



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Aukšto dažnio įtampą aukštinančių maitinimo šaltinių
triukšmų slopinimo tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Justinas Milišauskas

Projekto autorius

Prof. Alvydas Dosinas

Vadovas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektros fakultetas

Aukšto dažnio įtampą aukštinančių maitinimo šaltinių triukšmų slopinimo tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

Justinas Milišauskas

Projekto autorius

Prof. Alvydas Dosinas

Vadovas

Lekt. Dainius Slušnys

Recenzentas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Justinas Milišauskas

Aukšto dažnio įtampą aukštinančių maitinimo šaltinių triukšmų slopinimo tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Justino Milišausko, baigiamasis projektas tema „Aukšto dažnio įtampą aukštinančių maitinimo šaltinių triukšmų slopinimo tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir 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)

Milišauskas, Justinas. Aukšto dažnio įtampą aukštinančių maitinimo šaltinių triukšmų slopinimo tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Alvydas Dosinas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Elektros inžinerija, Inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: įtampą aukštinantis maitinimo šaltinis, elektromagnetiniai triukšmai, aukštas dažnis.

Kaunas, 2020. 52 p.

Santrauka

Šis baigiamasis magistro projektas skirtas išanalizuoti aukštu dažniu veikiančių įtampą aukštinančių maitinimo šaltinių veikimo ypatumus, kompiuterinės įrangos pagalba sudaryti keitiklio modelį ir atlikti jo kompiuterinį tyrimą. Atlikti bandymus su eksperimentiniu maketu, nustatant jo parametrus prie skirtingų darbo režimų.

Literatūros analizės dalyje aptariamos pagrindinės aukštu dažniu veikiančių impulsinių maitinimo topologijos, jų pritaikymo sritys ir veikimo principai. Apžvelgiama jų veikimo metu atsirandančių triukšmų atsiradimo priežastys ir būdai juos slopinti ar išvengti.

Kompiuterinių tyrimų dalyje sudaromas įtampą aukštinančio keitiklio modelis. Tiriama schemos komponentų įtaka generuojamiems elektromagnetiniams triukšmams, išorės parametrų poveikis keitiklio darbo režimams ir komponentų šilimas.

Keitiklio eksperimentinių tyrimų dalyje atliekami bandymai su įtampą aukštinančio keitiklio maketu. Bandymu pagalba analizuojami keitiklio darbo režimai, prie skirtingų įėjimo ir apkrovos parametrų. Apskaičiuojamas maitinimo šaltinio naudingumo koeficientas, jam dirbant skirtingomis sąlygomis. Atliekamas schemos elemento šiluminių savybių tyrimas.

Milišauskas, Justinas. Evaluation of Noise Reduction in High Frequency Boost Converters / supervisor prof. doc. Alvydas Dosinas; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Electrical Engineering, Engineering Science.

Keywords: boost converter, electromagnetic interference, high frequency.

Kaunas, 2020. 52 p.

Summary

This final master's project is designed to analyze the characteristics of high-frequency voltage-boosting power supplies, to create a model of the converter with the help of computer equipment and to perform its computer research. Perform experiments with an experimental layout, setting its parameters to different operating modes.

The literature analysis section discusses the main high-frequency pulse power supply topologies, their areas of application and operating principles. The causes of noise during their operation and ways to suppress or avoid it are reviewed.

In the part of computer research, a model of a step-up converter is created. The influence of the circuit components on the generated electromagnetic noise, the influence of external parameters on the operating modes of the converter and the heating of the components are investigated.

In the experimental part of the converter, tests are performed with the model of the step-up converter. The test is used to analyze the operating modes of the converter at different input and load parameters. The efficiency of the power supply when operating under different conditions is calculated. A study of the thermal properties of a circuit element is performed.

Turinys

Paveikslų sąrašas	7
Santrumpų ir terminų sąrašas	9
Įvadas.....	10
1. Impulsiniai maitinimo šaltiniai	12
1.1. Impulsinių maitinimo šaltinių tipai ir veikimas	12
2. Elektromagnetiniai triukšmai	18
2.1. Elektromagnetinių triukšmų generavimo priežastys	18
2.2. Komponentų įtaka elektromagnetinių triukšmų atsiradimui	19
2.3. Elektromagnetinių triukšmų mažinimas.....	21
3. Šiuolaikinių nuolatinės srovės impulsinių maitinimo šaltinių sudarymas	25
3.1. Valdiklio LM5155 struktūra ir funkcijos.....	25
3.2. Aukšto dažnio įtampą aukštinančio keitiklio sudarymas	28
4. Aukšto dažnio įtampą aukštinančių maitinimo šaltinių kompiuterinis tyrimas	31
4.1. Maitinimo šaltinio modelio sudarymas	31
4.2. Galios tranzistoriaus parametrų įtaka generuojamiems elektromagnetiniams triukšmams.....	32
4.3. Keitiklio darbo režimų įtakos generuojamiems triukšmams kompiuterinis tyrimas	36
5. Keitiklio darbo režimų eksperimentinis tyrimas.....	40
5.1. Keitiklio darbo režimų eksperimentinis tyrimas.....	41
5.2. Šiluminis maitinimo šaltinio tyrimas	45
Išvados	47
Literatūros sąrašas	48
Priedai.....	51
1 priedas. MATLAB signalo spektrinės analizės kodas.	51
2 priedas. LM5155EVM-BST keitiklio schema.	52

Paveikslų sąrašas

1.1.1 pav. Įtampą žeminančio Buck tipo maitinimo šaltinio schema [8].....	13
1.1.2 pav. Įtampą aukštinančio-žeminančio maitinimo šaltinio schema [8].....	13
1.1.3 pav. Įtampą aukštinančio maitinimo šaltinio schema [8].....	14
1.1.4 pav. Tranzistoriaus srovės, įtampos ir droseliu tekančios srovės grafikai dirbant netrūkių srovės režimu [19]	14
1.1.5 pav. Tranzistoriaus srovės, įtampos ir droseliu tekančios srovės grafikai dirbant trūkių srovės režimu [19]	14
1.1.6 pav. Suminiai tranzistoriaus nuostoliai priklausomai nuo veikimo dažnio [20].....	15
1.1.7 pav. Galios tranzistoriaus ištakos-santakos įtampos ir srovės I_T grafikai [20]	16
1.1.8 pav. <i>Infineon Technologies</i> N kanalo galios tranzistorius IPC50N04S5L.....	16
2.1.1 pav. Tranzistoriaus santakos-ištakos įtampos grafikas su pastebimu švytavimu (angl. <i>Ringing</i>) [14]	18
2.1.2 pav. Sinchroninio Boost keitiklio schemas: a) - be parazitinių, b) - su parazitiniiais induktyvumais ir talpomis [15]	19
2.2.1 pav. Tranzistorius su parazitinėmis talpomis prieš įsijungimą [25].....	20
2.2.2 pav. Užtūros krūvio sudedamosios dalys ir tranzistoriaus įsijungimo charakteristika [25].....	20
2.3.1 pav. Hibridinės aktyvaus ir pasyvaus filtravimo schemas: a) filtrai įėjime, b) filtrai išėjime[17]	22
2.3.2 pav. Skaitmeninio aktyvaus filtro prijungimo prie nuolatinės srovės keitiklio struktūrinė schema [22]	22
2.3.3 pav. Skleidžiamų elektromagnetinių triukšmų leistinos ribos A klasės (kairėje) ir B klasės (dešinėje) įrangoje [27].....	23
2.3.4 pav. Skleidžiamų elektromagnetinių triukšmų leistinos ribos A klasės pramonės srityje naudojamoje įrangoje. Kairėje – beveik maksimalių ribų vertės, dešinėje – vidutinio triukšmų lygio vertės [27].....	24
3.1.1 pav. Valdiklio LM5155 funkcinė blokinė schema [26]	26
3.1.2 pav. Valdiklio ir elementų sujungimo schema, darbui prie 2,97-16 V įėjimo įtampos [26]....	26
3.1.3 pav. Valdiklio išjungimo ir sinchronizacijos su išoriniu PWM signalu schema [26].....	27
3.1.4 pav. CS išvade matuojamas srovės ir kompensavimo signalai [26]	27
3.1.5 pav. CS išvade matuojamas srovės ir kompensavimo signalai [26]	28
3.2.1 pav. Įtampą aukštinančio keitiklio schema su LM5155 valdikliu	30
4.1.1 pav. <i>WEBENCH® Power Designer</i> aplinkoje sumodeliuota keitiklio schema	32
4.2.1 pav. Kietiklių su 1-o tipo (raudona kreivė) ir 5-o tipo (mėlyna kreivė) tranzistoriais modeliavimo metu gautų jungiklio persijungimo įtampos kreivių palyginimas (a) ir išdidinti triukšmai (b)	33
4.2.2 pav. Keitiklių su 1-o tipo (a) ir 5-o tipo (b) tranzistoriais persijungimo įtampos signalo spektrinė analizė.....	34
4.2.3 pav. U_{sw} įtampos I harmonikos amplitudės kitimas prie skirtingų Ciss verčių	34
4.2.4 pav. U_{sw} įtampos III ir V harmonikų amplitudės kitimas prie skirtingų tranzistoriaus Ciss verčių	35
4.2.5 pav. Maitinimo šaltinio naudingumo koeficientas naudojant skirtingų parametrų tranzistorius prie skirtingų įėjimo įtampos verčių.....	36
4.3.1 pav. Keitiklio išėjimo įtampos grafikas, kai $U_{in} = 6\text{ V}$, $I_a = 1,5\text{ A}$	37

4.3.2 pav. Keitiklio išėjimo įtampos pulsacijų amplitudė, kai įėjimo įtampa 6 V (raudona), 12 V (pilka), 18 V (mėlyna)	37
4.3.3 pav. Tranzistoriaus šilimas keičiant apkrovos srovę, kai įėjimo įtampa 6 V (raudona), 12 V (pilka), 18 V (mėlyna)	38
4.3.4 pav. Maitinimo šaltinio naudingumo koeficientas keičiant apkrovos srovę, kai įėjimo įtampa 6 V (raudona), 12 V (pilka), 18 V (mėlyna).....	39
5.1.1 pav. LM5155EVM-BST keitiklio tyrimo schema	41
5.1.2 pav. Išėjimo įtampos grafikas, kai $U_{IN} = 6\text{ V}$, $I_A = 1,45\text{ A}$	41
5.1.3 pav. Išėjimo įtampos grafikas, kai $U_{IN} = 18\text{ V}$, $I_A = 1,45\text{ A}$	41
5.1.4 pav. Išėjimo įtampos pulsacijų amplitudės priklausomybė nuo išėjimo įtampos ir apkrovos srovės, kai įėjimo įtampa kinta nuo 6 V iki 18 V	42
5.1.5 pav. Apkrovos srovės grafikas, kai $U_{IN} = 6\text{ V}$, $I_A = 0,87\text{ A}$	42
5.1.6 pav. Apkrovos srovės grafikas, kai $U_{IN} = 18\text{ V}$, $I_A = 0,39\text{ A}$	42
5.1.7 pav. Apkrovos srovės pulsacijų amplitudės priklausomybė nuo išėjimo įtampos ir apkrovos srovės, kai įėjimo įtampa kinta nuo 6 V iki 18 V	43
5.1.8 pav. Keitiklio naudingumo koeficiento priklausomybė nuo apkrovos srovės ir įėjimo įtampos	43
5.1.9 pav. Apkrovos srovės pulsacijų grafikas, kai įėjimo įtampa 6 V, $I_A = 0,87\text{ A}$	44
5.1.10 pav. Apkrovos srovės pulsacijų amplitudės priklausomybė nuo keitiklio darbo dažnio, kai $I_A = 0,87\text{ A}$	45
5.2.1 pav. Eksperimentinis LM5155EVM-BST modelis šiluminių bandymų metu.....	45
5.2.2 pav. LM5155EVM-BST modelis šiluminių bandymų metu, $U_{in} = 6\text{ V}$, $I_a = 0,43\text{ A}$	45
5.2.3 pav. LM5155EVM-BST modelis šiluminių bandymų metu, $U_{in} = 6\text{ V}$, $I_a = 1,45\text{ A}$	46
5.2.4 pav. LM5155EVM-BST modelis šiluminių bandymų metu, $U_{in} = 6\text{ V}$, $I_a = 0,87\text{ A}$	46

Santrumpų ir terminų sąrašas

SMPS (angl. *Switch Mode Power Supply*) – impulsinis maitinimo šaltinis;

EMI (angl. *Electromagnetic Interference*) – elektromagnetiniai triukšmai;

ESR (angl. *Equivalent Series Resistance*) – nuosekioji ekvivalentinė varža;

MOSFET (angl. *Metal Oxide Silicon Field Effect Transistor*) – metalo-oksido-puslaidininkio lauko tranzistorius;

DAEF (angl. *Digital Active EMI Filter*) – skaitmeninis aktyvusis elektromagnetinių trukdžių filtras;

ADC (angl. *Analog-Digital Converter*) – analoginis-skaitmeninis keitiklis;

DAC (angl. *Digital-Analog Converter*) – skaitmeninis-analoginis keitiklis;

DC (angl. *Direct Current*) – nuolatinė srovė;

Boost – įtampą aukštinantis keitiklis;

Buck – įtampą žeminantis keitiklis;

Boost-Buck – įtampą aukštinantis-žeminantis keitiklis;

Flyback – izoliuotas transformatorinis grįžtamasis keitiklis;

DCM (angl. *Discontinuous Conduction Mode*) – trūkios srovės režimas;

CCM (angl. *Continuous Conduction Mode*) – netrūkios srovės režimas.

Įvadas

Impulsiniai nuolatinės srovės keitikliai turi platų pritaikymo spektrą, pavyzdžiui, nešiojami įrenginiai, biuro įranga, erdvėlaivių galios sistemos, įvairūs kompiuteriai, ryšių įranga, medicinos įranga, didelės galios perdavimo tinklų keitikliai. Keitikliui dirbant dideliu dažniu, kiekvieno ciklo metu reikalinga kaupti mažesnę kiekį energijos pasyviuosiuose elementuose. Todėl, šiais laikais dažnai sutinkami maitinimo šaltiniai, kurie persijunginėja dideliu ir labai dideliu dažniu (MHz eilių) naudojant impulso pločio moduliaciją. Toks keitiklių darbas leidžia mažinti droselių ir kondensatorių, kartu ir viso maitinimo modulio, matmenis bei kainą.

Šiuolaikinių impulsinių maitinimo šaltinių išėjimo įtampa ir srovė turi būti stabilios ir be pulsacijų, nes kartu su pulsacijomis išauga tikimybė skleisti nepageidaujamus triukšmus į tinklą ar pažeisti kitus prietaisus. Atsakingų prietaisų maitinimo šaltiniams bei didelės galios keitikliams taikomi griežti išėjimo įtampos ir srovės kokybės reikalavimai. Kuriant nešiojamų įrenginių maitinimo šaltinius dažnai pasitelkiami įtampą žeminantys keitikliai, o įtampą aukštinantys maitinimo šaltiniai pritaikomi atsinaujinančioje energetikoje, pramonėje (variklių valdymas bei pavaros), transporto sektoriuje, buityje. Impulsiniai maitinimo šaltiniai plačiai naudojami nešiojamuose įrenginiuose dėl galimų plačių įėjimo ir išėjimo įtampų verčių, aukšto naudingumo koeficiento, mažo komponentų skaičiaus. Tai leidžia gaminti mažesnių matmenų įrenginius ar rinktis mažesnės talpos, lengvesnius akumuliatorius.

Nuolatinės srovės keitiklio darbo sparta apibūdinama jungiklio, prietaiso, kuris valdo pagrindinius elektros energijos srautus, persijungimo dažniu. Jungiklio dažniausiai būna tranzistorius ir nuo jo priklauso pagrindinės maitinimo šaltinio charakteristikos. Tranzistoriui persijungiant, per jį vienu metu teka srovė ir jame krenta įtampa. Dėl šios priežasties išsiskiria šiluma ir yra patiriami nuostoliai. Besikeičiant jungiklio būsenoms, vyksta staigūs įtampos bei srovės šuoliai. Šių perjungimų metu, generuojami ir į aplinką skleidžiami elektromagnetiniai triukšmai. Šiluminiai nuostoliai ir elektromagnetinių triukšmų generacija atsiranda dėl elementų netobulumo, egzistuojančių parazitinių talpų, kurios kiekvienu periodu turi įsikrauti ir išsikrauti.

Siekiant padidinti tokių maitinimo šaltinių efektyvumą ir gauti aukštesnę komponentų integracijos lygį, didinamas jungiklio persijungimų dažnis. Dėl šių priežasčių, šiuolaikiniuose keitikliuose ypač svarbu atkreipti dėmesį į jų skleidžiamus triukšmus. Triukšmų slopinimui naudojamos įvairios valdymo schemas bei filtrai, didelis dėmesys skiriamas spausdinto montažo plokščių gamybai bei komponentų joje, takelių išdėstymui. Priklausomai nuo maitinimo šaltinio pritaikymo, parenkami atitinkamai tikslūs komponentai.

Siekiant kuo geresnių rezultatų, aukštesnio elementų integracijos lygio, didelio naudingumo koeficiento, mažų matmenų bei svorio, reikalinga didinti tranzistoriaus persijungimų dažnį. Visgi, norint turėti kompaktiškesnius keitiklius atsiranda problemos susijusios su didėjančiais generuojamais elektromagnetiniais trukdžiais bei jų slopinimu.

Darbo tikslas: ištirti aukštu dažniu veikiančių maitinimo šaltinių generuojamų elektromagnetinių triukšmų atsiradimo priežastis ir slopinimo būdus.

Darbo uždaviniai:

1. apžvelgti aukšto dažnio nuolatinės srovės keitiklių tipus bei veikimą;
2. išanalizuoti elektromagnetinių triukšmų atsiradimo priežastis bei jų slopinimo metodus;
3. atlikti kompiuterinį modeliavimą ir tirti elektromagnetinių triukšmų atsiradimo priežastis įtampą aukštinančiuose keitikliuose: įėjimo parametrų įtaką, keitiklio elementų įtaką, keitiklio išėjimo parametrų įtaką generuojamiems triukšmams;
4. atlikti eksperimentinius tyrimus su aukšto dažnio įtampą aukštinančiu konverteriu, keičiant įėjimo parametrus, stebint keitiklio darbo režimus.

1. Impulsiniai maitinimo šaltiniai

Energijos keitimo principai iš esmės pasikeitė, kai apie 1970-uosius metus buvo sukurti impulsiniai maitinimo šaltiniai (angl. *Switch Mode Power Supplies* – SMPS). Jie pasižymėjo didesniu efektyvumu, mažesniais šiluminiais nuostoliais, mažesne kaina bei svoriu nei tiesiniuose maitinimo šaltiniai. SMPS dabar randami televizoriuose, kompiuteriuose, nuolatinės srovės varikliuose, energijos kaupikliuose, naudojami atsinaujinančioje energetikoje bei šiuolaikinėse apšvietimo sistemose, ar kituose prietaisuose, kuriems reikalingas didelio naudingumo galios maitinimo šaltinis.

Siekiant sukurti kuo mažiau vietos užimančius prietaisus, reikalingi atitinkamai efektyvūs ir kompaktiški komponentai. Impulsiniuose maitinimo šaltiniuose vieną iš pagrindinių funkcijų atlieka galios jungiklis, kurio pagalba valdomi keitiklio energijos srautai. Šiai funkcijai atlikti naudojami MOSFET tranzistoriai dėl jiems būdingų sąlyginai mažų persijungimo nuostolių ir aukšto darbo dažnio. Keisti įtaiso įėjimo parametrus schemos išėjime, reikalingi energiją kaupiantys elementai – kondensatoriai bei droseliai. Tranzistoriui persijunginėjant aukštesniu dažniu, vyksta spartesnis energijos srautų kitimas, todėl galimi mažesnės talpos pasyvieji energiją kaupiantys elementai [1].

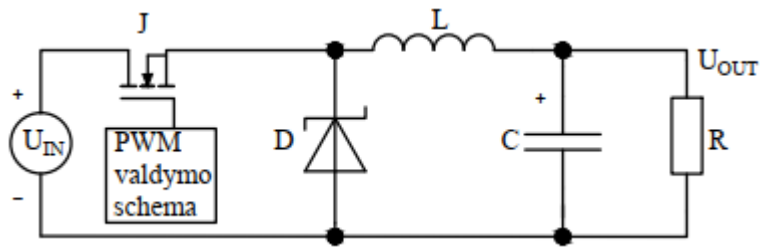
1.1. Impulsinių maitinimo šaltinių tipai ir veikimas

Priklausomai nuo pritaikymo srities, aukštu dažniu veikiančiuose nuolatinės srovės keitikliuose naudojamos įvairios aktyvių ir pasyvių energiją kaupiančių elementų kombinacijos. Impulsinių maitinimo šaltinių schemas galima padalinti į dvi grupes pagal izoliaciją tarp prietaiso įėjimo ir išėjimo. Izoliuoti keitikliai pasižymi dielektriniu įėjimo ir išėjimo grandinių atskyrimu, naudojant transformatorius. Transformatorius naudojamas kaupti energijai kiekvieno periodo metu. Jiems būdingas didelis komponentų kiekis, tačiau tai suteikia galimybę dirbti sistemose, kuriose reikalingas ypatingas saugumas. Šiai grupei priskiriami *Flyback* bei dvitakčiai keitikliai [7].

Neizoliuoti impulsiniai maitinimo šaltiniai dažnai yra paprastesni, kompaktiškesni ir neturintys galvaninio atskyrimo tarp schemos įėjimo ir išėjimo. Energija kaupiama droselio magnetiniame arba kondensatoriaus elektriniame lauke. Neizoliuoti keitikliai gali būti *Boost*, *Buck* ar *Boost-Buck* tipo. Šiuolaikiniai *SMPS* gaminami remiantis nesudėtingomis įtampą aukštinančių ir įtampą žeminančių keitiklių schemomis. Šios dažnai būna nesudėtingos bei kompaktiškos. Visgi, siekiant aukštesnės maitinimo šaltinio kokybės, pridedami papildomi komponentai ar schemos jungiamos tarpusavyje. Šiuolaikiniai maitinimo šaltiniai sudaromi remiantis tipinėmis, nesudėtingomis *Boost* ar *Buck* keitiklių schemomis

Vieno iš dažniausiai naudojamų keitiklių – Buck keitiklio schemos yra paprastos ir naudojamos kuriant sudėtingesnius maitinimo šaltinius. Jie skirti pažeminti įėjimo nuolatinę įtampą U_{IN} . Tokie maitinimo šaltiniai plačiai pritaikomi visur, kur reikalinga panaudoti, pavyzdžiui, tinklo įtampą pavarų maitinimui ar gamybos linijose, kur reikalinga 110 V ar mažesnę įtampą keisti į mikrovaldikliams maitinti tinkamą įtampą [8]. Šie keitikliai taip pat naudojami elektronikos maitinimui iš akumuliatorių baterijų, kai kraunantis ar išsikraunant kinta įtampa ant jų gnybtų, o apkrovai reikalinga pastovi, geros kokybės įtampa. Tam pasitelkiami skirtingi galios elementų valdymo būdai, papildomi išėjimo įtampos reguliatoriai. Buck keitikliai yra neizoliuoti impulsiniai maitinimo šaltiniai, kuriuose nuolatinė maitinimo įtampa, elektroninio jungiklio pagalba, yra periodiškai atjungiama nuo induktyvumo L ir apkrovos R. Nustatyto dažnio, periodiniams atjungimams naudojamas tranzistorius J (1.1.1 pav.). Tranzistoriui esant laidumo būsenoje, iš

maitinimo šaltinio srovė teka per droselį L , kondensatorių C ir apkrovą R . Šiuo laiko momentu, energija kaupiama droselio magnetiniame ir kondensatoriaus elektriniame laukuose.

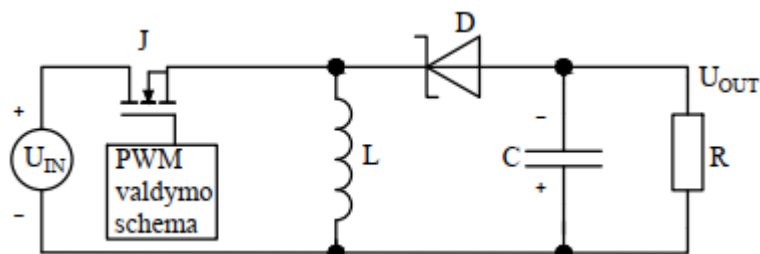


1.1.1 pav. Įtampą žeminančio Buck tipo maitinimo šaltinio schema [8]

Pakeitus tranzistoriaus būseną į išjungtą, maitinimo šaltinio įtampa atjungiamą nuo droselio. Rite tekanti srovė negali nutrūkti staiga, todėl magnetiniame lauke sukaupia energija palaiko apkrova tekančią srovę. Srovei sumažėjus, diodą D ima veikti tiesioginė įtampa ir šis atsitaro, leisdamas induktyvume sukaupiai energijai išsikrauti per apkrovą R . Kadangi kondensatoriaus įtampos nebepalaiko maitinimo šaltinis, kondensatorius taip pat išsikrauna. Apkrova tekanti srovė susideda iš abiejų pasyviųjų elementų srovių sumos. Išėjimo įtampos lygis kontroliuojamas keičiant jungiklio valdymo impulso plotį, kuris iš valdo laiką, per kurį elektroninis jungiklis yra įjungtas ir išjungtas.

Tokio keitiklio darbo efektyvumą galima padidinti pakeitus diodą D į valdomą tranzistorių. Tokia topologija turi pagrindinį tranzistorių, kuris atjungia ir prijungia maitinimo šaltinio įtampą, bei antrą, veikiantį priešingai, leidžiantį pasyviuosiuose elementuose kaupiamai energijai išsikrauti. Toks keitiklis vadinamas sinchroniniu Buck keitikliu ir pasiekia aukštesnį naudingumo koeficientą dėl mažesnių laidumo nuostolių.

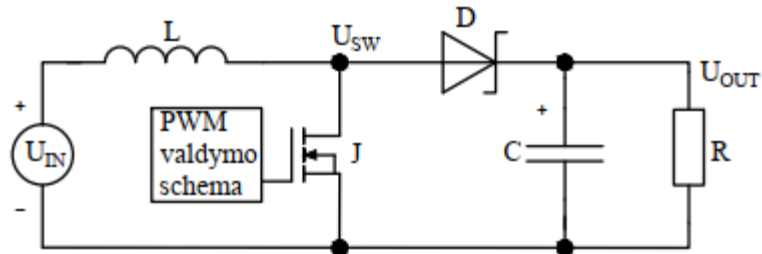
Nuolatinės srovės įtampą aukštinantys-žeminantys (angl. Buck-Boost) reguliatoriai gali naudoti įėjimo įtampas plačiose ribose – tiek žemesnę, tiek aukštesnę įtampą nei reikalinga keitiklio išėjime. Išėjimo įtampos amplitudė reguliuojama keičiant tranzistoriaus valdymo signalų plotį, keičiant laiką, kurį tranzistorius būna laidas srovei. Nesudėtingo Buck-Boost keitiklio topologija (1.1.2 pav.) yra panaši į įtampą žeminančio maitinimo šaltinio, tik schemos išėjime gaunama priešingo poliarumo įtampa [9]. Analogiškai, kai tranzistorius yra įjungtas, diodo D katodą veikia teigiamesnė įtampa nei anodą ir jis srovės nepraleidžia. Droseliu tekanti srovė kaupia energiją magnetiniame lauke, o apkrovos srovę palaiko tik išsikraunančio kondensatoriaus C energija. Pasikeitus jungiklio valdymo impulso vertei, diodas pereina į laidumo būseną ir induktyvumo srovė toliau teka ta pačia kryptimi. Šios būsenos metu, iš ritės tekanti srovė įkrauna kondensatorių bei palaiko apkrovos srovę.



1.1.2 pav. Įtampą aukštinančio-žeminančio maitinimo šaltinio schema [8]

Sparčiai vystantis elektromobilių rinkai, efektyviam akumuliatorių panaudojimui pritaikomi įtampą aukštinantys (angl. *Boost*) impulsiniai maitinimo šaltiniai. *Boost* keitikliai pasižymi plačiomis įėjimo įtampos vertėmis, kai keitiklio išėjime gaunama paaukštinta, stabilios amplitudės įtampa. Supaprastinta įtampą aukštinančio keitiklio schema pateikta 1.1.3 pav. Kai jungiklis J yra įjungtas,

per droselį L iš šaltinio tekanti srovė kaupia energiją magnetiniame lauke. Apkrovos srovė yra lygi išsikraunancio kondensatoriaus srovei. Išjungus tranzistorių, dėl staigaus srovės šuolio, srovė, tekanti droseliu negali kisti šuoliu. Droselyje sukuriama atgalinis magnetinis srautas ir priešingos krypties įtampa, palaikanti srovės tekėjimą. Tai lemia dviejų įtampų, įėjimo ir droselio, superpoziciją. Išjungtas jungiklis ir aukšta teigiama įtampa verčia diodą D pereiti į laidumo būseną. Taip induktyvumo srovė teka per apkrovą ir kondensatorių C , jį įkraunant aukštesne nei keitiklio įėjimo įtampa.

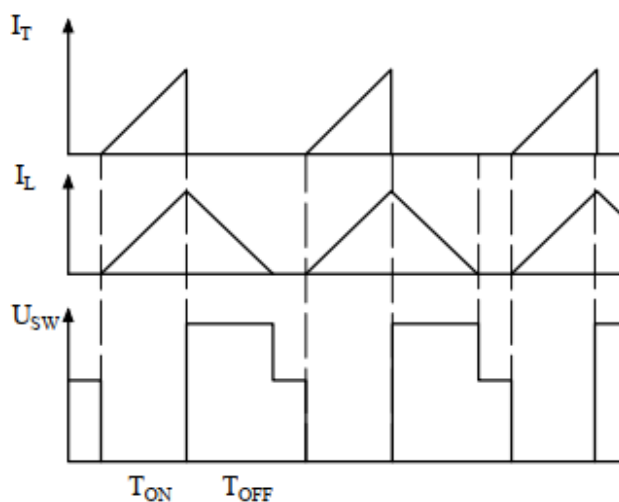


1.1.3 pav. Įtampą aukštinančio maitinimo šaltinio schema [8]

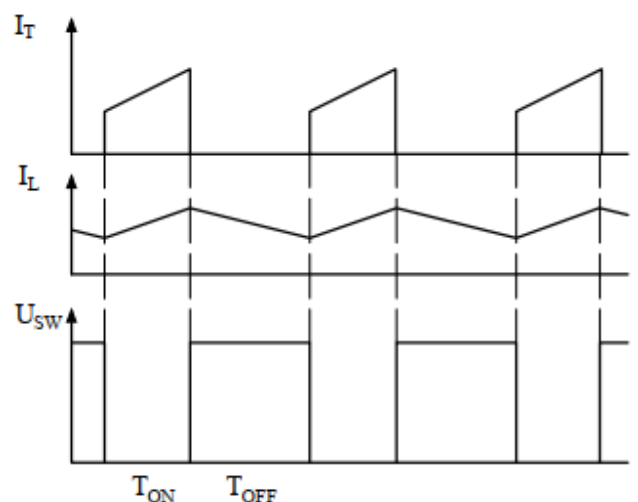
Impulsinio maitinimo šaltinio išėjimo įtampos vertė reguliuojama keičiant tranzistoriaus darbo laiką D . Jis priklauso nuo laiko T_{ON} , kurį tranzistorius yra atviras ir juo teka srovė, bei nuo laiko, kai jungiklis yra išjungtas T_{OFF} . Darbo laikas D apskaičiuojamas kaip laiko T_{ON} santykis su laiku, kurį trunka vienas periodas ($T_{ON} + T_{OFF}$):

$$D = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}}. \quad (1.1.1)$$

Įtampą aukštinantys nuolatinės srovės keitikliai, priklausomai nuo apkrovos dydžio, veikia nepertraukiamo laidumo režime (angl. *Continuous Conduction Mode – CCM*) arba pertraukiamo laidumo režime (angl. *Discontinuous Conduction Mode – DCM*). Šie režimai nurodo ar energijos kaupimo elemento (droselio) srovė kiekviename cikle nukrenta iki nulio, ar ne. Maitinimo šaltinis dirba *DCM* režimu, kai apkrova yra maža, dalį darbo ciklo srovė neteka per induktyvumą ir energija nekaupiama magnetiniame lauke. Tada, naujo ciklo metu, srovė visada pradeda didėti nuo nulio vertės (1.1.4 pav.), gaunamos didesnės įjungiamo tranzistoriaus srovės I_T pulsacijos.



1.1.4 pav. Tranzistoriaus srovės, įtampos ir droseliu tekančios srovės grafikai dirbant trūkios srovės režimu [19]



1.1.5 pav. Tranzistoriaus srovės, įtampos ir droseliu tekančios srovės grafikai dirbant netrūkios srovės režimu [19]

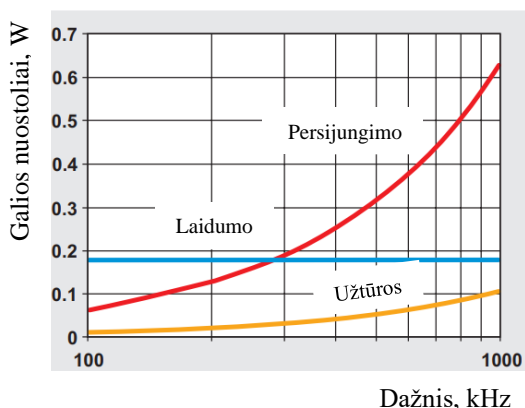
Esant didesnei maitinimo šaltinio apkrovai, kiekvieno ciklo metu turi būti perduodamas didesnis energijos kiekis. Laiko tarpo T_{ON} pradžioje, droselio magnetiniame lauke yra likusios sukauptos

energijos ir srovė I_L nėra pasiekusi 0 (1.1.5 pav.) [10]. Toks darbo režimas vadinamas nepertraukiamo laidumo režimu. Lyginant su *DCM*, *CCM* pažymi mažesniais jungiklio srovės pulsacijomis, didesniais šiluminiais nuostoliais droselyje, dėl nuolat jame esančios energijos ir tekančios srovės. Dėl mažesnių srovės pulsacijų, *CCM* režimu dirbantys nuolatinės srovės keitikliai pritaikomi darbui su didelės galios reikalaujančiomis apkrovomis [11].

Renkant schemas komponentus, kai žinoma, kad apkrova gali kisti plačiose ribose iki mažų verčių, pravartu parinkti valdiklius, galinčius dirbti valdymo impulsų praleidimo (angl. *pulse-skipping*) režimu. Į šį darbo režimą maitinimo šaltinis pereina, kai apkrovos srovė yra labai maža ir tranzistoriaus įjungtos būsenos laikas T_{ON} būtų mažesnis už minimalų leidžiamą laiką. Šio režimo metu valdiklis neleidžia tranzistoriui pereiti į įjungtą būseną vieną ar daugiau kartų, kad išėjimo įtampos vertė neviršytų nominalios vertės. Visgi, atliktų bandymu metu [12], gauta, kad *Buck* keitiklis, dirbdamas praleidinėjant valdymo impulsus, generuoja šiek tiek daugiau triukšmų, lyginant su darbu, kai apkrova tokia pati, normaliaame režime. Iš šių bandymų galima matyti, kad taikant impulsų praleidimo metodą, sumažėja šiluminiai nuostoliai, susiję su energijos perdavimu.

Kuo aukštesniu dažniu persijunginėja galios tranzistorius, tuo jis labiau šyla ir mažėja nuolatinės srovės keitiklio efektyvumas. Nuostoliai, atsirandantys impulsiniuose maitinimo šaltiniuose, gali būti suskirstyti į kelias grupes: nuo apkrovos priklausantys laidumo nuostoliai – dėl tranzistoriaus įjungtos būsenos varžos, diodo tiesioginės įtampos kritimo, droselio apvijų varžos, kondensatorių ekvivalentės nuosekliosios varžos (angl. *Equivalent Series Resistance* – ESR). Nuostoliai, priklausantys nuo keitiklio darbo dažnio, atsiranda dėl tranzistoriaus ir diodo parazitinių talpų įsikrovimo ir (ar) išsikrovimo, tranzistoriaus persijungimo nuostolių ir droselio šerdies nuostolių. Taip pat egzistuoja pastovūs nuostoliai dėl valdiklio laukimo režime nuotekio srovių.

Dažnai didesnės galios tranzistoriai pasižymi maža įjungtos būsenos santakos-ištakos varža. Didėjant tranzistoriaus matmenims, pasireiškia didesni parazitiniai talpumai, kurie sudaro nemažą dalį visų tranzistoriaus nuostolių. Tarp užtūros-santakos ir užtūros-ištakos esančios parazitinės talpos aprašomos kaip užtūros krūvis, kuris kiekvienu tranzistoriaus darbo ciklo metu turi būti įkraunamas ir iškraunamas. Didėjant įtaiso veikimo dažniui, šiek nuostoliai taip pat didėja dėl dažnesnių persikrovimų (žr. 1.1.6 pav.).

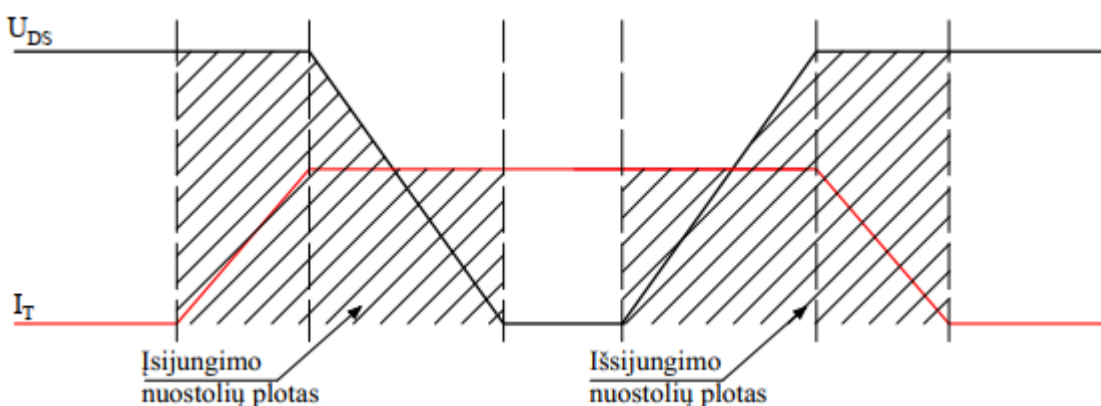


1.1.6 pav. Suminiai tranzistoriaus nuostoliai priklausomai nuo veikimo dažnio [20]

Pakankamai aukštu dažniu veikiančiuose impulsiniuose maitinimo šaltiniuose elektromagnetiniai nuostoliai droselio šerdyje žymiai padidėja, todėl šerdyje paliekamas oro tarpas. Projektuojant

keitiklį, dirbantį labai aukštų dažnių srityje, droselis takelių pavidalu paruošiamas ant montavimo plokštės [2], [3]. Kaip aprašoma [4], ištirtas dviejų sluoksnių, ant montažinės plokštės spausdintų, induktyvumą panaudojimas įtampą žeminančiame 5 W galios įtampos keitiklyje. Dirbant 10 MHz dažniu ir žeminant įtampą nuo 12 V iki 5 V, pasiektas net 84,7 % naudingumo koeficientas.

Šiuolaikiniuose aukštu dažniu veikiančiuose impulsiniuose maitinimo šaltiniuose jungiklio funkcijai atlikti naudojami *MOSFET* tranzistoriai. Nuolatinės srovės keitikliuose jie gali būti integruoti viename korpuse su valdikliu arba įrengiami atskirai. Idealiu atveju, tranzistorius, gavęs valdymo impulsą, būseną pakeičia tuo pačiu metu, kai per jį neteka srovė ir nekrenta įtampa. Visgi, kiekvieno persijungimo metu per santaką-ištaką teka srovė ir krenta įtampa, kuri sąlygoja išsiskiriančią galią (1.1.7 pav.). Ši galia iš sandūros pasišalina šilumos pavidalu. Didinant tranzistoriaus veikimo spartą, nuostoliai didėja dėl dažniau vykstančių persijungimų ir labiau šylančių komponentų. Naudojant neefektyvius galios jungiklius, reikalinga įvertinti jų šilumą, sumontuojant aktyvų ar pasyvų šilumos nuvedimą.



1.1.7 pav. Galios tranzistoriaus ištakos-santakos įtampos ir srovės I_T grafikai [20]

Užtikrinti palankesnes veikimo sąlygas, dėmesys atkreipiamas ne tik į vidinius elemento parametrus, bet ir į jo korpusą, išvadų skaičių, kontakto plotą. Pavyzdžiui: vieno iš bendrovės *Infineon Technologies* sukurto N kanalo galios tranzistoriaus santakos išvadas užima daugiau nei puse komponento dugno ploto (žr. 1.1.8 pav.). Toks sprendimas užtikrina geresnę kontaktą ir efektyvesnę



1.1.8 pav. *Infineon Technologies* N kanalo galios tranzistorius IPC50N04S5L

šilumos perdavimą į spausdinto montažo plokštę, kuri veikia lyg pasyvus aušintuvas.

Siekiant sumažinti nuo apkrovos priklausančius laidumo nuostolius ir didinti efektyvumą, įtampą aukštinančiame keitiklyje, vietoj išorinio Šotkio diodo, naudojamas kartu su pagrindiniu tranzistoriumi valdomas *MOSFET* tranzistorius. Toks keitiklis jau tampa sinchroniniu, nes išėjimo įtampai reguliuoti vietoj diodo naudojamas valdomos tranzistorius. Minėti diodai naudojami dėl aukšto persijunginėjimo dažnio, tačiau dėl krentančios tiesioginės įtampos sandūroje išsiskiria nuostoliai šilumos pavidalu. Tyrimai [24] parodė, kad juos pakeitus į *MOSFET*, sumažėja elemento šilumas, kadangi įjungto tranzistoriaus santakos-ištakos varža yra maža ir krenta mažesnė įtampa.

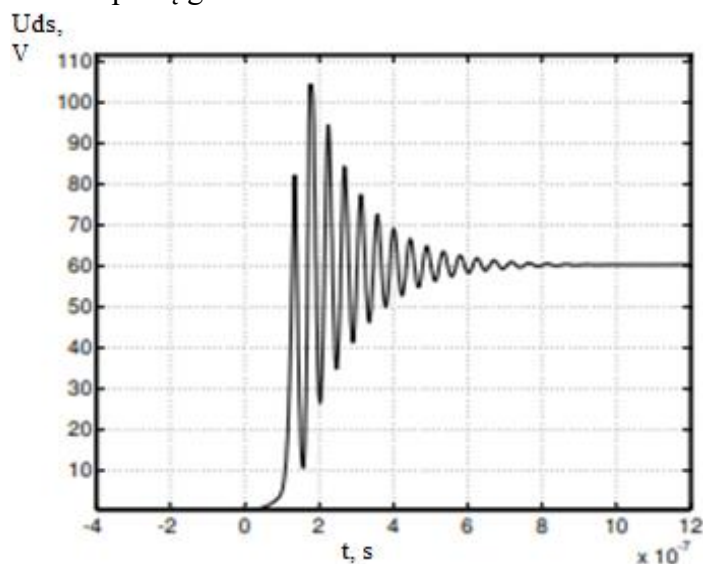
Didinant nuolatinės srovės keitiklių efektyvumą ir siekiant aukštesnio komponentų integracijos lygio, keliamas schemos darbo dažnis. Dažnesni tranzistoriaus persijungimai, pasyvių elementų įsikrovimai ir išsikrovimai, sąlygoja problemas, atsirandančias dėl parazitinių takelių induktyvumų ir parazitinių elementų talpumų. Didėjant srovių ir įtampų pulsacijoms, atsiranda signalų iškraipymai. Į tinklą ir į eterį išspinduliuojama daugiau elektromagnetinių triukšmų, kurių slopinimui pasitelkiami įvairūs filtrai ar taikomos kitos priemonės. Kaip aprašyta [5], elementai talpinami į metalinį įžemintą korpusą, sumažinant parazitinių dydžių įtaką sklaidžiamiesiems į eterį triukšmams. Pavyzdžiui, gaminami droseliai su uždaru, ekranuotu korpusu. Tai padidina jų kainą, tačiau apsaugo aplinkoje esančią jautrią įrangą. Taip pat reikalinga atkreipti dėmesį į komponentų išdėstymą montavimo plokštėje, mažinant takelių atstumus, kuriais sklinda aukšto dažnio signalai.

2. Elektromagnetiniai triukšmai

2.1. Elektromagnetinių triukšmų generavimo priežastys

Elektromagnetiniai triukšmai yra apibrėžiami kaip bet kokia perduota laidininku ar išspinduliuota į aplinką elektromagnetinė energija, galinti sutrikdyti, nutraukti ar kitaip riboti veiksmingą telekomunikacijų ar kitų elektros ir elektroninės įrangos veikimą [13]. Impulsiniai maitinimo šaltiniai dirbdami su apkrova, į tinklą skleidžia platų spektrą aukštesniųjų eilių harmonikų dėl staigių įtampos bei srovės šuolių, jungiklio persijunginėjimo aukštu dažniu, metu. Galios elektronikos keitikliuose esantys jungikliai (tranzistoriai) yra vieni iš pagrindinių elektromagnetinių triukšmų (angl. *Electromagnetic Interference* – EMI) šaltinių. Triukšmai kyla dėl staigaus galios jungiklio būsenos pasikeitimo, t. y. dėl periodinių ir staigių įtampos pokyčių ant tranzistoriaus, bei šuoliško srovės kitimo (didelis srovės pokytis dI per trumpą laiką dt – didelis dI/dt). Tranzistoriaus įtampos kitimo grafikas pateiktas 2.1.1 paveikslėlyje, kuriame matomi minėti staigūs šuoliai. Triukšmai yra glaudžiai susiję su puslaidininkio prietaiso struktūros parazitiniiais talpumais ir induktyvumais, spausdintos montažo plokštės takelių induktyvumais.

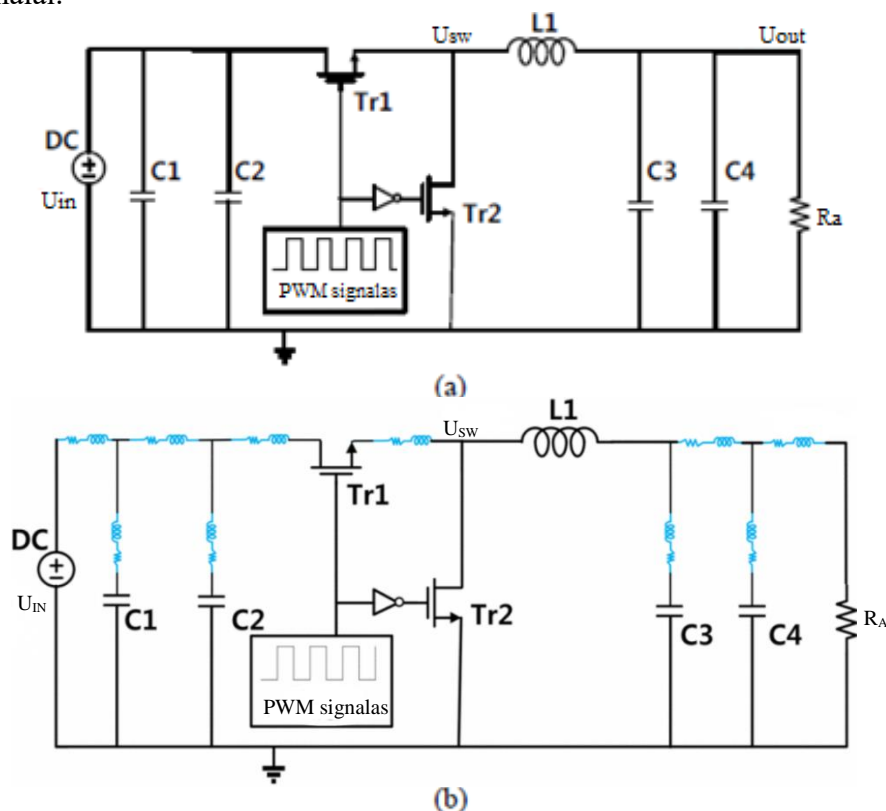
Vieni iš dažniausiai impulsiniuose maitinimo šaltiniuose pasitaikančių elektromagnetinių triukšmų yra slopstantieji. Pastarieji atsiranda kaskart persijungiant tranzistoriui ir pasižymi mažėjančia amplitudė laikui bėgant (žr. 2.1.1 pav.) [14]. Maksimali virpesių amplitudė gali gerokai viršyti schemos elemento nominalius parametrus ir jį pažeisti negrįžtamai. Dėl šios priežasties privalu atkreipti dėmesį parenkant komponentus maitinimo šaltiniams. Triukšmai taip pat gali būti priverstiniai ir laisvieji. Laisvieji egzistuoja tik idealiose grandinėse, kuriose nėra varžos energijai iškrauti. Priverstiniai trikdžių virpesiai yra neslopstantys, jų amplitudė laikui bėgant nemažėja dėl nuolat energija papildomos virpesių grandinės.



2.1.1 pav. Tranzistoriaus santakos-ištakos įtampos grafikas su pastebimu švytavimu (angl. *Ringing*) [14]

Kita dalis impulsinių maitinimo šaltinių generuojamų elektromagnetinių triukšmų atsiranda dėl schemos elementų netobulumo, parazitinių dydžių egzistavimo. Vykstant pereinamiesiems procesams parazitinės talpos ir induktyvumai įsikrauna/išsikrauna, generuodami elektromagnetinius trikdžius. Kaip pavyzdys [15] pateikiama įtampą aukštinančio Boost keitiklio principinė schema (2.1.2 pav. a) bei ta pati papildyta schema su parazitiniiais dydžiais, kurie 2.1.2 pav. b) išskirti mėlynai. Pažymėtina, kad induktyvumas turi lygiagrečiai prijungtas parazitinę varžą ir talpą. Projektuojant

aukštu dažniu dirbančius keitiklius, būtina atkreipti dėmesį į naudojamų komponentų parametrus, kad dėl pašalinių dydžių nesusidarytų nepageidaujami rezonansiniai kontūrai ar nebūtų per daug iškraipomi signalai.



2.1.2 pav. Sinchroninio Boost keitiklio schemas: a) - be parazitinių, b) - su parazitiniiais induktyvumais ir talpomis [15]

„Kietai“ persijungiančiuose keitikliuose (aukštas dI/dt) reikalinga atkreipti dėmesį į parazitinių induktyvumą tarp galios tranzistoriaus ištakos (angl. *Source*) ir keitiklio žemės. Status signalo frontas veikdamas kartu su parazitine talpa generuoja aukštos amplitudės, MHz eilės virpesius. Kuo didesnės galios maitinimo šaltinis, tuo labiau pasireiškia elektromagnetinių triukšmų generavimas. Svarbu nepamiršti schemas elementų išdėstymo ant spausdinto montažo plokščių. Gaminant kelių sluoksnių, brangesnes plokštes, pasiekiami trumpesni atstumai, kuriuos turi įveikti signalai.

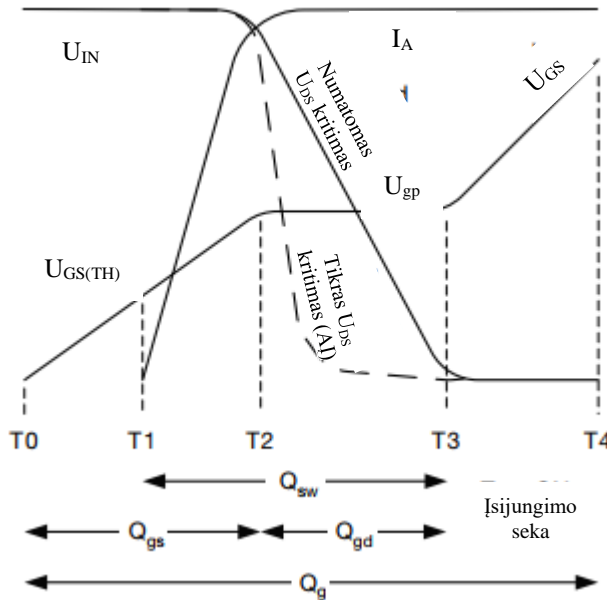
Keitikliui dirbant aukštu dažniu, esant ilgiems takeliams tarp komponentų, didėja takelių parazitinis induktyvumas, o didėjant takelių tankiui, atitinkamai didėja ir parazitinis talpumas. Didinant impulsinio maitinimo šaltinio veikimo dažnį n kartų skaičių, generuojami triukšmai gali padidėti n^2 kartų. Tai reiškia, kad padidinus keitiklio darbo dažnį nuo 200 kHz iki 400 kHz, į eterį sklaidžiami triukšmai gali padidėti net 4 kartus [6]. Generuojami trikdžiai sudaryti iš plataus spektro elektromagnetinių bangų, todėl gali trikdyti ne tik pačio maitinimo šaltinio darbą bet ir ryšio ar kitos elektronikos veikimą. Visgi, EMI atsiradimą lemia ne vien keitiklio veikimo dažnis ar elementų išdėstymas ant spausdinto montažo plokštės.

2.2. Komponentų įtaka elektromagnetinių triukšmų atsiradimui

Šiuolaikiniuose impulsiniuose maitinimo šaltiniuose, MOSFET dažnai valdomi skaitmeniniais įtaisais į užtūrą davus didesnės amplitudės signalą nei nurodoma slenkstinė įtampa $U_{GS(TH)}$. Vykstant valdymui loginiais signalais, dažnai priimama, kad tranzistorius pereina į laidumo būseną vos tik valdymo įtampa viršija slenkstinę. Visgi, minėtas puslaidininkinis prietaisas būsenos momentaliai

pakeisti negali, todėl maitinimo šaltiniuose generuojamų trukdžių atsiradimą taip pat lemia galios tranzistoriaus įsijungimo ir išsijungimo laikai.

Realus MOSFET įsijungimas priklauso nuo elemento parazitinių talpų, kurių dalį apibendrina užtūros krūvis Q_g . Q_g kitimo kreivė su užtūros-ištakos įtampos U_{GS} kitimu nėra tiesinė bei nepanaši į kondensatoriaus krūvio kitimo charakteristiką. Taip yra dėl to, nes krūvio Q_g kreivė (2.2.2 pav.) atstoja dviejų kondensatorių superpoziciją (užtūros-ištakos C_{gs} ir užtūros-santakos C_{gd}), kurie



2.2.1 pav. Užtūros krūvio sudedamosios dalys ir tranzistoriaus išsijungimo charakteristika [25]

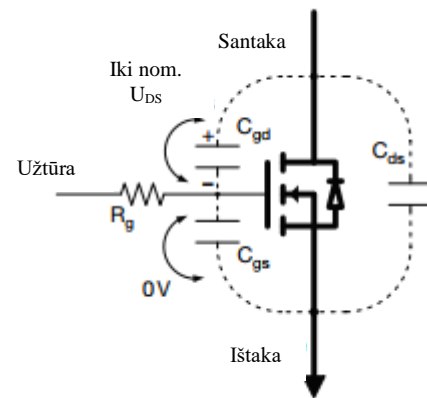
tarpusavyje nėra sujungti nei nuosekliai, nei lygiagrečiai. Šie kondensatoriai yra skirtingų parametrų, įsikrauna iki skirtingų įtampos verčių. Vietoj užtūros talpos ar krūvio, literatūroje ir tranzistorių duomenų pasuose aprašoma aktyvioji, arba įėjimo talpa C_{iss} , kuri lygi:

$$C_{iss} = C_{gs} + C_{gd} \quad (2.2.1)$$

Visgi, C_{iss} nėra reali talpa ir tranzistorius neįsijungia užkrovus šią talpą. Kaip matoma 2.2.1 paveiksle, prieš MOSFET įjungimą, kondensatorius C_{gs} neturi sukaupęs krūvio, tačiau C_{gd} yra įkrautas neigiamu krūviu, kuris turi būti iškrautas.

Į užtūrą davus valdymo įtampą U_{GS} , laiko momentu T0-T1 kondensatorius C_{gs} įsikrauna iki slenkstinės $U_{GS(th)}$ įtampos, tranzistoriaus įėjimo įtampai nekintant. Kadangi talpų C_{gs} ir C_{gd} vertės yra įtampos U_{ds} funkcijos, šiuo metu C_{gs} ir C_{gd} yra pastovios vertės. U_{GS} pasiekus slenkstinę įtampą, formuojasi laidus kanalas ir laiko momentu T1 pradeda tekėti srovė I_{DS} . Laiko momentu T2, valdymo įtampai pakilus iki Milerio plokštumos (angl. „Miller plateau“) įtampos U_{GP} , apkrovos srovė pasiekia maksimalią vertę. Laiko tarpe T2-T3 neigiamas ($U_{in} - U_{gp}$) krūvis virsta teigiamu, įtampos U_{gp} atžvilgiu. Tai pastebima santakos įtampos kritimu nuo vertės U_{in} iki beveik 0, kai krūvis Q_{gd} teka į užtūrą. Šio krūvio vertė apskaičiuojama kaip talpos C_{gd} integralas nuo 0 iki įėjimo įtampos vertės. U_{gs} signalui pasiekus laiko momentą T3, tranzistorius laikomas įsijungusiu, apkrovos srovė ir U_{gs} laikomos pastoviomis.

T3-T4 atkarpoje (2.2.2 pav.), priklausomai nuo valdymo signalo amplitudės, nustatoma aktyvioji santakos-ištakos varža $R_{DS(on)}$. Idealiu atveju, kuo mažesnė ši varža, tuo mažesni šiluminiai nuostoliai,



2.2.2 pav. Tranzistorius su parazitinėmis talpomis prieš išsijungimą [25]

atsirandantys dėl tekančios apkrovos srovės. Didesnių matmenų tranzistoriai turi mažesnę $R_{DS(on)}$. Visgi, didėjant jungiklio matmenims, atitinkamai didėja atstumai tarp takelių ir skirtingų sluoksnių. Tai sukelia nepageidaujamą parazitinių talpų augimą ir lėtesnį tranzistoriaus darbą.

Žinant, kad generuojamų trukdžių dažnio spektras priklauso nuo perjungimo metu atsirandančių įtampos ir srovės frontų statumo, galima įvertinti kokio dažnio trukdžiai bus skleidžiami. Impulsiniuose maitinimo šaltiniuose naudojami įvairių parametru MOSFET tranzistoriai. Įvertinus parazitines elementų savybes galima apytiksliai apskaičiuoti kiek laiko trunka visas tranzistoriaus įsijungimo ciklas, ar per kiek laiko iškrauna parazitinė C_{gs} talpa ir apkrovos srovė pasiekia maksimalią vertę [25]. Tam galima panaudoti literatūroje pateiktas formules. Pavyzdžiui, apkrovos srovės fronto kilimo laikas t_{ir} apskaičiuojamas:

$$t_{ir} = t_2 - t_1 = R_G * C_{iss} * \ln\left(\frac{U_{GS} - U_{TH}}{U_{GS} - U_{GP}}\right) \quad (2.2.2)$$

kur R_G yra parazitė užtūros varža.

Panaudojant tranzistorių duomenų lentelėse pateiktus duomenis, galima įvertinti per kiek laiko tranzistoriaus I_{ds} srovė pasiekia maksimalią vertę. Atitinkamai lygint keletos skirtingų parametru tranzistorių srovės kitimo frontus, galima pastebėti, kad kuo tranzistorius greičiau persijungia (statesnis srovės frontas), tuo aukštesnės eilės harmonikos yra generuojamos.

2.3. Elektromagnetinių triukšmų mažinimas

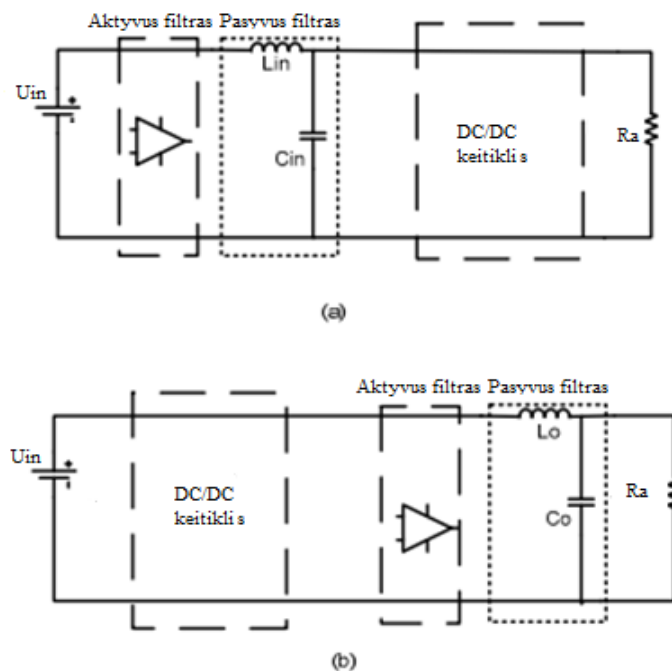
Laidininkais keliaujantys EMI gali būti susilpninti prijungiant schemos įėjimui nuosekliai didelę varžą arba lygiagrečiai mažą. Tai gali būti įgyvendinama naudojant pasyvius LC komponentus. Toks EMI triukšmų filtravimo būdas vadinamas pasyviuoju. Atsižvelgiant į konkretaus maitinimo šaltinio pritaikymo sritį ir komponentus, su kuriais jis dirba, šiais laikais pasyvieji filtrai dažniausiai neatitinka keitikliams keliamų reikalavimų. Tam gali būti naudojami kelių pakopų filtrai. Visgi, toks sprendimas atitinkamai didina įrenginio matmenis ir svorį, nes pasyviniai filtrai yra ganėtinai dideli ir tai nepadedą slopinti žemesnės eilės triukšmų [21].

Nuolatinės srovės keitiklių išėjimo įtampa dažnai turi aukšto dažnio iškraipymų. Šių iškraipymų dažnis yra kartotinis keitiklio veikimo dažniui. Šiuolaikiniuose maitinimo šaltiniuose, mažinant droselių ir kondensatorių matmenis, didinamas schemos darbo dažnis. Tai iššaukia aukštesnio dažnio triukšmus ir, atitinkamai, apkrovos įtampa tampa dar labiau iškraipyta.

Papildomai, išėjimo kondensatoriai turi parazitinę nuoseklią varžą (ESR), kuri prisideda prie įtampos iškraipymų. Siekiant geresnių rezultatų, naudojami keraminiai kondensatoriai, kurių vidinė nuosekloji varža yra palyginti maža, nors didesnės talpos jie yra ganėtinai brangūs. Kaip pigesnė alternatyva naudojami aliuminio elektrolito ir tantalo kondensatoriai, bet jų ESR žymiai didesnė.

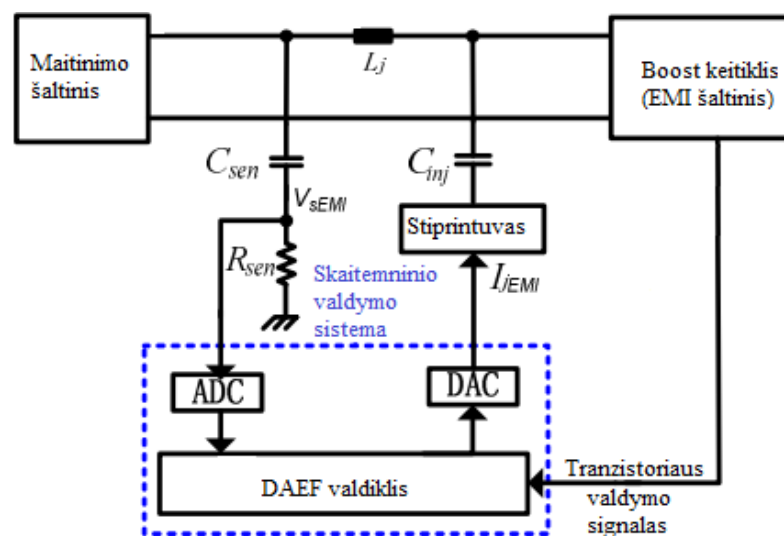
Siekiant geresnių rezultatų, naudojami aktyvūs filtrai, kurie dažnai jungiami keitiklio išėjime [16]. Atliekami tyrimai ir su įėjime jungiamais aktyviais filtrais [17]. Tokie bandymai aprašyti jungiant hibridinį filtrą (LC pasyvus ir aktyvus filtras) į keitiklio įėjimą. Filtras skirtas nustatyti trukdžių dydžiui ir paduoti atgal priešingo poliarumo signalą. 2.3.1 pav. pateiktos schemos su parodytais galimais keletu hibridinių filtrų jungimo būdų. Atlikti bandymai [21] parodė, kad prijungtas pasyvus filtras žymiai sumažina keitiklio skleidžiamus MHz eilės dažnių triukšmus. Visgi, norint pasiekti visapusiškai gerų rezultatų, kartu prijungtas aktyvusis filtras su trijų apvijų transformatoriumi. Gauti

rezultatai su 2.3.1 paveikslėlio b) schema parodė, kad hibridinis filtras efektyviai slopina elektromagnetinius triukšmus tiek prie žemų, tiek prie aukštesnių dažnių.



2.3.1 pav. Hibridinės aktyvaus ir pasyvaus filtravimo schemas: a) filtrai įėjime, b) filtrai išėjime[17]

Impulsinių maitinimo šaltinių skleidžiamų triukšmų slopinimui naudojamos ir pažangesnės schemas, naudojami skaitmeniniai aktyvieji EMI filtrai (angl. *digital active EMI filter – DAEF*) [22][23]. Principinė tokio filtro prijungimo schema pateikta 2.3.2 pav. Sugeneruotas triukšmo signalas aptinkamas RC filtru nuolatinės srovės įėjimo grandinėje ir analoginio-skaitmeninio keitiklio (angl. *analog-digital converter – ADC*) pagalba signalas pakeičiamas į skaitmeninį. Tuomet gautas signalas invertuojamas, pakeičiama jo fazė, kad gautas signalas būtų priešingas triukšmui ir jų suma būtų lygi 0. Invertuotas signalas atstatomas skaitmeninių-analoginių keitiklių (angl. *digital-analog converter DAC*) ir duodamas atgal į įėjimo grandinę.



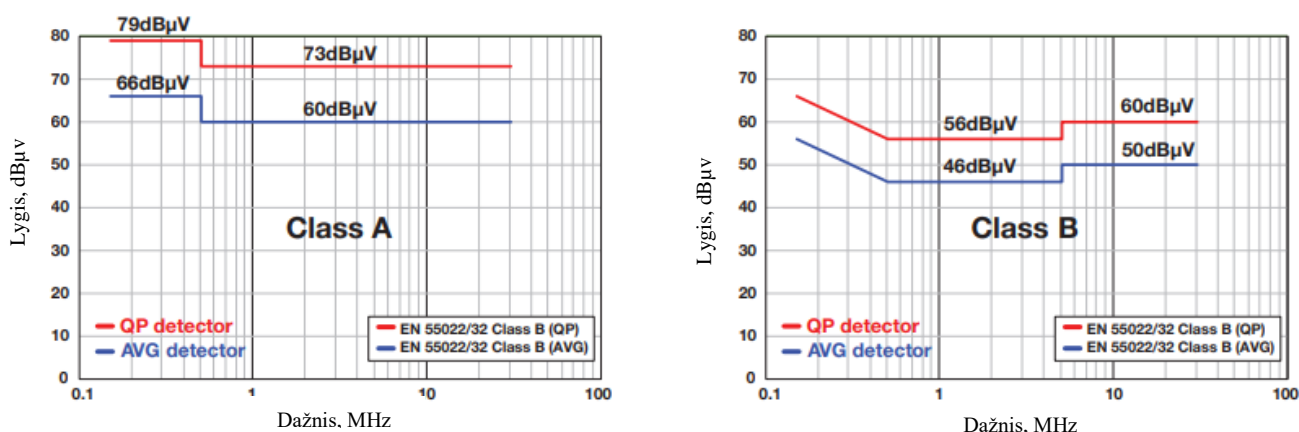
2.3.2 pav. Skaitmeninio aktyvaus filtro prijungimo prie nuolatinės srovės keitiklio struktūrinė schema [22]

Kitas būdas valdyti ir kiek galima sumažinti sklaidžiamus EMI triukšmus yra spausdintų plokščių tinkamas paruošimas ir elementų išdėstymas ant jų. Spausdinto montažo plokščių paruošime svarbu tinkamas takelių ir tam tikrų sluoksnių projektavimas. Pavyzdžiui [18] atkreiptas dėmesys į kelių sluoksnių plokštę ir žemės (angl. GND – *ground*) sluoksnio dydį. Eksperimentų metu gauta, kad vientiso GND sluoksnio įrengimas po jungikliu yra tinkamiausias būdas mažinti generuojamiems EMI triukšmams ir persijungimų virpesiams.

Taip pat svarbu parinkti atitinkamus atstumus tarp skirtingų komponentų ant montažinės plokštės. Aukšto dažnio signalams sklindant variniais takeliais, takeliai elgiasi kaip antenos, spinduliuojančios radijo dažnio triukšmus. Dėl šios priežasties reikia stengtis mažinti atstumus tarp dalių, tarp kurių vyksta aukšto dažnio signalų perdavimas. Taip pat šalia triukšmus generuojančių dalių, pavyzdžiui tranzistoriaus, ar šalia išėjimo, įrengiami filtrai ar bent aukšto dažnio triukšmams filtruoti, tarp signalo takelio ir GND įlituojami mažos talpos keraminiai kondensatoriai.

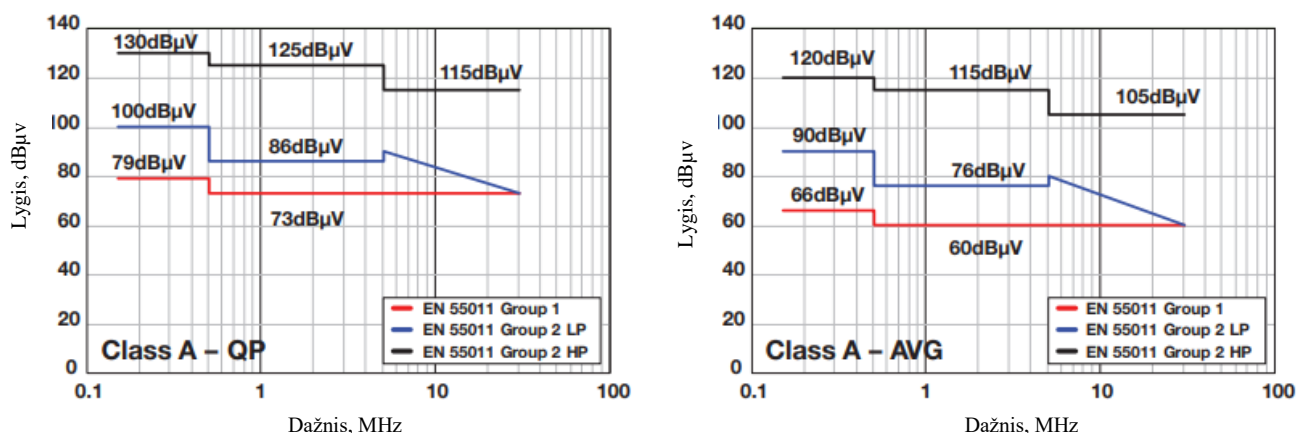
Kaip buvo minėta ankščiau, boost keitikliuose keičiant diodą į valdomą tranzistorių, gaunamas didesnis schemas naudingumas. Tuo pačiu, minėtą tranzistorių montuojant viename luste, kartu su pagrindiniu jungikliu, keitiklis tampa kompaktiškesnis. Taip gaunami trumpesni valdymo signalų keliai, kas gerina išėjimo įtampos kokybę.

Maitinimo šaltinių į eterį sklaidžiamų triukšmų reikalavimus, jų matavimo būdus aprašo Europos elektrotechnikos standartizacijos komitetas (angl. *European Committee for Electrotechnical Standardization - CENELEC*). Šiuo metu galiojantis LST EN 55032:2015 „Elektromagnetinis multimedijos įrangos suderinamumas. Spinduliavimo reikalavimai (CISPR 32:2015) aprašo multimedijos maitinimo šaltiniams keliamus reikalavimus. 2.3.3 paveiksle pateikti grafikai su A ir B klasės įrangos generuojamų EMI leistinomis vertėmis. Maitinimo šaltiniai, skirti naudoti gyvenamojoje aplinkoje, privalo neviršyti B klasės ribų, o visa kita įranga – neviršyti A klasės reikalavimų [27].



2.3.3 pav. Skleidžiamų elektromagnetinių triukšmų leistinos ribos A klasės (kairėje) ir B klasės (dešinėje) įrangoje [27]

2.3.4 pav. pateiktos ribos, kai matuojamos skleidžiamų trukdžių vidutinės vertės (mėlyna kreivė) ir beveik maksimalios (angl. *quasi-peak*) vertės. Tikrinant įrangos tinkamumą, generuojamų trukdžių vertės negali viršyti nei vienos iš minėtos ribos. Kitu atveju, privalu imtis veiksmų, kad 150 kHz – 30 MHz dažnių ribose generuojamų trukdžių amplitudės būtų sumažintos.



2.3.4 pav. Skleidžiamų elektromagnetinių triukšmų leistinos ribos A klasės pramonės srityje naudojamoje įrangoje. Kairėje – beveik maksimalių ribų vertės, dešinėje – vidutinio triukšmų lygio vertės [27]

Apšvietimo įrangos generuojamiems trukdžiams įvertinti naudojamas atskiras LST EN 55015:2013/A1:2015 standartas. Pramonėje naudojamos įrangos (indukcinės krosnys, lankinio suvirinimo aparatai ir kt.) tinkamumui įvertinti naudojamas CISPR/EN 55011 A klasės standartas. 2.3.4 paveikslėlyje pateiktuose grafikuose matoma, kad A klasės įrangai taikomi reikalavimai skirstomi į grupes: bendro naudojamo įrenginiams ir radijo dažnio įrangai.

Projektuojant aukštu dažniu veikiančią impulsinį maitinimo šaltinį, dėl keliamų aukštų reikalavimų įrangos skleidžiamiems elektromagnetiniams triukšmams, svarbu įvertinti galimas EMI ribas skirtingose pritaikymo srityse. Turi būti parinkti specialūs valdikliai, gebantys palaikyti išėjimo įtampą ar apkrovos srovę, stabiliai dirbti kintant apkrovai ar įėjimo parametrams. Taip pat turi būti atkreiptas dėmesys parenkant kitus keitiklio komponentus, kad šie neiškreiptų signalų ar kitaip netinkamai nepaveiktų maitinimo šaltinio darbo.

3. Šiuolaikinių nuolatinės srovės impulsinių maitinimo šaltinių sudarymas

Dabartiniai impulsiniai maitinimo šaltiniai turi platų pritaikymo spektrą. Jie naudojami darbui su kintančiomis apkrovomis, plačiose ribose kintančiomis įėjimo parametrų vertėmis, gali būti nustatomi dirbti tam tikrais režimais.

Skirtingi maitinimo šaltiniai gali pasižymėti funkcijomis, reikalingomis specifinėse pritaikymo srityse. Pavyzdžiui: apšvietimo šviesos diodams skirti nuolatinės srovės keitikliai gali turėti išvadus, skirtus apšvietimo intensyvumui ar spalvai reguliuoti. Kiti maitinimo šaltiniai turi galimybę būti pervesti į tranzistoriaus valdymo signalų dažnių spektro išplėtimo režimą, kuris skirtas mažinti skleidžiamus elektromagnetinius triukšmus, keičiant tranzistorių valdymo dažnių diapazoną.

Šiuolaikinio keitiklio funkcionalumas iš esmės priklauso nuo jame naudojamo specialaus valdiklio. Tokie valdikliai skirti valdyti pagrindinius energijos srautus, įvertinant grįžtamųjų grandinių signalus, įėjimo signalų parametrus, koreguoti sistemos darbą, atsižvelgiant į kintančią apkrovą ar įėjimo parametrus. Kiekvieną valdiklį sudaro loginiai elementai, signalų generatoriai, srovės šaltiniai, tranzistoriai. Siekiant aukšto schemos elementų integracijos lygio, pasitaiko kartu viename luste integruotų galios tranzistorių, skirtų komutuoti pagrindinius energijos srautus. Į valdiklį integruojamos grandinės, skirtos temperatūrinei apsaugai, apsaugai nuo viršįtampių, per mažos ar per didelės įėjimo srovės, bei darbo sinchronizavimui išorinių signalų ar elementų pagalba.

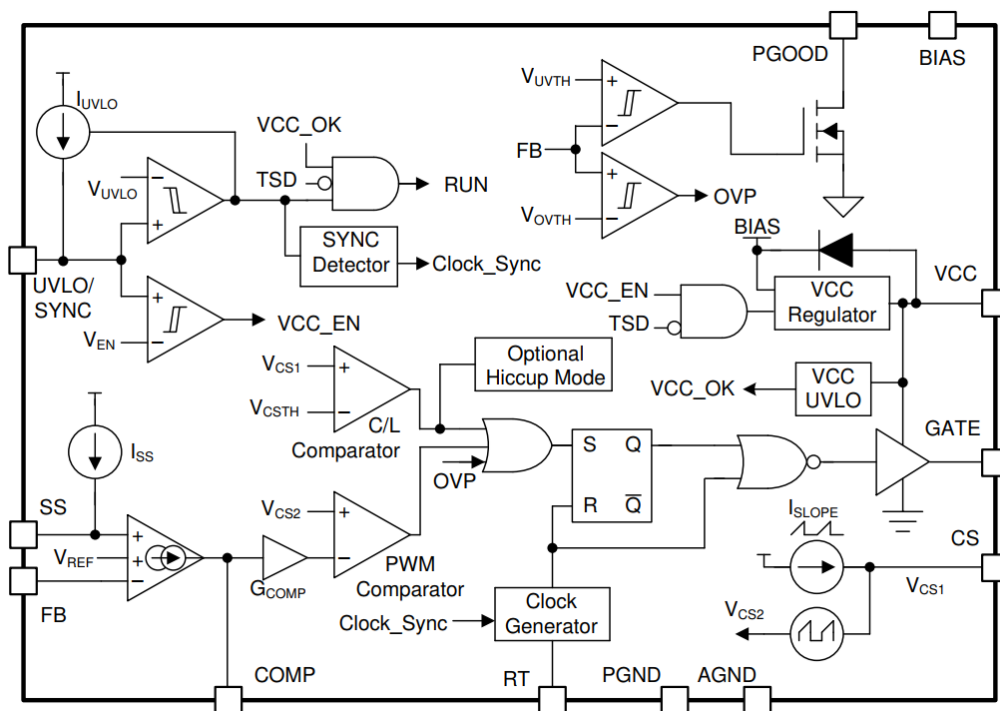
Šiais laikais gaminama aibė valdiklių, palaikančių skirtingas funkcijas. Pagrindiniai šių įtaisų gamintojai yra *Texas Instruments Inc*, *ON Semiconductor* ir *Infineon Technologies*. Renkantis valdiklį svarbu atkreipti dėmesį ne tik į jo deklaruojamus parametrus ar į tai, kur jis bus naudojamas, bet ir į gamintojo pateikiamą informaciją, kompiuterinius modelius, programinę įrangą ir jos palaikymą.

Vienas iš moderniausių, skirtų impulsiniams maitinimo šaltiniams valdyti, valdiklių yra *Texas Instruments* LM5155. Jis naudojamas skirtingų tipų, aukštu dažniu veikiančiuose, keitikliuose. Naudojant šį valdiklį pasiekiamas aukštas maitinimo šaltinio naudingumo koeficientas, galimos plačios maitinimo įtampos ribos. Jame integruotos funkcijos, saugančios keitiklį nuo netinkamų maitinimo šaltinio ar apkrovos parametrų, galimybė reguliuoti darbo dažnį [26].

3.1. Valdiklio LM5155 struktūra ir funkcijos

Šiame poskyryje nagrinėjamas modernus, impulsiniuose maitinimo šaltiniuose naudojamas, valdiklis. Analizuojamos jo galimybės ir pagrindinės atliekamos funkcijos.

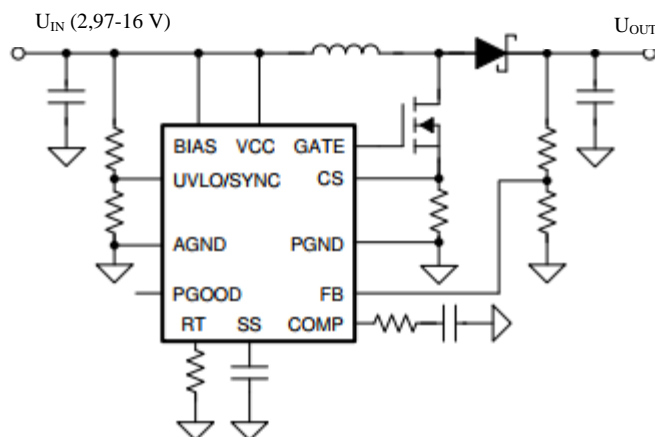
Bendrovės *Texas Instruments* valdiklis LM5155 gali būti pritaikomas skirtingose maitinimo šaltinių topologijose. Jis pasižymi plačiomis įėjimo įtampos ribomis, darbo dažniu nuo 100 kHz iki 2,2 MHz, galimybe sinchronizuoti veikimo dažnį išoriniu impulso pločiu moduluotu (angl. *Pulse Width Modulated* – PWM) signalu, apsauga nuo per didelės išėjimo ar netinkamos įėjimo įtampos. Taip pat valdiklyje integruotos apsaugos nuo perkaitimo, reguliuojamo švelnaus paleidimo (angl. *soft start*) grandinės bei išvadas, skirtas indikacijai apie tinkamą valdiklio veikimą. Jis yra nesinchroninis, energijos srautų perdavimui valdo tik vieną tranzistorių. Tranzistoriaus būsenų keitimui naudojamas maksimalios srovės režimas (angl. *peak current mode*). Nagrinėjamo valdiklio funkcinė blokinė schema pateikta 3.1.1 pav.



3.1.1 pav. Valdiklio LM5155 funkcinė blokinė schema [26]

Schema sudaryta iš tarpusavyje sujungtų blokų, skirtų atlikti tam tikras funkcijas. Blokai, prijungti prie UVLO/SYNC išvado, reikalingi valdiklio įjungimui ir išjungimui. Šio išvado nominali įtampa yra apie 1,5 V. Slenkstinei įtampai pasiekti, atsižvelgiant į planuojamas schemas įjungimo ir išjungimo įtampas, apskaičiuojamos varžų reikšmės ir prijungiamas rezistorių daliklis. Stabilaus darbo užtikrinimui prie žemos įėjimo įtampos, tarp išvado ir žemės jungiamas kondensatorius, kuris skirtas kompensuoti trumpalaikiams įtampos svyravimams.

UVLO/SYNC išvade įtampa viršijus slenkstinę ribą, įtaisas pereina į parengties režimą. Palaispniui pasiekti nusistovėjusį darbo režimą, su kuo galima mažesnėmis signalų pulsacijomis, padeda švelnaus paleidimo funkcija. Paleidimas pradamas, jei VCC regulatoriaus stabilizuota įtampa viršija 4,5 V, arba praėjus 50 μ s, kai įtampa viršija 2,85 V ribą. VCC regulatorius – LM5115 valdiklyje integruotas aukštos įtampos reguliatorius, maitinantis N kanalo *MOSFET* tranzistoriaus valdiklį. VCC regulatorius gali stabilizuoti iki 6,85 V per BIAS išvadą prijungtą 3,5-45 V įėjimo įtampą. Įtampos pulsacijų mažinimui VCC išvade prijungiamas 1-4,7 μ F talpos kondensatorius. Keičiant schemas topologiją, pvz.: BIAS išvadą sujungtus su VCC (žr. 3.1.2 pav.), įtaisas geba palaikyti įėjimo įtampą



3.1.2 pav. Valdiklio ir elementų sujungimo schema, darbui prie 2,97-16 V įėjimo įtampos [26]

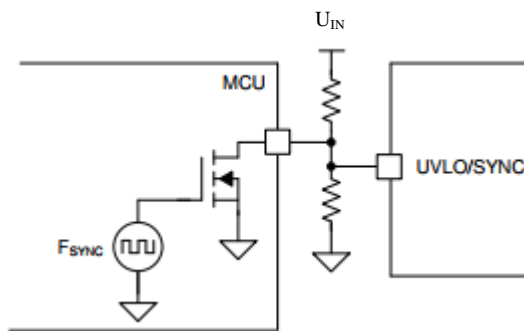
nuo 2,97 V iki 16 V. Toks darbo režimas rekomenduojamas, kai įtampą aukštinantis keitiklis maitinamas 1 celės baterija.

Švelnus paleidimas vyksta vidiniam srovės šaltiniui įkraunant prie SS išvado prijungtą kondensatorių C_{SS} . Kondensatoriaus įtampa didėja, kaupiantis elektriniam krūviui. Palaipsniui auga išėjimo įtampos vertė. Boost topologijoje paleidimo laikas t_{SS} priklauso nuo kondensatoriaus talpos, išėjimo ir įėjimo įtampų verčių:

$$t_{SS} = \frac{C_{SS}}{I_{SS}} * \left(1 - \frac{U_{OUT}}{U_{IN}}\right), \quad (3.1.1)$$

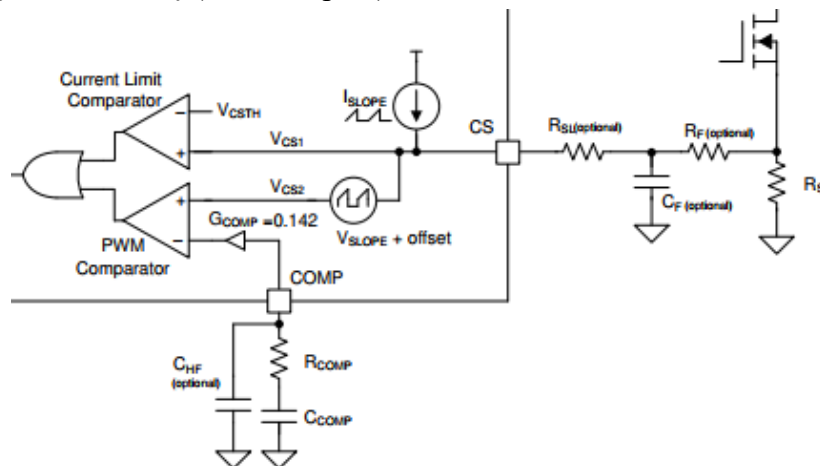
kur I_{SS} – švelnaus paleidimo srovė, U_{OUT} – išėjimo įtampa, U_{IN} – įėjimo įtampa.

Keitiklio darbo dažnis nusistovėjusiam režime priklauso nuo vidinio signalų generatoriaus darbo (angl. *Clock Generator*). Jo dažnis gali būti reguliuojamas nuo 100 kHz iki 2,2 MHz, priklausomai nuo to, kokios varžos rezistorius prijungtas tarp RT ir AGND išvadų. Taip pat galima valdiklio sinchronizacija su išoriniu PWM signalu. Sinchronizacija atliekama UVLO/SYNC išvadą pervedus į žemą lygį. Įtampos lygis turi būti žemesnis nei slenkstinė išijungimo riba, t.y. 1,45 V. Norit tai įgyvendinti, naudojamas MOSFET tranzistorius, kuris, į užtūrą gavęs aukšto lygio PWM signalą, įžemina UVLO/SYNC išvadą (žr. 3.1.3 pav.). Tuo pačiu metu vidinis signalų generatorius nustoja generuoti valdymo impulsus ir valdiklis išsijungia, jei aukštas loginis PWM signalo lygis trunka ilgiau nei 35 μ s.



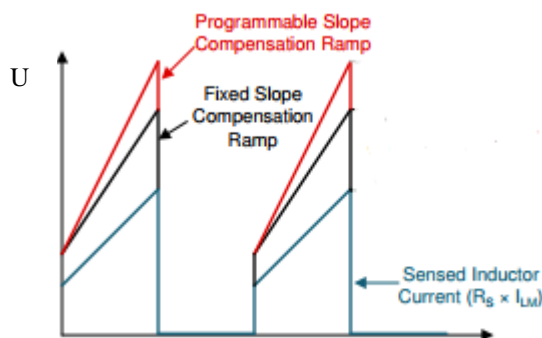
3.1.3 pav. Valdiklio išjungimo ir sinchronizacijos su išoriniu PWM signalu schema [26]

Įtampą aukštinančiame keitiklyje kiekvieno ciklo metu tranzistorius išjungiamas naudojant srovės matavimo grandinių signalą, kai droseliu tekanti srovė pasiekia nustatytą reikšmę. Srovė matuojama prijungiant išorinį R_S rezistorių (žr. 3.1.4 pav.). Keitikliu dirbant aukštesniu darbo laiku nei 50%,



3.1.4 pav. CS išvade matuojamas srovės ir kompensavimo signalai [26]

atsiranda tikimybė, kad matuojama srovė gali būti iškraipyta ir atsirasti nepageidaujamų triukšmų. Siekiant to išvengti, valdiklyje integruota signalo kompensavimo (angl. *slope compensation*) funkcija. Jos pagalba, prie CS išvade matuojamos įtampos signalo pridedamas kompensavimo signalas. Gautas sudėtinis aukštesnės amplitudės signalas (žr. 3.1.5 pav.) sumažina matuojamos įtampos harmoninių svyravimų įtaką schemos darbui. Kompensavimo signalas gali būti sudarytas iš pastovaus, kuris nuolat generuojamas valdiklio viduje, ir išorinio programuojamo. Programuojamas signalas nustatomas parenkant rezistorių R_{SL} ir jį prijungiant prie valdiklio CS išvado.



3.1.5 pav. CS išvade matuojamos srovės ir kompensavimo signalai [26]

Įtaisas palaiko pastovią apkrovos įtampą grįžtamojo ryšio FB išvade (3.1.2 pav.) matuodamas rezistorių dalikliu gaunamą įtampą. Operacinis stiprintuvas lygina FB įtampą su SS išvado ar vidine atramine įtampa (priklausomai kuri žemesnė). Generuojama įtampų skirtumui proporcinga srovė, keičianti tranzistoriaus darbo režimą [26].

Išnagrinėtos valdiklio LM5155 atliekamos funkcijos užtikrina stabilų keitiklio darbą, aukštą naudingumo koeficientą, greitą atsaką į kintančią apkrovą ar į įėjimo įtampos svyravimus. Toks keitiklis yra tinkamas naudoti aukštu dažniu veikiančiuose impulsiniuose maitinimo šaltiniuose.

3.2. Aukšto dažnio įtampą aukštinančio keitiklio sudarymas

Aukštu dažnio veikiančio keitiklio darbo našumui ir generuojamiems elektromagnetiniams triukšmams įtaką turi maitinimo šaltinyje naudojami komponentai, jų parametrai. Šiame skyriuje nagrinėjami pagrindiniai komponentų parinkimo principai, siekiant sukurti šiuolaikinius standartus atitinkantį maitinimo šaltinį.

Keitiklio darbo dažnio parinkimas yra vienas iš pirmų žingsnių projektuojant nuolatinės srovės keitiklį. Kadangi pramonėje, medicinoje ar šiuolaikiniuose automobiliuose naudojama elektronika turi būti kuo kompaktiškesnė, įtampą aukštinantys maitinimo šaltiniai taip pat turi būti mažų matmenų, mažai svėrti. Kaip buvo aptarta 1-ame skyriuje, didinant dažnį naudojami mažesni pasyvieji komponentai. Visgi, mažesni matmenys iššaukia didesnius persijungimo nuostolius ir sumažėjusį bendrą keitiklio naudingumo koeficientą. Projektuojant aukštu dažniu veikiančius maitinimo šaltinius turi būti atsižvelgta į jų darbo dažnį ir skleidžiamus elektromagnetinius triukšmus, kurie negali viršyti standartuose numatytų verčių.

Keitikliuose darbo dažnis nustatomas prijungiant išorinį rezistorių arba panaudojant išorinį sinchronizavimo signalą. Tai leidžia keitiklio kūrimo metu atlikti bandymus skirtingų dažnių ribose, išmatuojant skleidžiamus EMI.

Vienas iš pagrindinių energiją kaupiančių elementų yra droselis. Parenkant jo induktyvumą svarbu įvertinti droseliu tekančios srovės pulsacijas. Skaičiuojant induktyvumo vertę L , gamintojo siūlymu droseliu tekančios srovės pulsacijos turi būti lygios 30-70% vidutinės srovės vertės. Taip pasiekiamas balansas tarp šerdies ir laidumo nuostolių. Droselio induktyvumas priklauso nuo keitiklio įėjimo įtampos U_{IN} , įėjimo srovės I_{IN} , darbo dažnio f_{SW} , srovės pulsacijų su nominalia srove santykiui RR ir apskaičiuojamas pagal 3.2.1 formulę:

$$L = \frac{U_{IN}}{I_{IN} * RR * f_{SW}} * D \quad (3.2.1)$$

Pagal apskaičiuotą induktyvumo vertę L , randama maksimali droseliu tekanti srovė. Pagal ją parenkama srovės matavimo rezistoriaus R_S varža, kuri turi užtikrinti tam tikrą į valdiklį duodamo įtampos signalo lygį. Renkant droselio nominalią srovę, privalu įvertinti maitinimo šaltinio srovę, kai įėjimo įtampa yra minimali. Kadangi droseliu tekanti maksimali srovė yra apytiksliai lygi didžiausiai įėjimo srovei, parinkus tinkamų parametrų ritę, išvengiama jos įsisotinimas, kurio metu gali sutrikti keitiklio veikimas.

Sudarant aukštu dažniu veikiančius įtampą aukštinančius maitinimo šaltinius, svarbu parinkti diodą, kurio nominali srovė būtų didesnė nei apkrovos srovė ir kuris atgalinė įtampa būtų didesnė nei keitiklio išėjime. Taip pat diodas turi gebėti greitai pereiti į atkirtos režimą ir turėti kuo mažesnę tiesioginės įtampos kritimą sandūroje. Tokios savybės leidžia pasiekti aukštą naudingumo koeficientą ir didelį darbo dažnį. Šiuolaikiniuose keitikliuose naudojami Šotkio diodai, turintys visus reikalingus parametrus efektyviam, aukšto dažnio persijunginėjimui.

Parenkant galios tranzistorių svarbu atkreipti dėmesį į jo galios nuostolius ir nominalią darbo įtampą. Dalis nuostolių MOSFET tranzistoriuje susiję su santakos-ištakos kanalo varža, kai tranzistorius yra įjungtas. Kuo ši varža didesnė, tuo labiau šyla komponentas. Kiti nuostoliai atsiranda dėl parazitinių elementų ir pasireiškia persijungimo metu, kai per tranzistorių teka srovė ir kanale krenta įtampa. Parinkto galios jungiklio suminis užtūros krūvis Q_G turi būti toks, kad jį įkraunant nebūtų viršyta valdiklio vidinio VCC reguliatoriaus srovės riba. Suminis krūvis parenkamas pagal darbo dažnį f_{sw} , VCC reguliatoriaus srovę ir turi tenkinti nelygybę:

$$Q_G < \frac{35 \text{ mA}}{f_{SW}} \quad (3.2.2)$$

Kuo mažesnės parinkto tranzistoriaus parazitinių komponentų vertės, tuo greičiau MOSFET persijungia. Gaunami srovės ir įtampos signalai su mažesnėmis pulsacijomis, skleidžiama mažiau elektromagnetinių triukšmų, todėl svarbu parinkti tinkamų parametrų tranzistorių.

Įtampą aukštinančio keitiklio išėjimo kondensatoriai turi būti parinkti taip, kad sumažintų išėjimo įtampos pulsacijas iki leistinų ribų, atlaikytų apkrovos srovės pulsacijas ir kondensatorius nebūtų pažeistas, nesutrumpėtų jo darbo laikas. Minimali kondensatorių talpa apskaičiuojama pagal planuojamą išėjimo įtampos pulsacijų amplitudę ΔU_{OUT} , keitiklio darbo dažnį, darbo laiką D ir apkrovos srovę I_A :

$$C_{OUT_min} = \frac{I_{OUT} * D}{f_{SW} * \Delta U_{OUT}} \quad (3.2.3)$$

4. Aukšto dažnio įtampą aukštinančių maitinimo šaltinių kompiuterinis tyrimas

Aukštu dažniu veikiančio impulsinio maitinimo šaltinio generuojami triukšmai priklauso nuo keitiklyje naudojamų komponentų, jų tikslumo, parazitinių elementų dydžių. Skleidžiami triukšmai taip pat priklauso nuo keitiklio darbo dažnio, apkrovos kitimo ir įėjimo įtampos parametrų. Keičiant komponentus ir darbo režimus, kinta įtaiso naudingumo koeficientas ir skirtingai pasireiškia elementų šilimas. Šiame skyriuje atliekamas *boost* keitiklio kompiuterinis tyrimas, stebint komponentų su skirtingais parametrais įtaką generuojamiems elektromagnetiniams triukšmams ir naudingumo koeficientui. Taip pat tiriama įėjimo įtampos ir apkrovos srovės įtaka elementų šilimui, keitiklio efektyvumui ir skleidžiamiems EMI.

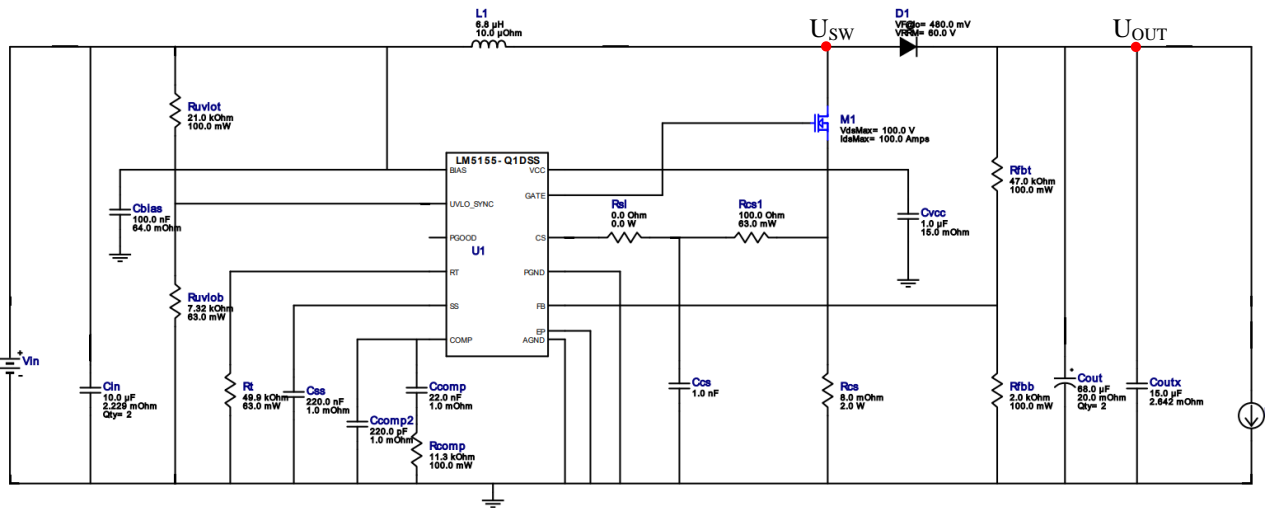
Aukštu dažniu veikiantis įtampą aukštinantis keitiklis, naudojantis LM5155 valdiklį, buvo modeliuojamas naudojant korporacijos *Texas Instruments WEBENCH® Power Designer* programinę įrangą. Jos pagalba galima atlikti įvairioms sritims pritaikytų maitinimo šaltinių veikimo analizę, pasirenkant norimus schemas įėjimo ir išėjimo parametrus. Tuo pačiu išlieka galimybė keisti schemas komponentus į kitų parametrų ar kito gamintojo. Modeliavimo programa galima atlikti schemas darbo simuliaciją su kintančia apkrova, skirtingomis įėjimo vertėmis, patikrinti schemas pasileidimą. Suteikiama galimybė sudarytą schemą ar gautus rezultatus eksportuoti į kitas modeliavimo platformas. Schemas veikimo analizė ypač aktuali prieš gaminant sumodeliuotą maitinimo šaltinį ar prieš atliekant realius bandymus.

4.1. Maitinimo šaltinio modelio sudarymas

Modeliuojant buvo naudojamas LM5155-Q1 2,2 MHz plataus įėjimo įtampų spektro, įtampą aukštinančio keitiklio valdiklis. Modeliavimo programoje sudaromo modelio pagrindiniai parametrai:

- Minimali įėjimo įtampos vertė: 6 V.
- Maksimali įėjimo įtampos vertė: 18 V.
- Išėjimo įtampos vertė: 24 V.
- Maksimali apkrovos srovė: 1,5 A.
- Darbo dažnis: 440 kHz.

Programa leidžia pasirinkti automatinį sudarytos schemas optimizavimą, kai siūlomi komponentai, skirti pasiekti aukštą naudingumo koeficientą, mažiausių matmenų spausdinto montažo plokštę ar pigiausius galimus komponentus. Kiekvienam schemas elementui keisti, prieinama plati biblioteka su skirtingų gamintojų ir parametrų komponentais. Kadangi bibliotekoje esančių elementų modeliuose įvertinti pagrindiniai parazitiniai dydžiai, modeliavimu pasiekiami ganėtinai tiksliai realybę atitinkantys rezultatai. Sumodeliuota nurodytų parametrų schema pateikta 4.1.1 pav.



4.1.1 pav. WEBENCH® Power Designer aplinkoje sumodeliuota keitiklio schema

4.2. Galios tranzistoriaus parametrų įtaka generuojamiems elektromagnetiniams triukšmams

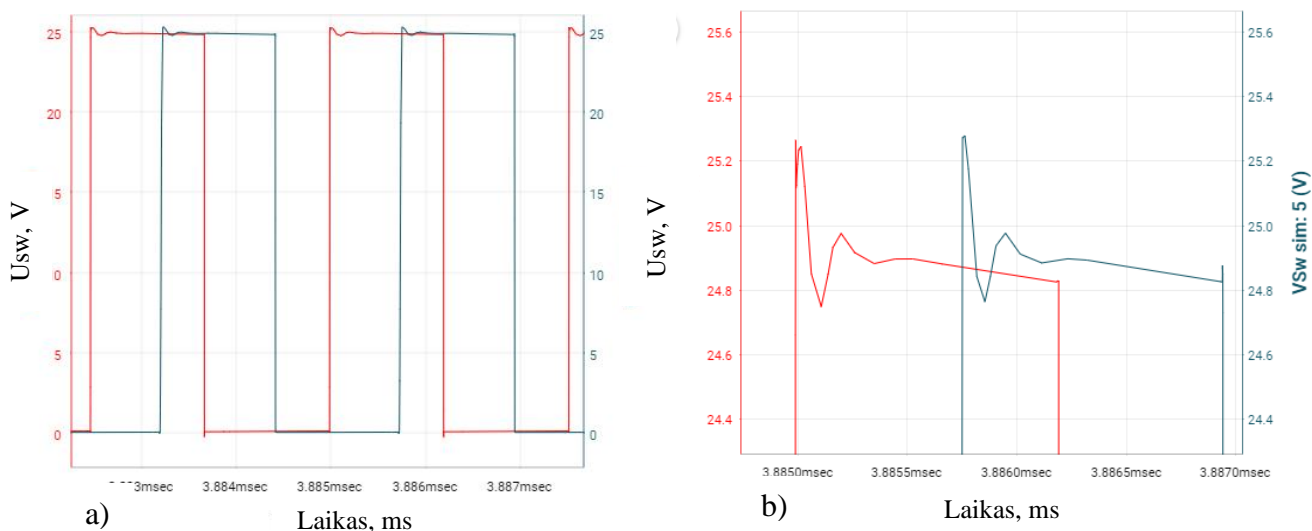
Aukštu dažniu veikiančių *boost* keitiklių sklaidžiami elektromagnetiniai triukšmai priklauso nuo naudojamų tranzistorių parametrų. Vieni tranzistoriai pasižymi maža įjungtos būsenos santakos-ištakos varža R_{DSon} , kiti turi ganėtinai didelę parazitinę įėjimo talpą C_{iss} . Tokie komponentų skirtumai lemia skirtingą maitinimo šaltinių efektyvumą, sklaidžiamus skirtingų spektrų elektromagnetinius triukšmus. Dėl šios priežasties parenkami aštuoni impulsiniuose maitinimo šaltiniuose naudojami tranzistoriai ir atliekami bandymai juos keičiant keitiklyje, kurio schema pateikta 4.1.1 pav. Analizuojamos U_{sw} taške gaunamos įtampos kitimo kreivės, atliekama jų spektrinė analizė.

Atliekami keitiklio nusistovėjusio darbo režimo (angl. *steady state*) bandymai su skirtingų parametrų tranzistoriais. Modeliuojant nustatyta 12 V įėjimo įtampa, 24 V išėjimo įtampa ir 1,5 A apkrovos srovė. Kiekvieno modeliavimo metu parenkamas skirtingų parametrų galios tranzistorius, tačiau toks kad dar būtų užtikrintas teisingas maitinimo šaltinio veikimas. Pagrindiniai naudojamų tranzistorių parazitinių elementų dydžiai pateikti 4.2.1. lentelėje.

4.2.1 lentelė WEBENCH® Power Designer naudojamų tranzistorių parazitinių elementų vertės

	Tranzistoriaus tipas							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Tranzistoriaus parametrai	CSD185 43Q3A	CSD195 02Q5B	CSD195 37Q3	CSD185 40Q5B	CSD185 36KCS	BSC340N 08NS3 G	CSD185 32NQ5B	CSD185 33Q5A
R_{dson} , mΩ	8.1	3.4	13.8	1.8	1.3	27.5	2.7	4.7
C_{iss} , pF	885	3750	1290	3250	8790	564	4100	2200
C_{oss} , pF	168	925	251	622	1410	156	495	292
C_{rss} , pF	4.8	17	13.3	15	39	7	16	7
R_g , Ohm	0.5	1.2	1.2	0.8	0.7	1	1.2	1.3
Q_g (10V), nC	11.1	48	16	41	108	6.8	49	29
Q_{gd} , nC	1.7	8.6	2.9	6.7	14	1.5	7.9	29
Q_{gs} , nC	3.1	14	5.5	8.8	18	2.4	16	6.6

Bandymo metu matuota tranzistoriaus persijungimo įtampa U_{sw} , taške tarp tranzistoriaus santakos ir Šotkio diodo katodo (žr. 4.1.1 pav.). Pastebėta, kad šio įtampą aukštinančio keitiklio schemeje pakeitus galios tranzistorių į kitokių parametų, gauti skirtingos formos persijungimo įtampos signalai. 4.2.1 a) paveiksle pateikti modeliavimo metu gautos jungiklių persijungimo įtampų kreivės, kai naudojami 1-o ir 5-o tipo tranzistoriai (žr. 4.2.1 lentelę). 1-o tipo tranzistoriaus persijungimo signalo svyravimų amplitudė yra žemesnė, o 5-ojo tranzistoriaus įsijungimo metu užfiksuotas apie 50 mV įtampos šuolis.

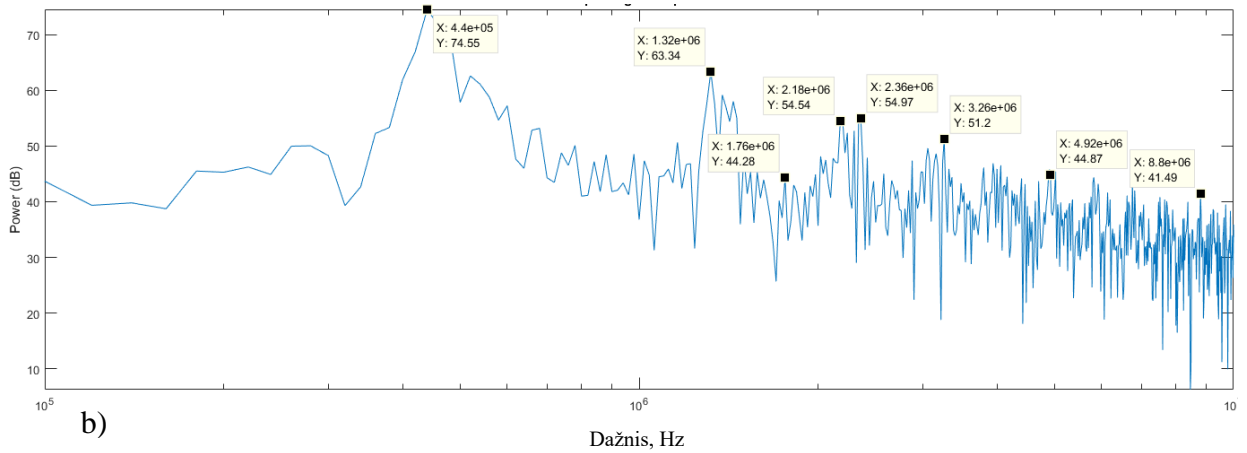
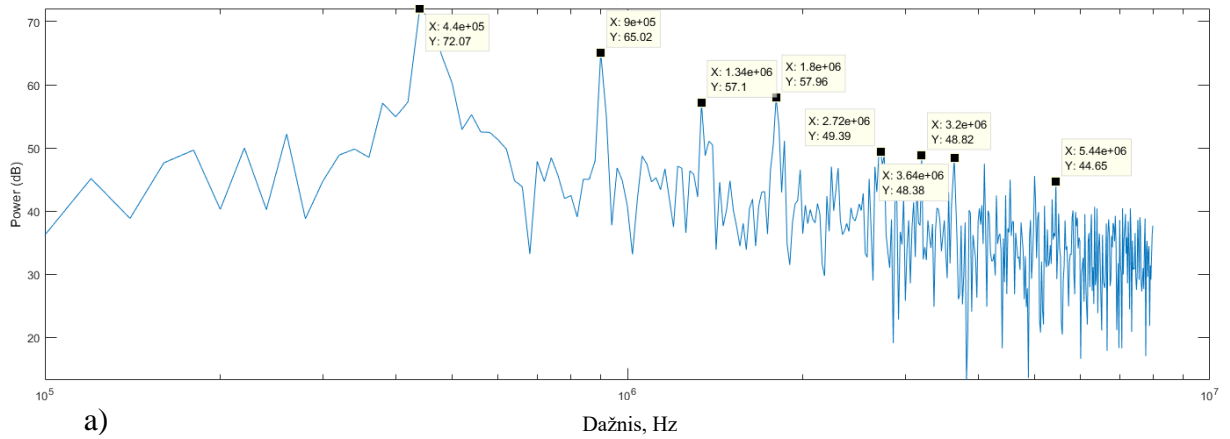


4.2.2 pav. Kietiklių su 1-o tipo (raudona kreivė) ir 5-o tipo (mėlyna kreivė) tranzistoriais modeliavimo metu gautų jungiklio persijungimo įtampos kreivių palyginimas (a) ir išdidinti triukšmai (b)

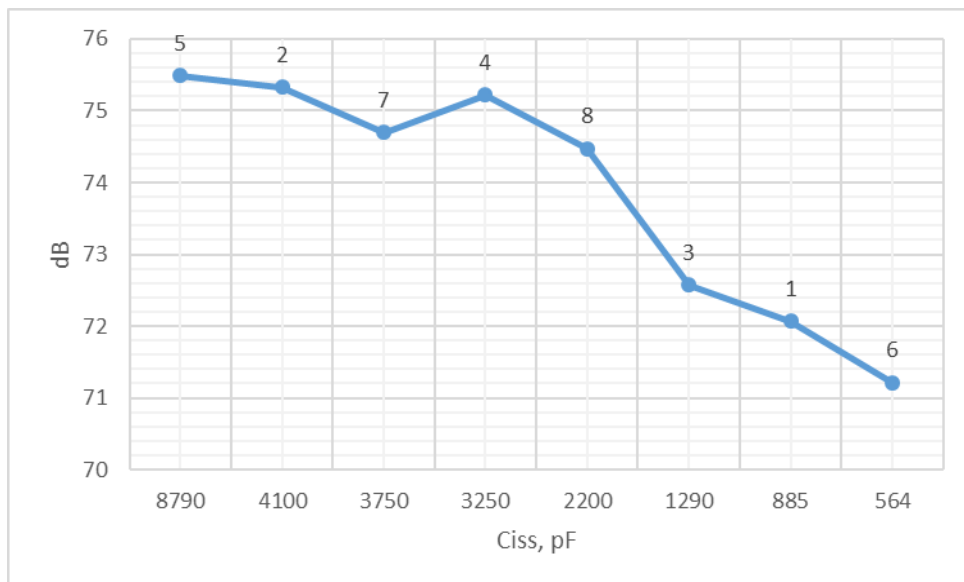
Iš tranzistorių persijungimo įtampos U_{sw} grafikų aiškiai pastebimi slopstantieji elektromagnetiniai triukšmai, kurie gali sutrikdyti greta esančios įrangos darbą ar pažeisti pačio keitiklio komponentus dėl aukštos pulsacijų amplitudės.

Siekiant gauti tikslesnius keitiklio generuojamų elektromagnetinių triukšmų analizės rezultatus, buvo atliekama modeliavimo metu gautų signalų spektrinė analizė. Jai atlikti buvo naudojama MATLAB aplinka. *WEBENCH® Power Designer* programa gautos kreivės eksportuotos tekstiniu pavidalu ir panaudojus 1 priede pateiktą kodą atlikta jungiklio mazgo įtampos U_{sw} analizė. Gautuose rezultatuose pastebimas skirtingas aukštesniųjų harmonikų pasiskirstymas. Visuose signaluose vyrauja pirmoji, persijungimo dažnio harmonika su 71-75,5 dB amplitudė. Tačiau skirtingų tranzistorių signaluose išryškėja skirtingų dažnių harmonikos. Pavyzdžiui, 4.2.2 pav. a) grafike matomos ryškios II, III ir IV harmonikos (atitinkamai 900 kHz su 65,02 dB, 1,34MHz su 57,01 dB ir 1,8 MHz su 57,96 dB). Tuo tarpu iš keitiklio su 5-o tipo tranzistoriumi persijungimo įtampos U_{sw} spektrinės analizės matyti, kad vyrauja nelyginės harmonikos. Tokį rezultatą lėmė skirtingas tranzistorių darbo laikas, atsiradęs dėl parazitinių elementų.

Apibendrinus rezultatus, pastebėta, kad beveik visais atvejais pirmos harmonikos amplitudė kinta atitinkamai su tranzistorių duomenų pasuose nurodytomis parazitinės įėjimo talpos vertėmis C_{iss} . 4.2.3 paveikslėlyje X ašyje atidėtos tranzistorių įėjimo talpos C_{iss} , o Y ašyje atitinkamo tranzistoriaus I harmonikos vertė. Prie mažesnių parazitinių įėjimo talpos verčių, tranzistoriaus perjungimo metu reikalingas mažesnis krūvis užkrauti/iškrauti parazitiniams talpoms. Dėl to tranzistoriaus būseną pasikeičia greičiau ir stebima mažesnės amplitudės pirma harmonika.



4.2.3 pav. Keitiklių su 1-o tipo (a) ir 5-o tipo (b) tranzistoriais persijungimo įtampas signalo spektrinė analizė

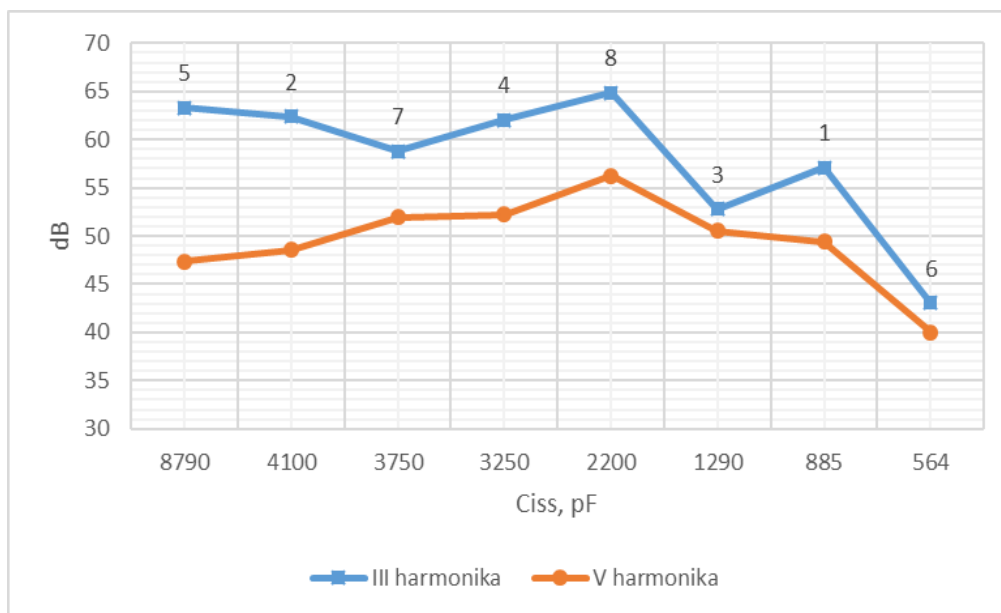


4.2.4 pav. Usw įtampas I harmonikos amplitudės kitimas prie skirtingų Ciss verčių

Tiriant aukštesniųjų eilių harmonikas, pastebimos mažėjančios jų amplitudžių vertės, lyginant su pirmąja. Modeliavimo metu gauti rezultatai pateikti 4.2.2 lentelėje. Pastebima, kad III ir V eilės harmonikų amplitudžių kitimas neapriklauso vien tik nuo parazitinės įėjimo talpos. Aukštesniųjų eilių harmonikų persijungimo signale atsiradimą daro įtaką ir kitų schemos elementų parametrai, kiti parazitiniai dydžiai. 4.2.4 paveikslyje pateiktas III ir V harmonikų verčių kitimas, kai modeliavimas atliekamas su skirtingų parametų galios tranzistoriais.

4.2.2 lentelė Schemos I, III ir V harmonikų vertės su skirtingas galios tranzistoriais

Tranzistoriaus tipas	5	2	7	4	8	3	1	6
Dažnis	Amplitudė, dB							
440 kHz	75.49	75.33	74.7	75.22	74.47	72.57	72.07	71.21
1,34 MHz	63.34	62.4	58.8	62.04	64.84	52.81	57.1	43.03
2,72 MHz	47.39	48.59	51.96	52.22	56.23	50.51	49.39	40.03



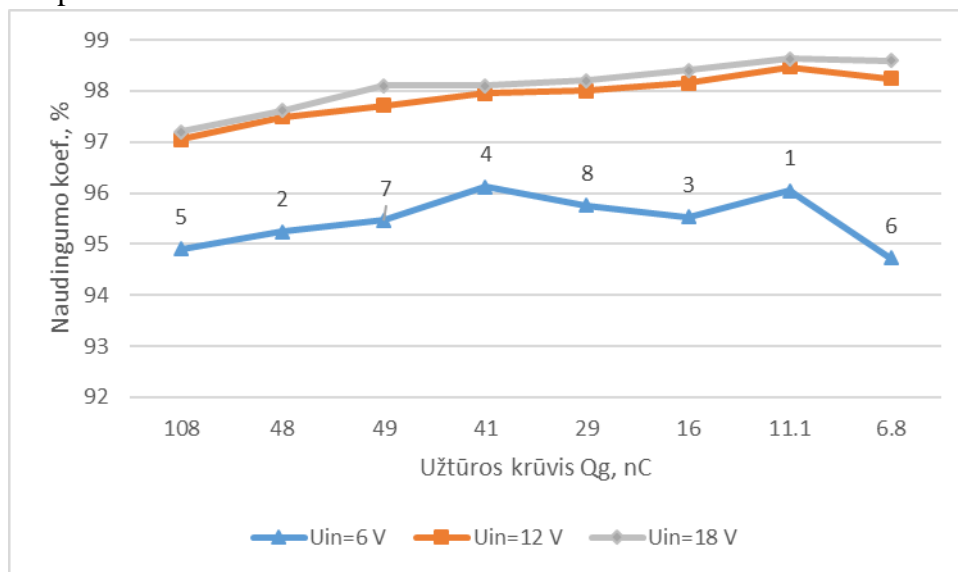
4.2.5 pav. Usw įtampos III ir V harmonikų amplitudės kitimas prie skirtingų tranzistoriaus Ciss verčių

Atliekant bandymus su keitikliu, naudojanti skirtingų parametų galios tranzistorius, pastebėta, kad kuo mažesnis parazitinis užtūros krūvis Q_g , tuo efektyviau dirba nagrinėjamas nuolatinės srovės impulsinis maitinimo šaltinis. Esant mažesniai parazitiniam užtūros krūviui, reikalingas mažesnis energijos kiekis kiekvieno ciklo metu jį įkrauti, todėl pasiekiamas aukštesnis naudingumo koeficientas. Modeliavimo metu gauti rezultatai pateikti 4.2.3 lentelėje:

4.2.3 lentelė Schemos naudingumo koeficientai prie skirtingų įėjimo įtampų U_{in} , naudojant skirtingų parametų galios tranzistorius

Tranzistoriaus tipas	5	2	7	4	8	3	1	6
U_{in}	Naudingumo koef., %							
6 V	94.9	95.246	95.462	96.126	95.754	95.527	96.041	94.728
12 V	97.05	97.49	97.71	97.95	98	98.15	98.47	98.24
18 V	97.2	97.62	98.11	98.1	98.2	98.41	98.63	98.6

Gautuose rezultatuose matoma, kad, kai keitiklio įėjimo įtampa yra 12 V arba 18 V, su kai kurių tranzistorių jungikliais pasiekiamas iki 98 % naudingumo koeficientas. Naudingumo koeficiento kitimas prie skirtingų įėjimo įtampos U_{IN} verčių ir su skirtingų parametru galios tranzistoriais pateiktas 4.2.5 paveiksle.



4.2.6 pav. Maitinimo šaltinio naudingumo koeficientas naudojant skirtingų parametru tranzistorius prie skirtingų įėjimo įtampos verčių

Grafike pastebima, kad kuo įėjimo įtampa artimesnė išėjimo įtampai, tuo efektyviau veikia keitiklis. Naudojant tranzistorių su maža užtūros įėjimo talpa, šiai talpai įkrauti kiekvieno persijungimo metu reikalingas mažesnis energijos kiekis. Dėl šios priežasties iššvaistoma mažiau energijos ir pasiekiamas aukštesnis naudingumo koeficientas.

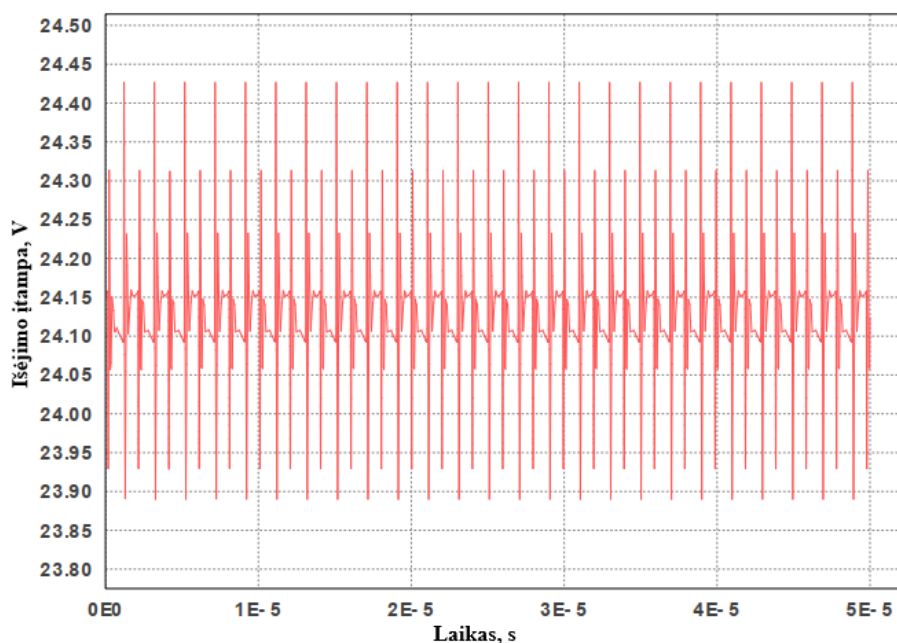
Atlikus tyrimus pastebėta, kad įtampą aukštinančiame keitiklyje parenkant skirtingų tipų, kitokių parametru tranzistorius, jungiklio persijungimo įtampos taške U_{sw} generuojami skirtingų amplitudžių elektromagnetiniai triukšmai. Pastebėta, kad svarbi yra tranzistoriaus įėjimo parazitinė talpa C_{ISS} . Tyrimų metu gauta, kad kuo didesnė C_{ISS} , tuo ilgiau vyksta tranzistoriaus persijungimo procesas ir generuojami aukštesnės amplitudės triukšmai. Nustatyta, kad keitiklyje naudojant skirtingų parametru galios tranzistorius, pasiekiamas naudingumo koeficientas gali kisti apie 1,5 %. Toks skirtumas atsiranda dėl kiekvieno persijungimo ciklo metu reikalingų skirtingų energijos kiekių tranzistoriaus parazitinėms talpoms įkrauti.

4.3. Keitiklio darbo režimų įtakos generuojamiems triukšmams kompiuterinis tyrimas

Tyrimai atlikti siekiant nustatyti įtampą aukštinančio keitiklio generuojamų elektromagnetinių triukšmų, komponentų šilimo ir naudingumo koeficiento priklausomybę nuo įėjimo įtampos ir apkrovos kitimo. Bandymų metu matuota keitiklio išėjimo įtampos U_{OUT} (žr. 4.1.1 pav.) pulsacijos, skaičiuojamas naudingumo koeficientas ir jungiklio šilimas. Tyrimų metu buvo keičiamas apkrovos dydis ir įėjimo įtampa.

Impulsiniam maitinimo šaltiniui dirbant skirtingais darbo režimais, palaikoma pastovi išėjimo įtampa, kai apkrovos srovė ir įėjimo įtampa kinta leistinose ribose. Valdiklis reguliuoja tranzistoriaus darbo ciklus palaikydamas pastovų darbo dažnį, tačiau keisdamas laiką, kurį tranzistorius būna įjungtas kiekvieno periodo metu. Atliekant *boost* maitinimo šaltinio tyrimus, kai keitiklio įėjimo įtampa buvo 6 V, 12 V ir 18 V, buvo keičiama apkrovos srovė nuo 0,1 A iki 1,5 A. Iš gaunamo išėjimo įtampos

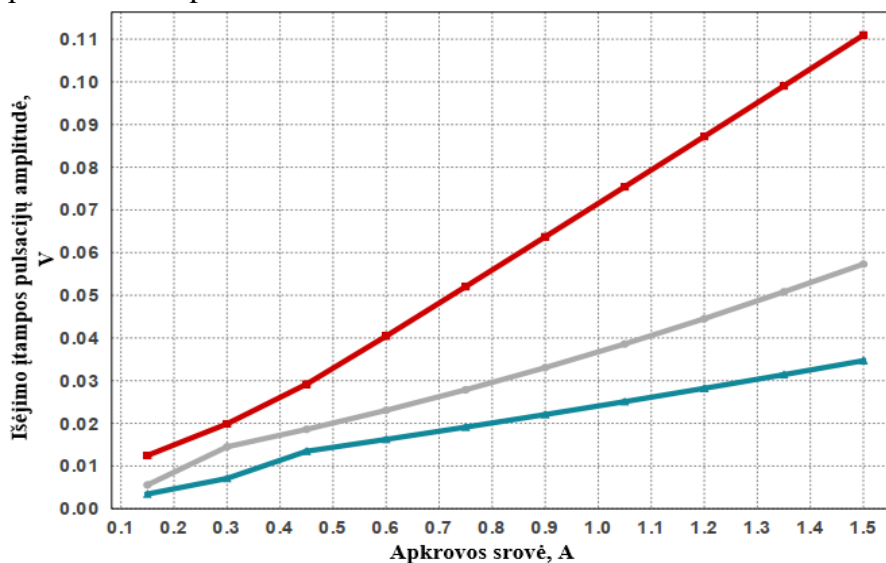
grafiko, matuojamos įtampos pulsacijos. U_{OUT} grafikas, kai $U_{IN} = 6\text{ V}$, $I_a = 1,5\text{ A}$ pateiktas 4.3.1 paveiksle.



4.3.1 pav. Keitiklio išėjimo įtampos grafikas, kai $U_{in} = 6\text{ V}$, $I_a = 1,5\text{ A}$

Nors modeliavimo metu vidutinė išėjimo įtampa gauta 24,1 V, tranzistoriaus persijungimų metu pastebimi signalo triukšmai, siekiantys 24,42 V. Šių nepageidaujamų triukšmų amplitudė kinta priklausomai nuo apkrovos, prijungtos prie keitiklio, dydžio ir įėjimo įtampos vertės. Atliekami bandymai, kai U_{IN} ir apkrovos srovė kinta leistinose ribose.

Iš modeliavimo metu gautų išėjimo įtampos grafikų išmatuotos įtampos pulsacijų amplitudės. Apibendrinus duomenis sudaryta įtampos pulsacijų priklausomybė nuo apkrovos srovės ir įėjimo įtampos, pateikta 4.3.2 pav.

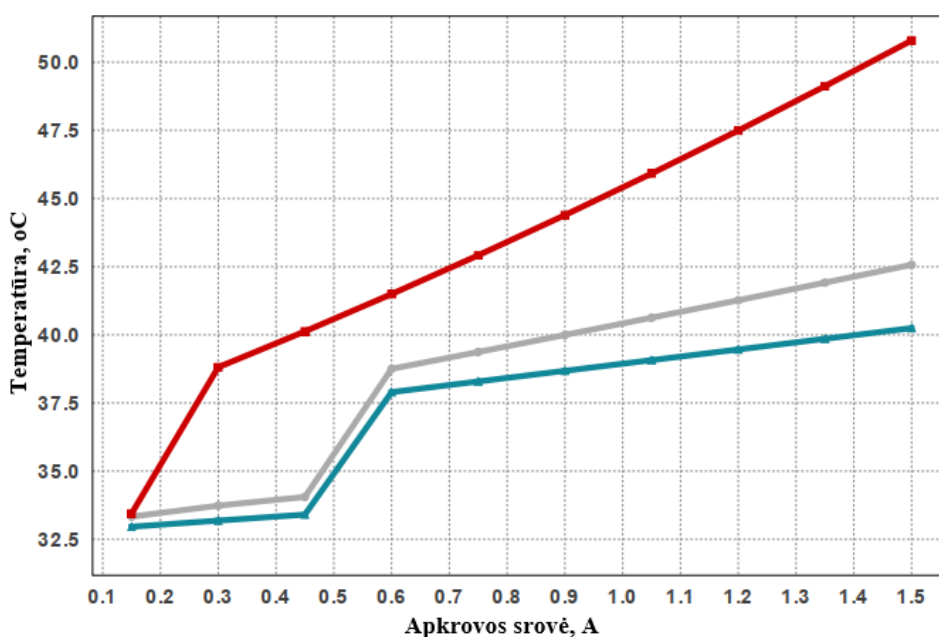


4.3.2 pav. Keitiklio išėjimo įtampos pulsacijų amplitudė, kai įėjimo įtampa 6 V (raudona), 12 V (pilka), 18 V (mėlyna)

Pastebėta, kad didėjant apkrovos srovei, didėja keitiklyje generuojamų elektromagnetinių triukšmų amplitudė. Didžiausios amplitudės pulsacijos, apie 111 mV, pasiekiamos, kai įėjimo srovė minimali ir apkrova yra didžiausia galima. Vadinasi, skaičiuojant aukštu dažniu veikiančiam keitikliui elektromagnetinių triukšmų slopintuvo komponentus, svarbu vertinti tokiaame darbo režime atsirandančias išėjimo įtampos signalo pulsacijas.

Įtampos pulsacijos sukelia ne tik elektromagnetinius triukšmus, tačiau ima labiau šilti keitiklio komponentai. Kaip buvo aptarta ankstesniuose skyriuose, dėl parazitinių elementų tranzistorius persijungia generuodamas *EMI*, patirdamas persijungimo ir laidumo nuostolius. Atliktas tyrimas, siekiant nustatyti ryšį tarp keitiklio apkrovos kitimo ir tranzistoriaus šilimo dėl laidumo ir persijungimo nuostolių. Bandymo metu buvo keičiama apkrovos srovė ir įėjimo įtampa, skaičiuojant tranzistoriaus įšilimą.

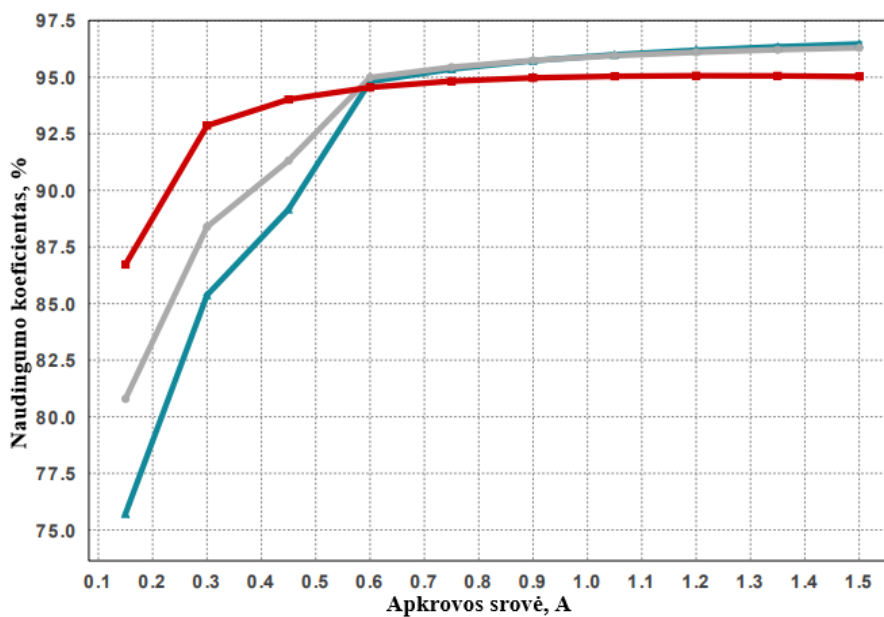
Keitiklio modeliavimo metu apskaičiuotos galios tranzistoriaus įšilimo temperatūros skirtingais darbo režimais. Temperatūros priklausomybės nuo apkrovos srovės pateiktos 4.3.3 pav. Tranzistorius labiausiai įkaista, kai apkrovos srovė didžiausia. Pastebima, kad kuo įėjimo įtampa artimesnė išėjimo įtampai, komponentai dirba efektyviau (mažiau kaista). Tekant mažesnei srovei per tranzistoriaus sandūrą, išsiskiria mažesni laidumo nuostoliai. Taip pat, komutuojant mažesnės amplitudės srovę atsiranda mažesni signalų švytavimai, gaunami mažesni persijungimo nuostoliai.



4.3.3 pav. Tranzistoriaus šilimas keičiant apkrovos srovę, kai įėjimo įtampa 6 V (raudona), 12 V (pilka), 18 V (mėlyna)

Generuojami elektromagnetiniai triukšmai sukelia nepageidaujamą keitiklio komponentų šilimą, todėl kintant generuojamiems *EMI*, kartu kinta maitinimo šaltinio efektyvumas. Naudingumo koeficiento nustatymui tyrimo metu matuojama keitiklio vartojama galia, ir galia, atiduodama apkrovai. Iš šių duomenų apskaičiuojamas bendras modelio naudingumo koeficientas.

Iš tyrimo metu gautų duomenų pastebėta, kad maksimalus naudingumo koeficientas pasiektas, kai apkrova naudoja 36,75 W galios. Tuo atveju teka maksimali išėjimo srovė, įėjimo įtampa lygi 18 V ir keitiklio naudingumo koeficientas yra 97,2 %. Maitinimo šaltinis dirba tuo efektyviau, kuo įėjimo įtampa artimesnė išėjimo įtampai. Pasyviuose elementuose kaupiamas mažesnis kiekis energijos, per



4.3.4 pav. Maitinimo šaltinio naudingumo koeficientas keičiant apkrovos srovę, kai įėjimo įtampa 6 V (raudona), 12 V (pilka), 18 V (mėlyna)

droselį ir tranzistorių teka mažesnės vidutinės vertės srovės su mažesnėmis pulsacijomis. Kuo mažesnė srovė teka, tuo mažiau šyla komponentai ir gaunamas aukštesnis naudingumo koeficientas.

Atlikus kompiuterinius tyrimus nustatyta, kad kintant maitinimo šaltinio įėjimo įtampai ir apkrovos dydžiui, keitiklyje generuojamos skirtingų amplitudžių pulsacijos. Iš rezultatų matoma, kad kai generuojami didžiausi elektromagnetiniai triukšmai, schemos komponentai kaista labiausiai.

5. Keitiklio darbo režimų eksperimentinis tyrimas

Eksperimentinių tyrimų metu nustatytos *boost* keitiklio su LM5155 valdikliu generuojamų elektromagnetinių triukšmų, komponentų šilimo ir naudingumo koeficiento priklausomybės nuo įėjimo įtampos, apkrovos ir darbo dažnio kitimo. Bandymų metu buvo matuoti keitiklio įėjimo ir išėjimo parametrai, skaičiuojamas naudingumo koeficientas. Tyrimų metu buvo keičiamas apkrovos dydis ir įėjimo įtampa, darbo dažnis.

Keitiklio LM5155EVM-BST maketas skirtas paaukštinti maitinimo įtampą iki 24 V, kai įėjimo įtampa kinta 6-18 V ribose. Didžiausia išėjimo galia – 48 W. Maketas pritaikytas atlikti įvairias modifikacijas, leidžiančias perjungti valdiklio išvadus. Matavimų taškai į maketo paviršių išvesti specialiais išvadais. Maitinimo šaltinio darbą galima sinchronizuoti prijungus išorinis PWM signalą.

Prie keitiklio išvado TP10 (žr. priedą Nr. 2) prijungus stačiakampio formos PWM signalą, galima valdyti maitinimo šaltinio darbo dažnį 375-505 kHz ribose. Į TP 10 paduotas aukšto lygio impulsas įjungia tranzistorių Q2, taip pervedant UVLO/SYNC išvadą į žemą lygį. Toks išvado lygis išjungia LM5155EVM-BST keitiklį iki kol PWM signalas pereina į žemą loginį lygį.

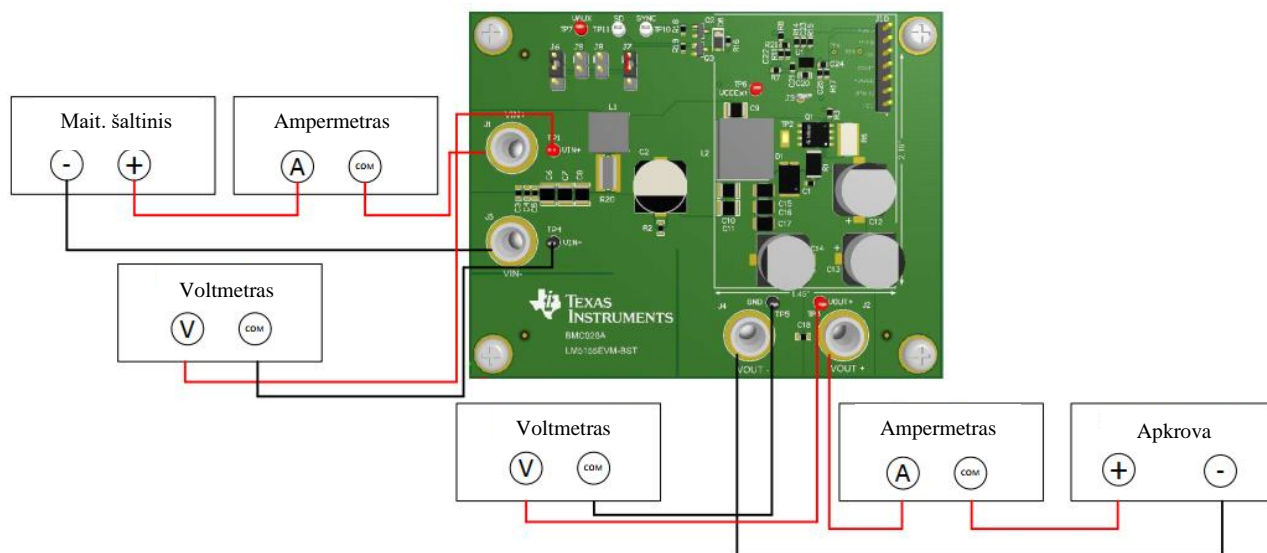
Eksperimentiškai sudaryto keitiklio tyrimui buvo naudojamas korporacijos *Texas Instruments* įtampą aukštinančio nesinchroninio impulsinio maitinimo šaltinio maketas LM5155EVM-BST. Naudojamo modelio pagrindiniai parametrai:

- LM5155DSSR 2,2 MHz plataus įėjimo įtampų spektro, įtampą aukštinantis valdiklis.
- Įėjimo įtampos vertė: nuo 6 V iki 18 V.
- Išėjimo įtampos vertė: 24 V.
- Maksimali apkrovos srovė: 2 A.
- Darbo dažnis: 440 kHz (pastovus) arba 375-505 kHz (reguliuojamas).

LM5155EVM-BST keitikliui maitinti naudojamas laboratorinis *MASTECH HY3005-2* laboratorinis maitinimo šaltinis. Rezultatų fiksavimui naudojamas *GW INSTEK GDS-2102* skaitmeninis osciloskopas ir termovizorius *FLIR E40BX*.

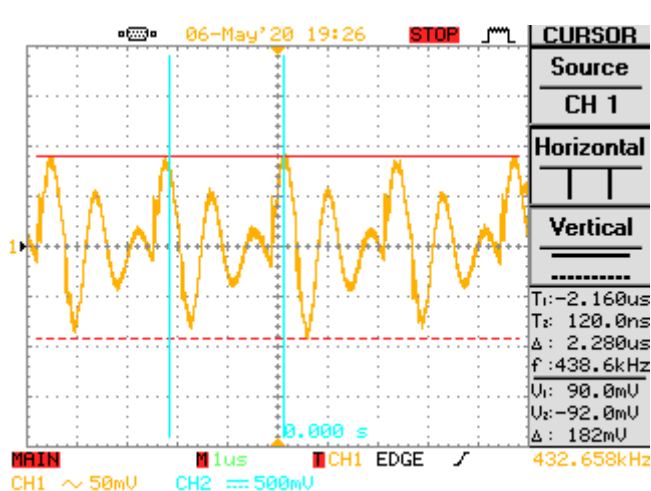
5.1. Keitiklio darbo režimų eksperimentinis tyrimas

Bandymai atliekami sujungus 5.1.1 pav. pateiktą schemą. Eksperimento metu buvo tiriama keitiklio išėjimo srovės ir įtampos signalai prie skirtingų apkrovų, keičiant įėjimo įtampos vertes. Naudojant osciloskopą buvo išmatuotos gautų signalų pulsacijų amplitudės. Pastebėta, kad maitinimo šaltiniui dirbant nominaliu dažniu, kai apkrovos srovė lygi 1,45 A, prie skirtingų įėjimo įtampos verčių gaunamos skirtingos apkrovos srovės pulsacijos. Gauto signalo grafikas pateiktas 5.1.2 pav., kur vertikaliomis linijomis išskirtas vienas periodas $T = 2,280 \mu\text{s}$. Jungiklio darbo dažnis $f_{\text{sw}} = 438,6 \text{ kHz}$.

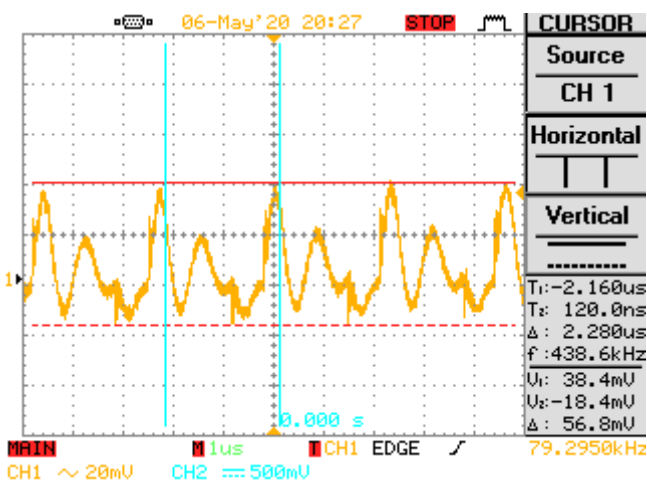


5.1.1 pav. LM5155EVM-BST keitiklio tyrimo schema

Tekant 1,45 A apkrovos srovei, kai įėjimo įtampa $U_{\text{IN}} = 6 \text{ V}$, maksimali išėjimo įtampos pulsacijų amplitudė siekia 182 mV. Tai sudaro apie 0,75 % išėjimo įtampos vertės. Padidinus U_{IN} iki 18 V, pulsacijos pastebimai sumažėja iki 56,8 mV. Galima paaiškinti tuo, kad keliant maitinimo įtampą, droselyje teka mažesnės amplitudės srovė ir kiekvieną periodą persijungus tranzistoriui, pastebimos mažesnės išėjimo įtampos pulsacijų amplitudės.

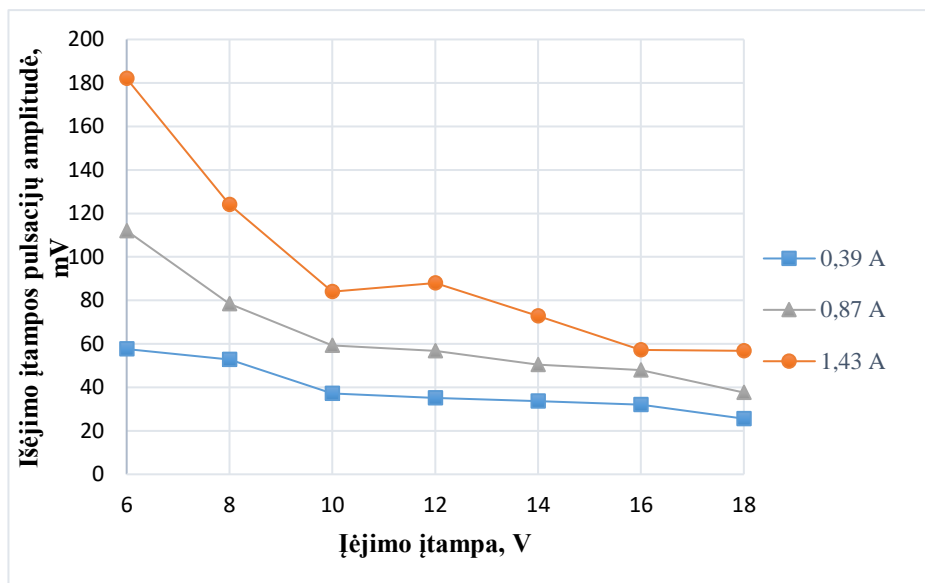


5.1.2 pav. Išėjimo įtampos grafikas, kai $U_{\text{IN}} = 6 \text{ V}$, $I_{\text{A}} = 1,45 \text{ A}$



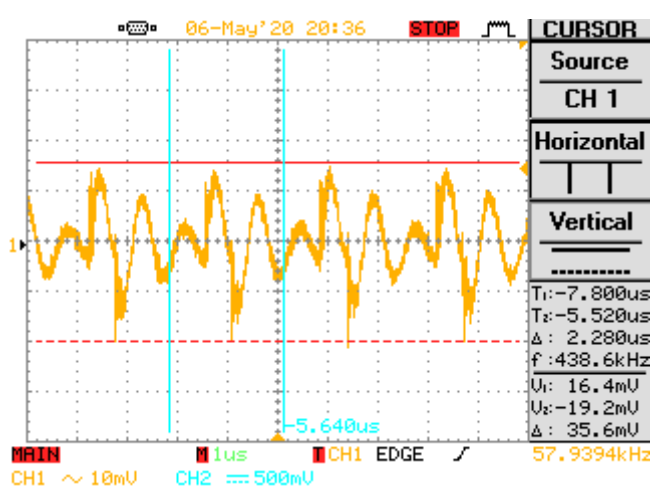
5.1.3 pav. Išėjimo įtampos grafikas, kai $U_{\text{IN}} = 18 \text{ V}$, $I_{\text{A}} = 1,45 \text{ A}$

Atlikus matavimus su trimis skirtingomis apkrovomis, keičiant įėjimo įtampą 6-18 V ribose, pastebėta, kad mažiausi išėjimo įtampos iškrypimai gaunami, kai maitinimo įtampa yra didžiausia galima, o apkrovos srovė mažiausia (žr. 5.1.4 pav.)

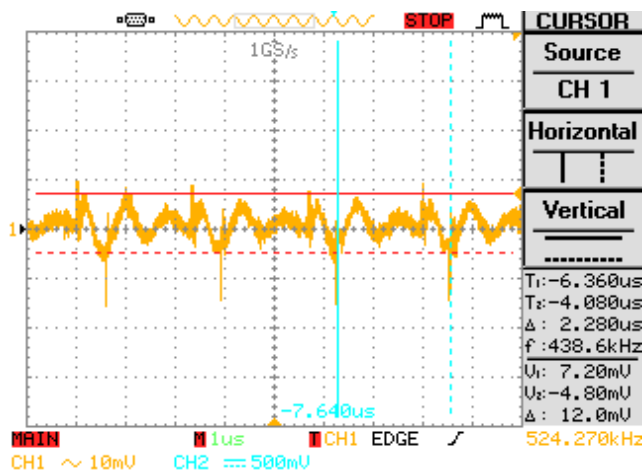


5.1.4 pav. Išėjimo įtampos pulsacijų amplitudės priklausomybė nuo išėjimo įtampos ir apkrovos srovės, kai įėjimo įtampa kinta nuo 6 V iki 18 V

Atlikti eksperimentiniai bandymai, kurių metu buvo keičiamos keitiklio maitinimo įtampos vertės prie skirtingų apkrovų ir matuojamos apkrovos srovės pulsacijų amplitudės. Gauta, kad srovės pulsacijos skiriasi nuo 6,56 mA iki 38,8 mA. Taip pat kaip ir įtamos, didžiausios pulsacijos užfiksuojamos, kai schemos įėjimo įtampa yra minimali. Įtampos paaukštinimui nuo 6 V iki 24 V tranzistorius praleidžia srovę daugiau kaip 70 % ciklo, todėl droselio magnetiniame lauke sukaupiamas didelis kiekis energijos, kuri išsikrauna per apkrovą ir išėjimo kondensatorius, tranzistoriui perėjus į išjungtą būseną. Srovės grafikuose pastebimi generuojami elektromagnetiniai triukšmai, kurie keitiklyje atsiranda dėl tranzistoriaus persijungimo kiekvieno ciklo metu (5.1.5 pav., 5.1.6 pav.). Siekiant mažinti šias pulsacijas, mažinant sklaidžiamų EMI kiekį, reikalinga naudoti aukšto dažnio pulsacijas slopinančius elementus – keraminius kondensatorius.

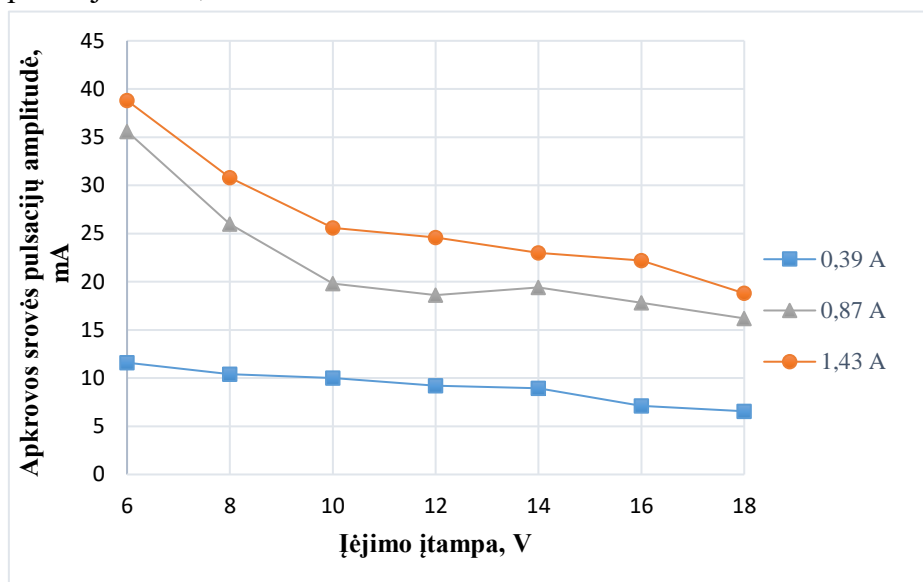


5.1.5 pav. Apkrovos srovės grafikas, kai $U_{IN} = 6$ V, $I_A = 0,87$ A



5.1.6 pav. Apkrovos srovės grafikas, kai $U_{IN} = 18$ V, $I_A = 0,39$ A

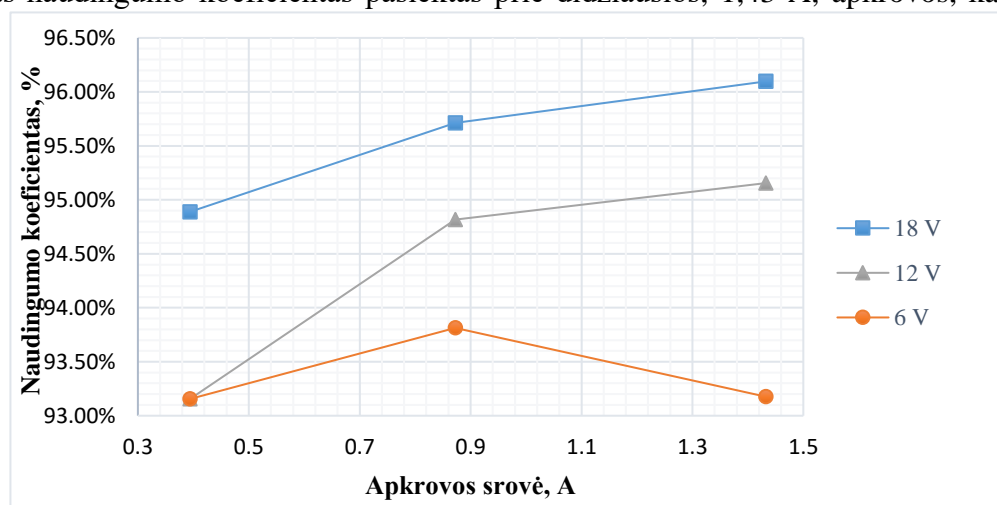
Keičiant maitinimo šaltinio įėjimo įtampą 6-18 V ribose, pastebėta, kad mažiausi išėjimo srovės iškraipymai gaunami, kai maitinimo įtampa yra didžiausia galima, o apkrovos srovė mažiausia. Apibendrinus rezultatus nubrėžta apkrovos srovės priklausomybė nuo keitiklio įėjimo įtampos prie skirtingų apkrovų (žr. 5.1.7 pav.). Kai įėjimo įtampa lygi 6 V, apkrovos srovės pulsacijos su mažiausia 0,39 A apkrova yra apie 12 mA. Apkrovai padidėjus daugiau nei 3 kartus, iki 1,43 A, pulsacijos atitinkamai padidėja iki 38,9 mA.



5.1.7 pav. Apkrovos srovės pulsacijų amplitudės priklausomybė nuo išėjimo įtampos ir apkrovos srovės, kai įėjimo įtampa kinta nuo 6 V iki 18 V

Generuojami elektromagnetiniai trukdžiai gali sutrikdyti ne tik greta esančių prietaisų darbą, tačiau taip pat sukelia keitiklio komponentų papildomą kaitimą. Dėl šios priežasties svarbu įvertinti keitiklio darbo efektyvumą prie skirtingų apkrovų, keičiant įėjimo įtampos vertę.

Atliekant bandymus, buvo matuojama maitinimo šaltinio naudojama galia ir galia, perduodama apkrovai. Apibendrinus gautus duomenis, apskaičiuotas keitiklio maketo naudingumo koeficientas, keitikliui dirbant prie skirtingų įėjimo įtampų ir skirtingų apkrovų. Rezultatai pateikti 5.1.8 pav. Didžiausias naudingumo koeficientas pasiektas prie didžiausios, 1,43 A, apkrovos, kai maitinimo

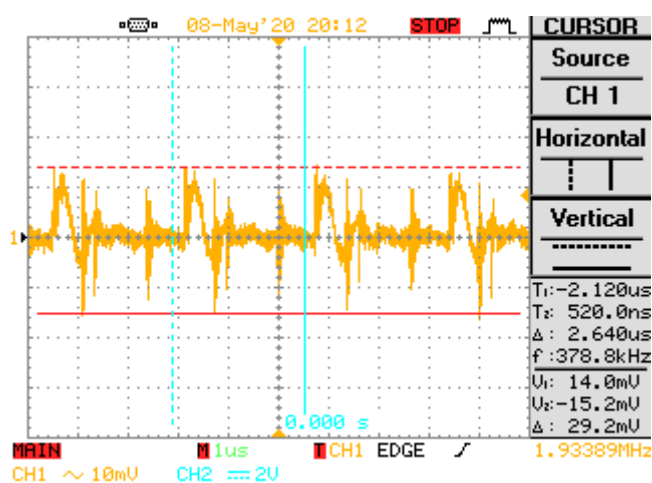


5.1.8 pav. Keitiklio naudingumo koeficiento priklausomybė nuo apkrovos srovės ir įėjimo įtampos

įtampa buvo artimiausia išėjimo įtampai. Tokiame režime teka ganėtinai mažos srovės, nedideli signalų iškraipymai, minimaliai šyla komponentai.

Šiuolaikiniams impulsiniams maitinimo šaltiniams ypatingai svarbus aukštas darbo dažnis. Tranzistoriui greičiau persijunginėjant, galima parinkti mažesnius energiją kaupiančius pasyviuosius elementus. Naudojant LM5155EVM-BST keitiklį, darbo dažnį galima keisti prie keitiklio išvado TP10 prijungus stačiakampio formos PWM signalą.

Nustatyti darbo dažnio įtaką generuojamiems triukšmams buvo atliktas tyrimas. Prijungus išorinį PWM signalo generatorių ir keičiant signalo dažnį bei įėjimo įtampą, buvo tirti maitinimo šaltinio parametrai. Bandymo metu, keitikliui dirbant minimaliu 380 kHz dažniu, atlikti apkrovos srovės pulsacijų matavimai, keičiant įėjimo įtampos vertę, kai apkrovos srovė buvo pastovi (0,87 A). Apkrovos srovės I_A pulsacijų grafikas tekant 0,87 A apkrovos srovei ir tranzistoriui persijunginėjant 380 kHz dažniu pateiktas 5.1.9 pav.

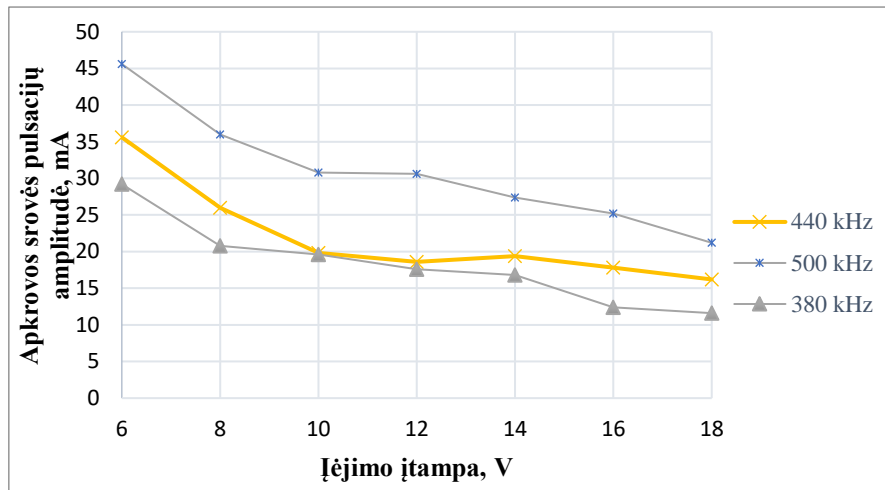


5.1.9 pav. Apkrovos srovės pulsacijų grafikas, kai įėjimo įtampa 6 V, $I_A = 0,87$ A

Atkreiptinas dėmesys, kad gautos apkrovos pulsacijos yra 29,2 mA, kai tokios pat apkrovos pulsacijos prie nominalaus 440 kHz dažnio siekė 35,6 mA. Keitiklio bandymai tekant 0,87 A apkrovos srovei buvo atlikti keičiant įėjimo įtampą nuo 6 V iki 18 V. Maitinimo šaltinio darbo dažnis buvo sinchronizuojamas išoriniu PWM signalu. Bandymu metu tranzistorius persijunginėjo 380 kHz, 440 kHz ir 500 kHz dažniais.

Grafiškai atvaizdavus eksperimento metu gautus rezultatus pastebėta, kad pulsacijų amplitudė priklauso nuo keitiklio darbo dažnio (žr. 5.1.10 pav.). Kuo sparčiau vyksta tranzistoriaus perjunginėjimas, tuo daugiau generuojama elektromagnetinių triukšmų. Didžiausių pulsacijų metu ($U_{in} = 6$ V, $f_{sw} = 500$ kHz), jų amplitudė sudaro apie 5,3 % vidutinės signalo vertės. Lyginant didžiausios amplitudės pulsacijas su mažiausios amplitudės, pastebimas net 64 % tarpusavio skirtumas. Aukštesniu dažniu dirbančių maitinimo šaltinių išėjimo srovė yra labiau iškraipoma, ją sudaro didesnės amplitudės aukštesniųjų eilių harmonikos.

Nors aukštesniu dažniu dirbantys maitinimo šaltiniai dažnai dirba efektyviau, jiems pagaminti gali būti naudojami mažesni pasyvieji komponentai, svarbu įvertinti ir neigiamas didėjančio dažnio



5.1.10 pav. Apkrovos srovės pulsacijų amplitudės priklausomybė nuo keitiklio darbo dažnio, kai $I_A = 0.87A$

sukeliamas pasekmes – auga signalų iškraipymai ir generuojami aukštesnio dažnio elektromagnetiniai triukšmai. Optimalus keitiklio komponentų dydis, atsižvelgiant į generuojamus triukšmus, parenkamas, kai darbo dažnis lygus 440 kHz.

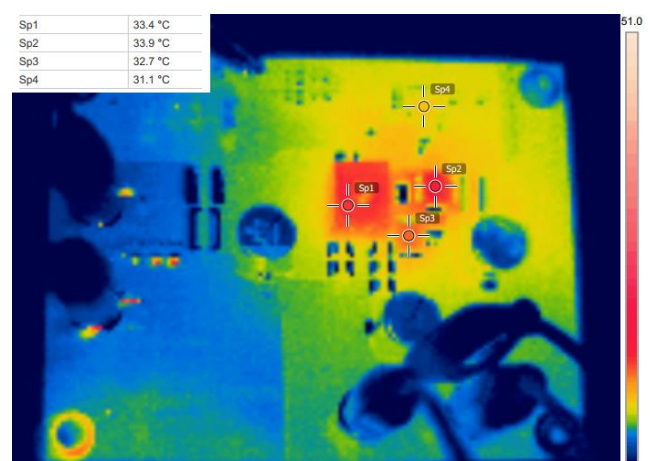
5.2. Šiluminis maitinimo šaltinio tyrimas

Bandymų metu taip pat buvo tiriama maitinimo šaltinio darbo parametrų įtaka komponentų šilumui. Tiriant keitiklį naudojamas išorinis PWM signalo generatorius, sinchronizuojantis eksperimentinio maketo veikimą nustatytu dažniu. Kadangi modeliavimo metu pastebėti didžiausi išėjimo įtampos ir apkrovos srovės pulsacijų, elementų šilimo skirtumai, kai įėjimo įtampa yra 6 V ir 18 V, eksperimentas atliekamas su šiomis vertėmis, keičiant apkrova tekančią srovę. Darbo dažnis nustatytas 500 kHz dažnio impulso pločiu moduluotu signalu. Prijungto eksperimentinio keitiklio vaizdas pateiktas 5.2.1 pav.

Atliekant pirmą bandymą prijungta 0,43 A apkrovos srovė, kai įėjimo įtampa buvo minimali (6 V).



5.2.1 pav. Eksperimentinis LM5155EVM-BST modelis šiluminių bandymų metu



5.2.2 pav. LM5155EVM-BST modelis šiluminių bandymų metu, $U_{in} = 6 V$, $I_a = 0,43 A$

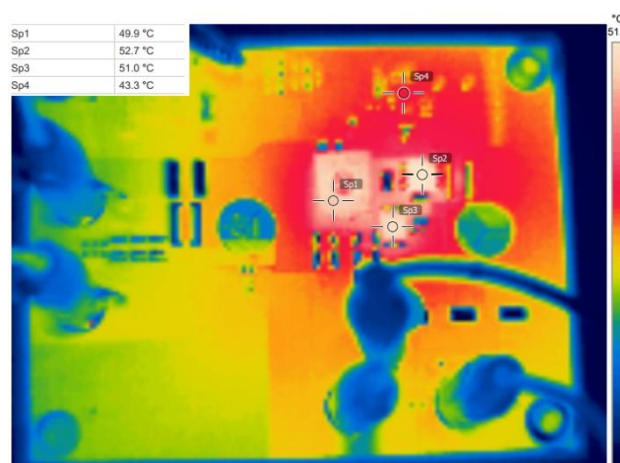
Termovizoriaus gamintojo programine įranga apdorotame vaizde ryškiausiai išsiskyrė trys šylantys komponentai – droselis, galios tranzistorius ir diodas (žr. 5.2.2 pav.). Paveiksle žymekliu Sp1 pažymėta ritė, Sp2 – tranzistorius, Sp-3 – Šotkio diodas ir Sp-4 – LM5155DSSR valdiklis. Šiuo

režimu nustatyta, kad labiausiai šyla tranzistorius, nors ryškaus skirtumo tarp kitų matuojamų komponentų nėra.

Padidinus apkrovą iki 0,87 A, pastebimai ėmė šilti kai kurie keitiklio komponentai. Labiausiai pakilo Šotkio diodo temperatūra. Ji padidėjo per 6,6 °C, iki 39,3 °C (žr. 5.2.3 pav.). Didesnį elementų šilimą sąlygojo didesnis energijos kiekis, kurį reikia perduoti tranzistoriaus vieno darbo ciklo metu. Pirmą ciklo dalį droselis kaupia energiją, kai tranzistorius įjungtas ir praleidžia srovę. Jungikliui perėjus į išjungtą būseną, droselio magnetiniame lauke sukaupta energija turi būti greitai perduota apkrovai ir išėjimo kondensatoriui. Staigus srovės šuolis, aukšta amplitudė ir generuojami triukšmai šildo diodą su rite. Tranzistoriaus šilimui svarbus persijungimo momentas. Tuo metu, trumpą laiko momentą, per sandūrą teka didelė, droselį įkraunanti, srovė ir sandūroje krenta įtampa. Taip pasireiškia laidumo nuostoliai.



5.2.3 pav. LM5155EVM-BST modelis šiluminių bandymų metu, $U_{in} = 6 \text{ V}$, $I_a = 0,87 \text{ A}$



5.2.4 pav. LM5155EVM-BST modelis šiluminių bandymų metu, $U_{in} = 6 \text{ V}$, $I_a = 1,45 \text{ A}$

Atliekant bandymą su 1,45 A apkrovos srove, pastebimas ryškus pagrindinius energijos srautus kaupiančių ir komutuojančių elementų kaitimas (žr. 5.2.4 pav.). Kadangi iš droselio į apkrovą perduodami dar didesni energijos srautai, elementai šyla dar labiau. Stebint aplink komponentus esančią spausdinto montažo plokštę, matomas jos šilimas. Tai reiškia, kad paviršinio tvirtinimo elementai per kontaktinius paviršius gerai perduoda šiluminę energiją ir plokštė spinduliuoja šilumą, atlieka pasyvaus aušintuvo funkciją.

Kaip ir tikėtasi, atliekant bandymą su aukštesnėmis maitinimo įtampomis, keitiklis šyla mažiau dėl mažesnio darbo laiko ir trumpesnį laiką tekančių induktyvumo srovių iš induktyvumo.

Gauti rezultatai ganėtinai sutampa su modeliavimo metu gautomis vertėmis. Pastebėta, kad galios tranzistoriaus temperatūros priklausomybė nuo apkrovos srovės yra beveik tiesinė. Tai reiškia, kad projektuojant didesnės galios maitinimo šaltinius galima apytiksliai įvertinti komponento kaitimą ir imtis priemonių perteklinės šilumos nuvedimui.

Eksperimentų metu gauti duomenys rodo, kad keitiklio generuojami elektromagnetiniai triukšmai priklauso nuo įėjimo įtampos, apkrovos ir darbo dažnio kitimo. Aukštesnis naudingumo koeficientas ir mažesnis elementų šilimas pasiekiamas, kai generuojami mažesni elektromagnetiniai triukšmai. Sudarant maitinimo šaltinį svarbu ne tik parinkti aukštą darbo dažnį ir mažus elementus, bet ir įvertinti kartu su juo atsirandančias EMI problemas, didesnį komponentų šilimą.

Išvados

1. Atlikus literatūros analizę, pastebėta, kad aukštu dažniu veikiančiuose konverteriuose darbo dažnis parenkamas atsižvelgiant į jam keliamus reikalavimus. Didinant veikimo spartą, mažėja reikalingas energijos kiekis, kurį reikia kaupti pasyviuosiuose elementuose, todėl parenkami mažesni droselis ir kondensatorius, mažėja montažinės plokštės dydis, svoris ir kaina. Tačiau atsiranda didesni tranzistoriaus perjungimo nuostoliai ir į aplinką skleidžiami elektromagnetiniai kartotinių dažnių trukdžiai.
2. Perjungimo nuostolius galima mažinti parenkant geresnių parametrų elementus ar parenkant optimalų schemas veikimo dažnį. Didinant schemas veikimo dažnį, dažniau perjungiamas tranzistorius, bet galimi mažesni energiją kaupiantys pasyvieji elementai. Keitiklio projektavimo metu svarbu parinkti optimalų variantą tarp komponentų kiekio, plokštės dydžio ir veikimo charakteristikų.
3. Parazitinių parametrų ir kitų komponentų keliamą EMI įtaką galima mažinti ekranuojant atskiras detales ar visą keitiklį, naudojant įvairius filtrus, teisingai išdėstant elementus ant montažinės plokštės. Keitikliams, kuriems keliami aukšti reikalavimai, triukšmų slopinimui naudojami aktyvieji ar skaitmeniniai aktyvieji filtrai.
4. Atlikus maitinimo šaltinio tranzistoriaus persijungimo signalų spektrinę analizę, nustatyta, kad tranzistoriaus parazitiniai elementai daro įtaką generuojamiems triukšmams. Naudojant skirtingų parametrų tranzistorius pirmos harmonikos amplitudės vertės svyravo nuo 75.49 dB iki 71.21 dB. Maitinimo šaltiniai, turintys tranzistorius su mažesniu parazitiniu užtūros Q_G krūviu, dirba efektyviau. Kai tranzistoriaus $Q_G=108$ nC, keitiklio naudingumo koeficientas yra 97,2%, o kai $Q_G=6.8$ nC – 98.6%. Tranzistoriaus pasirinkimas maitinimo šaltiniui turi didelę reikšmę maitinimo šaltinio naudingumo koeficientui ir generuojamų trukdžių spektrui.
5. Modeliuojant keitiklio darbo veikimo parametrus gautas 98,63% naudingumo koeficientas, kai apkrovos 1,43 A ir įėjimo įtampa 18 V. Eksperimentų metu maitinimo šaltinio efektyvumas siekė 96,1%, kai apkrovos 1,43 A ir įėjimo įtampa 18 V.
6. Bandymų metu, naudojant išorinius keitiklio darbą sinchronizuojančius signalus, nustatyta, kad dirbant aukštesnių dažnių ribose labiau iškraipomi signalai, dėl šios priežasties generuojami papildomi elektromagnetiniai triukšmai. Keitikliui dirbant su 6 V įėjimo įtampa, persijunginėjant 380 kHz dažniu apkrovos srovės pulsacijos siekė 29,2 mA, kai 500 kHz – 46 mA. Tarp keitiklio generuojamų elektromagnetinių triukšmų ir komponentų dydžio parenkamas optimalus variantas, kai darbo dažnis lygus 440 kHz, srovės pulsacijos – 35,6 mA. Sudarant maitinimo šaltinį svarbu ne tik parinkti aukštą darbo dažnį ir mažus elementus, bet ir įvertinti kartu aukštu dažniu atsirandančias EMI problemas.
7. Eksperimentinių tyrimų metu nustatyta, kad LM5155BST-EVM maitinimo šaltinyje labiausiai šyla galios tranzistorius, kurio temperatūra beveik tiesiškai priklauso nuo apkrovos srovės. Apkrovos srovei padidėjus nuo 0,43 A iki 1,45 A, tranzistoriaus temperatūra pakilo nuo 33.9°C iki 52.7°C.

Literatūros sąrašas

1. XU, D., GUAN, Y., WANG, Y. and WANG, W. Topologies and control strategies of very high frequency converters: A survey. In CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, vol. 2, no. 1, pp. 28-38, 2017. [žiūrėta 2020-01-05]. Prieiga per: doi: 10.24295/CPSSTPEA.2017.00004
2. PILAWA-PODGURSKI, R. C. N., SAGNERI, A. D., RIVAS, J. M., ANDERSON, D. I. And PERRESULT, D. J. Very-High-Frequency Resonant Boost Converters. In IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 6, pp. 1654-1665, 2009. [žiūrėta 2020-01-05]. Prieiga per: doi: 10.1109/TPEL.2009.2016098
3. MADSEN, M., KNOTT, A., ANDERSEN, M. A. E. and MYNSTER, A. P. Printed circuit board embedded inductors for very high frequency Switch-Mode Power Supplies. 2013 IEEE ECCE Asia Downunder, Melbourne, VIC, 2013, pp. 1071-1078. [žiūrėta 2020-01-05]. Prieiga per: doi: 10.1109/ECCE-Asia.2013.6579241
4. NOUR, Y., OUYANG, Z., KNOTT, A. and JOGENSEN, I., Design and implementation of high frequency buck converter using multi-layer PCB inductor. IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 1313-1317. [žiūrėta 2020-01-05]. Prieiga per: doi: 10.1109/IECON.2016.7794148
5. ZHOU, J., XIE, Y. and ZHOU, M. High frequency range conducted common-mode noise suppression in SMPS. 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), pp. 2360-2364, 2016. [žiūrėta 2019-11-10]. Prieiga per: doi: 10.1109/APEC.2016.7468195
6. KEEPING, S. Design Trade-offs when Selecting a High-Frequency Switching Regulator. Digi-Key, 2015 [žiūrėta 2020-01-05]. Prieiga per internetą: <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2015/feb/design-trade-offs-when-selecting-a-high-frequency-switching-regulator>
7. LIANG, Z., GUO, R., LI, J. and HUANG, A. Q. A High-Efficiency PV Module-Integrated DC/DC Converter for PV Energy Harvest in FREEDM Systems. In IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 3, pp. 897-909, 2011. [žiūrėta 2020-01-05]. Prieiga per: doi: 10.1109/TPEL.2011.2107581
8. CASTALDO, A. Texas Instruments. Switching Regulator Fundamentals. Application report, 2019. [žiūrėta 2019-05-10]. Prieiga per: <http://www.ti.com/lit/an/snva559c/snva559c.pdf>
9. LEE, Y., WEI, C., and CHEN, C. An integrated step-down DC-DC converter with low output voltage ripple in 2010 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. [žiūrėta 2020-01-05]. Prieiga per: doi: 10.1109/ICIEA.2010.5514889
10. NOZADIAN, M. H. B., BABAEI, E., RANJBARIZAD, V. and CECATI, C. Analysis and design of switched-boost inverter in CCM, DCM and BCM operations. IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Beijing, pp. 8015-8020. 2017. [žiūrėta 2020-01-05]. Prieiga per: doi: 10.1109/IECON.2017.8217406
11. MANNAM, R. and VANGALA, N. Soft switching boost converter for DC input LED drivers. 2016 7th India International Conference on Power Electronics (IICPE), Patiala, pp. 1-5, 2016. [žiūrėta 2020-01-05].

12. YOON, H., LEE, H., HAM, S., CHOE, H. and KANG, B. Off-Time Control of LLC Resonant Half-Bridge Converter to Prevent Audible Noise Generation Under a Light-Load Condition. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 33, NO. 10, OCTOBER 2018. [žiūrēta 2020-01-05]. Prieiga per: doi: 10.1109/TPEL.2017.2774840
13. FARHADI, A. Modeling, simulation, and reduction of conducted electromagnetic interference due to a PWM buck type switching power supply. 2008 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power. [žiūrēta 2020-01-05]. Prieiga per: doi: 10.1109/ICHQP.2008.4668755
14. MUSZNICKI, P., RUCINSKI, M., TURZYNSKI, M., and ABRAMIK, S. Prediction of ringing frequencies in DC-DC boost converter. 2016 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE, pp. 672-675. [žiūrēta 2020-01-05]. Prieiga per: doi: 10.1109/EMCEurope.2016.7739254
15. PARK, S., HUYNH, H. and KIM, S. Analysis of EMI reduction methods of DC-DC buck converter. 2015 10th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMC Compo). Prieiga per: doi: 10.1109/EMCCompo.2015.7358337
16. NASIRI, A. Different topologies of active EMI/ripple filters for automotive DC/DC converters. 2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. [žiūrēta 2020-01-05]. Prieiga per: doi: 10.1109/VPPC.2005.1554551
17. HAMZA, D., JAIN, P. Conducted EMI noise mitigation in DC-DC converters using active filtering method. 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference. [žiūrēta 2020-01-05]. Prieiga per: doi: 10.1109/PESC.2008.4591923
18. KOO, K., KIM, J., KIM M., KIM, J. Impact of PCB design on switching noise and EMI of synchronous DC-DC buck converter. 2010 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. [žiūrēta 2020-01-05]. Prieiga per: doi: 10.1109/ISEMC.2010.5711249
19. KESTER, W., ERISMAN, B. Switching regulators. Analog devices, Inc. Žiūrēta [2020-03-14]. Prieiga internetu: <https://www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/Practical-Design-Techniques-Power-Thermal/Section3.pdf>
20. LAKKAS, G. MOSFET power losses and how they affect power-supply efficiency. Analog Applications Journal. 2016. [žiūrēta 2020-05-22]. Prieiga internetu: <http://www.ti.com/lit/an/slyt664/slyt664.pdf?&ts=1589739060184>
21. CHANG, X., YANG, Y., CHEN, W., YANG, X. Implementation of a novel active common-mode filter used in DC-DC converters. 2014 XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS). [žiūrēta 2020-06-01]. Prieiga per: doi: 10.1109/URSIGASS.2014.6929540.
22. JI, J., CHEN, W., GU, Z., YANG, X., ZHANG, X. A Control Method of Digital Active EMI Filter. 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). 2017. [žiūrēta 2020-06-01]. Prieiga per: doi: 10.1109/APEC.2017.7930839.
23. HAMZA, D., QIU, M. Digital Active EMI Control Technique for Switch Mode Power Converters. IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, VOL. 55, NO. 1, FEBRUARY 2013. [žiūrēta 2020-06-01]. Prieiga per: doi: 10.1109/TEMC.2012.2213590.
24. HINOV, N., ARNAUDOV, D., VALCHEV, V., VUCHEV, S. Comparative loss analysis of boost and synchronous boost DC-DC converters. 2017 XXVI International Scientific Conference

- Electronics (ET), Sozopol, 2017, pp. 1-4.
[žiūrēta 2020-06-01]. Prieiga per: doi: 10.1109/ET.2017.8124347.
25. Vishay Intertechnology. Power MOSFET Basics: Understanding Gate Charge and Using it to Assess Switching Performance. 2016. [žiūrēta 2020-01-26]. Prieiga internetu: <https://www.vishay.com/docs/73217/an608a.pdf>.
26. Texas Instruments Inc. LM5155x 2.2-MHz Wide Input Nonsynchronous Boost, SEPIC, Flyback Controller. 2018. [žiūrēta 2020-05-22]. Prieiga internetu: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm5155.pdf?ts=1590152008652>.
27. HEGARTY, T. Texas Instruments Inc. An overview of conducted EMI specifications for power supplies 2018. [žiūrēta 2020-06-01]. Prieiga internetu: <http://www.ti.com/lit/wp/slyy136/slyy136.pdf?ts=1590530538234>.

Priedai

1 priedas. MATLAB signalo spektrinės analizės kodas.

```
clc; clear all;

signal = load('Usw1.txt');

N = length(signal);

fs = N/0.00005; % atskaitų skaičius per sekundę

X_mags = abs(fft(signal));

bin_vals = [0 : N-1];

fax_Hz = bin_vals*fs/N;

N_2 = ceil(N/2);

semilogx(fax_Hz(1:N_2), 20*log10(X_mags(1:N_2)))

xlabel('Frequency (Hz)')

ylabel('Power (dB)');

title('Vienpusis galios spektras');

axis tight

xlim ([100000 10000000]) % dažnio ribos
```

2 priedas. LM5155EVM-BST keitiklio schema.

