



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Elektromagnetinių triukšmų mažinimo aukšto dažnio  
žeminančiuosiuose įtampos keitikliuose tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Vaidas Abakas**

Projekto autorius

**Prof. dr. Alvydas Dosinas**

Vadovas

---

**Kaunas, 2019**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Elektromagnetinių triukšmų mažinimo aukšto dažnio  
žeminančiuosiuose įtampos keitikliuose tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

---

**Vaidas Abakas**

Projekto autorius

**Prof. dr. Alvydas Dosinas**

Vadovas

**Doc. dr. Mindaugas Vaitkūnas**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2019**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

Vaidas Abakas

## **Elektromagnetinių triukšmų mažinimo aukšto dažnio žeminančiuosiuose įtampos keitikliuose tyrimas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Vaido Abako, baigiamasis projektas tema „Elektromagnetinių triukšmų mažinimo aukšto dažnio žeminančiuosiuose įtampos keitikliuose 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)

Abakas, Vaidas. Elektromagnetinių triukšmų mažinimo aukšto dažnio žeminančiuosiuose įtampos keitikliuose 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: žeminantysis įtampos keitiklis, aukštas dažnis, elektromagnetinis triukšmas.

Kaunas, 2019. 68 p.

### **Santrauka**

Šio darbo tikslas yra atlikti išsamią maitinimo šaltinių literatūros analizę ir remiantis naujausiais pasiekimais ir technologijomis, sudaryti ir ištirti aukšto dažnio žeminantįjį įtampos keitiklį. Tyrimų dalyje atlikti kompiuteriu sudaryto modelio tyrimą bei eksperimentiškai ištirti sudaryto keitiklio parametrus bei veikimo charakteristikas. Darbo pabaigoje padaryti išvadas.

Literatūros apžvalgos dalyje yra apžvelgiamos naujausios keitiklių principinės schemos, jų privalumai ir trūkumai. Analizuojama sinchroninių įtampos keitiklių naujausi pasiekimai ir atsirandančios problemos.

Modeliavimo dalyje yra sumodeliuojamas žeminantysis įtampos keitiklis, parenkami modelio parametrai ir nustatymai. Taip pat atliekamas naudingumo koeficiento matavimas ir grafinis atvaizdavimas bei įvairių keitiklio signalų spektro analizė.

Eksperimentinio tyrimo metu, naudojant įvairią laboratorinę įrangą, buvo išmatuojama keitiklio darbo temperatūra, atvaizduojama naudingumo koeficiento charakteristika bei atliekama įvairių signalų spektro analizė.

Abakas, Vaidas. Investigation of Electromagnetic Interference Reduction of High Frequency Buck-Converters. Master's Final Degree Project / supervisor prof. Alvydas Dosinas; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: DC-DC buck converter, high frequency, electromagnetic interference.

Kaunas, 2019. 68 p.

### **Summary**

The objective of Master's degree final project is to analyze power supply literature and based on newest technologies, make an investigation of high frequency buck converter. In research part, achieve a computer-based simulation and experiment results and characteristics. In the end, conclusions are made.

Analytical literature part consists of scientific inquiries of DC-DC buck converters, newest achievements and technologies. Synchronous buck converter structure and problematics are analyzed.

Simulation section contains parameter selection of high frequency buck converter model. Furthermore, operational characteristics and operational parameters achieved: spectral analysis, efficiency and operational temperature.

In experimental analysis, using various laboratory measuring and monitoring equipment, thermal, spectral analysis and efficiency results were achieved.

# TURINYS

<b>LENTELIŲ SĄRAŠAS .....</b>	<b>7</b>
<b>PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....</b>	<b>8</b>
<b>SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS .....</b>	<b>10</b>
<b>ĮVADAS.....</b>	<b>11</b>
<b>1. AUKŠTO DAŽNIO ĮTAMPOS KEITIKLIAI.....</b>	<b>12</b>
1.1. Aukšto dažnio įtampos keitiklių struktūra.....	12
1.2. Aukšto dažnio rezonansiniai įtampos keitikliai.....	13
1.3. Aukšto dažnio kvazirezonansiniai įtampos keitikliai .....	18
1.4. Sinchroniniai aukšto dažnio įtampos keitikliai .....	20
1.5. Aukšto dažnio maitinimo šaltinių privalumai šviesos diodų apšvietimo įtaisuose .....	22
1.6. Kitos aukšto dažnio maitinimo šaltinių panaudojimo sritys .....	24
1.7. Elektromagnetiniai trikdžiai įtampos keitikliuose.....	25
1.8. Šiuolaikiniai sinchroninių įtampos keitiklių valdikliai .....	28
<b>2. MODELIAVIMAS TEXAS INSTRUMENTS MODELIAVIMO APLINKOJE WEBENCH®</b> .....	<b>38</b>
2.1. Modelio sudarymas ir nustatymai .....	38
2.2. Fiksuoto dažnio ir diodo funkciją imituojančio tranzistoriaus režimai.....	39
2.3. Perjungimo tranzistorių darbo temperatūros modeliavimas.....	43
2.4. Spektro plėtimas elektromagnetiniams trikdžiams mažinti.....	45
<b>3. EKSPERIMENTINIS TYRIMAS.....</b>	<b>49</b>
3.1. Fiksuoto dažnio ir diodo funkciją imituojančio tranzistoriaus režimai .....	50
3.2. Įtampos keitiklio komponentų temperatūros tyrimas .....	54
3.3. Eksperimentinis elektromagnetinių triukšmų šaltinių spektro tyrimas .....	57
<b>IŠVADOS .....</b>	<b>62</b>
<b>INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS .....</b>	<b>63</b>
<b>1 priedas. Modeliavimo schemas komponentų sąrašas.....</b>	<b>66</b>
<b>2 priedas. MATLAB programinio paketo kodas, spektro analizei.....</b>	<b>67</b>
<b>3 priedas. Keitiklio eksperimentinio komplekto LM5141QRGEVM schema .....</b>	<b>68</b>

## LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.7.1 lentelė. Keitiklių EMI klasifikacija .....	26
1.8.1 lentelė. LM5141 išvadų pavadinimai ir funkcijos .....	29
1.8.2 lentelė. Signalų generatoriaus dažnio priklausomybė nuo RT išvado rezistoriaus varžos .....	32
2.1.1 pav. <i>WEBENCH</i> ® modeliavimo aplinkos sudaryta schema .....	39
2.2.1 lentelė. Naudingumo koeficiento priklausomybė nuo išėjimo srovės, esant FPWM režimui...40	
2.2.2 lentelė. Naudingumo koeficiento priklausomybė nuo išėjimo srovės, esant DEMB režimui...42	
2.3.1 lentelė. M1 ir M2 tranzistorių temperatūros priklausomybė nuo įėjimo įtampos bei išėjimo srovės. ....	44
3.1.1 lentelė. Naudingumo koeficiento priklausomybė nuo išėjimo srovės, įjungus FPWM režimą 51	
3.1.2 lentelė. Naudingumo koeficiento priklausomybė nuo išėjimo srovės, keitikliui dirbant DEMB režimu .....	53

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1.1 pav. Aukšto dažnio maitinimo šaltinių blokinė schema .....	12
1.2.1 pav. E klasės rezonansinio inverterio pakopos schema .....	13
1.2.2 pav. EF <sub>2</sub> klasės rezonansinio inverterio pakopos schema .....	14
1.2.3 pav. DE klasės rezonansinio inverterio pakopos schema .....	15
1.2.4 pav. Rezonansinio lygintuvo pakopos schema .....	16
1.2.5 pav. Skirtingos neizoliuojančios impedanso suderinimo schemas.....	17
1.3.1 pav. Pilno periodo kvazirezonansinio keitiklio principinė schema .....	18
1.3.2 pav. Kvazirezonansinio keitiklio vieno impulso charakteristika.....	19
1.4.1 pav. Sinchroninio žeminančiojo įtampos keitiklio principinė schema .....	20
1.4.2 pav. MOSFET tranzistorių valdymo grandinė su parazitiniais induktyvumo ir talpos elementais 22	
1.5.1 pav. 20W galios maitinimo šaltinių palyginimas .....	23
1.5.2 pav. 20W 30Mhz dažnio maitinimo šaltinio naudingumo koeficientas .....	24
1.6.1 pav. <i>Apple</i> sukurtas <i>Sugar Cube</i> įkroviklis .....	24
1.7.1 pav. Elektromagnetinių trikdžių tipai .....	25
1.7.2 pav. Perjungimo metu atsirandantys virpesiai .....	26
1.7.3 pav. Užtūros rezistoriaus prijungimo schema.....	27
1.8.1 pav. LM5141 valdiklis ir jo kompaktiškumas PCB plokštėje .....	28
1.8.2 pav. LM5141 valdiklio funkcinė blokinė schema .....	30
1.8.3 pav. RT kontakto prijungimo schema 2,2MHz ir 440kHz dažniui. ....	32
1.8.4 pav. Signalų spektras prieš ir po jo išplėtimo .....	33
1.8.5 pav. Išėjimo įtampos reguliavimo grandinės schema .....	35
1.8.6 pav. Išėjimo srovės matavimo grandinės schema.....	35
1.8.7 pav. Laikinojo ribojimo režimo veikimo charakteristika .....	36
2.2.1 pav. Naudingumo koeficiento priklausomybė nuo išėjimo srovės $I_{out}$ veikiant FPWM režimu .....	41
2.3.1 pav. M1 ir M2 tranzistorių darbo temperatūros priklausomybė nuo apkrovos .....	44
2.4.1 pav. Įtampos keitiklio įėjimo srovė (a) ir perjungimo tranzistoriaus M2 įtampa (b) .....	46
2.4.2 pav. $I_{in}$ srovės spektro analizė 150kHz–30MHz dažnių diapazone: A – be DITH funkcijos, B – su DITH funkcija .....	47
2.4.3 pav. $V_{sw}$ įtampos spektro analizė 150kHz–30MHz dažnių diapazone: A – be DITH funkcijos, B – su DITH funkcija .....	48



3.1 pav. Įtampos keitiklio eksperimentinio LM5141QRGEVM komplekto komponentų išdėstymas.....	49
3.1.1 pav. LM5141QRGEVM įtampos keitiklio naudingumo koeficiento skaičiavimui skirta jungimo schema .....	50
3.1.2 pav. Naudingumo koeficiento priklausomybė nuo išėjimo srovės $I_{out}$ veikiant FPWM režimu .....	52
3.1.3 pav. Naudingumo koeficiento priklausomybė nuo išėjimo srovės $I_{out}$ veikiant DEMB režimu.....	54
3.2.1 pav. Keitiklio eksperimentinio komplekto LM5141QRGEVM takelių išdėstymas keturiuose sluoksniuose .....	55
3.2.2 pav. Apatinės keitiklio eksperimentinio komplekto LM5141QRGEVM pusės termovizoriaus vaizdas .....	56
3.2.3 pav. Viršutinės keitiklio eksperimentinio komplekto LM5141QRGEVM pusės termovizoriaus vaizdas .....	56
3.3.1 pav. Įtampos keitiklio mazgai spektro analizei atlikti .....	57
3.3.2 pav. Tranzistorių perjungimo momentu atsirandantys įtampos svyravimai.....	58
3.3.3 pav. Galios tranzistorių valdymo dažnio diapazono spektro analizė neįjungtam (kairėje) ir įjungtam DITH režimui (dešinėje) .....	59
3.3.4 pav. Q1 tranzistoriaus santakos mazgo spektro analizė neįjungtam (kairėje) ir įjungtam DITH režimui (dešinėje) .....	59
3.3.5 pav. Q1 tranzistoriaus santakos mazgo spektro analizė neįjungtam (kairėje) ir įjungtam DITH režimui (dešinėje) su apkrova.....	60
3.3.6 pav. Įtampos keitiklio įėjimo filtras.....	61
3.3.7 pav. Įėjimo įtampos spektro analizė be apkrovos (kairėje) ir su 5A apkrova (dešinėje).....	61

## SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS

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

EMC – (angl. *Electromagnetic Compatibility*) – elektromagnetinis suderinamumas;

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

FPWM – (angl. *Forced Pulse Width Modulation*) – priverstinė impulso pločio moduliacija;

LED – (angl. *Light Emitting Diode*) – šviesos diodas;

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

PCB – (angl. *Printed Circuit Board*) – spausdinto montažo plokštė;

PWM – (angl. *Pulse Width Modulation*) – impulso pločio moduliacija;

ZCS – (angl. *Zero Current Switching*) – nulinės srovės perjungimas;

ZVS – (angl. *Zero Voltage Switching*) – nulinės įtampos perjungimas.

## ĮVADAS

Projektuojant įtampos keitiklius visada siekiama sumažinti jų kainą ir fizinių dydį, tuo pačiu padidinant jų naudingumo koeficientą. Įtampos keitiklių tobulėjimas privedė prie labai aukšto naudingumo koeficiento ir didelių galių, kurie išplečia šių keitiklių panaudojimo sritis. Tiriant aukšto dažnio žeminančiuosius keitiklius pastebimas didesnis elektromagnetinių triukšmų kiekis, kuris yra priklausomas nuo pasyviųjų elektronikos komponentų kaip kondensatorių ar induktyvumo ričių.

Pagrindinę aukšto dažnio sinchroninių įtampos keitiklių struktūrą sudaro tranzistoriai ir jų valdymo grandinė. Reikia paminėti, kad šių tranzistorių sinchroniškas perjunginėjimas ir signalo išsikraipymai, svyravimai, temperatūra ir elektromagnetiniai triukšmai yra tiesiogiai siejami su parazitiniu induktyvumu bei talpa galios kontūruose ir užtūros valdymo grandinėse. Parazitinės savybės, kurios priklauso nuo komponentų sandaros ir išdėstymo, įtaiso korpuso bei spausdinto montažo plokštės takelių išdėstymo, lemia įtampos keitiklio naudingumo koeficientą bei elektromagnetinių triukšmų kiekį.

Šiandien, nemažai tyrėjų remiasi jau sukurtomis topologijomis, todėl, kuriant aukšto dažnio maitinimo šaltinius, susiduriama su problemomis, kaip puslaidininkinių komponentų parinkimas, parazitinių parametrų sumažinimas ir keitiklio projektavimas. Norint išvengti perjunginėjimo nuostolių keitikliui veikiant aukštu dažniu ir išlaikant aukštą naudingumo lygį, turi būti sudaromos naujos topologijos žeminančiųjų keitiklių elektromagnetiniams triukšmams ir nuostoliams mažinti.

**Darbo tikslas** – Atlikus išsamią maitinimo šaltinių literatūros analizę ir remiantis naujausiais pasiekimais ir technologijomis, sudaryti ir ištirti aukšto dažnio žeminantįjį įtampos keitiklį.

### **Tyrimo uždaviniai:**

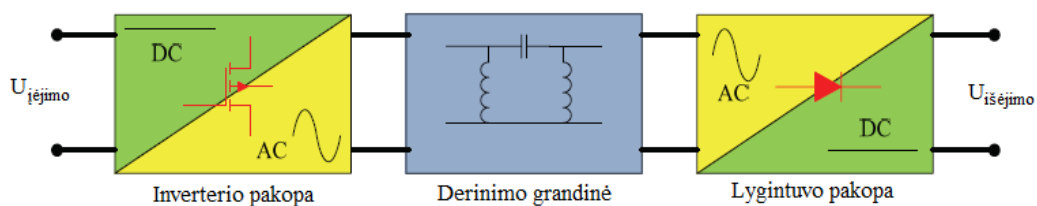
1. Atlikti aukšto dažnio maitinimo šaltinių analizę, išnagrinėti jų veikimo principus bei išsiaiškinti šių šaltinių darbo privalumus ir trūkumus;
2. Sudaryti aukšto dažnio žeminančiojo įtampos keitiklio struktūrą ir nustatyti reikiamus jo parametrus;
3. Kompiuteriu sumodeliuoti aukšto dažnio žeminantįjį įtampos keitiklį ir atlikti jo tyrimą;
4. Atlikti eksperimentinį aukšto dažnio žeminančiojo įtampos keitiklio tyrimą.

# 1. AUKŠTO DAŽNIO ĮTAMPOS KEITIKLIAI

## 1.1. Aukšto dažnio įtampos keitiklių struktūra

Įtampos keitiklis yra įrenginys, kuris tarpusavyje sujungia du šaltinius, įprastai generatorių ir apkrovą. Idealiai veikiantis keitiklis valdo galią tarp šių šaltinių pasiekdamas 100 % naudingumo koeficientą, bet kuriant keitikius atsiranda nemažai kliūčių ir trūkumų, kurie neleidžia pasiekti tokio naudingumo koeficiento.

Aukšto dažnio įtampos keitiklių struktūrą dažniausiai sudaro trys pagrindinės dalys: inverterio pakopa, valdymo grandinė ir lygintuvo pakopa (žr. 1.1.1 pav.) Inverterio pakopoje nuolatinė įtampa keičiama į kintamąją. Lygintuvo pakopoje kintamoji įtampa keičiama į nuolatinę. Rezonansinio suderinimo ir švelnaus perjungimo funkcijos sumažina galios nuostolius, padidindamos keitiklio naudingumo koeficientą. Tarp inverterio ir lygintuvo pakopų esanti valdymo grandinė valdo išėjimo



1.1.1 pav. Aukšto dažnio maitinimo šaltinių blokinė schema

grandinės įtampą bei riboja srovę, tam, kad keitiklis palaikytų pastovią galią.

Keitikliui veikiant aukštu dažniu, jungiklio ir diodo sukuriama nuostoliai didėja eksponentiškai. Norint užtikrinti didelį keitiklio naudingumo koeficientą, jungiklis (dažniausiai tai būna tranzistorius) ir diodas turi būti valdomi švelnaus perjungimo impulsais. Šiuo metu, dažniausiai naudojami įtampos keitikliai išėjimo įtampą valdo vienu jungiklių ir diodu. Analizuojant ir tarpusavyje jungiant įvairias aukšto dažnio įtampos keitiklių struktūras, kaip E klasės ir EF<sub>2</sub> klasės tipai, yra sudaromos inverterio ir lygintuvo pakopos [1].

## 1.2. Aukšto dažnio rezonansiniai įtampos keitikliai

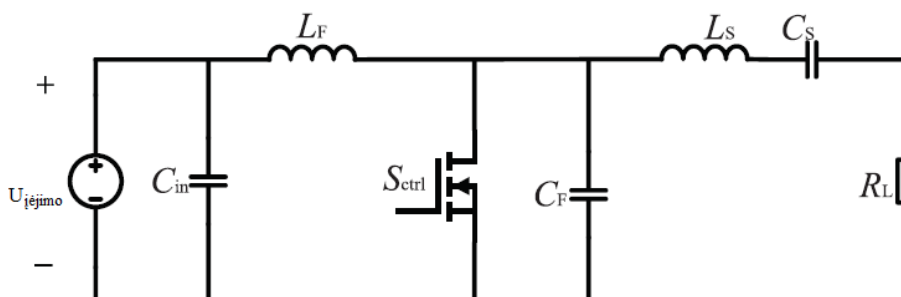
Per pastarąjį dešimtmetį, tiriant aukšto dažnio rezonansinius įtampos keitiklius įgyvendinta ir išspręsta nemažai tikslų ir uždavinių. Keitikliui veikiant aukštų dažnių diapazone, pasyviųjų energijos kaupiklių ir įvairių transformatorių poreikis sumažėjo. Elektrolitiniai kondensatoriai gali būti pakeičiami ritėmis be šerdžių ar keraminiais kondensatoriais, tokiu būdu įgyjant didelį pranašumą keitiklio dydyje, kainoje ir tarnavimo trukmėje [2, 3].

Esant labai aukštam keitiklių veikimo dažniui, pagrindinį susirūpinimą kelia perjunginėjimo nuostoliai bei padidėjęs elektromagnetinių triukšmų kiekis. Perjungimo metu atsiradę nuostoliai MOSFET tranzistoriuose, dėl parazitinės talpos, didėja priklausomai nuo dažnio ir tampa pagrindiniu trūkumu aukšto dažnio įtampos keitikliuose.

### E klasės inverteris

Daugelis keitiklių struktūrų sudaromos iš E klasės inverterio, kuriame naudojamame išėjimo kondensatoriuje sukauptas krūvis pilnai iškraunamas iki to laiko momento, kai tranzistorius vėl įsijungia. E klasės keitiklis yra vienas paprasčiausių ir labiausiai ištobulintų įtampos keitiklių. Šio keitiklio inverteris sudarytas iš vieno MOSFET tranzistoriaus, dviejų induktyvumo ričių ir kondensatoriaus. Visgi, E klasės keitikliai labiausiai tinkami, esant žemai įėjimo įtampai.

Induktyvumo ritė  $L_F$ , kondensatorius  $C_F$  ir atitinkamas rezonansinis virpesių kontūras sudaro E klasės inverterio grandinę (žr. 1.2.1 pav.) Reikia paminėti, kad kondensatorius  $C_F$  tai išėjimo grandinės talpų suma, susidedanti iš tranzistoriaus talpos bei lygiagrečiai prijungto kondensatoriaus talpos.



1.2.1 pav. E klasės rezonansinio inverterio pakopos schema

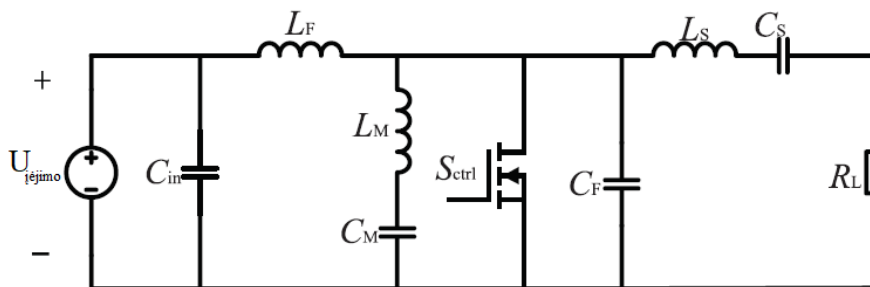
Kai tranzistorius yra išjungtas, ritė  $L_F$  ir kondensatorius  $C_F$  rezonuoja tarpusavyje. Norint sumažinti perjunginėjimo nuostolius aukšto dažnio srityje, tranzistorius turi veikti nulinės įtampos perjungimo (angl. *ZVS – zero voltage switching*) būsenoje. Teoriškai, dėl veikimo dažnio bei darbo ciklo, įtampa tranzistoriuje lygi nuliui tuo momentu, kai kitas valdymo impulsas vėl įjungia tranzistorių. Tokiu būdu pasiekama švelni perjunginėjimo charakteristika. Idealiomis sąlygomis, šioje pakopoje parazitinė tranzistoriaus talpa gali atstoti rezonansinį kondensatorių, todėl nereikalingas papildomas kondensatorius. Visgi, parazitinė tranzistoriaus talpa priklauso nuo tranzistoriaus tipo, o keičiant santakos ir ištakos įtampų reikšmes, jos dydis kinta netiesiškai, todėl lygiagrečiai prijungtas kondensatorius dažniausiai reikalingas [1, 2].

Nors E klasės inverterio pakopa yra gana paprasta, o jungiklis gali veikti švelnaus perjungimo režimu, vienas pagrindinių trūkumų yra tai, kad tranzistoriaus įtampos šuoliai tarp santakos ir ištakos yra labai aukšti. Kai tranzistoriaus darbo ciklas siekia 50%, tarp santakos ir ištakos įtampa gali siekti apie 3,5 karto didesnę vertę už įėjimo įtampą, todėl naudojamas tranzistorius privalo atlaikyti aukštesnę įtampą, o tai padidina keitiklio kainą.

### EF<sub>2</sub> klasės inverteris

EF<sub>2</sub> klasės įtampos keitikliai turi savų privalumų lyginant su kitų klasių aukšto dažnio keitikliais. Įtampos keitimas, paremtas EF<sub>2</sub> inverterio pakopa, išlaiko aukštą naudingumo koeficientą aukštų dažnių srityje, nes esant nedidelėms apkrovoms, naudojami mažos galios pasyvieji komponentai [5].

Šios klasės inverterio struktūra sudaryta remiantis E klasės keitiklio schema. Rezonansinė įėjimo schema susideda iš  $L_F$ ,  $L_M$  induktyvumo ričių bei  $C_F$  ir  $C_M$  kondensatorių (žr. 1.2.2 pav.)



1.2.2 pav. EF<sub>2</sub> klasės rezonansinio inverterio pakopos schema

Parametrų parinkimo metu, norint išgauti tranzistoriaus santakos–ištakos signalą, kuris yra žemo impedanso lygyje, antrosios harmonikos dažnyje, rezonansinis  $L_M$  ir  $C_M$  dažnis parenkamas toks, kad

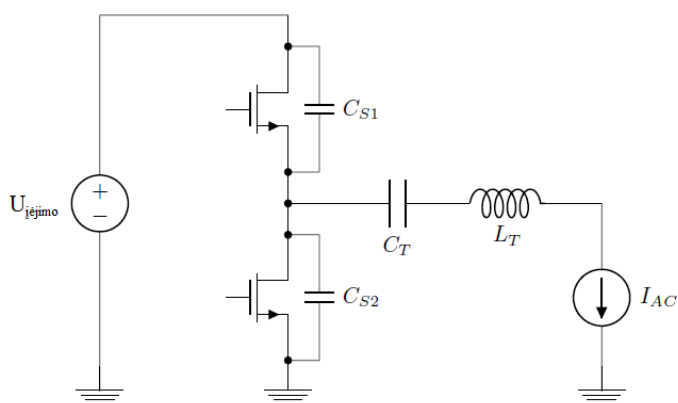
siektų beveik dvigubai didesnę perjungimo dažnį. Rezonansinis virpesių kontūras, sudarytas iš  $L_F$  ir  $C_F$  filtro, turėtų būti projektuojamas taip, kad turėtų aukštesnį impedanso lygį. Dėl pirmos ir trečios harmonikų superpozicijos, impulsų forma jungiklyje yra trapecijos formos [16].

Tranzistoriaus perjungimo įtampos dydis gali būti sumažintas dvigubai, todėl šios klasės aukšto dažnio maitinimo šaltiniai gali būti pritaikomi įvairiose srityse. Šiomis sąlygomis keitiklis vis tiek gali pasiekti ZVS charakteristiką. Lyginant su E klasės lygintuvo pakopa, atsiradus induktyvumo ritei  $L_M$  ir kondensatoriui  $C_M$ , šios klasės keitiklio kaina, matmenys bei sudėtingumo lygis didėja, todėl parenkant aukšto dažnio keitiklius, taip pat reikėtų atsižvelgti į jų panaudojimo sritį.

### DE klasės inverteris

DE klasės inverteris tai vieno pusperiodžio inverteris, struktūra panašus į E klasės inverterį. Skirtumas toks, kad didžiausia induktyvumo ritė pakeičiama papildomu jungikliu, todėl šios klasės inverteris turi tik vieną ritę, kuri taip pat yra mažesnė nei kitų klasių inverteriuose, todėl trumpalaikiai įtampos ir srovės šuoliai MOSFET tranzistoriuose taip pat sumažėja [2].

Kalbant apie lygintuvą, DE klasės inverterio puslaidininkiniai komponentai yra nuosekliai prijungti prie įėjimo įtampos, todėl įtampa juose neviršija įėjimo įtampos.

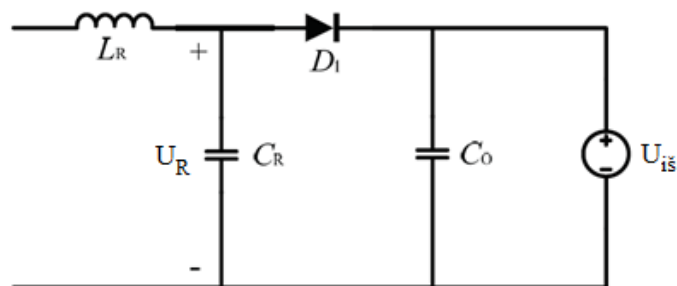


1.2.3 pav. DE klasės rezonansinio inverterio pakopos schema [6].

Tranzistoriai perjungiami vienas po kito paeiliui aukštu dažniu. Yra labai trumpas laiko momentas kai vienas tranzistorius išsijungia, o kitas dar nėra įsijungęs. Šiuo laiko momentu sinusoidinė srovė įkrauna šuntavimo kondensatorių ir iškrauna kitą [6].

## Rezonansinis lygintuvas

Dažniausiai naudojama rezonansinio lygintuvo pakopa susideda iš rezonansinės ritės  $L_R$ , kondensatoriaus  $C_R$  ir diodo  $D_1$  (diodo parazitinė talpa sumuojama su  $C_R$  kondensatoriumi) (1.2.4 pav.) Kai diodas yra uždaras, norint pasiekti nulinės srovės perjungimo (angl. *ZCS - zero current switching*) charakteristiką, ritė ir kondensatorius turi rezonuoti tarpusavyje [4].



1.2.4 pav. Rezonansinio lygintuvo pakopos schema

Diodas veikiantis ZCS režimu, sumažina perjungimo nuostolius, bet minėtoje scheme, įtampos kritimas diode taip pat šiuos nuostolius ir padidina. Ypatingai, žemos išėjimo įtampos sąlygomis, aukšto dažnio keitiklio naudingumo koeficientas žymiai sumažės. Šių trūkumų pašalinimui naudojamas metodas, paremtas sinchroniniu įtampos lyginimu. Sinchroniniam įtampos lyginimui, diodas pakeičiamas jungikliu, kuris yra valdomas atskiru signalu ir išgauna reikiamą įtampos charakteristiką. Sumažėjus įtampos kritimui, šis metodas gali sumažinti įtampos keitiklio nuostolius, visgi jungikliui valdyti reikalingas papildomas valdiklis.

Sudarymo metodikos, projektuojant didelio naudingumo koeficiento E klasės maitinimo šaltinius, nėra labai skirtingos, kalbant apie aukštų dažnių sritis. Daugelis kitų klasių yra sudaromos remiantis E klasės keitikliais.

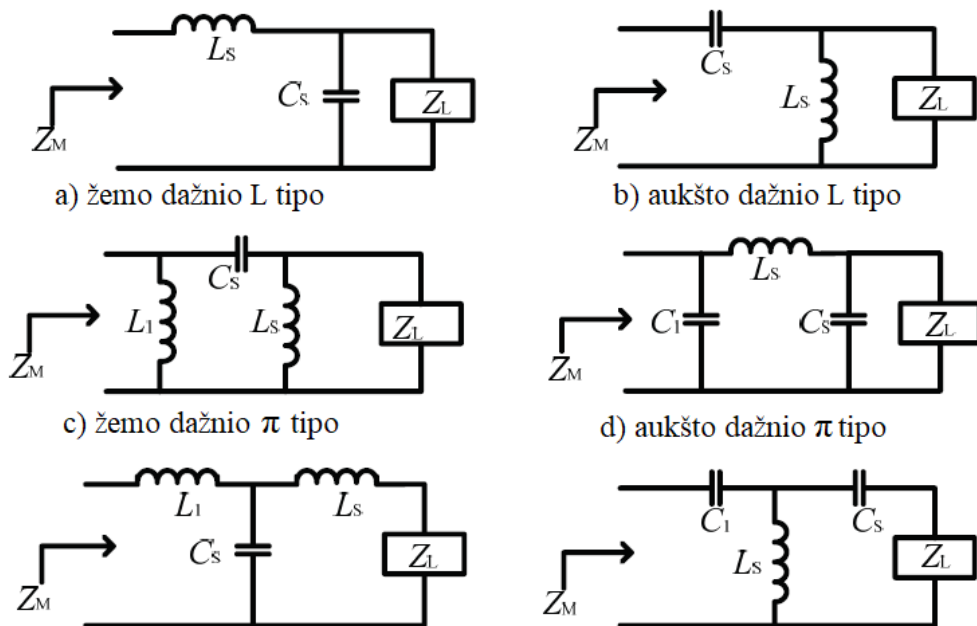


## Impedanso suderinimo grandinė

Dažnai, įtampos keitiklyje tarp inverterio bei lygintuvo pakopų yra prijungiama impedanso suderinimo grandinė. Įėjimo įtampa ir srovė lygintuvo pakopoje dažniausiai suderinamos taip, kad fazės kampas tarp jų būtų toks pat. Tada lygintuvo pakopos impedansas yra ekvivalentiškas tokiam, kuris gali būti keičiamas per suderinimo grandinę, kad atitiktų išėjimo grandinės galios dydį.

Yra du impedanso suderinimo grandinių tipai: izoliuotas ir neizoliuotas tipas. Izoliuoto tipo suderinimo grandinė naudoja transformatorių kaip impedanso keitimo elementą, kuris taip pat atlieka įėjimo ir išėjimo grandinių izoliavimo funkciją. Plačiame dažnių diapazone, transformatorius turi fiksuotą impedansų suderinimo charakteristiką. Visgi, aukštų dažnių srityje, šie transformatoriaus parametrai pakinta kai atsiranda papildomi veiksniai, kaip, pavyzdžiui, parazitinė talpa, nutėkio induktyvumas ir įsimagnetinimo induktyvumas. Visi šie trūkumai vienu ar kitu būdu gali būti pašalinami, bet parazitinės talpos pašalinti neįmanoma dėl oro tarpų esančių apvijose. Ši parazitinė talpa neigiamai paveikia maitinimo šaltinio charakteristiką ir eksploatacines savybes. Todėl nesant poreikiui izoliuoti išėjimo ir įėjimo grandines, paprasčiau naudoti neizoliuojančią suderinimo grandinę.

Neizoliuojančių suderinimo grandinės skirstomos į aukšto ir žemo dažnio impedanso suderinimo grandines (žr. 1.2.5 pav.)



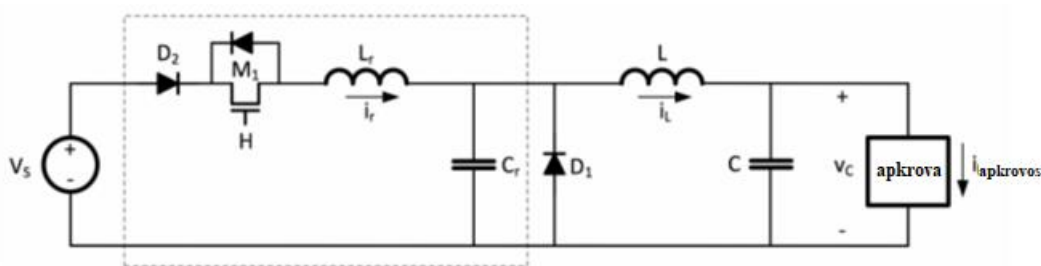
1.2.5 pav. Skirtingos neizoliuojančios impedanso suderinimo schemos

Aukšto dažnio keitikliuose, aukšto dažnio suderinimo grandinės tinka labiau, nes šios grandinės gali perduoti signalo formą, o taip ir visas harmonikas, jų nepakeisdamos. Aukšto dažnio L tipo impedanso suderinimo grandinė yra viena iš paprasčiausių grandinių (žr. 6 pav. b) Ją sudaro tik viena induktyvumo ritė  $L_S$  ir kondensatorius  $C_S$ . Šis kondensatorius yra nuosekliai sujungtas su apkrova, kuris taip pat atlieka pasipriešinimo nuolatinei įtampai funkciją. Ši suderinimo grandinė tinkama naudoti tiek žeminančiuosiuose, tiek aukštinančiuosiuose įtampos keitikliuose [7,1].

T ir  $\pi$  tipo impedanso suderinimo grandinės tinka tokiu atveju, kai apkrova yra pastoviai kintanti, nes jos išlaiko pastovų impedanso lygį, o tai padeda išlaikyti švelnaus perjungimo būseną. Neizoliuotos derinimo grandinės reikiamą impedanso keitimo santykį gali įgyti tik prie tam tikro dažnio. Kai veikimo dažnis pasikeičia suderinimo grandinėje, impedanso perdavimo santykis taip pat pasikeis, kuris įtakos tranzistorių veikimą, todėl sudarant impedanso suderinimo grandinę būtina atsižvelgti į apkrovos reikalavimus.

### 1.3. Aukšto dažnio kvazirezonansiniai įtampos keitikliai

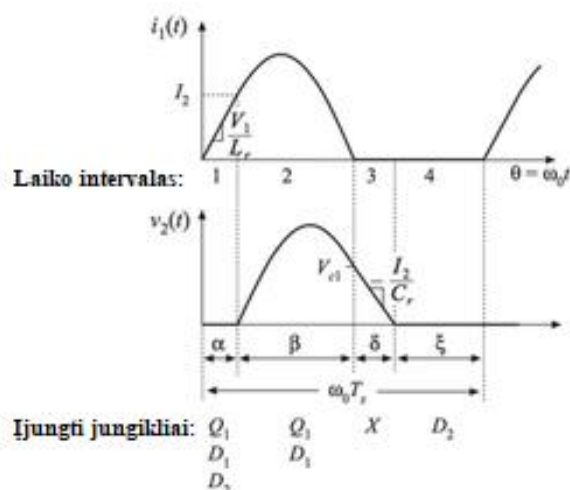
Kvazirezonansiniai keitikliai gali veikti vieno pusperiodžio ir dviejų pusperiodžių darbo režimais. Kalbant apie žeminantį kvazirezonansinį keitklį, rezonansas gali būti sukuriamas nuosekliai sujungiant induktyvumo elementą ir jungiklį, pavyzdžiui, MOSFET tranzistorių, įėjimo grandinėje, o lygiagrečiai išėjimo diodui, prijungiant kondensatorių (žr. 1.3.1 pav.) Vienas perjungiantysis elementas naudojamas vieno pusperiodžio darbo režimu, o naudojant antrą perjungimo elementą, kvazirezonansinis keitiklis dirba viso periodo darbo režimu. Veikimo principas abejais darbo režimais yra toks pat, tačiau, atgalinė ritės srovė gali grįžti per kito pusperiodžio diodą, todėl rezonanso intervalas padidėja. Todėl, esant mažai apkrovai, ši būseną leidžia rezonanso energijai būti perduotai atgal į įėjimo šaltinį. Kvazirezonansinių keitiklių naudojimas vietoje įprastų DC-DC keitiklių, suteikia mažus perjungimo nuostolius, didelį naudingumo koeficientą ir galimybes dirbti aukštesnių dažnių srityse [8].



1.3.1 pav. Pilno periodo kvazirezonansinio keitiklio principinė schema

Kai tranzistorius yra įjungtas, jis generuoja rezonansinį impulsą, kuris, kaip ir kituose keitikliuose, yra filtruojamas LC filtru išėjimo grandinėje. Kvazirezonansinių keitiklių impulso plotis ir amplitudė yra fiksuoto dydžio, todėl norint padidinti šio keitiklio galią, didinamas impulsų dažnis.

Pirmuoju laiko intervalu, kai jungiklis yra įjungiamas, ritės  $L_r$  srovė pradeda augti tiesiškai, o tuo metu diodas  $D_1$  vis dar yra atviras ir rezonansinis mazgas yra sujungtas su žeme. Ši būseną tęsiasi iki tol kol šios ritės srovė pakyla iki apkrovos srovės ir diodas užsidaro (pav. 1.3.2)



**1.3.2 pav.** Kvazirezonansinio keitiklio vieno impulso charakteristika

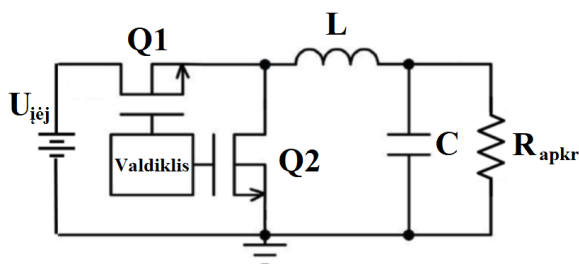
Antrajame intervale, kai diodas  $D_1$  užsidaro, rezonansinis kondensatorius pradeda įsikrauti ir taip susidaro pilna rezonansinė grandinė. Srovė vienu metu įkrauna kondensatorių ir teka į apkrovą. Viskas vyksta iki tol, kol srovė ritėje  $L_r$  sumažėja iki nulio ir uždaro diodą  $D_2$  ir tranzistorius pereina į ZCS režimą.

Trečiuoju laiko intervalu įtampa krinta tiesiškai išsikraunant rezonanso kondensatoriui, kuris taip pat maitina apkrovą. Kai rezonansinio mazgo įtampa pasiekia nulį,  $D_1$  tampa atviras ir prijungia mazgą prie žemės.

Ketvirtas laiko intervalas yra keitiklio kintamasis, kuris nusako laiką tarp impulsų. Šio laiko dydis priklausomas nuo rezonansinio impulso ilgio, norimos išėjimo įtampos ir apkrovos dydžio [9].

## 1.4. Sinchroniniai aukšto dažnio įtampos keitikliai

Sinchroniniai aukšto dažnio žeminantieji įtampos keitiklių struktūra yra gana paprasta. Šio tipo keitikliai keičia įėjimo grandinės įtampą į žemesnę ir gali atlaikyti dideles sroves išlaikydami aukštą naudingumo koeficientą. Principinė sinchroninių aukšto dažnio keitiklių schema susideda iš dviejų galios MOSFET tranzistorių, išėjimo induktyvumo ritės ir išėjimo kondensatoriaus (1.4.1 pav.)



1.4.1 pav. Sinchroninio žeminančiojo įtampos keitiklio principinė schema

Aukšto lygio tranzistorius Q1 yra tiesiogiai prijungtas prie įėjimo įtampos. Kai šis tranzistorius yra įjungiamas, srovė teka iš maitinimo šaltinio per Q1 tranzistorių ir L induktyvumo ritę į apkrovą ir išėjimo kondensatorių. Išsijungus aukšto lygio jungikliui, induktyvumo ritės srovė teka toliau ta pačia kryptimi ir yra įjungiamas žemo lygio jungiklis Q2. Šiuo momentu srovė teka per šį jungiklį, L ritę ir apkrovą atgal į Q2 jungiklį.

Abiejų kontūrų srovės yra pulsuojančios, o tai reiškia, kad jos turi statų priekinį ir galinį frontus. Šie frontai atsiranda per labai trumpą laiko tarpą, todėl įvyksta tam tikri rezonansiniai susvyravimai. Šių srovių svyravimai tiesiogiai priklauso nuo induktyvumo ritės ir bet kokio atsiradusio parazitinio induktyvumo bei talpumo [11].

Sinchroninių žeminančiųjų keitiklių skleidžiamas aukšto dažnio elektromagnetinis triukšmas (EMI) atsiranda dėl pereinamųjų įtampų ( $dv/dt$ ) ir pereinamųjų srovių ( $di/dt$ ) jungiklių perjungimo metu. Tokie elektromagnetiniai trikdžiai yra vienas iš pagrindinių trūkumų, ypač aukštų dažnių srityje, persijunginėjant MOSFET galios tranzistoriams. Tinkamai valdoma ir gerai sudaryta galios grandinė aukšto dažnio įtampos keitikliuose labai sumažina elektromagnetinių emisijų kiekį. Projektuojant aukšto dažnio įtampos keitiklius atsiranda kritiniai taškai, kurie nulemia tiek EMI kiekį, tiek įėjimo grandinės srovės šuolius. Vienas iš pagrindinių juos įtakojančių veiksnių, tai parazitinės talpos bei induktyvumai.

## **Sinchroninio aukšto dažnio įtampos keitiklių ypatybės**

Sinchroninis aukšto dažnio žeminantysis keitiklis tai modifikuota įprasto keitiklio versija, kurioje diodas D, pakeičiamas antru jungikliu. Šis pasikeitimas padidina keitiklio efektyvumą, bet taipogi padidėja kaina, nes dažniausiai tranzistorius kainuoja daugiau nei diodas.

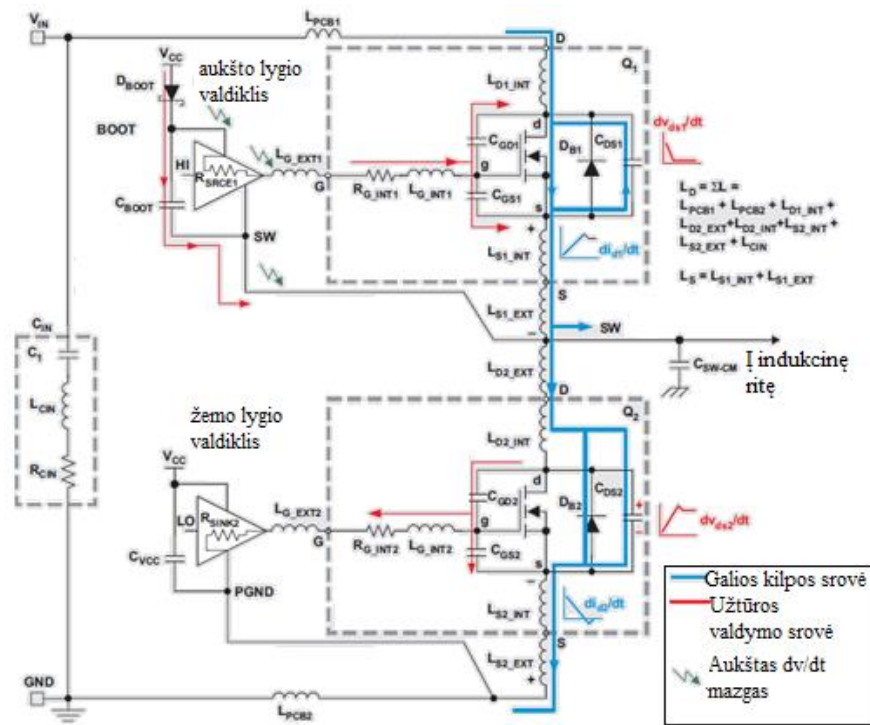
Standartiniame žeminančiajame keitiklyje diodas įsijungia savaime, kai tranzistorius išsijungia ir diodo įtampa pradeda kilti. Įtampos kritimas, srovei tekant diodu, sudaro didžiąją dalį galios nuostolių. Pakeičiant diodą jungikliu, pavyzdžiui, MOSFET tranzistoriumi, keitiklio naudingumo koeficientas padidėja. Abiem atvejais, galios nuostoliai labai priklauso nuo darbo ciklo.

Kitas sinchroninių įtampos keitiklių privalumas, tai, kad šie keitikliai yra dvikrypčiai. Šis privalumas pravartus kai yra reikalingas regeneruojamasis stabdymas. Galią perduodant priešinga kryptimi, šis keitiklis veikia panašiai kaip aukštinantysis įtampos keitiklis.

Visgi, sinchroniniai įtampos keitikliai turi ir trūkumų. Kaip minėta anksčiau, jungiklis įprastai kainuoja daugiau nei diodas. Taip pat, padidėja keitiklio sudėtingumas, nes reikalingas specialus valdiklis, kuris, priklausomai nuo išėjimo įtampos, sinchroniškai valdytų abu jungiklius.

## **Parazitiniai induktyvumai ir talpos**

Reikia paminėti, kad MOSFET tranzistorių sinchroniškas perjunginėjimas ir signalo išsikraipymai, svyravimai, temperatūra ir elektromagnetiniai triukšmai yra tiesiogiai siejami su parazitiniu induktyvumu bei talpumu galios kontūruose ir užtūros valdymo grandinėse. Parazitinės savybės, kurios priklauso nuo komponentų sandaros ir išdėstymo, įtaiso korpuso bei spausdinto montažo plokštės (PCB) takelių išdėstymo, lemia įtampos keitiklio naudingumo koeficientą bei elektromagnetinių triukšmų kiekį (žr. 1.4.2 pav.)



1.4.2 pav. MOSFET tranzistorių valdymo grandinė su parazitiniiais induktyvumo ir talpos elementais

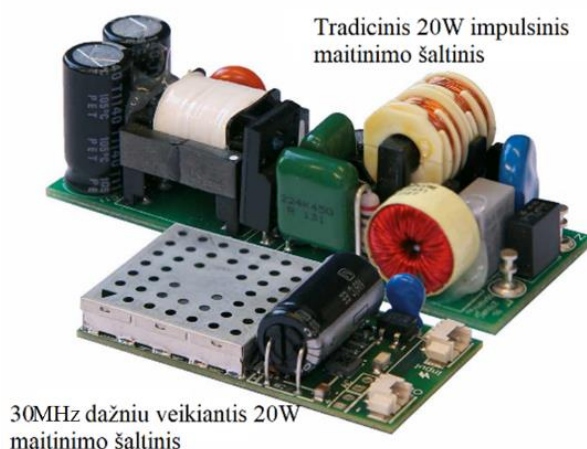
Efektyvus aukšto dažnio galios grandinės induktyvumas  $L_{LOOP}$ , tai bendra santakos induktyvumo  $L_D$  ir ištakos induktyvumo  $L_S$  suma, kuri priklauso nuo nuosekliai sujungto įėjimo įtampos kondensatoriaus  $C_{in}$ , spausdintinės montažinės plokštės takelių ir MOSFET tranzistorių sandaros parazitinio induktyvumo. Parazitinis induktyvumas didėja, ilgėjant PCB takeliams, o didėjant šių takelių tankiui (t. y. mažėjant atstumui tarp jų) taip pat didėja ir parazitinė keitiklio talpa.

Šiame darbe parinktas sinchroninis aukšto dažnio žeminantysis įtampos keitiklis dėl didelio naudingumo koeficiento, aukšto valdymo dažnio, bei galimybės naudoti įvairias funkcijas keitiklio parametrų pagerinti. Šie visi keitiklio bruožai suteikia galimybę stebėti keitiklio veikimą ir parametrų priklausomybę nuo juos įtakančių veiksnių.

## 1.5. Aukšto dažnio maitinimo šaltinių privalumai šviesos diodų apšvietimo įtaisuose

Aukštų dažnių srityje, apšvietimo įtaisų maitinimo šaltiniai įgyja keletą privalumų. Pagrindiniai privalumai tai miniatiūrizacija, patikimumas ir tarnavimo trukmė bei aukštas pritemdymo naudingumo koeficientas.

## Miniatiūrizacija



**1.5.1 pav.** 20W galios maitinimo šaltinių palyginimas

Impulsiniuose maitinimo šaltiniuose didžiausią dalį vietos užima pasyvieji energijos kaupimo komponentai. Dažniausiai šie komponentai užima apie 95% impulsinio maitinimo šaltinio tūrio, o aktyvieji ir kiti likę komponentai kaip rezistoriai, tranzistoriai ir pan. užima likusį tūrį. Visgi, negalima maitinimo šaltinių dydžių lyginti santykinai vien pagal maitinimo šaltinio veikimo dažnių santykį, pavyzdžiui padidinant dažnį 300 kartų, nuo 100kHz iki 30MHz, maitinimo šaltinio tūris sumažėja iki 10 kartų (1.5.1 pav.)

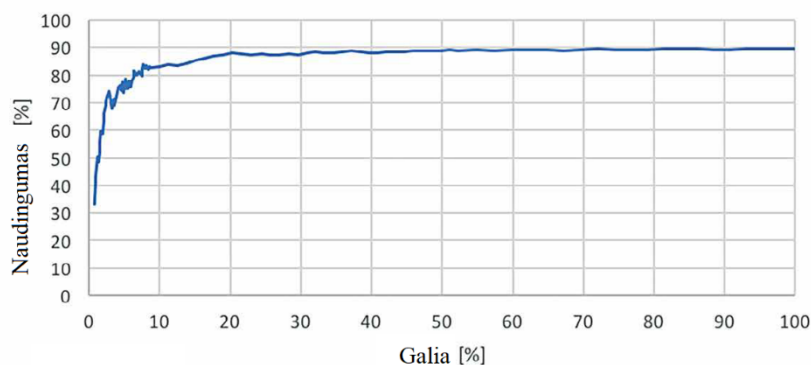
### Patikimumas ir tarnavimo trukmė

Didžiausia dalis LED apšvietimo sistemų gedimų atsiranda dėl maitinimo šaltinių kaltės. Tai įvyksta dėl elektrolito esančio elektrolitiniuose kondensatoriuose, kuris, veikiant aukštai šviesos diodų temperatūrai, greitai išgaruoja. Esant mažesniai aukšto dažnio maitinimo šaltinių kondensatorių talpos poreikiui, labai sumažėja maitinimo grandinės gedimo tikimybė. Paminėtina tai, kad aukšto dažnio maitinimo šaltiniuose nebūtina naudoti šerdinius induktyvumo elementus, todėl galima naudoti induktyvumo rites be šerdies. Perėjimas prie bešerdžių induktyvumo elementų pareikalauja išgauti didesnę dažnį, nes nuo jo priklauso šių ričių induktyvumas. Naudojant vis mažesnius

komponentus taip pat sumažėja maitinimo šaltinių kaina, padidėja jų stabilumas ir mechaninis atsparumas.

### Aukštas šviesos temdymo naudingumo koeficientas

Vienas pagrindinių aukšto dažnio maitinimo šaltinių privalumas, tai didelis LED temdymo (angl. *dimming*) naudingumo koeficientas. Dėl labai aukšto veikimo dažnio, šių maitinimo šaltinių išėjimo įtampa gali būti reguliuojama plačiose ribose, todėl nematomas joks šviestuvų mirgėjimas. Nepriklausomai nuo temdymo lygio, maitinimo šaltinis beveik visada veikia palaikydamas aukštą naudingumo koeficientą, arba esant visiškai užtemdymui jis veikia su minimaliais nuostoliais (žr 1.5.2 pav.)



1.5.2 pav. 20W 30Mhz dažnio maitinimo šaltinio naudingumo koeficientas

### 1.6. Kitos aukšto dažnio maitinimo šaltinių panaudojimo sritys

Aukšto dažnio maitinimo šaltiniai dažniausiai turi platų įėjimo įtampos diapazoną, todėl jie puikiai tinka kompiuterių, telefonų ir kitų įtaisų įkrovikliams gaminti.

Vienas iš žinomiausių ir kompaktiškiausių nešiojamųjų kompiuterių įkroviklių tai *Apple* sukurtas *Sugar Cube* įkroviklis ( 1.6.1 pav.)

Nešiojamųjų kompiuterių dabartiniai matmenys nebūtų net įsivaizduojami jei nebūtų naudojami aukšto dažnio maitinimo šaltiniai. Dažnai nešiojamojo kompiuterio įkroviklis kompiuterį maitina iki 20V įtampa, bet nešiojamajame



1.6.1 pav. *Apple* sukurtas *Sugar Cube* įkroviklis



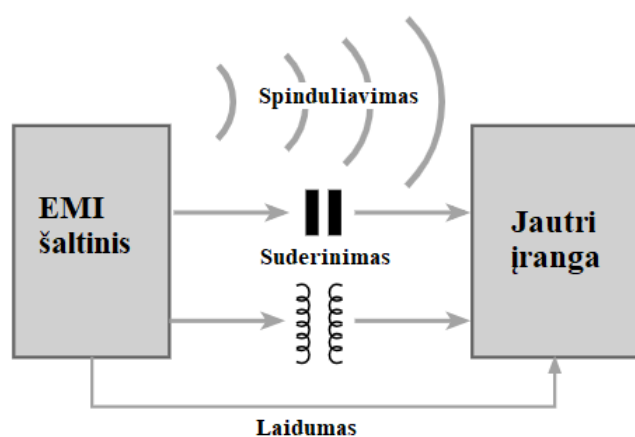
kompiuteryje yra sekcijų, kurioms reikalinga įtampa yra 0,8V ar net mažiau, todėl įtampos keitimui reikalingi mažos galios keitikliai.

Aukštadažniai maitinimo šaltiniai taip pat naudojami įtampos konversijai atsinaujinančiųjų energijos šaltinių srityje. Pavyzdžiui, Tarptautinė kosminė stotis turi nemažai saulės panielių ir kuro elementų, kurie generuoja 30–36V nuolatinę įtampą. Šiose stotyse įtampa dažnai turi būti keičiama į labai žemą įtampą įrangai maitinti ir pan.

Dėl didelio patikimumo ir tarnavimo trukmės, aukšto dažnio maitinimo šaltiniai dažnai naudojami medicinos srityje, kur patikimumas yra vienas iš pagrindinių reikalavimų [10].

### 1.7. Elektromagnetiniai trikdžiai įtampos keitikliuose

Parazitinis induktyvumas ir talpumas yra susiejami su elektromagnetiniais triukšmais ir elektromagnetiniu suderinamumu (angl. *EMC - Electromagnetic Compatibility*). Elektromagnetiniai triukšmai skirstomi į tris pagrindines grupes: spinduliuojamieji (angl. *Radiated*), laidumo (angl. *conducted*) ir suderinamieji (angl. *Coupled*) (žr. 1.7.1 pav.)



1.7.1 pav. Elektromagnetinių trikdžių tipai

Spinduliuojamieji elektromagnetiniai trikdžiai yra paprasčiausiai įsivaizduojami. Šio tipo EMI paprastai susidaro dideliu atstumu tarp elektromagnetinių trikdžių šaltinio ir konkretaus daikto. Šaltinis gali spinduliuoti trikdžius, kurie gali būti savaime susidarantys arba dirbtini, o juos sugeriančio šaltinio veikimas, dėl šių elektromagnetinių triukšmų, gali būti sutrikdytas.

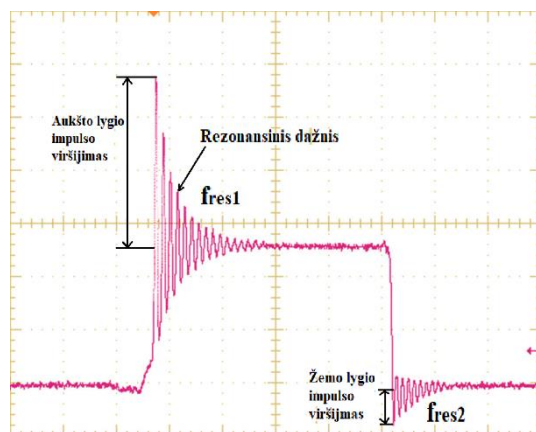
Laidumo atsirandantys EMI susidaro laidžiuose takeliuose, kuriuose gali tekėti signalai. Tai gali būti jungiamieji laidai ar kiti elementai. Šie trikdžiai gali atsirasti sutampant dviejų laidininkų fazėms, pavyzdžiui, maitinimo kabelio, arba taip pat atsiranda skirtuminiai trikdžiai, kai fazės nesutampa. Triukšmo filtravimas labai priklauso nuo skleidžiamo triukšmo tipo.

Suderinamieji elektromagnetiniai trikdžiai gali būti dviejų tipų: talpinio ir magnetinio suderinimo. Talpinio suderinimo triukšmai atsiranda įtampai iš talpinio elemento tekant į apkrovą. Magnetinio suderinimo elektromagnetiniai triukšmai atsiranda kai tarp šaltinio ir apkrovos susidaro kintantis elektromagnetinis laukas.

Žeminančiuosiuose įtampos keitikliuose atsiranda laidumo ir spinduliuojamieji triukšmai, o jų dažnis priklauso nuo triukšmus sukuriiančio šaltinio (žr. 1.7.1 lent.)

1.7.1 lentelė. Keitiklių EMI klasifikacija [11]

Keitiklio triukšmo tipas	Triukšmo tipas	Pagrindinis šaltinis	Dažnių diapazonas	Laidumo/spinduliuojamieji trikdžiai
1	Žemo dažnio	Perjungimo dažnio harmonikos	150kHz–50MHz	Laidumo
2	Radijo dažnis	Jungiklių sukuriami virpesiai	50MHz–200MHz	Abu
3	Aukšto dažnio	Diodo užsidarymas	Virš 200MHz	Spinduliuojamieji



1.7.2 pav. Perjungimo metu atsirandantys virpesiai

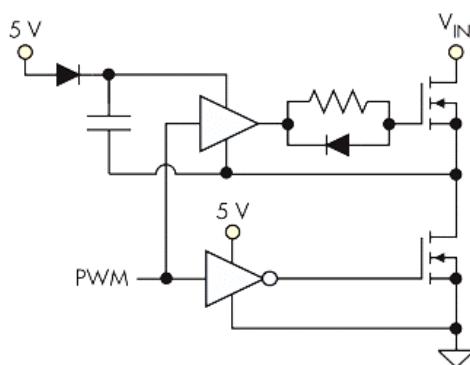
Rezonansinis perjungimo dažnis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{LOOP}C_{OSS}}}, \quad (1.7.1)$$

kur  $L_{LOOP}$  – kontūro parazitinis induktyvumas,  $C_{OSS}$  – tranzistoriaus užtūros vidinė talpa.

## Elektromagnetinių triukšmų sumažinimo metodai

**Rezistorius tranzistoriaus užtūroje.** Vienas iš paprasčiausių būdų sumažinti elektromagnetinius triukšmus keitikliuose tai nuosekliai aukšto lygio tranzistoriaus užtūroje prijungiant rezistorių (žr. 1.7.3 pav)



**1.7.3 pav.** Užtūros rezistoriaus prijungimo schema

MOSFET tranzistoriaus užtūra turi tam tikrą talpą  $C_{GS}$ , kuri kiekvieno perjungimo metu turi būti įkrauta ir iškrauta. Nuosekliai prijungtas rezistorius su šiuo parazitiniu talpumu sudaro žemo dažnio RC filtrą, sulėtindamas tranzistoriaus įsijungimo ir išsijungimo laiką. Trūkumas toks, kad sumažėja keitiklio naudingumo koeficientas.

Pagrindinis elektromagnetinių triukšmų šaltinis, tai trumpas tranzistoriaus įsijungimo laikas. Jį padidinus šiuo metodu, taip pat padidėja ir išsijungimo laikas, todėl norint sumažinti išsijungimo laiką lygiagrečiai rezistoriui prijungimas diodas.

**Elektromagnetinių trikdžių slopintuvas.** Kitas metodas sumažinti elektromagnetiniams trikdžiams yra slopintuvas. Jis jungimas tarp tranzistorių bendro mazgo ir žemės. Slopintuvo grandinė susideda iš nuosekliai sujungtų R ir C elementų, kuri sumažina parazitinių induktyvumą ir talpumą perjungimo metu. Tokiu būdu sumažėja perjungimo virpesių dažnis ir amplitudė.

Gerai parinktas slopintuvas leidžia impulso pradiniam frontui viršyti impulsinę įtampą tiek, kad būtų minimalus galios nuostolis. Trūkumas toks, kad slopintuvo apskaičiavimas yra sudėtingas ir gali skirtis nuo realių bandymų, o papildomas plokštės plotas taip pat gali turėti neigiamos įtakos triukšmams.

**Paleidimo rezistorius.** Paleidimo rezistorius yra dar vienas būdas aukšto lygio tranzistoriaus įsijungimo laikui sumažinti. Tranzistoriams naudojamas paleidimo kondensatorius  $C_{boot}$  gali būti nuosekliai sujungiamas su paleidimo rezistoriumi  $R_{boot}$ . Padidėjus tranzistoriaus įsijungimo laikui, parazitiniai elementai turi daugiau laiko išsikrauti, todėl sumažėja impulsų virpesiai.

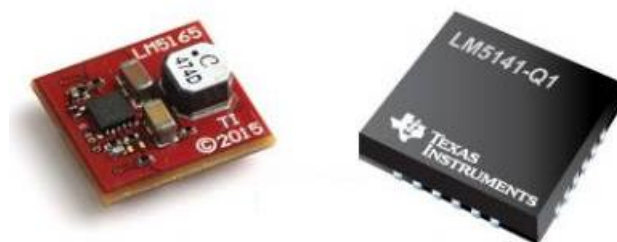
Paleidimo rezistorius  $R_{boot}$  įtakoja tik tranzistoriaus įsijungimo laiką, todėl šis metodas yra efektyvus būdas sumažinti elektromagnetinius triukšmus. Visgi, jeigu rezistoriaus varža bus per didelė, paleidimo kondensatorius nebus pilnai įkrautas ir tranzistorius bus išjungiamas per anksti [23].

## 1.8. Šiuolaikiniai sinchroninių įtampos keitiklių valdikliai

Valdiklių, skirtų aukšto dažnio sinchroniniams įtampos keitikliams, funkcija, idealiomis sąlygomis, yra ganėtinai paprasta – sinchroniškai valdyti abu tranzistorius. Realiomis sąlygomis valdymas yra daug sudėtingesnis: valdymo impulsai nėra idealios formos, yra laiko momentas kai abu tranzistoriai yra atviri, o tai lemia didelius srovės šuolius bei įtampos svyravimus. Aukštų dažnių srityje atsiradę parazitiniai elementai dar labiau pablogina situaciją, o tai labai įtakoja elektromagnetinių triukšmų kiekį. Todėl norint padidinti keitiklio naudingumo koeficientą ir sumažinti EMI reikalingos įvairios funkcijos.

Šiais laikais tokie gamintojai kaip *ON Semiconductor*, *Texas Instruments* ir *Linear Technology* kuria ir tobulina įvairius įtampos keitiklių valdiklius. Jų pasirinkimas yra gan didelis, todėl pasirenkant valdiklį labai svarbu įvertinti panaudojimo sritį.

Tyrimui atlikti parinktas *Texas Instruments* gamintojo valdiklis (1.8.1 pav.) LM5141 – tai sinchroninis žeminantysis valdiklis, skirtas plataus diapazono įėjimo įtampos keitimui į žemesnę. Valdymo metodas paremtas darbo ciklo valdymu.



**1.8.1 pav.** LM5141 valdiklis ir jo kompaktiškumas PCB plokštėje

Šis valdiklis turi ne vieną elektromagnetinių triukšmų mažinimo funkciją, supaprastinančią suderinamumą su CISPR (specialusis tarptautinis radijo trikdžių komitetas) ir panašiais automobilių pramonės reikalavimais.

Šis valdiklis turi du pasirinktinus jungiklių valdymo dažnius: 440kHz ir 2,2MHz. Esant mažai arba išvis nesant apkrovos, LM5141 veikia ciklų praleidimo režimu, kad esant mažai apkrovai, būtų pasiektas kuo didesnis naudingumo koeficientas. Taip pat, valdiklis turi dažnių derinimo funkciją, srovės ribojimą, perkrovos apsaugą bei laikinojo ribojimo režimą atsiradus perkrovoms, kuris atjungia apkrovą.

## Valdiklio funkcijos

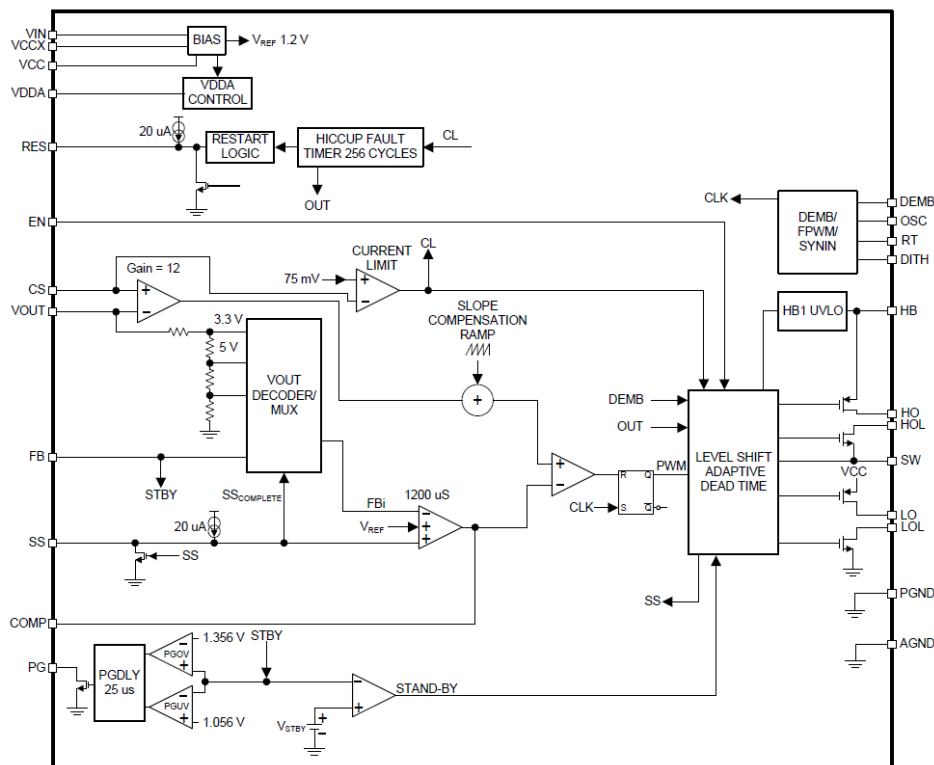
**1.8.1 lentelė.** LM5141 išvadų pavadinimai ir funkcijos

Išvadas		Apibūdinimas
Nr.	Pavadinimas	
1	DEMB	Diodo imitacijos išvadas. Sujungus DEMB ir AGND išvadus kartu, imituojamas diodas. Jei šis išvadas prijungtas prie VDDA išvado, LM5141 veikia FPWM režimu. Šis režimas nesant apkrovos, vistiek valdo tranzistorius.
2	VDDA	Vidinis, analoginis darbo taško reguliatorius. Prijungiamas kondensatorius tarp VDDA ir AGND išvadų.
3	AGND	Analoginė įžeminimo jungtis.
4	RT	Varža, prijungta tarp RT išvado ir žemės, keičia signalų generatoriaus dažnį tarp 300kHz–500kHz bei 1,8Mhz–2,53Mhz pasirinktinai.
5	DITH	Kondensatorius prijungtas tarp DITH ir AGND išvadų yra įkraunamas ir iškraunamas 20μA srovės šaltiniu. Jei DITH funkcija įjungiama, signalų generatoriaus dažnis pastoviai kinta tarp –5% ir +5%. Skirta triukšmų mažinimui.
6	OSC	Dažnio parinkties išvadas. Prijungus OSC išvadą prie VDDA išvado, nustatomas 2,2MHz dažnis, o prijungus prie AGND išvado – 440kHz.
7	LOL	Žemo lygio jungiklio išjungimo išvadas
8	LO	Žemo lygio jungiklio įjungimo išvadas
9	PGND	Galios įžeminimo išvadas žemo lygio jungikliui.
10	VCC	VCC darbo taško išvadas. Prijungiamas kondensatorius tarp VCC ir PGND išvadų.
11	HB	Aukšto lygio jungiklio maitinimo išvadas.
12	SW	Junginėjimo mazgas žeminančiajam reguliatoriui. Prijungiamas prie paleidimo kondensatoriaus, aukšto lygio MOSFET tranzistoriaus ištakos ir žemo lygio MOSFET tranzistoriaus santakos.
13	HO	Aukšto lygio jungiklio įjungimo išvadas
14	HOL	Aukšto lygio jungiklio išjungimo išvadas
15	VIN	Maitinimo įtampos išvadas VCC reguliatoriui.

Išvadas		Apibūdinimas
Nr.	Pavadinimas	
16	VCCX	Papildomas įėjimo išvadas išoriniam šaltiniui. Jei VCCX išvado įtampa didesnė nei 4,5V tai jis viduje sujungiamas su VCC išvadu. Jei šis išvadas nenaudojamas, jis turėtų būti įžemintas.
17	VOUT	Srovės matavimo įėjimas. Šis išvadas prijungiamas prie srovės fiksavimo varžos.
18	CS	Srovės fiksavimo stiprintuvo įėjimas. Išvadas prijungiamas prie induktyvumo ritės išėjimo pusės.
19	FB	Išvadą prijungus prie VDDA išvado, išėjime palaikoma 3,3V įtampa, prie AGND išvado – 5V, o prijungus prie išorinio įtampos daliklio bus nustatoma 1,5V–15V įtampa.
20	COMP	Pereinamųjų procesų klaidų stiprintuvo išėjimas.
21	PG	Atviro kolektoriaus išėjimas, kuris išduoda žemą signalą jei išėjimo įtampa išeina iš nustatytų rėžių.
22	SS	Švelnaus paleidimo programavimo išvadas.
23	EN	Aukšto lygio signalas, paduotas į šį išvadą, įgalina valdiklį.
24	RES	Paleidimo iš naujo išvadas.

## Funkcinė blokinė schema

LM5141 valdiklis – tai perjungimo valdiklis, kuris turi visas būtinas funkcijas, norint sukurti aukšto naudingumo koeficiento žeminantįjį įtampos keitiklį, kuris gali veikti plačiose įėjimo įtampos ribose. Šis valdiklis išėjime turi fiksuotą 3,3V, 5V arba reguliuojamą 1,5–15V įtampą. Valdiklyje integruoti aukšto ir žemo lygio MOSFET tranzistoriai, kurie gali atlaikyti nuolatinę 3,25A srovę. Šis valdiklis sukurtas taip, kad būtų galima lengvai įgyvendinti CISPR keliamus reikalavimus.



## Aukštos įtampos reguliatorius

LM5141 valdiklyje yra integruotas aukštos įėjimo įtampos VCC reguliatorius, kuris paduoda įtampą į PWM (angl. *Pulse Width Modulation*) valdiklį ir išorinius MOSFET tranzistorius. Įėjimo įtampos įvadas VIN gali būti tiesiogiai prijungtas prie įtampos šaltinio, kurio įtampa gali būti iki 65V. VCC reguliatoriaus išėjime nustatyta 5V įtampa. Kai įėjimo įtampa yra žemiau nustatytos vertės, VCC išvado įtampa šiek tiek nukris. Naudojant aukštą įėjimo įtampą svarbu užtikrinti, kad ši įtampa neviršytų maksimalios 70V įtampos, įskaitant ir linijų ar apkrovų pereinamuosius procesus. Norint sumažinti staigius įtampos svyravimus, kurie gali pažeisti valdiklį, būtina prijungti įėjimo kondensatorių tarp VIN išvado ir įžeminimo. Tokiu būdu trumpalaikiai įtampos virpesiai bus sumažinami.

## VCC reguliatorius

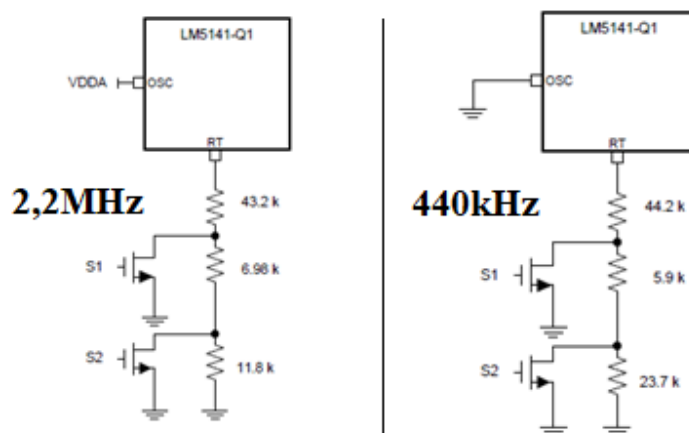
VCC įtampos reguliatoriaus minimali srovė yra 75mA. Paleisties metu reguliatorius praleidžia srovę į kondensatorių prijungtus prie VCC išvado. Kai įtampa VCC išvade viršija 3,4V, prijungiamas išėjimo įtampos išvadas ir pradedamas švelnus paleidimas (angl. *Soft Start*). Rekomenduojama VCC išvade jungti kondensatorių, kurio talpa 2,2–4,7 $\mu$ F.

Vidinis 5V reguliatorius stabilizuoja VDDA išvado įtampą. VDDA išvadas turėtų būti prijungiamas prie įžeminimo per ne mažesnę nei 100nF kondensatorių. Jei VCCX išvado įtampa mažesnė nei 4,5V, šis išvadas viduje sujungiamas su VCC išvadu ir tokiu būdu VCC reguliatorius yra atjungiamas. Jei VCCX nenaudojamas, jis turi būti įžemintas. VCCX išvado įtampos reikšmė negali viršyti 6.5V.

## Signalų generatorius

Valdiklis LM5141 turi vidinį signalų generatorių OSC, kuris gali generuoti 2,2MHz arba 440kHz dažnį. Kai OSC išvadas prijungtas prie VDDA išvado, signalų generatorius generuoja 2,2MHz, o kai OSC kontaktas įžeminamas, tai signalų generatoriaus dažnis yra 440kHz. Signalų generatoriaus nominalus dažnis (2,2MHz arba 440kHz) gali būti moduluojamas, prijungiant rezistorių prie RT

išvado ir įžeminimo (1.8.3 pav.). Norint išjungti dažnio moduliaciją, reikia RT išvadą prijungti prie įžeminimo arba jį palikti atvirą.



**1.8.3 pav.** RT kontakto prijungimo schema 2,2MHz ir 440kHz dažniui.

Po švelnaus paleidimo, kai išėjimo įtampa nusistovi, paleidžiamas 16μs laikmatis. Jei per šį laiką aptinkamas atitinkamas RT rezistorius, LM5141 valdiklis pakeis dažnį į atitinkamą nuo jo varžos.

2,2Mhz moduliacijos dažnis yra nuo 1,8MHz iki 2,53MHz, 440kHz – nuo 300kHz iki 500kHz (žr. 1.8.2 lent.)

**1.8.2 lentelė.** Signalų generatoriaus dažnio priklausomybė nuo RT išvado rezistoriaus varžos

S1	S2	RT varža 2,2MHz dažniui	2,2MHz signalų generatoriaus diapazonas	RT varža 440kHz dažniui	440kHz signalų generatoriaus diapazonas
X	X	>95 kΩ	Vidinis signalų gen.	>95 kΩ	Vidinis signalų gen.
OFF	OFF	61,98 kΩ bendra	1,8MHz	73,8 kΩ bendra	300 kHz
OFF	ON	50,18 kΩ bendra	2,2MHz	50,1 kΩ bendra	440 kHz
ON	OFF	43,2 kΩ	2,53MHz	44,2 kΩ	500 kHz
X	X	<27 kΩ	Vidinis signalų gen.	<27 kΩ	Vidinis signalų gen.

Jei RT rezistoriaus varža didesnė už 95kΩ, tai LM5141 valdiklis laikys, kad RT išvadas yra atviras, todėl bus naudojamas vidinis signalų generatorius. Jei RT rezistoriaus vertė bus mažesnė už 27kΩ, tai bus atliekama ta pati funkcija. Norint apskaičiuoti RT rezistoriaus vertę konkrečiam dažniui, 1.8.1 formulė naudojama 2,2MHz dažnio ribai, 1.8.2 formulė – 440kHz dažnio ribai.



$$RT_{2.2MHz} = \frac{1}{F_{SW}^{0.0216} \cdot 0.0086}; RT[k\Omega], F_{sw}[MHz] - \text{signalų gen. dažnis}; \quad (1.8.1)$$

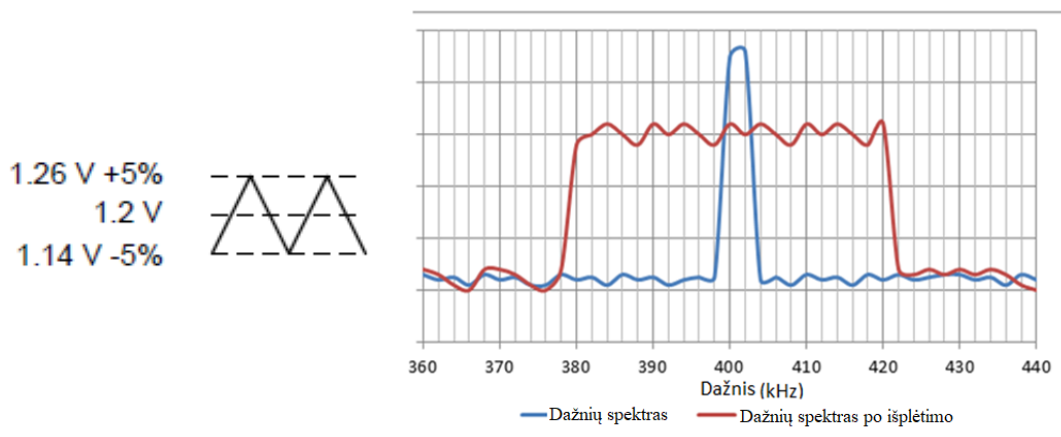
$$RT_{440kHz} = \frac{1}{F_{SW}^{1.38 \times 10^{-5}} \cdot 4.5 \times 10^{-5}}; RT[k\Omega], F_{sw}[kHz]. \quad (1.8.2)$$

## Sinchronizacija

Norint sinchronizuoti LM5141 valdiklį su išoriniu šaltiniu, reikia prie DEMB išvado prijungti loginį signalą. Sinchronizavimo diapazonas, kai signalų generatoriaus dažnis yra 440kHz, yra nuo 350kHz iki 550kHz. Kai signalų generatoriaus dažnis yra 2,2MHz, tai sinchronizavimo dažnio diapazonas yra 1,8MHz-2,6MHz. Jei yra prijungtas RT rezistorius, tai LM5141 valdiklis nepaisys jo ir sinchronizuos valdiklį su išoriniu kontroliniu laikmačiu. Esant žemai įėjimo įtampai, pasiekus 100ns laiką, sinchronizacija bus praleidžiama.

## Spektro plėtimas

LM5141 valdiklyje integruota elektromagnetinių trikdžių (EMI) sumažinimo funkcija – spektro plėtimas (angl. *Spread Spectrum*), kuri įjungiama prijungiant kondensatorių tarp DITH ir AGND išvadų. Įkraunant ir iškraunant šį kondensatorių, sugeneruojamas pjūklo formos signalas ir centruojamas ties 1,2V įtampa, kuris keičia signalų generatoriaus dažnį  $\pm 5\%$  (žr. 1.8.4 pav.)



1.8.4 pav. Signalų spektras prieš ir po jo išplėtimo

Kad spektro išplėtimo funkcija efektyviai mažintų elektromagnetinių trikdžių viršūnių vertes, virpesių dažnis turi būti mažesnis už signalų generatoriaus dažnį  $F_{sw}$ . 1.8.3 formule apskaičiuojama DITH išvadui reikalinga kondensatoriaus talpa:

$$C_{DITH} = \frac{20\mu A}{2 \times F_{MOD} \times 0.12V}. \quad (1.8.3)$$

### Įtampos stebėjimas

Valdiklyje yra išėjimo įtampos monitoringo funkcija įtampos stabilumui užtikrinti. Įtampos stebėjimo funkcija gali būti panaudojama atskirų grandinių valdymui, kurios maitinamos valdiklio išėjimo įtampa. PG išvadas persijungia į aukšto impedanso būseną kai išėjimo įtampa yra reguliuojama. PG išvado signalas tampa žemu, kai išėjimo įtampa nukrinta žemiau nustatytos PG ribos (92%) ir tampa aukštu kai išėjimo įtampa viršija nustatytą PG ribą (110%). 25μs filtras užtikrina patikimumą nuo netikrų klaidų, kaip, pavyzdžiui, pereinamieji procesai.

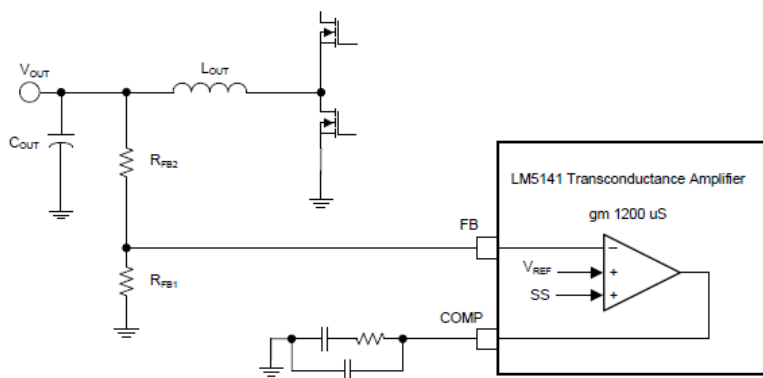
### Išėjimo įtampa

LM5141 valdiklio išėjimo grandinė gali būti sukonfigūruojama vienai iš dviejų fiksuotų įtampų nenaudojant grįžtamojo ryšio rezistorių arba išėjimo įtampa gali būti pakeičiama iki reikiamo didumo naudojant įtampos daliklį.  $U_{is}$  sukonfigūruojama 3,3V įtampai sujungiant FB ir VDDA išvadus kartu, o norint gauti 5V įtampą, FB išvadas įžeminamas.

Alternatyviai, išėjimo įtampa gali būti nustatoma naudojant rezistorinį įtampos daliklį. Išėjimo įtampa keičiama 1,5V-15V ribose, kai reguliavimo žingsnis – 1,2V. Norint apskaičiuoti  $R_{FB1}$  ir  $R_{FB2}$  daliklio vertes naudojama formulė:

$$R_{FB2} = \left( \frac{V_{OUT}}{V_{REF}} - 1 \right) \times R_{FB1}. \quad (1.8.4)$$

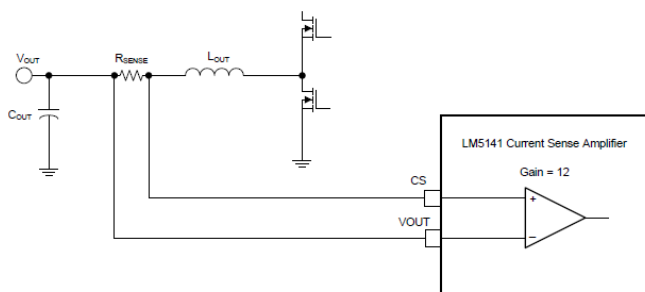
Apskaičiavus rezistorių varžų vertes jungiama pagal schemą:



**1.8.5 pav.** Išėjimo įtampos reguliavimo grandinės schema.

### Srovės matavimas induktyvumo ritėje

Yra du būdai matuoti induktyvumo ritės srovę keitiklyje. Pirmasis, tai nuosekliai ritei prijungti rezistorių srovės matavimui (rezistoriaus tikslumas turi būti iki 1%), o antrasis, tai apskaičiuoti srovę matuojant nuolatinės įtampos pasipriešinimą ritėje. 1.8.6 paveikslėlyje pavaizduota jungimo schema pirmuoju atveju.



**1.8.6 pav.** Išėjimo srovės matavimo grandinės schema.

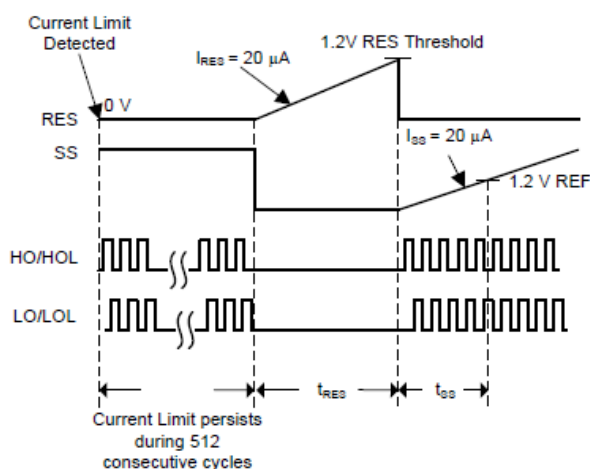
Rezistoriaus varžos apskaičiavimui naudojama formulė:

$$R_{SENSE} = \frac{V_{CS}(75mV)}{(I_{OUT(MAX)} + \frac{\Delta I}{2})} \quad (1.8.5)$$

## Laikinojo ribojimo režimas

Valdiklyje integruotas laikinojo ribojimo režimas yra skirtas apsaugai nuo perkrovos. Šis režimas naudojamas kai tarp žemės ir RES išvado prijungiamas kondensatorius. Normaliomis sąlygomis RES išvado kondensatorius yra iškraunamas. Jei atsiranda srovės ribojimas, SS išvado kondensatorius yra atjungiamas, tokiu būdu atjungdamas HO ir LO išvadus. Tada  $20\mu\text{s}$  srovės šaltinis pradeda įkrauti RES išvado kondensatorių.

Kai RES išvado įtampa pasiekia  $1.2\text{V}$ , išsikrauna jo kondensatorius ir pradedamas įkrauti SS išvado kondensatorius ir toliau ciklas kartojasi. (1.8.7 pav).



1.8.7 pav. Laikinojo ribojimo režimo veikimo charakteristika

## Parengties režimas

Nesant arba esant minimaliai apkrovai, LM5141 valdiklio išėjimo kondensatorius išsikrauna labai lėtai, o rezultate neišduodami impulsai į tranzistorius. Valdikliui aptikus, kad buvo praleista 16 ciklų, jis pereina į parengties režimą ir nebevaldo tranzistorių tam, kad sumažintų įėjimo VIN srovę. Norint, kad LM5141 valdiklis pereitų į parengties režimą, turi būti įjungtas diodo imitacijos režimas (DEMB išvado įtampa mažesnė nei  $0,4\text{V}$ ). Valdiklis parengties režimu naudoja  $35\mu\text{A}$  srovę.

## Švelnus paleidimas

Švelnaus paleidimo funkcija leidžia valdikliui palaipsniui pasiekti nusistovėjusią reikšmę, kad būtų sumažinamos paleidimo srovės. LM5141 valdiklis reguliuoja FB išvado perduodamą įtampą į SS išvadą. Pradžioje, kai SS išvado įtampą lygi nuliui, vidinė  $20\mu\text{A}$  švelnaus paleidimo srovė įkrauna išorėje esantį, šiai funkcijai skirtą, kondensatorių, kuris palaipsniui didina FB išvado ir išėjimo įtampas. Valdiklis dirba PWM režimu kai DEMB išvadas sujungtas su VDDA išvadu.

## Diodo funkciją imituojantis tranzistorius

Valdiklis galios tranzistorius gali valdyti dviem būdais: priverstiniu PWM režimu (FPWM) ir diodo imitacijos režimu (DEMB). Sinchroniškai veikiantis valdiklis turi vidinį MOSFET tranzistorių, skirtą diodo funkcijai atlikti. Esant įjungtam diodo imitacijos režimui, valdiklis sumažina valdymo dažnį esant mažoms apkrovoms. Tai sudaro galimybę pašalinti neigiamą srovę išėjimo grandinėje tam tikrose situacijose. Diodo imitacija reikalinga tam, kad galios tranzistoriuose srovė netekėtų atvirkščiai (iš santakos į ištaką). Ši funkcija konfigūruojama panaudojant DEMB išvadą, o norint ją įjungti, reikia šį išvadą prijungti prie žemės.

Veikiant FPWM režimu valdymo dažnis išlieka toks pat, todėl esant mažai išėjimo srovei, sumažėja naudingumo koeficientas.

## **2. MODELIAVIMAS *TEXAS INSTRUMENTS* MODELIAVIMO APLINKOJE *WEBENCH*®**

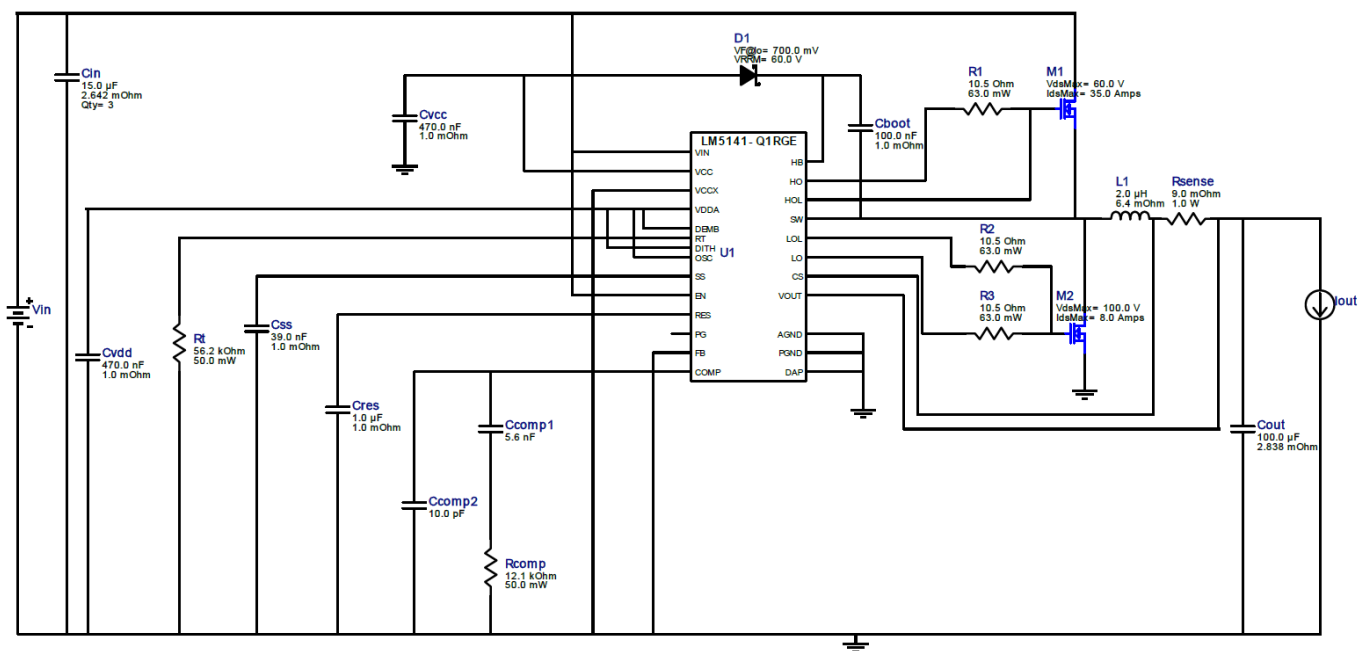
*Texas Instruments* bendrovės *WEBENCH*® *Power Designer* modeliavimo aplinka, atsižvelgiant į naudotojo reikalavimus ir nustatymus, sugeneruoja realybėje pritaikomą maitinimo šaltinio schemą. Šioje modeliavimo aplinkoje galima eksportuoti schemas, jos komponentų duomenis ar modeliavimo rezultatus ir panaudoti juos kitose programose.

### **2.1. Modelio sudarymas ir nustatymai**

Sudarant modelį, nustatomi parametrai:

- parenkamas LM5141 valdiklis.
- įėjimo įtampos diapazonas: 8V–24V.
- išėjimo įtampos reikšmė: 5V.
- maksimali išėjimo grandinės srovė: 5A.
- aplinkos temperatūra: 25°C.
- švelnaus paleidimo laikas: 2ms.
- tranzistorių junginėjimo dažnis: 2,2MHz.

Įvedus parametrus, modeliavimo programa leidžia automatiškai sudaryti schemą (2.1.1 pav.), spausdinto montažo plokštės išdėstymą bei įvairius grafikus. Taip pat lentelėje pateikiamas visų komponentų sąrašas (1 priedas). Prieš sudarant modelį galima nustatyti parinktį, kaip efektyvumo ir kainos santykis ar pritaikymo tipas.



2.1.1 pav. WEBENCH® modeliavimo aplinkos sudaryta schema

Visi komponentai atitinka ir parinkti pagal automobilių pramonės bei CISPR keliamus reikalavimus, kadangi LM5141 valdiklio naudojimas yra orientuotas šiose srityse.

## 2.2. Fiksuoto dažnio ir diodo funkciją imituojančio tranzistoriaus režimai

Modeliuojant stebimi paleidimo momentu vykstantys procesai (angl. *startup*), perinamieji procesai prijungiant ir atjungiant apkrovą (angl. *load transient*), procesai esant įėjimo įtampos pokyčiui (angl. *input transient*) ir keitiklio veikimas esant nusistovėjusiam režimui (angl. *steady state*).

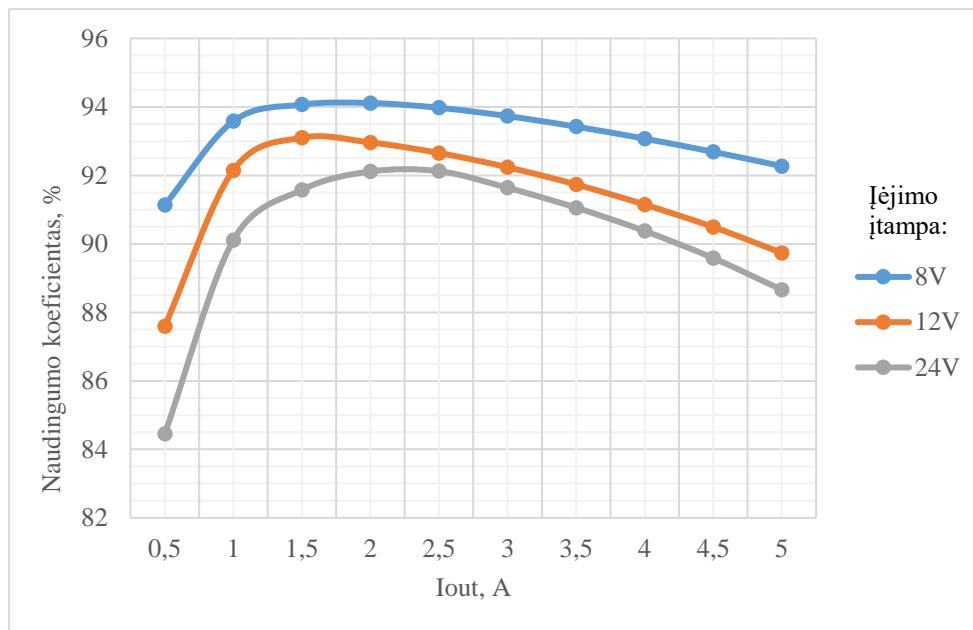
Pirmiausia, įjungiamas FPWM režimas ir prijungiamas įėjimo maitinimo šaltinis, kuris išduoda 8V įtampą. Keičiant išėjimo apkrovos dydį nuo 0,5A iki 5A, matuojama įėjimo srovė. Iš gautų duomenų apskaičiuojamas išėjimo ir įėjimo galios santykis, t. y. naudingumo koeficientas. Tokie patys matavimai atliekami esant 12V ir 24V įėjimo įtampai (išėjimo įtampa visada lieka pastovi – 5V). Gauti rezultatai surašomi į lentelę (žr. 2.2.1 lent.).

**2.2.1 lentelė.** Naudingumo koeficiento priklausomybė nuo išėjimo srovės, esant FPWM režimui

Įėjimo įtampa $U_{in}$ , V	Įėjimo srovė $I_{in}$ , A	Įėjimo galia $P_{in}$ , W	Išėjimo srovė $I_{out}$ , A	Išėjimo galia $P_{out}$ , W	Nuostoliai $P_{loss}$ , W	Naudingumo koeficientas, %
8	0,34289	2,743	0,5	2,5	0,243	91,14
	0,66785	5,343	1	5	0,343	93,58
	0,99663	7,973	1,5	7,5	0,473	94,07
	1,3282	10,626	2	10	0,626	94,11
	1,6627	13,302	2,5	12,5	0,802	93,97
	2,0004	16,003	3	15	1,003	93,73
	2,3415	18,732	3,5	17,5	1,232	93,42
	2,6861	21,489	4	20	1,489	93,07
	3,0344	24,275	4,5	22,5	1,775	92,69
3,3868	27,094	5	25	2,094	92,27	
12	0,23784	2,854	0,5	2,5	0,354	87,59
	0,45216	5,426	1	5	0,426	92,15
	0,67132	8,056	1,5	7,5	0,556	93,10
	0,89642	10,757	2	10	0,757	92,96
	1,12426	13,491	2,5	12,5	0,991	92,65
	1,3552	16,262	3	15	1,262	92,24
	1,5897	19,077	3,5	17,5	1,577	91,73
	1,8285	21,942	4	20	1,942	91,15
	2,072	24,864	4,5	22,5	2,364	90,49
2,3216	27,859	5	25	2,859	89,74	
24	0,12334	2,960	0,5	2,5	0,460	84,45
	0,2312	5,549	1	5	0,549	90,11
	0,34124	8,190	1,5	7,5	0,690	91,58
	0,45234	10,856	2	10	0,856	92,11
	0,56537	13,569	2,5	12,5	1,069	92,12
	0,68203	16,369	3	15	1,369	91,64
	0,80079	19,219	3,5	17,5	1,719	91,06
	0,92207	22,130	4	20	2,130	90,38
	1,0465	25,116	4,5	22,5	2,616	89,58
1,1749	28,198	5	25	3,198	88,66	

Pagal gautus duomenis, nubraižomas priklausomybės grafikas:





**2.2.1 pav.** Naudingumo koeficiento priklausomybė nuo išėjimo srovės  $I_{out}$  veikiant FPWM režimu

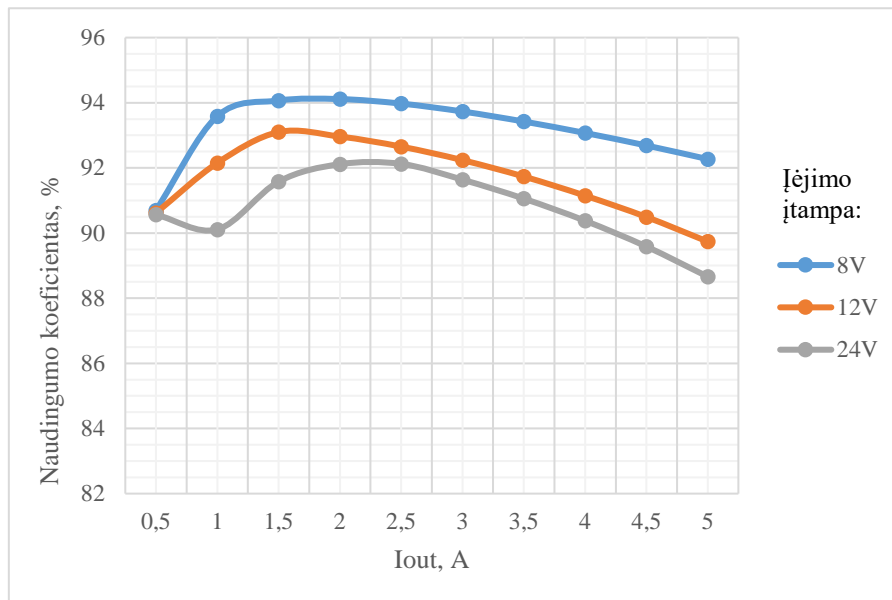
Charakteristikoje bei duomenų lentelėje matoma, kad didžiausias naudingumo koeficientas pasiekiamas keitiklį maitinant 8V įtampa, esant 2A apkrovai išėjimo grandinėje (94,11 %). Keitiklį maitinant 12V įtampa naudingumo koeficientas siekia 93,10 %, o esant 24V įėjimo įtampai naudingumo koeficientas neviršija 92,12%. Keičiant apkrovos srovę matoma, kad įėjimo srovė, esant 12V įėjimo įtampai, lygi 2,32A, o tai reiškia, kad apytikslis galios suvartojimas yra 28W. Šie matavimai tiksliai leidžia nustatyti įėjimo grandinės maitinimo šaltinio reikalavimus.

Analogiškai naudingumo koeficientas apskaičiuojamas valdikliui veikiant diodo imitacijos režimu (DEMB). Duomenys surašomi į lentelę (2.2.2 lent.)

**2.2.2 lentelė.** Naudingumo koeficiento priklausomybė nuo išėjimo srovės, esant DEMB režimui

Įėjimo įtampa $U_{in}, V$	Įėjimo srovė $I_{in}, A$	Įėjimo galia $P_{in}, W$	Išėjimo srovė $I_{out}, A$	Išėjimo galia $P_{out}, W$	Nuostoliai $P_{loss}, W$	Naudingumo koeficientas, %
8	0,34455	2,756	0,5	2,5	0,256	90,70
	0,66785	5,343	1	5	0,343	93,58
	0,99663	7,973	1,5	7,5	0,473	94,07
	1,3282	10,626	2	10	0,626	94,11
	1,6627	13,302	2,5	12,5	0,802	93,97
	2,0004	16,003	3	15	1,003	93,73
	2,3415	18,732	3,5	17,5	1,232	93,42
	2,6861	21,489	4	20	1,489	93,07
	3,0344	24,275	4,5	22,5	1,775	92,69
	3,3868	27,094	5	25	2,094	92,27
12	0,22991	2,759	0,5	2,5	0,259	90,62
	0,45216	5,426	1	5	0,426	92,15
	0,67132	8,056	1,5	7,5	0,556	93,10
	0,89643	10,757	2	10	0,757	92,96
	1,12427	13,491	2,5	12,5	0,991	92,65
	1,3552	16,262	3	15	1,262	92,24
	1,58973	19,077	3,5	17,5	1,577	91,73
	1,82853	21,942	4	20	1,942	91,15
	2,072	24,864	4,5	22,5	2,364	90,49
	2,3216	27,859	5	25	2,859	89,74
24	0,11502	2,760	0,5	2,5	0,260	90,56
	0,2312	5,549	1	5	0,549	90,11
	0,34124	8,190	1,5	7,5	0,690	91,58
	0,45234	10,856	2	10	0,856	92,11
	0,56537	13,569	2,5	12,5	1,069	92,12
	0,68203	16,369	3	15	1,369	91,64
	0,80079	19,219	3,5	17,5	1,719	91,06
	0,92207	22,130	4	20	2,130	90,38
	1,0465	25,116	4,5	22,5	2,616	89,58
	1,1749	28,198	5	25	3,198	88,66

Iš gautų duomenų nubraižoma naudingumo koeficiento priklausomybės charakteristika:



**2.2.2 pav.** Naudingumo koeficiento priklausomybė nuo išėjimo srovės  $I_{out}$  veikiant DEMB režimu

Ijungus DEMB valdiklio režimą, vietoj žemo lygio tranzistoriaus yra imituojamas diodas. 2.2.2 pav. matoma, kad naudingumo koeficientas, esant mažoms apkrovoms, padidėja. Galima daryti išvadą, kad plačiose ribose kintančioms apkrovoms, šis veikimo režimas yra priimtinausias.

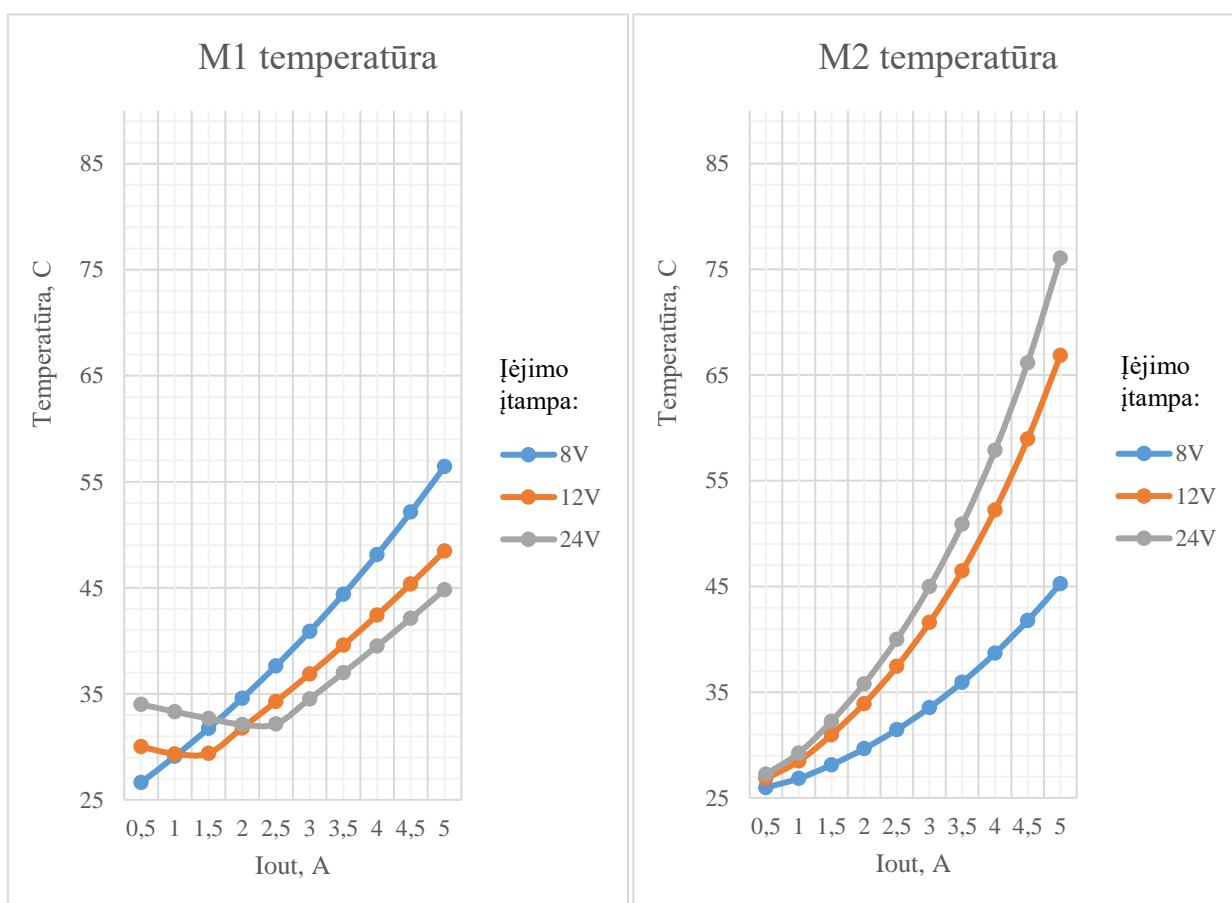
### 2.3. Perjungimo tranzistorių darbo temperatūros modeliavimas

Sinchroniškai persijunginėjant MOSFET tranzistoriams, yra trumpas laiko tarpas, kai abu tranzistoriai yra atviri, todėl atsiranda staigūs srovės šuoliai. Tranzistoriams persijungiant aukštu dažniu atsiradę nuostoliai virsta į šilumą, dėl ko M1 ir M2 tranzistoriai bei išėjimo induktyvumo ritė kaista.

Modeliavimo aplinkoje išmatuojama tranzistorių darbo temperatūra, priklausomai nuo išėjimo apkrovos (0,5A–5A), esant 8V, 12V ir 24V įėjimo įtampai (aplinkos temperatūra – 25 °C). Rezultatai surašomi į lentelę ir nubraižomi priklausomybių grafikai:

**2.3.1 lentelė.** M1 ir M2 tranzistorių temperatūros priklausomybė nuo įėjimo įtampos bei išėjimo srovės.

Išėjimo srovė $I_{out}$ , A	M1 tranzistoriaus temperatūra kai $U_{in}=8V$ , °C	M1 tranzistoriaus temperatūra kai $U_{in}=12V$ , °C	M1 tranzistoriaus temperatūra kai $U_{in}=24V$ , °C	M2 tranzistoriaus temperatūra kai $U_{in}=8V$ , °C	M2 tranzistoriaus temperatūra kai $U_{in}=12V$ , °C	M2 tranzistoriaus temperatūra kai $U_{in}=24V$ , °C
0,5	26,64	30,01	34,01	25,98	26,83	27,25
1	29,10	29,34	33,31	26,84	28,47	29,24
1,5	31,75	29,39	32,67	28,12	30,96	32,25
2	34,59	31,79	32,10	29,65	33,92	35,79
2,5	37,63	34,28	32,15	31,45	37,43	40,00
3	40,90	36,88	34,53	33,54	41,59	44,99
3,5	44,39	39,59	36,98	35,94	46,48	50,89
4	48,13	42,42	39,51	38,67	52,21	57,87
4,5	52,14	45,37	42,12	41,77	58,94	66,16
5	56,43	48,46	44,82	45,26	66,84	76,04



**2.3.1 pav.** M1 ir M2 tranzistorių darbo temperatūros priklausomybė nuo apkrovos

Atlikti matavimai rodo, kad tranzistorių darbo temperatūra priklauso ne tik nuo išėjimo srovės. Esant žemesnei įėjimo įtampai, aukšto lygio tranzistoriaus M1 temperatūra yra didesnė nei esant 24V įėjimo įtampai ir gali pasiekti 56 °C. Tuo tarpu žemo lygio tranzistoriaus temperatūra, esant 8V įėjimo įtampai, yra žemesnė, lyginant su 24V įėjimo įtampa. Taip yra todėl, nes esant 8V įėjimo įtampai darbo ciklas yra žymiai didesnis ir aukšto lygio tranzistorius veikia ilgesnį laiką.

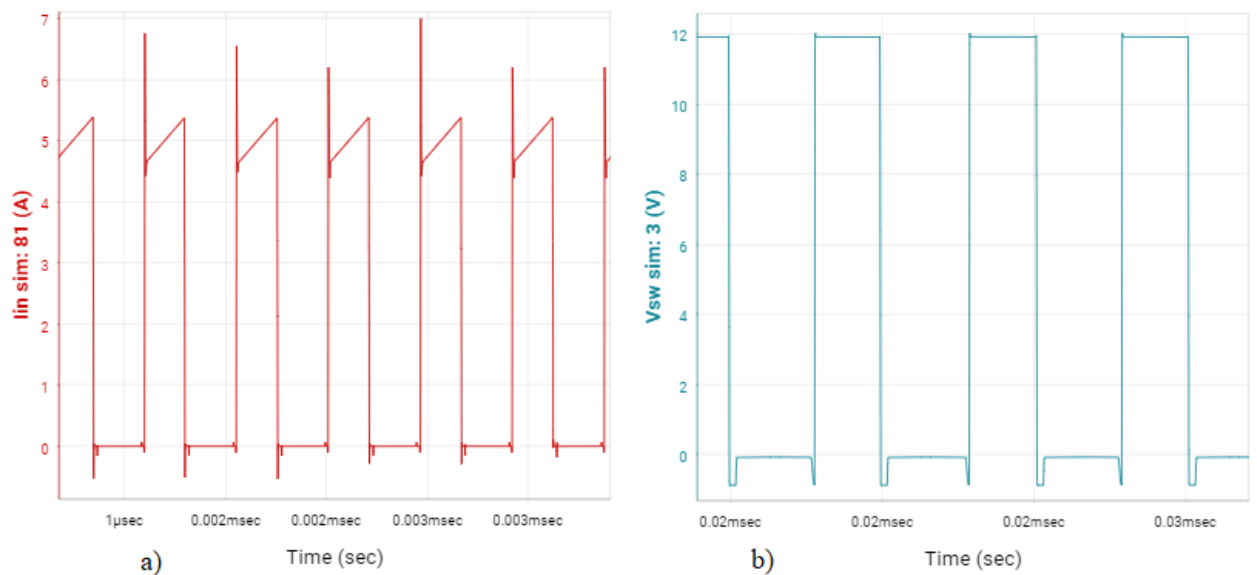
## **2.4. Spektro plėtimas elektromagnetiniams trikdžiams mažinti**

Dažnai įtampos keitiklių elektromagnetinis triukšmas nebūna ištiriamas iki pat keitiklio kūrimo pabaigos, kai keitiklis jau būna integruotas į tam tikrą gaminį ar sistemą. Dažniausiai tokiu atveju jau nebelieka vietos papildomam filtrui prijungti ar laiko šio keitiklio perdarymui. Norint surasti sprendimą EMC reikalavimų įgyvendinimui tokiu atveju gali brangiai kainuoti ir išnaudoti daug laiko.

Vienas, gana paprastas, būdas elektromagnetinių trikdžių kiekiui sumažinti tai panaudoti keitiklio veikimo dažnio svyravimo funkciją (angl. *dithering*). Tarp valdiklio DITH išvado ir žemės yra prijungiamas kondensatorius, kuris įsikraudamas ir išsikraudamas pastoviai keičia tranzistorių valdymo dažnį.

Daugiausiai EMI skleidžia aukšto lygio tranzistoriaus santakos mazgas, kur atsiranda staigūs srovės šuoliai, ir bendras abiejų tranzistorių išėjimo mazgas, kur ties kiekvienu įtampos impulsu atsiranda slopstantys virpesiai.

Modeliuojant keitiklį *WEBENCH® Power Designer* modeliavimo aplinkoje gauti įėjimo srovės bei MOSFET galios tranzistorių perjungimo signalai (žr. 2.4.1 pav. a ir b). Tyrimai atlikti esant 12V įėjimo įtampai ir 5A išėjimo apkrovai.

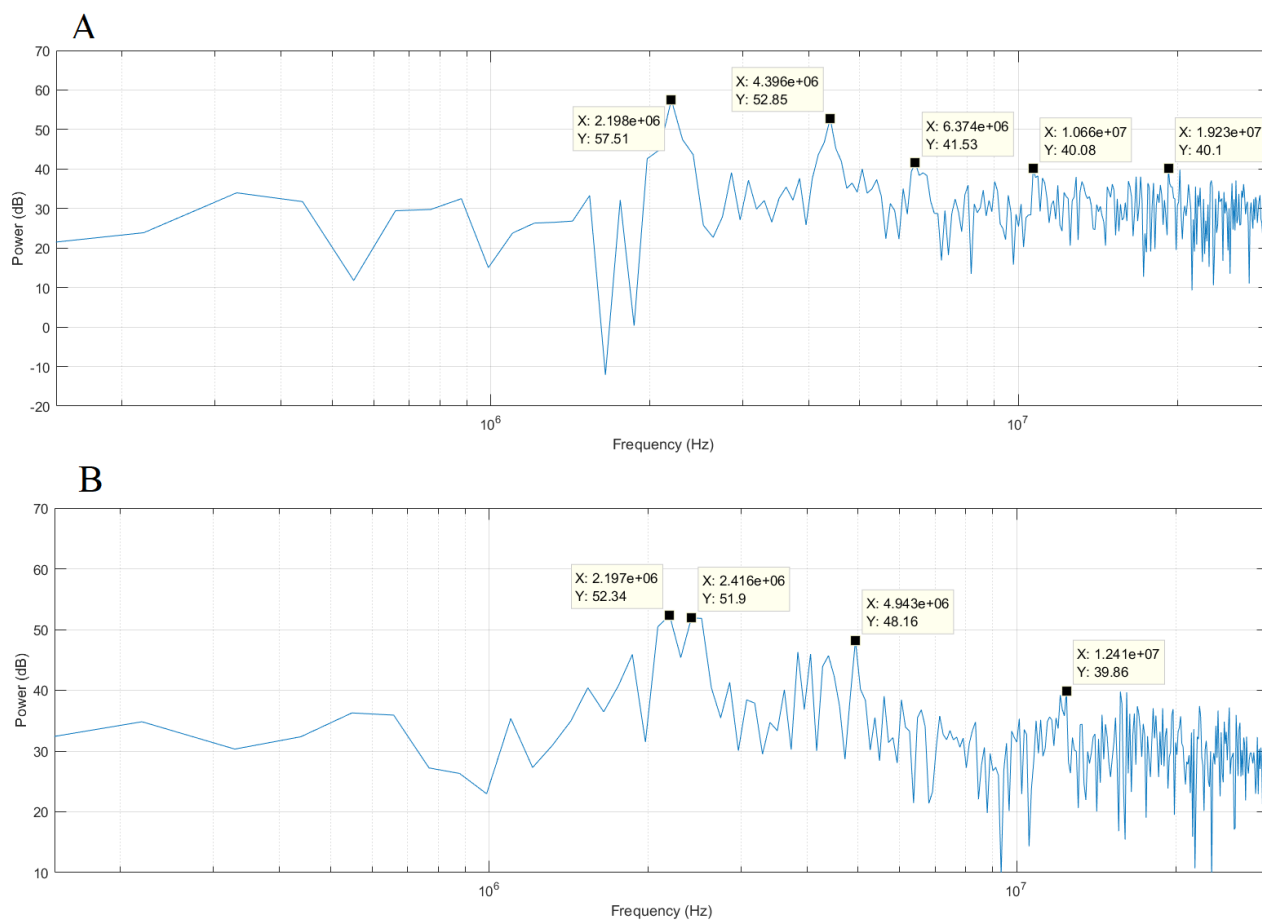


**2.4.1 pav.** Įtampos keitiklio įėjimo srovė (a) ir perjungimo tranzistoriaus M2 įtampa (b)

Iš įtampos keitiklio srovės formos matoma, kad perjungimo metu atsiranda aukšto dažnio srovės šuoliai. Šie šuoliai generuoja aukšto dažnio elektromagnetinių triukšmų harmonikas. Palyginus, tranzistorių perjungimo įtampos signalas, turi pakankamai mažai svyravimų. Taip yra todėl, kad modeliuojant nėra įvertinama daug parametru. Taip pat, dėl modeliavimo programos ribotų galimybių negalima tarpusavyje palyginti tranzistorių valdymo signalų.

Išmatavus abiejų signalų vertes skirtingais laiko momentais, naudojant *MATLAB* programinį paketą, buvo atliekama šių signalų spektro analizė 150kHz–30MHz dažnio srityje. Naudotas pavyzdinis programos kodas pateiktas 2 priede.

Atliekant spektro analizę lyginami rezultatai įtampos keitikliui veikiant įprastu režimu ir esant įjungtai DITH funkcijai, skirtą spektro išplėtimui. Pirmiausia atliekama įėjimo srovės  $i_{in}$  spektro analizė (žr. 2.4.2 pav.)

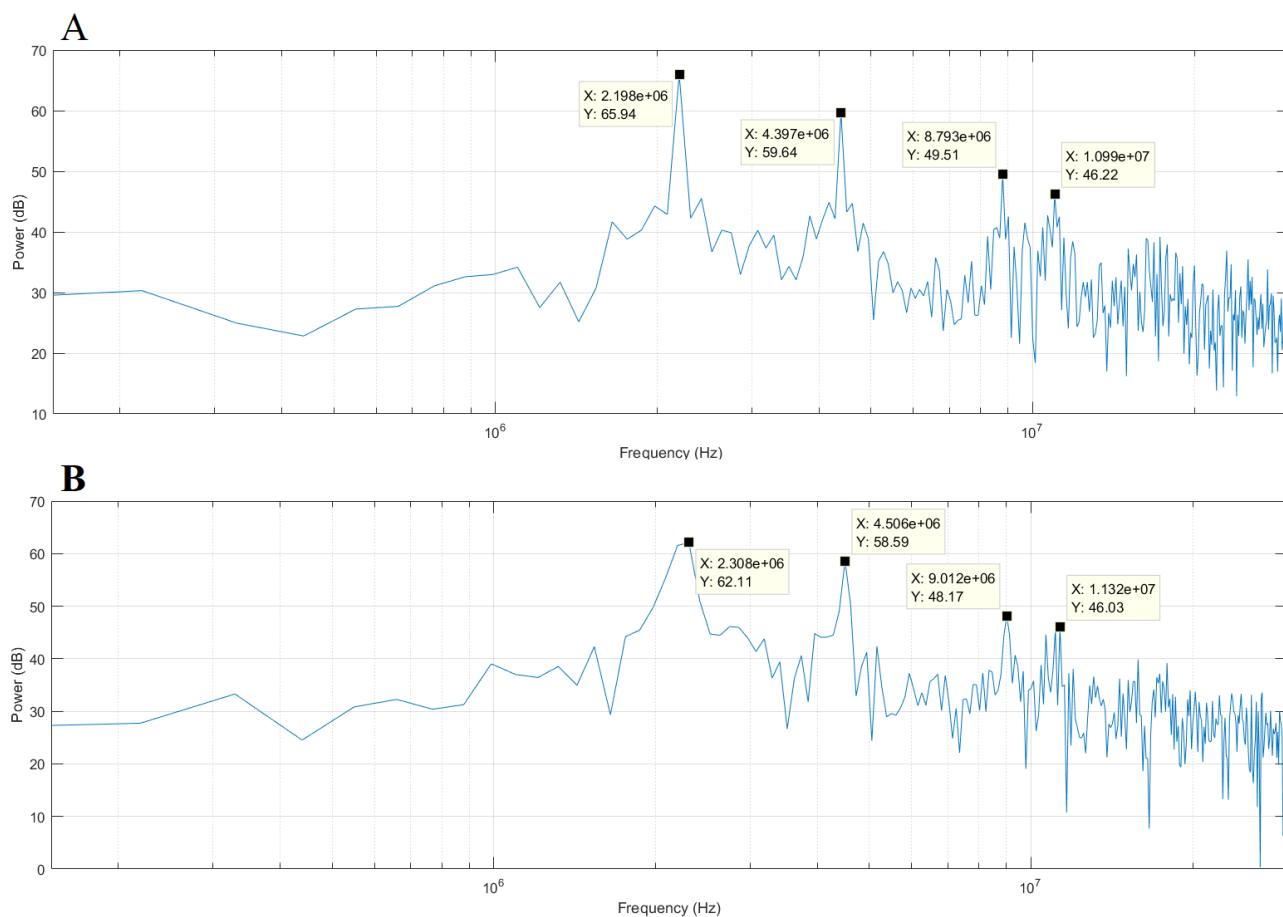


**2.4.2 pav.**  $I_{in}$  srovės spektro analizė 150kHz–30MHz dažnių diapazone: A – be DITH funkcijos, B – su DITH funkcija

Atlikus įėjimo srovės  $I_{in}$  spektro analizę galima pastebėti (2.4.2 A pav.), kad galios spektre išryškėja šios harmonikos: 2,2MHz (57.5dB), 4,4MHz (52,9dB), 6,4MHz (41,5dB), 10,7MHz (40dB) bei 19,2MHz (40dB). Iš to galima spręsti, kad didžiausios vertės skleidžiamas elektromagnetinis triukšmas vyraus būtent šiuose dažniuose.

Įtampos keitiklyje įjungus spektro išplėtimo funkciją, 2.4.2 B paveiksle matoma, kad santykinės vertės, ypač valdymo dažnio harmonikose, buvo sumažintos (~2,2MHz srityje sumažėjo apytikriai iki 51dB, ~4,4MHz – iki 48dB). Visgi, sumažinant harmonikų santykinę amplitudę, padidėja šių harmonikų dažnio spektras.

Buvo atlikta ir tranzistorių persijungimo signalo  $V_{sw}$  spektro analizė (2.4.3 pav.)



**2.4.3 pav.**  $V_{sw}$  įtampos spektro analizė 150kHz–30MHz dažnių diapazone: A – be DITH funkcijos, B – su DITH funkcija

Išanalizavus įtampos keitiklio MOSFET tranzistorių persijungimo signalą (2.4.3 pav.) matoma, kad papildomai išryškėja 8,8MHz ir 11MHz dažnių harmonikos. Šie harmoniniai dažniai išryškėja dėl persijungimo metu atsirandančių svyravimų.

Spektro plėtimo funkcija didesnę įtaką daro pirmos ir antros harmonikų dažniams, todėl 9MHz ir 11MHz dažnių harmonikos išlieka beveik nepakitusios. Nors modeliuojant yra neįvertinama daug realybėje atsirandančių veiksnių, iš spektro analizės galima numatyti kokiose dažnių srityse elektromagnetinių triukšmų lygis bus žymiai didesnis.



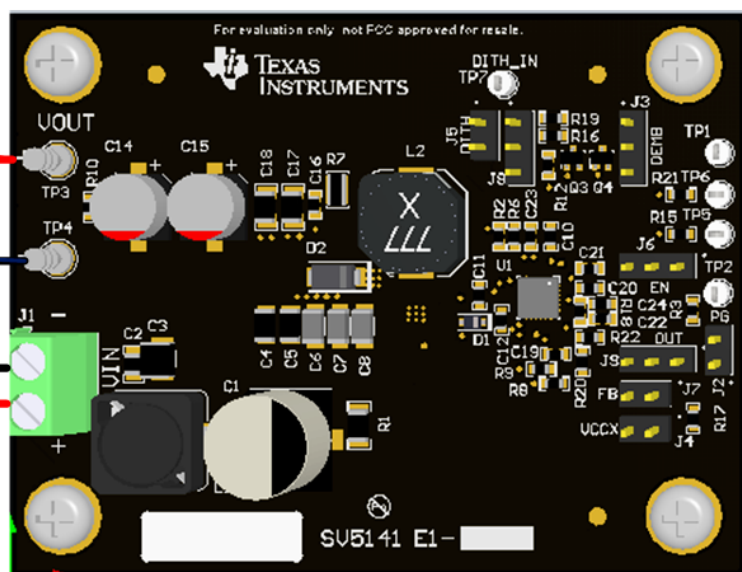
### 3. EKSPERIMENTINIS TYRIMAS

Eksperimentiniam tyrimui buvo naudojamas žeminančiojo įtampos keitiklio eksperimentinis komplektas LM5141QRGEVM, kurio schema pateikta 3 priede.

LM5141QRGEVM komplekto savybės ir galimi nustatymai:

- įėjimo įtampa: 5,5V–42V;
- fiksuota 5V arba 3,3V išėjimo įtampa;
- mažas srovės suvartojimas parengties režimu: 10 $\mu$ A;
- 2,2MHz arba 440kHz dažnių generatoriaus dažnis;
- spektro išplėtimo funkcija;
- laikinojo ribojimo režimas skirtas apsaugoti nuo perkrovos;
- DEMB ir FPWM veikimo režimai.

Įtampos keitiklio komponentų išdėstymas eksperimentiniame komplekte pavaizduotas 3.1 pav.

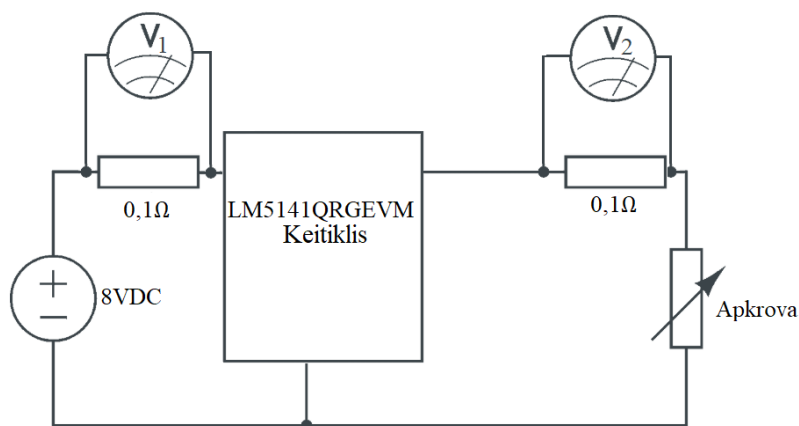


**3.1 pav.** Įtampos keitiklio eksperimentinio LM5141QRGEVM komplekto komponentų išdėstymas

Eksperimentinis komplektas sudarytas taip, kad būtų galima lengvai išbandyti visas pagrindines valdiklio funkcijas ir jas palyginti tarpusavyje. Pagrindinių matavimų mazgai turi atskirus išvadus.

### 3.1. Fiksuoto dažnio ir diodo funkciją imituojančio tranzistoriaus režimai

Pirmiausia buvo tiriamas FPWM režimas. Naudingumo koeficiento matavimo schema parodyta 3.1.1 paveiksle. Keitiklio įėjimo grandinėje ir išėjimo grandinėje nuosekliai buvo įjungti didelio tikslumo rezistoriai, kurio varža yra  $0,1\Omega$ .



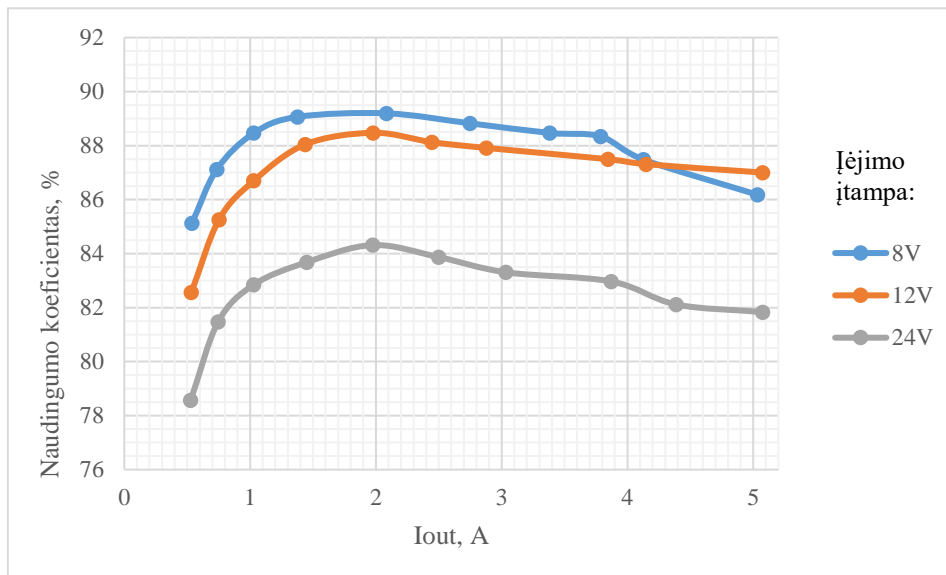
**3.1.1 pav.** LM5141QRGEVM įtampos keitiklio naudingumo koeficiento skaičiavimui skirta jungimo schema

Keičiant išėjimo apkrovos varžą, matuojama išėjimo bei įėjimo rezistoriuose krintanti įtampa ir apskaičiuojama išėjimo ir įėjimo grandinių srovė. Iš gautų duomenų surandamas išėjimo ir įėjimo galios santykis, t. y. naudingumo koeficientas. Tokie patys matavimai atliekami esant 12V ir 24V įėjimo įtampai (išėjimo įtampa visada lieka pastovi – 5V). Gauti rezultatai parodyti 3.1.1 lentelėje.

**3.1.1 lentelė.** Naudingumo koeficiento priklausomybė nuo išėjimo srovės, įjungus FPWM režimą

Įėj. įtampa, U <sub>in</sub> , V	Įėj. srovė, I <sub>in</sub> , A	Įėj. galia, P <sub>in</sub> , W	Išėj. srovė, I <sub>out</sub> , A	Išėj. galia, P <sub>out</sub> , W	Nuostoliai, W	Naudingumo koef., %
8	0,395	3,160	0,538	2,69	0,470	85,13
	0,528	4,224	0,736	3,68	0,544	87,12
	0,727	5,816	1,029	5,145	0,671	88,46
	0,967	7,736	1,378	6,89	0,846	89,06
	1,461	11,688	2,085	10,425	1,263	89,19
	1,935	15,480	2,75	13,75	1,730	88,82
	2,390	19,120	3,383	16,915	2,205	88,47
	2,680	21,440	3,788	18,94	2,500	88,34
	2,950	23,600	4,129	20,645	2,955	87,48
	3,650	29,200	5,033	25,165	4,035	86,18
12	0,269	3,228	0,533	2,665	0,563	82,56
	0,368	4,416	0,753	3,765	0,651	85,26
	0,495	5,940	1,03	5,15	0,790	86,70
	0,681	8,172	1,439	7,195	0,977	88,04
	0,932	11,184	1,979	9,895	1,289	88,47
	1,156	13,872	2,445	12,225	1,647	88,13
	1,365	16,380	2,88	14,4	1,980	87,91
	1,831	21,972	3,845	19,225	2,747	87,50
	1,980	23,760	4,149	20,745	3,015	87,31
	2,430	29,160	5,074	25,37	3,790	87,00
24	0,140	3,360	0,528	2,64	0,720	78,57
	0,191	4,584	0,747	3,735	0,849	81,48
	0,259	6,216	1,03	5,15	1,066	82,85
	0,361	8,664	1,45	7,25	1,414	83,68
	0,488	11,712	1,975	9,875	1,837	84,32
	0,621	14,904	2,5	12,5	2,404	83,87
	0,759	18,216	3,035	15,175	3,041	83,31
	0,972	23,328	3,871	19,355	3,973	82,97
	1,113	26,712	4,387	21,935	4,777	82,12
	1,292	31,008	5,075	25,375	5,633	81,83

Pagal gautus duomenis, nubraižomas priklausomybės grafikas:



**3.1.2 pav.** Naudingumo koeficiento priklausomybė nuo išėjimo srovės  $I_{out}$  veikiant FPWM režimu

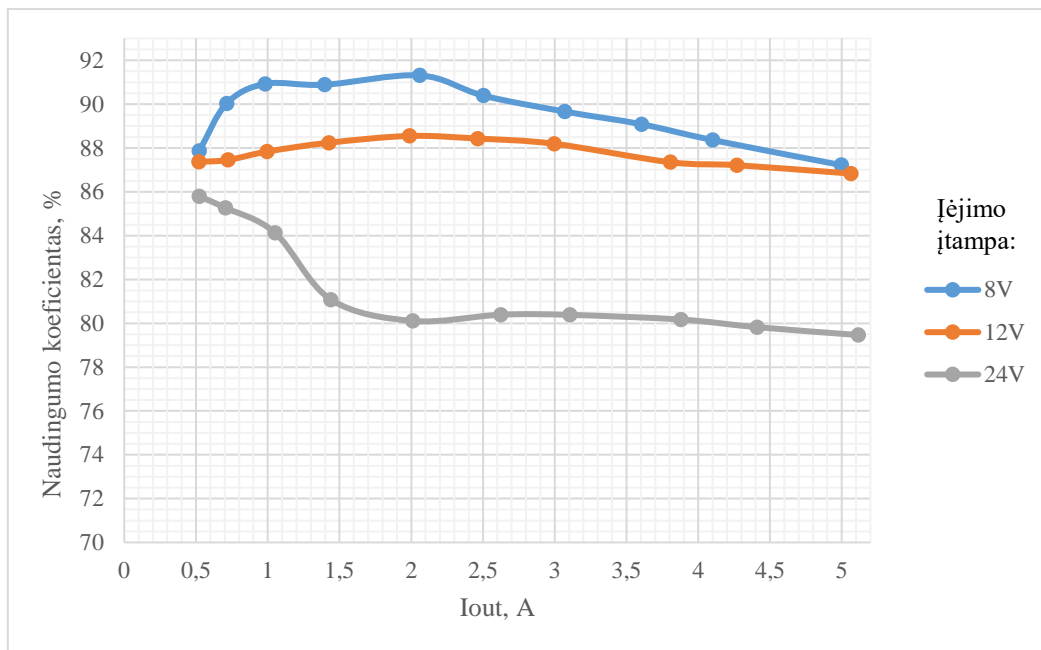
Charakteristikoje bei duomenų lentelėje matoma, kad didžiausias naudingumo koeficientas pasiekiamas keitiklį maitinant 8V įtampa, esant maždaug 2A apkrovai išėjimo grandinėje (89,19 %). Keitiklį maitinant 12V įtampa naudingumo koeficientas siekia 88,47 %, o esant 24V įėjimo įtampai naudingumo koeficientas neviršija 84,32%. Keičiant apkrovos srovę matoma, kad įėjimo srovė, esant 12V įėjimo įtampai, lygi 2,43A, o tai reiškia, kad apytikslis galios suvartojimas yra 29W.

Analogiškai buvo tiriamas naudingumo koeficientas ir dirbant DEMB režimu. Lygiai taip pat kaip ir anksčiau, naudingumo koeficientas išmatuojamas prieš tai minėtu būdu valdikliui veikiant diodo imitacijos režimu. Gautieji duomenys parodyti 3.1.2 lentelėje.

**3.1.2 lentelė.** Naudingumo koeficiento priklausomybė nuo išėjimo srovės, keitikliui dirbant DEMB režimu

Įėjimo įtampa $U_{in}, V$	Įėjimo srovė $I_{in}, A$	Įėjimo galia $P_{in}, W$	Išėjimo srovė $I_{out}, A$	Išėjimo galia $P_{out}, W$	Nuostoliai $P_{loss}, W$	Naudingumo koeficientas, %
8	0,372	2,976	0,523	2,615	0,361	87,87
	0,495	3,960	0,713	3,565	0,395	90,03
	0,675	5,400	0,982	4,91	0,490	90,93
	0,960	7,680	1,396	6,98	0,700	90,89
	1,410	11,280	2,06	10,3	0,980	91,31
	1,730	13,840	2,502	12,51	1,330	90,39
	2,140	17,120	3,07	15,35	1,770	89,66
	2,530	20,240	3,606	18,03	2,210	89,08
	2,900	23,200	4,1	20,5	2,700	88,36
	3,580	28,640	4,996	24,98	3,660	87,22
12	0,248	2,976	0,52	2,6	0,376	87,37
	0,344	4,128	0,722	3,61	0,518	87,45
	0,472	5,664	0,995	4,975	0,689	87,84
	0,673	8,075	1,425	7,125	0,950	88,24
	0,935	11,220	1,987	9,935	1,285	88,55
	1,161	13,932	2,464	12,32	1,612	88,43
	1,415	16,980	2,995	14,975	2,005	88,19
	1,815	21,780	3,805	19,025	2,755	87,35
	2,040	24,480	4,27	21,35	3,130	87,21
	2,430	29,160	5,064	25,32	3,840	86,83
24	0,127	3,048	0,523	2,615	0,433	85,79
	0,172	4,128	0,704	3,52	0,608	85,27
	0,260	6,240	1,05	5,25	0,990	84,13
	0,370	8,880	1,44	7,2	1,680	81,08
	0,523	12,552	2,011	10,055	2,497	80,11
	0,680	16,320	2,624	13,12	3,200	80,39
	0,805	19,320	3,106	15,53	3,790	80,38
	1,008	24,192	3,879	19,395	4,797	80,17
	1,151	27,624	4,41	22,05	5,574	79,82
	1,341	32,184	5,115	25,575	6,609	79,46

Iš gautų duomenų nubraižyta naudingumo koeficiento priklausomybės charakteristika pateikta 3.1.3 pav.



**3.1.3 pav.** Naudingumo koeficiento priklausomybė nuo išėjimo srovės  $I_{out}$  veikiant DEMB režimu

Gautieji duomenys rodo, kad dirbant DEMB režimu naudingumo koeficientas, esant mažoms apkrovoms, yra didesnis nei keitikliui veikiant FPWM režimu. Esant didesnėms apkrovoms ir 24V įėjimo įtampai, naudingumo koeficientas svyruoja apie 80 %. Tuo tarpu veikiant FPWM režimu, naudingumo koeficientas svyruoja tarp 82 % ir 84 %. Pasirenkant veikimo režimą būtina įvertinti keitiklio įėjimo įtampą ir apkrovos dydį.

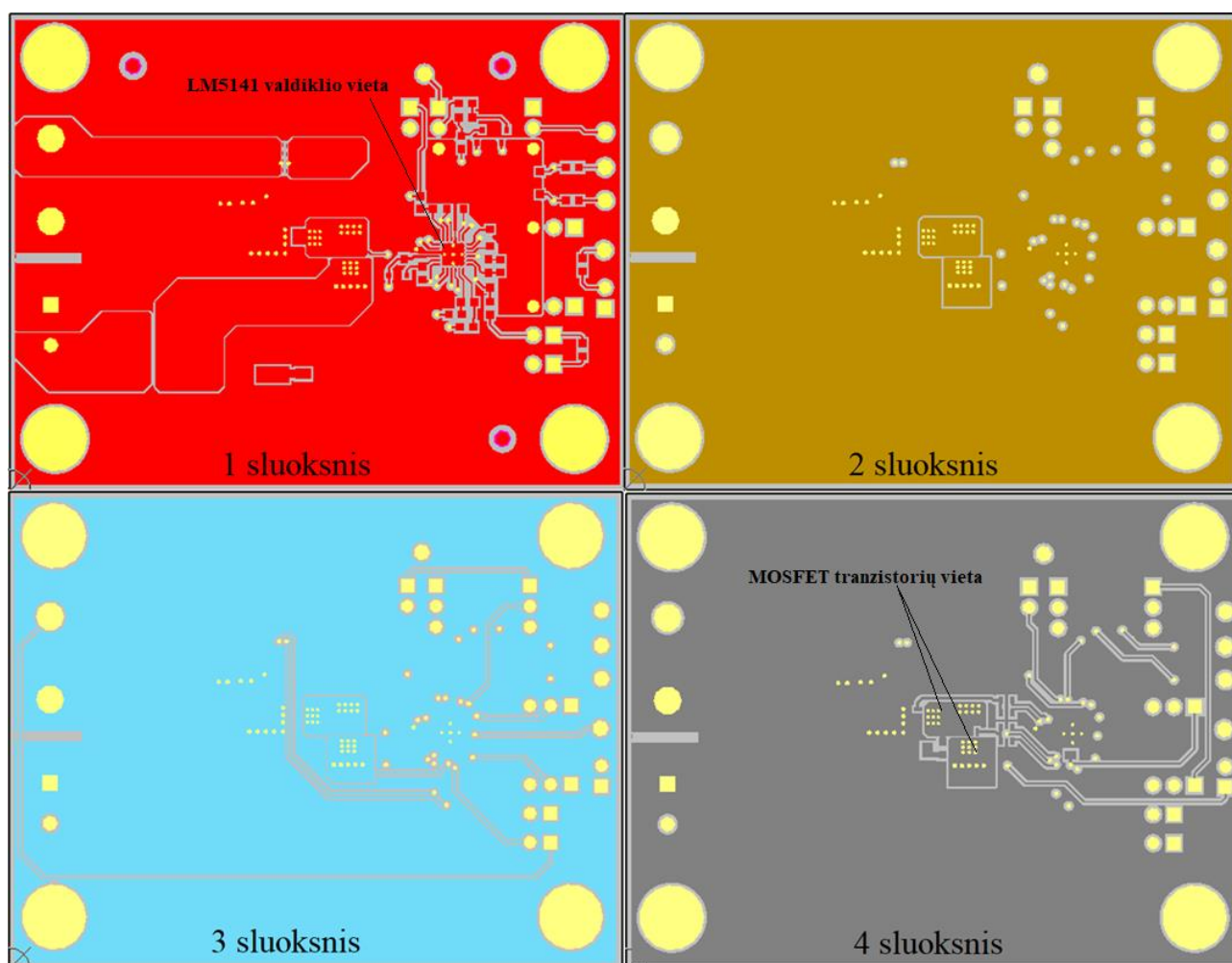
### 3.2. Įtampos keitiklio komponentų temperatūros tyrimas

Keitiklio komponentų temperatūros eksperimentinis tyrimas buvo atliekamas naudojant termovizorių *FLIR E40BX*. Jo pagrindiniai parametrai:

- raiška - 160 x 120 pikselių, 3,1 MP, LED apšvietimas;
- matymo laukas -  $25^{\circ} \times 19^{\circ}$ ;
- minimalus matavimo nuotolis: 0,4 m;
- fokusavimas: rankinis, priartinimas: skaitmeninis, 1–2x;
- temperatūrinis jautrumas:  $<0,045^{\circ}\text{C}$ ;
- matuojamas temperatūros diapazonas:  $-20\dots+120^{\circ}\text{C}$ ;
- tikslumas:  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 3,6^{\circ}\text{F}$ );

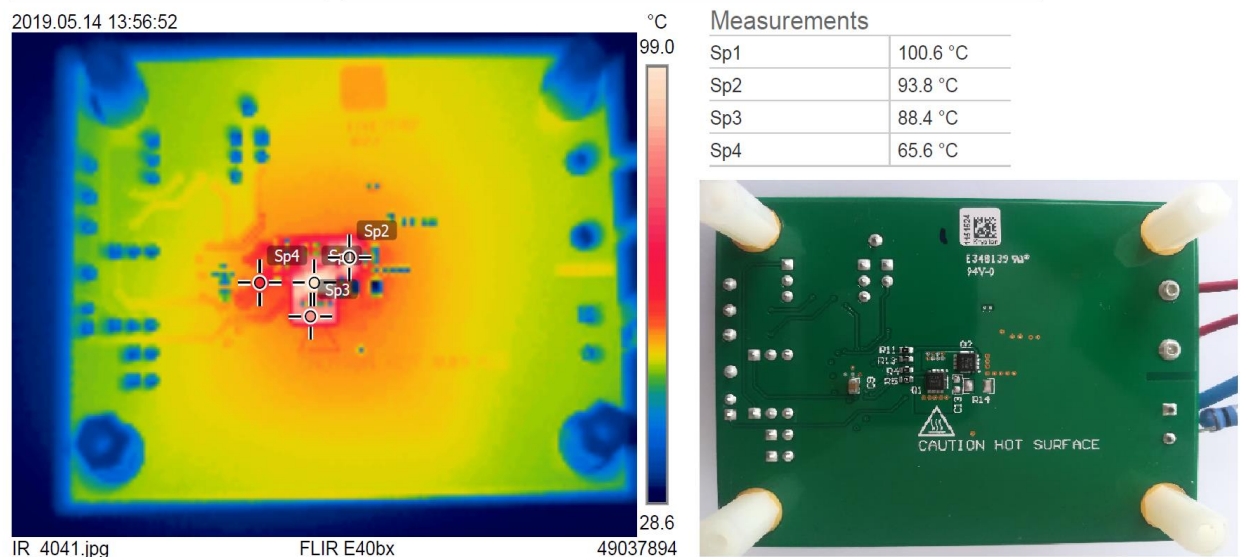
Tyrimo metu buvo stebima keitiklio eksperimentinio komplekto LM5141QRGEVM komponentų temperatūros priklausomybė nuo išėjimo srovės.

Žiūrint į įtampos keitiklio komponentų ir daugiasluoksnės spausdinto montažo plokštės (PCB) takelių išdėstymą (3.2.1 pav.) nesunku pastebėti, kad pagrindinių galios takelių plotas yra didelis, o ties Q1 ir Q2 MOSFET tranzistoriais yra papildomų metalizuotų skylučių, kurios sujungia šį sluoksnį su kitais sluoksniais ir taip atlieka svarbią tranzistorių aušinimo funkciją. Taip pat, atsižvelgta ir į elektromagnetinius triukšmus, todėl įžeminimo plotas yra ne tik maksimaliai išplėstas, bet taip pat kertasi kitų sluoksnių atžvilgiu su EMI skleidžiančiais takeliais taip sumažindamas ir elektromagnetinių trikdžių kiekį.

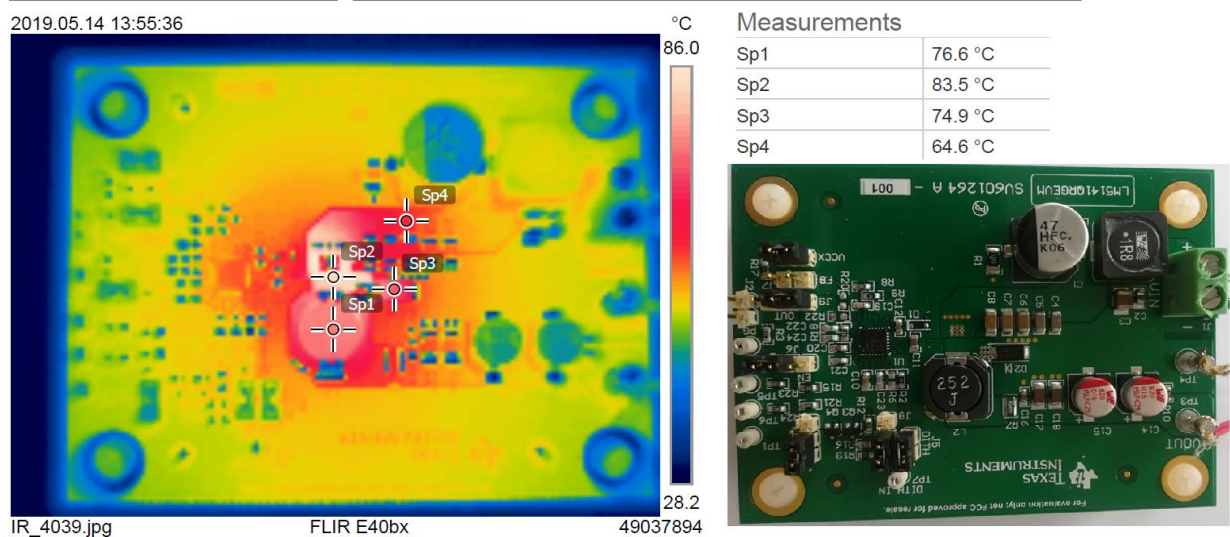


**3.2.1 pav.** Keitiklio eksperimentinio komplekto LM5141QRGEVM takelių išdėstymas keturiuose sluoksnuose

Naudojant termovizorių *FLIR E40BX* buvo ištirta įtampos keitiklio temperatūra esant 24V įėjimo įtampai ir 5A išėjimo srovei. Termovizoriaus vaizdai pateikiami 3.2.2 ir 3.2.3 paveiksluose.



**3.2.2 pav.** Apatinės keitiklio eksperimentinio komplekto LM5141QRGEVM pusės termovizoriaus vaizdas



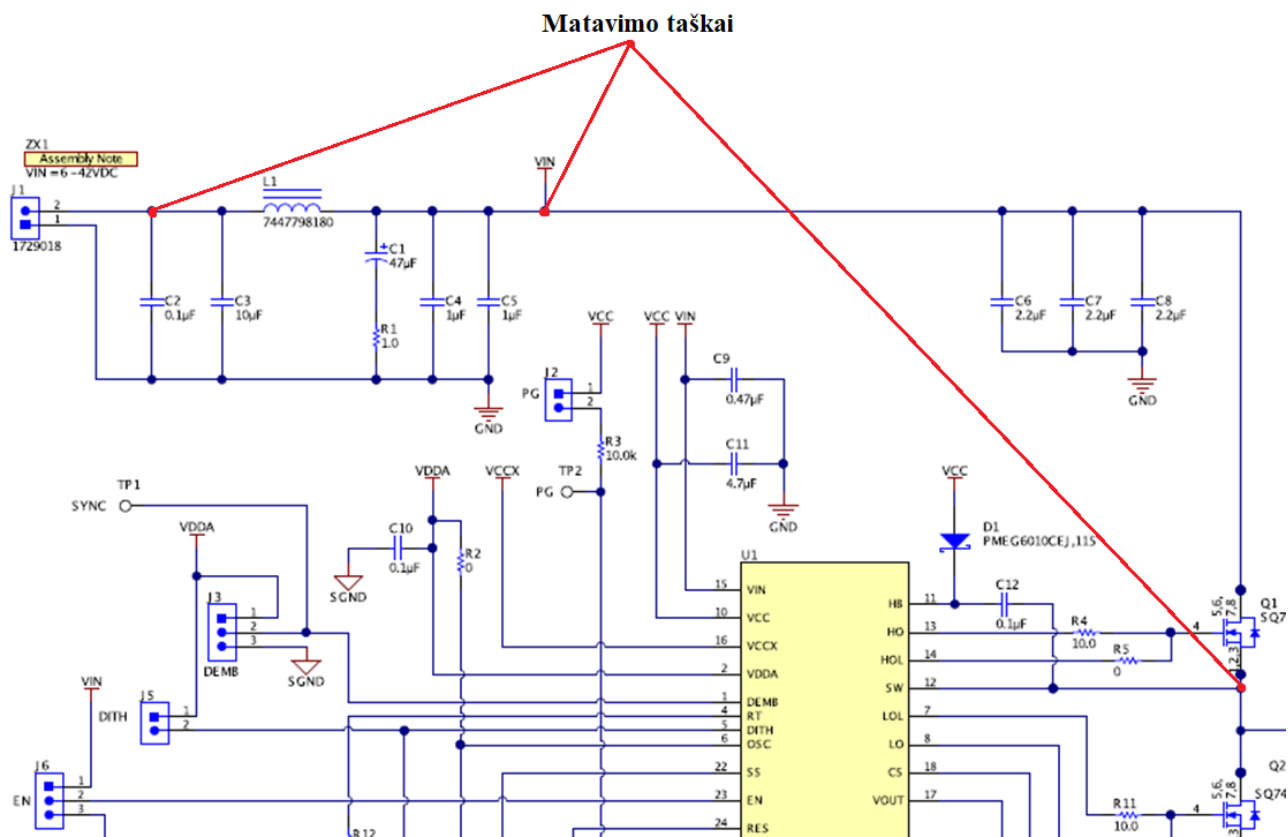
**3.2.3 pav.** Viršutinės keitiklio eksperimentinio komplekto LM5141QRGEVM pusės termovizoriaus vaizdas

Nustatyta, kad įtampos keitiklyje labiausiai šyla aukšto ir žemo lygio tranzistoriai Q1 ir Q2 bei išėjimo grandinės filtravimo ritė L2. Žemo lygio tranzistorius Q2 pasiekia net 100°C temperatūrą. Tuo tarp aukšto lygio tranzistorius Q1 sušyla iki 88 °C bei ritė L2 iki 76 °C. Kylant maitinimo šaltinio temperatūrai, padidėja perkaitimo ar gedimų tikimybė, todėl naudinga naudoti aušinimo ventiliatorių.



### 3.3. Eksperimentinis elektromagnetinių triukšmų šaltinių spektro tyrimas

Eksperimentinio tyrimo metu buvo atliekama daugiausiai elektromagnetinių triukšmų sklaidžiančių mazgų spektro analizė. Tyrimo mazgai atvaizduojami 3.3.1 pav.

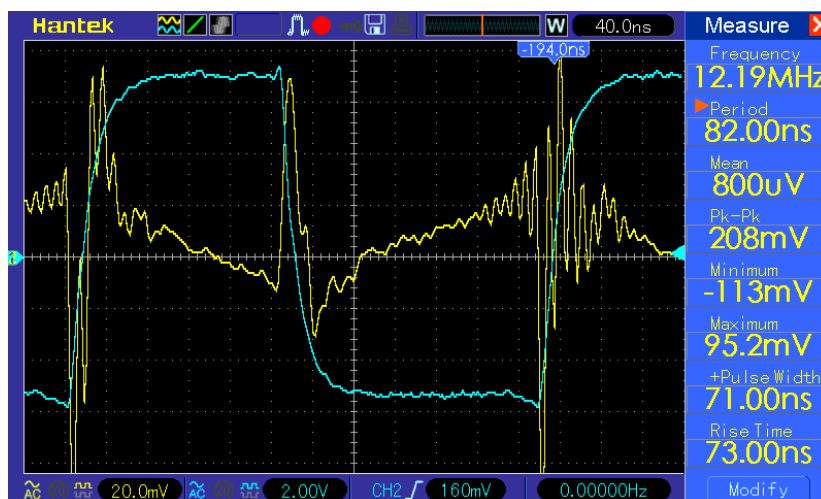


3.3.1 pav. Įtampos keitiklio mazgai spektro analizei atlikti

Spektro analizei ištirti buvo naudojamas *ROHDE & SCHWARZ HMS-X* spektro analizatorius. Šio analizatoriaus parametrai:

- dažnių diapazonas: 100kHz–3GHz;
- laiko diapazonas: 20ms–1000s;
- spektro stabilumas: -100dB/Hz (prie 100kHz);
- automatinis maksimalių ir minimalių amplitudžių aptikimas;
- amplitudinio vidurkio matavimas.

Eksperimentiškai tiriant žeminantįjį aukšto dažnio įtampos keitiklį buvo pastebėta, kad perjungimo metu Q1 tranzistoriaus santakoje atsiranda amplitudinių įtampos svyravimų dėl nuolat kintančios srovės. Taip pat, trumpu perjungimo momentu, kai abu tranzistoriai yra atviri įvyksta įėjimo srovės šuolis ir įvyksta dažniniai įėjimo įtampos susvyravimai (3.3.2 pav.)



**3.3.2 pav.** Tranzistorių perjungimo momentu atsirandantys įtampos svyravimai

Šie įtampos svyravimai ir srovės šuoliai yra pagrindinė keitiklio sukiamų aukšto dažnio elektromagnetinių triukšmų priežastis.

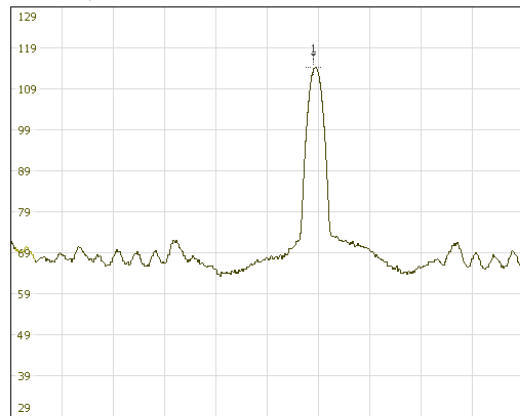
Norint išsiaiškinti elektromagnetinių triukšmų dažnių spektrą buvo panaudotas *ROHDE & SCHWARZ HMS-X* spektro analizatorius. Kaip ir atliekant modeliavimą, buvo analizuojamas dažnių spektras esant išjungtai ir įjungtai DITH funkcijai, esant 12V šaltinio įėjimo įtampai.

Pirmiausia, norint įsitikinti dėl spektro plėtimo funkcionalumo buvo atliekama galios tranzistorių valdymo dažnio diapazono spektro analizė (3.3.3 pav.)

RBW: 30 kHz  
VBW: 10 kHz  
Ref: 129 dBμV

SwT: 200 ms  
Att: 30 dB

M1: 2.18000 MHz, 114.35 dBμV



Center: 2.00000000 MHz 200 kHz/DIV Span: 2 MHz

FREQUENCY

CENTER

2.00000 MHz

START

1.00000 MHz

STOP

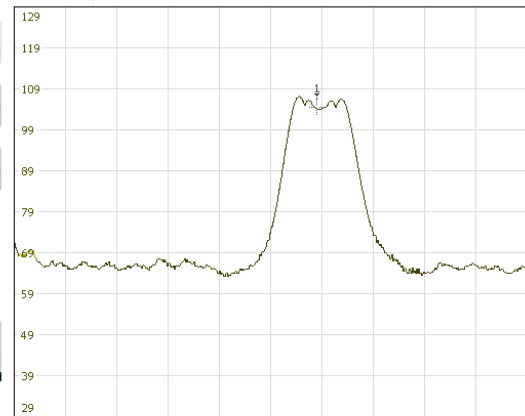
3.00000 MHz

CF-STEPSIZE

RBW: 30 kHz  
VBW: 10 kHz  
Ref: 129 dBμV

SwT: 200 ms  
Att: 30 dB

M1: 2.18000 MHz, 104.49 dBμV



Center: 2.00000000 MHz 200 kHz/DIV Span: 2 MHz

FREQUENCY

CENTER

2.00000 MHz

START

1.00000 MHz

STOP

3.00000 MHz

CF-STEPSIZE

TM: AVG

**3.3.3 pav.** Galios tranzistorių valdymo dažnio diapazono spektro analizė neįjungtam (kairėje) ir įjungtam DITH režimui (dešinėje)

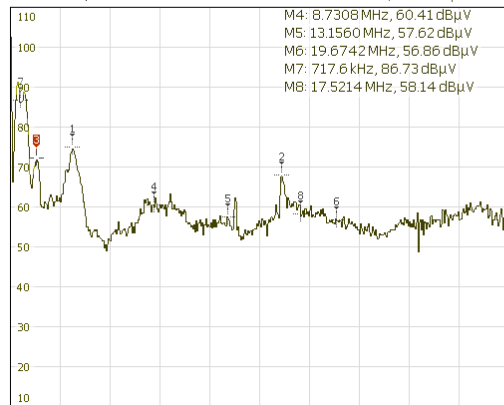
Nesunku pastebėti, kad veikiant spektro plėtimo funkcijai 2,2MHz dažnio harmonikos santykinė amplitudė sumažėjo net 10dB.

Toliau atliekama 150kHz–30MHz dažnių diapazono spektro analizė. Analizuojamas Q1 tranzistoriaus santakos mazgas ir stebimas dažnių spektras neprijungus apkrovos. Kaip ir anksčiau, tiriama dviem atvejais (žr. 3.3.4 pav.)

RBW: 100 kHz  
VBW: 30 kHz  
Ref: 110 dBμV

SwT: 299 ms  
Att: 10 dB

M1: 3.8272 MHz, 74.92 dBμV  
M2: 16.3852 MHz, 68.10 dBμV  
M3: 1.6744 MHz, 72.25 dBμV



Center: 15.05000000 MHz 2.99 MHz/DIV Span: 29.9 MHz

PEAK SEARCH

PEAK

NEXT PEAK

NEXT LEFT

NEXT RIGHT

MINIMUM

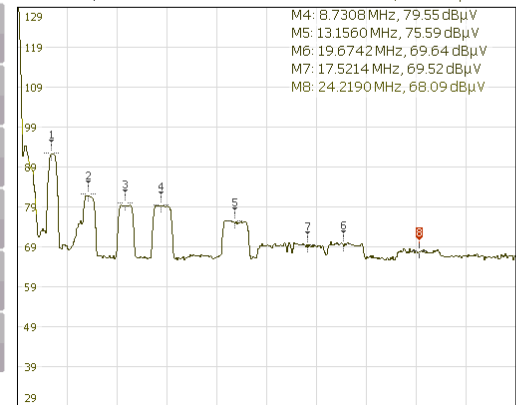
ALL TO PEAK

TM: MAX

RBW: 200 kHz  
VBW: 100 kHz  
Ref: 129 dBμV

SwT: 100 ms  
Att: 30 dB

M1: 2.1528 MHz, 92.53 dBμV  
M2: 4.3654 MHz, 82.16 dBμV  
M3: 6.5780 MHz, 79.93 dBμV



Center: 15.05000000 MHz 2.99 MHz/DIV Span: 29.9 MHz

MARKER

MARKER

8

DISPLAY

On Off

POSITION

24.2190 MHz

DELTA

On Off

SET TO

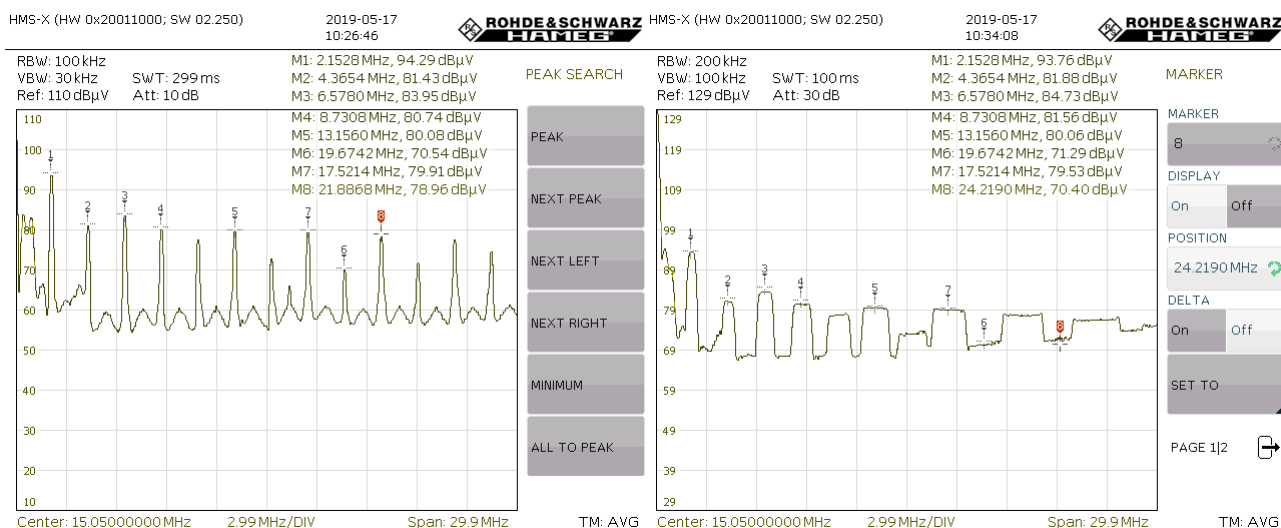
PAGE 1/2

TM: MAX

**3.3.4 pav.** Q1 tranzistoriaus santakos mazgo spektro analizė neįjungtam (kairėje) ir įjungtam DITH režimui (dešinėje)

Iš gautų grafikų matoma, kad spektro plėtimo funkcija išryškina kai kurias spektro harmonikas, bet taip pat padidino jų santykinį dydį. Nenaudojant DITH funkcijos ryškiausios buvo 720kHz, 3,8MHz ir 16,4MHz dažnio harmonikos, kurios atitinkamai siekė 86dB, 75dB ir 68dB ribas. Naudojant DITH funkciją aukščiausios buvo 2,2MHz, 4,4MHz ir 6,6MHz harmonikos.

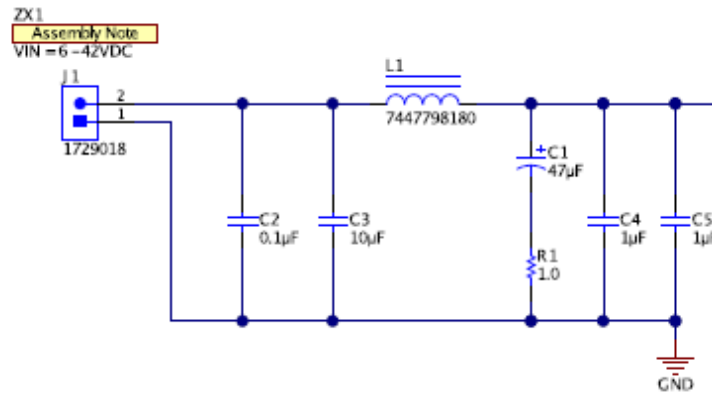
Kitame bandyme keitiklis apkraunamas maksimaliai (išėjimo srovė 5A). Gautieji rezultatai atvaizduojami (3.3.5 pav.)



**3.3.5 pav.** Q1 tranzistoriaus santakos mazgo spektro analizė neįjungtam (kairėje) ir įjungtam DITH režimui (dešinėje) su apkrova

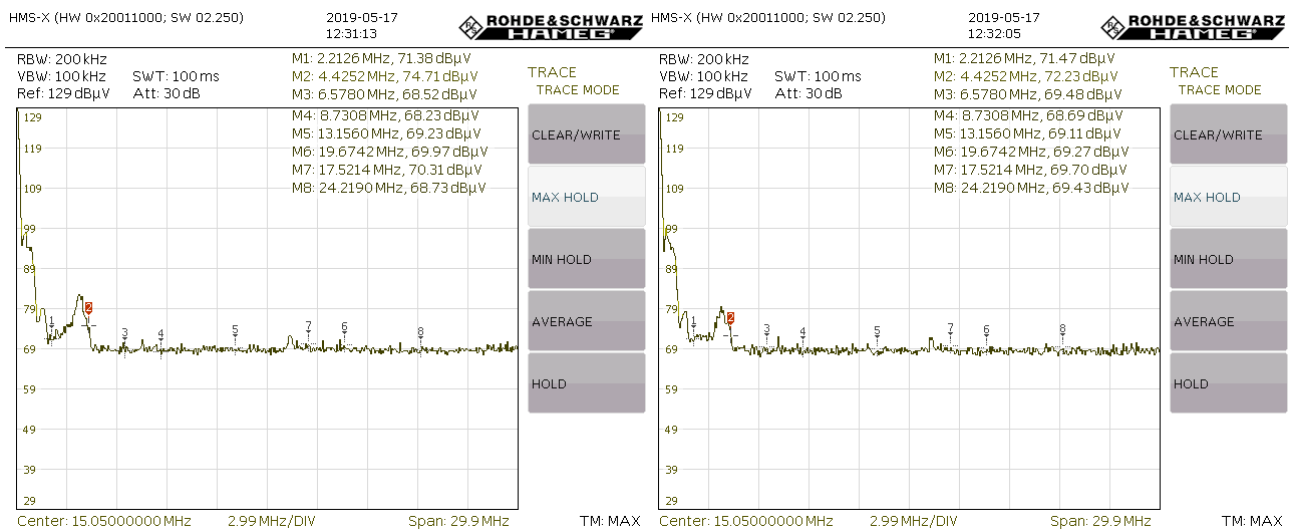
Iš rezultatų matyti, kad, naudojant spektro plėtimo funkciją, visų harmonikų amplitudė sumažėjo, bet padidėjo šių harmonikų plotis. Matoma, kad aukštesnių dažnių harmonikų amplitudės buvo sumažintos daugiau.

Įėjimo grandinėje yra prijungtas filtras sudarytas iš kelių kondensatorių ir induktyvumo ritės. (3.3.6 pav.)



3.3.6 pav. Įtampos keitiklio įėjimo filtras

Buvo tiriama įėjimo filtro efektyvumo priklausomybė nuo apkrovos srovės. Rezultatai pateikti 3.3.7 paveiksle.



3.3.7 pav. Įėjimo įtampos spektro analizė be apkrovos (kairėje) ir su 5A apkrova (dešinėje)

Atlikus įėjimo įtampos spektro analizę matoma, kad naudojant filtrą žymiai sumažėja harmonikų amplitudė. Lyginant 3.3.7 paveiksle pavaizduotus su spektro analizatoriumi gautus vaizdus, matoma, kad apkrovos srovės padidinimas nuo 0A iki 5A, neišryškino jokių papildomų harmonikų. Galima teigti, jog įėjimo grandinėje atsirandantys elektromagnetiniai trikdžiai nepriklauso nuo keitiklio išėjimo grandinės apkrovos srovės.

Nors negalima įvertinti, spektro analizatoriaus gautų matavimų amplitudės, nes nebuvo sukurtos idealios sąlygos elektromagnetinių triukšmų matavimui, galima lyginti pokyčius dėl naudotų režimų ir srovės pokyčių.

## IŠVADOS

1. Literatūros apžvalgos dalis parodo, kad aukšto dažnio maitinimo šaltinių struktūra susideda iš inverterio bei įtampos lygintuvo pakopų bei impedanso suderinimo grandinės. Impedanso suderinimo dalis reikalinga impedanso suderinimui tarp inverterio ir lygintuvo. Pagrindinės rezonansinių aukšto dažnio keitiklių klasės yra E, EF<sub>2</sub> ir DE klasės, kurių inverterių ir įtampos lygintuvų schemos turi savitus privalumus bei trūkumus. Aukšto dažnio maitinimo šaltinių pagrindiniai privalumai tai maži matmenys, ilga tarnavimo trukmė bei patikimumas ir didelis naudingumo koeficientas.
2. Analizuojant aukšto žeminančiųjų įtampos keitiklių veikimą ir trūkumus, nustatyta, kad elektromagnetinių triukšmų kiekį ir naudingumo koeficiento sumažėjimą lemia parazitinis induktyvumas ir talpa. Šie elementai priklauso nuo komponentų išdėstymo, įtaiso korpuso bei spausdinto montažo plokštės takelių išdėstymo.
3. Remiantis naujausiomis technologijomis parinktas *Texas Instruments* aukšto dažnio sinchroninio įtampos keitiklio valdiklis LM5141. Sudarius įtampos keitiklio modelį ir nustačius šio modelio parametrus buvo ištiriamas šio modelio veikimas. Naudojant *Texas Instruments* modeliavimo programą *WEBENCH*®, nustatyta, kad keitiklio naudingumo koeficientas gali siekti net 94 %, o susidarę nuostoliai ir didelės srovės priveda prie tranzistorių šilimo, kurie gali sušilti iki 76 °C.
4. Atlikus keitiklio įėjimo srovės bei tranzistorių valdymo signalų spektro analizę buvo nustatyta, kad didžiausią amplitudę pasiekia 2,2MHz ir 4,4MHz dažnio harmonikos. Šias harmonikas sumažina spektro plėtimo funkcija.
5. Atlikus eksperimentinį įtampos keitiklio tyrimą, nustatyta, kad keitiklio naudingumo koeficientas siekia 91 %. Tiriant keitiklio šilimą termovizoriumi *FLIR E40BX* nustatyta, kad įtampos keitiklyje labiausiai šyla galios tranzistoriai Q1 ir Q2, kurių temperatūra pasiekė 100 °C.
6. Naudojant *ROHDE & SCHWARZ HMS-X* spektro analizatorių ištirta, kad tranzistorių valdymo dažnines harmonikas sumažina spektro plėtimo funkcija (2MHz dažnio harmonika sumažėjo net 10dB), o į įėjimo grandinėje atsirandančius triukšmus efektyviai sumažina įėjimo filtras – beveik visos harmonikos sumažėja ~10dB.

## INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. DIANGUO X., YUESHI G., YIJIE W., WEI W. „Topologies and Control Strategies of Very High Frequency Converters: A Survey” – 2017. Prieiga internete: [http://tpea.cps.org.cn/uploads/soft/170421/1\\_1200278181.pdf](http://tpea.cps.org.cn/uploads/soft/170421/1_1200278181.pdf) – žiūrėta 2018.06.18
2. MADSEN M. „LED Driver Miniaturization - Opening New Opportunities for Solid State Lighting” – 2017. Prieiga internete: <https://www.led-professional.com/resources-1/articles/led-driver-miniaturization-opening-new-opportunities-for-solid-state-lighting> – žiūrėta 2018.06.18
3. MICKEY P. MADSEN, A. KNOTT. MICHAEL A.E. ANDERSEN “Low Power Very High Frequency Switch-Mode Power Supply with 50 V Input and 5 V Output” – 2014. Prieiga internete: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6739180/> – žiūrėta 2018.06.18
4. A. MEDIANO, F. J. ORTEGA-GONZALEZ “ Class-E amplifiers and applications at MF, HF, and VHF” – 2017 m. Prieiga internete: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8058853/> – žiūrėta 2018.06.18
5. Y. ZHOU, Z. ZHANG, XUE-WEN ZOU, Z. DONG AND X. REN. „, A 10-MHz Isolated Class- $\Phi_2$  Synchronous Resonant DC-DC Converter“ – 2016. Prieiga internete: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7467854/> - žiūrėta 2018.06.18
6. MICKEY P. MADSEN, A. KNOTT, MICHAEL A.E. ANDERSEN. „,Very High Frequency Half Bridge DC/DC Converter“ – 2014. Prieiga internete: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6803491/> - žiūrėta 2018.06.18
7. L. GU, W. LIANG, J. R. DAVILA. „,Design of Very-High-Frequency Synchronous Resonant DC-DC Converter for Variable Load Operation“ – 2017. Prieiga internete: <https://www.semanticscholar.org/paper/Design-of-very-high-frequency-synchronous-resonant-Gu-Liang/77b72f2356f7b32bd93b273817991a7584ded655> - žiūrėta 2018.06.18
8. G. YANIK, E. ISEN. „,Quasi-Resonant Full-Wave Zero-Current Switching Buck Converter Design, Simulation and Application“ – 2013. Prieiga internete: <http://dergipark.gov.tr/download/article-file/39750> - žiūrėta 2018.06.18
9. Prieiga internete: [http://web.stanford.edu/class/ee152/projects/f14/danyliw\\_dewing/about.html](http://web.stanford.edu/class/ee152/projects/f14/danyliw_dewing/about.html) – žiūrėta 2018.06.18

10. Prieiga internete: <https://www.apple.com/shop/product/MC461LL/A/apple-60w-magsafe-power-adapter-for-macbook-and-13-inch-macbook-pro>
11. T. Hegarty. „Reduce buck-converter EMI and voltage stress by minimizing inductive parasitics” – 2017. Prieiga internete: <http://www.ti.com/lit/an/slyt682/slyt682.pdf> – žiūrėta 2019.01.25
12. Texas Instruments, „LM5141-Q1 Wide Input Range Synchronous Buck Controller”, Techninis aprašas – 2017. Prieiga internete: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm5141-q1.pdf> – žiūrėta 2019.01.23
13. ALEX J. HANSON, RACHEL S. YANG, SEUNGBUM LIM, DAVID J. PERREAULT. „A Soft-Switched High Frequency Converter for Wide Voltage and Power Ranges” – 2016. Prieiga internete: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7749103> – žiūrėta 2019.04.18
14. J. MILIMONFARED, M. TAHERI, H. MORADISIZKOOHI. „Analysis and Design of Current-Fed High Step Up PWM Controlled Quasi-Resonant DC-DC Converter for Fuel Cell Applications” – 2015. Prieiga internete: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6506748/> – žiūrėta 2019.04.19
15. YAGNESH V. WAGHELA, SUDARSHAN D. SOLANKI. „Switched-Mode Power Supply design guidelines for smartphones and tablets for reducing RF emissions” – 2017. Prieiga internete: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7921502> – žiūrėta 2019.04.15
16. JUAN M. RIVAS, OLIVIA LEITERMANN, YEHUI HAN. „A Very High Frequency dc-dc Converter Based on a Class  $\Phi 2$  Resonant Inverter” – 2008. Prieiga internete: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5703132> – žiūrėta 2019.05.18
17. PENGCHENG XU, ZHIGANG HAN. „One Flyback off Line AC/DC Switching Power Supply Design” – 2014. Prieiga internete: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6931364/> – žiūrėta 2019.05.18
18. HE LIU, YIFU ZHANG, XUE JIANG, SHUANG ZHANG. „Design of Switching Power Supply based on Cadence” – 2018. Prieiga internete: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8298639> – žiūrėta 2019.05.18
19. ROBERTO LANGELLA, ALFREDO TESTA, XU XIAO, SASA DJOKIC. „Performance Comparison of Three Main SMPS Types under Sinusoidal and Distorted Supply Voltage” – 2017. Prieiga internete: [http://tpea.cpss.org.cn/uploads/soft/170421/1\\_1200278181.pdf](http://tpea.cpss.org.cn/uploads/soft/170421/1_1200278181.pdf) – žiūrėta 2019.05.18



20. JIANJING W., SHU-HUNG C. „Impact of Parasitic Elements on the Spurious Triggering Pulse in Synchronous Buck Converter” – 2014. Prieiga internete: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6755463> – žiūrėta 2019.05.18
21. Prieiga internete: <https://www.richtek.com/Design%20Support/Technical%20Document/AN045> – žiūrėta 2019.05.20
22. [https://www.electronics-notes.com/articles/analogue\\_circuits/emc-emi-electromagnetic-interference-compatibility/what-is-emi-basics-tutorial.php](https://www.electronics-notes.com/articles/analogue_circuits/emc-emi-electromagnetic-interference-compatibility/what-is-emi-basics-tutorial.php) Prieiga internete: – žiūrėta 2019.05.20

## 1 priedas. Modeliavimo schemos komponentų sąrašas

Komponentas	Gamintojas	Kiekis	Apibūdinimas
Rt	<i>Yageo</i>	1	Varža: 56.2 k $\Omega$ , paklaida: 1 %, galia: 50 mW.
Cboot	<i>MuRata</i>	1	Talpa: 100 nF, VDC: 6.3 V, ESR: 1 m $\Omega$ .
Cout	<i>TDK</i>	1	Talpa: 100 nF, VDC: 6.3 V, ESR: 1 m $\Omega$ .
Css	<i>MuRata</i>	1	Talpa: 39 nF, VDC: 10 V, ESR: 1 m $\Omega$ .
R2	<i>Vishay</i>	1	Varža: 10.5 $\Omega$ , paklaida: 1 %, galia: 63 mW.
Rsense	<i>Susumu Co Ltd</i>	1	Varža: 9 m $\Omega$ , paklaida: 1 %, galia: 1 W.
Ccomp2	<i>MuRata</i>	1	Talpa: 10 pF, VDC: 25 V, ESR: 0 $\Omega$ .
Rcomp	<i>Yageo</i>	1	Varža: 12.1 k $\Omega$ , paklaida: 1 %, galia: 50 mW.
U1	<i>Texas Instruments</i>	1	
Ccomp1	<i>TDK</i>	1	Talpa: 5.6 nF, VDC: 50 V, ESR: 0 $\Omega$ .
Cin	<i>TDK</i>	3	Talpa: 15 $\mu$ F, VDC: 100 V, ESR: 2.64 m $\Omega$ .
D1	<i>Diodes Inc.</i>	1	Tipas: Šotkio, VRRM: 60 V, Io: 2 A.
Cres	<i>Kemet</i>	1	Talpa: 1 $\mu$ F, VDC: 10 V, ESR: 1 m $\Omega$ .
Cvdd	<i>MuRata</i>	1	Talpa: 470 nF, VDC: 6.3 V, ESR: 1 m $\Omega$ .
R1	<i>Vishay</i>	1	Varža: 10.5 $\Omega$ , paklaida: 1 %, galia: 63 mW.
L1	<i>Wurth Elektronik</i>	1	Induktyvumas: 2 $\mu$ H, DCR: 6.4 m $\Omega$ , IDC: 9 A.
R3	<i>Vishay</i>	1	Varža: 10.5 $\Omega$ , paklaida: 1 %, galia: 63 mW.
M1	<i>Texas Instruments</i>	1	VdsMax: 60 V, IdsMax: 35 A.
Cvcc	<i>MuRata</i>	1	Talpa: 470 nF, VDC: 6.3 V, ESR: 1 m $\Omega$ .
M2	<i>ON Semiconductor</i>	1	VdsMax: 100 V, IdsMax: 8 A.

## 2 priedas. *MATLAB* programinio paketo kodas, spektro analizei atlikti

```
signal = load('SS70_Vsw.txt');

N = length(signal);

fs = 56000000; % samples per second

fnyquist = fs/2; %Nyquist frequency

X_mags = abs(fft(signal));

bin_vals = [0 : N-1];

fax_Hz = bin_vals*fs/N;

N_2 = ceil(N/2);

semilogx(fax_Hz(1:560), 20*log10(X_mags(1:560)))

xlabel('Frequency (Hz)')

ylabel('Power (dB)');

title({'Single-sided Power spectrum' ...

      ' (Frequency in shown on a log scale)'});

axis tight

xlim ([100000 100000000])
```

### 3 priedas. Keitiklio eksperimentinio komplekto LM5141QRGEVM schema

