KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Gražvydas Selvenis

APŠVIETIMO ŠVIESOS DIODŲ AUKŠTO DAŽNIO IMPULSINIŲ MAITINIMO ŠALTINIŲ TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas
Prof. dr. Alvydas Dosinas

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

APŠVIETIMO ŠVIESOS DIODŲ AUKŠTO DAŽNIO IMPULSINIŲ MAITINIMO ŠALTINIŲ TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Elektros energetikos inžinerija (621H63003)

Vadovas
Prof. dr. Alvydas Dosinas
2017-05-31

Recenzentas
Doc. dr. Mindaugas Vaitkūnas

Projektą atliko
Gražvydas Selvenis
2017-05-31

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Gražvydas Selvenis

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos inžinerija (621H63003)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo magistro darbo „Apšvietimo šviesos diodų aukšto dažnio impulsinių maitinimo šaltinių tyrimas“

AKADEMINIO SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. gegužės 31 d.

Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Gražvydo Selvenio** baigiamasis magistro darbas tema „Apšvietimo šviesos diodų aukšto dažnio impulsinių maitinimo šaltinių tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka) *(parašas)*

Selvenis, Gražvydas. Apšvietimo šviesos diodų aukšto dažnio impulsinių maitinimo šaltinių tyrimas. *Elektros energetikos inžinerijos magistro* baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Alvydas Dosinas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Elektros ir elektronikos inžinerija, Technologiniai mokslai.

Reikšminiai žodžiai: *impulsiniai maitinimo šaltiniai, šviesos diodų šviestuvas, šviestuvo maitinimo šaltinis*.

Kaunas, 2017. 56 p.

SANTRAUKA

Šiame darbe apžvelgiami impulsinių keitiklių tipai, jų privalumai ir trūkumai, atliekami tyrimai su sukurtais maitinimo šaltiniais ir elektronikos gamintojų parduodamomis bandyminėmis plokštėmis.

Tyrimai atlikti su aukšto dažnio įtampą aukštinančiais (angl. *Boost*) maitinimo šaltiniais. Šio tipo šaltiniai pasirinkti dėl didesnio jų veikimo dažnio nei kitų tipų šaltinių naudojamų praktikoje. Tai leidžia geriau įvertinti maitinimo šaltinio veikimo dažnio įtaką šaltinio parametrams ir nustatyti problemas, atsirandančias kuriant impulsinius maitinimo šaltinius.

Aukšto veikimo dažnio impulsiniai maitinimo šaltiniai pasižymi mažais gabaritais ir mažu svoriu, dėl naudojamų mažesnių komponentų. Didėjant veikimo dažniui kaupti reikalingas energijos kiekis mažėja, todėl reikalinga mažesnio induktyvumo schemoje naudojama ritė ir mažesnės talpos kondensatoriai. Impulsinių maitinimo šaltinių efektyvumas siekia 80-95 %, tačiau didėjant veikimo dažniui, naudingumo koeficientas mažėja, tai viena iš problemų, kuri sprendžiama tobulinant valdiklius, tranzistorius ir kitus puslaidininkius elementus. Kuriant impulsinius maitinimo šaltinius, svarbu įvertinti ir juos sudarančių elementų kaitimą bei numatyti jų aušinimo galimybes. Projektuojant maitinimo šaltinio plokštę projektuojami didesni aušinimo plotai, didesnis kiaurymių skaičius ir plokštės sluoksnių skaičius. Svarbu atsižvelgti į tai, kad tokie plokštės patobulinimai nesudarytų sąlygų padidėti maitinimo šaltinio generuojamiems elektromagnetiniams trukdžiams. Elektromagnetiniai trukdžiai yra viena iš didžiausių sutinkamų problemų kuriant aukšto dažnio impulsinius maitinimo šaltinius. Trukdžių susidarymo galimybių mažinimas prasideda planuojant ir projektuojant šaltinio plokštę. Svarbu parinkti tinkamus šaltinį sudarančius komponentus, įvertinti jų parametrus ir išdėstymą plokštėje. Taip pat trukdžių mažinimui naudojami įvairūs slopintuvai. Šios ir kitos impulsinių maitinimo šaltinių problemos buvo tiriamos darbo eigoje.

Impulsiniai maitinimo šaltiniai plačiai naudojami praktikoje ir yra sparčiai tobulinami, todėl svarbu tirti problemas atsirandančias kuriant maitinimo šaltinius ir nustatyti jų galimus sprendimo būdus.

Selvenis, Gražvydas. Investigation of High Frequency Switching Power Supplies for LED Lighting: *Master's* thesis in *Electrical Power Engineering* / supervisor prof. dr. Alvydas Dosinas. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electrical Energy Systems.

Research area and field: Electrical and Electronics Engineering, Technological Sciences.

Key words: switching power supplies, DC-DC converters, LED luminaire, high frequency.

Kaunas, 2017. 56 p.

SUMMARY

This paper reviews the types of switching power converters, their advantages and disadvantages. Some researches were made with developed power supplies and other manufacturers created samples.

Researches were done with high frequency boost converters. This type of converter was selected because usually it is working with higher frequency than other converters. This allows for a better assessment of high frequency influence for power supply and its parameters also to determine issues arising from the development of switching power supply.

The high frequency switching power supplies feature small size and low weight due to the use of smaller components. When operating frequency is increased required amount of energy stored in components decreases, so smaller coil and smaller capacitors can be used. Efficiency of switching power supply can be around 80-95 %. When operating frequency is increased the efficiency of switching power supply decreases. It is one of the issues which can be solved with development of better ICs, transistors and other semiconductor components. When the power supply is being created it is important to evaluate heating of circuit elements, and provide their cooling with bigger area of copper plates, greater number of vias and printed circuit board with more layers. It is important to take into account the fact that these improvements can cause greater electromagnetic interference. Electromagnetic interference is one of the biggest problems occurring in the development of high frequency switching power supplies. Reduction of electromagnetic interference begins in the planning and design of the power supply. It is important to choose the right components, to evaluate their options and the layout of the printed circuit board. Also for electromagnetic interference reduction snubber circuits are used. These and other problems of power supplies were examined in the course of work.

Switching power supplies are widely used in practice and has developed rapidly, so it is important to investigate the problems arising from the development of these power supplies and identify possible solutions of related problems.

TURINYS

SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS 7
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS 8
LENTELIŲ SĄRAŠAS 10
ĮVADAS 11
1. KEITIKLIŲ TIPAI 13
1.1 Įtampą žeminantys, aukštinantys-žeminantys ir kiti keitikliai 13
1.2 Įtampą aukštinantys keitikliai 15
2. AUKŠTO DAŽNIO MAITINIMO ŠALTINIAI 18
2.1 Signalų kokybė 18
2.2 Tranzistoriaus perjungimo ir kiti nuostoliai 19
2.3 Elektromagnetiniai trukdžiai 21
2.4 Maitinimo šaltinių įėjimo ir išėjimo parametrų pulsacijos 23
3. ĮTAMPĄ AUKŠTINANČIŲ MATINIMO ŠALTINIŲ PERJUNGIMO TRUKDŽIAI IR JŲ MAŽINIMAS 25
3.1 Perjungimo impulsų trukdžių slopintuvas 25
3.2 Perjungimo impulsų trukdžių slopintuvo komponentų parametrų apskaičiavimo metodika 27
3.3 Trukdžių slopintuvo tyrimams pasirinkti maitinimo šaltiniai 29
3.4 Tranzistoriaus perjungimo impulsų trukdžių eksperimentinis tyrimas 31
3.5 Perjungimų trukdžių slopintuvo parametrų optimizavimas 34
3.6 Trukdžių slopintuvo tyrimų rezultatų palyginimas 39
4. MAITINIMO ŠALTINIŲ ELEKTROMAGNETINIŲ TRUKDŽIŲ EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI 41
4.1 Maitinimo šaltinių spinduliuojamų elektromagnetinių trukdžių tyrimai 41
4.2 Maitinimo šaltinių laiduose generuojami trukdžiai 45
5. DAŽNIO ĮTAKOS ĮTAMPĄ AUKŠTINANČIO MAITINIMO ŠALTINIO PARAMETRAMS TYRIMAS 47
5.1 Maitinimo šaltinio kompiuterinis modeliavimas keičiant veikimo dažnį 47
5.2 Maitinimo šaltinio eksperimentinis tyrimas keičiant veikimo dažnį 49
5.3 Dažnio įtakos maitinimo šaltinio parametrams tyrimų rezultatų palyginimas 50
IŠVADOS 54
LITERATŪROS SĄRAŠAS 55

SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS

IC (angl. *Integrated Circuit*) – integruota grandinė, elektros grandinė suformuota mažame puslaidininkio korpuse – valdiklis.

EMI (angl. E*lectromagnetic Interference*) – elektromagnetiniai trukdžiai.

EMC (angl. *Electromagnetic Compatibility*) – elektromagnetins suderinamumas, įtaiso gebėjimas nereaguoti į kitų prietaisų skleidžiamus trukdžius.

RMS (angl. *Root Mean Square*) – kvadratinis vidurkis.

ESR (angl. *Equivalent Series Resistance*) – ekvivalentinė nuoseklioji varža, kondensatorių ir ričių parametras.

CISPR (pranc. *Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques*) – specialusis tarptaurtinis radijo trukdžių komitetas.

RF (angl. *Radio Frequency*) – radijo dažnis.

DCR (angl. *Direct Current Resistance*) – nuolatinės srovės varža, ritės parametras.

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1.1 pav. Įtampą žeminantis keitiklis [1] 13
1.1.2 pav. Įtampą aukštinantis-žeminantis (*Cuk*) keitiklis [1] 14
1.1.3 pav. Įtampą žeminantis-aukštinantis keitiklis [1] 14
1.1.4 pav. *SEPIC* keitiklis [1] 15
1.2.1 pav. Įtampą aukštinantis keitiklis [1] 16
2.2.1 pav. Tranzistoriaus perjungimo grafikai [4] 20
2.3.1 pav. Idealus ir praktinis tranzistoriaus perjungimas [4] 22
3.1.1 pav. Supaprastinta įtampą aukštinančio maitinimo šaltinio principinė schema ir jos vaizduojami parazitiniai parametrai [14] 25
3.1.2 pav. Slopstantys trukdžiai tranzistorinio jungiklio perjungimo metu [14] 26
3.3.1 pav. Supaprastinta principinė tiriamų A ir B maitinimo šaltinių schema 30
3.3.2 pav. Tiriamų spausdinto montažo plokščių topologijos 30
3.4.1 pav. A maitinimo šaltinio tranzistoriaus perjungimai (kairėje) ir jų trukdžiai (dešinėje) nenaudojant trukdžių slopintuvo 32
3.4.2 pav. A maitinimo šaltinio tranzistoriaus perjungimai ir jų trukdžiai prijungus 1,6 nF kondensatorių 32
3.4.3 pav. B maitinimo šaltinio tranzistoriaus perjungimai (kairėje) ir jų trukdžiai (dešinėje) be trukdžių slopintuvo 33
3.4.4 pav. B maitinimo šaltinio tranzistoriaus perjungimai ir jų trukdžiai prijungus 1,6 nF kondensatorių 33
3.5.1 pav. A maitinimo šaltinio tranzistoriaus perjungimai ir jų trukdžiai prijungus trukdžių slopintuvą su 1,6 nF kondensatoriumi ir 4 Ω varža 36
3.5.2 pav. A maitinimo šaltinio tranzistoriaus perjungimai ir jų trukdžiai prijungus trukdžių slopintuvą su 1,6 nF kondensatoriumi ir 2 Ω varža 36
3.5.3 pav. A maitinimo šaltinio tranzistoriaus perjungimai ir jų trukdžiai prijungus trukdžių slopintuvą su 2 nF kondensatoriumi ir 2 Ω varža 37
3.5.4 pav. B maitinimo šaltinio tranzistoriaus perjungimai ir jų trukdžiai prijungus trukdžių slopintuvą su 2 nF kondensatoriumi ir 2 Ω varža 37
3.5.5 pav. A maitinimo šaltinio išėjimo įtampa ir jos virpesiai be trukdžių slopintuvo – kairėje ir prijungus trukdžių slopintuvą su 2 nF kondensatoriumi ir 2 Ω varža – dešinėje 38
3.5.6 pav. B maitinimo šaltinio išėjimo įtampa ir jos virpesiai be trukdžių slopintuvo – kairėje ir prijungus trukdžių slopintuvą su 2 nF kondensatoriumi ir 2 Ω varža – dešinėje. 38

4.1.1 pav. „Frankonia“ *GTEM-1000* elektromagnetinių trukdžių tyrimo kamera 41
4.1.2 pav. Pirminio maitinimo šaltinio „TEC M7“ elektromagnetiniai trukdžiai 42
4.1.3 pav. Maitinimo šaltinių paruošimas elektromagnetinių trukdžių tyrimams 42
4.1.4 pav. A (kairėje) ir B (dešinėje) maitinimo šaltinių elektromagnetiniai trukdžiai.....43
4.1.5 pav. A ir B maitinimo šaltinių elektromagnetiniai trukdžiai 500 kHz-1 GHz 44
4.1.6 pav. A ir B maitinimo šaltinių įžeminimo plotai 45
4.2.1 pav. Maitinimo šaltinio įjungimo (kairėje) ir išjungimo (dešinėje) srovės grafikai 46
5.1.1 pav. Principinė *TPS55340EVM-017* kompiuterinio modeliavimo schema 48
5.1.2 pav. *TPS55340EVM-017* kompiuterinio modeliavimo temperatūrinis vaizdas 48
5.2.1 pav. *TPS55340EVM-017* maitinimo šaltinio topologija [18] 49
5.2.2 pav. *TPS55340EVM-017* vaizdai termovizoriuje, keičiant dažnį, 350 kHz, 600 kHz, 900 kHz ir 1200 kHz 50
5.3.1 pav. *TPS55340EVM-017* kompiuterinio modeliavimo ir eksperimentinio tyrimo efektyvumo rezultatai 52
5.3.2 pav. Didžiausios *TPS55340EVM-017* temperatūros keičiant veikimo dažnį 52

LENTELIŲ SĄRAŠAS

3.4.1 lentelė. Trukdžių slopintuvų kondensatorių parinkimo matavimų rezultatai 34
3.6.1 lentelė. Trukdžių slopintuvo tyrimų rezultatai 40
5.3.1 lentelė. *TPS55340* kompiuterinio modeliavimo ir eksperimentinių tyrimų rezulatai 51

ĮVADAS

Nuolatinės įtampos keitikliai naudojami daugelyje sričių, pavyzdžiui, biuro įranga, erdvėlaivių galios sistemos, nešiojami ir stacionarūs kompiuteriai, telekomunikacijų įranga, laboratorijų įranga ir kt. Šie keitikliai plačiai naudojami ir apšvietimo srityje.

Apšvietimo šviesos diodų maitinimo šaltinių išėjimo įtampa ir srovė turi būti stabilios ir be pulsacijų, nes pulsacijos gali sukelti šviesos mirgėjimus. Todėl šviesos diodų maitinimo šaltiniams keliami aukšti išėjimo parametrų kokybės reikalavimai. Šviesos diodų šviestuvų maitinimo šaltiniai dažniau kuriami naudojant įtampą žeminančius keitiklius, tačiau įtampą aukštinantys maitinimo šaltiniai plačiai naudojami autotransporte (hibridiniai automobiliai, elektromobiliai), saulės elementų sistemose, architektūriniame apšvietime, biuruose, kelių ženklinimui ir apšvietimui, pritaikoma buityje. Taip pat naudojami mažos įtampos šaltinių įtampą kelti iki reikiamos vertės, todėl dažniausiai naudojami nešiojamų įtaisų maitinimui. Įtampą aukštinantys keitikliai paprastai veikia didesniu dažniu negu kitų tipų keitikliai. Jie leidžia išnaudoti baterijų energiją ir sumažinti naudojamų baterijų skaičių – sumažinti įtaisų matmenis ir svorį.

Pagrindinis impulsinių maitinimo šaltinių elementas – tranzistorius. Tranzistoriaus veikimas lemia viso keitiklio patikimumą ir efektyvumą. Viena iš pagrindinių problemų sukeliančių galios nuostolius ir elektromagnetinius trukdžius impulsiniuose maitinimo šaltiniuose yra tranzistoriaus perjungimo trukdžių atsiradimas ritės, diodo ir tranzistoriaus mazge. Šiuos trukdžius sukelia parazitinės talpos ir induktyvumai minėtame mazge. Trukdžiai pastebimi perjungimo signale, kai yra įjungiamas ir išjungiamas tranzistorius, matomas slopstančių virpesių pavidalo pereinamasis procesas (angl. *ringing*). Šie virpesiai sukelia elektromagnetinius trukdžius, veikiančius aplinkinius įtaisus, didina tranzistoriaus kaitimą, taip pat sukelia didelius įtampos šuolius, kurie gali sugadinti patį tranzistorių ir kitus schemos komponentus. Tai ypač svarbu didėjant maitinimo šaltinio dažniui. Tranzistoriaus perjungimo impulsų trukdžių mažinimui yra naudojami virpesių slopintuvai. Tai filtrai, kurie gali būti sudaryti iš nuoseklios kondensatoriaus ir varžos grandinėlės, kartais papildomai naudojami ir diodai. Populiariausi – kondensatoriaus ir varžos slopintuvai, prijungiami prie ritės, diodo, tranzistoriaus mazgo ir įžeminimo.

Aukšto dažnio energijos konversijos maitinimo šaltinių pagrindiniai privalumai – maži matmenys ir mažas svoris, tačiau kuriant šiuos šaltinius susiduriama su tokiomis problemomis kaip mažėjantis maitinimo šaltinio naudingumo koeficientas, generuojamų elektromagnetinių trukdžių slopinimas, efektyvus šilumos nuvedimas.

Darbo tikslas. Apžvelgti aukšto dažnio impulsinių maitinimo šaltinių, skirtų apšvietimo šviesos diodų maitinimui, ypatybes. Ištirti dėl aukšto dažnio įtakos sustiprėjusius trukdžius, atlikti analitinius ir eksperimentinius jų tyrimus bei parinkti optimalius trukdžių slopinimo variantus.

Darbo uždaviniai:

1. Aptarti nuolatinės įtampos šviesos diodų maitinimo šaltinių tipus ir jų taikymo galimybes.
2. Išnagrinėti aukšto dažnio keitiklių privalumus ir trūkumus bei atsirandančias problemas taikant keitiklius.
3. Ištirti aukšto dažnio maitinimo šaltinių trukdžių slopintuvo įtaką tranzistoriaus perjungimo trukdžiams.
4. Atlikti eksperimentinius maitinimo šaltinių tyrimus, nustatyti jų parazitines talpas ir induktyvumus, ir apskaičiuoti bei parinkti optimalų tranzistoriaus perjungimo trukdžių slopintuvą.
5. Atlikti aukšto veikimo dažnio maitinimo šaltinio skleidžiamų elektromagnetinių trukdžių tyrimus ir pasiūlyti jų mažinimo būdus.
6. Ištirti maitinimo šaltinio veikimo dažnio įtaką jo efektyvumui, komponentų šilimui, įėjimo ir išėjimo parametrams.

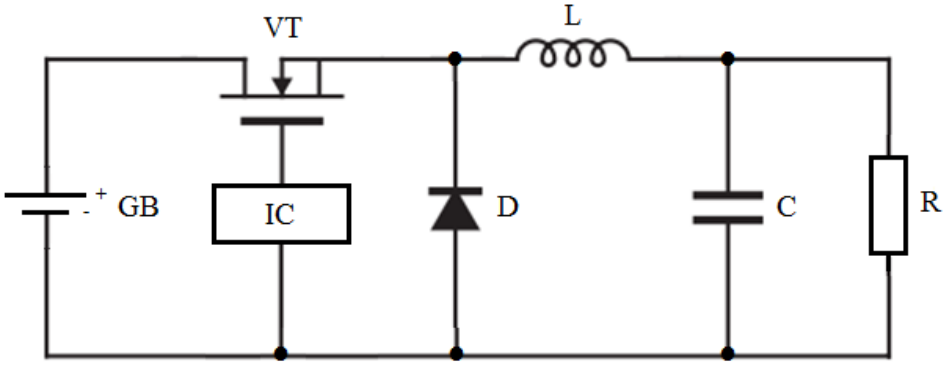
1. KEITIKLIŲ TIPAI

Nuolatinės įtampos impulsiniai keitikliai išpopuliarėjo maždaug 1980-aisiais ir buvo naudojami keisti baterijų įtampą. Šie keitikliai pasižymi didesniu efektyvumu nei linijiniai reguliatoriai. Jie leidžia išnaudoti visą galimą baterijų energiją, mažiau šyla, todėl yra efektyvesni [11].

Nuolatinės įtampos keitikliai – tai įtaisai, kurie įėjimo įtampą keičia į kito reikiamo didumo išėjimo įtampą. Šių keitiklių veikimo pagrindas – išėjimo įtampos arba srovės valdymas, naudojant tranzistorinį jungiklį. Nuolatinę įtampą aukštinančių ar žeminančių keitiklių grandinių galima rasti daug, kaip ir jų panaudojimo sričių, tačiau šiame skyriuje aptariami pagrindiniai schemų tipai. Remiantis keitiklių veikimo režimais, juos galima suskirstyti į tris tipus – įtampą žeminantys (angl. *buck*), įtampą aukštinantys (angl. *boost*) ir įtampą žeminantys-aukštinantys (angl. *buck-boost*), kurie gali būti ir įtampą žeminantys, ir aukštinantys, priklausomai nuo jų valdymo signalų [2].

1.1 Įtampą žeminantys, aukštinantys-žeminantys ir kiti keitikliai

Pagrindinė įtampą žeminančių keitiklių savybė – išėjimo įtampa visada mažesnė už įėjimo įtampą. Tai paprasčiausi impulsiniai keitikliai. Šių keitiklių topologija panaši į įtampą aukštinančių keitiklių, pagrindinis skirtumas – ritės, diodo ir tranzistoriaus vietų schemoje sukeitimas [1, 3]. Supaprastinta principinė įtampą žeminančio keitiklio schema pateikta 1.1.1 paveiksle.

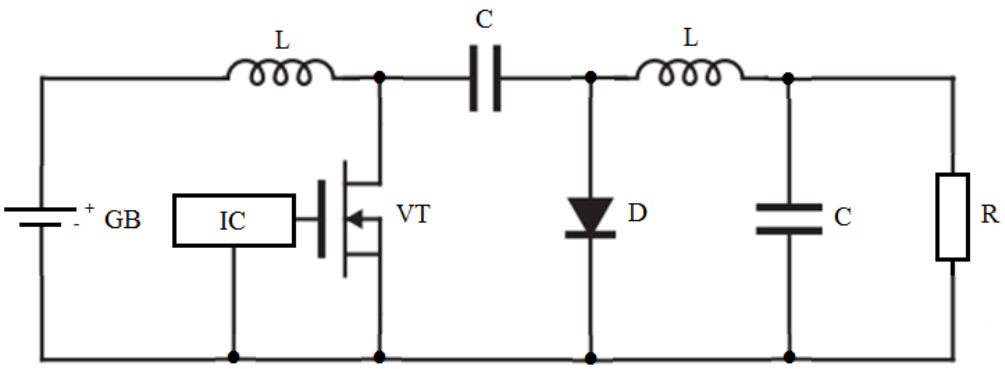


1.1.1 pav. Įtampą žeminantis keitiklis [1]

Šių keitiklių išėjimo įtampa sudaro iki 85 % įėjimo įtampos dėl perjungimo delsos valdymo grandinėje. Įtampą žeminantys keitikliai dažniausiai naudojami šviesos diodams

maitinti žemos įtampos sistemose, nes pasižymi pastovia šviesos diodų srove ir aukštu efektyvumu, galinčiu siekti daugiau kaip 90 %. Esant žemai įėjimo įtampai, įprastas įtampą žeminančių keitiklių veikimo dažnis $f_s = 150\ kHz$ [3].

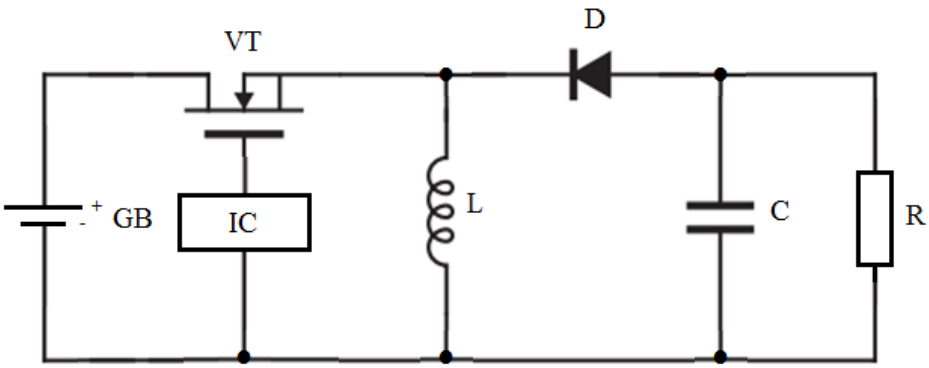
Įtampą aukštinantis-žeminantis keitiklis dar vadinamas *Cuk*, savo savybėmis nesiskiria nuo įtampą žeminančio-aukštinančio keitiklio. Šis keitiklis gali ir didinti, ir mažinti išėjimo įtampą, įėjimo įtampos atžvilgiu. Susideda iš įtampą aukštinančios ir žeminančios grandinių, kurias valdo vienas tranzistorinis jungiklis [3]. Įtampą aukštinančio-žeminančio keitiklio supaprastinta principinė schema pateikta 1.1.2 paveiksle.



1.1.2 pav. Įtampą aukštinantis-žeminantis (*Cuk*) keitiklis [1]

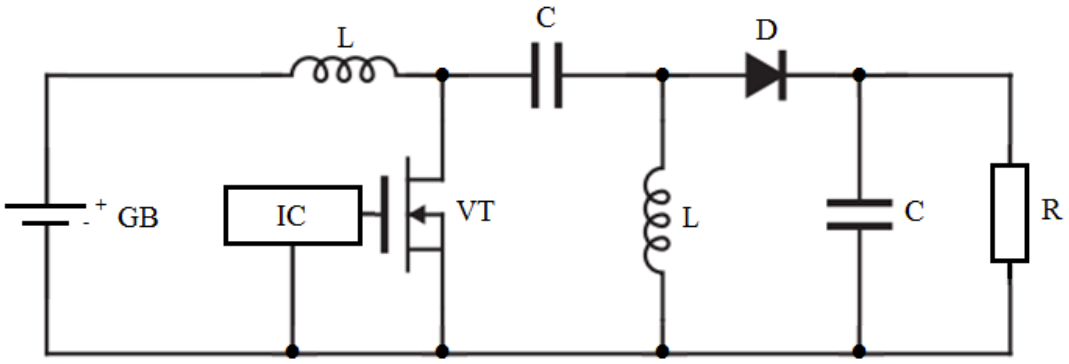
Šie keitikliai nėra paplitę dėl didelių trūkumų: nevaldomų rezonansų, sudėtingo veikimo režimo stabilizavimo. Juos naudojant sunkiau valdyti papildomas funkcijas, pvz., reguliuoti šviesos intensyvumą.

Taip pat naudojama ir įtampą žeminanti-aukštinanti schema, kuri priskiriama *flyback* tipo schemoms, tačiau ji turi tik vienos apvijos ritę, nors įprastose *flyback* schemose naudojami dviejų apvijų ritės. *Flyback* maitinimo šaltinių privalumas – nuo pagrindinio šaltinio izoliuotas apkrovos (pvz. šviesos diodų) maitinimas [3, 20]. Supaprastinta principinė keitiklio schema pateikta 1.1.3 paveiksle.



1.1.3 pav. Įtampą žeminantis-aukštinantis keitiklis [1]

SEPIC keitiklis – tai *Cuk* keitiklio atmaina, kuri gali veikti pastovios įtampos arba pastovios srovės režimu. *SEPIC* keitiklio pagrindas – *boost-buck* topologija. Įtampą aukštinanti schemos dalis atlieka galios faktoriaus korekciją (angl. *Power Factor Correction*), o įtampą žeminanti dalis atlieka įprastą funkciją (*žr.* 1.1.4 paveikslą). Ši topologija pasižymi kompaktiškumu ir efektyvumu [3].



1.1.4 pav. *SEPIC* keitiklis [1]

Nors keitiklių topologijų gausu, tačiau daugumą jų sudaro panašūs pagrindiniai elementai. Paminėtina ir tai, kad šioms schemoms būdinga bent keletas panašių savybių. Galima pastebėti, kad visų šių keitiklių schemų pagrindas – įtampą aukštinantis arba įtampą žeminantis keitiklis.

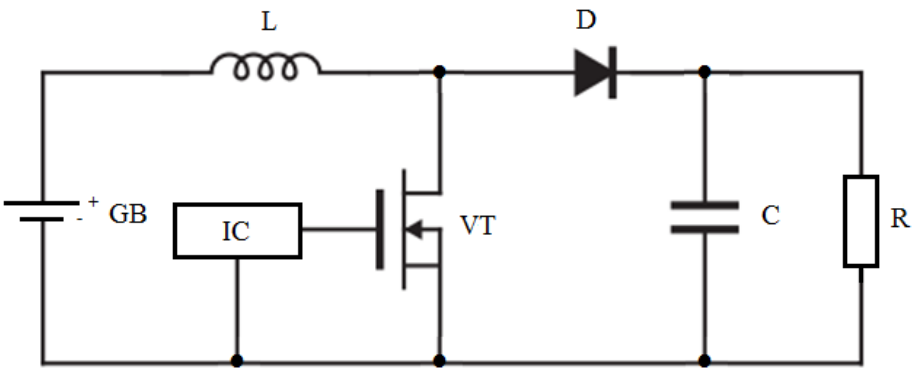
1.2 Įtampą aukštinantys keitikliai

Įtampą aukštinantys keitikliai – tai galios keitikliai, kurių išėjimo įtampa yra didesnė už įėjimo įtampą. Įprastai įtampą aukštinantys keitikliai naudojami, kai mažiausia išėjimo įtampa yra bent 1,5 karto didesnė už įėjimo įtampą [3].

Tai impulsiniai maitinimo šaltiniai, turintys bent du puslaidininkius elementus – diodą ir tranzistorių ir bent vieną energijos kaupimo elementą. Taip pat naudojamas išėjimo kondensatorius, kuris sumažina išėjimo įtampos pulsacijas. Šie keitikliai pasižymi paprastumu ir dideliu efektyvumu, jų schemose nenaudojami transformatoriai, yra gana pigūs ir mažo dydžio. Tačiau jie turi ir trūkumų – išėjimo įtampos pulsacijos ir trumpojo jungimo srovės nevaldymas, t. y. esant išėjimo trumpajam jungimui, valdiklis negali nutraukti trumpojo jungimo srovės [2].

Supaprastinta principinė įtampą aukštinančio keitiklio schema pateikta 1.2.1 paveiksle. Šie keitikliai plačiai taikomi kuro elementų energijos konversijos sistemose, saulės elementų sistemose, skystųjų kristalų ekranų apšvietimui. Taip pat jie gali sudaryti paskirstytos galios

blokus, kur standartinė nuolatinė įtampa yra konvertuojama į reikiamą įtampą, atsižvelgiant į apkrovą ir jos poreikius. Tikimasi, kad ateityje šie šaltiniai padės sumažinti nešiojamų ir signalų apdorojimo įrenginių energijos suvartojimą ir pailgins baterijų tarnavimo laiką [2].



1.2.1 pav. Įtampą aukštinantis keitiklis [1]

Įtampą aukštinančiame keitiklyje įtampa didinama panaudojant ritės savybę priešintis srovės pokyčiams, kuriant ir suardant ritės magnetinį lauką. Kai tranzistorius įjungiamas, sujungiama maitinimo šaltinio GB, ritės L ir tranzistoriaus VT grandinė (*žr.* 1.2.1 paveikslą). Srovė teka pagal laikrodžio rodyklę ir ritėje kaupiama energija magnetinio lauko pavidalu. Pagal valdiklio IC nustatytą režimą tranzistorius atjungiamas, maitinimo šaltinio ir ritės sukaupta energija, per diodą D, perduodama į apkrovą R. Tuo pat metu užkraunamas išėjimo kondensatorius C, kuris vėl įjungus tranzistorių užtikrina energijos tiekimą apkrovai, o diodas D saugo šio kondensatoriaus energijos grįžimą į ritę ar nutekėjimą per tranzistorių. Taigi, ritėje sukaupta energija, įjungus tranzistorių, sumuojama su maitinimo šaltinio energija tarsi du nuosekliai sujungti energijos šaltiniai, kai tranzistorius atjungtas, todėl schemos išėjime gaunama aukštesnė išėjimo įtampa įėjimo įtampos atžvilgiu. Pagrindinis šios schemos mazgas – ritę L, diodą D ir tranzistorių VT jungiantis mazgas. Šiame mazge stebimas tranzistoriaus perjungimas, jo trukdžiai, nustatomos pagrindinės maitinimo šaltinio parazitinių talpų ir induktyvumų vertės [10, 20].

Įtampą aukštinantys keitikliai gali veikti dviem režimais – nepertraukiamojo laidumo režimas (angl. *Continuous Conduction Mode*) ir pertraukiamojo laidumo režimas (angl. *Discontinuous Conduction Mode*). Nepertraukiamojo laidumo režimas turėtų būti naudojamas, kai išėjimo įtampa yra ne daugiau kaip šešis kartus didesnė už įėjimo įtampą. Pertraukiamojo laidumo režimas naudojamas, kai išėjimo įtampa yra daugiau kaip šešis kartus didesnė už įėjimo įtampą. Įtampą aukštinančio keitiklio veikiančio pertraukiamojo laidumo režimu skleidžiami elektromagnetiniai trukdžiai (angl. *Electromagnetic Interference*) yra didesni negu veikiančio

nepertraukiamojo laidumo režimu, esant panašiai išėjimo galiai. Taip pat esant pertraukiamojo laidumo režimui didėja ritės šerdies nuostoliai dėl didelių ritės srovės pikinių verčių. Taigi, pertraukiamojo laidumo režimo keitikliai yra mažiau efektyvūs, sukelia daugiau elektromagnetinių trukdžių problemų ir išėjime gaunamas labiau ribotas galios dydis negu nepertraukiamojo laidumo režimo keitikliuose [3].

Impulsinių keitiklių naudingumo koeficientas, kaip ir keitiklio dydis priklauso nuo valdiklio veikimo dažnio. Kuo dažnis didesnis, tuo keitiklis mažesnis, dėl naudojamų mažesnių komponentų, kurių dydį taip pat lemia veikimo dažnis. Tačiau, dažniui didėjant, šiek tiek mažėja maitinimo šaltinio naudingumo koeficientas. Įprastai įtampą aukštinantys keitikliai veikia nuo keletos šimtų kilohercų iki megahercų eilės dažnių [6, 7].

Šiame darbe pasirinkti tirti įtampą aukštinantys keitikliai dėl jų didesnio veikimo dažnio nei kitų tipų keitiklių, tai leis lengviau stebėti ir tirti keitiklio veikimo dažnio įtaką jo parametrams. Tirti šaltiniai taip pat yra apšvietimo šviesos diodų pastovios srovės maitinimo šaltiniai. Jiems keliami aukšti išėjimo įtampos ir srovės kokybės reikalavimai. Svarbu užtikrinti, kad keitiklio išėjime nėra įtampos ir srovės pulsacijų, kurios gali sukelti šviesos diodų mirgėjimą.

2. AUKŠTO DAŽNIO MAITINIMO ŠALTINIAI

Bėgant laikui, kūrėjai vis didina impulsinių maitinimo šaltinių veikimo dažnį. Šie gali veikti nuo kelių dešimčių kilohercų iki keletos megahercų dažnio ar daugiau.

Įtampą aukštinančių keitiklių dažnis paprastai yra didesnis už įtampą žeminančių. Įprastai naudojami įtampą žeminantys keitikliai, kurių veikimo dažnis siekia 50-200 kHz. Įtampą aukštinantys keitikliai dažnai veikia didesniu kaip 200 kHz dažniu.

Įtampą aukštinantys keitikliai, kaip ir visi impulsiniai maitinimo šaltiniai, pasižymi aukštu naudingumo koeficientu ir mažu dydžiu. Jų dydis ir naudingumo koeficientas priklauso nuo juose naudojamo valdiklio veikimo dažnio. Didėjant veikimo dažniui, keitiklio elementuose reikia kaupti vis mažiau energijos, todėl jie gali būti mažesni ir pigesni. Sumažėja maitinimo šaltinio dydis ir svoris. Tačiau mažėja keitiklio naudingumo koeficientas, susiduriama su efektyvaus šilumos nuvedimo problema, taip pat didėja įtaiso generuojami elektromagnetiniai trukdžiai. Didėjant veikimo dažniui, didėja galios nuostoliai šylant keitiklio elementams. Dėl elementų šilimo gali tekti panaudoti papildomus aušinimo elementus ar naudoti didesnius spausdinto montažo plokštės takelių plotus šilumos nuvedimui, tačiau takelių plotą riboja didėjančių elektromagnetinių trukdžių rizika [11].

Optimalus schemos veikimo dažnis parenkamas atsižvelgiant į įtaiso dydį, naudojamų elementų kainą, galios nuostolius, elektromagnetinius trukdžius, užsibrėžtą efektyvumą ir kitus keitiklio parametrus [11].

2.1 Signalų kokybė

Pagrindinis impulsinių keitiklių signalas yra tranzistoriaus perjungimo signalas (stačiakampiai impulsai). Aukštas dažnis ypač veikia signalų kokybę. Todėl projektuojant maitinimo šaltinio plokštę reikia atkreipti dėmesį į galimus signalų iškraipymus ir stengtis to išvengti [10].

Esant aukštiems dažniams, didesnę įtaką maitinimo šaltinio plokštės signalams daro jos generuojami elektromagnetiniai trukdžiai nei įprasti veiksniai, tokie kaip elementų išdėstymas, takelių varža ir kt. [9]. Parazitiniai trukdžiai prastina valdymo signalų tikslumą ir stabilumą. Kalbant apie plokštės elementų išdėstymą ir takelius galima paminėtį tokį pavyzdį – kiekvienam takelio ilgio milimetrui gali prisidėti apie 1 nH parazitinis induktyvumas, taigi ilgėjant takeliui – didėja ir jo parazitinis induktyvumas. Taip pat didėjant plokštės takelių tankiui, t. y. jų skaičiui

tam tikrame plote, didėja parazitinė talpa. Parazitinė talpa taip pat didėja dėl neteisingai suprojektuotų įžeminimo plotų [9].

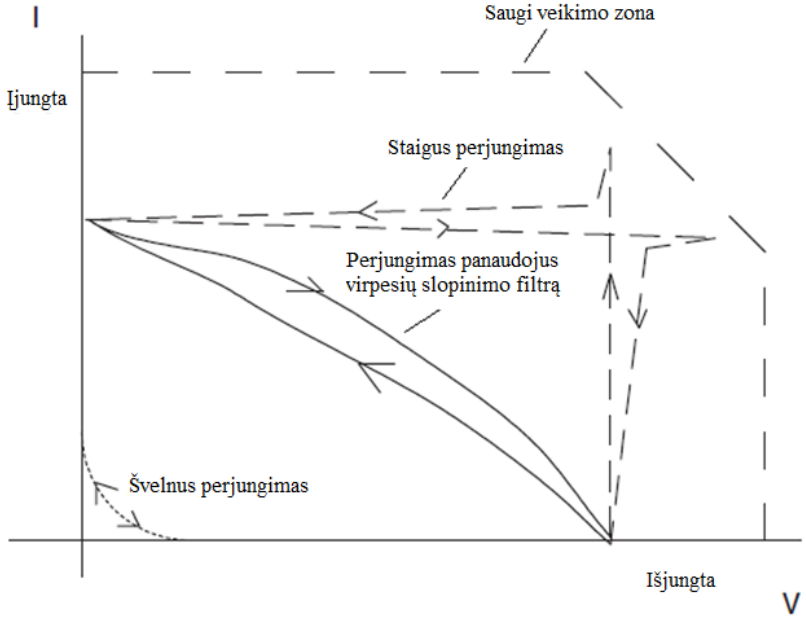
Parazitiniai veiksniai veikia įtaiso parametrų stabilumą. Taigi, projektuojant aukšto dažnio plokštę atsiranda papildomų iššūkių. Keletas neapgalvotų plokštės takelių milimetrų gali turėti didelę įtaką įtaiso veikimo stabilumui, taip pat įtaisas gali generuoti didesnius nei leidžiama trukdžius į aplinką, taip trikdydamas kitų prietaisų, pavyzdžiui, radijo imtuvų veikimą.

2.2 Tranzistoriaus perjungimo ir kiti nuostoliai

Impulsiniuose šaltiniuose naudojamas tranzistorius yra artimas idealiam jungikliui, nes kai tranzsitorius įjungtas, juo teka srovė, o ant jo krenta labai žema įtampa, kai tranzistorius išjungtas – ant jo krenta įtampa, bet juo teka labai maža srovė. Tačiau tranzsitoriaus nuostoliai atsiranda įjungiant ir išjungiant tranzistorių. Šiems nuostoliams sumažinti naudojami virpesių slopintuvai (angl. *snubber*).

Perjungimo tranzistorius gali būti išorinis arba integruotas į valdiklį. Išorinio tranzistoriaus privalumai – galima pasirinkti tam tikras veikimo sąlygas atitinkantį tranzistorių ir lengviau pritaikyti efektyvų tranzistoriaus aušinimą. Tačiau vidinis valdiklio tranzistorius generuoja mažesnius elektromagnetinius trukdžius. To priežastis – trumpesni atstumai tarp valdiklio grandinių ir tranzistoriaus, taip pat trumpėja ir tranzistoriaus valdomų plokštės dalių takelių ilgiai, dėl talpesnio plokštės elementų išdėstymo. Mažėjant tranzistoriaus takelių ilgiui ir plotui, mažėja takelių parazitinė talpa ir parazitiniai induktyvumai.

Bet kuriuo atveju pagrindinė tranzistoriaus šilimo priežastis – perjungimas, dėl kurio atsiranda energijos nuostoliai, be to, tranzistorius patiria perkrovas [5]. Tranzistoriaus įtampos ir srovės grafikai perjungimo metu pateikti 2.2.1 paveiksle. Čia matoma, kad kai tranzistorius įjungiamas švelniai, idealiu atveju ant jo krentanti įtampa mažėja iki minimalios vertės, prie kurios tranzistoriumi ima tekėti srovė ir tik tada srovė didėja, o išjungimo metu – atvirkščiai, srovė sumažėja, tuomet didėja įtampa. Šiuo atveju tranzistoriaus nuostoliai yra minimalūs ir tranzistoriaus neveikia pavojingi įtampų ir srovių šuoliai. Panaudojus tranzistoriaus perjungimo signalo virpesių slopintuvą matoma, kad perjungimo metu mažėjant įtampai iškart didėja srovė ir atvirkščiai, tačiau tokie perjungimai nėra pavojingi tranzistoriui. Kur kas pavojingesni staigūs perjungimai, kai grandinėje nėra virpesių slopintuvo. Šiuo atveju tranzistoriaus išjungimo metu srovė staigiai nutraukiama, tai sukelia staigų įtampos kilimą taip pat ir viršįtampį, kuris gali viršyti tranzistoriaus galimybes – saugią veikimo zoną ir jį sugadinti, kaip ir kitus keitiklio komponentus.



2.2.1 pav. Tranzistoriaus perjungimo grafikai [4]

Taigi, įjungimo ir išjungimo metu, tranzistorius turi atlaikyti stiprius srovės ir įtampos šuolius, kuriuos sušvelnina minėti slopintuvai. Perjungimo signalo virpesių slopintuvai sušvelnina įtampos ir srovės augimą, taip sumažinami perjungimo nuostoliai, trukdžiai ir perkrovos tenkančios tranzistoriui. Virpesių slopintuvas sudaromas iš nuosekliai sujungtų rezistoriaus ir kondensatoriaus, prijungiamų lygiagrečiai tranzistoriui. Slopintuvų skaičiavimai yra sudėtingi ir dažnai reikalauja praktinių eksperimentų ir korekcijų, todėl valdiklių aprašuose dažnai yra nurodomi tam tikri elementų nominalūs parametrai ir patarimai kokiu atveju juos didinti ar mažinti. Taip supaprastėja ir sutrumpėja plokštės projektavimas. Sumažinus tranzistoriaus trukdžius, sumažėja išjungimo metu atsirandantys energijos nuostoliai, todėl padidėja šaltinio efektyvumas [5]. Perjungimo nuostolių mažinimas tuo svarbesnis, kuo dažnesni perjungimai, t. y. kuo didesnis dažnis. Nors dėl virpesių slopintuvo prarandama dalis efektyvumo, šie nuostoliai palyginti nedideli ir nekinta, todėl didėjant keitiklio išėjimo galiai, nuostoliai slopintuve procentiškai mažėja visų nuostolių atžvilgiu. Šiuo metu galima rasti valdiklių, kurie turi integruotus slopintuvus, todėl supaprastėja maitinimo šaltinio plokštės kūrimas ir nuostolių apskaičiavimas [12].

Perjungimo nuostoliai didėja didėjant veikimo dažniui, nes didėja tranzistoriaus persijungimų skaičius per tą patį laiką. Dalis tranzistoriaus nuostolių atsiranda dėl jo persijungimo metu atsirandančių srovės ir įtampos persidengimų, nes tranzistorius negali persijungti akimirksniu ir jam reikia tam tikro laikotarpio. Didžioji persijungimo metu atsirandančių nuostolių dalis tenka tranzistoriaus parazitinių talpų įkrovimui ir iškrovimui. Šiuo

metu siekiama sumažinti tranzistoriaus nuostolius mažinant jo laidumo ir perjungimo nuostolius, mažinant kanalo varžą ir mažinant užtūros bei santakos parazitinę talpą. Nauji tranzistorių tipai leidžia paspartinti jų persijungimą ir mažinti nuostolius.

Nors didesnis keitiklio veikimo dažnis leidžia jame naudoti mažesnio induktyvumo ritę, tačiau šiuo atveju didėja jos nuostoliai. Ritės nuostoliai atsiranda jos šerdyje, dėl magnetinės histerezės. Tai priklauso ir nuo ritės šerdies medžiagos, feritinės šerdies nuostoliai mažesni negu geležies miltelių šerdies [11]. Taip pat svarbu paminėti, kad ekranuotoji ritė yra pranašesnė už neekranuotąją dėl jos savybės arčiau savęs sulaikyti savo generuojamą magnetinį lauką. Tai reiškia, kad ekranuotoji ritė daro mažesnį neigiamą poveikį aplinkiniams elementams. Ekranuotosios ritės galios nuostoliai mažesni, ji turi mažesnį vijų skaičių negu tokio pat induktyvumo neekranuotoji, be to, pasižymi geresnėmis laidumo savybėmis, t. y. mažesne nuolatinės srovės varža (angl. *Direct Current Resistance*) [13].

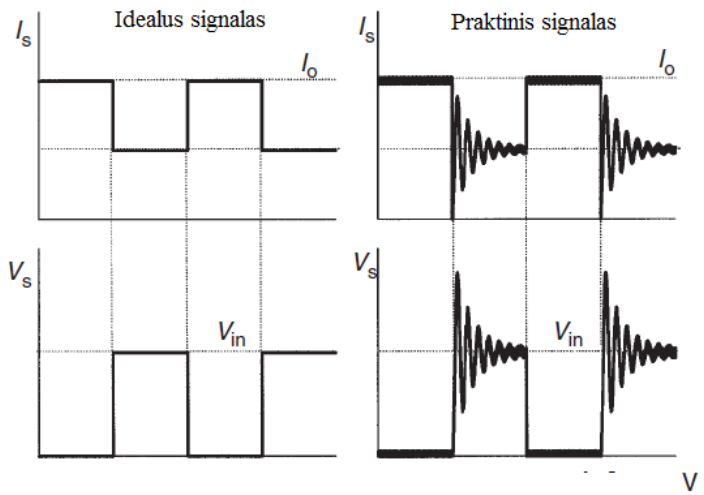
Kitų schemos elementų nuostoliai yra mažesni, bet vykstant pereinamiesiems procesams juos apskaičiuoti gana sudėtinga, tačiau nesunku pastebėti, kad nuostoliai proporcingai didėja didėjant dažniui [11].

Suprantama, kad didėjant maitinimo šaltinio veikimo dažniui, proporcingai didėja ir perjungimo tranzistoriaus bei kitų elementų nuostoliai, o tai riboja maksimalų maitinimo šaltinio veikimo dažnį [4]. Be to, didinant keitiklio veikimo dažnį ir galią, didėja virpesių slopintuvo panaudojimo svarba.

2.3 Elektromagnetiniai trukdžiai

Šiame poskyryje trumpai aprašomi elektromagnetiniai trukdžiai. Nagrinėjant elektromagnetinius trukdžius galima susidurti su *EMC* (angl. *Electromagnetic Compatibility*) terminu, kuris reiškia elektromagnetinį suderinamumą – įtaiso gebėjimą nereaguoti į kitų prietaisų skleidžiamus trukdžius [3].

Maitinimo šaltinio parazitiniai induktyvumai ir parazitinė talpa, vykstant pereinamiesiems procesams, generuoja elektromagnetinius trukdžius. 2.3.1 paveikslas atvaizduoja idealaus perjungimo srovės ir įtampos signalus bei gaunamus tipinius praktinius signalus. Taigi, praktinio signalo pereinamieji virpesiai (angl. *ringing*) ir yra pagrindinė elektromagnetinių trukdžių atsiradimo priežastis.



2.3.1 pav. Idealus ir praktinis tranzistoriaus perjungimas [4]

Padidinus impulsinio keitiklio veikimo dažnį tam tikrą kartų skaičių, jo elektromagnetiniai trukdžiai gali padidėti to skaičiaus kvadratu, t. y. padidinus veikimo dažnį 2 kartus, jo elektromagnetiniai trukdžiai gali padidėti 4 kartus [11]. Elektromagnetiniai trukdžiai generuojami plačioje dažnio juostoje, todėl ne tik trikdo radijo ryšio sistemų veikimą, bet ir gali paveikti kitų įtaisų, pavyzdžiui, matavimo įtaisų (prastesnės kokybės multimetrų) veikimą [3].

Elektromagnetiniai trukdžiai gali būti laisvieji, slopstantieji ir priverstiniai. Laisvieji trukdžiai susidaro idealiose grandinėse, kuriose nėra aktyviosios varžos. Slopstantieji virpesiai, tai virpesiai kurių energija palaipsniui išsklaidoma grandinės aktyviojoje varžoje, o priverstiniai virpesiai – kai virpesių grandinė nuolat papildoma energija, prijungiant kintančią įtampą. Impulsiniuose keitikliuose galima pastebėti slopstančius ir priverstinius trukdžių virpesius, pavydžiui, 2.3.1 paveiksle matomi praktinio tranzistoriaus perjungimo slopstantys virpesiai, kurie kartojasi kiekvieno tranzistoriaus perjungimo metu.

Norint išvengti elektromagnetinių trukdžių, imtis veiksmų reikia jau projektuojant spausdinto montažo plokštes ir išanksto numatyti pagrindinius galimus trukdžių generavimo taškus. Pagrindinis elektromagnetinių trukdžių mazgas – tranzistorinis jungiklis, kurio veikimo dažnis yra aukštas, o jo perjungimo srovės ir įtampos kinta staigiais šuoliais. Kai dažnis aukštas, ritės, kurios buvo numatytos filtruoti kintamus signalus, gali pradėti elgtis kaip talpos, kurios lengvai praleidžia šiuos signalus. Priešingai nei turėtų, gali pradėti elgtis ir elektrolitiniai kondensatoriai [3]. Taigi, labai svarbu atkreipti dėmesį į gamintojo nurodomus komponentų parametrus ir parinkti tinkamus elementus, nustatyti galimus elektromagnetinių trukdžių generavimo mazgus jau pradėjus planuoti maitinimo šaltinį.

Taip pat svarbu tinkamai parinkti virpesių filtrą, įėjimo ir išėjimo kondensatorius, kadangi elektromagnetiniai trukdžiai gali kilti ir maitinimo šaltinio įėjime, ir išėjime dėl ritės pereinamųjų procesų, kurie sukelia įtampos pulsacijas. Pasirinkus netinkamo tipo, ribinės ar mažesnės galimos talpos kondensatorių, idealiai veikiantis keitiklis gali generuoti papildomus elektromagnetinius trukdžius [12].

2.4 Maitinimo šaltinių įėjimo ir išėjimo parametrų pulsacijos

Idealiu atveju įtampą aukštinančio impulsinio maitinimo šaltinio įėjimo įtampos pulsacijų nėra, todėl numatomos tik apytikslės įėjimo įtampos pulsacijos atsirandančios dėl srovės pulsacijų ritėje. Be to, įėjimo įtampos pulsacijos dažniau sutinkamos įtampą žeminančių keitiklių grandinėse, o įtampą aukštinančių keitiklių grandinėse – didesnės išėjimo parametrų pulsacijos.

Įėjimo įtampos pulsacijos dažniau sutinkamos pertraukiamojo laidumo režimo įtampą aukštinančių keitiklių grandinėse. Siekiant sumažinti įtaiso generuojamus elektromagnetinius trukdžius, svarbu atkreipti dėmesį ar įėjimo ir išėjimo kondensatorių talpos yra pakankamos, kad būtų panaikintos nepageidaujamos įtampos pulsacijos [3]. Paprastai keitikliuose naudojamų valdiklių aprašuose yra nurodoma apytikslė rekomenduojama kondensatoriaus talpa, o derinant realią grandinę kondensatorius gali būti keičiamas. Taip pat valdiklių aprašuose pateikiamos formulės, kurios palengvina kondensatoriaus parinkimą. Skaičiuojant įėjimo kondensatoriaus talpą, atsižvelgiama į ritės srovės amplitudę, numatomą ar išmatuotą įėjimo įtampos pulsaciją, keitiklio veikimo dažnį [8]. Kondensatoriaus talpa nėra pagrindinis parametras renkantis šį elementą. Taip pat svarbu atkreipti dėmesį į vidutinę kvadratinę srovę (angl. *Root Mean Square*) ir įtampą. Parametras nusakantis kondensatoriaus kokybę – ekvivalentinė nuoseklioji varža (angl. *Equivalent Series Resistance*), kuo ji mažesnė tuo elementas kokybiškesnis ir mažiau kaista. Impulsinių maitinimo šaltinių įėjimuose ir išėjimuose tinka naudoti keraminius ir tantalo kondensatorius. Renkantis keraminį kondensatorių patariama, kad jo įtampa būtų bent 1,5 karto didesnė už didžiausią numatomą įtampą. Tantalo kondensatoriaus įtampa turėtų būti bent du kartus didesnė už didžiausią numatomą įtampą [12].

Aukšto dažnio grandinių įėjimuose ir išėjimuose rekomenduojama lygiagrečiai pagrindiniam numatytam kondensatoriui jungti keraminį kondensatorių, nepageidaujamų įtampos pulsacijų ir trukdžių filtravimui. Iš praktinių eksperimentų pastebėta, kad keraminiai kondensatoriai geriau slopina trukdžius, be to, dažnai naudojamos jų kombinacijos, pavyzdžiui, nustačius reikiamą keitiklio įėjimo kondensatoriaus talpą, patartina kondensatorių plokštėje talpinti kuo arčiau valdiklio. Jei trukdžiai sumažėja nepakankamai, parinktą kondensatorių

galima atitolinti nuo valdiklio, tačiau reikia papildomai naudoti mažesnio korpuso ir mažesnės talpos kondensatorių ypač arti valdiklio. Tokios keraminių kondensatorių kombinacijos gali ženkliai sumažinti maitinimo šaltinio plokštės elektromagnetinius trukdžius [11, 19].

3. ĮTAMPĄ AUKŠTINANČIŲ MATINIMO ŠALTINIŲ PERJUNGIMO TRUKDŽIAI IR JŲ MAŽINIMAS

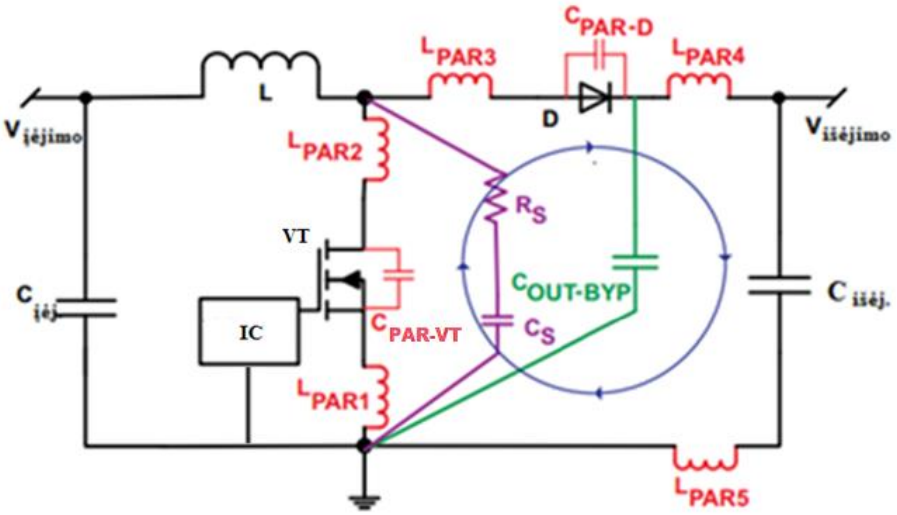
Šiame skyriuje nagrinėjamas nuolatinės įtampos impulsinių maitinimo šaltinių tranzistoriaus perjungimo trukdžių mažinimo būdas panaudojant pasyvinį trukdžių slopintuvą, sudarytą iš kondensatoriaus ir varžos.

3.1 Perjungimo impulsų trukdžių slopintuvas

Impulsinių maitinimo šaltinių veikimo pagrindas yra išėjimo parametrų keitimas, valdant tranzistorinį jungiklį. Tranzistorius yra vienas pagrindinių šių keitiklių komponentų, kuriame ir generuojami elektromagnetiniai trukdžiai.

Tranzistoriuje, lyginant su kitais maitinimo šaltinio komponentais, yra didelė dalis viso maitinimo šaltinio energijos nuostolių. Pagrindinė elektromagnetinių trukdžių, o kartu ir tranzistoriaus nuostolių priežastis yra parazitinė grandinės talpa ir induktyvumas. Parazitiniai maitinimo šaltinio parametrai priklauso ne tik nuo atskirų komponentų parazitinių parametrų, bet ir nuo sulituotos spausdinto montažo plokštės parametrų. Parazitinė maitinimo šaltinio talpa priklauso nuo tranzistoriaus ir diodo parazitinės talpos, taip pat gali kisti ilgėjant arba trumpėjant maitinimo šaltinio spausdinto montažo plokštės takeliams. Plokštės takeliui ilgėjant didėja jo parazitinis induktyvumas, o didėjant takelių tankiui, didėja parazitinė plokštės talpa [1, 5].

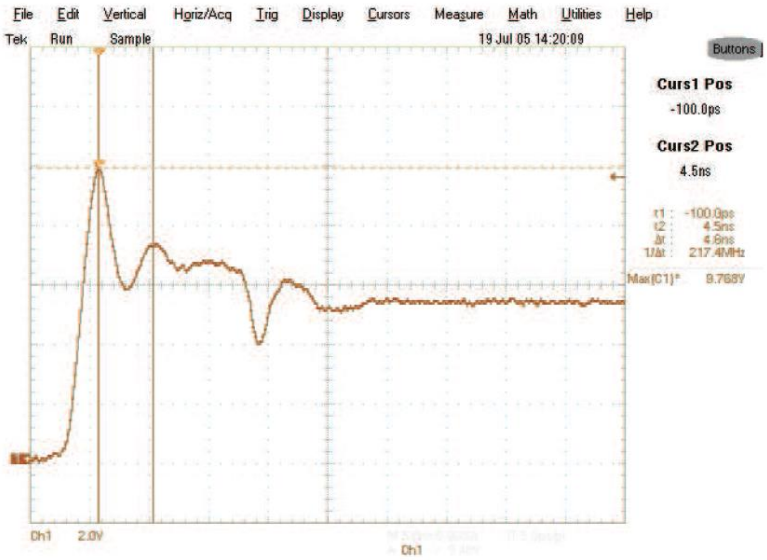
3.1.1 paveiksle pavaizduoti pagrindiniai įtampą aukštinančio šaltinio komponentai ir susidarantys parazitiniai (raudona spalva) parametrai.



3.1.1 pav. Supaprastinta įtampą aukštinančio maitinimo šaltinio principinė schema ir jos vaizduojami parazitiniai parametrai [14]

Šioje schemoje įvertinti parazitiniai parametrai atvaizduoti kaip schemos komponentai: diodo parazitinė talpa C_{PAR-D}, tranzistoriaus parazitinė talpa C_{PAR-VT}, taip pat nuo spausdinto montažo plokštės topologijos priklausantys parazitiniai parametrai: plokštės takelių iš tranzistoriaus ir diodo į perjungimo mazgą parazitiniai induktyvumai L_{PAR2} ir L_{PAR3}, parazitinis induktyvumas tarp tranzistoriaus ir įžeminimo L_{PAR1}, išėjimo teigiamo ir neigiamo polių parazitiniai induktyvumai L_{PAR4} ir L_{PAR5}.

Buvo tiriama trukdžių slopintuvo įtaka tranzistoriaus perjungimo metu atsirandantiems trukdžiams. Tokie triukšmai gali atsirasti, kaip buvo parodyta 2.3.1 paveiksle, vykstant slopstančių virpesių pavidalo pereinamajam procesui. Perjungimo impulsai, valdiklio pagalba yra generuojami ritės *L*, diodo *D* ir tranzistoriaus *VT* (kuris yra integruotas tiriamų plokščių valdiklyje) mazge, dar vadinamame perjungimo mazgu (*žr.* 3.1.1 pav.) Tarp šio mazgo ir tranzistoriaus yra parazitinis induktyvumas L_{PAR2}, o tarp šio mazgo ir diodo yra parazitinis induktyvumas L_{PAR3}. Parazitinės komponentų ir spausdinto montažo plokštės takelių talpos bei induktyvumai šiame mazge gali sukelti 200 MHz ir didesnio dažnio perjungimo impulsų trukdžius. Jei šių trukdžių bendroji įtampos amplitudė yra didesnė už tranzistoriaus gamintojo leidžiamą amplitudę, jie gali pažeisti tranzistorių ir kitus schemos elementus. Taip pat svarbu tai, kad šie perjungimo virpesiai generuoja elektromagnetinius trukdžius, kurie gali paveikti ir aplinkinių įtaisų veikimą. Perjungimo metu impulsuose atsirandančių trukdžių grafikas pateiktas 3.1.2 paveiksle.



3.1.2 pav. Slopstantys trukdžiai tranzistorinio jungiklio perjungimo metu [14]

Šiame darbe buvo tiriami tranzistoriaus išjungimo metu atsirandantys perjungimo impulsų trukdžiai. Tranzistoriaus įjungimo metu ant jo krintanti įtampa staigiai pereina iš aukšto lygio į žemą, o išjungimo metu iš žemo lygio į aukštą. Išjungimo metu atsirandantys perjungimo virpesiai paprastai būna didesni negu įjungimo metu, be to, aukšto įtampos lygio virpesiai yra pavojingesni maitinimo šaltinio komponentams, nes gali viršyti jų ribines leistinas vertes, kai žemo lygio įtampos virpesiai tokio pavojaus nesukelia [14].

Trukdžių slopintuvo veikimas nėra sudėtingas. Naudojamas kondensatorius sumažina įtampos kilimą tranzistoriaus išjungimo metu kaupdamas energiją. Tam kad kito, ateityje įvyksiančio, tranzistoriaus išjungimo metu kondensatorius galėtų vėl kaupti energiją, t. y. mažinti įtampos šuolį ir jos trukdžius, nuosekliai kondensatoriui jungiamas rezistorius, kuris išsklaido kondensatoriaus sukauptą energiją. Šis ciklas kartojasi kiekvieno tranzistoriaus išjungimo metu. Egzistuoja ir kitokių šio slopintuvo atmainų, pavyzdžiui, grąžinantys dalį sukauptos energijos į grandinę [3, 5].

Perjungimo impulsų trukdžius nustatyti gana sudėtinga. Tam reikia aukšto dažnio skiriamosios gebos matavimo įrangos, taip pat svarbu atkreipti dėmesį į įrangos matavimo kabelio talpą, kuri gali iškreipti ar sumažinti realų signalą. Galimi atvejai, kad dėl skaitmeninės matavimo įrangos per mažos dažnio skiriamosios gebos, išmatuota signalo amplitudė gaunama daug mažesnė negu ji yra iš tikrųjų.

Trukdžių slopintuvas C_S ir R_S (*žr.* 3.1.1 pav.) ne tik mažina tranzistoriaus energijos nuostolius, elektromagnetinius trukdžius, bet ir mažina nepageidaujamus įtampos ir srovės šuolius, atsirandančius tranzistoriaus perjungimo metu, kurie gali pažeisti tranzistorių. Šiuo atveju buvo tyrinėtas virpesių slopintuvas, sudarytas iš nuosekliai sujungtų rezistoriaus ir kondensatoriaus, kurie prijungti lygiagrečiai tranzistoriui.

3.2 Perjungimo impulsų trukdžių slopintuvo komponentų parametrų apskaičiavimo metodika

Tranzistoriaus perjungimo impulsų trukdžių slopintuvo skaičiavimams ir jo komponentų parinkimui svarbu žinoti maitinimo šaltinio parazitines talpas ir induktyvumus. Tačiau šiuos parametrus apskaičiuoti ir išmatuoti yra gana sudėtinga. Be to, maitinimo šaltinio parazitiniai parametrai priklauso ne tik nuo schemos plokštės takelių, bet ir nuo ją sudarančių komponentų parazitinių parametrų. Šiame poskyryje suminės parazitinės maitinimo šaltinio plokštės talpos ir induktyvumo nustatymui naudosime netiesioginį metodą.

Šis metodas susideda iš praktinių matavimų ir teorinių skaičiavimų. Pirmiausia išmatuojamas plokštės tranzistoriaus perjungimo impulsų trukdžių pirmo periodo dažnis. Žinant šį dažnį, lygiagrečiai tranzistoriui prijungiamas nedidelės talpos kondensatorius, kurio talpa didinama tol, kol šio trukdžio virpesio dažnis sumažėja per pusę. Nustačius kondensatoriaus talpą, kuri sumažina perjungimo impulso trukdžių dažnį pusiau, galima apskaičiuoti maitinimo šaltinio parazitinę talpą, parazitinį induktyvumą, slopintuve naudojamos varžos nominalo dydį ir galimus trukdžių slopintuvo nuostolius.

Induktyvumo ir talpos grandinėlės rezonansinis dažnis yra atvirkščiai proporcingas induktyvumo ir talpos sandaugos kvadratinei šakniai:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}. \tag{1}$$

Todėl perrašius šią priklausomybę įvedant dažnio sumažėjimą *n* dėl talpos padidėjimo, gaunama tokia išraiška:

$$\frac{f}{n} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot n^2 \cdot C}}. \tag{2}$$

Tuomet parazitinės talpos ryšys su pridėta talpa aprašomas taip:

$$n^2 \cdot C = C + C_{PRIDĖTA}, \tag{3}$$

$$(n^2 - 1) \cdot C = C_{PRIDĖTA}. \tag{4}$$

Pavyzdžiui, tarkime, kad prie tiriamo maitinimo šaltinio tranzistoriaus parazitinės talpos pridėjus $C_{PRIDĖTA}$ = 1 nF talpos kondensatorių, trukdžių dažnis sumažėjo pusiau. Pagal (2) formulę, bendra talpa padidėjo 4 kartus ir tai yra minimali talpa, reikalinga naudoti schemoje perjungimo trukdžių slopintuve. Taigi, parazitinė maitinimo šaltinio talpa randama taip:

$$C_{PAR} = C = \frac{C_{PRIDĖTA}}{n^2 - 1}. \tag{5}$$

Žinant trukdžius sukeliančią parazitinę talpą ir trukdžių dažnį be slopintuvo, galima apskaičiuoti trukdžius sukeliantį parazitinį induktyvumą:

$$L_{PAR} = \frac{1}{C_{PAR} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^2}, \tag{6}$$

čia f – tranzistoriaus perjungimo impulso slopstančių virpesių trukdžio dažnis.

Tranzistoriaus perjungimo trukdžių slopintuvo varža turi būti artima rezonansinei parazitinės *LC* grandinės varžai, kuri randama taip:

$$R_{SNUB} = Z = \sqrt{\frac{L_{PAR}}{C_{PAR}}}. \tag{7}$$

Atliekant eksperimentus, rekomenduojama pradėti matavimus su mažesnio nominalo rezistoriumi negu apskaičiuota, siekiant nustatyti tinkamą rezistoriaus vertę efektyviausiam slopintuvo darbui.

Tranzistoriaus perjungimo trukdžių slopintuvo nuostoliai randami pagal šią formulę:

$$P_{SNUB} = \frac{C_{PRIDĖTA}}{2} \cdot V_{BA}^2 \cdot f_{VALD}, \quad (8)$$

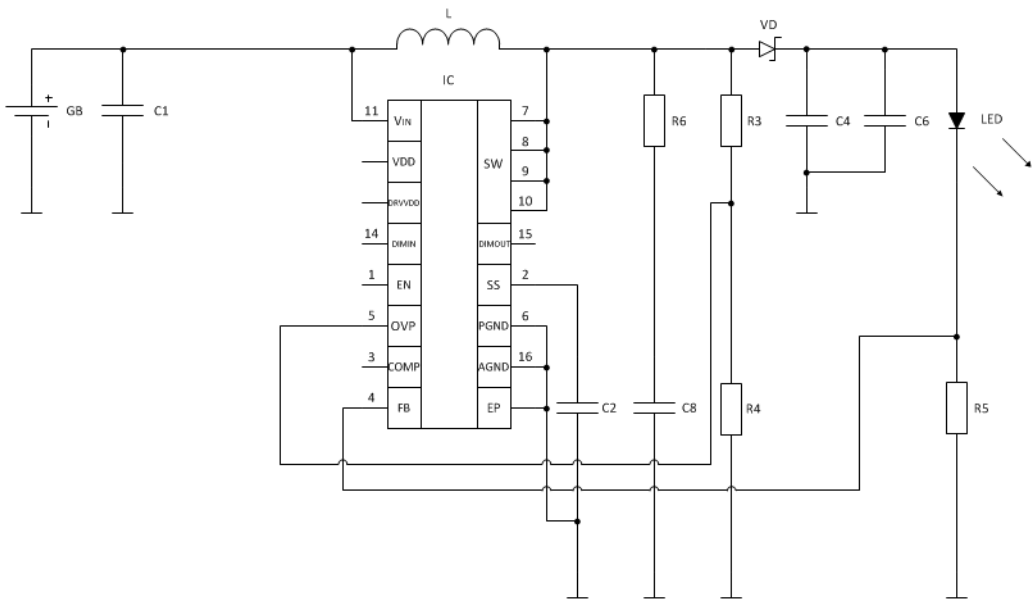
kai f_{VALD} – valdiklio veikimo dažnis, V_{BA} – įtampos amplitudės maksimali vertė, prijungus triukšmų slopintuvą [14,15].

Pagal šiuos skaičiavimus parenkami tranzistoriaus perjungimo trukdžių slopintuvo komponentai. Šiam slopintuvui parenkamas artimiausios talpos kondensatorius, kurio talpa yra nemažesnė už apskaičiuotą minimalią reikalingą talpą, pavyzdžiui, jei apskaičiuota, kad reikalingas 0,9 nF kondensatorius, tai parenkamas 1 nF kondensatorius. Taip pat parenkama slopintuvo varža.

3.3 *Trukdžių slopintuvo tyrimams pasirinkti maitinimo šaltiniai*

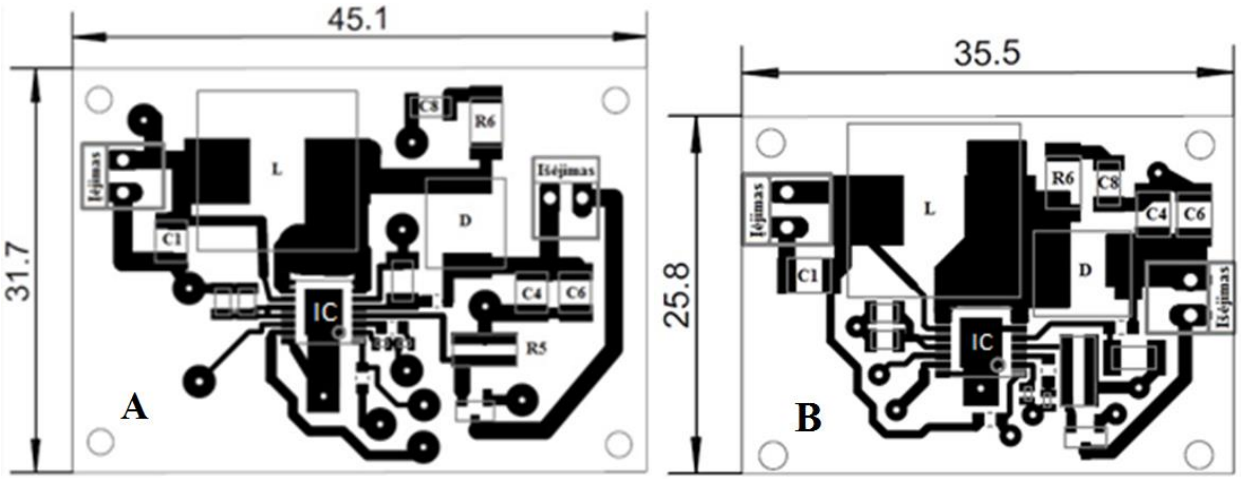
Tyrimams naudotas sukurtas įtampą aukštinantis 1 MHz dažniu veikiantis maitinimo šaltinis, kadangi įtampą aukštinančių maitinimo šaltinių veikimo dažnis yra didesnis už įtampą žeminančių, o didėjant dažniui, didėja tranzistoriaus perjungimo trukdžių, elektromagnetinių trukdžių ir nuostolių padidėjimo rizika. Siekiant įvertinti komponentų išdėstymo ir spausdinto montažo plokštės takelių įtaką maitinimo šaltinio parametrams, tyrimams buvo naudojamos suprojektuotos dvi skirtingų topologijų to paties maitinimo šaltinio spausdinto montažo plokštės, kurių principinė schema ir ją sudarantys elementai yra vienodi.

Maitinimo šaltiniui tiekiama 12 V maitinimo įtampa, o srovė kinta priklausomai nuo keitiklio naudingumo koeficiento ir jo apkrovos (išėjimo parametrų). Tyrimams naudota maitinimo šaltinio apkrova – šviesos diodų šviestuvas. Apkrovai maitinimo šaltinis tiekia 0,73 A srovę ir apie 35 V įtampą. Taigi maitinimo šaltinio naudingumo keoficientas gana aukštas ir siekia apie 85 %. Maitinimo šaltinis suprojektuotas „Microchip“ *MIC3223* valdiklio pagrindu. Tai nedidelės kainos ir gana mažo komponentų skaičiaus schema, nustatyta tiekti apie 26 W galios šviesos diodų šviestuvui. Valdiklis turi švelnaus įjungimo, šviesos intensyvumo valdymo funkcijas, temperatūrinę, išėjimo įtampos viršįtampių, išėjimo srovės viršijimo ir per žemos įėjimo įtampos apsaugas. Supaprastinta principinė maitinimo šaltinio schema pateikta 3.3.1 paveiksle.



3.3.1 pav. Supaprastinta principinė tiriamų A ir B maitinimo šaltinių schema

Realizuojant šį maitinimo šaltinį buvo suprojektuotos dvi spausdinto montažo plokštės – A ir B. Jų principinės schemos ir elementai vienodi, tačiau skiriasi elementų išdėstymas ir plokščių gabaritai. Šių dviejų spausdinto montažo plokščių takelių išdėstymas pateiktas 3.3.2 pav. Čia matomi komponentai R6 – trukdžių slopintuvo rezistorius ir C8 – slopintuvo kondensatorius, kurių nuosekli grandinėlė prijungta lygiagrečiai tranzistoriui. Šiuo atveju tranzistorius yra integruotas valdiklio *IC* korpuse (3.3.2 paveiksle).



3.3.2 pav. Tiriamų spausdinto montažo plokščių topologijos

A maitinimo šaltinis yra didesnių gabaritų (matmenys 3.3.2 paveiksle pateikti milimetrais), jo takeliai yra siauresni ir ilgesni, todėl šio maitinimo šaltinio takelių parazitiniai induktyvumai turėtų būti didesni už B maitinimo šaltinio takelių parazitinius induktyvumus. B

maitinimo šaltinio trukdžių slopintuvo takelis 9 mm trumpesnis negu A maitinimo šaltinyje, taip pat B maitinimo šaltinio diodo *D* takelis trumpesnis 5 mm, o ritė *L* priartinta prie valdiklio 2 mm, taip pat padidintas tranzistoriaus perjungimo mazgo plotas. 10 mm sutrumpintas išėjimo neigiamo poliaus takelis, taip pat 4 mm sutrumpintas išėjimo srovės nustatymo varžos R_5 takelis. B maitinimo šaltinyje suprojektuota daugiau grandinės elementų įžeminimo taškų. B plokštės plotis yra 18,6 % trumpesnis, o ilgis trumpesnis 21,29 %.

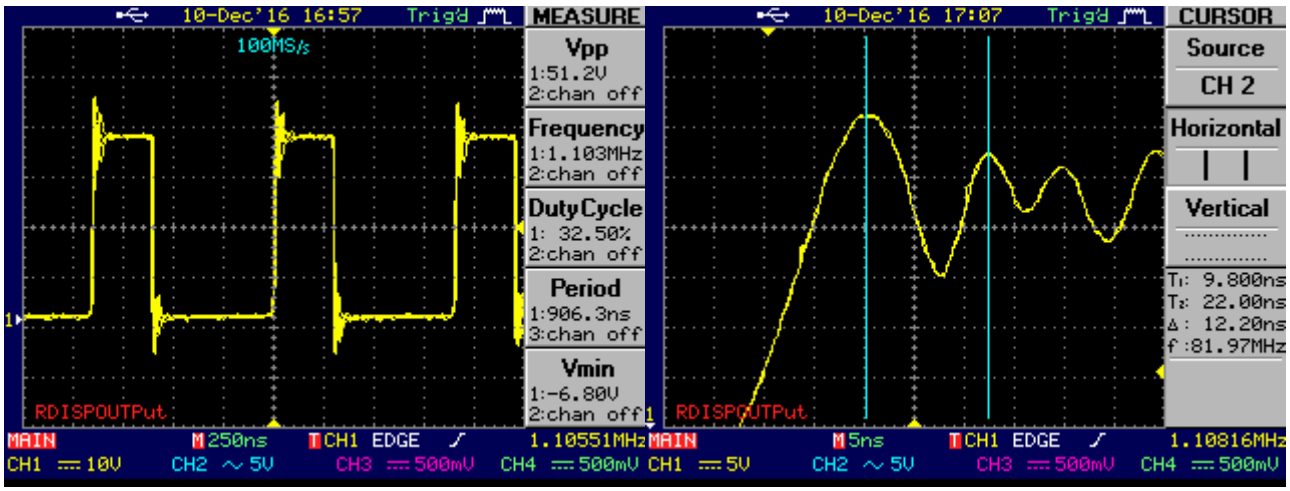
B maitinimo šaltinio gabaritai mažesni, taip pat jo takelių ir komponentų tankis didesnis, todėl tikėtina, kad šio maitinimo šaltinio parazitinės talpos yra didesnės, lyginant su A maitinimo šaltinio parazitinėmis talpomis.

3.4 Tranzistoriaus perjungimo impulsų trukdžių eksperimentinis tyrimas

Šiame poskyryje buvo atliekami eksperimentiniai matavimai, dviejų maitinimo šaltinių plokščių parazitinės talpos ir induktyvumo nustatymui, taip pat perjungimo impulsų trukdžių slopintuvo elementų parametrų apskaičiavimui. Stebimi perjungimo signalo pasikeitimai.

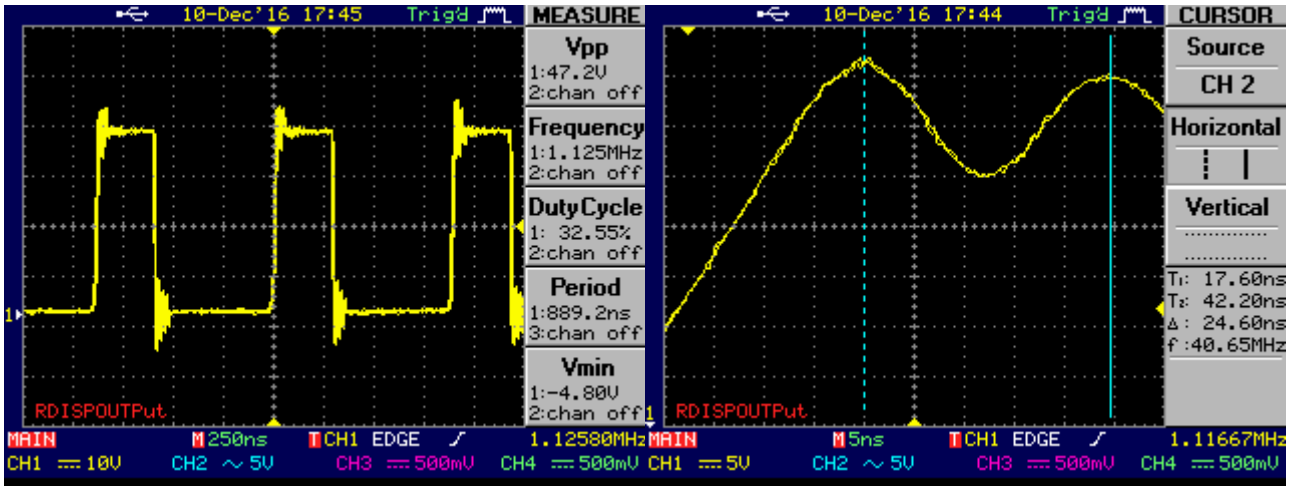
Norint apskaičiuoti A ir B maitinimo šaltinių parazitinę talpą ir induktyvumą, reikia išmatuoti perjungimo impulsų trukdžių pirmo periodo dažnį. Nustačius trukdžio dažnį, plokštėje lygiagrečiai tranzistoriui buvo prijungiamas mažos talpos keraminis kondensatorius. Pagal 3.2 poskyryje aprašytą metodą, buvo pasirinkta didinti lygiagrečiai prijungiamo kondensatoriaus talpą tol, kol perjungimo trukdžių virpesių dažnis sumažėjo per pusę. Skaičiavimai, reikalingi parinkti slopintuvo elementus ir elementų parinkimas, aprašomi 3.5 poskyryje.

3.4.1 paveiksle pateikti A maitinimo šaltinio perjungimo impulsų grafikai, kai plokštėje nenaudojamas perjungimo impulsų trukdžių slopintuvas. Reikia atkreipti dėmesį, kad perjungimo impulsų signalas yra invertuotas ir signalo užpildymo koeficientas (angl. *Duty Cycle*) yra apie 67,5 %. Šiame paveiksle pastebima, kad bendra amplitudė tarp mažiausios ir didžiausios signalo vertės (angl. *Peak-to-Peak*) siekia 51,2 V, o perjungimo trukdžių virpesių dažnis yra 81,97 MHz. Bendra maksimali įtampos amplitudė gana didelė ir viršija maitinimo šaltinyje naudoto valdiklio tranzistoriaus leidžiamą 42 V maksimalią įtampą, nurodytą valdiklio apraše. Matomas didelis perjungimo signalo triukšmas įjungimo ir išjungimo metu. Trukdžių dažnis taip pat aukštas, tačiau tikslesni skaičiavimų rezultatai gaunami skaičiuojant slopintuvus aukštesniems trukdžių dažniams, kurie siekia 200 MHz ir daugiau.



3.4.1 pav. A maitinimo šaltinio tranzistoriaus perjungimai (kairėje) ir jų trukdžiai (dešinėje) nenaudojant trukdžių slopintuvo

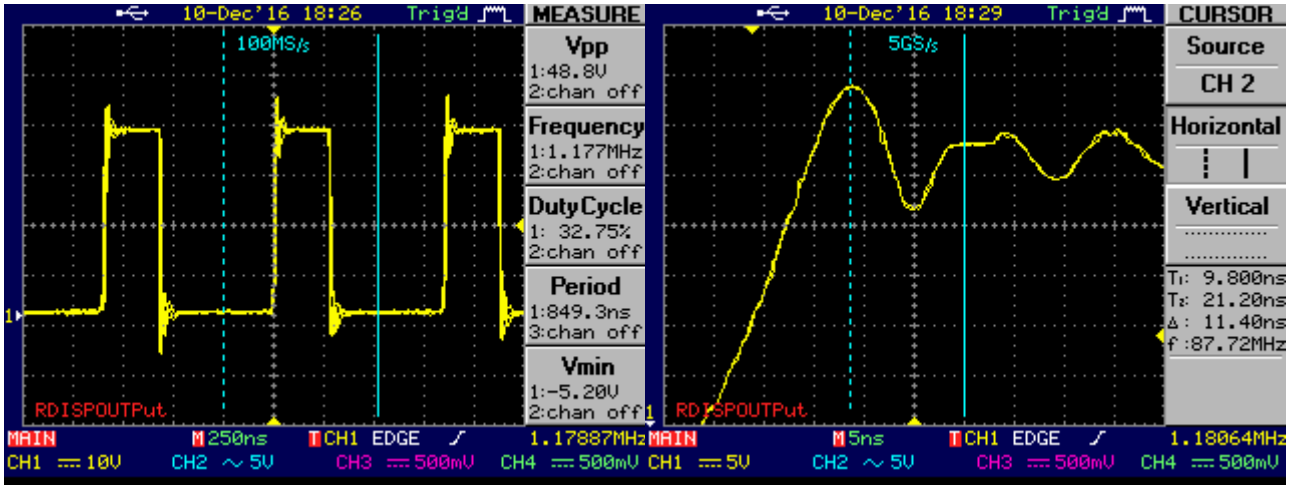
3.4.2 paveiksle matomi A maitinimo šaltinio tranzistoriaus perjungimai ir jo trukdžių grafikai, kai plokštėje panaudotas 1,6 nF kondensatorius perjungimų trukdžių slopinimui. Bendra maksimali signalo amplitudė sumažėjo iki 47,2 V, taip pat pastebimas trukdžių virpesių dažnio sumažėjimas apytiksliai per pusę iki 40,65 MHz. Taigi ši kondensatoriaus talpa yra tinkama tolimesniems A maitinimo šaltinio skaičiavimams.



3.4.2 pav. A maitinimo šaltinio tranzistoriaus perjungimai ir jų trukdžiai prijungus 1,6 nF kondensatorių

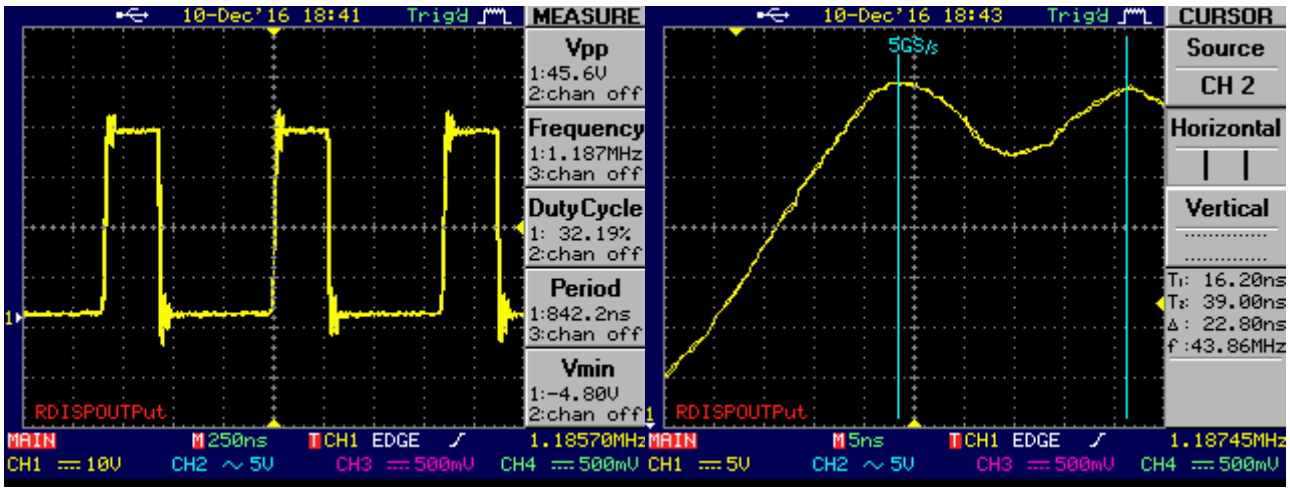
3.4.3 paveiksle pateikti B maitinimo šaltinio tranzistoriaus perjungimai ir jų trukdžių grafikai. Išmatuota tranzistoriaus perjungimo įtampos maksimali amplitudė lygi 48,8 V. Signalo triukšmo grafikas gana sudėtingas ir jo tikslinimui reikia naudoti tikslesnę matavimo įrangą, kadangi šiuo atveju naudotas skaitmeninis 200 MHz dažnio oscilografas gali nefiksuoti

aukštesnio dažnio trukdžių. Tačiau signalo forma yra pakankamai aiški apytiksliam trukdžio dažnio nustatymui, kuris siekia 87,72 MHz.



3.4.3 pav. B maitinimo šaltinio tranzistoriaus perjungimai (kairėje) ir jų trukdžiai (dešinėje) be trukdžių slopintuvo

Prijungus B maitinimo šaltiniui lygiagrečiai tranzistoriui 1,6 nF kondensatorių pastebėtas idealiai per pusę sumažėjęs trukdžių signalo dažnis – 43,86 MHz, taip pat sumažėjusi bendra signalo amplitudė iki 45,6 V (3.4.4 paveikslas).



3.4.4 pav. B maitinimo šaltinio tranzistoriaus perjungimai ir jų trukdžiai prijungus 1,6 nF kondensatorių

3.4.1 lentelėje pateikti eksperimentinių matavimų rezultatai. Jie buvo naudojami kaip pradiniai duomenys tolimesniems skaičiavimams ir tranzistoriaus perjungimų trukdžių slopintuvo komponentų parinkimui.

3.4.1 lentelė. Trukdžių slopintuvų kondensatorių parinkimo matavimų rezultatai

	A	B
Trukdžių virpesių dažnis be trukdžių slopintuvo	81,97 MHz	87,72 MHz
Trukdžių virpesių dažnis su apskaičiuotu optimaliu slopintuvo kondensatoriumi *C*	40,65 MHz	43,86 MHz
Tranzistoriaus perjungimo maksimali amplitudė be trukdžių slopintuvo	51,2 V	48,8 V
Tranzistoriaus perjungimo maksimali amplitudė su optimaliu slopintuvo kondensatoriumi *C*	47,2 V	45,6 V
Nustatyta kondensatoriaus talpa, sumažinanti trukdžių virpesių dažnį pusiau	~1,6 nF	1,6 nF

Taigi, nustatyti A ir B maitinimo šaltinių tranzistoriaus perjungimų parametrai, ir trukdžių virpesių grafikai. Abiejose plokštėse panaudojus papildomą 1,6 nF kondensatorių, prijungtą lygiagrečiai tranzistoriaus parazitinei talpai, pastebimas maksimaliosios tranzistoriaus perjungimų amplitudės sumažėjimas, taip pat trukdžių dažnio sumažėjimas per pusę.

3.5 Perjungimų trukdžių slopintuvo parametrų optimizavimas

Nustačius kondensatoriaus talpą, sumažinančią tranzistoriaus perjungimo trukdžių dažnį pusiau, apskaičiuojama konkrečios topologijos plokštės parazitinė talpa C_{PAR}, parazitinis induktyvumas L_{PAR}, slopintuvo rezistoriaus varža R_{SNUB} ir galimi slopintuvo nuostoliai.

Prie tiriamo maitinimo šaltinio tranzistoriaus prijungus $C_{PRIDĖTA}$ = 1,6 nF talpos kondensatorių, trukdžių dažnis sumažėjo pusiau, todėl pagal (2) formulę bendra plokštės talpa padidėjo 4 kartus. Tai yra minimali talpa, reikalinga naudoti šio maitinimo šaltinio tranzistoriaus perjungimo trukdžių slopintuvui. Pagal (5) formulę apskaičiuota parazitinė A maitinimo šaltinio talpa lygi 0,533 nF:

$$C_{PAR} = \frac{1{,}6\ nF}{4-1} = 0{,}533\ nF. \qquad (9)$$

Kaip ir tikėtasi, B maitinimo šaltinio parazitinė talpa yra truputį didesnė, nes išmatuotų trukdžių dažnis yra taip pat didesnis ir tokios pat talpos kondensatorius B maitinimo šaltinio trukdžių dažnį sumažina dvigubai, o A maitinimo šaltinio trukdžių dažnį – daugiau negu dvigubai. Tačiau šis skirtumas yra mažas ir jį nustatyti gana sudėtinga. Šiuo atveju skaičiavimų tikslumui didesnę reikšmę turi trukdžių dažnis.

Žinant A maitinimo šaltinio parazitinę talpą ir trukdžių dažnį, galima apskaičiuoti šios plokštės parazitinį induktyvumą, sukeliantį perjungimo trukdžius, naudojant (6) formulę:

$$L_{PAR} = \frac{1}{0{,}533\ nF \cdot (2 \cdot 3{,}14 \cdot 81{,}97\ MHz)^2} = 7{,}069\ nH, \quad (10)$$

čia f – perjungimo triukšmo pirmo periodo dažnis (A maitinimo šaltinio dažnis lygus 81,97 MHz). Naudojant tą pačią formulę taip pat apskaičiuojamas ir B maitinimo šaltinio parazitinis induktyvumas. Kai parazitinė talpa yra artima A maitinimo šaltinio parazitinei talpai (0,533 nF), o tranzistoriaus perjungimo trukdžių dažnis yra 87,72 MHz, tai gautas parazitinis induktyvumas lygus 6,172 nH.

Pagal (7) formulę randama trukdžių slopintuvui reikalinga varža:

$$R_{SNUB} = \sqrt{\frac{7{,}069\ nH}{0{,}533\ nF}} = 3{,}641\ \Omega. \quad (11)$$

Ta pati formulė naudojama ir B maitinimo šaltinio trukdžių slopintuvo varžos nominalo apskaičiavimui. Šiuo atveju ji lyi 3,402 Ω.

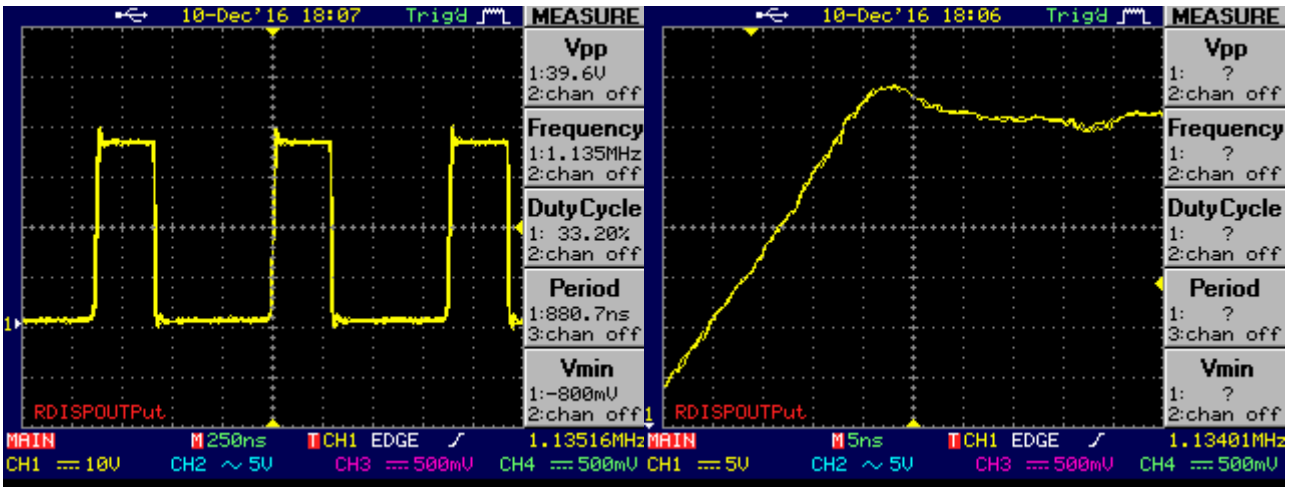
Tranzistoriaus perjungimo trukdžių slopintuvo nuostoliai A maitinimo šaltinyje randami naudojantis (8) formule:

$$P_{SNUB} = \frac{1{,}6\ nF}{2} \cdot (47{,}2\ V)^2 \cdot 1\ MHz\ = 1{,}782\ W, \quad (12)$$

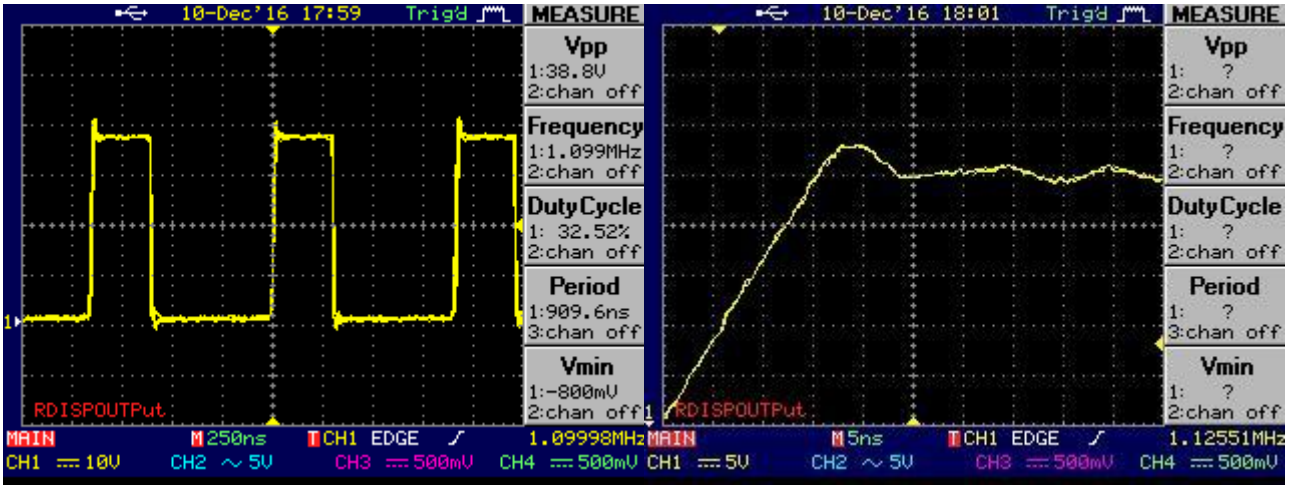
kai f_{VALD} – valdiklio veikimo dažnis, V_{BA} – tranzistoriaus perjungimo maksimalios amplitudės dydis, prijungus trukdžių slopintuvą. B maitinimo šaltinio numatomi galios nuostoliai trukdžių slopintuve lygūs 1,663 W.

Pagal šiuos skaičiavimus parenkami tranzistoriaus perjungimo trukdžių slopintuvo komponentai. Šiam slopintuvui parenkamas artimiausios talpos kondensatorius, kurio talpa yra nemažesnė už apskaičiuotą minimalią reikalingą (1,6 nF) talpą – 2 nF. Kadangi A ir B maitinimo šaltinių apskaičiuotų slopintuvų varžos yra panašios, pirminiams matavimams buvo parinkti 4 Ω rezistoriai taip pat buvo naudojami valdiklio gamintojo nurodyti 2 Ω rezistoriai, slopintuvo nuostolių ir slopinimo efektyvumo nustatymui.

3.5.1 ir 3.5.2 paveiksluose parodytose oscilogramose matyti, kad kai A maitinimo šaltinyje naudojamas 1,6 nF kondensatorius, panaudojus 2 Ω ir 4 Ω varžas, tranzistoriaus perjungimo triukšmo grafikas kinta nežymiai, o maksimali tranzistoriaus perjungimo įtampos amplitudė, panaudojus 2 Ω varžą sumažėja 0,8 V, nuo 39,6 V iki 38,8 V. Nors apskaičiuota varža yra lygi 4 Ω, siekiant efektyvesnio slopintuvo darbo parenkama 2 Ω varža, kadangi didelės triukšmų slopinimo įtakos panaudojus 4 Ω varžą nepastebėta.

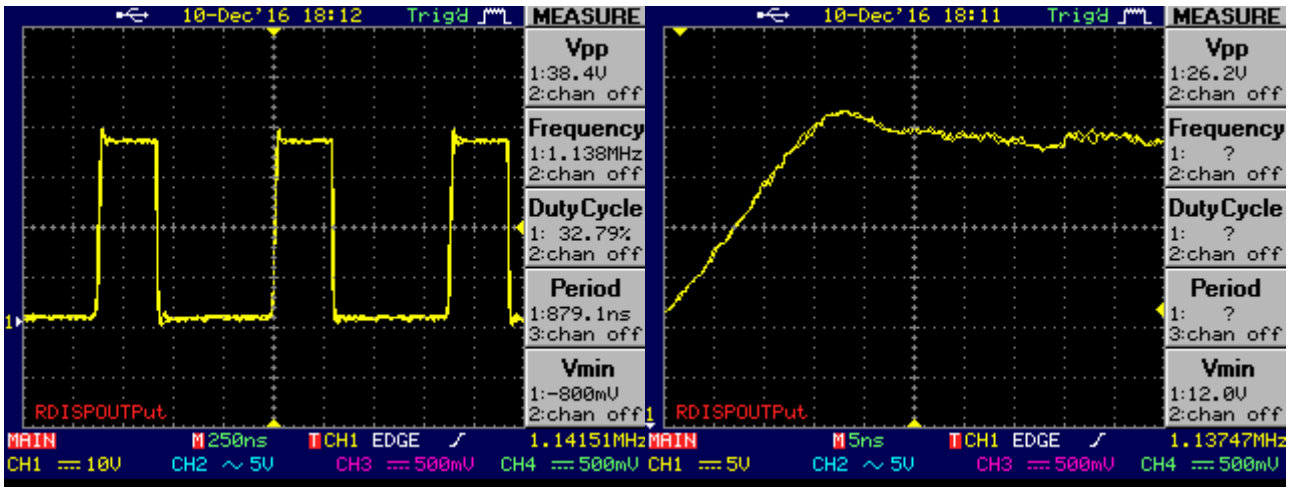


3.5.1 pav. A maitinimo šaltinio tranzistoriaus perjungimai ir jų trukdžiai prijungus trukdžių slopintuvą su 1,6 nF kondensatoriumi ir 4 Ω varža

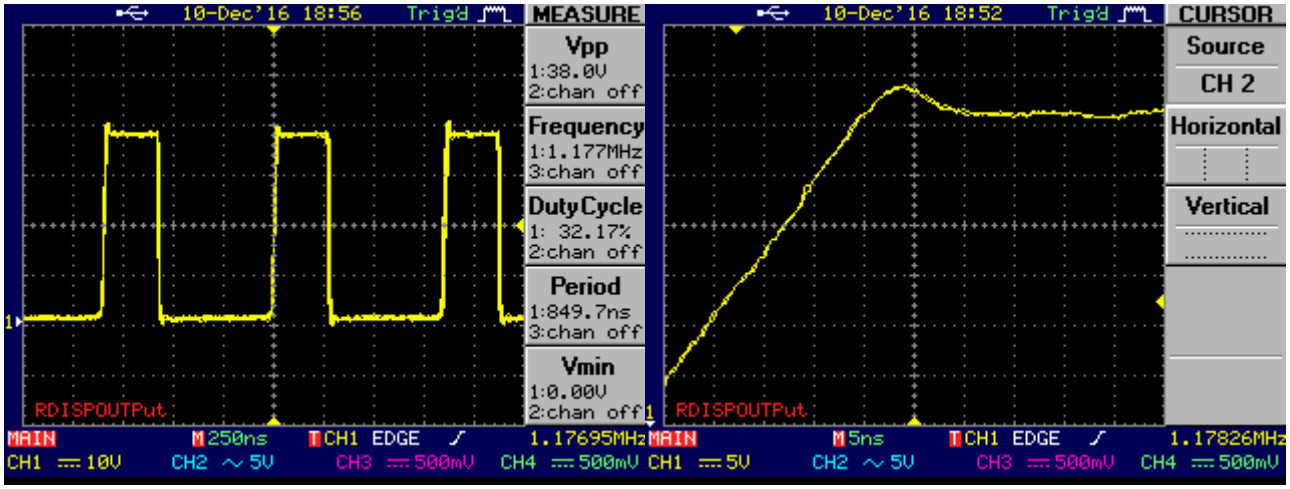


3.5.2 pav. A maitinimo šaltinio tranzistoriaus perjungimai ir jų trukdžiai prijungus trukdžių slopintuvą su 1,6 nF kondensatoriumi ir 2 Ω varža

3.5.3 ir 3.5.4 paveiksluose pateikiami A ir B maitinimo šaltinių grafikai, panaudojus 2 nF talpos kondensatorių ir 2 Ω varžą. Pastebimos mažesnės tranzistoriaus perjungimo įtampos amplitudės ir sumažėję trukdžiai.

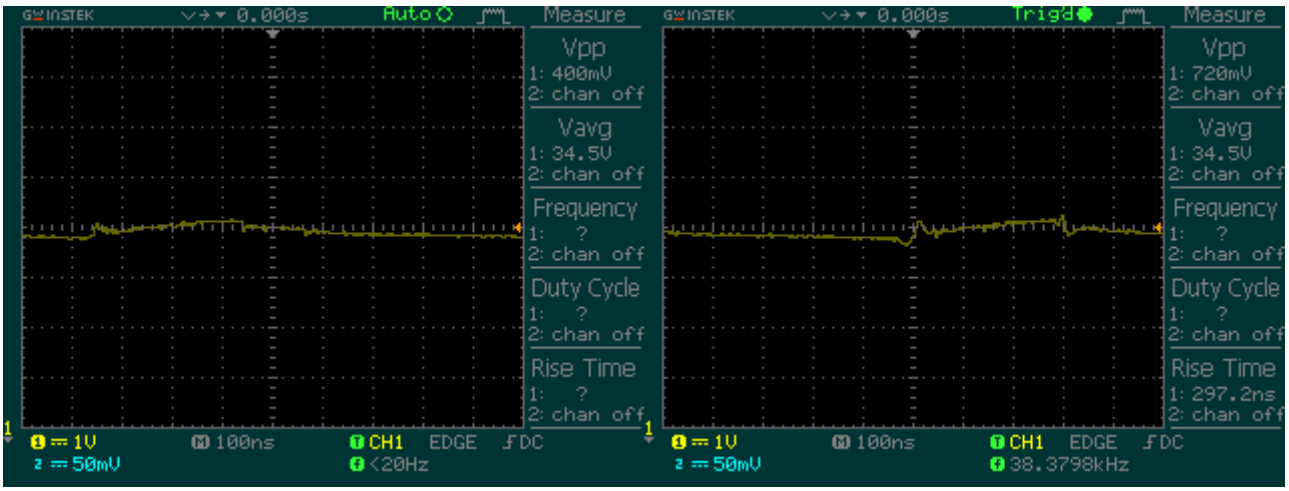


3.5.3 pav. A maitinimo šaltinio tranzistoriaus perjungimai ir jų trukdžiai prijungus trukdžių slopintuvą su 2 nF kondensatoriumi ir 2 Ω varža

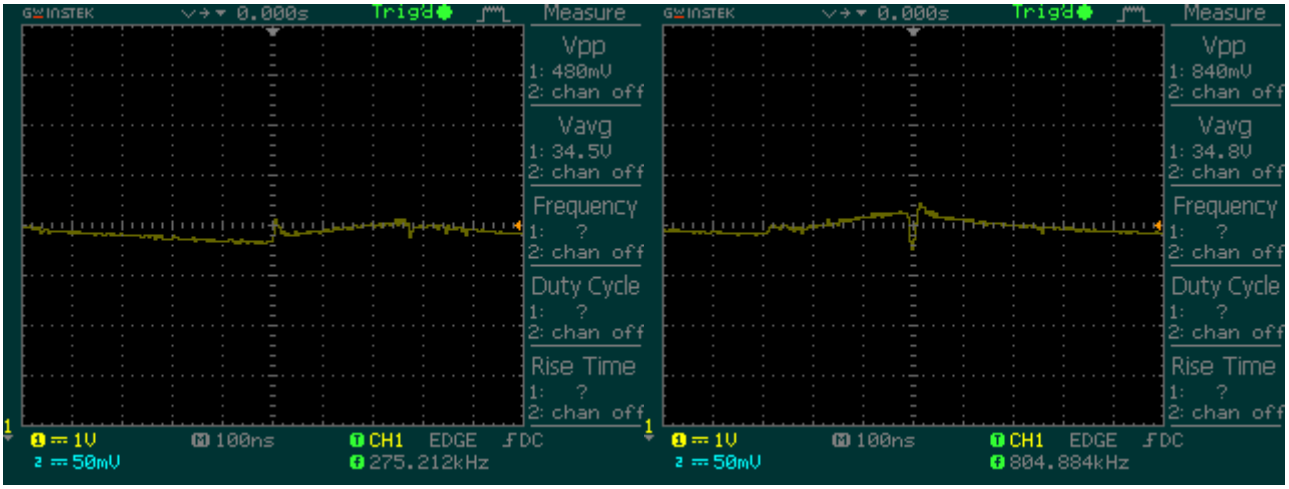


3.5.4 pav. B maitinimo šaltinio tranzistoriaus perjungimai ir jų trukdžiai prijungus trukdžių slopintuvą su 2 nF kondensatoriumi ir 2 Ω varža

3.5.5 paveiksle pateikti A maitinimo šaltinio išėjimo įtampos grafikai, su trukdžių slopintuvu ir be jo. 3.5.6 paveiksle – B maitinimo šaltinio išėjimo įtampos grafikai. Įtampą aukštinantiems impulsiniams maitinimo šaltiniams būdingos išėjimo įtampos pulsacijos. A maitinimo šaltinio išėjimo įtampos pulsacijos prijungus trukdžių slopintuvą padidėja nuo 400 mV iki 720 mV, o B maitinimo šaltinio – nuo 480 mV iki 840 mV. Šios pulsacijos mažos, lyginant su išėjimo įtampos dydžiu (34,5 V), todėl imtis papildomų priemonių jų mažinimui nereikia.



3.5.5 pav. A maitinimo šaltinio išėjimo įtampa ir jos virpesiai be trukdžių slopintuvo – kairėje ir prijungus trukdžių slopintuvą su 2 nF kondensatoriumi ir 2 Ω varža – dešinėje



3.5.6 pav. B maitinimo šaltinio išėjimo įtampa ir jos virpesiai be trukdžių slopintuvo – kairėje ir prijungus trukdžių slopintuvą su 2 nF kondensatoriumi ir 2 Ω varža – dešinėje

Palyginus *MIC3223* valdiklio gamintojo rekomenduojamus trukdžių slopintuvo parametrus (2 Ω ir 470 pF-1000 pF) ir pagal skaičiavimus, ir praktinius matavimus parinkto slopintuvo komponentų parametrus (2 nF ir 2 Ω), matoma, kad reikalingas dvigubai didesnės talpos kondensatorius negu rekomenduoja gamintojas. Tai žinoma priklauso nuo plokštės perjungimo mazgo parazitinės talpos ir induktyvumo. Vadinasi A ir B maitinimo šaltinio parazitiniai parametrai yra didesni negu numatė valdiklio, kuriame integruotas tranzistorius, gamintojas. Tai lėmė ne tik plokščių topologijos, takelių parametrai, bet ir komponentų kokybė.

3.6 Trukdžių slopintuvo tyrimų rezultatų palyginimas

Maitinimo šaltinių A ir B plokštėse panaudojus 2 nF ir 2 Ω tranzistoriaus perjungimų trukdžių slopintuvą, ištirti maitinimo šaltinių parametrų pasikeitimai.

3.6.1 lentelėje pateikiami pagrindinių parametrų skirtumai be tranzistoriaus perjungimų impulsų trukdžių slopintuvo ir su juo. Taip pat šioje lentelėje pateikti perskaičiuoti trukdžių slopintuvo nuostoliai, pagal parinkto trukdžių slopintuvo grafikus (3.5.3 ir 3.5.4 paveikslai).

3.6.1 lentelėje galima pastebėti, kad panaudojus tranzistoriaus trukdžių slopintuvą, maitinimo šaltinio naudingumo koeficientas sumažėja šiek tiek daugiau nei 2 %, tačiau tranzistoriaus perjungimo įtampos maksimali amplitudė A maitinimo šaltinyje sumažinta net 12,8 V (25 %), o B maitinimo šaltinyje – 10,8 V (22,131 %). Maksimali maitinimo šaltinio tranzistoriaus perjungimo įtampos amplitudė neturėtų būti didesnė negu išėjimo įtampos ir schemos diodo įtampos suma. Kadangi išėjimo įtampa yra apie 34,55 V, o ant diodo krintanti įtampa 0,65 V, taigi ideali teorinė bendroji signalo amplitudė turėtų būti apie 35,2 V. Šiuo atveju abiejų maitinimo šaltinių signalų amplitudės buvo sumažintos iki 38 V. Tai geras rezultatas, atsižvelgiant į itin didelę tranzistoriaus perjungimų maksimalią amplitudę nepanaudojus trukdžių slopintuvo, kuri viršija maksimalią leistiną tranzistoriaus 42 V įtampą A maitinimo šaltinyje 17,969 %, o B maitinimo šaltinyje 13,934 % [4, 6].

3.6.1 lentelė. Trukdžių slopintuvo tyrimų rezultatai

Parametras	A maitinimo šaltinis	B maitinimo šaltinis
Tranzistoriaus perjungimo maksimali įtampos amplitudė be trukdžių slopintuvo	51,2 V	48,8 V
Tranzistoriaus perjungimo maksimali įtampos amplitudė su trukdžių slopintuvu	38,4 V	38 V
Apskaičiuota parazitinė talpa ir induktyvumas	~0,533 nF, 7,069 nH	0,533 nF, 6,172 nH
Įtampa ir srovė maitinimo šaltinio įėjime be trukdžių slopintuvo	12 V, 2,35 A	12 V, 2,24 A
Įtampa ir srovė maitinimo šaltinio įėjime su trukdžių slopintuvu	12 V, 2,5 A	12 V, 2,5A
Įtampa ir srovė maitinimo šaltinio išėjime be trukdžių slopintuvo	34,4 V, 0,72 A	34,6 V, 0,67 A
Įtampa ir srovė maitinimo šaltinio išėjime su trukdžių slopintuvu	34,5 V, 0,74 A	34,7 V, 0,72 A
Įėjimo galia be trukdžių slopintuvo	28,2 W	26,88 W
Įėjimo galia su trukdžių slopintuvu	30 W	30 W
Išėjimo galia be trukdžių slopintuvo	24,768 W	23,182 W
Išėjimo galia su trukdžių slopintuvu	25,53 W	25,331 W
Apskaičiuoti galios nuostoliai trukdžių slopintuve	1,475 W	1,4 W
Naudingumo koeficientas be trukdžių slopintuvo	0,878	0,862
Naudingumo koeficientas su trukdžių slopintuvu	0,851	0,844

Tyrimų metu pasiektas didelis trukdžių amplitudės sumažinimas su minimaliais galios nuostoliais. Apskaičiuoti galios nuostoliai trukdžių slopintuve siekia apie 1,45 W. Iš praktinių rezultatų matyti, kad abiejuose maitinimo šaltiniuose galios nuostoliai padidėja, tačiau padidėja ir išėjime gaunama galia, todėl efektyvumas sumažėja tik apie 2 %. Akivaizdu, kad tirtiems A ir B maitinimo šaltiniams parinkti trukdžių slopintuvai labai svarbūs ir saugo perjungimo tranzistorių nuo didelių 51,2 V siekiančių įtampos šuolių.

4. MAITINIMO ŠALTINIŲ ELEKTROMAGNETINIŲ TRUKDŽIŲ EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI

Sukurtiems A ir B šviesos diodų maitinimo šaltiniams (plačiau aprašomi 3.3 poskyryje) buvo atlikti elektromagnetinių trukdžių tyrimai.

Elektromagnetinių trukdžių tyrimams pasirinkti A ir B šaltiniai, dėl aukšto 1 MHz jų veikimo dažnio. Šie šaltiniai buvo projektuojami atsižvelgiant į teorines rekomendacijas, vengiant elektromagnetinių trukdžių susidarymo mazgų. Tačiau yra didelė tikimybė, kad elektromagnetinių trukdžių išvengti nepavyks, todėl atlikus tyrimus nustatoma ar trukdžiai neviršija nustatytų ribų ir ar reikia imtis papildomų trukdžių slopinimo priemonių. Matavimai atlikti Kauno technologijos universiteto telekomunikacijų skyriaus laboratorijoje.

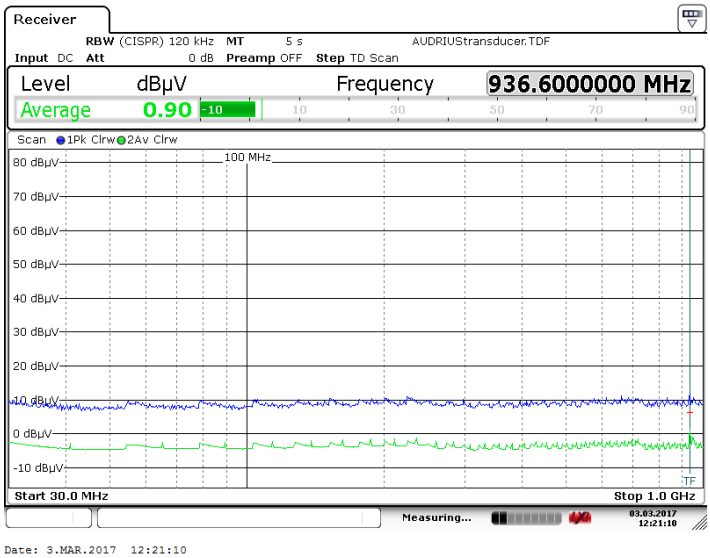
4.1 Maitinimo šaltinių spinduliuojamų elektromagnetinių trukdžių tyrimai

Į aplinką spinduliuojamų elektromagnetinių trukdžių tyrimai atlikti su „Frankonia“ *GTEM-1000* tyrimo įranga.

Šia įranga galima matuoti tiriamo objekto atsparumą išoriniam elektromagnetiniam laukui ir indukuotiems trukdžiams, pagal IEC/EN 61000-4-20 standartą – „Spinduliavimo ir atsparumo trukdžiams bandymai skersinių elektromagnetinių (TEM) bangų bangolaidžiuose“. Tyrimų metu tiriami maitinimo šaltiniai izoliuojami nuo aplinkos trukdžių, matavimus atliekant specialioje *GTEM-1000* kameroje (4.1.1 pav.) Matavimams atlikti ir rezultatams apdoroti naudotas „ROHDE&SHWARZ“ *R&S ESRP7* elektromagnetinių trukdžių matavimo imtuvas.

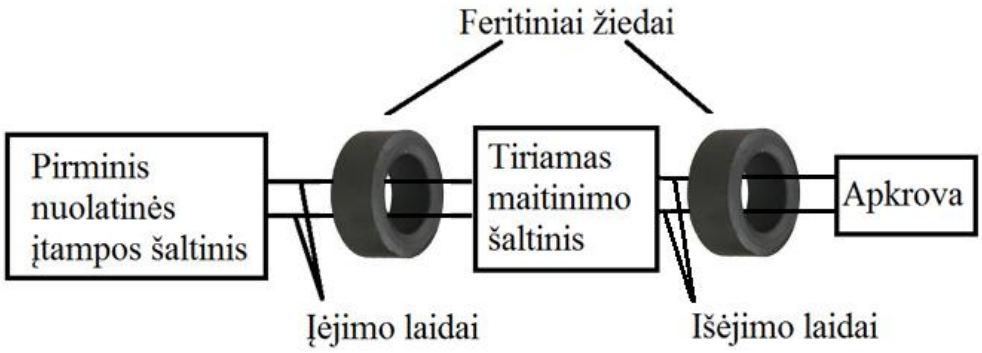
4.1.1 pav. „Frankonia“ *GTEM-1000* elektromagnetinių trukdžių tyrimo kamera

Prieš atliekant matavimus, buvo išmatuoti pirminio nuolatinės įtampos maitinimo šaltinio „TEC M7“ *HTP 15.5*, kuris maitina tiriamą maitinimo šaltinį, spinduliuojami elektromagnetiniai trukdžiai. Matavimui atlikti panaudota ekvivalentinė apkrova – reostatas, kurio nustatyta varža atitinka tiriamų A ir B maitinimo šaltinių įėjimo varžą, lygią 4,6 Ω. Šio matavimo rezultatai pateikti 4.1.2 paveiksle, kuriame matomas žemas (10 dBµV) elektromagnetinių trukdžių maksimalių verčių lygis. Čia žemesnė (žalia) kreivė – verčių vidurkis, aukštesnė (mėlyna) – maksimalios vertės.



4.1.2 pav. Pirminio maitinimo šaltinio „TEC M7“ elektromagnetiniai trukdžiai

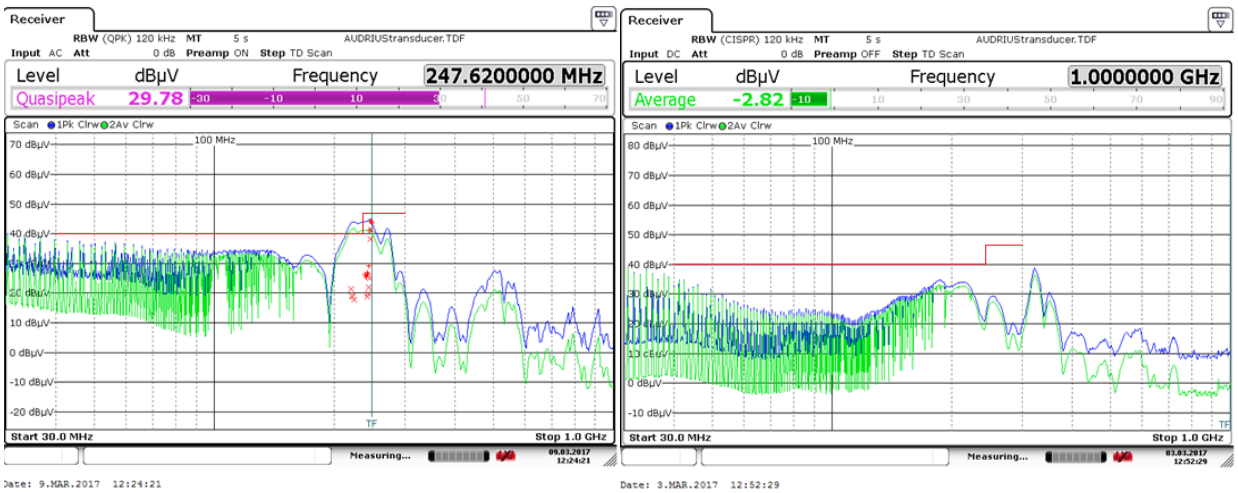
Patikrinus, kad pirminio maitinimo šaltinio skleidžiamų elektromagnetinių trukdžių lygis žemas, buvo paruošti A ir B maitinimo šaltiniai ir išmatuoti jų elektromagnetiniai trukdžiai. Maitinimo šaltinių paruošimas – tai feritinių žiedų panaudojimas ant maitinimo šaltinių įėjimo ir išėjimo laidų (4.1.3 pav.)



4.1.3 pav. Maitinimo šaltinių paruošimas elektromagnetinių trukdžių tyrimams

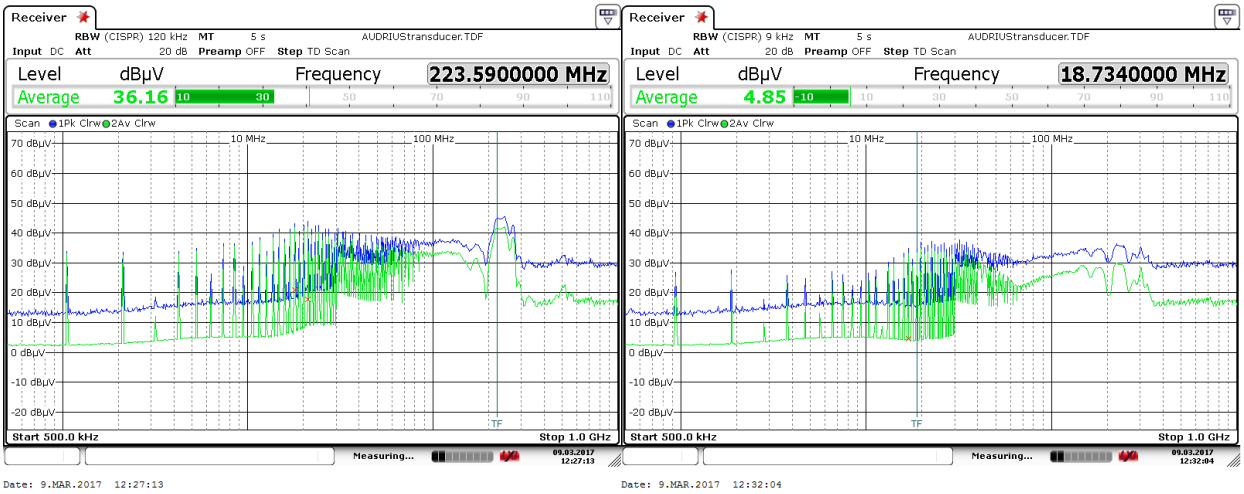
Panaudojus feritinius žiedus, filtruojami įėjimo ir išėjimo laidų generuojami trukdžiai, todėl matuojant gaunami tik maitinimo šaltinių spinduliuojami elektromagnetiniai trukdžiai. Taip stebimi elektromagnetinių trukdžių stiprumo pasikeitimai, pasikeitus plokštės elementų išdėstymui ir plokštės takelių ilgiams, nepriklausomai nuo maitinimo šaltinio įėjimo ir išėjimo laidų ilgių.

4.1.4 paveiksle pateikti A ir B maitinimo šaltinių elektromagnetiniai trukdžiai. Iš grafikų matyti žymiai mažesni trukdžiai B topologijos maitinimo šaltinyje. CISPR 15 standartas, Lietuvoje priimtas kaip LST EN 55015/A1, apibrėžiantis elektros apšvietimo ir panašios įrangos radijo trukdžių ribines vertes, nurodo, kad 3 m atstumu 30-230 MHz dažnio intervale galimi trukdžiai iki 40 dB, o 230-300 MHz intervale – 47 dB (4.1.4 pav. pažymėta raudona linija) [16].



4.1.4 pav. A (kairėje) ir B (dešinėje) maitinimo šaltinių elektromagnetiniai trukdžiai

Įprasta, kad elektromagnetinių trukdžių spinduliavimas įtaisuose yra matuojamas nuo 30 MHz iki 1 GHz veikimo dažnio, o laiduose generuojami trukdžiai – iki 30 MHz. Norint stebėti elektromagnetinių trukdžių intensyvumą keitiklio veikimo dažnio zonoje (1 MHz), buvo atlikti A ir B maitinimo šaltinių matavimai nuo 500 kHz iki 1 GHz. Gauti rezultatai pateikti 4.1.5 paveiksle. Čia matoma, kad 10-30 MHz maitinimo šaltinio veikimo dažnio intervale, spinduliuojamų trukdžių intensyvumas yra palyginus didelis ir A maitinimo šaltinyje prie 20 MHz dažnio viršija 40 dBµV, tačiau CISPR 15 standarte iki 30 MHz maitinimo šaltinio veikimo dažnio, elektromagnetiniams trukdžiams apribojimų nėra. B maitinimo šaltinio 10-30 MHz veikimo dažnio intervale trukdžiai mažesni 4 dBµV lyginant su A maitinimo šaltinio trukdžiais.

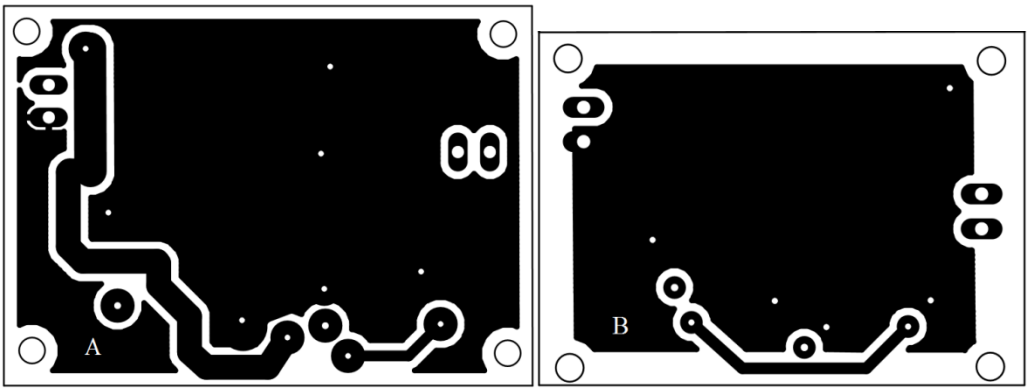


4.1.5 pav. A ir B maitinimo šaltinių elektromagnetiniai trukdžiai 500 kHz-1 GHz

Iš tyrimų rezultatų matoma, kad tiriamos šaltinių topologijos turi didelę įtaką elektromagnetiniams trukdžiams. 4.1.4 paveiksle matoma, kad A maitinimo šaltinio elektromagnetiniai trukdžiai viršija 40 dBµV vertę 220-240 MHz dažnių intervale, o B maitinimo šaltinio trukdžiai yra žemiau šios ribos, per visą matavimų intervalą (30 MHz-1 GHz). Taigi, pagal CISPR 15 standarto keliamus reikalavimus A maitinimo šaltinio trukdžiai šiek tiek viršija elektromagnetinių trukdžių ribas 220-240 MHz intervale, o B šaltinio trukdžiai neviršija standarto apibrėžiamų ribų ir yra žymiai mažesni už A šaltinio trukdžius. Keičiant maitinimo šaltinio įėjimo įtampą, pastebėti elektromagnetinių trukdžių pasikeitimai labai maži.

Geresnius B maitinimo šaltinio (*žr.* 3.3.2 ir 4.1.4 pav.) rezultatus galėjo lemti mažesni atstumai tarp pagrindinių komponentų, trumpesni takeliai, dėl ko sumažėjo srovės tekėjimo kelias ir parazitiniai induktyvumai. Taip pat galima pastebėti pasikeitimus komponentų įžeminime. Tai svarbu, nes elektromagnetiniai trukdžiai sumažėja, kai komponentų grandinėlė turi savo atskirą įžeminimą. Pavyzdžiui, įėjimo kondensatorius *C1* B maitinimo šaltinyje buvo atskirtas nuo kitų grandinėlių įžeminimo. Geresnių rezultatų galima pasiekti šį kondensatorių priartinus prie valdiklio. Tuomet elektromagnetiniai trukdžiai būtų mažesni. Taip pat rekomenduojama B maitinimo šaltinyje atskirti trukdžių slopintuvo *R6, C8* įžeminimo tašką (kiaurymę) nuo išėjimo kondensatorių *C4, C6*. Ši bendra kiaurymė gali generuoti papildomus trukdžius išėjimo laiduose arba paveikti tranzistoriaus perjungimo trukdžių slopinimą. Taigi, projektuojant maitinimo šaltinį itin svarbu priartinti pagrindinius komponentus kuo arčiau valdiklio – įėjimo ir išėjimo kondensatorius, diodą, ritę ir trukdžių slopintuvo komponentus. Taip pat pagrindinių komponentų įžeminimas negali būti sujungtas su kitų signalų įžeminimu, pavyzdžiui, įėjimo kondensatoriaus įžeminimas su švelnaus paleidimo nustatymo kondensatoriaus įžeminimu. Sujungus keleto komponentų įžeminimus į vieną tašką gali atsirasti

nepageidaujamų trukdžių ir valdiklio darbo režimo sutrikimų. Be to, projektuojant plokštę būtina sudaryti įžeminimo plotą kitoje plokštės pusėje, jei plokštė dvisluoksnė arba antrame (kuo artimesniame pagrindiniams komponentų takeliams) sluoksnyje, jei plokštė yra daugiasluoksnė. Šis įžeminimo plotas turi būti vientisas, t. y. reikia vengti jį dalijančių ar pertraukiančių takelių. Pavyzdžiui, 4.1.6 paveiksle B maitinimo šaltinio įžeminimo ploto apačioje matomas papildomas takelis mažesnis, trumpesnis ir įžeminimo plotas yra didesnis po pagrindiniais viršutinio sluoksnio takeliais, lyginant su A maitinimo šaltinio. Kuo įžeminimo plotas vientisesnis ir yra arčiau pagrindinių, didžiausių šaltinio srovių takelių, tuo jis geriau mažina elektromagnetinius trukdžius.



4.1.6 pav. A ir B maitinimo šaltinių įžeminimo plotai

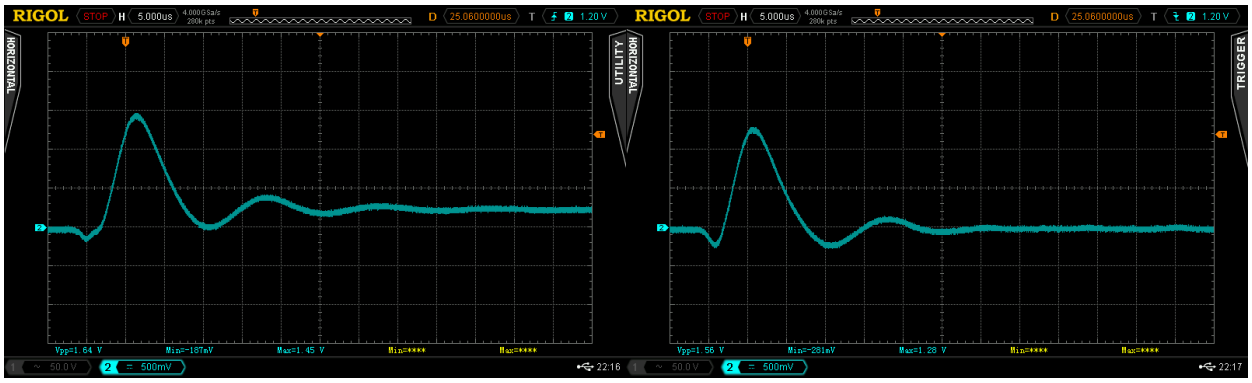
Svarbu paminėti, kad vien plokštės topologijos pakeitimai nevisada ženkliai sumažina elektromagnetinius trukdžius. Elektromagnetiniai trukdžiai gali didėti ir dėl netinkamai parinktų komponentų, pavyzdžiui, nepakankamos talpos kondensatoriaus, netinkamo diodo, kurio perjungimo charakteristika nėra tinkama aukšto dažnio maitinimo šaltiniams ir pan. Paprastai sumažinus vieno dažnio intervalo elektromagnetinius trukdžius, padidėja kito intervalo trukdžiai, pavyzdžiui, sumažinus aukšto dažnio spinduliavimą, padidėja žemesnio dažnio spinduliavimas ir atvirkščiai. Elektromagnetinių trukdžių spinduliavimą galima ženkliai sumažinti panaudojus įžemintą metalinį maitinimo šaltinio korpusą (ekranuoti). Deja, šis sprendimas nesumažina maitinimo šaltinio įėjimo ir išėjimo laiduose generuojamų trukdžių.

4.2 Maitinimo šaltinių laiduose generuojami trukdžiai

Šiame poskyryje aprašomi A ir B maitinimo šaltinių laidų trukdžių (angl. *conducted*) spinduliavimo tyrimai.

Tyrimui naudotas „Fischer Custom Communications Inc.“ *F-52* radijo dažnio srovės jutiklio žiedas, uždedamas ant keitiklio įėjimo teigiamo poliaus laido. *F-52* jutiklis matuoja

išoriniu metodu, tai yra, jis neįjungiamas į grandinę, bet naudojamas kaip srovės replės. *F-52* jutikliu buvo išmatuoti A tiriamo maitinimo šaltinio trukdžiai, generuojami įėjimo laiduose, įjungimo metu. Tyrimo rezultatus atvaizduoja 4.2.1 paveikslas, kuriame matomos įjungimo ir išjungimo metu generuojamos srovės.



4.2.1 pav. Maitinimo šaltinio įjungimo (kairėje) ir išjungimo (dešinėje) srovės grafikai

Atlikus matavimus, pastebėta (4.2.1 pav.), kad įjungimo ir išjungimo metu tiriami maitinimo šaltiniai sukelia aukštus 15,36-17,4 A srovės amplitudės virpesius. Laboratorijoje turima elektromagnetinių trukdžių matavimo įranga „ROHDE&SHWARZ“ *ENV216* skirta matuoti iki 16 A srovę. Taip pat ji turi didelį induktyvumą savo vidinėje grandinėje, todėl sąveikaujant su tiriamais maitinimo šaltiniais jų įjungimo metu gali būti sukuriamos dar didesnės srovės, kurios sukelia valdiklių gedimus.

Nors tikslių matavimų atlikti nepavyko dėl ribotų laboratorijos įrangos galimybių, iš 4.2.1 paveikslo duomenų matyti, kad įjungimo metu maitinimo šaltinių įėjimo laiduose generuojami dideli trukdžiai – srovės šuoliai, kuriuos būtina mažinti. Šiems trukdžiams mažinti reikia papildomų filtrų, kurie sudaromi iš tokių komponentų, kaip kondensatoriai, feritiniai komponentai, ritės ir šių komponentų grandinės.

Laiduose generuojami elektromagnetiniai trukdžiai gali atsirasti dėl per mažos įėjimo kondensatoriaus talpos, netinkamo jo įžeminimo ar vietos plokštėje. Dažnai reikia panaudoti didesnės talpos kondensatorius, juos priartinti prie kritinių mazgų, taip mažinant srovės tekėjimo kelią. Kartais reikia imtis papildomų priemonių ir naudoti įėjimo trukdžių slopinimo grandinėles.

5. DAŽNIO ĮTAKOS ĮTAMPĄ AUKŠTINANČIO MAITINIMO ŠALTINIO PARAMETRAMS TYRIMAS

Impulsinio maitinimo šaltinio veikimo dažnis yra vienas pagrindinių parametrų, lemiančių maitinimo šaltinio skaičiavimus, projektavimą ir elementų parinkimą nuo pirmų šaltinio kūrimo žingsnių.

Taip pat maitinimo šaltinio veikimo dažnis lemia jo efektyvumą, komponentų šilimą, elektromagnetinių trukdžių susidarymo tikimybę ir pan. Pavyzdžiui, parinkus 1 MHz veikimo dažnio maitinimo šaltinio komponentus, negalima naudoti tų pačių komponentų kuriant ir 500 kHz veikimo dažnio maitinimo šaltinį. Taip yra dėl mažesnio energijos kiekio, reikalingo kaupti 1 MHz veikimo dažnio maitinimo šaltinio komponentuose, negu 500 kHz, todėl didelė tikimybė, kad tie patys komponentai 500 kHz veikimo dažnio maitinimo šaltinyje šils labiau.

Tyrimams buvo naudojama „Texas Instruments“ *TPS55340EVM-017* eksperimentinė maitinimo šaltinio plokštė, kurioje sumontuotas *TPS55340* įtampą aukštinantis valdiklis. Šis maitinimo šaltinis taip pat kaip ir 3, 4 skyriuose aprašyti A, B maitinimo šaltiniai aukština įtampą ir veikia pastovios srovės režimu. Minėtas maitinimo šaltinis yra skirtas eksperimentiniams įvairių šaltinio veikimo režimų tyrimams, tačiau nėra skirtas naudoti kaip galutinis produktas. Šis maitinimo šaltinis pasirinktas, nes ji turi kompiuterinį modelį, todėl galima atlikti papildomus tyrimus šiame modelyje ir palyginti eksperimentinių ir kompiuterinių tyrimų rezultatus.

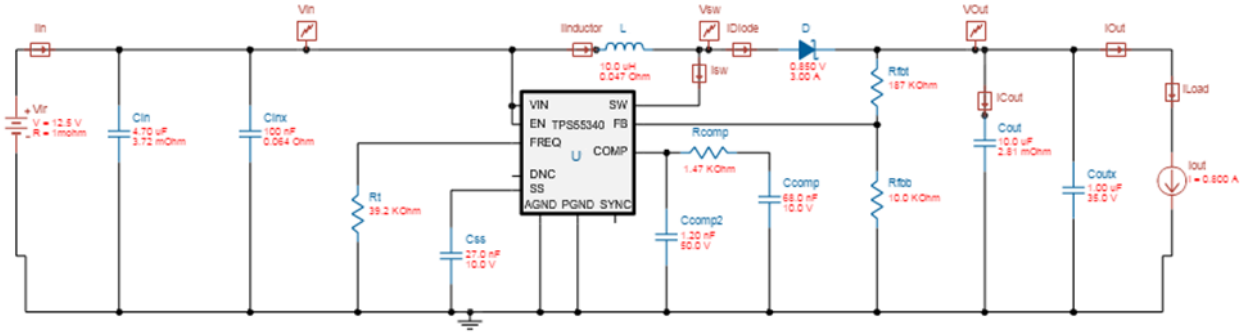
Maitinimo šaltinis veikia pastovios srovės režimu. Jį maitinant 5 V įtampa, išėjime gaunama iki 800 mA srovė, o maitinant 12 V įtampa – iki 1,9 A srovė. Maksimali šio šaltinio išėjimo įtampa – 38 V, o veikimo dažnis gali būti keičiamas nuo 300 kHz iki 1200 kHz. Šaltinio nominalus veikimo dažnis yra apie 600 kHz [17, 18]. Tyrimams maitinimo šaltinis paruoštas veikti maitinama 12 V įtampa, išėjime gaunama 24 V įtampa ir 800 mA srovė. Tyrimų metu buvo keičiamas maitinimo šaltinio veikimo dažnis nuo 350 kHz iki 1200 kHz ir stebimi parametrai: komponentų temperatūra, šaltinio efektyvumas, išėjimo ir įėjimo srovės, įtampos ir galios. Tyrimai atliekami, kai aplinkos temepratūra lygi 23 °C. Gamintojas pateikia komponentų parinkimui reikalingų skaičiavimų formules ir skaičiuoklius taip pat kompiuterinį modelį.

5.1 Maitinimo šaltinio kompiuterinis modeliavimas keičiant veikimo dažnį

Kompiuterinis modeliavimas atliktas „Texas Instruments“ *WEBENCH* kompiuterinio modeliavimo programoje. Tiriamos schemos parametrai nustatyti pagal turimo realaus maitinimo šaltinio parametrus.

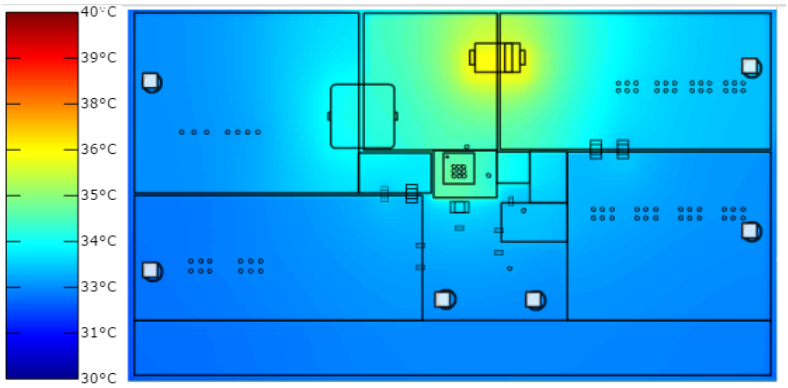
Šaltinio išduodama galia lygi 19,2 W, išėjimo įtampa 24,211 V, srovė – 0,8 A. Kiti šaltinio parametrai, gauti keičiant veikimo dažnį, pateikti 5.3.1 lentelėje. Svarbu paminėti, kad „Texas Instruments“ *WEBENCH* programa automatiškai perskaičiuoja ir parenka tinkamiausius schemos komponentus, todėl gauti rezultatai artimi idealiems.

Gamintojo duota principinė šaltinio kompiuterinio modeliavimo schema pateikta 5.1.1 paveiksle. Veikimo dažnis keičiamas keičiant rezistoriaus R_4 varžą: 133 kΩ – 350 kHz, 78,7 kΩ – 600 kHz, 51 kΩ – 900 kHz, 43 kΩ – 350 kHz.



5.1.1 pav. Principinė *TPS55340EVM-017* kompiuterinio modeliavimo schema

Toliau pateikiami grafikai ir kiti duomenys, gauti tiriant kompiuterinį modelį, kurio veikimo dažnis – 600 kHz. Rezultatai gauti prie kitų veikimo dažnių pateikiami 5.3 poskyryje. 5.1.2 paveiksle pateiktas temperatūrinis vaizdas gaunamas kompiuterinio modeliavimo programoje, kai maitinimo šaltinis veikia standartiniu 600 kHz dažniu. Čia matoma ir modeliavimo metu gauta, kad didžiausia temperatūra yra diodo, gamintojo principinėje schemoje pažymėto *D* ir lygi 46,6 °C, o valdiklio temperatūra – 44,3 °C.



5.1.2 pav. *TPS55340EVM-017* kompiuterinio modeliavimo temperatūrinis vaizdas

Atlikus kompiuterinį modeliavimą su kitais maitinimo šaltinio veikimo dažniais, nustatyta, kad visais atvejais didžiausia temperatūra yra diodo *D*. Pastebėta, kad kitų pagrindinių

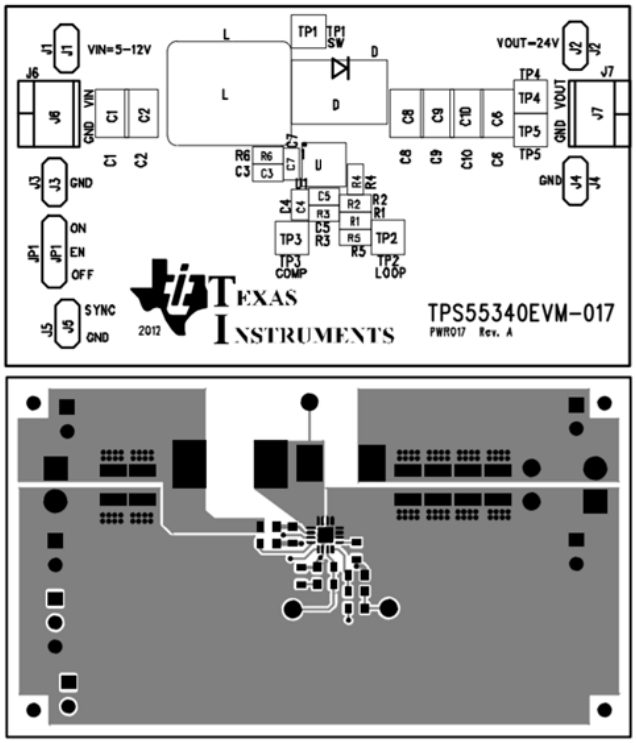
komponentų – įėjimo ir išėjimo kondensatorių, ritės ir valdiklio, temperatūra viršija 34 °C, tačiau visada yra mažesnė už diodo *D* temperatūrą.

Gauti kompiuterinio modeliavimo rezultatai pateikti 5.3.1 lentelėje ir palyginti su eksperimentinio tyrimo rezultatais 5.3 poskyryje.

5.2 Maitinimo šaltinio eksperimentinis tyrimas keičiant veikimo dažnį

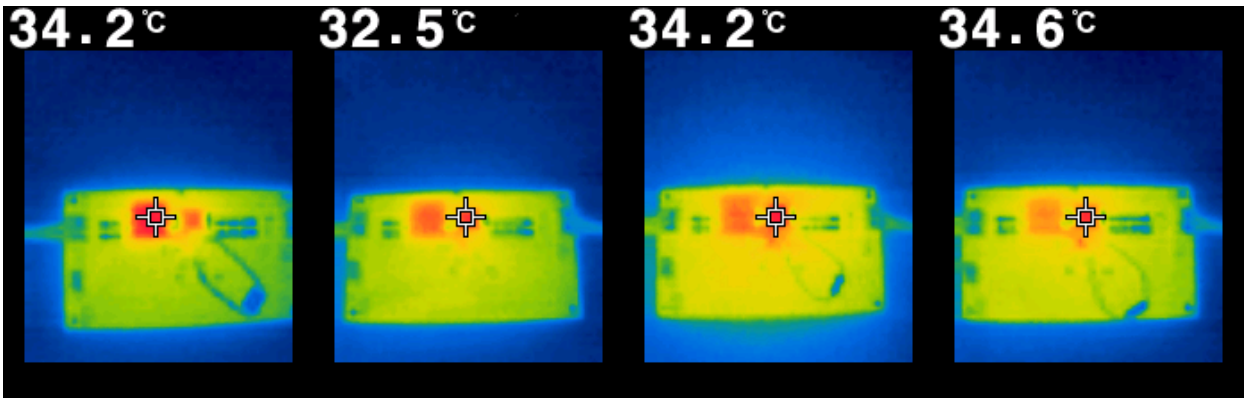
Eksperimentinių tyrimų metu stebėti *TPS55340EVM-017* bandyminės plokštės parametrai keičiant valdiklio veikimo dažnį.

Tirto maitinimo šaltinio plokštės topologijos ir takelių vaizdas pateiktas 5.2.1 paveiksle. Gamintojas prie valdiklio *U* priartino kondensatorius ir rezistorius, kurie nustato tokias funkcijas kaip švelnaus paleidimo (C_3), išėjimo įtampos viršįtampių apsaugos (R_1, R_2), dažnio nustatymo (R_4) ir kt. Pagrindiniai komponentai: ritė *L* ir diodas *D* gana arti, tačiau įėjimo C_1, C_2 ir išėjimo C_8, C_9, C_{10} kondensatoriai yra šiek tiek toliau nuo valdiklio. Pagrindinių takelių plotai dideli, tai padeda aušinti komponentus, taip pat ženkliai prisideda prie elektromagnetinių trukdžių mažinimo, kai įžeminimo plotas taip pat didelis ir yra po šiais pagrindinių takelių plotais.



5.2.1 pav. *TPS55340EVM-017* maitinimo šaltinio topologija [18]

5.2.2 paveiksle pateiktas tiriamo maitinimo šaltinio vaizdas gautas termovizoriumi, kai veikimo dažnis lygus 350 kHz, 600 kHz, 900 kHz, 1200 kHz iš kairės į dešinę. Matavimai atlikti su „Flir“ *TG165*.



5.2.2 pav. *TPS55340EVM-017* vaizdai termovizoriuje, keičiant dažnį, 350 kHz, 600 kHz, 900 kHz ir 1200 kHz

Nustatyta, kad labiausiai šylantys maitinimo šaltinio elementai – diodas, ritė ir valdiklis. Kai maitinimo šaltinis veikia 350 kHz dažniu labiausiai šyla ritė, matoma 5.2.2 pav. kairiausios nuotraukos centre (34,2 °C), visais kitais atvejais – diodas, kuris yra kitų trijų nuotraukų centruose. Maitinimo šaltiniui veikiant 350 kHz dažniu, ritės induktyvumas yra per mažas ir ritėje reikia kaupti didesnį energijos kiekį, kad maitinimo šaltinis dirbtų nustatytu darbo režimu. Šiuo atveju ritės induktyvumas nėra kritiškai žemas, todėl darbo režimas yra normalus, tačiau jau pastebimas ritės šilimas. Maitinimo šaltinis pasižymi itin žema veikimo temperatūra ir dideliu efektyvumu.

Visi eksperimentinių tyrimų rezultatai pateikiami ir lyginami su kompiuterinio modeliavimo rezultatais 5.3 poskyryje.

5.3 Dažnio įtakos maitinimo šaltinio parametrams tyrimų rezultatų palyginimas

Šiame poskyryje aptariami ir lyginami 5.1 ir 5.2 poskyrių rezultatai. Nustatomi rezultatų skirtumai ir galimos jų priežastys.

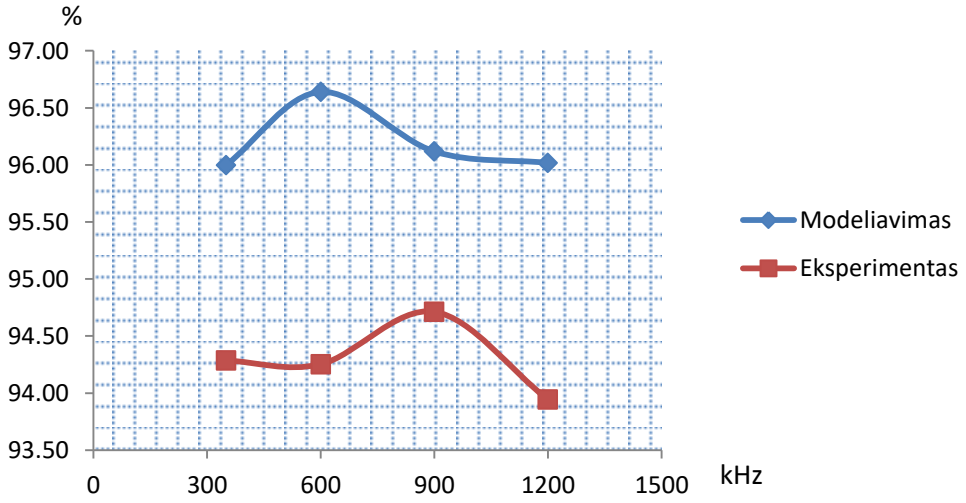
5.3.1 lentelėje pateikti modeliavimo ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, keičiant maitinimo šaltinio veikimo dažnį. Lentelėje nurodyta temperatūra – tai maksimali plokštėje nustatyta temperatūra. Modeliavimo atveju ši temperatūra visuomet yra diodo D1. Eksperimentinių tyrimų metu didžiausia nustatyta temperatūra taip pat yra diodo, tačiau maitinimo šaltiniui veikiant 350 kHz dažniu labiausiai įšyla ritė. Taip yra, nes mažėjant veikimo dažniui rite teka didesnės srovės, schemoje reikalinga didesnio induktyvumo ritė. Kai ritės induktyvumas per mažas, ritė artėja prie šerdies magnetinio įsotinimo vertės, todėl labiau šyla. Maitinimo šaltinis pritaikytas veikti 600 kHz dažniu, todėl iš visų tyrimų atvejų ritės induktyvumas per mažas tik 350 kHz veikimo atveju. Modeliuojant, schema yra automatiškai

koreguojama ir parenkami tinkamiausi elementai nustatytam veikimo režimui. Pagal gamintojo aprašą, diodas gali veikti iki 150 ^{0}C temperatūros, ritė iki 125 ^{0}C. Visais atvejais maitinimo šaltinį sudarančių elementų temperatūra yra žema ir neviršija 38,5 ^{0}C modeliuojant bei 34,6 ^{0}C eksperimentų metu.

5.3.1 lentelė. *TPS55340* kompiuterinio modeliavimo ir eksperimentinių tyrimų rezulatai

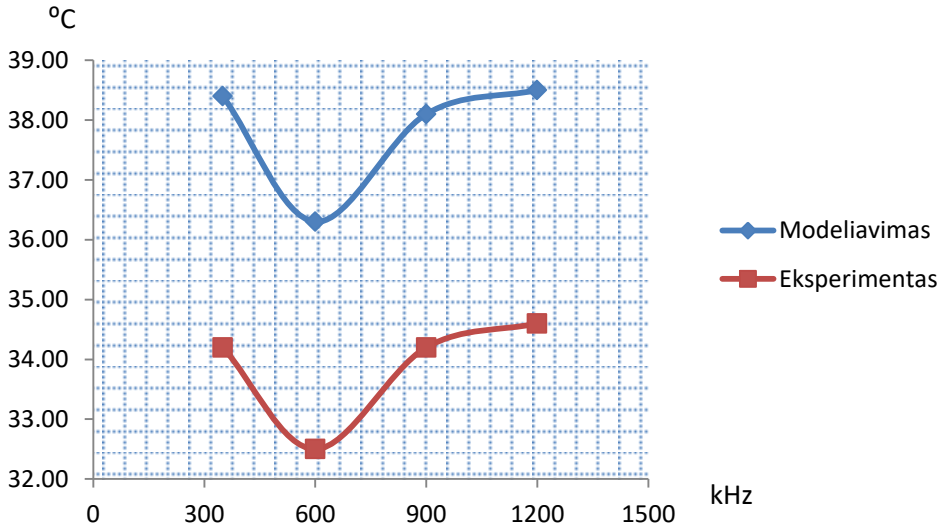
Veikimo dažnis, kHz	Parametras	Modeliavimo rezultatai	Eksperimentų rezultatai
350	Maitinimo srovė, A	1,67	1,75
	Įėjimo galia, W	20	21
	Išėjimo galia, W	19,2	19,8
	Efektyvumas, %	96	94,29
	Temperatūra, ^{0}C	38,4	34,2
600	Maitinimo srovė, A	1,66	1,74
	Įėjimo galia, W	19,87	20,88
	Išėjimo galia, W	19,2	19,68
	Efektyvumas, %	96,64	94,25
	Temperatūra, ^{0}C	36,3	32,5
900	Maitinimo srovė, A	1,67	1,74
	Įėjimo galia, W	19,98	20,88
	Išėjimo galia, W	19,2	19,78
	Efektyvumas, %	96,12	94,71
	Temperatūra, ^{0}C	38,1	34,2
1200	Maitinimo srovė, A	1,67	1,75
	Įėjimo galia, W	19,99	21
	Išėjimo galia, W	19,2	19,73
	Efektyvumas, %	96,02	93,94
	Temperatūra, ^{0}C	38,5	34,6

Dalis 5.3.1 lentelėje pateiktų rezultatų atvaizduojami 5.3.1 ir 5.3.2 paveiksluose. 5.3.1 paveiksle matoma, kad kompiuterinio modeliavimo metu nustatytas efektyviausias maitinimo šaltinio veikimas, kai dažnis lygus 600 kHz. Eksperimentinio tyrimo metu efektyviausias veikimas esant 900 kHz dažniui. Šis skirtumas galėjo atsirasti dėl realaus maitinimo šaltinio komponentų parinkimo. Komponentai parenkami pagal teorinių skaičiavimų rezultatus, tačiau gaminami komponentai yra tam tikrų standartinių parametrų. Todėl dažnai parinktų komponentų parametrai šiek tiek skiriasi nuo apskaičiuotų. Taip pat visi komponentai turi tam tikras leistinas parametrų paklaidas. Dėl šių priežasčių realaus maitinimo šaltinio efektyvumas gali būti didesnis, kai dažnis yra 900 kHz. Abiejų tyrimų rezultatai artimi, jų skirtumus galėjo lemti matavimo aparatūros paklaidos ir maitinimo šaltinio komponentų paklaidos.



5.3.1 pav. *TPS55340EVM-017* kompiuterinio modeliavimo ir eksperimentinio tyrimo efektyvumo rezultatai

5.3.2 paveiksle temperatūrinių tyrimų rezultatų kreivės yra panašių formų. Kompiuterinio modeliavimo metu gautos temperatūros vidutiniškai didesnės 3,95 ^{0}C nei eksperimentinių tyrimų, esant tam pačiam dažniui. Reikia atkreipti dėmesį, kad gauti geresni eksperimentinio tyrimo rezultatai gali būti dėl termovizoriaus „Flir“ *TG165* matavimo paklaidos. Mažiausia maksimali plokštės temperatūra pasiekta, kai maitinimo šaltinis veikė standartiniu 600 kHz dažniu.



5.3.2 pav. Didžiausios *TPS55340EVM-017* temperatūros keičiant veikimo dažnį

Atlikus tyrimus nustatyta, kad *TPS55340EVM-017* maitinimo šaltinio efektyvumas labai aukštas, o maksimali jo komponentų pasiekta temperatūra gana žema. Aukštas efektyvumas

pasiektas dėl gerų valdiklio parametrų ir gerai apskaičiuotų, ir parinktų komponentų. Tai prisidėjo ir prie puikių temperatūrinių rezultatų. Tirto maitinimo šaltinio plokštė yra keturių sluoksnių, todėl ji turi vientisesnį ir didesnį įžeminimo sluoksnį, lyginant su mažiau sluoksnių turinčiomis plokštėmis. Šis sluoksnis mažina elektromagnetinius trukdžius. Keturių sluoksnių plokštė užtikriną gerą komponentų aušinimą, todėl nereikia naudoti papildomų aušintuvų.

Tirto maitinimo šaltinio kompiuterinio modeliavimo ir eksperimentinio tyrimo rezultatai puikūs ir artimi. Kadangi ši plokštė gerai suprojektuota, keičiant veikimo dažnį rezultatai kito mažai ir atitiko teorinius pastebėjimus.

IŠVADOS

1. Optimalus maitinimo šaltinio veikimo dažnis parenkamas atsižvelgiant į įtaiso dydį, komponentų kainą, nuostolius, elektromagnetinius trukdžius ir efektyvumą. Didinant veikimo dažnį, elementuose reikia kaupti mažiau energijos, todėl jie yra mažesni, kartu mažėja plokštės dydis, kaina ir svoris. Tačiau mažėja šaltinio efektyvumas, susiduriama su aušinimo problemomis taip pat didėja įtaiso generuojami elektromagnetiniai trukdžiai.
2. Norint išvengti elektromagnetinių trukdžių, imtis veiksmų reikia jau projektuojant spausdinto montažo plokštę ir numatyti galimus trukdžių generavimo taškus, kaip tranzistorinis jungiklis, kurio veikimo dažnis aukštas ir perjungimo srovės bei įtampos kinta staigiais šuoliais.
3. Parazitiniai maitinimo šaltinio parametrai priklauso ne tik nuo komponentų parametrų, bet ir nuo maitinimo šaltinio plokštės parametrų. Spausdinto montažo plokštės takeliui ilgėjant didėja jo parazitinis induktyvumas, o didėjant takelių tankiui, didėja parazitinė talpa.
4. Trukdžių slopintuvas mažina tranzistoriaus nuostolius, elektromagnetinius trukdžius ir įtampos bei srovės šuolius, atsirandančius tranzistoriaus perjungimo metu, kurie gali jį pažeisti. Panaudojus trukdžių slopintuvą, A ir B maitinimo šaltinių naudingumo koeficientas sumažėja apie 2 % (1,4-1,475 W), tačiau tranzistoriaus perjungimo įtampos amplitudė A maitinimo šaltinyje sumažinta net 12,8 V (25 %), o B maitinimo šaltinyje – 10,8 V (22,131 %), nuo 48,8-51,2 V iki 38-38,4 V, kai maksimali leistina tranzistoriaus įtampa yra 42 V.
5. Maitinimo šaltinio plokštės komponentų išdėstymo pakeitimas lėmė akivaizdų trukdžių sumažėjimą. Geresnius B maitinimo šaltinio elektromagnetinių trukdžių tyrimų rezultatus lėmė trumpesni takeliai, dėl ko sumažėjo parazitiniai induktyvumai, taip pat atliktos korekcijos komponentų įžeminime. Elektromagnetiniai trukdžiai sumažėja, kai komponentų grandinėlė turi savo atskirą įžeminimą ir srovės nepersidengia su kitų grandinės dalių srovėmis.
6. Šaltinio topologijos pakeitimai nevisada ženkliai sumažina elektromagnetinius trukdžius. Trukdžiai atsiranda ir dėl netinkamai parinktų komponentų, pavyzdžiui, per mažos talpos kondensatoriaus, netinkamų diodo charakteristikų, per mažo ritės induktyvumo.
7. Modeliuojant *TPS55340EVM-017* maitinimo šaltinį, maksimali jo temperatūra neviršija 38,5 ºC, o eksperimentų metu – 34,6 ºC, kai aplinkos temperatūra – 23 ºC, didžiausia užfiksuota temperatūra yra lygintuvinio diodo, išskyrus eksperimentą, kai valdiklis veikė 350 kHz dažniu ir labiausiai įšilo ritė, dėl per mažo induktyvumo šiam veikimo dažniui. Ši plokštė sudaryta iš didelių takelių plotų ir keturių sluoksnių, todėl nereikia naudoti papildomo aušinimo.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. ERICKSON, R. W. DC-DC Power Converters. Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, 2013 p. 4, 5 [žiūrėta 2016-03-15]. Prieiga per internetą: http://web.eecs.utk.edu/~dcostine/ECE482/Spring2016/materials/DCPowerConv.pdf
2. AL HASSAN, F. A Transformerless Step-Up DC-DC Converter. EMU, 2014, p. 1-15 [žiūrėta 2016-03-15]. Prieiga per internetą: http://i-rep.emu.edu.tr:8080/jspui/bitstream/11129/68/1/Hassan.pdf
3. WINDER, S. Power Supplies for LED Driving. USA, 2008, p. 39-133
4. RASHID, M. H. Power Electronics Handbook, Third Edition. USA, 2011, p. 249-410 [žiūrėta 2016-03-16]. Prieiga per internetą: http://minitorn.tlu.ee/~jaagup/kool/java/kursused/15/robootika/elektriopik.pdf
5. RADIKA, P. A High Efficiency DC-DC Boost Converter with Passive Regenerative Snubber. USA, 2013, p. 249-357 [žiūrėta 2016-03-18]. Prieiga per internetą: http://www.jeet.or.kr/LTKPSWeb/uploadfiles/be/201311/191120131355149246250.pdf
6. MARASCO, K. How to Apply DC-to-DC Step-Up/Step-Down Regulators Successfully. Analog Devices, 2011 [žiūrėta 2016-03-19]. Prieiga per internetą: http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/45-12/buck_boost.html
7. NELSON, C. LT1070 Design Manual. Linear Technology, 1986 [žiūrėta 2016-03-19]. Prieiga per internetą: http://cds.linear.com/docs/en/application-note/an19fc.pdf
8. MICROCHIP. MIC3223 Data Sheet. USA, 2010 [žiūrėta 2016-03-19]. Prieiga per internetą: http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/mic3223.pdf
9. EICHHORN, T. Boost Converter Efficiency Through Accurate Calculations. Power Electronics Technology Magazine Online, 2008, [žiūrėta 2016-03-20]. Prieiga per internetą: http://powerelectronics.com/power-management/boost-converter-efficiency-through-accurate-calculations
10. DUKA, I. High Frequency DC/DC Boost Converter. Worcester polytechnic institute, 2011, p. 11-28 [žiūrėta 2016-03-20]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=55bb935d6307d94f388b465d&assetKey=AS%3A273822983360534%401442295895002
11. KEEPING, S. Design Trade-offs when Selecting a High-Frequency Switching Regulator. Digi-Key, 2015 [žiūrėta 2016-04-09]. Prieiga per internetą: http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2015/feb/design-trade-offs-when-selecting-a-high-frequency-switching-regulator

12. KEEPING, S. Capacitor Selection is Key to Good Voltage Regulator Design. Digi-Key, 2014 [žiūrėta 2016-04-09]. Prieiga per internetą: http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2014/jun/capacitor-selection-is-key-to-good-voltage-regulator-design

13. LAIRD TECHNOLOGIES. Understanding SMD Power Inductors. 2011 [žiūrėta 2016-06-12]. Prieiga per internetą: http://www.lairdtech.com/brandworld/library/SMD%20Power%20Inductor%20Specifications%20and%20Applications.pdf

14. FALIN, J. Minimizing Ringing at the Switch Node of a Boost Converter. Texas Instruments, 2006 [žiūrėta 2016-12-12]. Prieiga per internetą: http://www.ti.com/lit/an/slva255/slva255.pdf

15. FAIRCHILD SEMICONDUCTOR. Resistor-Capacitor (RC) Snubber Design for Power Switches. Digi-Key, 2014 [žiūrėta 2016-12-12]. Prieiga per internetą: http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2014/aug/resistor-capacitor-rc-snubber-design-for-power-switches

16. CENELEC. Elektros apšvietimo ir panašios įrangos keliamų radijo trikdžių charakteristikų ribinės vertės ir matavimo metodai (CISPR 15:2013/A1:2015). Lietuvos standartizacijos departamentas, 2015 [žiūrėta 2017-03-27]. Prieiga per internetą: https://view.elaba.lt/standartai/view?search_from=aleph&id=1142484

17. TEXAS INSTRUMENTS. TPS55340 Integrated 5-A Wide Input Range Boost/SEPIC/Flyback DC-DC Regulator. USA, 2015 [žiūrėta 2017-03-29]. Prieiga per internetą: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps55340.pdf

18. TEXAS INSTRUMENTS. TPS55340EVM-017, 5-V to 12-V Input, 24-V Output Boost Evaluation Module. USA, 2012 [žiūrėta 2017-03-29]. Prieiga per internetą: http://www.ti.com/lit/ug/slvu668a/slvu668a.pdf

19. VAN ROY R. Reducing EMI in buck converters. Richtek Technology Corporation, 2016 [žiūrėta 2017-04-20]. Prieiga per internetą: http://www.richtek.com/Design%20Support/Technical%20Document/~/media/AN%20PDF/AN045_EN.ashx

20. UDRIS D. Elektroniniai galios keitikliai. Vilnius, 2008, p. 56-74 [žiūrėta 2017-04-02]. Prieiga per internetą: https://www.ebooks.ktu.lt/eb/435/elektroniniai_galios_keitikliai/