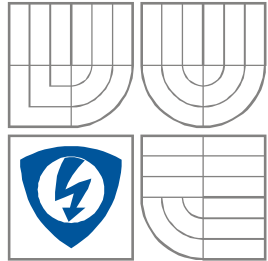


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

LABORATORNÍ PULSNÍ ZDROJ S VÝSTUPNÍ LINEÁRNÍ STABILIZACÍ

LABORATORY PULSE POWER SUPPLY USING OUTPUT LINEAR STABILIZATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MAREK LEDNICKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ ŠEBESTA, Ph.D.

BRNO, 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Marek Lednický

ID: 43216

Ročník: 3

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Laboratorní pulsní zdroj s výstupní lineární stabilizací

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Provedte systémový rozbor řešení impulsního laboratorního zdroje s výstupní lineární stabilizací. Zdroj musí umožňovat nastavení výstupního napětí a proudového omezení ve vhodných rozsazích. Navrhněte komplexní zapojení zdroje včetně výpočtů prvků v silové části zdroje. Navrhněte desky plošných spojů zdroje a jeho mechanické řešení. Osadte desky plošných spojů zdroje a oživte jej. Provedte komplexní měření parametrů navrženého a realizovaného laboratorního zdroje.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KREJČÍŘÍK, A. Napájecí zdroje I. -III. BEN - technická literatura, Praha, 1997.

[2] NEASCU, D. O. Power-Switching Converters. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006.

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 25.5.2012

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Šebesta, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práce se zabývá problematikou impulsních (spínaných) zdrojů. Teoretická část obsahuje historický vývoj, porovnání s lineárními zdroji a základní zapojení spínaných zdrojů. Dále obsahuje popis jednotlivých částí spínaných zdrojů jako jsou usměrňovače, měniče a stabilizátory. V praktické části se nachází návrh, popis funkce a sestavení laboratorního pulsního zdroje s výstupní lineární stabilizací.

KLÍČOVÁ SLOVA

Pulsní zdroj, laboratorní zdroj, lineární stabilizace, UC3844, IR2110, měniče, stabilizátory, usměrňovače

ABSTRACT

This thesis deals with switched mode power supplies. The theoretic part of the thesis consists of historical development and the elementary schemes of switched mode power supplies. It also includes the comparing with linear regulators. Next, it contains the description of individuals parts switched mode power supplies as a rectifiers, power supplies and stabilizers. There is a proposal and fixing of laboratory pulse power supply using output linear stabilization in the practical part of the paper.

KEYWORDS

Switched mode power supply, laboratory power supply, linear stabilization, UC3844, IR2110, stabilizers, rectifiers.

LEDNICKÝ, M. *Laboratorní pulsní zdroj výstupní lineární stabilizací*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2012. 34 s., 6 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Šebesta, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Laboratorní pulsní zdroj s výstupní lineární stabilizací jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 25. května 2012

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiří Šebesta, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 25. května 2012

.....

(podpis autora)

OBSAH

Obsah	vi
Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	x
Úvod	1
1 Spínané zdroje	2
1.1 Porovnání lineárních a spínaných zdrojů.....	2
1.2 Rozdělení spínaných zdrojů.....	5
1.3 Usměrňovače	5
1.3.1 Jednocestný usměrňovač	6
1.3.2 Dvoucestný usměrňovač.....	7
1.3.3 Můstkový usměrňovač.....	7
1.3.4 Zdvojovač	7
1.3.5 Násobiče napětí.....	8
1.4 Měniče	8
1.4.1 Jednočinný měnič	8
1.4.2 Propustný snižující měnič.....	9
1.4.3 Blokující invertující měnič (buck boost).....	10
1.4.4 Propustný DC/DC měnič s impulzním transformátorem	10
1.4.5 Jednočinný propustný měnič s demagnetizací pomocí Zenerovy diody ...	11
1.4.6 Jednočinný můstkový propustný měnič	12
1.4.7 Dvojčinný měnič	13
1.4.8 Dvojčinný blokující měnič	14
1.4.9 Dvojčinný můstkový propustný měnič.....	15
1.5 Pulzně šířková modulace	16
1.6 Stabilizátory napětí	17
1.6.1 Parametrické stabilizátory	17
1.6.2 Zpětnovazební stabilizátory.....	18
1.6.3 Řízené stabilizátory	18
1.6.4 Stabilizátory s IO	19

1.7	Rušivé vyzařování	19
2	Návrh a simulace hlavních částí zdroje	21
2.1	Základní zapojení	21
2.2	Popis funkce	21
2.3	Návrh součástí zdroje	25
2.4	Výroba a testování plošného spoje	27
2.5	Měření parametrů napájecího zdroje	29
2.6	Vnější provedení zdroje.....	30
3	Závěr	32
	Literatura	33
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	34
	Seznam příloh	35

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Blokové schéma lineárního stabilizovaného zdroje	2
Obr. 1.2: Blokové schéma spínaného zdroje	4
Obr. 1.3: Jednocestný usměřovač	6
Obr. 1.4: Dvoucestný usměřovač.....	7
Obr. 1.5: Můstkový usměřovač.....	7
Obr. 1.6: Greinacherův zdvojovač napětí	8
Obr. 1.7: Základní zapojení jednočinného měniče	8
Obr. 1.8: Průběhy napětí v některých místech jednočinného měniče.....	9
Obr. 1.9: Propustný snižující měnič.....	10
Obr. 1.10: Blokující invertující měnič	10
Obr. 1.11: Propustný DC/DC měnič	11
Obr. 1.12: Jednočinný propustný měnič s demagnetizací pomocí Zenerovy diody	12
Obr. 1.13: Jednočinný můstkový propustný měnič	12
Obr. 1.14: Zapojení dvojjinného propustného měniče.....	13
Obr. 1.15: Průběhy napětí v některých místech dvojjinného měniče	14
Obr. 1.16: Základní zapojení blokujícího měniče.....	15
Obr. 1.17: Dvojjinný můstkový propustný měnič.....	15
Obr. 1.18: Zdroj s pulzně šířkovou modulací	16
Obr. 1.19: Parametrický stabilizátor napětí	17
Obr. 1.20: Stabilizátor s výstupním tranzistorem	18
Obr. 1.21: Blokové schéma zpětnovazebního stabilizátoru napětí.....	18
Obr. 1.22: Blokové schéma řízeného stabilizátoru	18
Obr. 1.23: Kladné napětí se 78xx	19
Obr. 1.24: Záporné napětí se 79xx.....	19
Obr. 2.1: Základní zapojení zdroje	21
Obr. 2.2: Můstkový usměřovač.....	21
Obr. 2.3: Schéma silové části.....	22
Obr. 2.4: Blokové schéma obvodu UC3844.....	22
Obr. 2.5: Časové průběhy obvodu UC3844.....	23
Obr. 2.6: Blokové schéma obvodu IR2110.....	23
Obr. 2.7: Schéma lineární regulace.....	25

Obr. 2.8: Průběh napětí v spojitém a nespojitém režimu.....	26
Obr. 2.9: Průběh generovaných spínacích signálů UC3844 a IR2110	28
Obr. 2.10: Průběh proudu tekoucího primárním a sekundárním vinutím.....	28
Obr. 2.11: Průběh napětí na sekundárním vinutí při PWM regulaci	28
Obr. 2.12: Graf závislosti zatěžovacích charakteristik pro různé hodnoty proudu.....	30
Obr. 2.13: Přední stěna zdroje	30
Obr. 2.14: Zadní stěna zdroje.....	31

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Porovnání lineárních a spínaných zdrojů	4
Tab. 2: Popis výstupů obvodu IR2110.....	24
Tab. 3: Měření VA charakteristiky pro výstup 10V při omezení proudu na 1A	29
Tab. 4: Měření VA charakteristiky pro výstup 10V při omezení proudu na 6A	29
Tab. 5: Měření VA charakteristiky pro výstup 22V při omezení proudu na 1A	29
Tab. 6: Měření VA charakteristiky pro výstup 22V při omezení proudu na 6A	29
Tab. 7: Seznam součástek.....	39

ÚVOD

V dnešní době je kladen velký důraz na efektivitu a ekonomičnost všech zařízení. To platí i při návrhu napájecích zdrojů. Klasické zdroje s transformátory jsou nahrazovány spínanými zdroji pro jejich nesporné výhody, které jsou rozebrány v této práci.

Spínané zdroje jsou moderní napájecí zdroje, které vyhlazené a usměrněné síťové napájecí napětí převádí na impulsy vysoké frekvence, které se následně opět usměrní a vyhladí a tím se získá výsledné výstupní napětí.

Cílem bakalářské práce je příprava podkladů a realizace laboratorního pulsního zdroje s výstupní lineární stabilizací. Na vstupu zdroje je umístěn nezbytný filtr kvůli odfiltrování rušivých impulsů a můstkový usměrňovač pro usměrnění napájecího napětí. Primární výkonovou část zdroje tvoří poloviční můstek s impulsním transformátorem. Pro řízení tohoto můstku jsou použity obvody UC3844 a IR2110. Zdroj umožňuje nastavení výstupního napětí a proudového omezení ve vhodných rozsazích.

Bakalářská práce je rozdělena na dvě hlavní kapitoly. V první kapitole jsou porovnány lineární a spínané zdroje a rozebrány jejich výhody a nevýhody. Dále je rozbor jednotlivých částí spínaných zdrojů, jako jsou usměrňovače, měniče a filtry. Druhá kapitola je zaměřena na praktický návrh laboratorního zdroje. Je zde vytvořen návrh základního zapojení, návrh plošného spoje včetně dimenzování a volby součástek. Dále jsou zde zpracovány hodnoty z měření včetně zobrazení výstupů v grafu. Na závěr kapitoly jsou umístěny fotografie sestaveného zařízení.

1 SPÍNANÉ ZDROJE

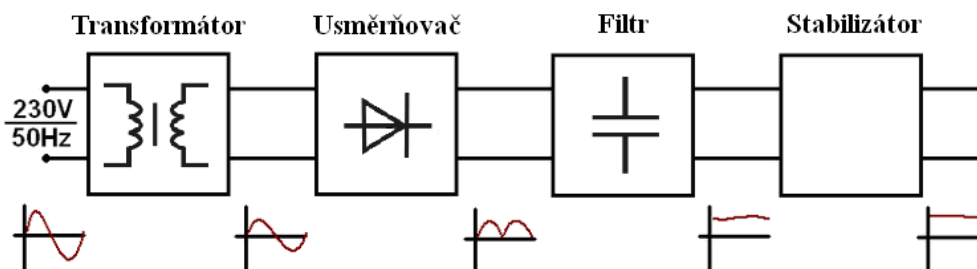
Lineární zdroje se používaly hlavně v 50. a 60. letech minulého století. Dnes se používají převážně na aplikacích s výkonem kolem 50 W, hlavně tehdy, je-li zapotřebí bezšumový zdroj.

Spínané zdroje jsou moderní náhradou síťových zdrojů s klasickými transformátory a začaly se objevovat s příchodem výkonných spínacích tranzistorů typu MOSFET, IGBT a jiné. Dnes už pro tento typ zdrojů existují i specializované integrované obvody, které pomáhají zlepšit spolehlivost a zjednodušit konstrukci. Spínané zdroje se také vyrábějí jako několik zdrojů o menším výkonu rozptýlených v jednotlivých částech zařízení. Dosahuje se tak zastupitelnosti při poruše a také snížení úbytků napětí v místě spotřeby.

Popularita spínaných zdrojů neustále roste a stávají se hlavní skupinou zdrojů na trhu. Umožňují výrobu kompaktních přístrojů s malými rozměry, hmotností a velkou účinností. Praktický návrh je však komplikovanější z hlediska náročnosti výběru a návrhu součástek. Použití spínaných zdrojů je vhodné již u zdrojů s výkonem okolo 20 W.

1.1 Porovnání lineárních a spínaných zdrojů

Lineární zdroje se skládají ze čtyř částí: transformátor, usměrňovač, filtr a stabilizátor. Na vstup transformátoru přivádíme síťové napájecí napětí 230 V, které je na výstupu sníženo dle převodu transformátoru tak, aby bylo dosaženo napětí o trochu vyšší, než je požadované – napětí je stále střídavé. Usměrňovač změní střídavé napětí na stejnosměrné. Z usměrňovače vystupují kladné půlvlny napětí, které filtr co nejvíce vyhladí. Stabilizátor zajistí, že se může měnit odebíraný proud, ale napětí zůstane stále stejné. Blokové schéma takového zdroje je na obr. 1.1.



Obr. 1.1: Blokové schéma lineárního stabilizovaného zdroje

Tyto zdroje nevysílají zpět do sítě rušivé napětí, ale dnes se kvůli svým výhodám více používají spínané zdroje.

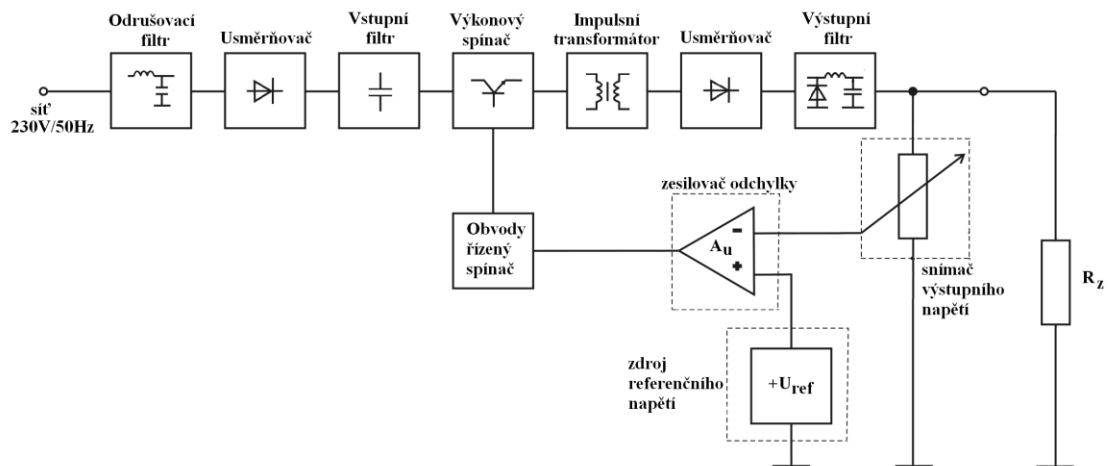
Jednou z hlavních předností spínaných zdrojů oproti klasickým lineárním zdrojům

je snížení výrobních nákladů a také jejich vysoká účinnost, zejména v případech omezeného výkonu dodávaného z baterií. Vysoká účinnost je zajištěna tím, že transformátor zdroje nepracuje se sítovým kmitočtem 50 Hz, ale transformuje napětí na kmitočty řádově desítky nebo stovky kHz. S vyšším kmitočtem se zvyšují nároky na jednotlivé součástky, jako jsou například výstupní filtrační kondenzátory. Tyto součástky musí spolehlivě pracovat i na vysokých kmitočtech a od toho se odvíjí i jejich cena. Právě díky klesající ceně roste hranice efektivní využitelnosti spínaných zdrojů.

Zlepšení účinnosti se dosahuje na pracovních kmitočtech v okolí 20 kHz, ale dnešní součástky umožňují i konstrukce na kmitočtech 100 kHz až 1 MHz s účinností až osmkrát vyšší než podobná zapojení s lineárními zdroji.

Funkce spínaného zdroje je přímo řízena zpětnou vazbou, výstupní napětí je stabilizováno a nemusí se dále upravovat. Spínané zdroje během provozu nepřetržitě sledují odebíraný proud a v závislosti na něm jsou regulovány. Tím je zdroj ochráněn před přetížením a také před zkratem na výstupu. Dojde-li k proudovému přetížení spínaného zdroje, je výstupní proud snížen na bezpečnou hodnotu. Rozměry oproti klasickým transformátorovým zdrojům jsou menší i při velkých výkonech. Při konstrukci jsou kladeny vysoké nároky na feritové části transformátoru, usměrňovací diody a také na výkonové tranzistory. Čím vyšší pracovní kmitočet, tím menší jsou rozměry a hmotnost transformátoru. Zvýší-li se např. z 50 Hz tisíckrát, rozměry transformátoru je možné zmenšit třicetkrát. Použití je nejčastější ve výpočetní technice, televizních přijímačích a nabíječkách. Účinnost běžných zdrojů je asi do 50 % podle typu aplikace, zatímco u spínaných zdrojů je 80% i vyšší.

Obr. 1.2 znázorňuje blokové schéma spínaného zdroje. Vstupní střídavé napětí přichází z rozvodné sítě přes nezbytný širokopásmový odrušovací LC filtr, na vstupu je usměrněno pomocí můstkového usměrňovače a vyhlazeno na vstupním kondenzátoru. Stejnoseměrné napětí je přivedeno na regulační výkonový spínací tranzistor, jehož zátěž je tvořena primárním vinutím transformátoru napětového měniče, pracujícího v ultrazvukové oblasti (desítky kHz). Impulsní proud procházející primárním vinutím transformátoru měniče indukuje v jeho sekundárním vinutí napětí, usměrňované rychlým diodovým výkonovým usměrňovačem a vyhlazované v obvodu výstupního filtru. Vyhlazené výstupní napětí U_s je porovnáváno s referenčním napětím U_{ref} , odchylka vhodným způsobem ovládá poměr intervalů T_a/T_b pracovní periody T_c . Zpětná vazba zapojená z výstupu do obvodu řídicího spínání hlídá stabilitu výstupního napětí.



Obr. 1.2: Blokové schéma spínaného zdroje (převzato z [3])

Protože rychlé spínání na vysokých kmitočtech je zdrojem rušení, musí být každý spínaný zdroj dobře odrušen od sítě. Na vstupu zapojený LC filtr zajišťuje toto odrušení a zabráňuje pronikání rušivých signálů ze zdroje zpět do sítě.

Elektronický spínač je řízen ve smyčce zpětné vazby tak, aby výstupní napětí bylo konstantní. Za spínačem je obdélníkové napětí o frekvenci desítek kHz a amplitudě $230 \cdot \sqrt{2}$ V. Toto napětí je transformováno impulsním transformátorem s feritovým jádrem na požadovanou velikost, je usměrněno Schottkyho diodami a filtrováno výstupním kondenzátorem nebo LC filtrem. Zdroj zpětné vazby je stejný jako u lineárních zdrojů, navíc je zde obvod buzený spínačem, který mění stejnosměrné napětí na obdélníkové napětí. Pokud by se vynechala v zapojení vstupní část, vzniklo by zapojení stejnosměrného měniče.

Srovnání parametrů lineárních a spínaných zdrojů je uvedeno v následující tabulce. S rostoucím kmitočtem součástek se poměr parametrů mění ve prospěch spínaných zdrojů.

Tab. 1: Porovnání lineárních a spínaných zdrojů (převzato z [1])

Parametr	Jednotka	Lineární zdroj	Spínaný zdroj
Účinnost	[%]	40 - 50	80
Výkon/váha	[W/kg]	20	100
Výkon/objem	[W/cm ³]	0,05	0,2
Výstupní zvlnění	[mV]	5	50
Šumové napětí	[mV]	50	200
Odezva na skok	[ms]	0,02	1
Doba náběhu	[ms]	2	20
Cena		roste s výkonem	přibližně konstantní

1.2 Rozdělení spínaných zdrojů

Spínané zdroje lze rozdělit do dvou základních skupin: zdroje pracující s kmitočtem sítě a zdroje pracující s kmitočtem vyšším než síťovým.

1. Zdroje pracující s kmitočtem sítě

- bez transformátoru - tyto zdroje se dají ještě rozdělit podle druhu usměrňovače na jednočinné a dvojčinné. Jednočinné stabilizátory pracují do kondenzátorového filtru a jsou vhodné pro zdroje s vyšším výstupním napětím a malých výstupních proudů. Dvojčinné stabilizátory pracují do filtru začínajícího cívkou a jsou vhodné pro zdroje nižších výstupních napětí a velkých proudů.
- s transformátorem - jako spínač je použit triak, který je fázově řízený. Spotřebič je transformátor, který má na sekundární straně usměrňovač pracující do filtru LC. Výstupní napětí je přes dělič přivedeno na diodu optočlenu, která ovládá fototranzistor. Ten ovládá vstup obvodu pro fázové řízení triaku. Je-li výstupní napětí menší než požadované, prochází diodou menší proud a fototranzistor se přivře. Na vstupu obvodu pro řízení je nižší napětí. To má za následek, že napětí na výstupním filtračním kondenzátoru se zvýší nebo naopak.
 - pulsní regulace v primární části
 - pulsní regulace v sekundární části

2. Zdroje pracující s kmitočtem vyšším než síťovým

využívají impulsní regulaci. Výstupní napětí U_s je stabilizováno zásahy regulačního členu pouze v určitých, časově omezených intervalech T_a . Impulsní regulace umožňuje výrazně redukovat výkonovou ztrátu na regulačním členu. Regulační prvek (tranzistor), pracuje jako řízený spínač. Proud jím prochází pouze po určitý interval pracovního cyklu. Jelikož se tranzistor vždy maximálně otevře a pak úplně zavře, tak je výkonová ztráta malá. Tyto zdroje lze dále rozdělit podle typu měniče na:

- jednočinné měniče
- dvojčinné měniče
- dvojitě propustné měniče

Obecně platí, že napětí z rozvodné sítě 230 V (50 Hz) je nejdříve usměrněno můstkovým usměrňovačem. Kondenzátor C je filtrační kondenzátor a po většinu času představuje zdroj napětí pro měnič. Musí mít dostatečnou kapacitu, aby udržel napětí na dostatečné úrovni i v době, kdy napětí prochází nulou.

Níže jsou popsány nejdůležitější části spínaných zdrojů, jako jsou usměrňovače, měniče a stabilizátory.

1.3 Usměrňovače

V oblasti napájecích zdrojů je používáno několik zapojení usměrňovačů podle požadovaných napětí, proudů a zvlnění. Usměrňovač je elektrické zařízení, které je

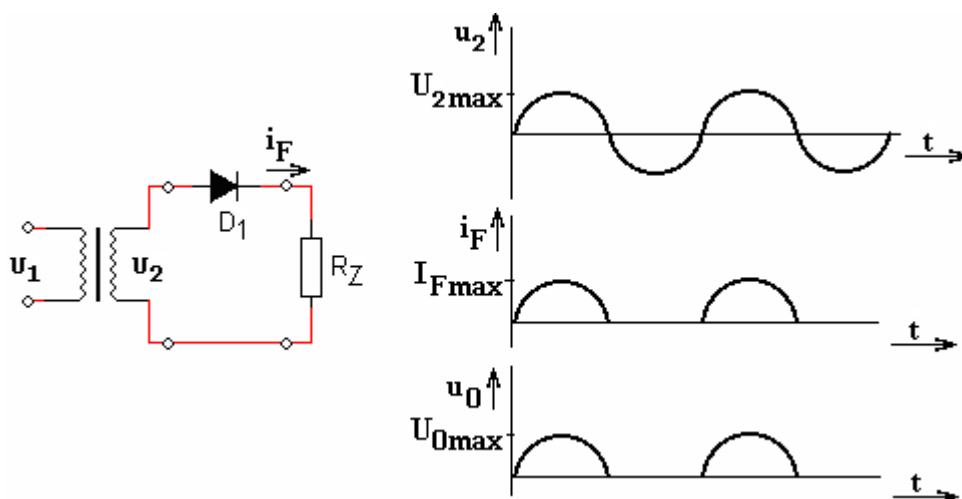
používáno k přeměně střídavého napětí na stejnosměrné. Usměrňovače jsou nejčastěji používané na vstupu zařízení, protože k distribuci elektrické energie je využíváno střídavé napětí, ale u většiny elektrických obvodů je využíváno stejnosměrné napětí. Jednotlivé typy jde rozdělit:

1. pro síťový kmitočet 50 Hz
 - jednocestný
 - dvoucestný
 - můstkový
 - zdvojovač
 - násobiče
2. pro vyšší kmitočty okolo 100 kHz
 - jednocestný
 - dvoucestný.

Základním prvkem usměrňovačů je dioda. Dioda má vysoký odpor v závěrném směru a téměř nulový odpor v propustném směru. Na výstupu usměrňovače je stejnosměrné pulsní napětí, kvůli jeho vyhlazení se připojuje paralelně se zátěží filtrační kondenzátor.

1.3.1 Jednocestný usměrňovač

Je využíván v obvodech s vysokým napětím, ale nízkým proudem. Jde o nejjednodušší zapojení, obvod obsahuje pouze jednu diodu, propouští pouze jednu půlvlnu. Na obr. 1.3 je schéma a průběhy napětí a proudu jednocestného usměrňovače s odporovou zátěží.

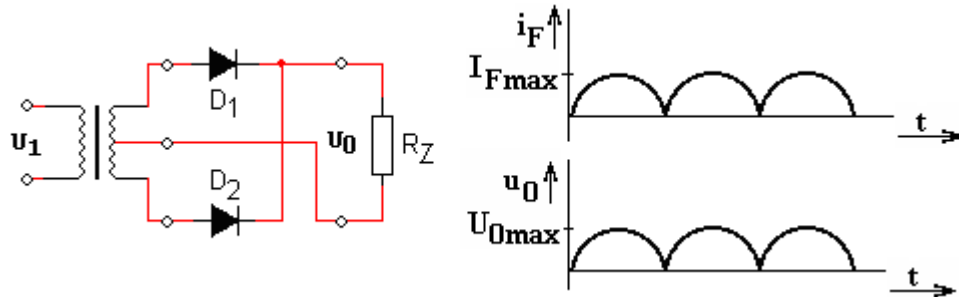


Obr. 1.3: Jednocestný usměrňovač

Výhodou tohoto zapojení je jednoduchost a možnost přímého připojení na síť. Nevýhodou je velké zkreslení.

1.3.2 Dvoucestný usměrňovač

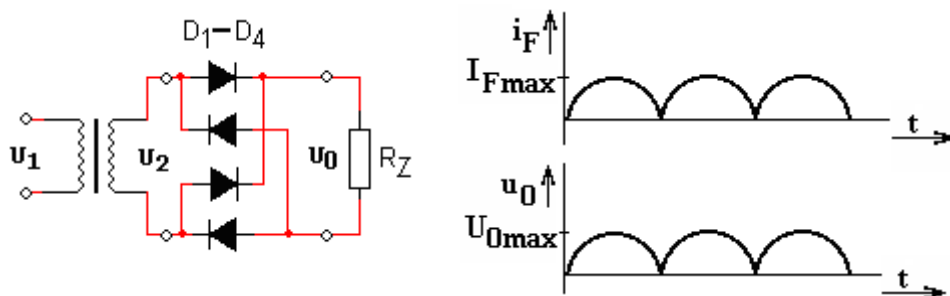
Je využíván v obvodech s nízkým napětím, ale velkým proudem. Má malé zvlnění. Obvod obsahuje dvě diody, musí být připojen na transformátor s dvojitým sekundárním vinutím, propouští obě půlvlny vstupního napětí. Na obr. 1.4 je schéma a průběhy napětí a proudu jednocestného usměrňovače s odporovou zátěží



Obr. 1.4: Dvoucestný usměrňovač

1.3.3 Můstkový usměrňovač

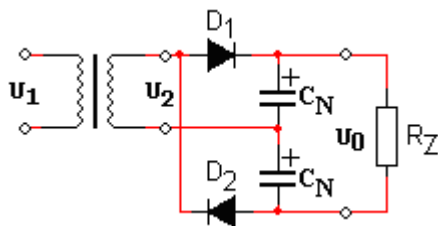
Můstkový usměrňovač neboli Grätzův můstek je nejpoužívanějším zapojením usměrňovače a obsahuje čtyři diody. Je využíván v obvodech se středním napětím, velkým proudem a má malé zvlnění. Jeho výhodou je možnost pouze jednoho sekundárního vinutí transformátoru. Na obr. 1.5 je schéma a průběhy napětí a proudu můstkového usměrňovače s odporovou zátěží



Obr. 1.5: Můstkový usměrňovač

1.3.4 Zdvojovač

Zapojení zdvojovače obsahuje dva jednocestné usměrňovače svým vstupem zapojené paralelně a svým výstupem zapojené sériově. Obě poloviny se navrhují vždy stejné. Zdvojovač zatěžuje transformátor symetricky, tudíž nevzniká stejnosměrné sycení jeho jádra. Na obr. 1.6 je schéma Greinacherova zdvojovače napětí.



Obr. 1.6: Greinacherův zdvojovač napětí

V první periodě napájecího napětí se nabije první kondenzátor a v druhé periodě se k jeho napětí přidá napětí dalšího kondenzátoru. Zapojení je vhodné pro zátěže o velkém napětí, ale malém proudu.

1.3.5 Násobiče napětí

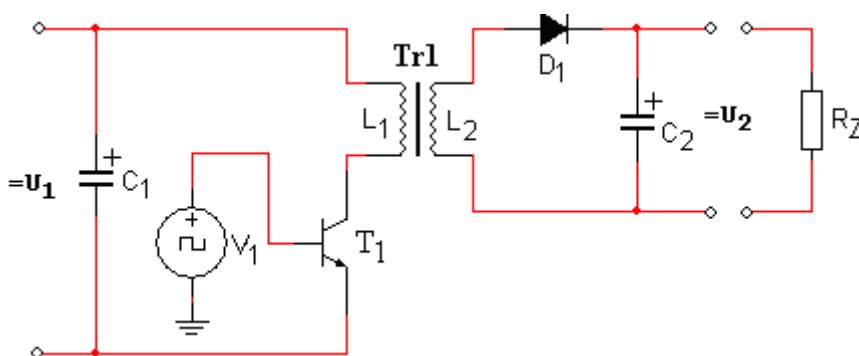
Násobič napětí je měnič napětí (zdvojovač) sestavený z diod a kondenzátorů. První půlperioda střídavého proudu nabíjí kondenzátory paralelně a druhá (opačná) půlperioda je v sériovém zapojení vybíjí. Pro každou dvojici kondenzátoru s diodou dostaneme na výstupu dvojnásobek napětí. Pro další zvyšování napětí se dá tento obvod kaskádovitě zapojovat. Násobiče napětí jsou využity tam, kde je potřeba vysokého stejnosměrného napětí, ale malý odběr proudu. Dosahují velkého zvlnění.

1.4 Měniče

Měniče jsou nejdůležitější částí impulsně regulovaných napájecích zdrojů a jsou na ně kladeny vysoké požadavky.

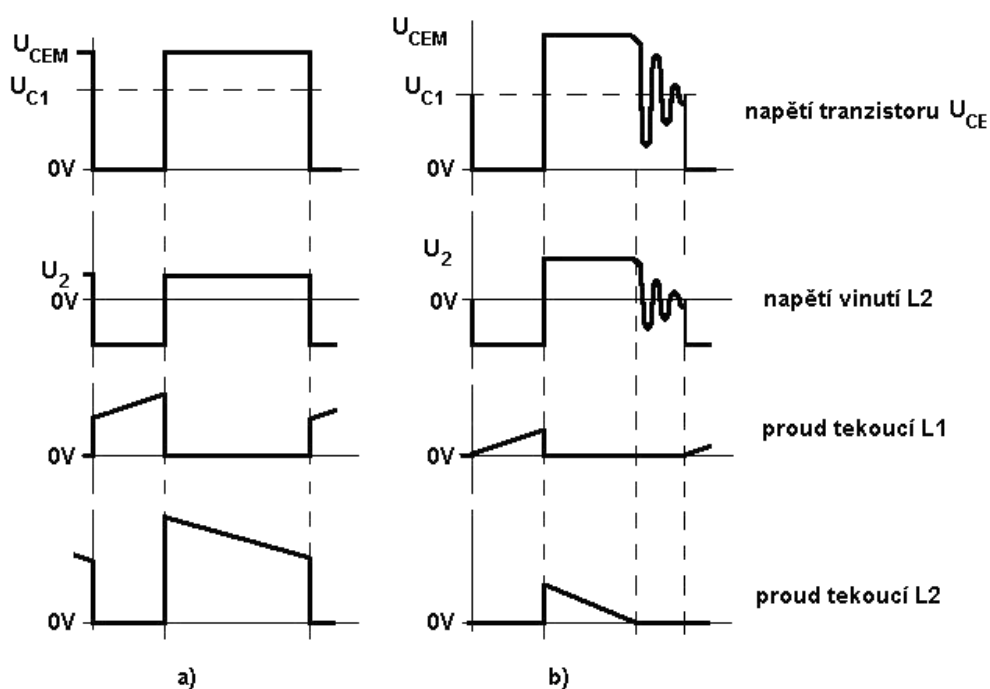
1.4.1 Jednočinný měnič

Patří k nejjednodušším typům impulzních zdrojů. Pro přeměnu energie je použit transformátor se vzduchovou mezerou a jeden výkonný tranzistor. Transformátor se chová spíše jako tlumivka s více vinutími, proto není potřeba tlumivka na výstupu. Pracovní kmitočet měniče je mnohem vyšší než kmitočet napětí sítě. Na obr. 1.7 je schéma jednočinného blokujícího měniče.



Obr. 1.7: Základní zapojení jednočinného měniče

Jeden pracovní cyklus měniče je složen z několika částí. V první části sepne tranzistor T_1 a připojí primární vinutí transformátoru L_1 ke kondenzátoru C_1 . Proud vinutím se postupně zvětšuje, zvětšuje se i magnetické pole v jádře transformátoru. Po určité době musí řídicí elektronika rozepnout tranzistor T_1 . Kvůli zachování procházejícího proudu vybudí magnetické pole jádra vinutí L_1 ve vinutí L_2 napětí opačné polarity. Nyní vinutím L_1 prakticky neprochází proud, energie magnetického pole přechází přes L_2 a D_1 do zátěže. Výstupní napětí zdroje je dáno poměrem závitů vinutí L_1 a L_2 , velikostí napájecího napětí na primární straně a poměrem časů, po něž je tranzistor otevřen a uzavřen. Průběhy napětí a proudu v některých místech měniče jsou na obr. 1.8a.

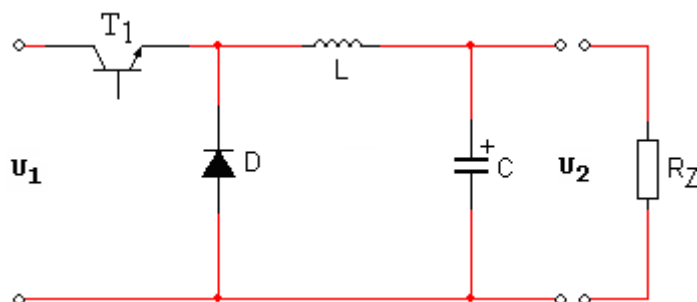


Obr. 1.8: Průběhy napětí v některých místech jednočinného měniče (převzato z [1])

Pokud je opakovací kmitočet měniče nízký nebo je zdroj málo zatížen, může dojít k tomu, že magnetické pole v jádře zanikne dříve, než se opětovně sepne tranzistor T_1 a na nezatíženém vinutí transformátoru vzniknou tlumené kmitání. Průběhy napětí v měniči jsou na obr. 1.8b. Tento stav není příliš nebezpečný, protože amplituda kmitů je menší než pracovní rozkmit napětí. Zmenšuje se však účinnost měniče, a proto se tento způsob činnosti v rozsahu pracovní zátěže nedoporučuje.

1.4.2 Propustný snižující měnič

Na obrázku 1.9 je zobrazeno schéma propustného snižujícího měniče.

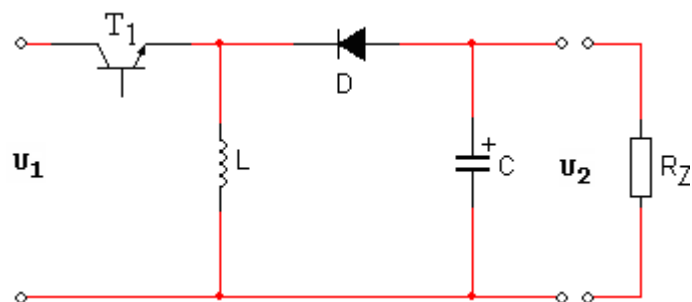


Obr. 1.9: Propustný snižující měnič

V cívce L se akumuluje energie magnetického pole ve formě elektrického pole. Proud procházející zátěží se postupně zvětšuje, při určitém napětí rozezne spínač (tranzistor T_1) a potom se stává zdrojem energie pro zátěž akumulací cívka L a kondenzátor C . Napětí na cívce L podle Lencova pravidla změni svoji polaritu, nastává přechodný děj, při němž se postupně proud zátěží i napětí na zátěži zmenšuje. Při snížení pod určitou nastavenou hodnotu sepne spínač a děj se opakuje.

1.4.3 Blokující invertující měnič (buck boost)

Na obrázku 1.10 je zobrazeno schéma blokujícího invertujícího měniče.

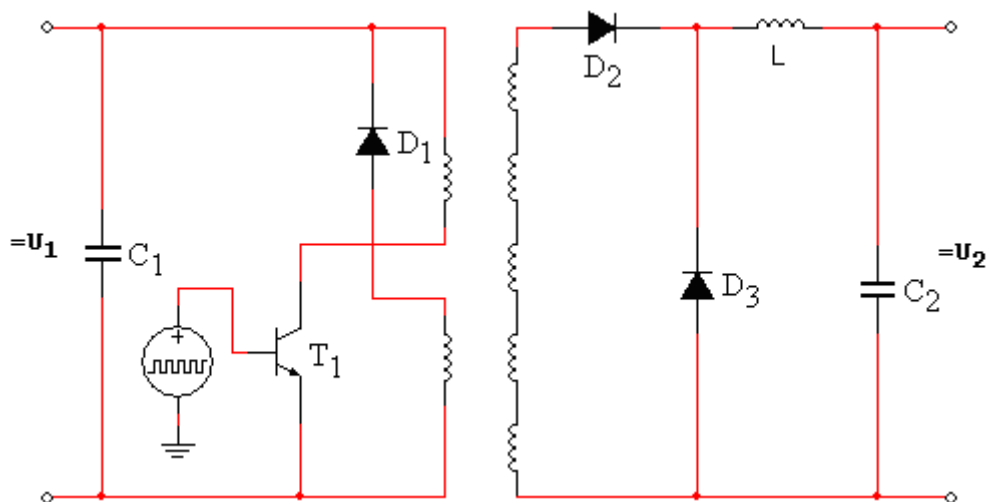


Obr. 1.10: Blokující invertující měnič

V době T_a je akumulací cívka L součástí vstupního obvodu měniče a hromadí se v ní energie. Proud kondenzátorem C téměř lineárně narůstá. Po rozpojení spínače (tranzistor T_1) se odpojí cívka od vstupního napětí. Podle Lencova pravidla se změni polarita na cívce L (sepne se dioda D a obvod se uzavře přes R_z). Na výstupních svorkách měniče bude napětí opačné polarity.

1.4.4 Propustný DC/DC měnič s impulzním transformátorem

Na obrázku 1.11 je propustý DC/DC měnič s impulzním transformátorem.



Obr. 1.11: Propustný DC/DC měnič

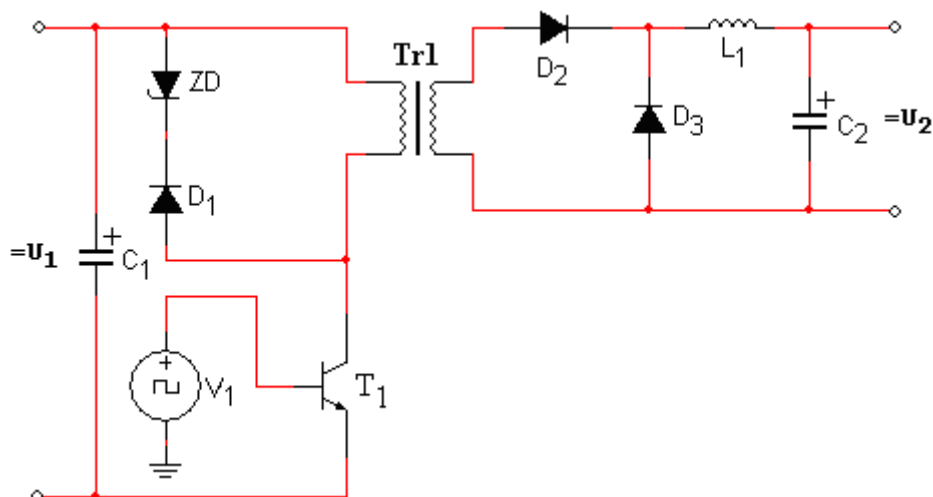
V časovém intervalu, kdy je sepnutý tranzistor T_1 , prochází proud primárním vinutím impulzního transformátoru. V sekundárním vinutí transformátoru se indukují napětí a uzavírá se obvod přes diodu D_2 , cívku L a přes zátěž paralelně s kondenzátorem C_2 na výstupu.

Proud cívku L se lineárně zvětšuje a napětí na výstupu také roste. Když napětí na výstupu překročí určitou velikost, spínač rozezne a nastává časový okamžik t_b – na akumulaci cívce L se indukují napětí opačné polarity, aby zůstal zachován směr proudu. Tím se sepne dioda a zdrojem energie pro zátěž je akumulaci cívka L a výstupní kondenzátor C_2 . Akumulovaná energie v jádře transformátoru se během rozeznutí spínače nespotebovává a je nutno ji odvést, aby nedošlo k přesycení jádra transformátoru. K tomu slouží demagnetizační dioda.

Měnič je jednoduchý a je vhodný pro větší výkony, protože nedochází ke stejnoměrné magnetizaci jádra. Tranzistor T_1 je značně napětově namáhán, zejména při vyšších proudech, proto se nehodí pro výkony větší než cca 200W.

1.4.5 Jednočinný propustný měnič s demagnetizací pomocí Zenerovy diody

Na obrázku 1.12 je zobrazeno schéma jednočinného propustného měniče s demagnetizací pomocí Zenerovy diody.

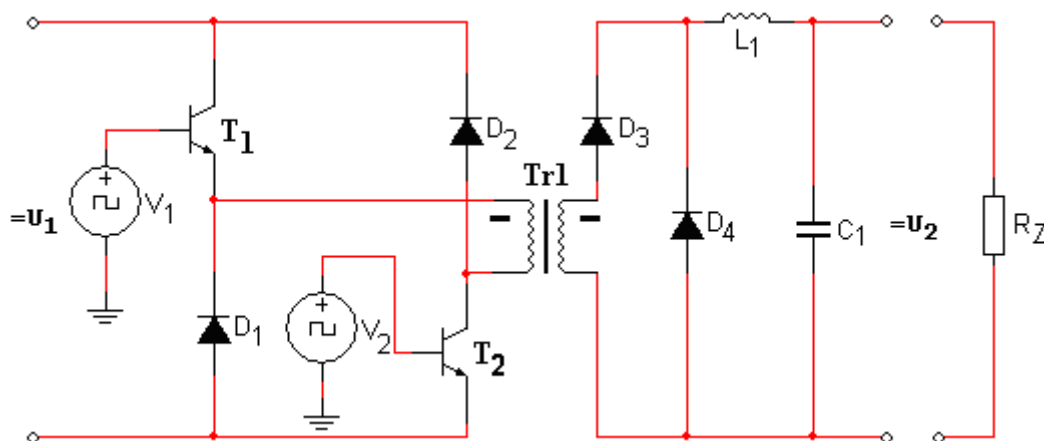


Obr. 1.12: Jednočinný propustný měnič s demagnetizací pomocí Zenerovy diody

Akumulovaná energie na cívce L_1 se vypočte pomocí vztahu $W=(1/2)LI^2$. Princip je stejný jako u měniče s demagnetizačním vinutím. Rozdíl spočívá ve způsobu demagnetizace jádra transformátoru. V tomto případě se po rozpojení spínače indukuje napětí opačné polarity, tím se uzavírá obvod přes diodu D_1 a Zenerovu diodu ZD. Energie se v Zenerově diodě mění na teplo.

1.4.6 Jednočinný můstkový propustný měnič

Na obrázku 1.13 je schéma jednočinného můstkového propustného měniče.



Obr. 1.13: Jednočinný můstkový propustný měnič

Pracuje stejně jako jednočinný propustný měnič. Demagnetizační vinutí není potřebné, protože po vypnutí tranzistoru se cesta magnetického proudu uzavírá přes demagnetizační diody. V době sepnutí tranzistoru teče proud ze sekundárního vinutí přes D_3 a T_1 do zátěže. V době rozepnutí tranzistoru se změnila polarita napětí na akumulační cívce L_1 a uzavírá se obvod přes diodu D_4 .

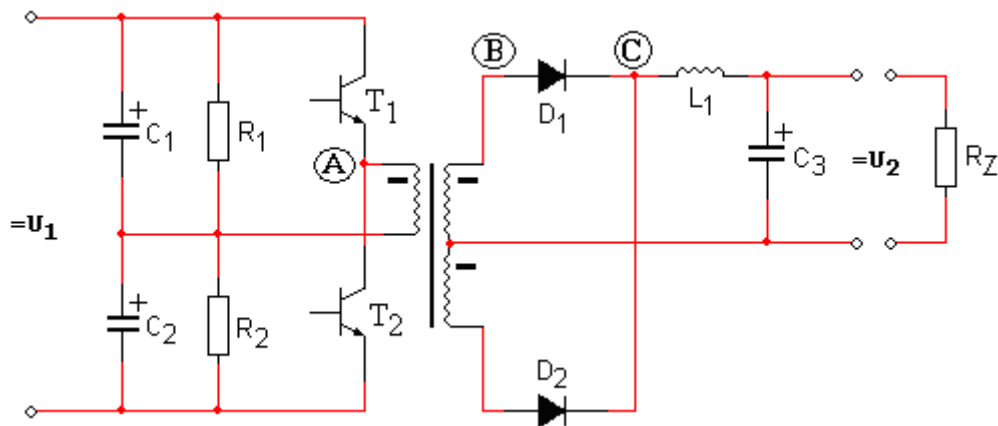
Měnič je vhodný i pro velké výkony (1 až 10 kW) i při relativně vysokých vstupních napětích (usměrněnou 1 fázovou nebo 3 fázovou síť). Tranzistor je namáhán

po vypnutí menším napětím, než u měniče s demagnetizačním vinutím. Měnič má 2 tranzistory v sérii - větší ztráty na spínači. Je třeba zajistit dva shodné budící signály, avšak galvanicky oddělené.

1.4.7 Dvojčinný měnič

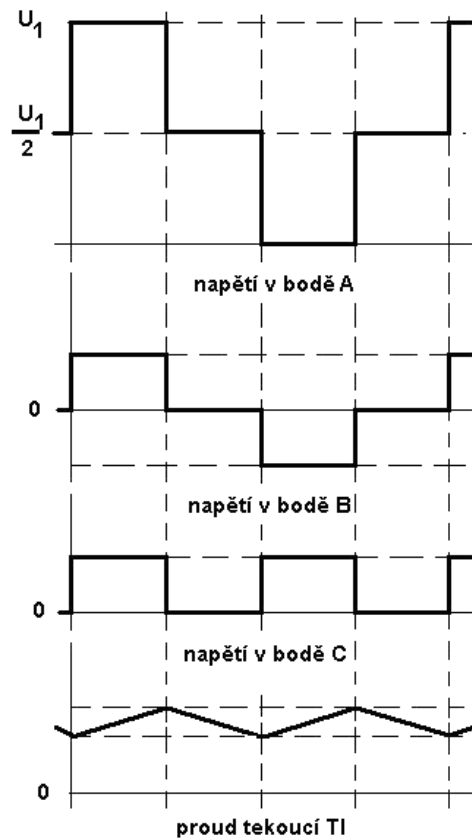
Zapojení dvojčinného propustného měniče je složitější a je vidět na obr. 1.14.

Oba kondenzátory C_1 a C_2 slouží jako zásobník energie (u jednočinného měniče kondenzátor C_1). Rezistory R_1 a R_2 udržují přibližně polovinu napájecího napětí ve středu děliče. Do středu děliče je připojen jeden konec primárního vinutí $Tr1$, druhý konec může být připojen přes tranzistory T_1 a T_2 na kladné nebo záporné napájecí napětí. Na sekundární straně je dvojčinný usměrňovač a tlumivka L_1 .



Obr. 1.14: Zapojení dvojčinného propustného měniče

Tranzistory T_1 a T_2 střídavě připojují primární vinutí na kladné nebo záporné napájecí napětí. Toto napětí se přímo transformuje na sekundární vinutí. Transformátor může být podstatně menší, protože se v něm nehromadí tolik energie ve formě magnetického pole jako u blokujícího měniče. Tranzistory jsou vždy otevřeny po dobu kratší než je polovina periody, a proto na katodách diod D_1 a D_2 dostaneme pulsuující stejnosměrné napětí, přičemž šířka impulsů odpovídá délce sepnutí T_1 nebo T_2 . Průběhy napětí v některých místech měniče jsou uvedeny na obr. 1.15.



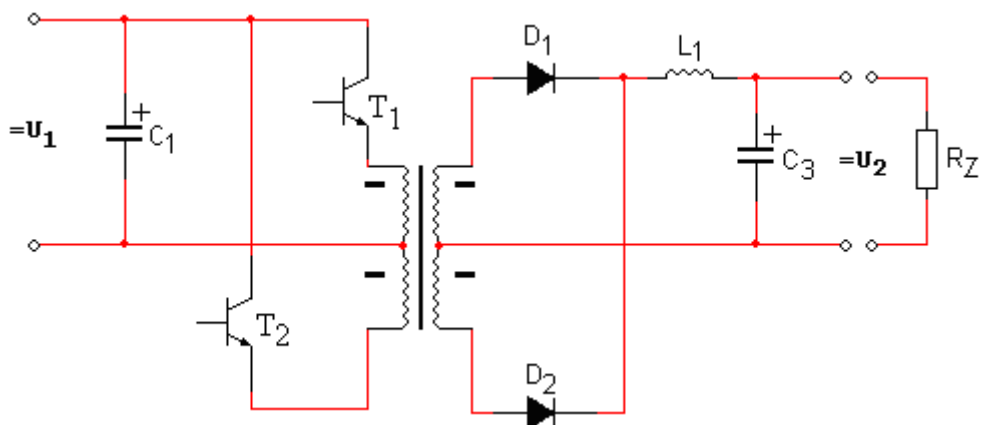
Obr. 1.15: Průběhy napětí v některých místech dvojčinného měniče (převzato z [1])

Je-li u zdroje několik výstupních napětí, jsou všechny tlumivky navinuty na společném jádře. Tím se zajistí přibližně stejný poměr výstupních napětí i při rozdílné zátěži v jednotlivých větvích. Počet závitů a polarita vinutí musí být úměrná výstupním napětím.

I tento typ měniče vyžaduje určitou minimální zátěž pro správnou funkci. Doporučuje se asi 10 %, což nemusí být vždy splnitelné. Zpravidla je však dostačující již několikaprocentní zátěž. Nevýhoda je, že při zkratování výstupu se zdroj většinou zničí.

1.4.8 Dvojčinný blokující měnič

Na obrázku 1.16 je zobrazeno schéma dvojčinného blokujícího měniče.

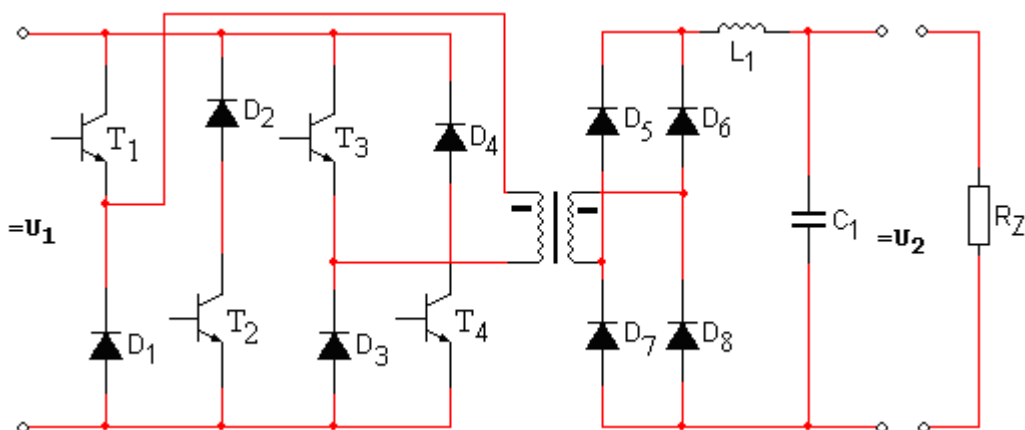


Obr. 1.16: Základní zapojení blokujícího měniče

Tento typ měniče obsahuje dva spínací tranzistory T_1 a T_2 , jádro transformátoru se zmagnetizovává do obou polarit. Výsledkem je, že jádro přeneše větší výkon než u jednočinného měniče, ale protože nevzniká stejnosměrná složka, nemusí být použita vzduchová mezera. Zapojení je složitější, ale je vhodné pro velké výstupní výkony, má malé zvlnění výstupního napětí a větší účinnost.

1.4.9 Dvojčinný můstkový propustný měnič

Na obrázku 1.17 je schéma dvojčinného můstkového propustného měniče.



Obr. 1.17: Dvojčinný můstkový propustný měnič

Budící obvody musí zajistit, že jsou současně sepnuty tranzistory T_1 , T_4 a T_2 , T_3 v jiných okamžicích. Mezi spínáním těchto dvojic musí být časový interval, kdy není sepnutý žádný tranzistor. Kdyby se spínací doby částečně překrývaly, sepnuté tranzistory by zkratovaly vstupní napětí. Při sepnutí T_1 , T_4 prochází primárním vinutím proud a v sekundárním vinutí se indukuje napětí opačné polarity, tím se sepnou diody D_7 a D_6 a uzavírá se obvod přes akumulaciční tlumivku, kondenzátor a zátěž paralelně.

V dalším intervalu jsou všechny tranzistory rozepnuté, na primární straně transformátoru napětí změni svou polaritu. Sepnou se diody D_1 , D_4 a energie se z jádra transformátoru vrací do zdroje. Na sekundární straně se také změni polarita napětí na

cívce, otevřou se diody D_5 , D_6 , D_7 , D_8 a energie do zátěže je dodávána z cívky a kondenzátoru.

V dalším okamžiku jsou sepnuty T_2 a T_3 . Primárním vinutím transformátoru prochází proud opačným směrem. V sekundárním vinutí se indukuje napětí, které otevírá D_5 a D_8 . Přes akumulaci cívku a přes zátěž prochází proud.

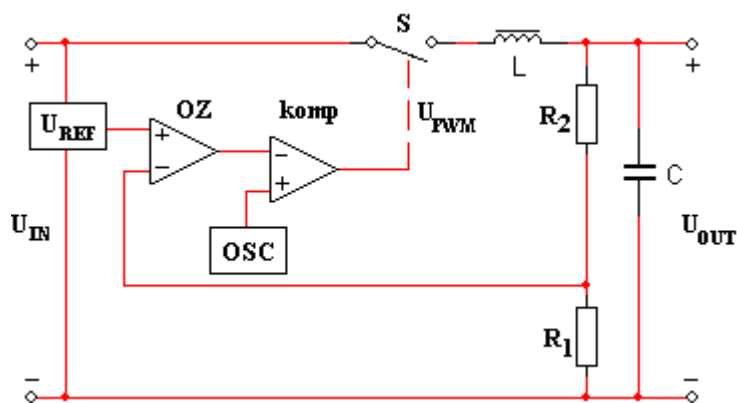
V dalším intervalu jsou opět všechny tranzistory rozepnuty. Energie z transformátoru se vrací přes D_1 a D_4 . Na sekundární straně prochází energie z cívky a kondenzátoru.

Výhodou je poloviční počet závitů a stejné jádro, tlustší vodiče, větší možný přenášený výkon.

Nevýhodami je složitější buzení (ŘO), přibližně 4x větší hysterezní ztráty v jádře, je nutné zajistit dokonalou symetrii buzení, jinak dojde k stejnosměrné magnetizaci jádra.

1.5 Pulzně šířková modulace

PWM (Pulse Width Modulation) vychází z porovnání napětí výstupního a z napětí interního oscilátoru, z toho je odvozeno chybové napětí. Ze vstupního napětí je odvozeno referenční napětí U_{REF} , které je přivedeno na neinvertující vstup zesilovače chybového napětí OZ. Na invertující vstup zesilovače je přivedeno vydělené výstupní napětí U_{OUT} . Vždy platí, že $U_{REF} < U_{IN}$. Na obr. 1.18 je blokové schéma zdroje s PWM.



Obr. 1.18: Zdroj s pulzně šířkovou modulací

OZ zesiluje odchylku napětí U_{OUT} od napětí U_{REF} a získáváme analogový signál U_{ERR} . Tento analogový signál U_{ERR} se porovnává s pilovitým napětím U_{OSC} , které je generováno v OSC. Výsledkem tohoto porovnání je signál, který ovládá spínač S. Je-li pilové napětí oscilátoru vyšší než chybové napětí, signál má hodnotu logické jedničky H a sepne se spínač S. Logická jednička trvá, dokud se napětí U_{OUT} nezvýší natolik, že na uzlu mezi R_1 a R_2 bude napětí vyšší než U_{REF} .

Potom se komparátor překloupí na hodnotu logické nuly (L) a rozepíná se spínač S. Kondenzátor C se dobíjí na potřebnou hodnotu U_{OUT} . Nevýhodou nabíjení je tvar

signálu U_{PWM} . Tento signál má proměnnou frekvenci i střidu, takže filtrace LC je různě účinná.

1.6 Stabilizátory napětí

Stabilizátory napětí jsou elektronické obvody, které umožňují stabilizovat výstupní napětí nebo proud. Jedná se o zapojení diskretních součástek nebo o elektronickou součástku na principu integrovaného obvodu. Stabilizátory musí stabilizovat výstupní veličiny při změnách vstupního napětí, teploty okolí a také při změně výstupní zátěže.

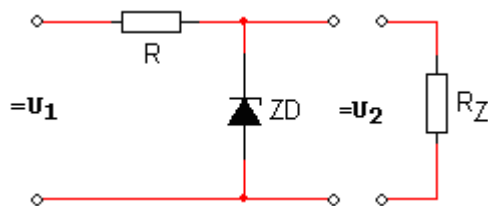
Stabilizátory také pracují jako filtry, více či méně snižují střídavou složku výstupního napětí.

Stabilizátory dělíme podle principu funkce na:

- stabilizátory napětí nebo proudu
- parametrické
- lineární
- kladné nebo záporné
- sériové nebo paralelní zapojení.

1.6.1 Parametrické stabilizátory

Funkce je založena na principu možného rozdílu mezi stejnosměrným a dynamickým odporem stabilizačního prvku v pracovním bodě. Pokud je dynamický odpor v pracovním bodě mnohem menší než stejnosměrný, jedná se o parametrický stabilizátor napětí, pokud je dynamický odpor v pracovním bodě stabilizačního prvku mnohem větší než stejnosměrný, jedná se o parametrický stabilizátor proudu. Na obr. 1.19 je parametrický (nelineární spojitý) stabilizátor napětí se Zenerovou diodou.

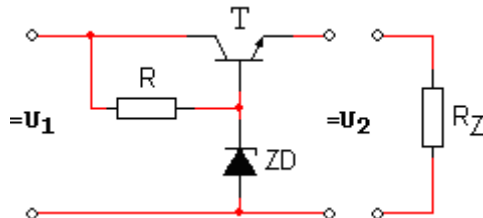


Obr. 1.19: Parametrický stabilizátor napětí

Proud protékající Zenerovou diodou musí ležet mezi maximálním proudem a minimálním proudem Zenerovy diody. Pokud se odpor R nahradí zdrojem konstantního proudu, činitel stabilizace se výrazně zvýší. Zdrojem konstantního proudu může být tranzistor v zapojení SB, dioda použita v závěrném směru. Nevýhoda je, že Zenerovou diodou musí protékat poměrně velký proud.

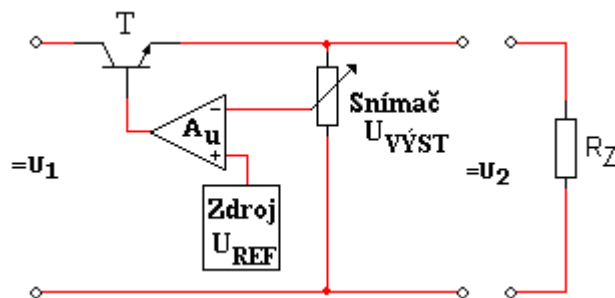
1.6.2 Zpětnovazební stabilizátory

Na obr. 1.20 je zdokonalený stabilizátor s výstupním tranzistorem. Pro regulaci je použit regulační tranzistor zapojený jako emitorový sledovač. Užívají se výkonové tranzistory umožňující větší odběr, v daném případě se stabilizuje napětí mezi bází a zemí. Proud do báze je malý a odpor R může být větší. Tím je vyšší i činitel stabilizace.



Obr. 1.20: Stabilizátor s výstupním tranzistorem

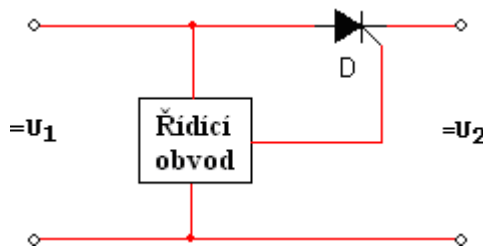
Zpětnovazebním obvodem je napěťová regulační smyčka se zápornou zpětnou vazbou (elektronický regulační obvod). Zesilovač zesiluje odchylku mezi referenční hodnotou a skutečnou hodnotou výstupního napětí a otevírá nebo přivírá výstupní výkonový tranzistor. Na obr. 1.21 je blokové schéma zpětnovazebního stabilizátoru napětí.



Obr. 1.21: Blokové schéma zpětnovazebního stabilizátoru napětí

1.6.3 Řízené stabilizátory

Na obr 1.22 je blokové schéma řízeného stabilizátoru s tyristorem.



Obr. 1.22: Blokové schéma řízeného stabilizátoru

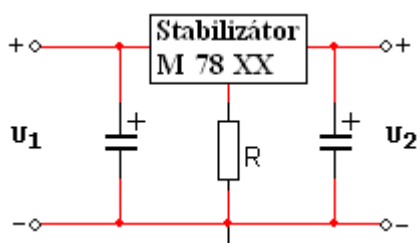
Pokud jsou místo usměrňovacích diod použity tyristory, lze velikost usměrněného napětí plynule řídit od nuly do maximální hodnoty. Otvírání tyristoru zajišťují řídicí obvody. Tyristor je podle použitého typu schopen usměrňovat kladné nebo záporné

půlplyny střídavého napětí od okamžiku, kdy řídicí elektroda obdrží impuls pro otevření tyristoru do propustného stavu. Tento impuls lze odvozovat od střídavého napětí, které se usměrňuje a pomocí RC článku jde časově posouvat - fázově řídit tyristor.

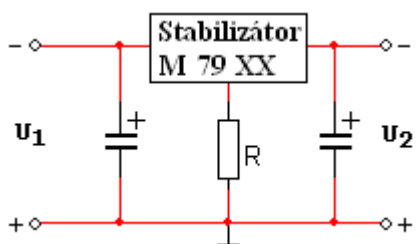
1.6.4 Stabilizátory s IO

Nejčastěji používané jsou obvody řady 78xx pro stabilizaci kladného napětí a stabilizátory řady 79xx pro stabilizaci záporného napětí. Tyto stabilizátory se dále dělí na výkonové a na stabilizátory s proměnným napětím jako např. LM117. Nejpoužívanější IO pro stabilizaci napětí je obvod MAA723.

Stabilizátory musí být na vstupu a na výstupu opatřeny pomocnými kondenzátory kvůli nebezpečí vzniku oscilací. Hodnoty určuje výrobce. Na obr. 1.23 a 1.24 jsou schémata kladného a záporného stabilizátoru v jejich obvyklých aplikacích.



Obr. 1.23: Kladné napětí se 78xx



Obr. 1.24: Záporné napětí se 79xx

Kladné stabilizátory se nejčastěji užívají pro získávání kladných napětí a záporné stabilizátory pro získávání záporných napětí.

1.7 Rušivé vyzařování

Tam, kde dochází k rychlým změnám napětí nebo proudu, vzniká rušivé vyzařování. Mezi přirozené zdroje rušení se řadí elektrické výboje v ovzduší, prudké změny zemského elektrického i magnetického pole (elektromagnetické bouře, polární záře atd.) a elektromagnetická vlnění z kosmických těles. U spínaných zdrojů je rušivé kmitočtové pásmo poruch v rozsahu od 0,1 Hz až 30 MHz. Tyto zdroje produkují souvislé rušivé spektrum v širokém kmitočtovém rozsahu.

Základní předpoklad pro zmenšení rušivého vyzařování je síťový filtr. Pro

zmenšení rušivého vyzařování jde také použít kvalitní kovovou skříň nebo vnitřní stínění funkčních bloků kovovými fóliemi. Napájecí přívody je vhodné blokovat na obou stranách keramickými kondenzátory. Propojovací kabely mezi jednotlivými díly se používají co nejkratší a stíněné. Velkou úroveň rušivých signálů na ostatních propojovacích vodičích jde omezit protažením svazku vodičů nebo jednotlivých drátů feritovým toroidem a vytvořením 2 až 5 závitů.

Vazba mezi zdrojem a příjemcem může být:

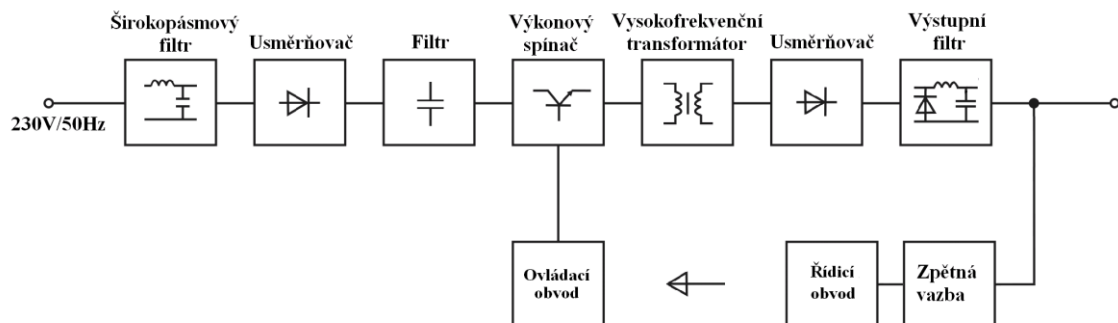
- galvanická: vzniká na společných vodičích (nejčastěji vodiče napájecí nebo uzemňovací). Při průtoku proudu, který je zdrojem rušení (např. impulsy ze střídačového zdroje, hodinového oscilátoru, apod.), vzniká na odporu a při vyšších kmitočtech i na indukčnosti vodiče parazitní napětí, které se dostává do rušeného obvodu. Tento obvod musí mít s rušícím obvodem část společného vedení. Je typická pro přenos rušivých signálů v rámci jednoho zařízení
- kapacitní: vzniká mezi vodiči vedenými blízko sebe, hlavně pak mezi vodiči vedenými paralelně ve větších délkách, např. v kabelech nebo na deskách plošných spojů.
- induktivní: tam, kde rušící proud protéká smyčkou a rušený obvod obsahuje také smyčku (prostorově blízko). Čím větší je plocha obou smyček, tím silnější je vazba. Vazba také vzniká, když přijímací smyčkou prochází rozptylové magnetické pole transformátoru nebo tlumivky.
- elektromagnetická: působí šíření elektromagnetické vlny buď po vedení nebo volným prostorem. Jako vedení slouží elektromagnetické vlně elektrovodná síť, napájecí vodiče, někdy i vodiče uzemňovací nebo signálové (které přenášejí žádaný signál z jedné části do jiné). Jako anténa fungují jednak vodiče, jednak proudové smyčky. Je typická pro přenos rušivých signálů mezi prostorově oddělenými zařízeními.

2 NÁVRH A SIMULACE HLAVNÍCH ČÁSTÍ ZDROJE

V této části bakalářské práce je proveden základní návrh a rozbor laboratorního pulsního zdroje s výstupní lineární regulací.

2.1 Základní zapojení

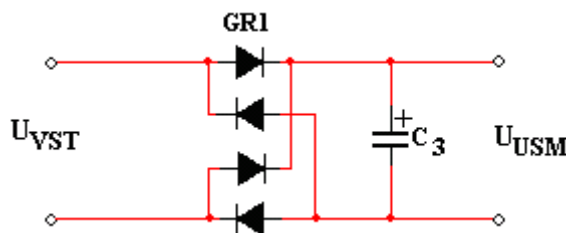
Na obr. 2.1 je schéma základního zapojení obvodu.



Obr. 2.1: Základní zapojení zdroje

2.2 Popis funkce

Vstupní síťové napětí je přivedeno přes vstupní filtr, usměrněno pomocí můstkového usměrňovače a vyhlazeno na vstupním kondenzátoru C_3 . Na obr. 2.2 je schéma můstkového usměrňovače.

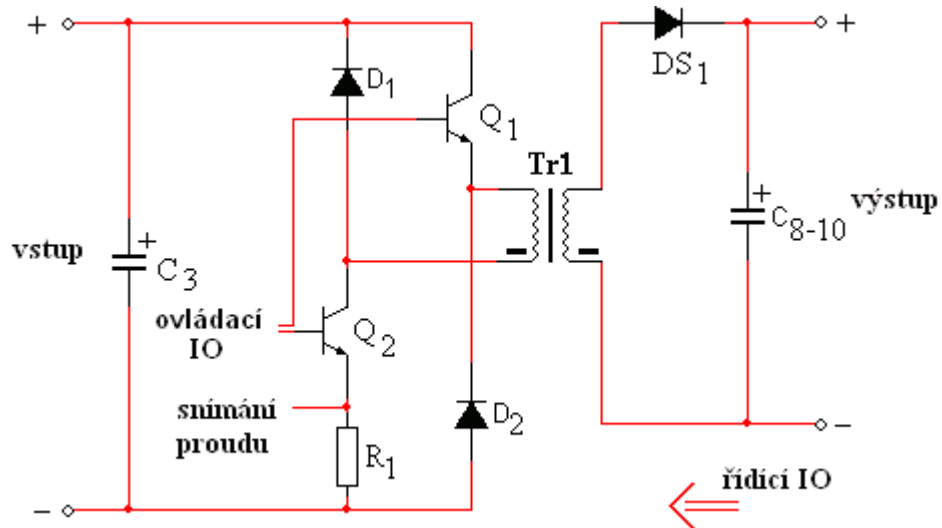


Obr. 2.2: Můstkový usměrňovač

Na vstupu můstkového usměrňovače je vstupní síťové napětí U_{VST} , na výstupu usměrňovače je usměrněné napětí U_{USM} . Velikost tohoto napětí je vypočítaná ve vztahu (2.2). Hodnota kondenzátoru C_3 , který má za úkol vyhladit napětí usměrněné diodovým můstkem je vypočtena vztahem (2.3).

Poté je usměrněné napětí přivedeno na vstup měniče. Řídicí obvody generují

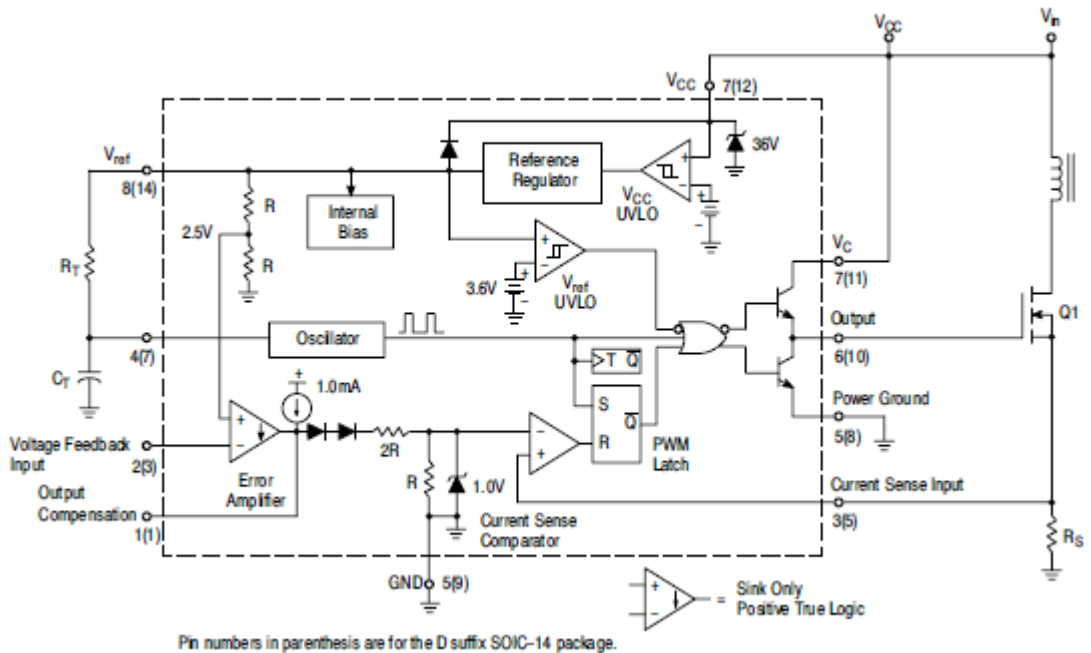
spínací signály pro tranzistory Q_1 a Q_2 . Při sepnutí tranzistorů protéká z C_3 proud transformátorem a po jejich vypnutí je část energie vrácena zpět do C_3 přes diody D_1 , D_2 . Na obr. 2.3 je schéma zapojení silové části obvodu.



Obr. 2.3: Schéma silové části

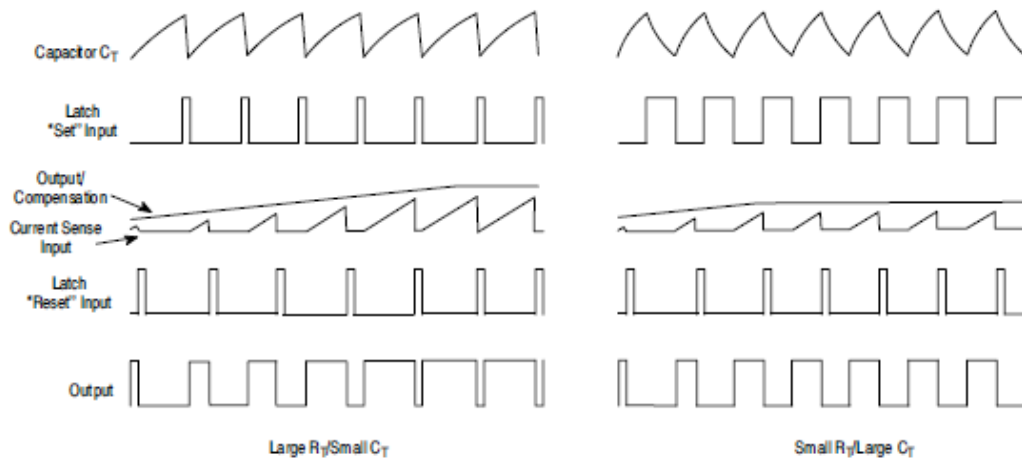
Na sekundární straně je energie získaná v transformátoru usměrněna diodou DS_1 a napětí je vyhlazeno na kaskádě kondenzátorů C_{8-10} .

O spínání tranzistorů se stará řídicí obvod UC3844, který je galvanicky oddělen od primární části. Obvod má pevně nastavenou spínací frekvenci na 50 kHz RC článkem (pin č. 8, 4). Na obr. 2.4 je blokové schéma obvodu.



Obr. 2.4: Blokové schéma obvodu UC3844 (převzato z [8])

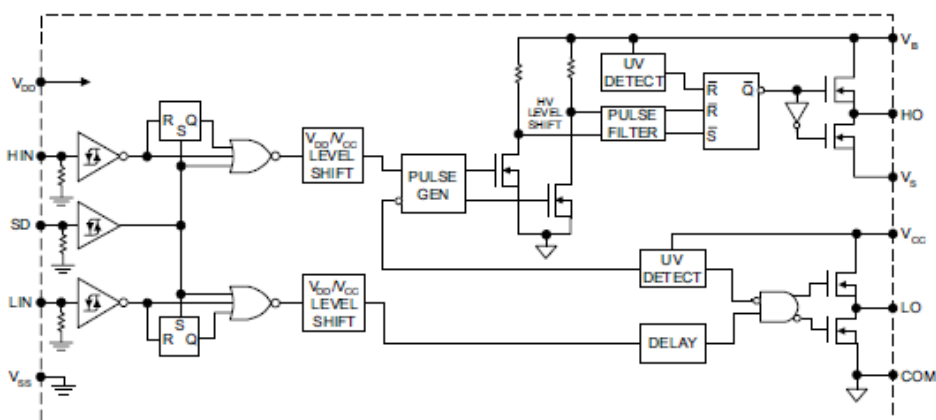
Na pin č. 2 je přivedena zpětná napěťová vazba ze sekundárního obvodu, která je porovnávána vnitřním komparátorem s referenční hodnotou. Podle velikosti snímaného napětí obvod nastavuje šířku pulsu pro spínání tranzistorů - regulace PWM. Na obr. 2.5 jsou časové průběhy obvodu UC3844.



Obr. 2.5: Časové průběhy obvodu UC3844 (převzato z [8])

Tento integrovaný obvod nespíná tranzistory přímo, ale prostřednictvím ovládacího obvodu IR2110. Ačkoliv obvod umožňuje nezávislé ovládání tranzistorů Q_1 i Q_2 , v této aplikaci je potřeba spínat oba tranzistory najednou, proto jsou vstupní piny propojeny. Tranzistory Q_3 , Q_4 ve spojení s diodami zaručují dostatečné nabití kondenzátoru C_{13} pro spínání výkonového tranzistoru, přizemňováním primární části transformátoru, což je důležité zejména při krátkých pulzech při regulaci PWM. Na obr. 2.6 je funkční blokové schéma ovládacího obvodu IR2110.

Velikost proudu se omezuje v ovládacím obvodu na primární části, konkrétně přivedením napětí na pin č. 10. Toto napětí je měřeno na odporu R_1 a vzniká úbytkem procházejícího proudu primárním obvodem. Při překročení povoleného proudu vznikne úbytek napětí větší než 1V, který je 10x zesílen tranzistory. Ovládací obvod IR2110 se postará o vypnutí tranzistorů. Takto je zaručena i ochrana před zkratem.



Obr. 2.6: Blokové schéma obvodu IR2110 (převzato z [9])

V tabulce Tab. 2 je uveden popis výstupů obvodu s doporučenými hodnotami.

Tab. 2: Popis výstupů obvodu IR2110 (převzato z [9])

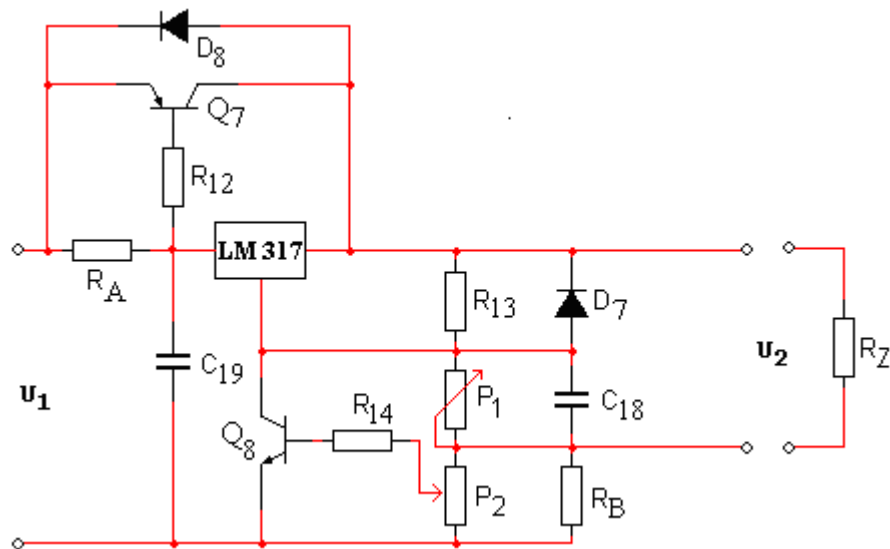
Symbol	Popis	Min	Max
VDD	napájení logické části	-0,3	V _S + 25
HIN	logický vstup pro high kanál	V _S - 0,3	VDD + 0,3
SD	logický vstup pro shutdown	V _S - 0,3	VDD + 0,3
LIN	logický vstup pro low kanál	V _S - 0,3	VDD + 0,3
VSS	zem logické části	VCC - 25	VCC + 0,3
VB	napájení high kanálu, kladnější napětí	-0,3	525
HO	výstup high kanálu	V _S - 0,3	VDD + 0,3
Vs	napájení high kanálu, zápornější napětí	V _B - 25	V _B + 0,3
VCC	napájení low kanálu, kladnější napětí	-0,3	25
LO	výstup low kanálu	-0,3	VCC + 0,3
COM	napájení low kanálu, zápornější napětí	-0,3	VCC

Napájení řídicího a ovládacího obvodu zajišťuje malý dvouvinutový transformátor s parametry 2x15V/60mA. Oba výstupy jsou osazeny můstkovým usměrňovačem a napětí je stabilizováno lineárním stabilizátorem L7815. Jedna napájecí větev je zdrojem energie pro ovládací část, druhá pro část řídicí, tím je také zajištěno galvanické oddělení primární a sekundární části.

Lineární část tohoto zdroje je realizovaná na samostatné desce. Výstupu spínaného zdroje je propojen vodiči. O lineární regulaci napětí se stará regulátor LM317, jehož výstupní napětí je nastaveno pomocí děliče tvořeného z rezistoru R₁₃ a potenciometru P₁. Regulátor porovnává referenční hodnotu napětí 1,25V s úbytkem na rezistoru R₁₃, pokud se úbytek na odporu zvýší, regulátor sníží napětí v obvodu, aby úbytek dosáhl opět 1,25V. Kondenzátor C₁₈ zabrání zesilování zvlnění a rušení, které může nastat při činnosti regulátoru. Diody D₇ a D₈ slouží jako ochrana regulátoru před vybitím energie z výstupu nebo z kondenzátorů přes vlastní výstup, který není dimenzovaný na tok energie opačným směrem.

Regulátor neumožňuje přenos velkých proudů, proto je posílen výkonovým tranzistorem Q₇, který přebírá větší část proudu při zatížení. Aby bylo možné tento tranzistor otevřít, je obvod osazen rezistorem R_A. Průchodem proudu přes regulátor na něm vzniká úbytek napětí, který otevírá tranzistor Q₇.

Proud obvodem je omezován „přechodem“ zdroje do proudového režimu. Průchodem proudu na rezistoru R_B vzniká úbytek napětí, shodný s úbytkem na potenciometru P₂. Vznikne-li úbytek napětí na potenciometru větší 0,65V, začne se otevírat tranzistor Q₈, což způsobí snížení výstupního napětí při konstantním proudu. Schéma lineární části je na obr. 2.7.



Obr. 2.7: Schéma lineární regulace

2.3 Návrh součástí zdroje

Pro vyhlazení napětí vstupního napájení, usměrněného Graetzovým můstkem je použit kondenzátor C1. Vstupní napětí kondenzátoru se spočítá z rovnice 2.2.

$$U_1 = U_n \cdot \sqrt{2} - \Delta U_D = 230V \cdot \sqrt{2} - 0,9V = 324,37V \quad (2.2)$$

Velikost kapacity kondenzátoru C se určí dle rovnice uvedené v následujícím vztahu [4]. Hodnoty jsou dosazeny pro výkon zdroje 160W.

$$C = 1000 \cdot \frac{K \cdot I}{p \cdot U_1} = 1000 \cdot \frac{K \cdot P}{p \cdot U_1^2} = 1000 \cdot \frac{200 \cdot 160}{1 \cdot 324,37^2} = 304,14 \mu F \quad (2.3)$$

K	[-] konstanta pro dvoucestné usměrnění je rovna 200
I	[A] proud zátěží
p	[%] činitel zvlnění
U ₁	[V] je stejnosměrné napětí

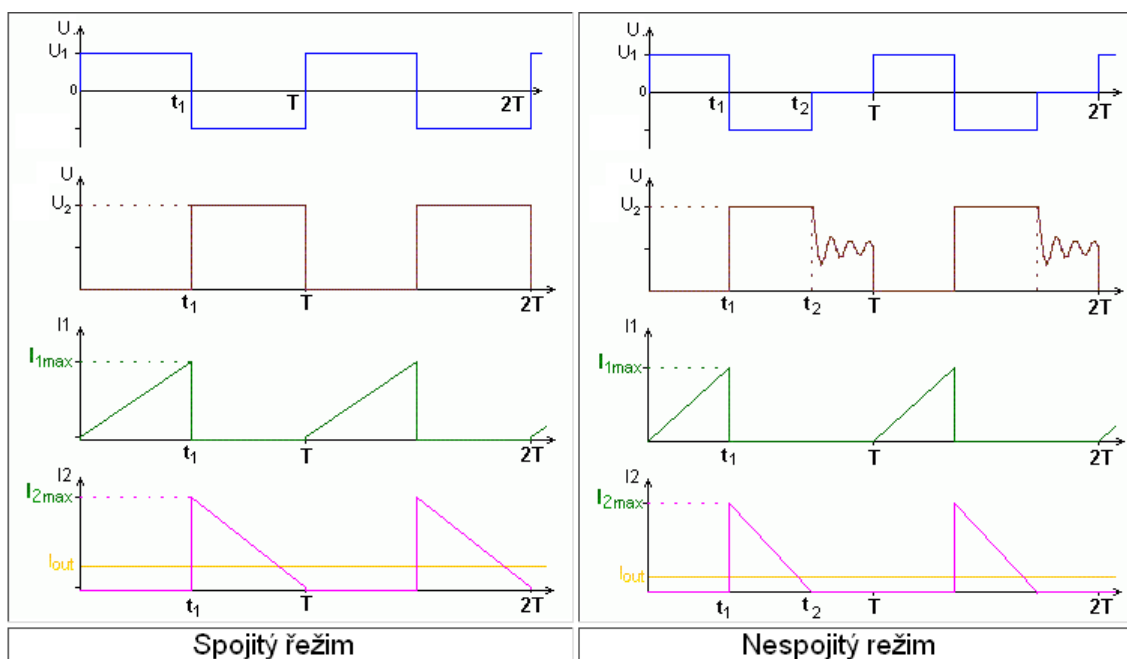
Jako referenční hodnota napětí pro výpočet převodu transformátoru je použita hodnota napětí sítě snižená o 5% a dále o úbytek napětí na diodovém můstku. Požadované napětí 25V na sekundární straně je zvýšeno o úbytek napětí na Schottkyho diodě. Z toho platí pro převod transformátoru následující vztah:

$$p = \frac{0,95 \cdot U_1}{U_2 + \Delta U_{D2}} = \frac{0,95 \cdot 324,37}{25 + 0,57} = 12,05 \cong 12 \quad (2.4)$$

Zatímco u transformátorů pracujících se sítovou frekvencí je potřeba několik závitů na 1 volt, tak u vysokofrekvenčních transformátorů je situace opačná a stačí jeden závit na několik voltů. Jádrem je použito feritové s tvarem typu E. Na plastové kostičce je navinuto primární vinutí z lakem izolovaného drátu, následuje vrstva izolace a sekundární vinutí. Navržený transformátor je spíše tlumivka s převodem, v textu ale bude označována jako transformátor. Výhodou je, že nepotřebuje dodatečnou indukčnost na výstupu. Transformátory se vzduchovou mezerou vyzařují do svého okolí větší rozptylový tok. Rozptylový tok středního sloupku odstíní primární vinutí, umístěním co nejbližší středu cívky. Začátek jeho vinutí je nutno připojit co nejbližší ke spínacímu tranzistoru.

Vinutí: primární – 96 závitů, měděný drát \varnothing 0,4mm
 sekundární – 8 závitů, měděný drát \varnothing 1mm

Na obr. 2.8 je zobrazen průběh napětí a proudu při různé době spínání tranzistorů. Při spínání s maximální střídou (50%) je průběh napětí pulsní – obdélníkový. V době kdy jsou tranzistory sepnuty, akumuluje se energie v transformátoru. Při rozepnutí tranzistorů protéká proud sekundárním obvodem. Průběh proudu v primární části je pilový s narůstající amplitudou, zatímco v sekundární části s amplitudou klesající. Se zkracováním střídy neprotéká proud obvodem po celou dobu periody. Vznikají tlumené kmity napětí na sekundární straně v době, kdy proud neprotéká.



Obr. 2.8: Průběh napětí v spojitém a nespojitém režimu (převzato z [5])

Lineární část:

Návrh rezistoru R_A dle parametrů tranzistoru BJE2955, který je otevřený při napětí $U_{BE} = 1,8V$ a při předpokládaném proudu $0,9A$ regulátorem, jehož maximální proud je $1,5A$ je použito rovnice 2.5:

$$R = \frac{U_{BE}}{I_a} = \frac{1,8}{0,9} = 2\Omega \quad (2.5)$$

Odtud je patrné, že je potřeba tento odpor dimenzovat minimálně na $2W$. Při tomto proudu dojde k úplnému otevření tranzistoru a ke stávajícímu proudu $0,9A$ se přidá proud bázi tranzistoru cca $0,4A$, který neprotéká přes odpor, ale přímo do regulátoru. Výchozí proud regulátorem pak bude $1,3A$, zbytek proudu poteče přes výkonový tranzistor. Je možno počítat i s vyšším proudovým zatížením, neboť napětí je regulováno na straně spínaného zdroje i v lineární části. Tímto úbytkem na regulátoru bude vždy cca $5V$, což znamená při průchodu proudu $1,5A$ výkonovou ztrátu $7,5W$. Další pomocné součástky jsou použity dle katalogu zapojení. Poslední navržený odpor je určen pro regulaci proudu. Napětí, při kterém se otevírá tranzistor Q_8 je $U_{BE} = 0,6V$. Pokud zvolím regulaci od $1A$, tak určený odpor z rovnice 2.6 bude $0,6\Omega$.

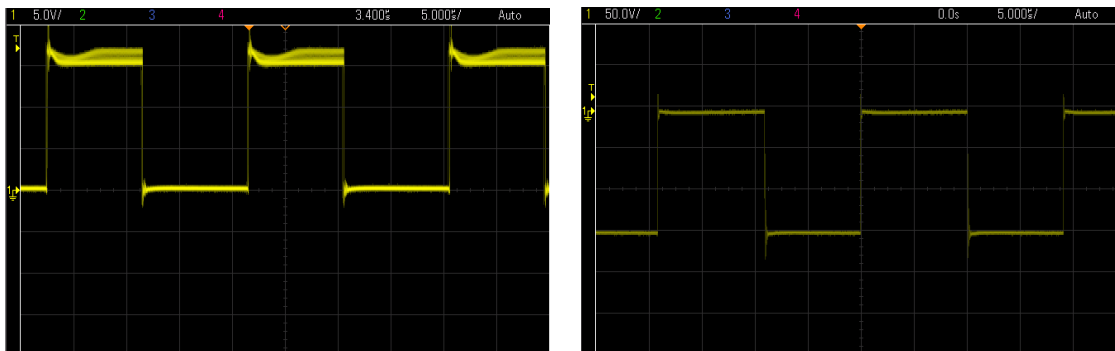
$$R = \frac{U_{BE}}{I_b} = \frac{0,6}{1} = 0,6\Omega \quad (2.6)$$

2.4 Výroba a testování plošného spoje

Návrh desky plošného spoje je realizován v programu PLOTPC 1.90. Po návrhu je obvod vytištěn na průsvitný papír, který se připevní na fotosenzitivní jednostranný plošný spoj. Ten je umístěn do ozařovací komory s UV lampou. Po ozáření je plošný spoj umístěn do vývojky pro pozitivní fotoemulzi a následně ponořen do leptacího roztoku (roztok chloridu železitého).

Do připravené desky jsou vyvrtány otvory a osazovány součástky. Během osazování součástek se provádí kontrola správné funkce obvodu, probíhá „oživování“ částí zdroje, nejprve za sníženého napětí (regulovaným zdrojem $0-65VDC$). Jako výstupní zátěž je použit reostat $0-20\Omega$ s proudovým zatížením $6A$. Po úspěšném otestování všech částí zdroje při nízkém napětí je zdroj testován jako celek a po úspěšných testech je připojen na síťové napětí přes oddělovací transformátor.

Na obr. 2.9 vlevo je záznamu z osciloskopu zachyceného výstupu z UC3844 pro řízení spínání tranzistorů. Signál má frekvenci $50kHz$. Na stejném obrázku vpravo je již natvarovaný signál ovladačem IR2110.



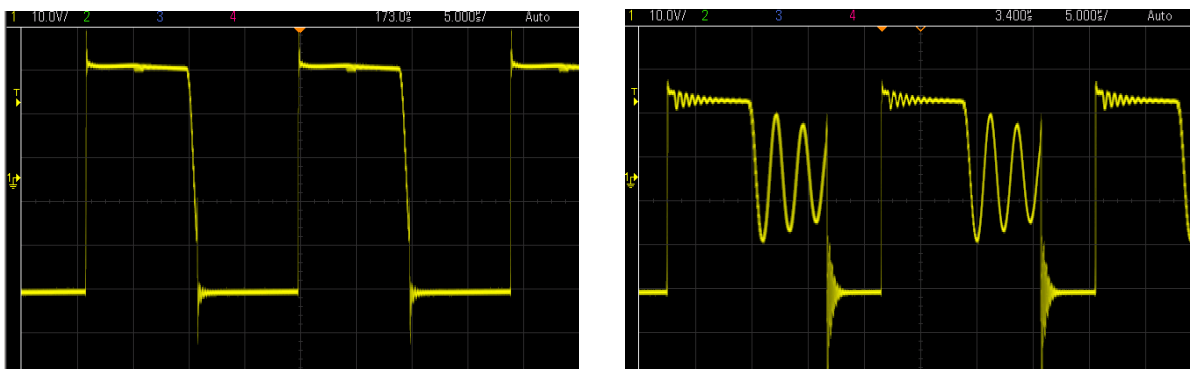
Obr. 2.9: Průběh generovaných spínacích signálů UC3844 a IR2110

Na obr. 2.10 vlevo je zaznamenán průběh proudu primárním obvodem, v pravé části je průběh proudu sekundárním obvodem. Průběh proudu v sekundárním obvodu by měl být pilový s klesající amplitudou.



Obr. 2.10: Průběh proudu tekoucího primárním a sekundárním vinutím

Na obr. 2.11 vlevo je zaznamenáno napětí v sekundárním obvodu se střídou 50% a vpravo při regulaci PWM.



Obr. 2.11: Průběh napětí na sekundárním vinutí při PWM regulaci

2.5 Měření parametrů napájecího zdroje

Simulace parametrů lineárního zdroje je vytvořena v programu TINA. Schéma je součástí přílohy A. Tento program používá transientní analýzu k nalezení pracovního bodu daného schématu. Program poskytuje měřené hodnoty RMS, které je možné odečítat při vložení ampérmetrů a voltmetrů jako do reálného zapojení. Byly provedeny 4 měření, jejichž výsledky jsou zaznamenány v tabulce a zobrazeny v grafu. Při dosažení nastaveného proudového omezení se automaticky snižuje napětí k nule téměř lineárně.

Tab. 3: Měření VA charakteristiky pro výstup 10V při omezení proudu na 1A

Zátěž RZ	22	10	7	5	2	1
Proud I _z [A]	0,463	1,01	1,16	1,24	1,28	1,29
Napětí U _z [V]	10,18	10,12	9,26	6,2	2,56	1,29

Tab. 4: Měření VA charakteristiky pro výstup 10V při omezení proudu na 6A

Zátěž RZ [Ω]	22	10	5	2	1,8	1,5	1	0,5
Proud I _z [A]	0,463	1,02	2,54	5,04	5,42	5,77	6,04	6,08
Napětí U _z [V]	10,18	10,18	10,18	10,08	9,76	8,65	6,04	3,04

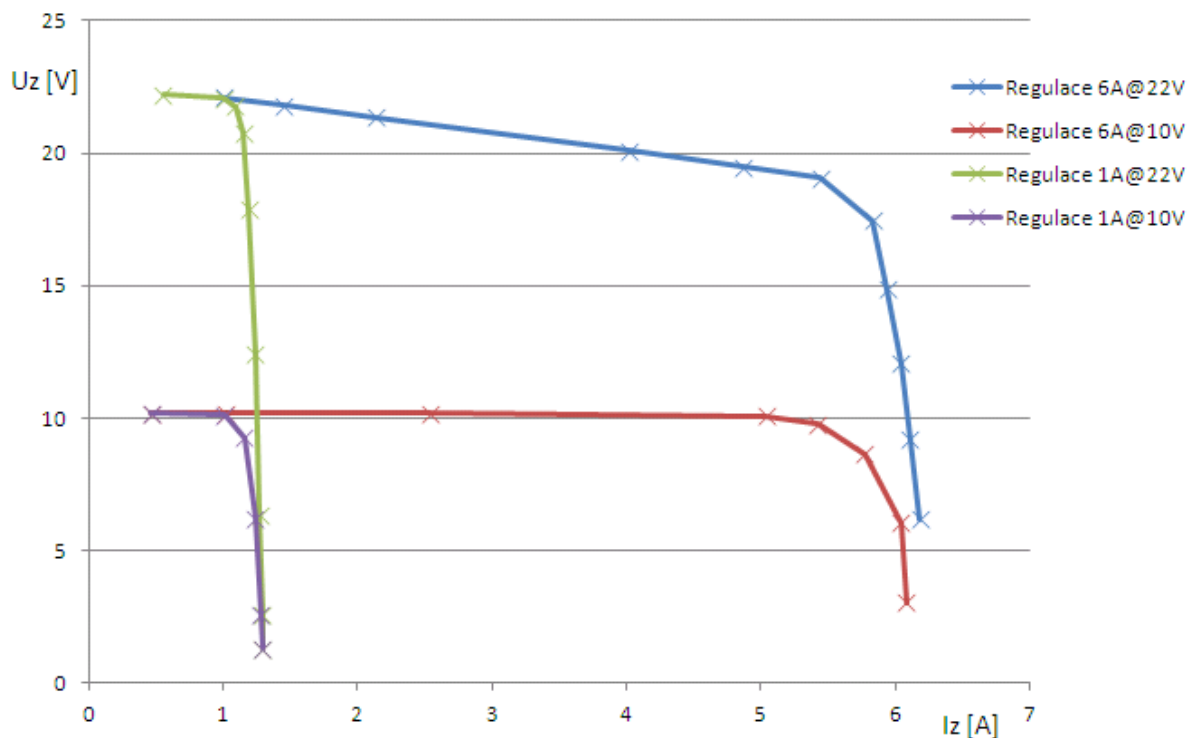
Tab. 5: Měření VA charakteristiky pro výstup 22V při omezení proudu na 1A

Zátěž RZ [Ω]	25	22	20	18	15	10	5	2	1
Proud I _z [A]	0,55	1	1,09	1,15	1,19	1,24	1,27	1,29	1,29
Napětí U _z [V]	22,2	22,07	21,76	20,77	17,88	12,4	6,36	2,57	1,29

Tab. 6: Měření VA charakteristiky pro výstup 22V při omezení proudu na 6A

Zátěž RZ [Ω]	22	15	10	5	4	3,5	3	2,5	2	1,5	1
Proud I _z [A]	1	1,45	2,14	4,02	4,87	5,44	5,83	5,94	6,04	6,11	6,18
Napětí U _z [V]	22,09	21,8	21,37	20,09	19,48	19,05	17,45	14,85	12,07	9,17	6,18

Na obr. 2.12 je graf závislosti zatěžovacích charakteristik pro různá nastavení proudu.



Obr. 2.12: Graf závislosti zatěžovacích charakteristik pro různé hodnoty proudu

2.6 Vnější provedení zdroje

Zdroj je umístěn v plastové krabici typu UK15P o rozměrech 90 x 230 x 215 mm (V x Š x D). V zadní stěně je umístěna síťová vidlice typu CS 011 se síťovým vypínačem. V přední stěně je umístěn ampérmetr typu MP 45 a voltmetr typu MP 45 o rozsahu 30 V. Dále jsou v přední stěně umístěny výstupní zdířky a regulační potenciometry. Na obr. 2.13 a obr. 2.14 je pohled na přední a zadní stěnu zdroje.



Obr. 2.13: Přední stěna zdroje



Obr. 2.14: Zadní stěna zdroje

3 ZÁVĚR

V bakalářské práci jsem vytvořil návrh Laboratorního pulsního zdroje s výstupní lineární stabilizací. Základem pro výkonovou část zdroje je poloviční můstek, osazený tranzistory N-MOSFET. Tyto jsou spínány za pomoci ovladače IR2110, který tvaruje signál z řídicího obvodu UC3844. Řídicí obvod je umístěn v sekundární části zdroje, kde také snímá výstupní napětí pro zpětnou vazbu. Primární a sekundární část je galvanicky oddělena a o napájení obou částí se stará malý dvouvinuťový transformátor s lineární stabilizací obou výstupů na 15V. Hlavní částí lineární části zdroje je lineární regulátor LM317, jehož maximální výstup je 1,5 A. Proto je posílen výkonovým tranzistorem, který přebírá proudovou zátěž větší než 1A.

Sestavil jsem kompletní obvodové schéma, jehož některé části jsem odsimuloval pomocí programu PSPICE a TINA. Dle tohoto schématu jsem vytvořil desky plošného spoje pomocí programu PLOTPC 1.90. Vyrobený plošný spoj jsem postupně osazoval navrženými součástkami a takto postupně uváděl do chodu.

Zdroj reguluje výstupní napětí prostřednictvím napěťového děliče ve zpětné vazbě nastavováním potenciometru P_1 . Z provedených měření snižování nebo zvyšování vstupního napájecího napětí nemá vliv na výstupní napětí, pokud je dodrženo ustanovení, že napájecí napětí je větší nejméně o 3V než výstupní napětí. Je to dáno úbytkem na regulátoru LM317. Pokud je napájecí napětí nižší, výstupní napájení se sníží, ale regulátor nemá schopnost lineárně regulovat hodnotu výstupního napětí. Při regulaci bylo možné změřit hodnoty 1,25V – 22V. Při změně odebíraného proudu bylo napětí zachováno v původní nastavené hladině. Při zkratu na výstupu působí jedinou překážku průchozímu proudu měřicí odpor proudu, na kterém se objeví nejnižší nastavitelné napětí 1,25V. Regulace proudu se provádí nastavováním potenciometru P_2 . Tímto děličem napětí se nastaví, při jaké hodnotě proudu dochází k otevření tranzistoru Q_8 . Takto je přizemňován regulátor LM317 a dochází ke snižování výstupního napětí, při zachování hodnoty proudu. Zdroj přechází do proudového režimu.

Pro vylepšení parametrů zdroje bych zvolil použití operačního zesilovače (OZ) pro měření proudu, který by získal referenční hodnotu napětí z odporového děliče připojeného na Zenerovu diodu. Na odporovém děličci by bylo možné nastavit hodnotu napětí, která by byla porovnána s napětím na odporu měření proudu. OZ by ovládal tranzistor (použitý jako proměnný odpor) v proudové cestě.

LITERATURA

- [1] KREJČIŘÍK, A. Napájecí zdroje I. -III. BEN - technická literatura, Praha, 1997.
- [2] NEASCU, D. O. Power-Switching Converters. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006.
- [3] WIKIPEDIA. Spínaný zdroj. Dostupné na [www:](http://cs.wikipedia.org/wiki/Sp%C3%ADnan%C3%BD_zdroj)
http://cs.wikipedia.org/wiki/Sp%C3%ADnan%C3%BD_zdroj, 2011
- [4] WIKIPEDIA. Polovodičová dioda. Dostupné na [www:](http://cs.wikipedia.org/wiki/Polovodi%C4%8Dov%C3%A1_dioda)
http://cs.wikipedia.org/wiki/Polovodi%C4%8Dov%C3%A1_dioda, 2011
- [5] Design of Switch Mode Power Supplies. Dostupné na [www:](http://schmidt-walter.eit.h-da.de/smpe/smpe.html)
<http://schmidt-walter.eit.h-da.de/smpe/smpe.html>, 2006
- [6] HV Floating MOS-Gate Driver ICs. Dostupné na [www:](http://www.irf.com/technical-info/appnotes/an-978.pdf)
<http://www.irf.com/technical-info/appnotes/an-978.pdf>
- [7] Current mode PWM controller. Dostupné na [www:](http://www.ti.com/lit/gpn/uc3844)
<http://www.ti.com/lit/gpn/uc3844>
- [8] High Performance Current Mode Controller. Dostupné na [www:](http://www.ges.cz/sheets/u/uc3844_5.pdf)
http://www.ges.cz/sheets/u/uc3844_5.pdf
- [9] Data Sheet No. PD60147 rev.U. Dostupné na [www:](http://www.gme.cz/dokumentace/399/399-080/dsh.399-080.1.pdf)
<http://www.gme.cz/dokumentace/399/399-080/dsh.399-080.1.pdf>
- [10] HUMLHANS, J. Zajímavá zapojení BEN – technická literatura, Praha, 2005
- [11] KREJČIŘÍK, A. Lineární napájecí zdroje BEN - technická literatura, Praha, 2001
- [12] KREJČIŘÍK, A. DC/DC měniče BEN - technická literatura, Praha, 2001

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

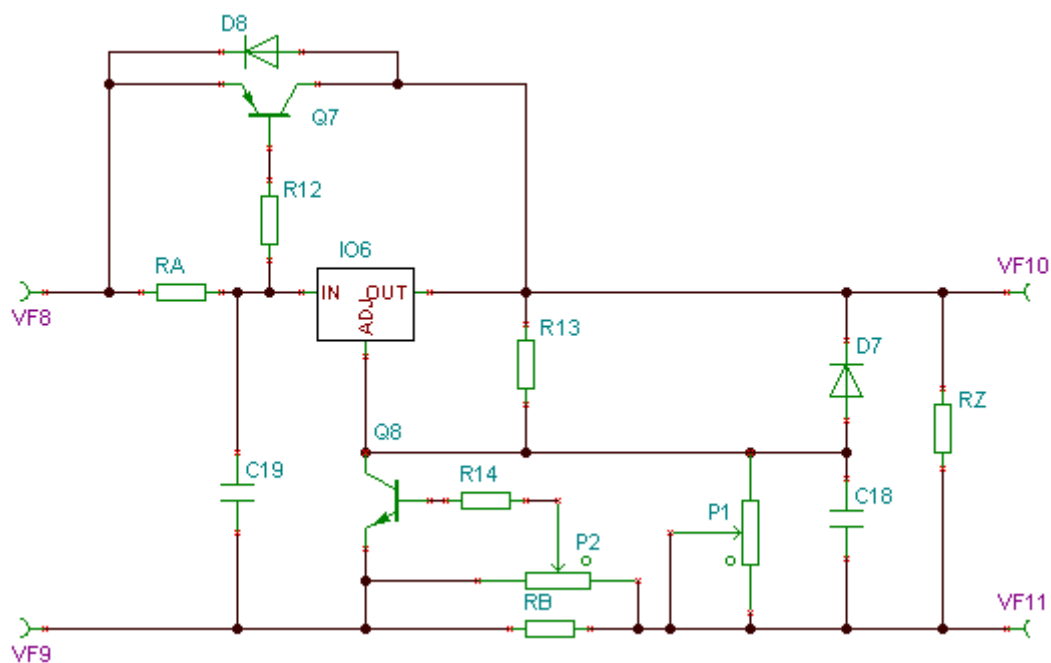
C	kondenzátor
D	dioda
I	proud
kHz	kiloHertz
kW	kiloWatt
komp	komparátor
L	cívka
MOS	označení struktury tranzistoru FET
OZ	operační zesilovač
OSC	oscilátor
PWM	označení obvodu pulzně šířkové modulace
ss	stejnoseměrná
R	odpor - rezistor
R _Z	odpor zátěže
T	tranzistor
U	napětí
VA	volt - ampérová
Tr	transformátor
W	Watt
ZD	Zenerova dioda

SEZNAM PŘÍLOH

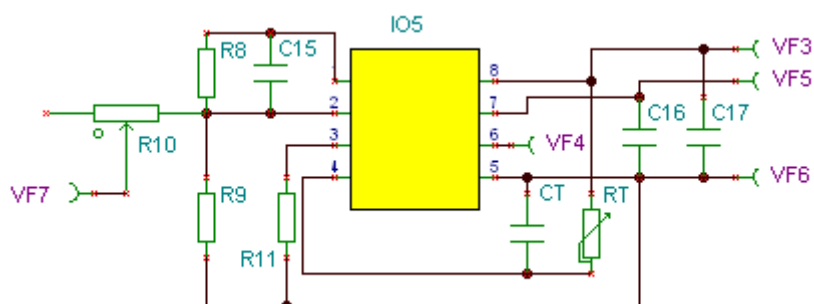
A	Návrh zařízení	36
A.1	Obvodové zapojení lineární části	36
A.2	Obvodové zapojení řídicího obvodu.....	36
A.3	Obvodové zapojení zdroje	37
A.4	Desky plošných spojů – top (strana součástek).....	38
B	Seznam součástek	39

A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

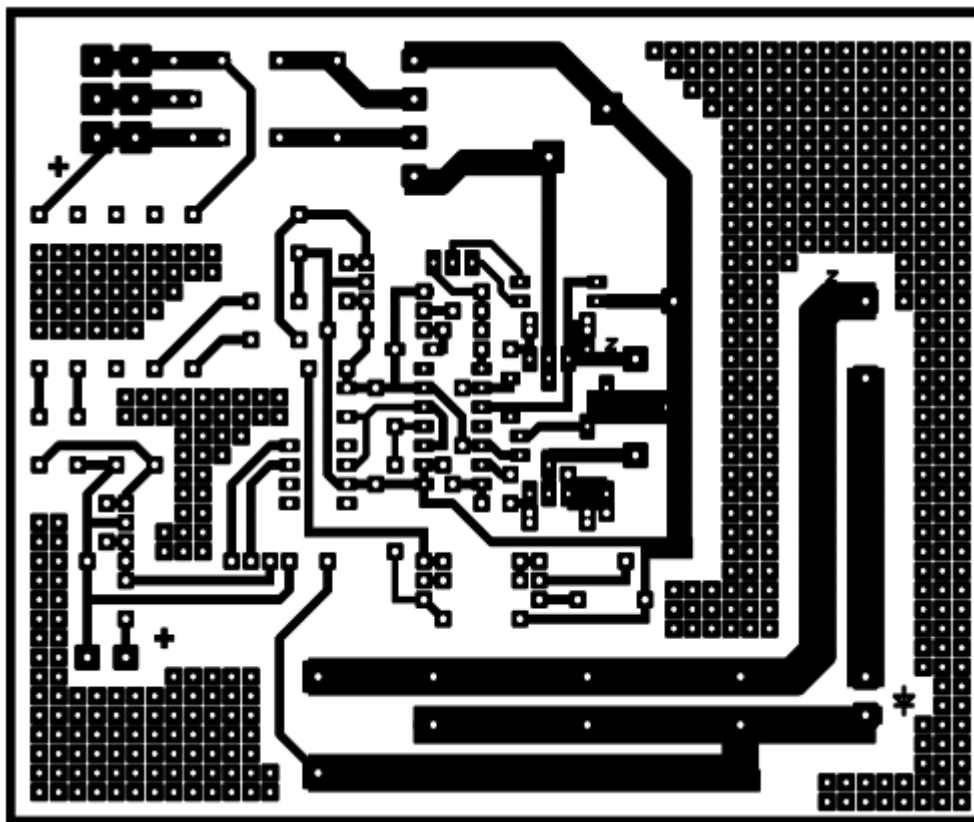
A.1 Obvodové zapojení lineární části



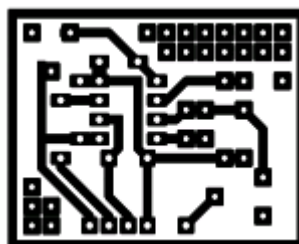
A.2 Obvodové zapojení řídicího obvodu



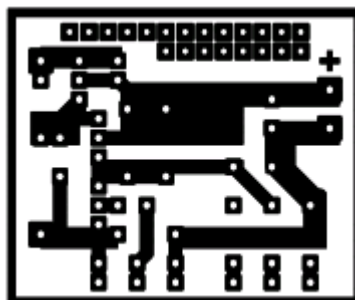
A.4 Desky plošných spojů – top (strana součástek)



Rozměr desky spínaného zdroje 12 x 150 [mm], měřítko M1:1



Rozměr desky řídicí části 35 x 45 [mm], měřítko M1:1



Rozměr desky lineární části 45 x 55 [mm], měřítko M1:1

B SEZNAM SOUČÁSTEK

Tab. 7: Seznam součástek

Označení	Hodnota	Popis
IO 1	IR2110	Ovládací obvod
IO 2,3	MC78L15ACP	Lineární stabilizátor
IO 4	4N35	Optočlen
IO 5	UC3844	Řídicí obvod
IO 6	LM317	Lineární stabilizátor
T1	EI30/12,5 215	Transformátor 2x 15V
T2		Transformátor vl. výroba
Q1,2	STP5NK50Z	Spínací tranzistor
Q3	IRF710	Pomocný tranzistor
Q4	IRFD120	Pomocný tranzistor
Q5,6	BC337	Pomocný tranzistor
Q7	MJE2955T	Tranzistor
Q8	BC337	Pomocný tranzistor
GR1	KBL406	Diodový můstek
GR2,3	DB102	Diodový můstek
D1,2	BYW96E	Dioda
D3,4,7,8	1N4002	Ochranná dioda
D5	BYT01-400	Dioda
D6	GP942	Dioda
DO1,2	1N4002	Ochranná dioda
DS1	MBR1045	Schottkyho dioda
DZ1	BZX55C5V1	Zenerova dioda
C1a,b	3nF	Keramický kondenzátor
C2	100nF	Keramický kondenzátor
C3	330 μ F/400V	Elektrolyt. kondenzátor
C4,6	100 μ F/50V	Elektrolyt. kondenzátor
C5,7	100nF	Keramický kondenzátor
C8-10	2200 μ F/50V	Elektrolyt. kondenzátor
C11	1 μ F	Keramický kondenzátor
C12	2,2 μ F/50V	Elektrolyt. kondenzátor

Označení	Hodnota	Popis
C13	470nF	Keramický kondenzátor
C14	470pF	Keramický kondenzátor
C15,17	10nF	Keramický kondenzátor
C16	4,7 μ F	Keramický kondenzátor
C18	1 μ F	Elektrolyt. kondenzátor
C19	100nF	Keramický kondenzátor
CT	10nF	Keramický kondenzátor
R1	0,56 Ω 2W	Rezistor pro měření proudu
R2		Rezistor
R3		Rezistor
R4		Rezistor
R5		Rezistor
R6		Rezistor
R7	10k Ω	Rezistor
R8	100k Ω	Rezistor
R9	1k Ω	Rezistor
R10	10k Ω	Trimr
R11	300 Ω	Rezistor
R12	10 Ω	Rezistor
R13	240 Ω	Rezistor
R14	10 Ω	Rezistor
RA	2 Ω 2W	Rezistor pro měření proudu
RB	0,6 Ω 5W	Rezistor pro měření proudu
RO1,2	2,7K Ω	Rezistor
RT	10k Ω	Trimr
RZ	1k Ω 1W	Rezistor
P1	10k Ω	Potenciometr
P2	1k Ω	Potenciometr
L1	80 μ H	Tlumivka