VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZIKOS FAKULTETAS
KIETOJO KŪNO ELEKTRONIKOS KATEDRA

Reguliuojamas aukštos įtampos šaltinis

Bakalauro studijų baigiamasis darbas

Telekomunikacijų fizikos ir elektronikos studijų programa

Studentas	Deividas Kimsa
Recenzentas	doc. Vytautas Jonkus
Darbo vadovas	doc. dr. Mindaugas Viliūnas
Katedros vedėjas	prof. Kęstutis Arlauskas

Vilnius 2016

Turinys

Įvadas 3
Teorija (keitikliai) 4
Keitiklio pasirinkimas 13
Principinė schema 14
Prietaiso veikimas 15
Rezultatai 25
Išvados 26
Summary 27
Literatūra 28

Įvadas

Tobulėjant technologijoms ir atsirandant naujoms medžiagoms reikalingi tyrinėjimai. Išsamiems tyrimams reikalingos skirtingos išėjimo įtampos, pavyzdžiui, dirbant su didelių varžų medžiagomis, dažnai prireikia aukštos įtampos specifinės formos signalų, taip pat didelės ir aukštos įtampos reikia puslaidininkinių prietaisų tyrimams. Įprasti generatoriai, stiprintuvai ir charakteriografai paprastai apsiriboja 200V eilės išėjimo įtampa, o jos dažnai neužtenka atlikti matavimams. Norint gauti skirtingas išėjimo įtampas, reikalingas aukštos įtampos stiprintuvas, maitinamas reguliuojamos aukštos įtampos šaltinio. Deja, kol kas pasaulyje tokie prietaisai yra tik neseniai pradėti gaminti, jų yra mažai ir jie yra labai brangūs. 1 paveiksliuke pateiktas didžiausio pasaulyje tokių stiprintuvų gamintojo Matsusada Precision Inc siūlomų High-end stiprintuvų sąrašas. Pagrindiniai tokių stiprintuvų parametrai yra didžiausia išėjimo įtampa, srovė, galia, signalo augimo greitis arba/ir dažnių diapazonas, triukšmų įtampa, netiesiškumas, nulio poslinkis ir jo dreifas.

Mes irgi sumanėme pagaminti aukštos įtampos stiprintuvą, kurio išėjimo įtampa siektų 3kV, o signalo augimo greitis išėjime būtų 100 V/us eilės. Mano darbas buvo pagaminti vieną to prietaiso komponentą- izoliuotą reguliuojamos įtampos šaltinį, skirtą stiprintuvo maitinimui.

More than ±30kV models are available. Please refer to our sales office.

Output Voltage	Output Current		MODEL	Slew Rate	Frequency Response(−3db)*1	
	DC and below AC 10Hz	over AC 10Hz and square waveform			Full scale *2	Small bandwidth (10% of full scale)
−600V to +600Vdc	±2000mAmax or ±2000mApk	2000mArms max and 4000mApk 1mS max	AMP-0.6B2000	≧ 300V / μs	DC to 40kHz	DC to 60kHz
−1kV to +1kVdc	±1200mAmax or ±1200mApk	1200mArms max and 2400mApk 1mS max	AMP-1B1200		DC to 30kHz	DC to 50kHz
−2kV to +2kVdc	±200mAmax or ±200mApk	200mArms max and 400mApk 1mS max	AMP-2B200	≧ 700V / μs	DC to 20kHz	DC to 50kHz
−5kV to +5kVdc	±80mAmax or ±80mApk	80mArms max and 160mApk 1mS max	AMP-5B80		DC to 10kHz	DC to 30kHz
−10kV to +10kVdc	±10mAmax or ±10mApk	10mArms max and 30mApk 1mS max	AMP-10B10		DC to 7kHz	DC to 25kHz
	±40mAmax or ±40mApk	40mArms max and 120mApk 1mS max	AMP-10B40			
−20kV to +20kVdc	±20mAmax or ±20mApk	20mArms max and 60mApk 1mS max	AMP-20B20		DC to 4kHz	DC to 20kHz
−30kV to +30kVdc	±10mAmax or ±10mApk	10mArms max and 30mApk 1mS max	AMP-30B10	≧ 360V / μs	DC to 1kHz	DC to 5kHz

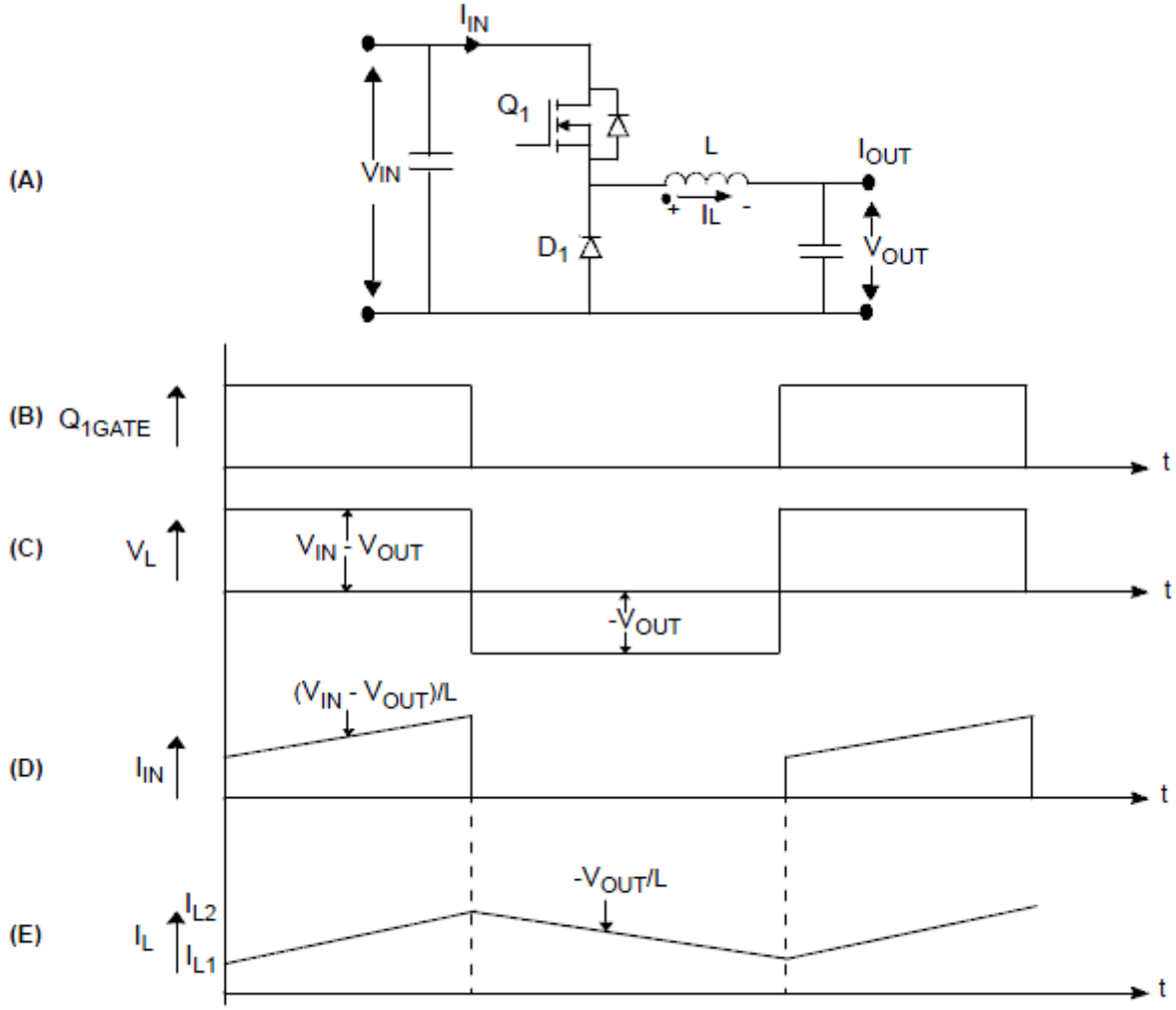
1pav. „AMP“ serijos gaminami stiprintuvai[1]

Taigi, darbo tikslas – suprojektuoti ir pagaminti reguliuojamą aukštos įtampos šaltinį, kurio išėjimo įtampą būtų galima pasirinkti viename iš šių diapazonų: -1.5...+1.5 kV, 0..3 kV, 0..-3 kV. Šaltinio išėjimo galia turėtų būti iki 60W, o išėjimo įtampos pulsacijos - neviršytų 0,1V pačiomis blogiausiomis sąlygomis.

Teorija

Buck(žeminantis) keitiklis

Buck tipo keitiklio išėjimo vidutinė įtampa yra visada žemesnė už įėjimo. Principinė keitiklio schema ir įtampų, ir laikinės srovių priklausomybės parodytas 2 paveiksle. Buck keitiklyje jungiklis (Q1), yra jungiamas nuosekliai įtampos šaltiniui. Šis įtampos šaltinis V_{IN} maitina išėjimą per jungiklį ir žemų dažnių filtrą, sudarytą iš kondensatoriaus ir ritės.



2 pav. Buck keitiklio schema, bei laikinės įtampų ir srovių priklausomybės, dirbant nenutrūkstančios srovės veika [3]

Tuomet, kai raktas yra atidarytas – T_{ON}, įėjimo srovė per ritę teka į keitiklio išėjimą. Įtampa ritėje tuomet lygi V_{IN}(įėjimo įtampa) ir V_{out} (išėjimo įtampa) skirtumui. Tokia įtampa pavaizduota 2 (C) paveiksle. Todėl tokios įtampos poveikio ritės srovė I_L auga tiesiškai nuo I_{L1} iki I_{L2} kaip matoma 2 (E) paveiksle. Augimo sparta išreiškiama sąryšiu [4]:

$$L\frac{di}{dt} = (V_{IN} - V_{OUT}) \qquad (1)$$

Tada, kai raktas uždaromas, dėl ritėje sutelktos energijos, ritės srovė toliau teka ta pačia kryptimi. Kadangi raktas yra uždarytas, srovė teka per diodą D_1. Tuo metu įtampa ritėje yra atvirkščio poliškumo 2(C) pav. Per laiką T_{OFF} ritės srovė sumažėja nuo I_{L2} iki I_{L1} 2(E) pav.

Jei ritės srovė per visą persijungimo periodą T_S nepasiekia nulio, tuomet toks veikimo principas vadinamas nenutrūkstamu. Nenutrūkstamo veikos įėjimo ir išėjimo įtampų sąryšis:

$$V_{OUT} = D \cdot V_{IN} \qquad (2)$$

Kur D yra užpildos koeficientas:

$$D = \frac{T_{ON}}{T_S} \qquad (3)$$

Čia T_S – persijungimo periodas.

Kai išėjimo ir įėjimo įtampų santykis mažesnis nei 0.1, patariama naudoti dviejų lygmenų buck konverterį [3]. Reikia pabrėžti, kad toks keitiklis gali dirbti ir nutrūkstamu, ir nenutrūkstamu veikimu, tačiau, nepriklausomai nuo to, įėjimo srovė visuomet yra impulsinė, kaip parodyta 2(D) paveiksle, dėl to kyla dideli elektromagnetiniai trikdžiai. Jų atsiradimą dar lemia didžiulis įtampos kitimas dU_L/dt perjungimo metu, įtampai V_L pakeičiant kryptį.

Kuriant buck tipo keitiklį visuomet iškyla klausimas, kokio nominalo ritę ir kondensatorių naudoti. Pasirinkus didesnio induktyvumo ritę, gaunamos mažesnės srovės pulsacijos išėjimo kondensatoriuje, bet tokioje ritėje būna daugiau vijų, todėl didėja nuostoliai. Dar, naudojant didelio induktyvumo ritę, ilgiau užtruks keitiklio prisitaikymas prie pakitusios įėjimo įtampos ar apkrovos. Mažesnis induktyvumas padidina srovės pulsacijas, bet leidžia sparčiau prisitaikyti prie pakitusios apkrovos ar įėjimo įtampos. Dėl mažesnių pulsacijų ir nenorint prarasti naudingumo koeficiento, patariama naudoti žemos ekvivalentinės varžos išėjimo kondensatorius.

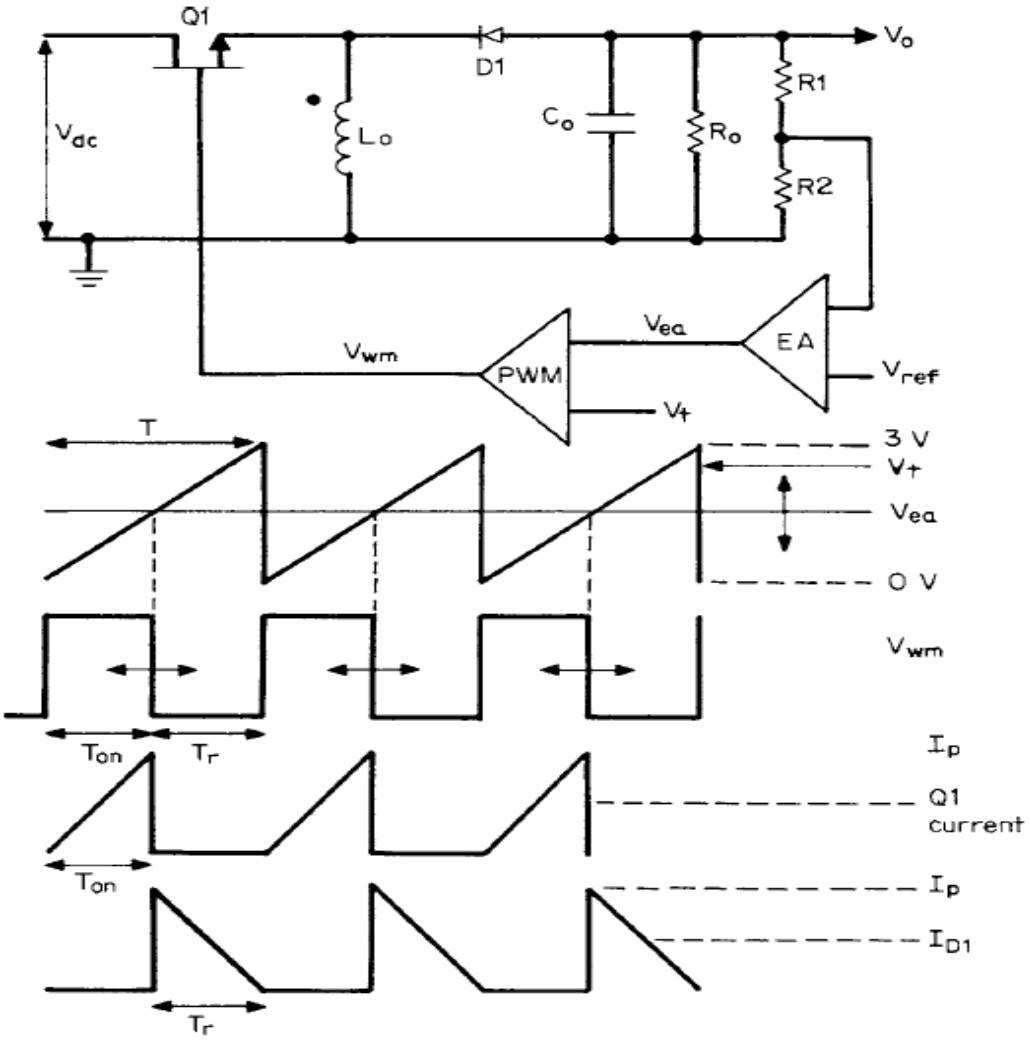
Buck keitiklis turi kelis fizikos dėsnių lemtus trūkumus [5]:

1. Norint palaikyti keičiama išėjimo įtampą, įėjimo įtampa visuomet yra 1-2 V didesnė už išėjimo. Tokį patį reikalavimą turi tiesinis keitiklis.
2. Kai raktas atsidaro, per diodą dar teka ritės srovė. Diodui užsidaryti reikia laiko, vadinamu diodo atgalinės varžos atsistatymo trukme T_{rt}. Kol diodas dar užsidarinėja, srovė tekės tiesiogiai į žemę per diodą D1 ir raktą Q1. Tai yra trumpalaikis trumpas jungimas tarp žemės ir maitinimo šaltinio, todėl diode ir jungiklyje išsiskiria didelė galia. Norint sumažinti šį efektą, reikia naudoti diodą su kuo trumpesniu atsistatymo laiku.
3. Dėl per didelės srovės, rakto Q1 funkciją atliekantis tranzistorius gali susigadinti. Tuomet įėjimo įtampa tiesiai sujungiama su išėjimo, kurio dėka gali sugesti apkrovos grandinė. Norint to išvengti, reikia išėjime panaudoti viršįtampio apsaugos grandinę, ir saugiklį įėjimo grandinėje. Viršįtampių apsaugos grandinė, viršijus leistina įtampos ribą, pakreipia srovę tiesiai į žemę, todėl suveikia saugiklis ir apsaugoma apkrovos grandinė. Tačiau

praktikoje ši apsauga gali sudirbti ir dėl per daug lėto keitiklio sureagavimo į apkrovos dingimą, pasireiškiančiu žymiu įtampos šuoliu keitiklio išėjime.

Buck-Boost keiklis

Buck-boost arba dar vadinamo invertuojančio boost keitiklio schema ir laikinės įtampų ir srovių priklausomybės parodytos 3 paveiksle. Jis veikia panašiai, kaip prieš tai aprašytas boost keitiklis, energija sukaupiama ritėje tuo metu, kol raktas Q1 yra įjungtas (T_{on}). Kai raktas uždarytas, (T_r,) ritė perduoda energiją apkrovai ir išėjimo kondensatoriui. Lyginant boost (2 pav.) keitiklį su invertuojančio boost tipo keitikliu (3 pav), matosi, kad jungiklis sukeistas vietomis su induktyvine rite. Tuomet, kai raktas atidaromas, įtampa diode D1 yra užtvarinės krypties, todėl srovė nebeteka. Per laiką T_{on} įėjimo įtampa veiks ritę ir srovė toliau augs tiesiškai su sparta $di/dt = V_{dc}/L_0$[4].



3 pav. Buck-boost keitiklio schema, bei laikinės įtampų ir srovių priklausomybės[4]

Baigiantis T_{on}, srovė ritėje taps $I_p=V_{dc}T_{on}/L_0$, o sukaupta energija:

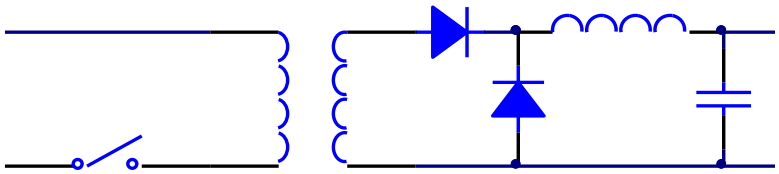
$$E = 0{,}5L_0I_p^2 \quad (7)$$

Kuomet raktas yra uždaromas, įtampos poliškumas ritėje keičiasi dėl ritės savybės išlaikyti pastovią srovę. Todėl tuoj pat po jungiklio išsijungimo, srovė I_p (kuri tekėjo per Q1 prieš jam išsijungiant) teka iš išėjimo (ir išėjimo kondensatoriaus C_0) per diodą D1. Taip kondensatorius įelektrinamas neigiamai žemės atžvilgiu. Per R1, R2 įtampos daliklį matuojama išėjimo įtampa, ir pagal ją keičiama T_{on} trukmė. Jeigu visa ritėje gauta energija perduodama apkrovai priešais atsidarant raktui, šitoks veikimas vadinamas pertraukiamu, o išėjimo galia:

$$P_{\mathbf{out}} = \frac{0,5L_0I_p^2}{T} \quad (8)$$

Tiesioginis keitiklis

Izoliuojančio keitiklio atveju yra būtinas skiriamasis transformatorius. Jei transformatorius naudojamas tik galvaniniam atskyrimui, tuomet mes turime taip vadinamą tiesioginį (**direct** type, jų yra kelios modifikacijos) keitiklį:

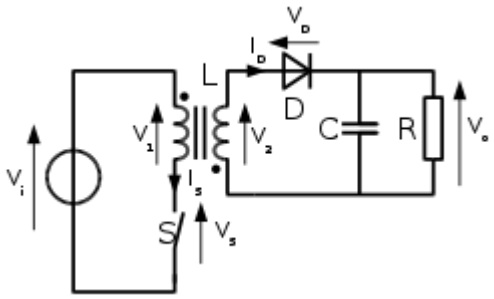


4 pav. Supaprastina tiesioginio tipo keitiklio schema

Akivaizdu, kad visa dešinioji šio keitiklio pusė yra buck keitiklio grandinė be rakto, o buck keitiklio raktas yra pakeičiamas raktu, transformatorium ir vienu diodu antrinėje transformatoriaus grandinėje. Reikia atkreipti dėmesį į transformatoriaus vijų kryptis, žymimas taškais - šioje grandinėje transformatorius pajungtas taip, kad, esant įjungtam raktui, antrinės transformatoriaus grandinės srovė per diodą maitina buck tipo grandinę. Tokio keitiklio išėjimo įtampa, priklausomai nuo transformatoriaus transformacijos koeficiento K_t=*antrinės_apvijos_vijų_skaičius/ pirminės_apvijos_vijų_skaičius*, gali kisti nuo 0V iki K_t*U_{in}. Dar verta pažymėti, jog šios grandinės elementai yra laikomi idealiais, taigi laikoma, kad transformatoriuje induktyvinė energija nekaupiama (tą atvejį atitiktų transformatorius su begalinio induktyvumo apvijomis); realybėje reikalingos specialios grandinės, grąžinančios transformatoriuje rakto įjungimo metu sukauptą energiją maitinimo šaltiniui. Egzistuoja kelios šio keitiklio modifikacijos. Vientakčiu atveju, priklausomai nuo energijos, sukauptos transformatoriuje, grąžinimo būdo, turime papildomos apvijos arba papildomo raktinio tranzistorius modifikacijas, o dvitakčiu atveju turime pusės arba pilno tilto modifikacijas, kuriose transformatoriaus energijos grąžinimo problemą jau sprendžia dvitaktis lygintuvas antrinėje apvijoje.

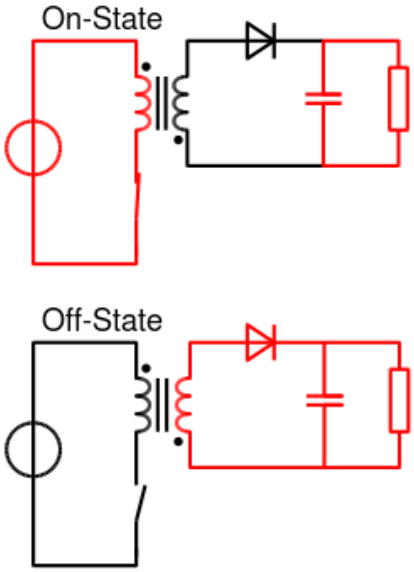
Tačiau bet kuriuo atveju tiesioginiam keitikliui reikalingi du vyniojami aukštai įtampai atsparūs komponentai- transformatorius ir energiją kaupianti ritė. Dviejų išėjimo įtampų atveju situacija dar komplikuojasi- energiją kaupianti ritė jau turi būti dviejų apvijų.

Flyback (keitiklis su energijos kaupimu transformatoriuje) keitiklis



5 pav. Flyback keitiklio schema [6]

Flyback keitiklis yra tas pats buck-boost keitiklis, tik jame vietoje droselio naudojamas transformatorius. Transformatorius kaupia energiją per pirminę apviją, o atiduoda per antrinę (antrines). Papildomai dar turime pirminės ir antrinės apvijų galvaninį atskyrimą. Įtampų santykį pirminėje ir antrinėje apvijose nusako transformatoriaus vijų skaičiaus santykis, kuris vadinamas transformacijos koeficientu. [6]



Pav. 6: Dvi flyback keitiklio veikimo fazės: įjungtoj būsenoj energija yra tiekiama iš įėjimo įtampos šaltinio į transformatorių (išėjimo kondensatorius tiekia energiją išėjime). Išjungtoje būsenoje, energija perduodama iš transformatoriaus į išėjimo apkrovą (ir kurį laiką į išėjimo kondensatorių). [6]

Struktūra ir veikimo principas

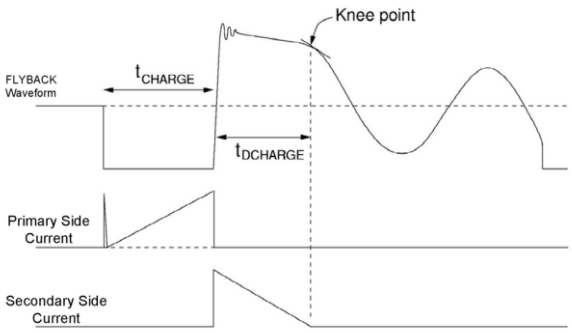
Flyback keitiklio schema gali būti matoma 5 paveiksliuke. Todėl einamasis principas invertuojančio boost tipo (3 paveiksliukas) ir flyback keitiklių yra labai panašus:

- Kai jungiklis įjungtas (6 paveiksliukas viršuje), pirminė transformatoriaus apvija yra tiesiogiai sujungta su įėjimo įtampos šaltiniu. Pirminė srovė ir magnetinis srautas transformatoriuje didėja, taigi energija transformatoriuje kaupiama. O indukuota antrinėje apvijoje įtampa yra neigiama, todėl diodas yra užblokuotas. Išėjime kondensatorius perduoda energiją į apkrovą.
- Kai jungiklis išjungtas (6 paveiksliukas apačioje), pirminė srovė lygi nuliui, magnetinis srautas krenta, antrinė įtampa yra teigiama ir diodas tiesiogine kryptimi leidžia srovei tekėti iš transformatoriaus. Energija iš transformatoriaus šerdies kaupiasi kondensatoriuje ir aprūpina apkrovą.

Energijos kaupimas transformatoriuje prieš perduodant į keitiklio išėjimą leidžia schemoje naudoti kelis išėjimus su papildomomis apvijomis, o jų išėjimo įtampa sutampa viena su kita per vijų santykį. Taip pat galios tranzistoriaus valdymo kontroleriui reikalinga maitinimo grandinė, ir ji negali imti energijos iš to paties transformatoriaus, nes transformatoriaus išėjimo įtampų diapazonas prasideda nuo nulio [6]

Operacijos

Flyback keitiklis yra izoliuotas galios keitiklis. Egzistuoja du vyraujantys valdymo būdai- įtampinis ir srovinis. Dažniau naudojamas srovinis valdymo būdas, nes jis prie tų pačių reikalavimų keitiklio pereinamajai charakteristikai užtikrina didesnį grįžtamojo ryšio stabilumą. Abudu būdai reikalauja signalo, susijusio su išėjimo įtampa. Yra keletas būdų generuoti šią įtampą. Pirmasis yra, kai naudojami optronai grįžtamojo ryšio signalo perdavimui iš antrinės į pirminę grandinę. Antrasis yra vynioti atskirą viją ant šerdies ir reguliuoti įtampą joje. Trečias yra sekti pirminės apvijos įtampą teigiamo maitinimo šaltinio poliaus atžvilgiu tuo metu, kai antrinėje apvijoje baigiasi srovė. [6]



Pav. 7: Bangos – naudojant pirminę pusę stebejimo metodu – rodant „knee point“. [6]

Pirmas būdas, įtraukiant optronus, buvo naudojamas gauti kokybišką įtampos ir srovės reguliavimą, antras metodas buvo sukurtas finansiškai patrauklioms technologijoms, kur išėjimo įtampos tikslumui nekeliami dideli reikalavimai, bet daugiau kaip 11 komponentų, įskaitant optinius izoliatorius, gali būti pašalinti iš visos konstrukcijos. Trečias būdas, pirminės apvijos sekimas, gali būti beveik toks tikslus kaip pirmasis ir labiau ekonomiškas nei antrasis, tačiau reikalaujantis minimalios apkrovos. Sekdami pirminės apvijos indukuojamą įtampą, galime sužinoti kokia įtampa bus antrinėje apvijoje per vijų santykį pirminės apvijos pagalba. (esant tam tikram laikui, kaip 7 paveiksliuke).

Trūkumai

Nenutrūkstamame veikime:

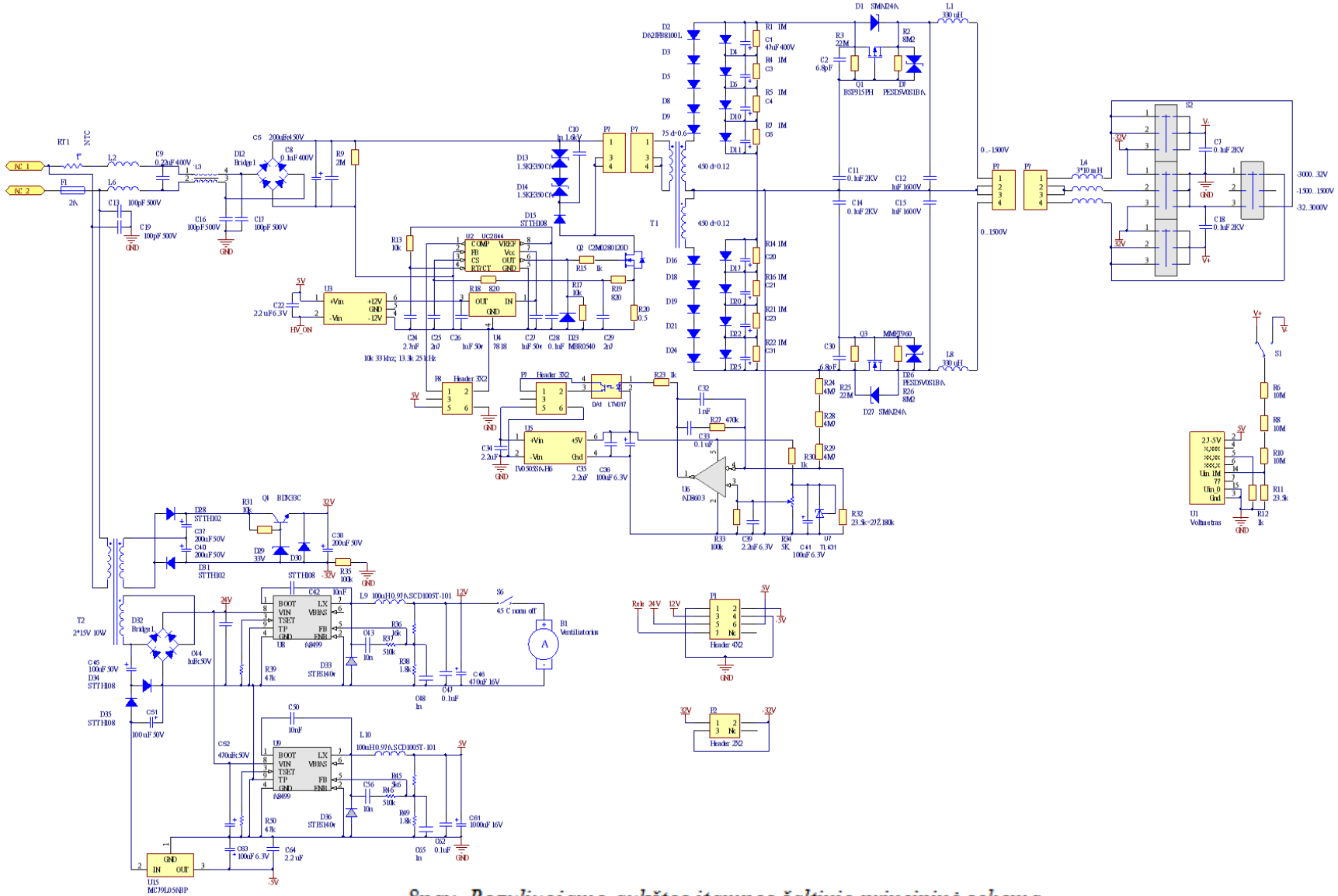
- Sunku paskaičiuoti optimalius grįžtamojo ryšio parametrus [6]
- Naudojant, esant >50% užpildai ir srovės tipo grįžtamajam ryšiui, reikalinga papildoma kompensacijos grandinė.
- Raktui įsijungiant, srovė per diodą dar nėra pasibaigusi. Taigi, turime nuostolius dėl diodo atbulinės varžos atsistatymo.

Nenuolatinis veikimas turi šiuos trūkumus, kurie riboja keitiklio efektyvumą:

- Didelės pikinės srovės.
- Didelis magnetinis srautas transformatoriuje

Keitiklio pasirinkimas

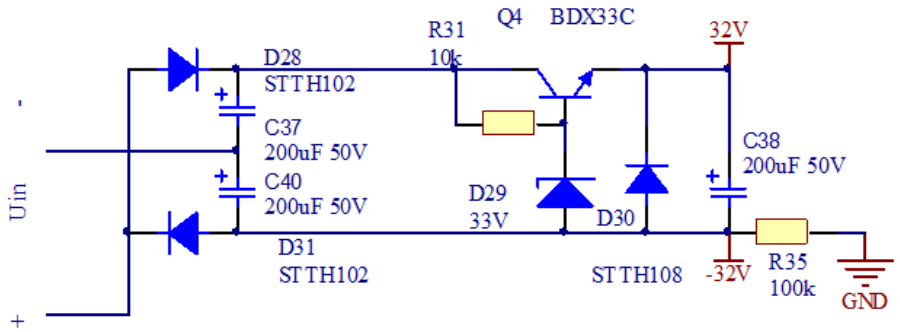
Galima dėti paprasčiausia 50Hz transformatorių, tačiau prie jo reikės stabilizatoriaus, o jei dėsime impulsinį stabilizatorių, jis nuo flyback keitiklio nesiskirs. Jei dėsime tiesinį stabilizatorių, tai jis išskirs labai didelę galią, ypač bus problematiškas prie mažų įtampų, nes, pvz. prie 80V išėjimo įtampos, 95 procentai visos galios išsiskirs reguliuojančiame tranzistoriuje, ir tik 5 procentai pateks į apkrovą. Be to, bus labai sudėtinga išlyginti pulsacijas, kadangi išėjime bus reikalingos didelės kondensatorių įtampos, o dažnis jau bus ne 30kHz eilės, o 100Hz. Todėl pasirinkome impulsinį flyback tipo keitiklį, nes jis yra paprasčiausias. Galima naudoti ir dvitaktį tiesioginį keitiklį su nekaupiančiu energijos skiriamuoju transformatoriumi. Bet toks keitiklis reikalauja kiekvienoje antrinėje apvijoje po vieno surišto droselio. Taigi, nors energija kaupiama droselyje, o ne transformatoriuje, ir skiriamąjam transformatoriui keliami mažesni reikalavimai(dėl to jis mažesnis) , bet nieko nelaimime, nes pagrindinė problema yra ne kaip vyniotame komponente sukaupti kuo didesnę energiją, o kaip užtikrinti užtenkamą izoliaciją tarp apvijų. Taigi dėl izoliacijos tiek tiesioginio keitiklio transformatorius, tiek droselis bus panašaus dydžio, kaip flyback keitiklio transformatorius. Taigi tiesioginis keitiklis netinka, dar lieka rezonansiniai keitikliai, bet jų išėjimo įtampų diapazonas yra per siauras, taigi jie irgi netinka. Taigi flyback keitiklį renkamės dėl jo plataus išėjimo įtampų diapazono ir tik vieno aukštavolčio vyniojamo komponento panaudojimo. Aišku, už tai susimokame mažu naudingumo koeficientu ir didesniais reikalavimais raktiniam tranzistoriui, bet tai priimtina kaina.



8pav. Reguliuojamo aukštos įtampos šaltinio principinė schema

Prietaiso veikimas

Šioje dalyje bus nagrinėjimas reguliuojamo aukštos įtampos šaltinio veikimas (8pav). Turint stiprintuvo didelį stiprinimo koeficientą, galima turėti dideles išėjimo įtampas. Tačiau ir nedidelis trukdis įėjime turi didele reikšmę išėjime. Pavyzdžiui, jei stiprinimo koeficientas yra apie 1000, tai padavę 1V trukdį į įėjimą (o tai reali siuacija), išėjime gauname 1000V, kuris gali būti pavojingas. Todėl patogu stiprintuvo įtampos ribojimą atlikti per maitinimo įtampos nustatymą, nes stiprintuvo išėjimo įtampa negali būti didesnė už maitinimo įtampą. Tokiu atveju mums reikalingos ribos (*+U*, *-U*), nuo kurios jis gali kisti, o jas viršijant prasideda ribojimai. Įvairiems taikymams yra reikalinga skirtinga įtampa, todėl mes ją darome reguliuojamą. Todėl prie stiprintuvo reikalingas maitinimo blokas, kuris įtampą keičia iš 220V į *+U* ir *-U*. Yra atvejų, kai mums reikalinga tik vieno poliarumo įtampa, nes priešingo poliarumo įtampa gali sugadinti tiriamą objektą, todėl yra svarbu padaryti, jog stiprintuvo išėjimas būtų matuojamas ne tik žemės atžvilgiu, bet ir kitų taškų (0V, +, -), tada jis galės veikti iki dvigubos įtampos. Tuomet vieno poliarumo įtampa yra dvigubai didesnė negu dvipolio maitinimo atveju. Jei ankščiau buvo nuo -1500V iki +1500V, tai dabar turime nuo -3000V iki 0V ir nuo 0V iki +3000V. Tačiau taip būtų idealiu atveju, bet realybėje stiprintuvas nėra idealus, ir jei jis maitinamas nuo *-U* iki *+U*, jo išėjimo įtampa yra nuo *-U+5V* iki *+U-5V*, tai yra maitinimo įtampa yra aukščiau ribos, kurios gaunamos išėjime. Tokiu budu artėjame prie ribos, kurioje prasideda iškraipymai ir tirinėjant vieno poliarumo įtampoje mes 0V nepasiekiame. Norėdami 0V pasiekti (pavyzdžiui norime turėti impulsą, kurio minimumas būtų 0V, o maksimumas 3000V) reikalingas maitinimas, kuris yra žemiau 0V, todėl mūsų prietaise naudojamas 32V šaltinis (9pav.), kuris yra visiškai atskiras ir tai yra parametrinis stabilizatorius.

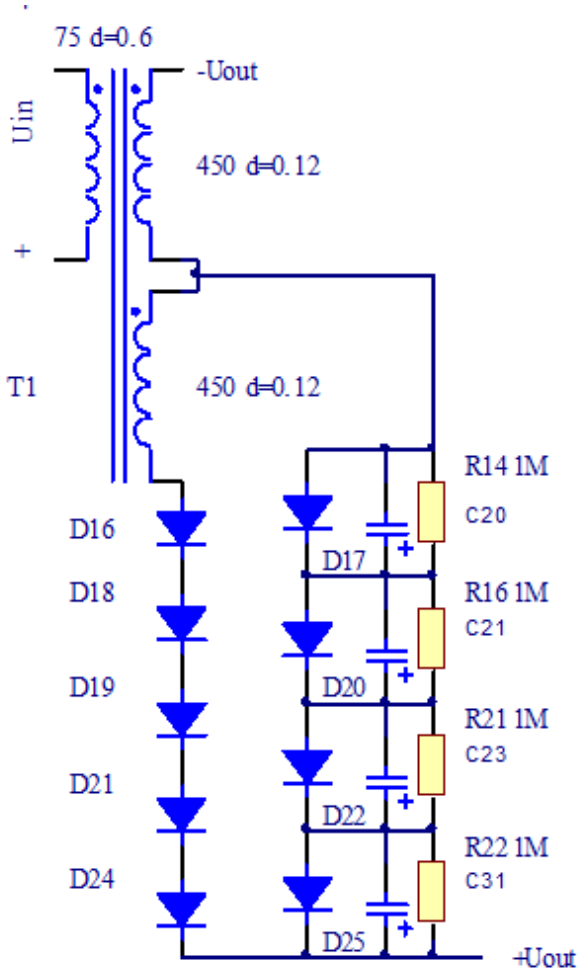


9pav. schemos 32V šaltinis.

Maitinimas šiam stabilizatoriui gaunamas iš įtampos dvigubintuvo, kurioje įėjimo įtampos pusbangiais yra įkraunami kondensatoriai, taip pasiekiant pastovią išėjimo įtampą, idealiu atveju lygiai du kartus viršijančią įėjimo įtampą. Toliau D30 diodas yra įdėtas nutekėjimui į žemę, kad trumpo jungimo metu atbulinės įtampos negauti, o prie jo esanti 100k Omų varža (R35) į žemę pajungta transformatoriaus apsaugojimui, jeigu jos nebus, izoliuota transformatorius apvija gali

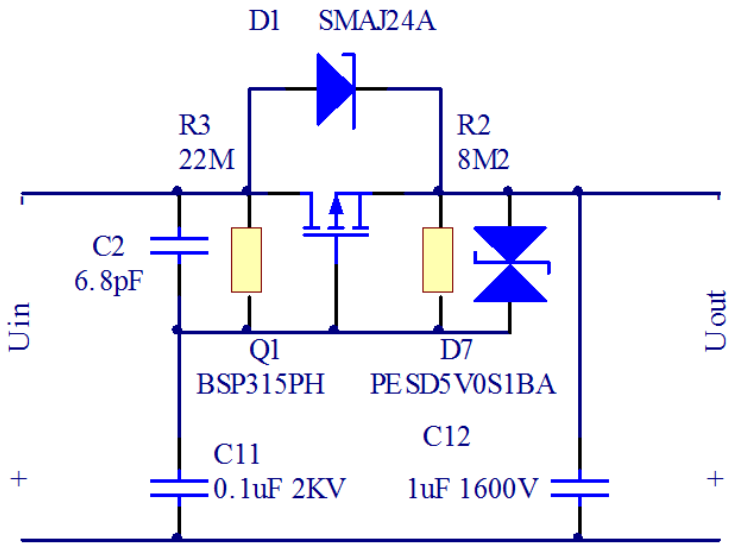
statiškai įsielektrinti žemės atžvilgiu iki tiek, kad įvyks pramušimas. Ši įtampa (+32V, -32V) prijungiama prie teigiamos arba prie neigiamos išėjimo įtampos jungiklio pagalba.

Flyback keitiklio antrinėse apvijose indukuojama aukšta įtampa, kurioje turi dirbti lygintuvo diodai. Kiekvienas lygintuvas turi būti atsparus bent 3000V atbulinei įtapai, tačiau būtų geriau, jei ši įtampa būtų didesnė. Be to diodas turi būti greitas (greit atsidaro, greit užsidaro), tačiau tokios įtampos schottky diodo nėra, jų pramušimo įtampa yra 250V. SiC schottky diodo pramušimo įtampa yra iki 1700V, bet jie turi didelę srovę, taip pat didelę talpą. Kadangi prietaise mažos srovės ir didelė talpa. Jis veikia kaip rezonansinis kontūras, todėl netinkami SiC schottky diodai. Taip pat yra SBR diodai, tačiau jie laiko tik 400V, todėl netinkami. Lieka aukštos įtampos paprasti diodai, kurie yra lėti, o mums reikalingi kuo trumpesnės atsiurbimo trukmės (tai yra per kiek laiko atsistato atgalinė varža). Jeigu atgalinė varža neatsistato greit, tai turėsime labai didelius nuostolius. Šiame prietaise naudojami D16, D18, D19, D21, D24 diodai (10pav.), kurių įtampa yra 800V ir atsiurbimo trukmė - 40ns. Naudojame ne vieną diodą, nes prietaise išėjimo įtampos gaunamos didelės, todėl įdėję 5 diodus turime apie 4000V su atsarga. Sekanti problema yra su kondensatoriais, kadangi pasaulyje dar nėra gaminami didesni negu 500V elektrolitiniai kondensatoriai,



10pav. Diodų ir kondensatorių schema

o prietaisui yra reikalingos didelės filtracinės talpos. Taip reikiamą talpą gauname iš C20, C21, C23, C31 400V kondensatorių, sujungtų nuosekliai. Pramušimo įtampa teoriškai turėtų būti 1600V. Be to kondensatorių talpos ir nuotėkio srovės yra nevienodos, diodai (D17, D20, D22, D25) ir varžos (R14, R4, R5, R7) išlygina krūvius kondensatoriuose ir apsaugo, kai kondensatoriai yra iškraunami, kad mažiausios talpos kondensatoriuje įtampa nebūtų priešinga. Naudojami Hi-Volt kondensatoriai yra mažos talpos ir dideles vidines varžos, išnaikinti pulsacijų jais nepavyksta. Naudoti induktyvinį filtrą neapsimoka dėl būtino itin didelio induktyvumo, todėl naudojamas aktyvus filtras, kuriame krenta 10-12V įtampa (priklauso nuo tranzistoriaus *Vth* ir *R* daliklio (*Vth*<<5V)) (11paveiksliukas). Aktyvinis filtras padaro, jog varža kinta laike ir slopinimo koeficientas yra labai didelis. Aktyvinį filtrą galime įsivaizduoti,



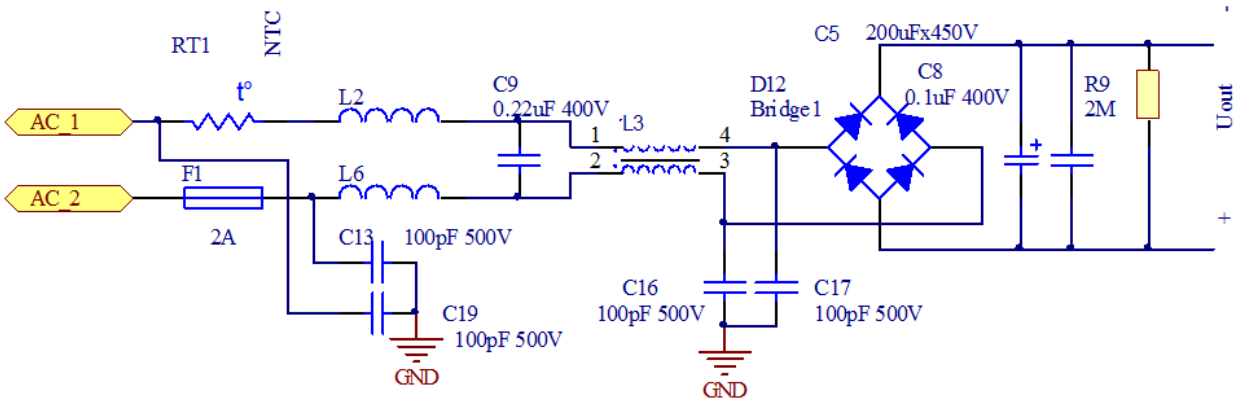
11pav. Aktyvinio filtro schema

kaip elementarų stabilizatorių, jis atkartoja paduodamą įtampą. Jeigu turime įėjime pulsacijos įtampą (kuri yra apie 2V mūsų atveju), ir ji yra didesnę negu paduodama, išėjime turime įtampą, mažesnę per Vth įtampą. Bet mes nežinome kokia yra įtampa. Todėl naudojame kondensatorių, kurio įtampa bus pastovi ir nepulsuojanti. Taip pulsacijų slopinimo koeficientas priklauso nuo R3 ir R2 lygiagrečiai sujungtų varžų ir C11 kondensatoriaus (jeigu nebūtų varžų R3 ir R2, slopinimo koeficientas būtų lygus C11 ir C2 kondensatorių santykiui), kurio RC laiko pastovioji yra 5s, o periodas yra 30us, tai teorinis slopinimo koeficientas yra 20000. Pajungus įtampą gali nutikti taip, kad kondensatorius bus pasikrovęs, tada tarp tranzistoriaus užtūros ir santakos bus 1500V ir bet koks tranzistorius perdegs. Apsaugai yra įdėtas 5V stabilitronas D7, kuris leidžia 10A didelę srovę. Jis staigiai iškrauna kondensatorių ir įtampa nepasiekia leistinos ribos. Tačiau filtre naudojamas Q1 tranzistorius yra 60V eilės, kuris yra mažos galios ir įtampos. Ir įjungę įtampą, kai kondensatorius bus nepakrautas tranzistorius perdegs, todėl apsaugai yra įdedamas dar vienas D1 stabilitronas,

kuris neleidžia pasiekti didelių įtampos skirtumų didesnių kaip 24V, tokiu būdu tranzistorius yra apsaugojamas nuo perdegimo visais atvejais. Aktyviniam filtre esančio C2 kondensatoriaus, kuriame injektuojamos papildomos pulsacijos, pagrindinė paskirtis neleisti užgeneruoti tranzsitoriui Q1, nes toks schemos jungimo būdas su stabilitronais yra linkęs generuoti. Už filtro naudojamas L1 diferencialinis droselis, naudojamas nuslopinti kiekvienos linijos signalą, kadangi aukštadažnės komponentės su tranzistoriumi turi talpas.

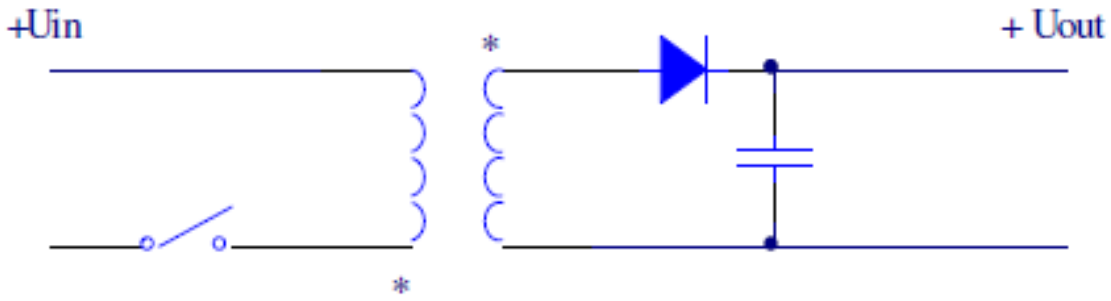
Dar vienas svarbus skirtumas nuo visų maitinimo blokų, kurie paprastai grandinę maitina nuo antrinės apvijos. Kuriamo prietaiso antrinėje apvijoje įtampa labai plačiose ribose kinta, todėl grandinės negalime maitinti. Tokiu atveju maitinimą darome atskirą ir naudojame keitiklį U3. Jis iš vienos įtampos padaro, kiek nestandartinę 18V įtampą (tokia pasirinkta, nes naudojamo SiC lauko tranzistoriaus atviro kanalo varža tik viršijus 15V sklendės įtampą nustoja stipriai mažėti). Tokį keitiklį sunku surasti, todėl mes panaudojame 24V keitiklį ir iš jo sustabilizuojam 18V su U4 stabilizatoriumi. Taip daryti yra pigiau.

Toliau yra maitinimo blokas (12pav.). Jo įtampą turime reguliuoti ir keisti poliškumus.



12pav. Pirminės grandinės filtras su lygintuvu schema

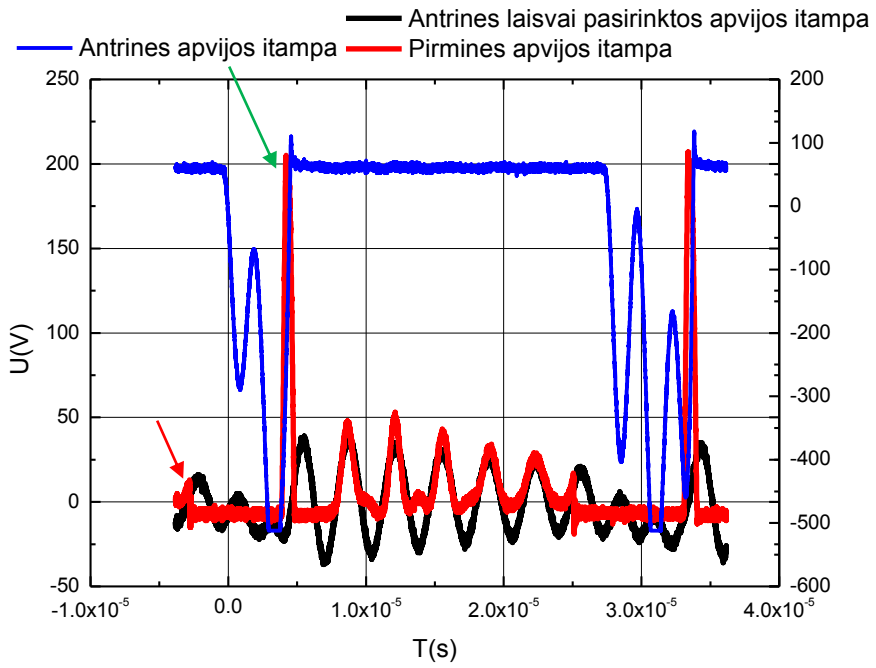
Jo struktūra yra keitiklio klasikinė schema, lygintuvas tai yra tiltelis (kai ateina kintama srovė išeina pastovi srovė). Maitinimo bloke naudojami filtraciniai droseliai yra skirti panaikinti tinklo trukdžiams, o diferencialinis transformatorius skirtas kiekvieną srovę slopinti atskirai. Šalia esantys kondensatoriai (C13, C19, C16, C17) , skirti mažinti pulsacijas žemės atžvilgiu. Taip pat yra RT1 termistorius, kurio varža pradžioje yra didelė, o kai kondensatorius kraunasi, varža įkaista ir priartėja prie 0 Omų, skirtas reguliuoti srovę. O R9 varža skirta kondensatoriui iškrauti.



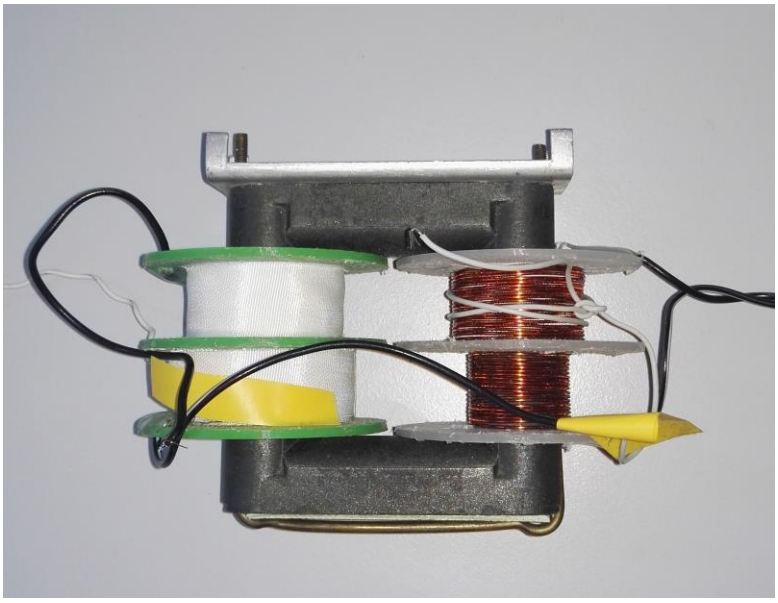
13pav. Supaprastina flyback tipo keitiklio schema.

Toliau yra keitiklis, kuriame įjungus raktą sukaupta energija pirminėje apvijoje, išjungus raktą atiduodama per antrinę apviją. Tuomet turime, kad įtampos per vijų skaičių yra lygios, tokiu būdu mes gauname antrinėje apvijoje įtampą padaugintą iš transformacijos koeficiento. Ir tai priklauso nuo rakto įjungimo trukmės. Ir šis keitiklis mums yra tinkamiausias, jog čia yra naudojamas tik vienas elementas, kuriame yra 3kV įtampa tarp pirminės ir antrinės. Kiti keitikliai reikalauja daugiau tokių elementų, kuriuos yra sudėtingiau pagaminti ir prietaiso matmenys labai pasikeičia.

Tačiau susidūrėme su bėdomis. Pagaminę transformatorių, išbandėme jį realioje grandinėje, bet saugumo sumetimais su sumažinta maitinimo įtampa. Oscilografu išmatavome įtampą ant valdančio tranzistoriaus Q2, įtampa antrinėje transformatoriaus apvijoje (kuri apkrauta per diodą D16), ir atskirai ant transformatoriaus užvyniotos apvijos (ji neapkrauta, todėl jos įtampa atspindi magnetinio srauto kitimo transformatoriaus šerdyje greitį) matomus 16 paveiksliuke. Matavimo rezultatai ir kaip atrodo transformatorius pateikti 14 ir 15 paveiksliukuose. Raudonos kreivės pirmas mažas pokytis reiškia tranzistoriaus Q2 atsidarymą (Raudona rodyklė oscilogramoje), o kai tranzistorius užsidaro, matomas labai didelis įtampos šuolis (žalia rodyklė oscilogramoje). Tačiau nei antrinėje, nei neapkrautoje apvijoje tokio šuolio praktiškai nėra. Taip pat esant įjungtam tranzistoriui, antrinėje apvijoje matome ne stačiakampį įtampos kitimą, o silpnai gęstantį rezonansą. Toks pats atvejis, tik kai tranzistorius uždarytas, gaunama ir pirminėje apvijoje. Tokie rezultatai parodo, jog turime labai prastą transformatoriaus vijų surišimą, tai reiškia, kad visa transformatoriaus neperduota energija yra paverčiama į šilumą, daugiausiai apsaugos grandinėje D13-D15, C10. Todėl teko perdaryti transformatorių – keisti šerdį, taigi ir konstrukciją.

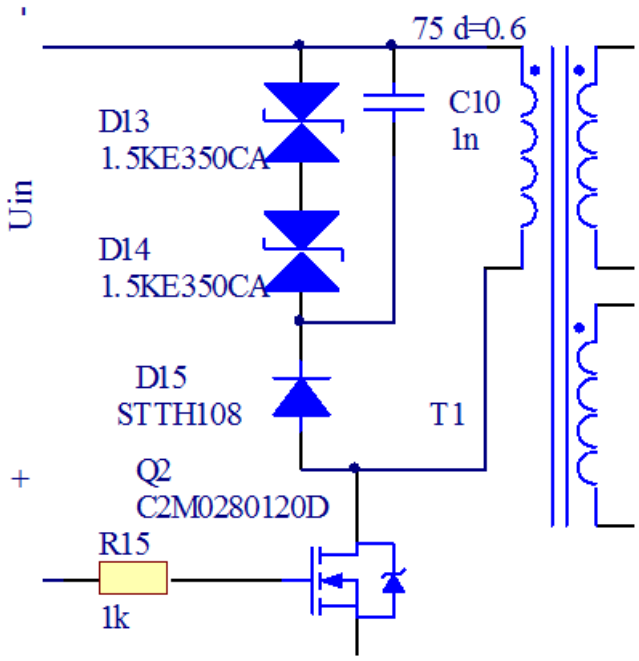


14pav. Transformatoriaus oscilogramos.



15pav. Transformatorius, su blogu vijų surišimu.

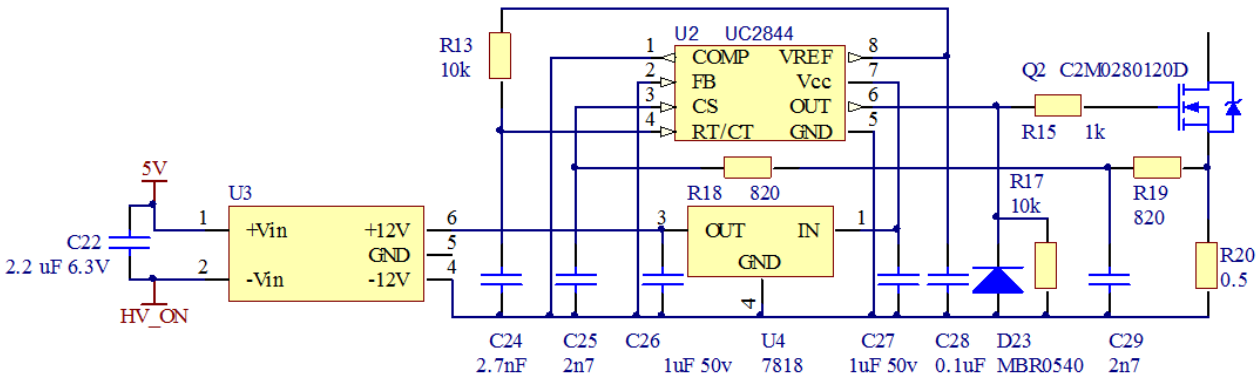
Naudojamas maitinimo blokas dirba su raktų įtampomis iki 800V eilės, kur silicio tranzistorių didžiausios įtampos yra apie 1200V, tačiau geri parametrai yra išlaikomi ne daugiau kaip iki 600V-650V, aukštesnėse įtampose parametrai labai blogėja. Todėl negalime naudoti paprasto tranzistoriaus kaip rakto, nes tai yra rizikinga. Naudojame SiC tranzistorių, kuris yra labai greitas, aštrus persijungimai, aštrus frontai, jo ribinė įtampa siekia 1200V, tačiau kuo statesnis frontas, tuo daugiau trukdžių turime, todėl mes dirbtinai palėtinam Q2 tranzistoriaus frontus, įdėdami didelę sklendės grandinės R15 (16 pav.) 1k varža. Naudingumas nuo to nesikeičia, nes žemas antrines apvijos rezonansinis dažnis duoda nepanaudojama pirmąjį įtampos šuolį. Lėtiname frontus norėdami sumažinti virpesius, kurie atsiranda dėl neidealaus transformatoriaus.



16 pav. Flyback keitiklio schema.

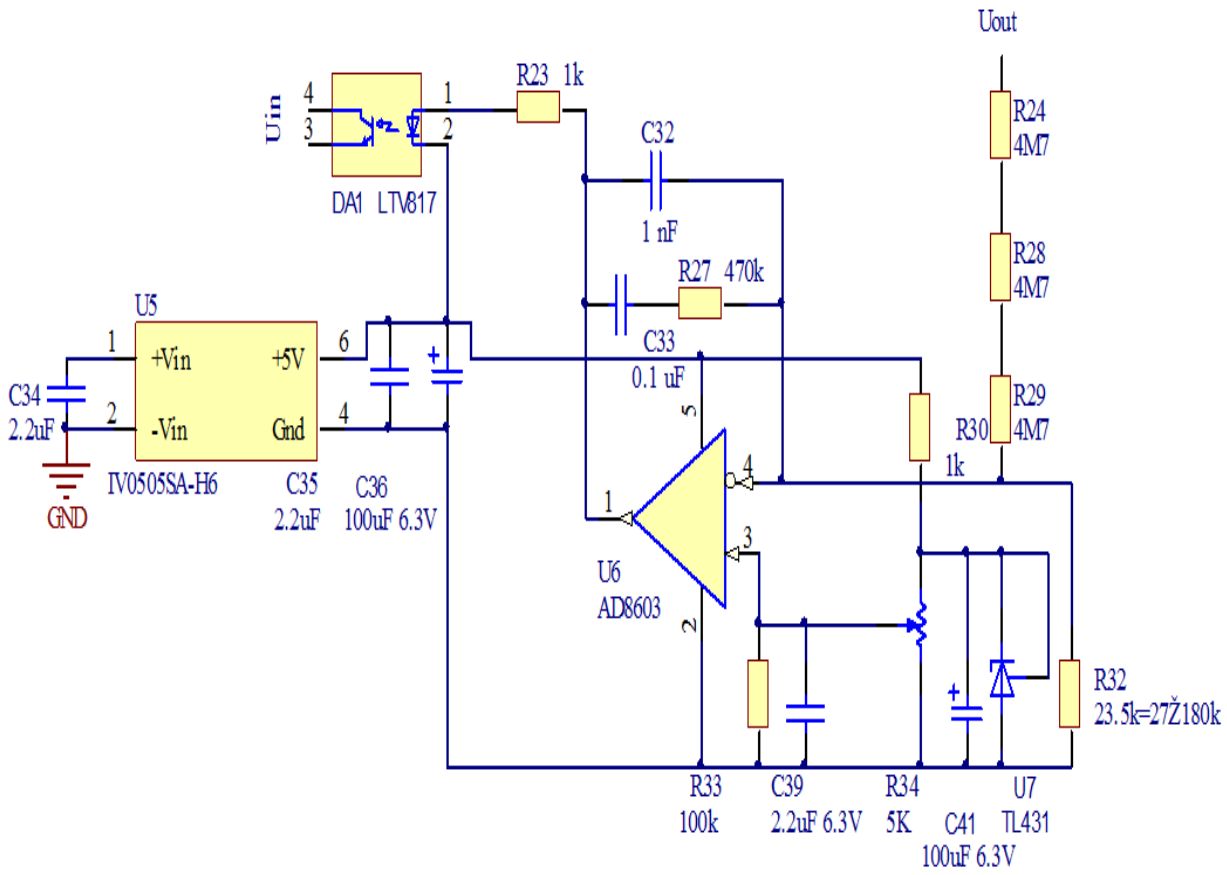
Stabilitronai D13,D14 skirti panaikinti parazitinę įtampą, todėl jie pradeda kaisti, kaitimas yra didesnis, kai transformatorius yra prastesnis ir kai yra didesne apkrova.

Naudojama U2 mikroschema (17 pav.) atsakinga už impulso pločio palaikymą ir ji parenka



17 pav. Valdymo schema

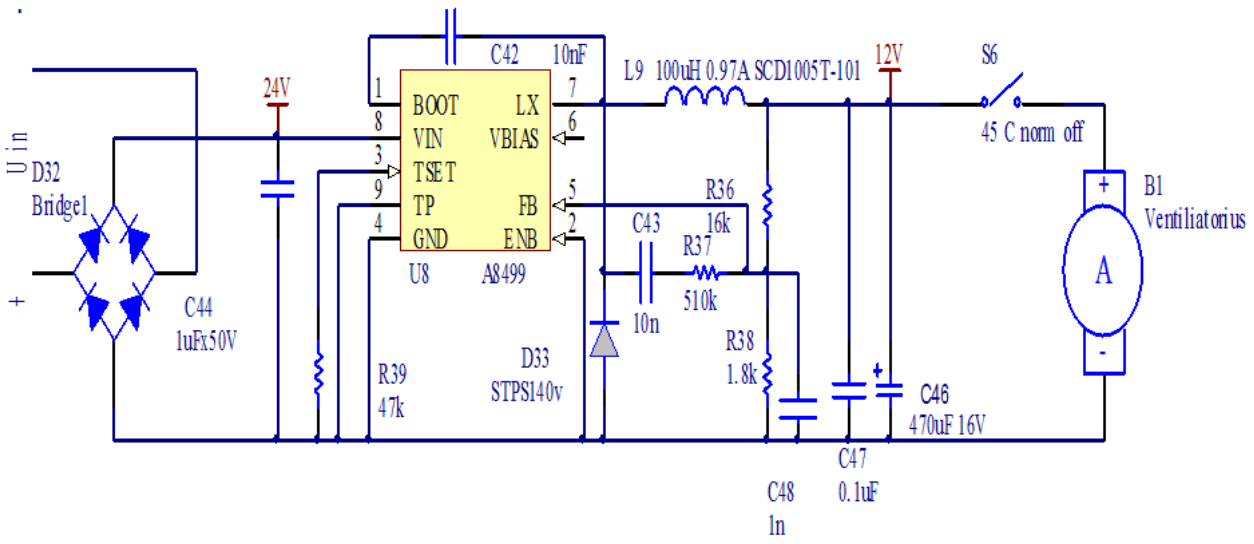
per grįžtamąjį ryšį, tai yra per optroną DA1 koks yra transliuojamas signalas. O į patį optroną paduodamas signalas palyginimas tarp išėjimo įtampos (padalintos iš daliklio R24, R28, R29 (18 paveiksliukas), kurios nuosekliai sujungtos, kad būtų jas sunkiau pramušti ir R32 varža pajungta į žemę), kurią galima apskaičiuoti pagal formulę $U_x=(U_{iš}*R32)/(R24+R28+R29+R32)$, su stabilitrono gauta įtampa, kuri yra dar nufiltruota triukšmo su C41 kondensatoriumi ir per potenciometrą R34 reguliuojama.



18pav. Grįžtamojo ryšio schema

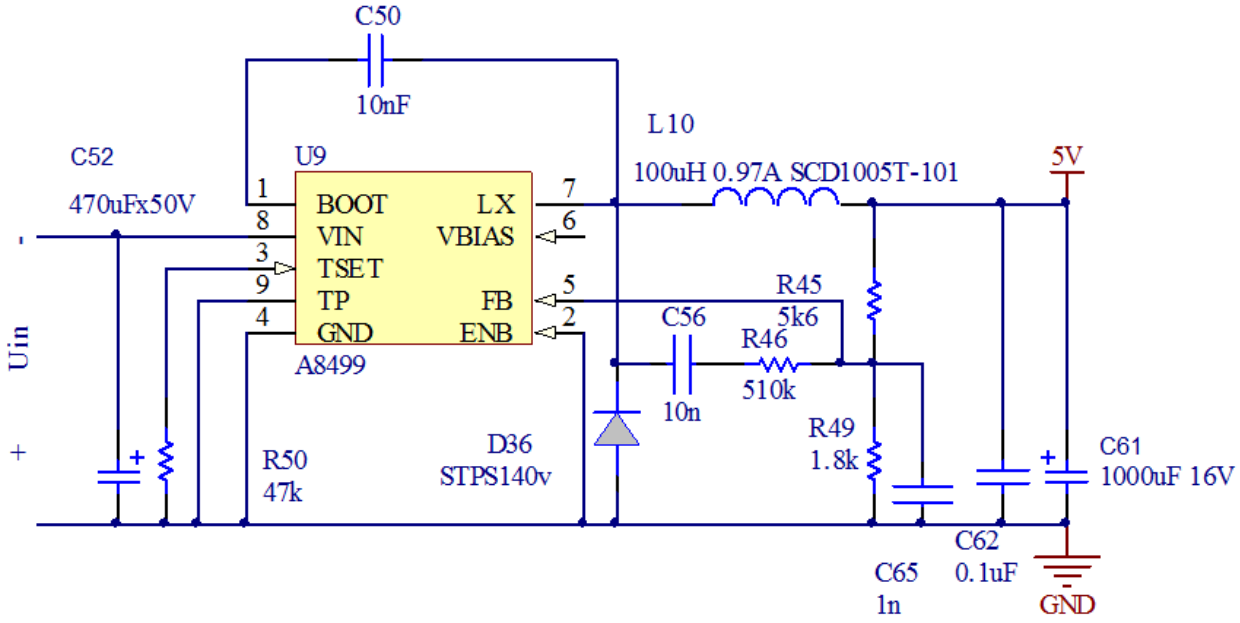
Šias įtampas operacinis stiprintuvas lygins, ir išlaikys jas lygias. Ir būtent U2 (17 paveiksliukas) mikroschema yra atsakinga už šį valdymą, ji taip pat žiūri, kad srovė per SiC tranzistorių nebūtų per didelė. Taip saugo nuo trumpo jungimo, tačiau SiC tranzistoriai yra atsparus didelėms perkrovoms ir yra sudėtinga jį sudeginti. Be to grįžtamojo ryšio grandinė maitinama taip pat ne iš transformatoriaus, o yra įdėtas U5 5V keitiklis (18 paveiksliukas), kuris yra ypatingas, nes garantuoja saugų veikimą, esant įtampai tarp abiejų grandinių iki 5000V. Įprastų keitiklių izoliacijos įtampa paprastai būna 1000V.

Prietaise yra pagalbiniai maitinimo šaltiniai (19, 20 paveiksliukas) kurie yra impulsiniai Buck keitikliai, jie komutuoja L9 ir L10 rites, kuriuose skiriasi varžų dalikliai įėjime. Pirmasis keitiklis (19 pav.), kuriame gaunama 12V įtampą. Ir yra S6 raktas, kuris suveikia pasiekus 45 laipsniu temperatūra ir įjungia ventiliatorių.



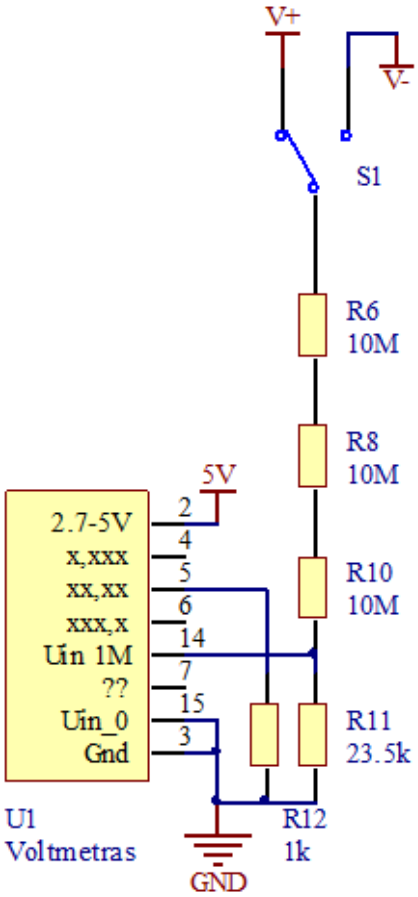
19 pav. 12V Maitinimo šaltinio schema

O sekantis keitiklis (20 pav.), kuriame gaunamos 5V ir -5V įtampos. Neigiama įtampa gaunama su tiesiniu stabilizatoriumi, kuris paima mažesnę įtampą žemės atžvilgiu, taip sukurdamas neigiamą įtampos šaltinį.

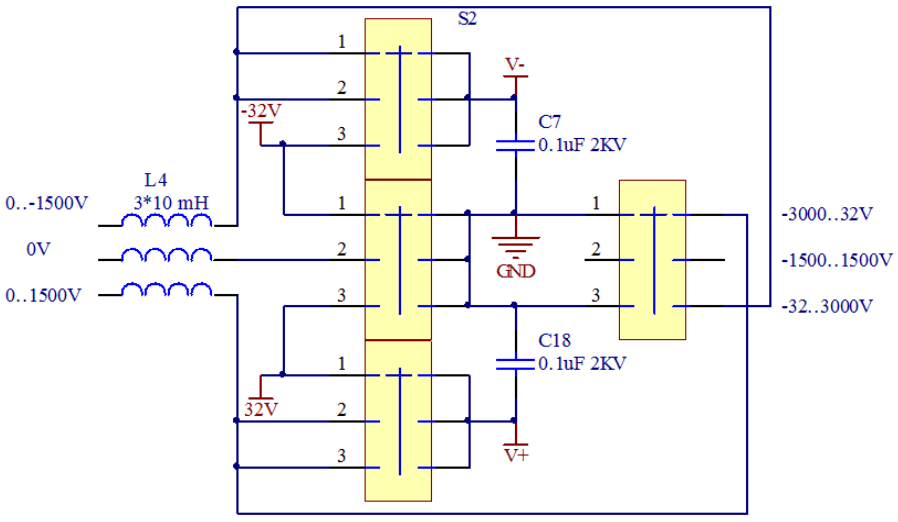


20 pav. 5V Maitinimo šaltinio schema

Yra voltmetras U1 (21 paveiksliukas), kuris matuoja prietaiso teigiamą arba neigiamą maitinimo įtampą žemės atžvilgiu.



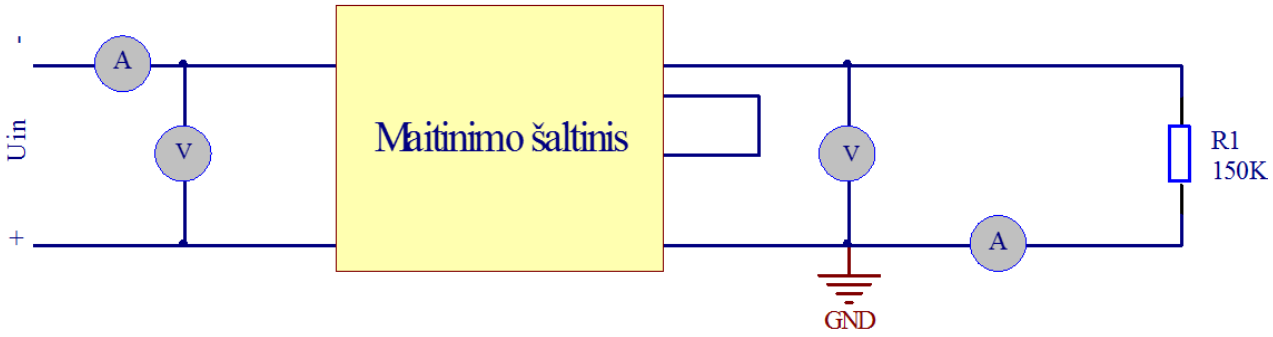
21 pav. Voltmetro pajungimo schema



22 pav. Išėjimo įtampos matavimo schema.

Už aktyvinio filtro yra L4 ritė (22 paveiksliukas), kuri yra labai didelio induktyvumo ir ji yra sinfazinė (visi trys laidai suvinioti ta pačia kryptimi) tai reiškia, jei įteka ir išteka tas pats srovės kiekis, tai ritė neturi induktyvumo, bet jei turime tos pačios krypties sroves, tai srovės stabdomos ritės pagalba, nes jos induktyvumas didelis.

Rezultatai



23pav. Naudingumo koeficiento matavimo schema

Prie didžiausios išėjimo srovės (20mA) ir įtampos (3kV) pasiektas 72% naudingumo koeficientas (matuotas pagal 23 pav. schema). Valdymo grandinės sąnaudos į naudingumo koeficientą neįskaičiuotos. Pulsacijų amplitudė už pulsacijų filtro tuomet neviršija 5 mV.

Išvados

1. Flyback tipo keitiklis su maždaug vienodo dydžio + ir - poliškumo įtampa yra geriausias pasirinkimas plataus išėjimo įtampų diapazono iki 100W galios maitinimo šaltiniui.

2. Dėl didelio antrinės apvijos vijų skaičiaus atsirandantys rezonansiniai efektai blogina keitiklio charakteristikas, todėl gaminant transformatorių svarbu kiek įmanoma mažinti jo parazitines talpas.

3. Dėl neužtenkamai gero pirminės ir antrinių apvijų ryšio neapsimoka naudoti itin stačių žadinančios apvijos srovės perjungimo frontų. Nes praktiškai visa liekamajame induktyvume sukaupiama energija tuomet virsta į šilumą pirminės apvijos viršįtampių slopinimo grandinėje.

Deividas Kimsa

Adjustable High Voltage Source

Summary

The aim of this work was to make and design Adjustable High Voltage Source. Adjustable High Voltage Source have to be safe for health, easy to use and get good parameters.

This work now have:

- Designed adjustable high voltage source structure
- Designed principle of electronic scheme and have chosen components
- Made and tested control block and testing HV converter

Literatūra

[1] http://www.matsusada.com/product/psel/amp/hiv/000184/ [Žiūrėta: 2016.05.19]

[2] http://www.trekinc.com/products/HV_Amp.asp [Žiūrėta: 2016.05.19]

[3] http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01114A.pdf [Žiūrėta: 2016.05.19]

[4] Abraham I. Pressman, Keith Bilings, Taylor Morey(2009). Switching Power Supply Design (Third Edition). USA: McGraw-Hill. ISBN 978-0-07-159432-5 [Žiūrėta: 2016.05.19]

[5] Marty Brown(1990). Practical Switching Power Supply Design. San Diego: Academic Press Inc. ISBN 0-12-137030-5 [Žiūrėta: 2016.05.19]

[6] https://en.wikipedia.org/wiki/Flyback_converter [Žiūrėta: 2016.05.19]