tipų apžvalga. Analizuoti įtampa valdomi, srovė valdomi, įtampos histerize valdomi ir pastovaus įjungimo laiko keitikliai. Projektuojamam IG parinktas pastovaus įjungimo laiko architektūros tipas. Šio tipo keitikliai greitai reaguoja į pasikeitusią apkrovos srovę, apsaugo induktyvumo ritę nuo įsisotinimo ir yra gana lengvai įgyvendinami dėl nesudėtingos struktūros. Pagrindinis šio tipo keitiklių trūkumas – veikimo dažnis priklauso nuo įėjimo įtampos. Kadangi užduotyje numatytas įėjimo įtampos diapazonas yra platus, darbe pasiūlyta patobulinti pastovaus įjungimo laiko architektūrą suprojektavus dažnio keitimo grandinę. Ji užtikrina mažesnę dažnio pokytį, kintant įėjimo įtampai – dėl to keitiklis veikia stabiliau plačiame įėjimo įtampos diapazone.

Atlikta tiesinių ličio jonų baterijų kroviklių veikimo principų apžvalga. Nuspręsta, kad projektuojamame IG bus įgyvendintas dviejų etapų tiesinis ličio jonų baterijų kroviklis. Kroviklis atlieka baterijos krovimą nuolatinės srovės ir nuolatinės įtampos režimais ir geba įkrauti bateriją iki 4,2 V įtampos.

Suprojektuotas ir ištirtas IG bei atskiros sistemos sudarančios dalys. Projektavimas atliktas naudojant Cadence IG projektavimo programinę įrangą, o projektuojant naudotos AMS H35B4D3 0,35 μm 120 V KMOP gamybos proceso technologinės bibliotekos. Atlikti tyrimai temperatūros nuo -40°C iki 125°C sąlygomis, naudoti technologinėje bibliotekoje pateikti kraštutiniai elementų

modeliai, siekiant įsitikinti, kad suprojektuotas IG veiks tinkamai, nepriklausomai nuo gamybos paklaidų.

Suprojektuota ir ištirta impulsinio įtampą žeminančio keitiklio elektrinė principinė schema ir topologija. Palyginti schemas ir topologijos kompiuterinio modeliavimo rezultatai ir įsitikinta, kad keitiklis atitinka užduotyje numatytus reikalavimus. Keitiklio įėjimo įtampa yra 10–100 V, išėjimo įtampa 2,8–20 V, o išėjimo srovė yra 2 A. Atlikti keitiklio veikimo dažnio, efektyvumo, išėjimo srovės ribojimo, išėjimo signalą generuojančio tranzistoriaus varžos, atraminės srovės ir įtampos bloko bei vidinio tiesinio įtampą žeminančio keitiklio tyrimai. Kai įėjimo įtampa yra 10 V, aplinkos temperatūra 27°C, keitiklio išėjimo įtampa 4 V, o išėjimo srovė 2 A, keitiklis veikia 122,2 kHz dažniu, o jo efektyvumas yra 55,1 %. Jei įėjimo įtampa pakinta į 100 V, keitiklis veikia 159,3 kHz dažniu, o jo efektyvumas yra 22,2 %.

Suprojektuota ir ištirta ličio jonų baterijos kroviklio elektrinė principinė schema ir topologija. Palyginti schemas ir topologijos kompiuterinio modeliavimo rezultatai ir įsitikinta, kad kroviklis tinkamai įkrauna bateriją ir atitinka užduotyje numatytą reikalavimą – krauna bateriją bent 100 mA srove. Maksimali krovimo srovė yra valdoma prie IG prijungiamu rezistoriumi. Tyrimo metu naudotas 2 kΩ rezistorius, o krovimo srovė kinta nuo 110 mA iki 148 mA, priklausomai nuo temperatūros ir kompiuterinio modeliavimo metu naudojamų elementų modelių.

Suprojektuota ir ištirta maitinimo šaltinio perjungimo grandinės elektrinė principinė schema ir topologija. Atliktas tyrimas, kurio metu išanalizuota perjungimo grandinės tranzistorių varža, leidžianti įvertinti perjungimo grandinėje atsirandančius energijos nuostolius. Tranzistorių varža kinta nuo 65 mΩ iki 181 mΩ, priklausomai nuo temperatūros ir kompiuterinio modeliavimo metu naudojamų elementų modelių.

Visi trys suprojektuoti blokai sujungti į bendrą sistemą. Sistemos užimamas plotas yra 13,84 mm². Impulsinis įtampą žeminantis keitiklis užima 3,55 mm², baterijos kroviklis 4,38 mm², o maitinimo šaltinio perjungimo grandinė 5,91 mm². Aptartos sistemos tobulinimo galimybės. Pagrindinės dvi tobulinimo kryptys – IG ploto mažinimas ir funkciniai sistemos patobulinimai. IG plotą galima sumažinti perprojektuojant dalį vidinių IG grandinių ir naudojant mažesnių matmenų tranzistorius, skirtus dirbti su 5 V įtampa, optimizuojant dabartinių elementų išdėstymą. Pagrindiniai funkcinio patobulinimo būdai – maitinimo šaltinio perjungimo grandinės suveikimo greičio didinimas, impulsinio įtampą žeminančio keitiklio efektyvumo didinimas ir papildomų ličio jonų baterijos kroviklio funkcijų įgyvendinimas.

LITERATŪRA

1. *Switching regulator fundamentals* [interaktyvus]. 2019. Castaldo A. [žiūrėta 2021 m. gruodžio 8 d.]. Prieiga per internetą: <<https://www.ti.com/lit/an/snva559c/snva559c.pdf?ts=1639354076575>>
2. GAO D. W. 2015. *Energy Storage for Sustainable Microgrid*: vadovėlis. London: Elsevier. 142 p.
3. *Switching Power Supply Topology Voltage Mode vs. Current Mode* [interaktyvus]. 1999. Mammano R. [žiūrėta 2021 m. gruodžio 10 d.]. Prieiga per internetą: <<https://pdf4pro.com/fullscreen/switching-power-supply-topology-voltage-mode-vs-current-3e7289.html>>
4. *Understanding and Applying Current-Mode Control Theory* [interaktyvus]. 2007. Sheehan R. [žiūrėta 2021 m. lapkričio 27 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.ti.com/cn/cn/lit/an/snva555/snva555.pdf?ts=1639376386391&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F>
5. *Design of voltage-mode hysteretic controllers for synchronous buck converters supplying microprocessor loads* [interaktyvus]. 2005. Castilla M., Garcia de Vicuna L., Guerrero J. M., Matas J., Miret J. [žiūrėta 2021 m. gruodžio 12 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/publication/3353743_Design_of_voltage-mode_hysteretic_controllers_for_synchronous_buck_converters_supplying_microprocessor_loads>
6. *Control-Mode Quick Reference Guide Step-Down Non-Isolated DC/DC* [interaktyvus]. 2017. Texas Instruments [žiūrėta 2021 m. gruodžio 13 d.]. Prieiga per internetą: <<https://training.ti.com/sites/default/files/docs/slyt710.pdf>>
7. *A High Efficiency Fast Transient COT Control DC-DC Buck Converter with Current Reused Current Sensor* [interaktyvus]. 2021. Khan D., Qurat Ul A. [žiūrėta 2021 m. gruodžio 13 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/publication/348532786_A_High_Efficiency_Fast_Transient_COT_Control_DC-DC_Buck_Converter_with_Current_Reused_Current_Sensor>
8. *A novel Li-ion battery charger using multi-mode LDO configuration based on 350 nm HV-CMOS* [interaktyvus]. 2016. Nguyen H., Pham L. Hoang T. [žiūrėta 2022 m. kovo 3 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/publication/303956948_A_novel_Li-ion_battery_charger_using_multi-mode_LDO_configuration_based_on_350_nm_HV-CMOS>

[ion battery charger using multi-mode LDO configuration based on 350 nm HV-CMOS](#)>

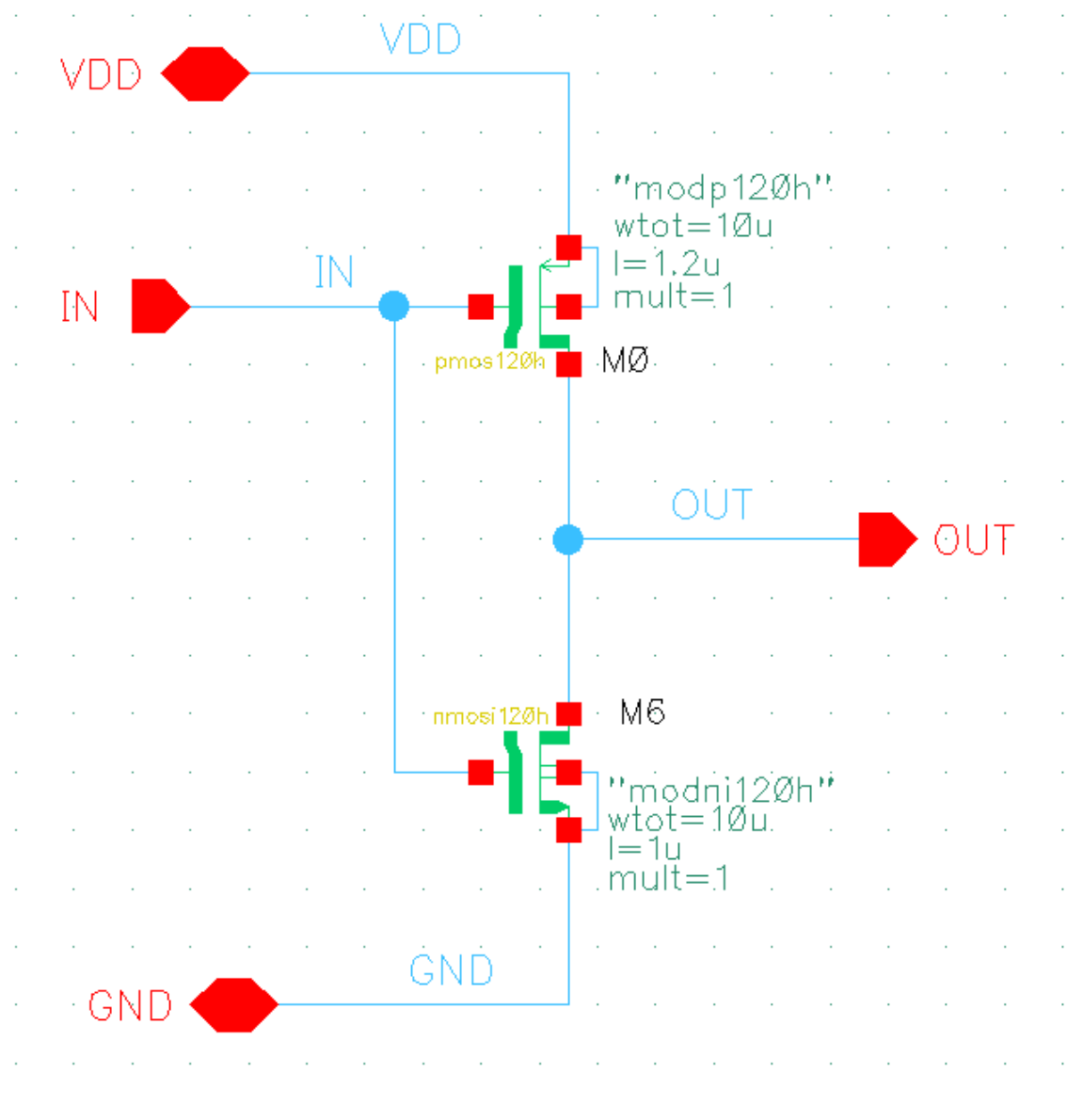
9. A feedback loop regulated bootstrap driver circuit with improved drive capability for high voltage buck DC–DC converter [interaktyvus]. 2013. Liu Y., Liu S., Ye Q., Yuan B., Lai X. [žiūrėta 2022 m. kovo 12 d.]. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0026269213001882v>>
10. Kok W. ir Tam S. (2020). *CMOS Voltage: An Analytical and Practical Perspective (2nd ed.)*. John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd.
11. *Design of a DCDC buck converter for ultra-low power applications in 65nm CMOS Process* [interaktyvus]. 2012. Safari N. [žiūrėta 2022 m. gegužės 3 d.]. <<http://liu.diva-portal.org/smash/get/diva2:546843/FULLTEXT01.pdf>>
12. *A Monolithic Current-Mode CMOS DC–DC Converter With On-Chip Current-Sensing Technique* [interaktyvus]. 2004. Lee C., Mok P. [žiūrėta 2023 m. vasario 3 d.]. <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1261283>>

PRIEDAI

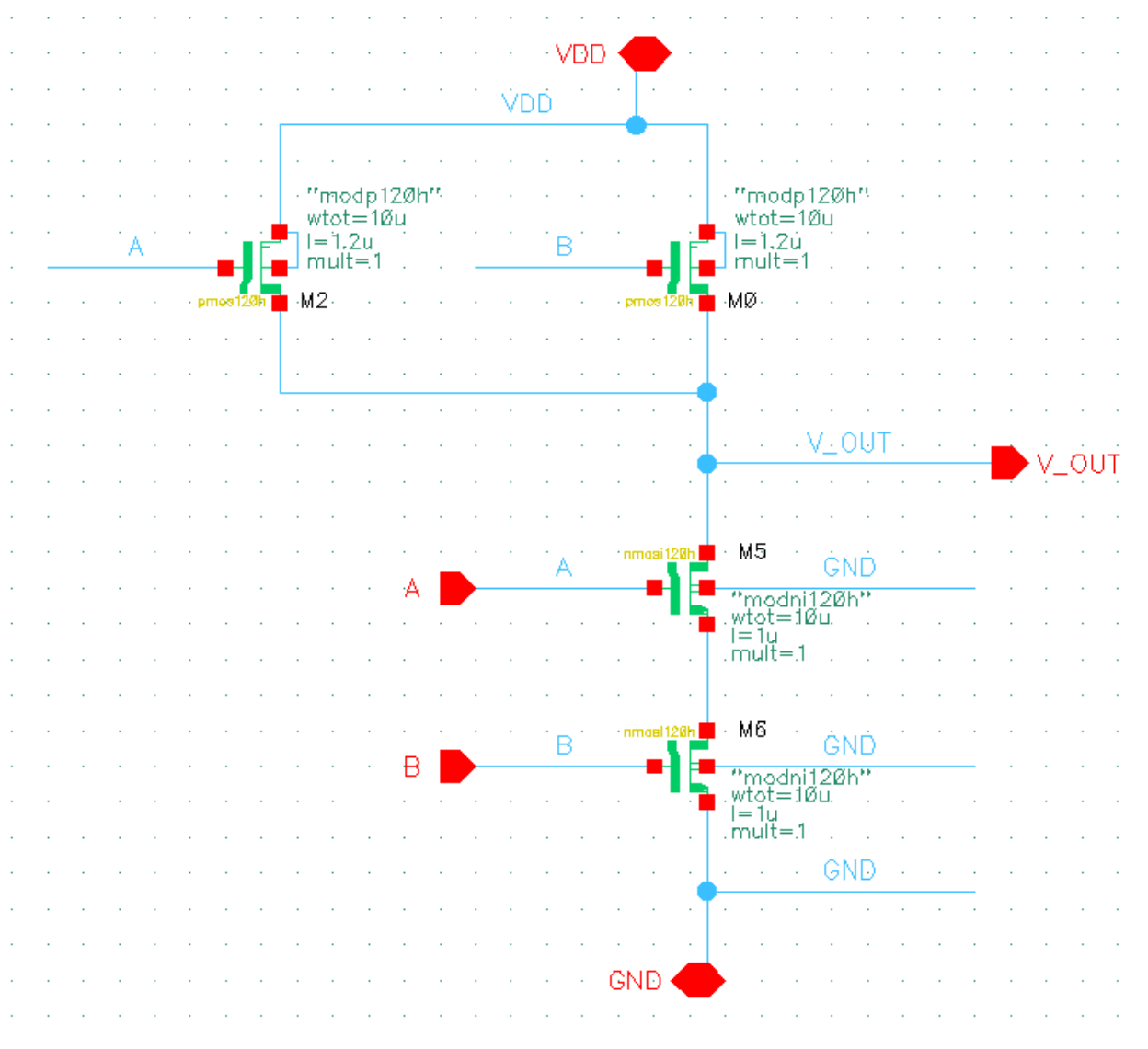
Priedas A. Suprojektuotų elementų elektrinės principinės schemos	93
Priedas A1. Inverterio elektrinė principinė schema	93
Priedas A2. Loginio IR-NE elektrinė principinė schema	94
Priedas A3. Loginio ARBA-NE elektrinė principinė schema	95
Priedas A4. Loginio IR elektrinė principinė schema	95
Priedas A5. Loginio ARBA elektrinė principinė schema	96
Priedas A6. SR trigerio elektrinė principinė schema	96
Priedas A7. Komparatoriaus elektrinė principinė schema	97
Priedas A7.1. Komparatoriaus diferencinės įėjimo tranzistorių poros elektrinė principinė schema	97
Priedas A7.2. Komparatoriaus elektrinė principinė schema su diferencine įėjimo tranzistorių pora	97
Priedas A8. Vidinis impulsų generatorius	98
Priedas A8.1. Vidinio impulsų generatoriaus simbolis	98
Priedas A8.2. Vidinio impulsų generatoriaus elektrinė principinė schema	98
Priedas A8.3. Komparatoriaus su įėjimo įtampos daliklio koeficiento keitikliu elektrinė principinė schema	99
Priedas A9. Loginio sistemos valdymo bloko principinė elektrinė schema	99
Priedas A10. Išėjimo srovės ribojimo bloko principinė elektrinė schema	100
Priedas A11. Išėjimo įtampos impulsų generatoriaus principinė elektrinė schema	100
Priedas A11.1. Išėjimo įtampos impulsų valdiklio principinė elektrinė schema	100
Priedas A11.2. Išėjimo įtampos impulsų valdiklio ir išėjimo signalą generuojančio tranzistoriaus principinė elektrinė schema	100
Priedas A12. Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio principinė elektrinė schema	101
Priedas A13. Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio išėjimo įtampos svyravimas	101
Priedas A13.1. Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio išėjimo įtampos maksimumai	101
Priedas A13.2. Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio išėjimo įtampos minimumai	101

Priedas A. Suprojektuotų elementų elektrinės principinės schemos

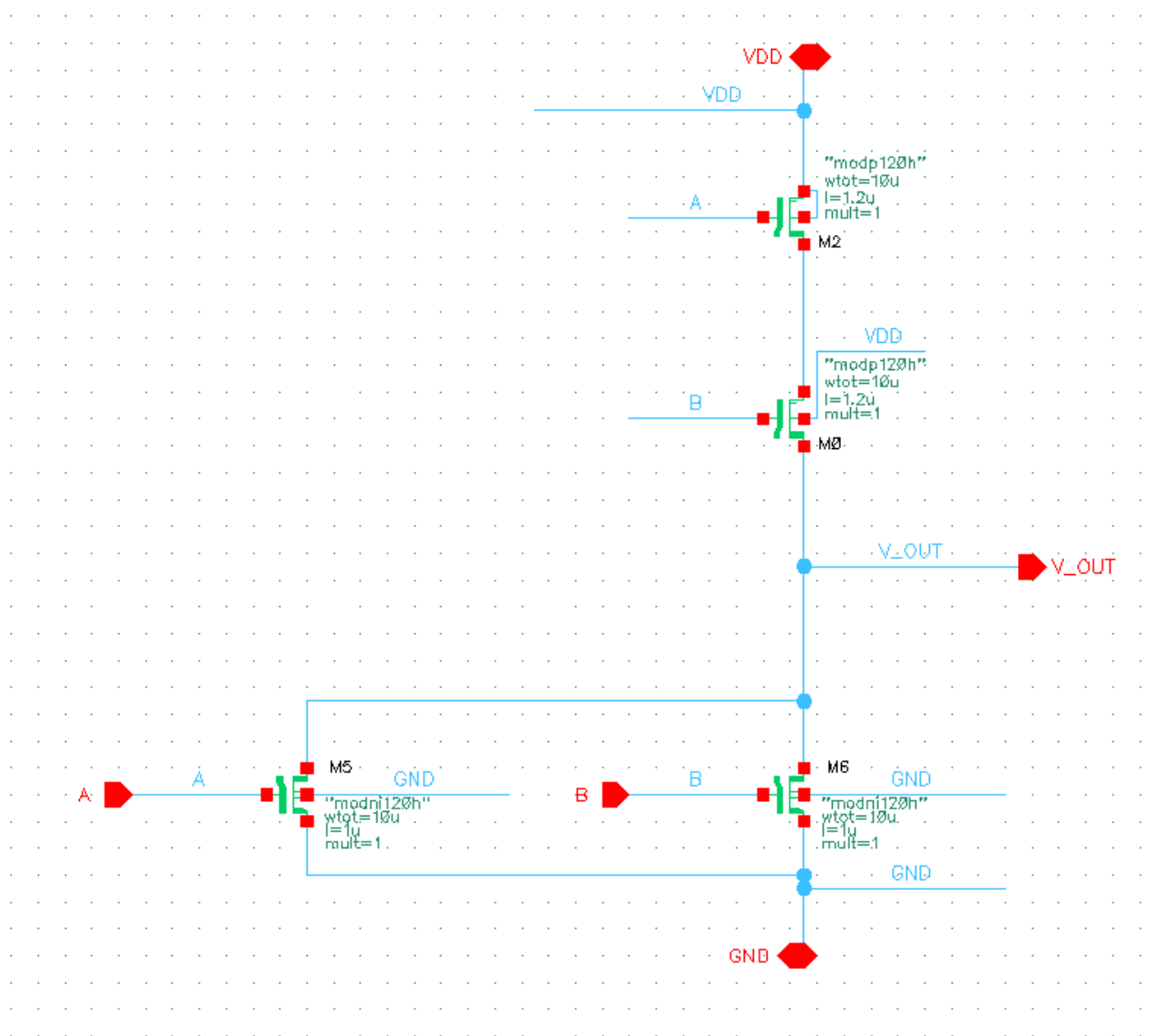
Priedas A1. Inverterio elektrinė principinė schema



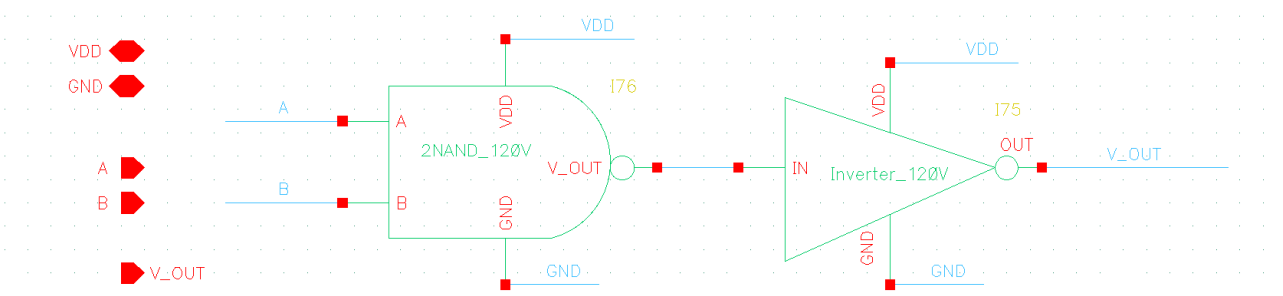
Priedas A2. Loginio IR-NE elektrinė principinė schema



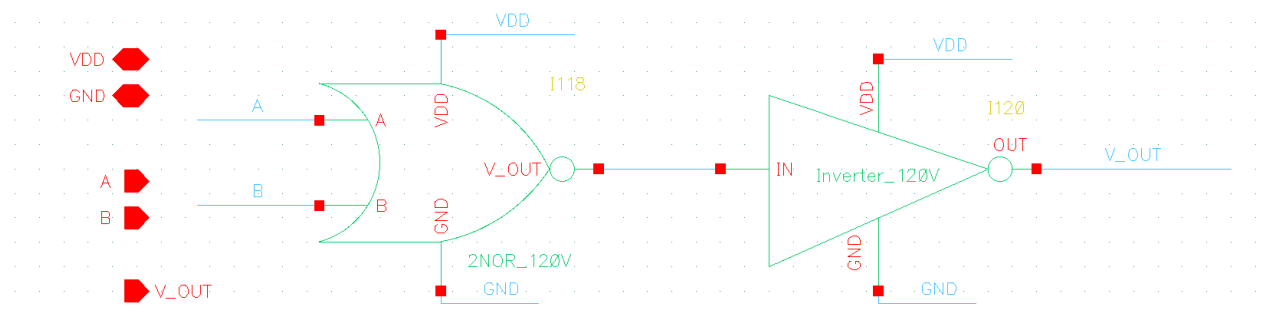
Priedas A3. Loginio ARBA-NE elektrinė principinė schema



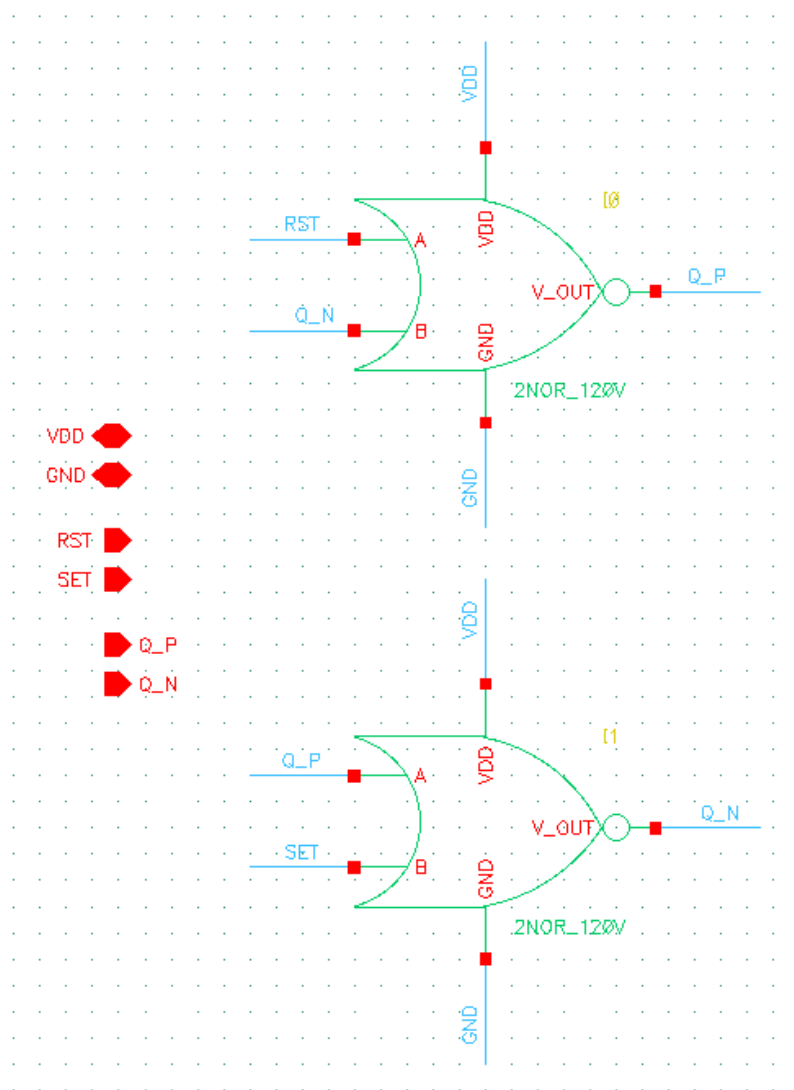
Priedas A4. Loginio IR elektrinė principinė schema



Priedas A5. Loginio ARBA elektrinė principinė schema

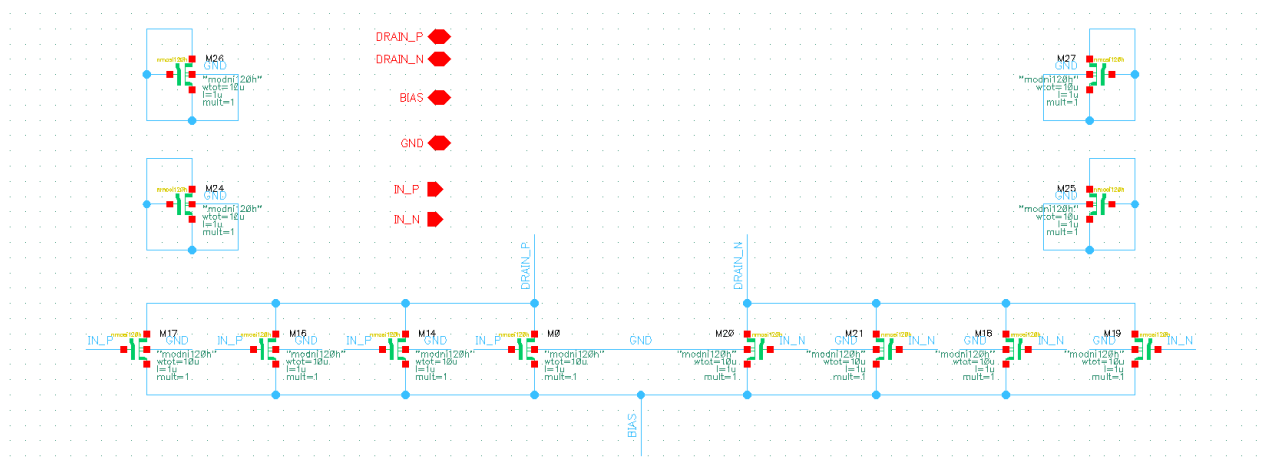


Priedas A6. SR trigerio elektrinė principinė schema

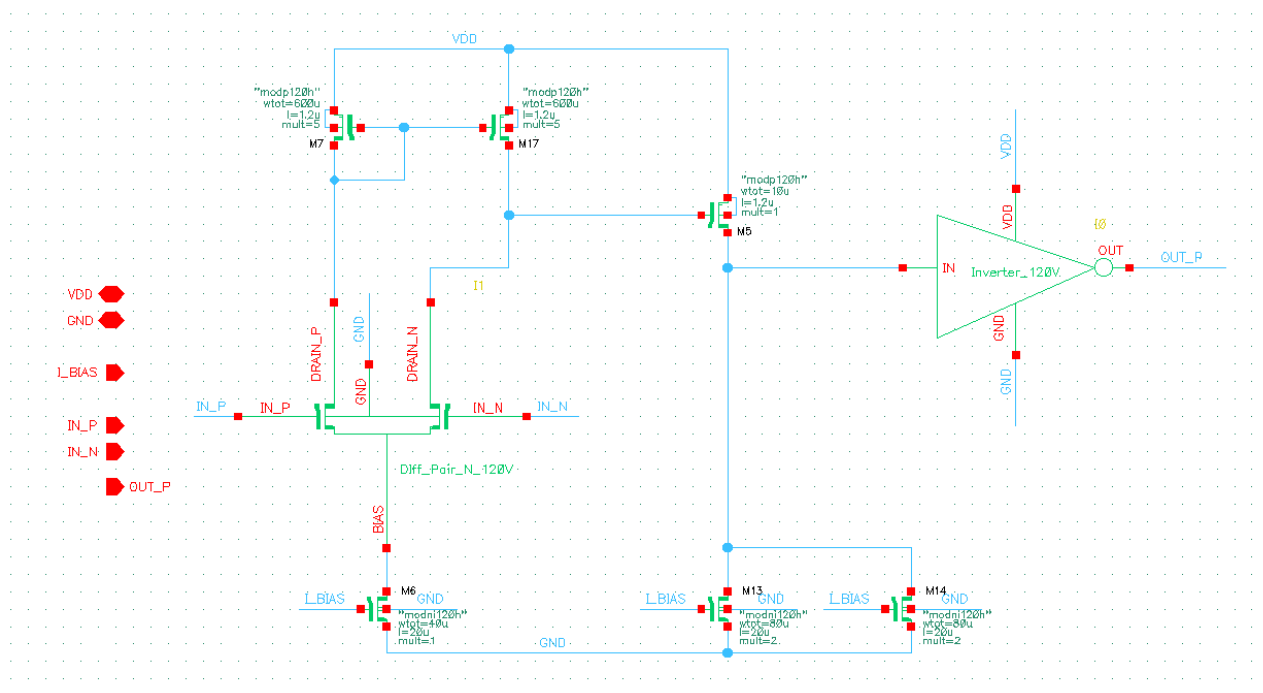


Priedas A7. Komparatoriaus elektrinė principinė schema

Priedas A7.1. Komparatoriaus diferencinės įėjimo tranzistorių poros elektrinė principinė schema

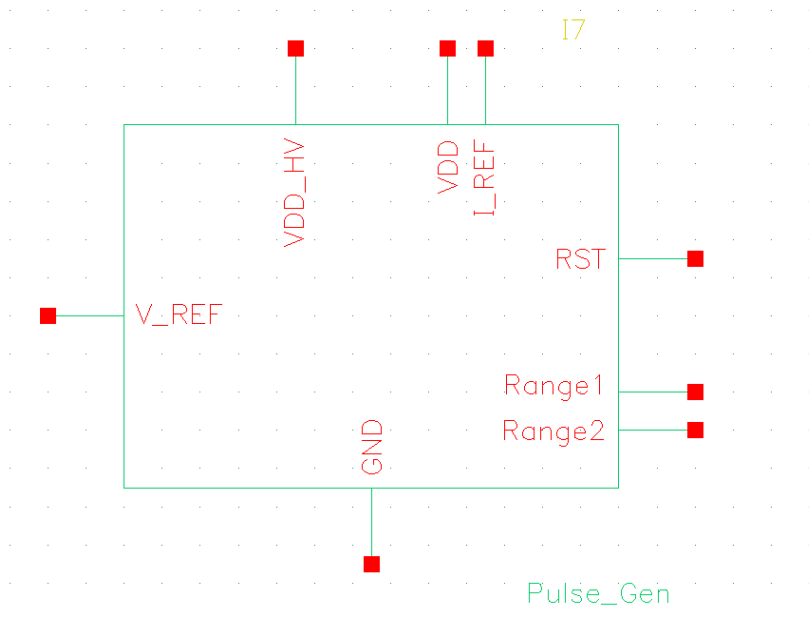


Priedas A7.2. Komparatoriaus elektrinė principinė schema su diferencine įėjimo tranzistorių pora

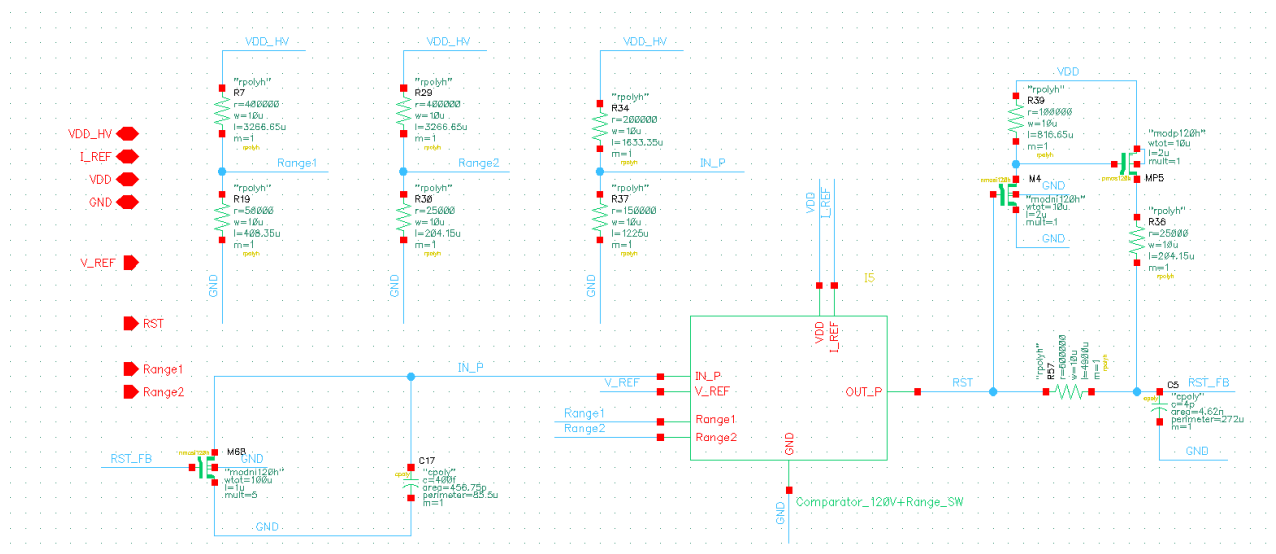


Priedas A8. Vidinis impulsų generatorius

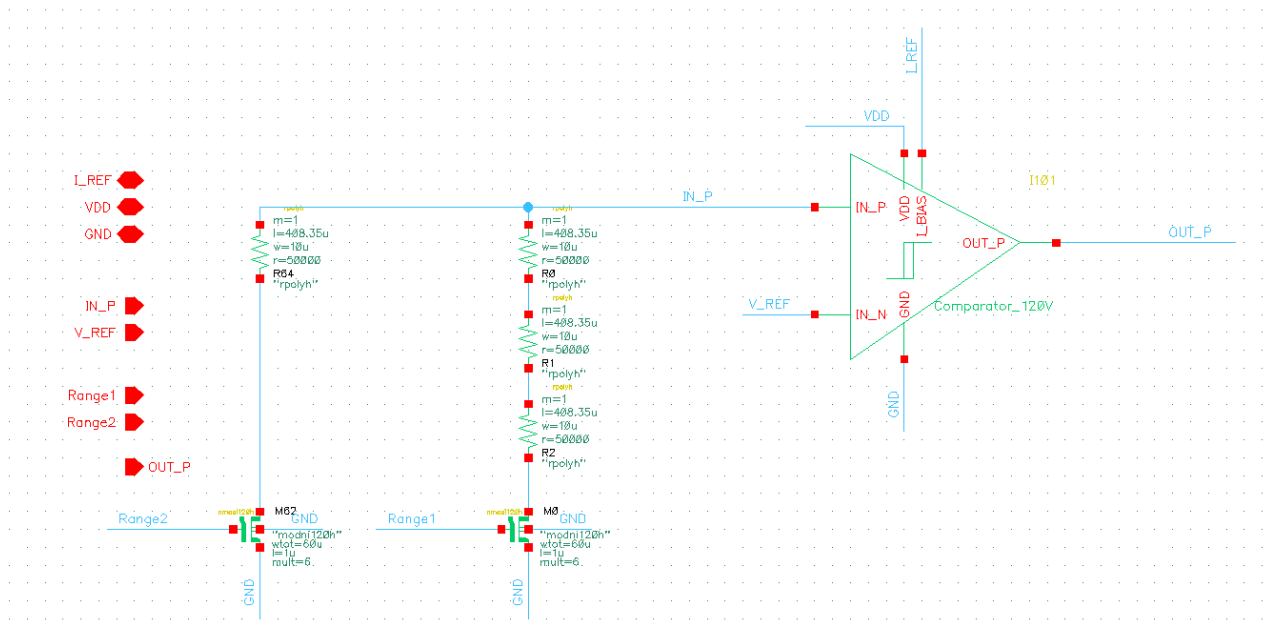
Priedas A8.1. Vidinio impulsų generatoriaus simbolis



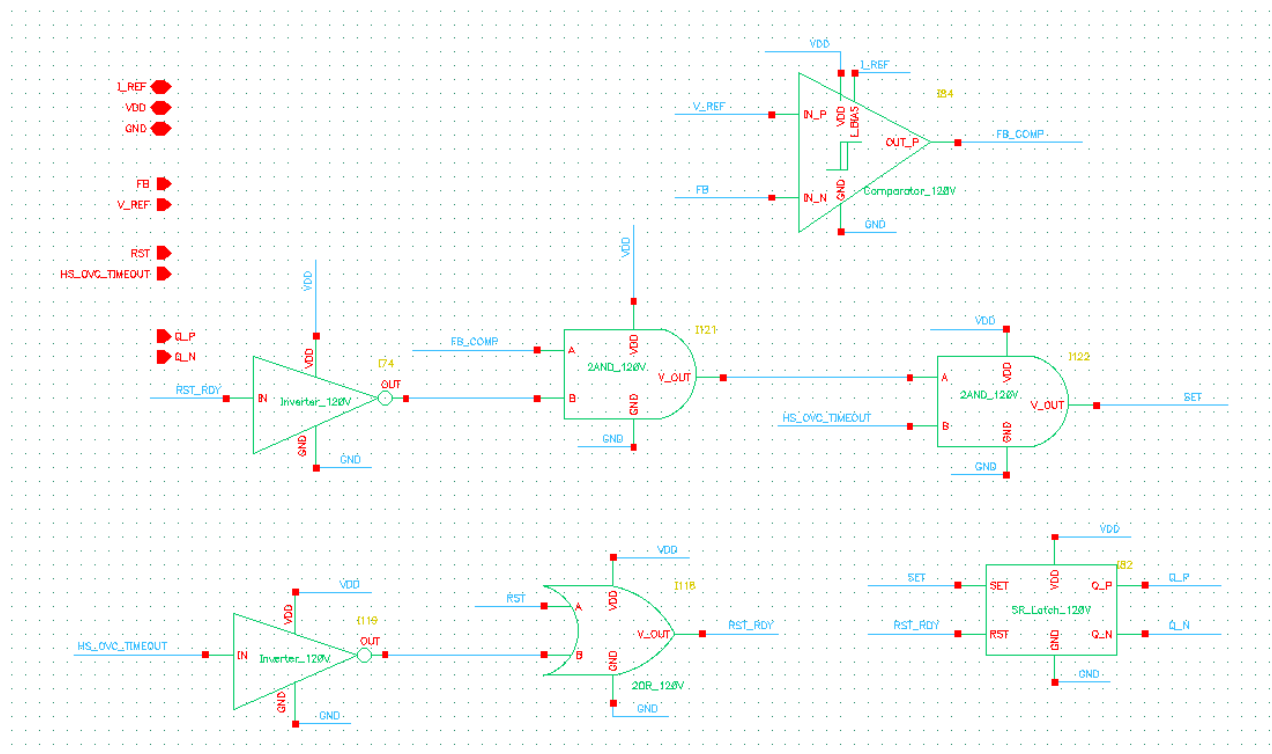
Priedas A8.2. Vidinio impulsų generatoriaus elektrinė principinė schema



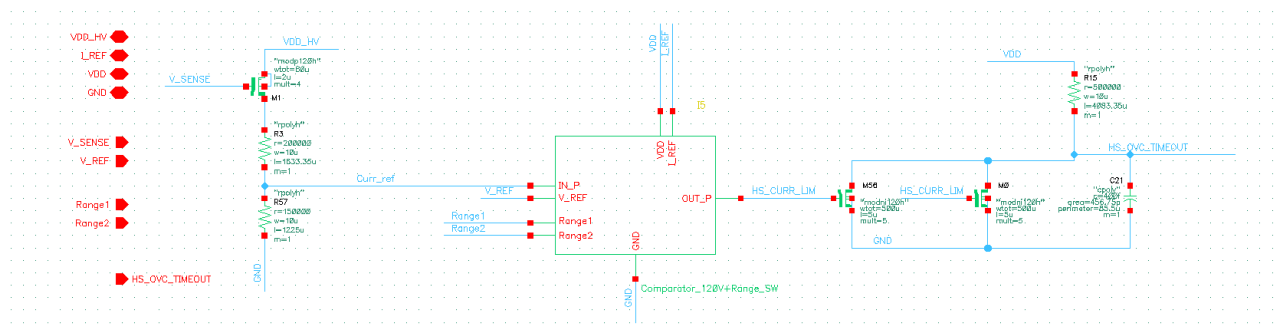
Priedas A8.3. Komparatoriaus su įėjimo įtampos daliklio koeficiento keitikliu elektrinė principinė schema



Priedas A9. Loginio sistemos valdymo bloko principinė elektrinė schema

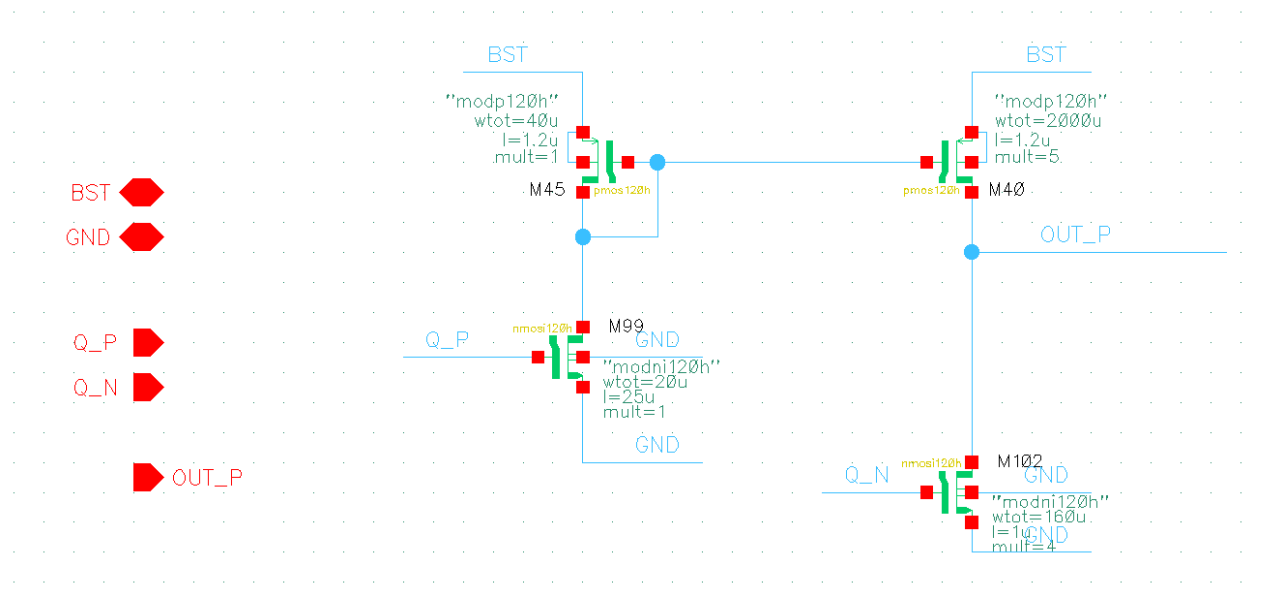


Priedas A10. Išėjimo srovės ribojimo bloko principinė elektrinė schema

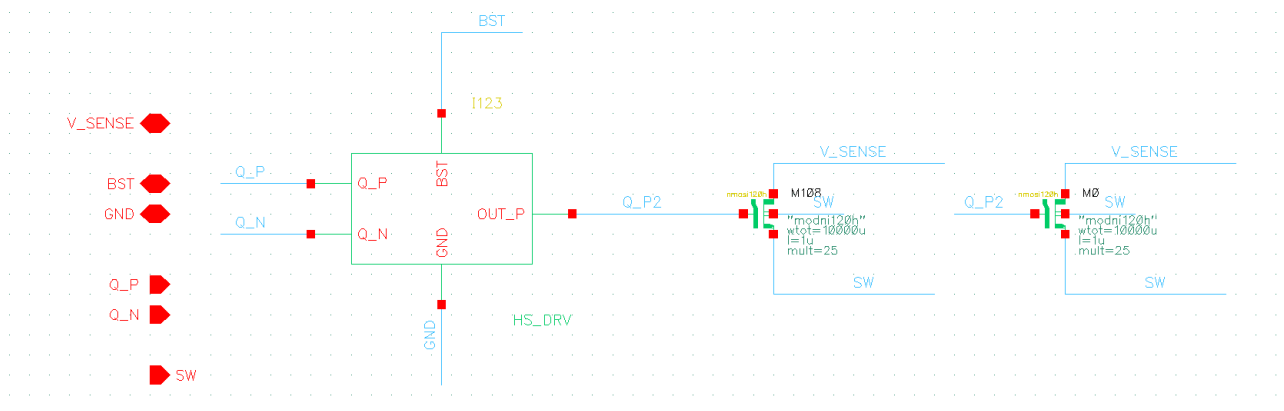


Priedas A11. Išėjimo įtampos impulsų generatoriaus principinė elektrinė schema

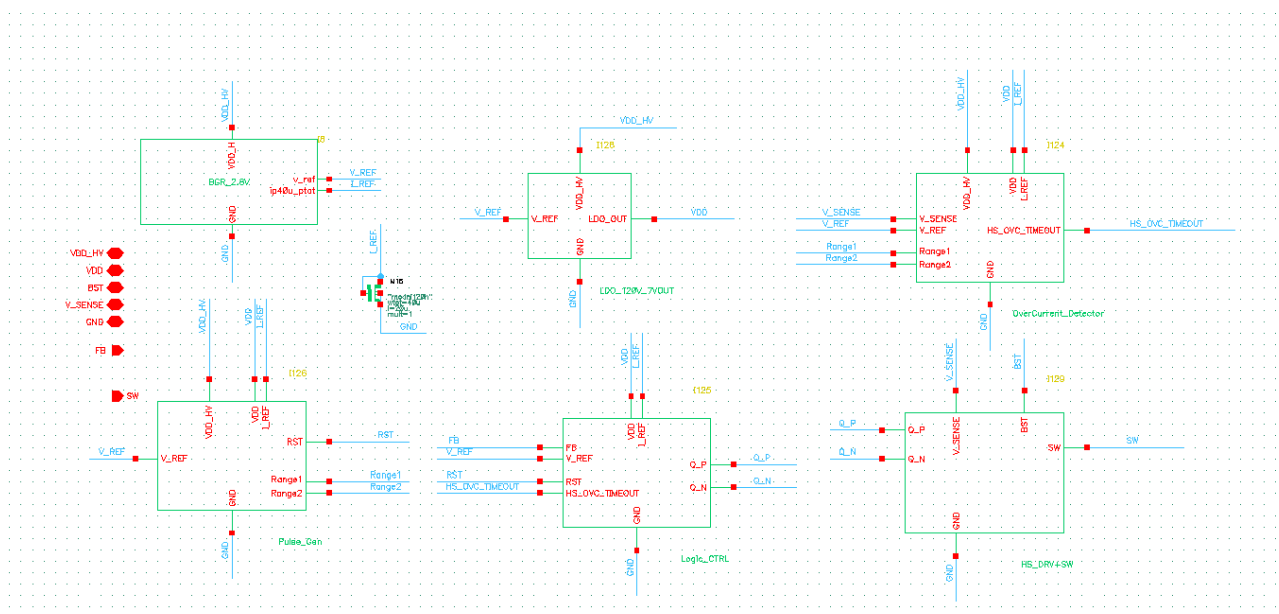
Priedas A11.1. Išėjimo įtampos impulsų valdiklio principinė elektrinė schema



Priedas A11.2. Išėjimo įtampos impulsų valdiklio ir išėjimo signalą generuojančio tranzistoriaus principinė elektrinė schema



Priedas A12. Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio principinė elektrinė schema



Priedas A13. Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio išėjimo įtampos svyravimas

Priedas A13.1. Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio išėjimo įtampos maksimumai

	I _{OUT} = 50 mA	I _{OUT} = 500 mA	I _{OUT} = 1000 mA
U _{IN} = 12 V, U _{OUT} = 3 V	3,0567	3,0899	3,0737
U _{IN} = 48 V, U _{OUT} = 3 V	3,1619	3,1276	3,0575
U _{IN} = 120 V, U _{OUT} = 3 V	3,2707	3,1755	3,1129
U _{IN} = 12 V, U _{OUT} = 6 V	6,0919	6,0465	6,0846
U _{IN} = 48 V, U _{OUT} = 6 V	6,0953	6,0847	6,1176
U _{IN} = 120 V, U _{OUT} = 6 V	6,1871	6,1051	6,1274

Priedas A13.2. Impulsinio įtampą žeminančio keitiklio išėjimo įtampos minimumai

	I _{OUT} = 50 mA	I _{OUT} = 500 mA	I _{OUT} = 1000 mA
U _{IN} = 12 V, U _{OUT} = 3 V	2,9887	2,9592	2,9242
U _{IN} = 48 V, U _{OUT} = 3 V	2,9913	2,9612	2,9391
U _{IN} = 120 V, U _{OUT} = 3 V	2,9859	2,9572	2,9308
U _{IN} = 12 V, U _{OUT} = 6 V	5,9482	5,9497	5,9201
U _{IN} = 48 V, U _{OUT} = 6 V	5,9804	5,9445	5,9133
U _{IN} = 120 V, U _{OUT} = 6 V	5,9797	5,9352	5,9012