

Electronics and electrical engineering Elektronika ir elektros inžinerija

NUOSTOLIŲ MINIMIZAVIMAS ĮTAMPOS KEITIKLIUOSE IR HIBRIDINĖS ARCHITEKTŪROS ĮTAMPOS KEITIKLIO PROJEKTAVIMAS

Edgard ALEINIKOV *

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

Gauta 2019 m. lapkričio 5 d.; priimta 2019 m. lapkričio 7 d.

Santrauka. Yra daug skirtingų įtampos keitiklių architektūrų, kurios naudojamos elektroninių įtaisų įtampos šaltinių įtampos pakeisti. Kiekviena architektūra turi savo privalumų ir trūkumų. Hibridinė architektūra yra pranašiausia, nes sujungia kitų architektūrų privalumus. Išanalizavus įtampos keitiklių architektūras ir keitikliuose patiriamus nuostolius, šiame straipsnyje pateikiamas suprojektuotas hibridinės architektūros įtampos keitiklis. Hibridinis sujungimas ir transformatorius leidžia išėjime gauti didesnę įtampą nei kitose architektūrose. Transformatorius minimizuoja keitiklio savikainą, nes tranzistorius, skirtas veikti žemojoje įtampoje, yra gerokai pigesnis. Šis keitiklis iš 5 V įtampos pakeičia į aukštąją 300 V įtampą ir, esant 125 kΩ apkrovai, išėjime gaunama 2,4 mA srovė. Esant tokiai apkrovai, keitiklio naudingumo koeficientas η yra 72 %.

Reikšminiai žodžiai: hibridinės architektūros keitiklis, įtampos keitikliai, nuostoliai keitiklyje, nuostolių minimizavimas.

Įvadas

Šiame straipsnyje nagrinėjami keitikliai, kuriuose įtampa yra aukštinama, keitimas vykdomas magnetiniu lauku. Didelė dalis šiuolaikinių nešiojamųjų įrenginių maitinami 3,6 V arba žemesnėmis įtampomis. Kiekvienas įrenginys atlieka skirtingas funkcijas, kurioms reikalinga aukštesnė įtampa, todėl projektuotojams reikia kuo efektyviau ir pigiau keisti įtampą (DigiKey, 2018). Aukštoji įtampa naudojama, pavyzdžiui, MEMS (mikroelektromechaninių sistemų), Geigerio vamzdžių, (APD) lavininių fotodiodų maitinimui. Įtampos keitikliai yra svarbūs projektuojant įrenginius, todėl projektuotojas turi pats pasirinkti keitiklio architektūrą, kuri atitinka nustatytus reikalavimus bei geriausiai tinka projektuojamam įrenginiui.

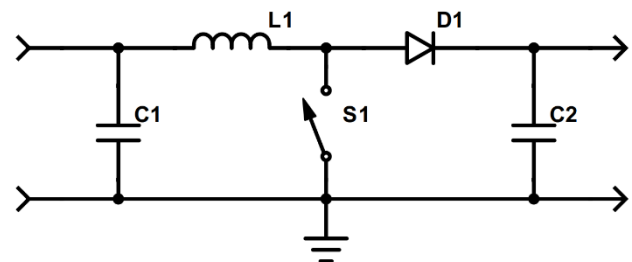
Straipsnyje aptariamos tokios architektūros: aukštinamoji, SEPIC, atgalinės eigos. Pabrėžiami šių architektūrų privalumai ir trūkumai. Ypatingas dėmesys skiriamas retai pasitaikančios aukštinamojo įtampos keitiklio hibridinės architektūros aptarimui ir projektavimui.

Pagrindinis tikslas – išanalizuoti ir suprojektuoti įtampos keitiklį, kuris iš žemosios maitinimo įtampos 5–10 V pakeičia į aukštąją 200–300 V įtampą, patiria kuo mažesnius energijos nuostolius bei yra mažos savikainos. Mūsų atveju tinkamiausias hibridinės architektūros įtampos keitiklis, nes tokiu būdu naudojamas mažesnių matmenų ir

pigusis lauko tranzistorius. Išanalizavus keitiklio sandarą, funkcionavimą ir energijos nuostolius, patiriamus įtampos keitimo metu, pateikiami galimi keitiklio gamybos kainos mažinimo ir efektyvumo užtikrinimo būdai.

1. Aukštinamoji įtampos keitiklio architektūra

Aukštinamoji keitiklio principinė elektrinė schema pavaizduota 1 pav. Pagrindinis šios architektūros privalumas – paprastumas dėl komponentų skaičiaus. Kadangi schema veikia nuolatinės srovės režimu, nereikia papildomų įėjimo įtampos filtrų. Iš architektūros trūkumų verta paminėti didelius naudojamų kondensatorių matmenis ir



1 paveikslas. Aukštinamosios architektūros principinė elektrinė schema

Figure 1. Step-up (boost) architecture circuit diagram

*Autorius susirašinėti. El. paštas edgard.aleinikov@stud.vgtu.lt

tai, jog, esant didesniems dažniams, kondensatoriai praranda savąsias ir įgyja induktyvumo savybes.

Esant labai dideliam įtampos stiprinimui, pasireiškia dar vienas architektūros trūkumas – mažas efektyvumas. Pavyzdžiui, esant 0,7 darbo ciklui, efektyvumas gali būti 60–65 %.

Iš 1 pav. pateiktos principinės schemos matyti, kad keitiklio išėjimas turi tiesioginį ryšį su įėjimu (A. Obraztsov ir S. Obraztsov, 2005), o architektūros, kuriose įėjimas nuo išėjimo yra atskirti, – pranašesnės.

2. Atgalinės eigos įtampos keitiklio architektūra

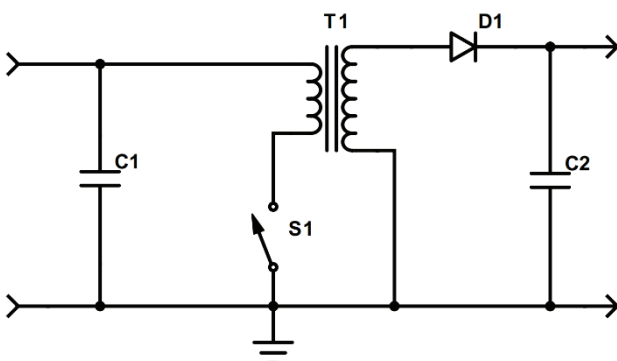
Atgalinės eigos keitiklio architektūra, pavaizduota 2 paveiksle, išsiskiria tuo, kad yra naudojamas transformatorius, kuris padeda atskirti išėjimo ir įėjimo grandines. Priklausomai nuo transformacijos koeficiento, transformatorius gali aukštinti arba žeminti įtampą keitiklyje. Esant kelioms antrinėms apvijoms, galima prijungti skirtingas apkrovas. Ši architektūra puikiai tinka mažos galios elektronikos įrenginių maitinimui. Pagrindinis privalumas – įėjimo įtampa gali būti tiek kintamoji, tiek nuolatinė.

Iš 2 paveikslo matome, kad architektūroje yra mažas komponentų skaičius, tai savo ruožtu užtikrina schemos paprastumą. Pagrindinis architektūros trūkumas tas, kad, netinkamai parinkus transformatorių, galima gauti ganėtinai didelius energijos nuostolius. Tipinis tokios architektūros keitiklio efektyvumas yra 75–80 %.

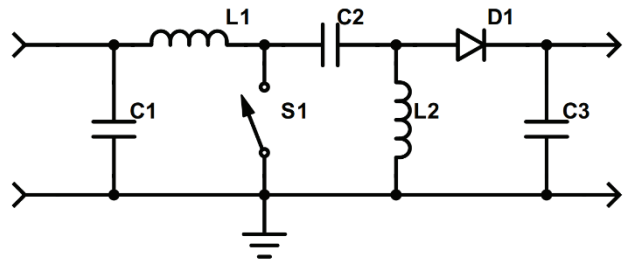
3. SEPIC įtampos keitiklio architektūra

SEPIC architektūra yra universali – sugeba ne tik didinti įtampą, bet ir mažinti (Ioffe, 2008). Išskirtinis bruožas tas, kad išėjimo įtampa neinvertuojama. Iš 3 paveiksle pateiktos schemos matyti, kad įėjimas ir išėjimas yra atskirti kondensatoriumi, kuris išėjimą izoliuoja nuo įėjimo.

Pagrindiniai šios architektūros trūkumai yra dėl kondensatoriaus C_2 atliekamos funkcijos. Kadangi visa energija perduodama tarp išėjimo ir įėjimo prijungtu kondensatoriumi C_2 , turi būti atitinkamai parinkta talpa, veikimo įtampa ir darbo dažnis.



2 paveikslas. Atgalinės eigos architektūros principinė elektrinė schema
Figure 2. Flyback architecture circuit diagram



3 paveikslas. SEPIC architektūros principinė elektrinė schema
Figure 3. SEPIC architecture circuit diagram

4. Hibridinė įtampos keitiklio architektūra

4 paveiksle pavaizduota architektūra vadinama hibridine, nes, atidžiai pažvelgę į 1 ir 2 paveikslius, pamatysime, kad jas sujungę gausime hibridinę schemą. Panaudojus žemesnės įtampos lauko tranzistorius, hibridinis sujungimas padidina išėjimo įtampas, palyginti su kitomis architektūromis.

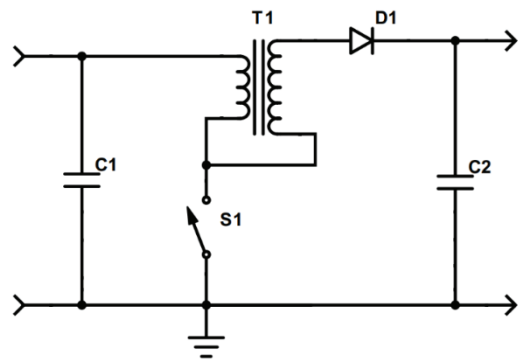
Dėl hibridinio sujungimo, kai pirminė ir antrinė transformatoriaus apvijos yra sujungtos nuosekliai, gaunama didesnė išėjimo įtampa naudojant žemesnės įtampos lauko tranzistorius. Panaudojus transformatorių sumažinama impulsų skvarba ir padidinamas aukštinamojo įtampos keitiklio efektyvumas. Kitame skyriuje apžvelgsime hibridinės architektūros įtampos keitiklio nuostolių mažinimo būdus.

5. Nuostoliai hibridinėje architektūroje

Hibridinėje architektūroje pagrindiniai nuostoliai gaunami transformatoriuje, tranzistoriuje ir diode (Mashakov, 2005). Įtampos keitiklio efektyvumo sumažėjimą dėl aktyviosios varžos galime išreikšti (1) formule:

$$\frac{E_R}{E_R + E_{perd}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

čia E_{perd} – vieno impulso metu perduodamos energijos kiekis; E_R – energijos nuostoliai dėl aktyviosios varžos.



4 paveikslas. Hibridinės architektūros principinė elektrinė schema
Figure 4. Hybrid architecture circuit diagram

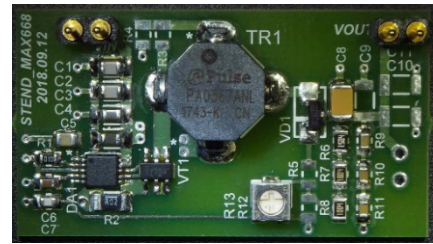
Nuostoliai dėl transformatoriaus nuotėkio induktyvumo minimizuojami mažinant transformatoriaus nuotėkio induktyvumo dydį. Jis mažinamas minimizuojant vijų skaičių, tarpus tarp apvijų sluoksnių, apvijų sluoksnių skaičių (Rumatowski, 2002) ir naudojant storesnį laidą apvijoms. Didėjant dažniui vyksta paviršinis efektas, o tai irgi sukelia nemažus nuostolius schemeje. Paviršinio efekto nuostoliams mažinti vietoje vieno laido vijos yra vnyojamos keliais laidininkais. Verta paminėti ir nuostolius, kurie patiriami transformatoriaus šerdyje. Šie nuostoliai priklauso nuo panaudotos medžiagos ir šerdies konstrukcijos. Šiluminiai nuostoliai šerdyje vyksta dėl atsirandančių sūkurinių srovių. Pirminės apvijos sukuriama magnetinis laukas ne iki galo perduodamas į antrinę apviją. Nepatekusi į antrinę apviją magnetinio srauto dalis sukuria sūkurines sroves šalia esančiuose laidžiuose objektuose. Taip pat transformatoriuje pasireiškia ir nuostoliai dėl histerezės reiškinio. Šią energijos dalį galima koreguoti keičiant šerdies medžiagą (toku būdu keičiamas histerezės lygis). Taigi, norint sumažinti energijos nuostolius transformatoriuje, naudojama geresnių savybių medžiaga šerdies gamybai, be to, šerdį stengiamasi sudaryti iš kelių (keliolikos) plonų dalių (Savelov, 2015). Taip mažinama sūkurinių srovių įtaką ir mažinami šiluminiai nuostoliai šerdyje. Šiuo metu naujų transformatorių šerdims gaminti plačiai imama naudoti amorfinį plieną vietoje standartinio plieno lydinio (Bashir-U-Din, 2018). Su tokia konstrukcija nuostoliai gaunami iki 80 % mažesni.

Esant aukštiesiems dažniams lauko tranzistoriuose dėl atviro kanalo varžos gaunami labai maži nuostoliai. Šios varžos įtaka pasireiškia tranzistoriuose, veikiančiuose esant aukštajai įtampai ($U_{IS} > 250\text{--}300\text{ V}$). Nuostolius tranzistoriuje taip pat lemia ir parazitinės talpos (tarp elektrodų) bei tarp ištakos ir santakos esantis diodas. Taigi tranzistoriaus įjungimo ir išjungimo trukmę lemia procesai, kurių metu įkraunamos ir iškraunamos parazitinės talpos bei atsikuria vidinis diodas.

Esant žemosioms išėjimo įtampoms, racionalu naudoti Šotkio diodus, nes jų pn sandūros įtampos kritimas yra mažiausias (DigiKey, 2018). Kai yra aukštosios išėjimo įtampos, naudojami diodai, kurių greitaveika yra didesnė nei Šotkio diodų. Nuostoliai diode atsiranda dėl tekančios tiesioginės arba atgalinės srovės. Diodo nuostoliams mažinti būtina laikytis taisyklės ir parinkti diodą su 50 % įtampos dydžio atsarga. Aukštosios išėjimo įtampos keitikliuose kiekvieno darbo ciklo pradžioje diodas turi spėti visiškai užsidaryti, nes priešingu atveju dėl transformacijos koeficiento dydžio diode atsiranda didelė srovė, dėl kurios diodas kais ir susidarys dideli energijos nuostoliai. Taigi verta atitinkamai parinkti diodą, atsižvelgiant į maksimalią diodo įtampą ir jo greitaveiką.

6. Suprojektuotas įtampos keitiklis

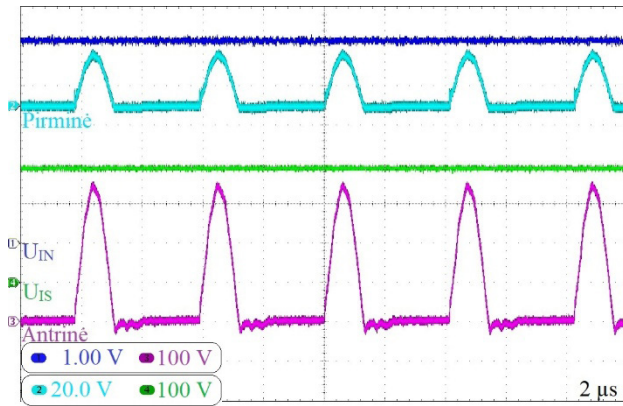
Išanalizavus nuostolius hibridiniame įtampos keitiklyje, buvo suprojektuota ir pagaminta spausdintinė plokštė (5 pav.) pagal 7 paveikslą principinę elektrinę schemą.



5 paveikslas. Hibridinės architektūros įtampos konverteris
Figure 5. Hybrid architecture DC-DC converter

Ši schema grindžiama hibridinės architektūros principu, t. y. dėl hibridinio jungimo (antrinė transformatoriaus apvija sujungiama su pirmine apvija) gauname, kad išėjimo įtampa susideda iš įtampų ant pirminės ir antrinės apvijų (standartinėje architektūroje išėjimo įtampa lygi tik antrinės apvijos įtampai). Taigi dėl tokio specifinio sujungimo suprojektuoto keitiklio išėjime gaunama didesnė išėjimo įtampa, panaudojus žemesnės įtampos lauko tranzistorių VT_1 . Keitiklio maksimali išėjimo įtampa yra apribojama transformatoriaus apvijų santykiu bei diodo ir tranzistoriaus parametrais. Tranzistorius valdomas DA_1 valdikliu. Valdiklio formuojamų impulsų dažnis gali būti reguliuojamas keičiant rezistoriaus R_1 varžą. Mūsų atveju gaunamas apie 250 kHz dažnis. Dažnį galima mažinti padidinus R_1 varžą. Kondensatoriai $C_1\text{--}C_4$ skirti įėjimo įtampai stabilizuoti, o C_5 talpa užtikrina vidinių valdiklio grandinių maitinimo stabilumą. C_7 kondensatorius skirtas grįžtamojo ryšio kontūro kompensacijai (koreguoja ESR nulinį tašką). Kondensatoriai $C_8\text{--}C_{11}$ užtikrina išėjimo įtampos stabilumą, parenkant šiuos kondensatorius būtina atkreipti dėmesį į maksimalią leidžiamąją veikimo įtampą. Rezistorius R_2 apriboja srovę paleidžiant keitiklį, kad nebūtų viršytas maksimalus išėjimo įtampos dydis. Šiame keitiklyje panaudotas dvigubas diodas (du diodai viename korpuse, sujungti nuosekliai). Dėl tokio sujungimo gaunama didesnė leidžiamoji įtampa bei yra papildomai sutaupoma perkant pigesnę dvigubą diodą vietoj brangesnio viengubo, skirto veikti esant aukštajai įtampai. Kintamosios varžos rezistorius R_{13} yra įtampos daliklio dalis. Dėl šio įtampos daliklio galima reguliuoti išėjimo įtampos dydį. Didinant R_{13} varžą išėjimo įtampa mažėja ir atvirkščiai. TR_1 transformatoriaus pirminių ir antrinių apvijų santykis yra 1:12. Dėl didelio transformacijos koeficiento 300 V išėjimo įtampa gaunama turint vos 25–30 V įtampą pirminėje apvijoje.

Suprojektuoto hibridinės architektūros įtampos keitiklio įėjimo bei išėjimo įtampų oscilogramos pateikiamos 6 paveiksle kartu su pirminės ir antrinės apvijų impulsų oscilogramomis. Mėlyna kreivė atvaizduoja aukštinamojo keitiklio 5 V maitinimo įtampą, o žalia kreivė – keitiklio išėjime gaunamą apytiksliai 300 V aukštą nuolatinę įtampą. Esant 5 V maitinimo įtampai, hibridinės architektūros keitiklio transformatoriaus apvijose gaunami atitinkamų amplitudžių impulsai. Žydra kreivė parodo pirminėje apvijoje formuojamus 28,4 V impulsus. Violetinė kreivė parodo antrinėje apvijoje gaunamus impulsus, kurių įtampa



6 paveikslas. Hibridinės architektūros keitiklio oscilogramos
Figure 6. Hybrid architecture DC-DC converter oscillograms

yra 306 V. Tokiu būdu gaunama apytiksliai 300 V aukštoji nuolatinė išėjimo įtampa. Taip pat iš 6 paveiklė pateiktų rodmenų matome, jog impulsų dažnis yra lygus 250 kHz. Tokiu būdu panaudojamas žemosios įtampos lauko tranzistorius ir sumažinamos išlaidos komponentams. Suprojektavus įtampos keitiklį buvo atliktas tyrimas. Esant 5 V maitinimo įtampai (U_{IN}) ir 300 V išėjimo įtampai (U_{IS}) buvo keičiama apkrovos varža (R_a) ir stebimi įėjimo (I_{IN}) ir išėjimo (I_{IS}) srovių pokyčiai. Pasinaudojus (2) išraiška pagal gautus duomenis buvo apskaičiuoti naudingumo koeficientų dydžiai.

$$\eta = \frac{P_{IS}}{P_{IN}} \cdot 100\% = \frac{U_{IS} \cdot I_{IS}}{U_{IN} \cdot I_{IN}} \cdot 100\% \quad (2)$$

1 lentelėje pateikiamos naudingumo koeficiento ir išėjimo galios priklausomybės nuo apkrovos dydžio. Esant mažesnei nei 125 kΩ apkrovos varžai, išėjimo įtampa pradeda mažėti, tad mažesnės apkrovos varžos nebuvo vertinamos. Iš lentelėje esančių duomenų matome, kad įtampos keitiklio apkrovos diapazonas yra nuo 125 kΩ varžos ir didėja.

Taip pat pastebime, jog, įtampos keitikliui dirbant tuščiosios veikos režimu, labai mažai suvartojama energijos. Naudingumo koeficiento vertės gaunamos didžiausias,

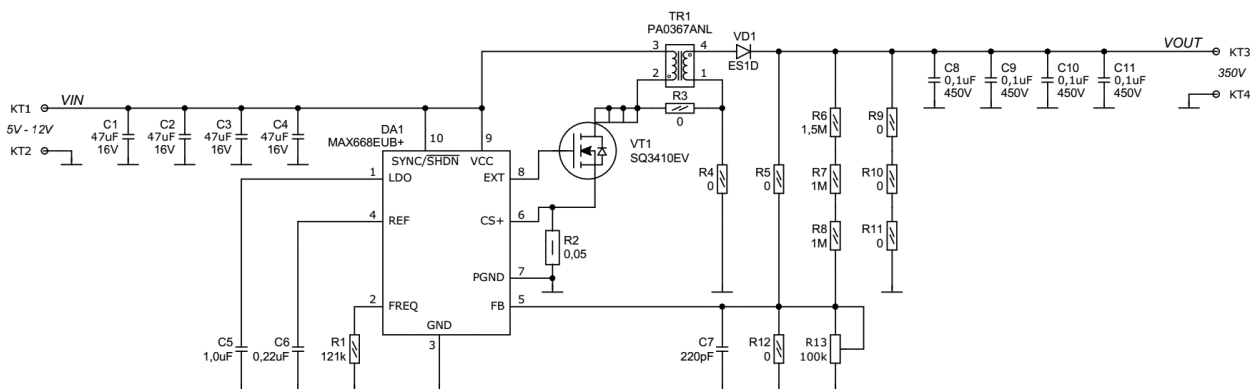
1 lentelė. Bandymų rezultatai
Table 1. Test results

R_a , kΩ	I_{IN} , A	I_{IS} , mA	P_{IS} , W	η , %
∞	0,01	0	0	0
500	0,05	0,6	0,72	72
320	0,1	0,9	0,27	54
125	0,2	2,4	0,72	72

esant minimaliai ir maksimaliai apkrovoms. Taigi dėl hibridinės architektūros gautas 72 % naudingumo ir mažos savikainos įtampos keitiklis, kurio išėjime gaunama 300 V nuolatinė įtampa ir yra galima maksimali 2,4 mA srovė.

Išvados

1. Suprojektuoto įtampos keitiklio nuostolius minimizuoja aukštinamasis transformatorius, nes dėl didelio transformacijos koeficiento naudojamas lauko tranzistorius, skirtas darbui esant žemosioms įtampoms.
2. Energijos nuostoliai mažinami parenkant lauko tranzistorių, kurio atviro kanalo varža ($0,0175 \Omega$) yra mažesnė nei kitų esamų analogų ($0,022 \Omega$).
3. Pagrindinis pagaminto įtampos konverterio privalumas yra dėl hibridinės architektūros. Suprojektuotas keitiklis pakelia įtampą nuo 5 V iki 300 V.
4. Šilumos nuostoliai diode yra minimizuoti nuosekliaju dviejų identiškių sparčiųjų diodų jungimu, kurių atsistatymo trukmė – 50 ns.
5. Panaudojus aukštinamąjį transformatorių, žemosios įtampos lauko tranzistorių bei dvigubą diodą, ne tik minimizuojami patiriami nuostoliai, bet ir sumažinama projektuojamo įtampos keitiklio savikaina.
6. Transformatoriuje patiriami nuostoliai gali būti minimizuojami atitinkamai parenkant transformatoriaus konstrukciją, parametrus ir medžiagą. Mūsų pagaminto įtaiso atveju pasirinktas aukštinamasis transformatorius su ganėtinai mažu nuotėkio induktyvumu, kurio maksimali vertė yra 750 mH.



7 paveikslas. Hibridinės architektūros įtampos konverterio principinė elektrinė schema
Figure 7. Hybrid architecture DC-DC converter circuit diagram

Literatūra

- Bashir-U-Din, A. (2018). *Characterisation of amorphous metal materials for high-frequency high-power-density transformer*. Paper presented at the 2018 26th International Conference on Systems Engineering (ICSEng). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/ICSENG.2018.8638251>
- DigiKey. (2018). *Generating a high DC output voltage from a low input supply*. <https://www.digikey.com/en/articles/tech-zone/2018/jan/generating-a-high-dc-output-voltage-from-a-low-input-supply>
- Ioffe, D. (2008). Razrabotka preobrazovatelya SEPIC [Development of the SEPIC converter]. *Components and Technologies*, 9, 125–128.
- Mashakov, M. (2005). *Obratnokhodovoy preobrazovatel'* [Flyback converter]. Moskva.
- Obraztsov, A., & Obraztsov, S. (2005). Skhemotekhnika DC/DC preobrazovately [DC/DC converters]. *Modern Electronics*, 3, 36–43.
- Rumatowski, K. (2002). *Straty mocy w uzwojeniach transformatorów zasilaczy impulsowych*. Poznań.
- Savelov, A. (2015). *Raschet impul'snykh istochnikov pitaniya ustroystv avioniki* [Calculation of pulsed power sources used in avionics]. Moskva.

MINIMIZING LOSS IN VOLTAGE CONVERTERS AND DESIGNING A VOLTAGE CONVERTER BASED ON A HYBRID ARCHITECTURE

E. Aleinikov

Abstract

There are several different architectures of voltage converters, that are widely used to change the source voltage of an electronic device. Each architecture has its advantages and disadvantages. The hybrid architecture has the major advantage because of the hybrid interconnection of two other architectures. After analyzing the different architectures and energy losses in converters we designed a hybrid architecture voltage converter and provided several solutions for increasing the efficiency of this voltage converter and reducing the cost of production.

Keywords: DC-DC voltage converters, energy losses in converters, hybrid architecture converter, minimizing energy losses in converters.