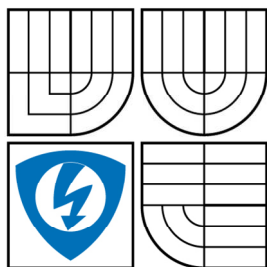


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

LABORATORNÍ SPÍNANÝ NAPÁJECÍ ZDROJ

LABORATORY SWITCHING POWER SUPPLY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Jakub Slezák

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Jiří Šebesta, Ph.D.

BRNO 2009

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Jakub Slezák
Ročník: 3

ID: 72893
Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Laboratorní spínaný napájecí zdroj

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte teoretický rozbor řešení laboratorního síťového spínaného zdroje, srovnajte výhody a nevýhody a vlastnosti z hlediska EMI u jednotlivých principiálních zapojení spínaných zdrojů. Navrhněte koncepci vícehladinového laboratorního zdroje s pevnými i regulovatelnými napětovými hladinami včetně ochran a celkového konstrukčního řešení. Na zkušební desce realizujte testovací verzi regulovatelného zdroje a proveďte základní měření.

Navrhněte celkové schéma zapojení a mechanické řešení napájecího zdroje včetně ochran a modulů pro měření napětí a proudů. Navrhněte desky plošných spojů, zdroj osadte a proveďte jeho důkladné měření.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

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

[2] FAKTOR, Z. transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje. Praha: BEN - technická literatura, 2002.

[3] PRESSMAN, A. I. Switching Power Supply Design. New York: McGraw-Hill, 1998.

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 5.6.2009

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

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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Jakub Slezák
Bytem: Luční 850, Nové Město na Moravě, 592 31
Narozen/a (datum a místo): 29. října 1986 v Nové Městě na Moravě

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☐ diplomová práce
- ☒ bakalářská práce
- ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Laboratorní spínaný napájecí zdroj

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Jiří Šebesta, Ph.D.

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- ☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- ☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 5. června 2009

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem spínaného zdroje na bázi propustného měniče s výstupním regulovatelným napětím v rozmezí 3 až 30V a zatěžovacím proudem do 1 A. Nejprve je rozebráno teoretické řešení základních typů měničů a problematika spínaných zdrojů. Následuje návrh jednotlivých částí zdroje, který byl nejprve sestaven v testovací verzi na pokusné desce. Poté byla navrhována deska plošných spojů a kompletní mechanické řešení. Zdroj je rovněž opatřen digitálními moduly pro měření napětí a proudu a je chráněn proti přetížení.

Klíčová slova

Spínaný napájecí zdroj, Propustný měnič, Impulsní transformátor, Budicí obvod, Optočlen, Spínací tranzistor.

Abstract

This bachelor's thesis is concerned with design switching power supply based on forward converter with output voltage regulated in the range of 3 to 30V and load current to 1 A. First of all, it discusses the theoretical solution of basic types of converters and switching power supply problems. Followed by a proposal of various parts source, which was first established in the test version on the test board. Then was proposed printed circuit board and complete mechanical solutions. Source is also equipped with digital modules for measuring voltage and current, and is protected against overload.

Keywords

Switching Power Supply, Forward Converter, Pulse Transformer, Excitation Circuit, Optocouplers, Switching Transistor.

Bibliografická citace práce

SLEZÁK, J. Laboratorní spínaný napájecí zdroj. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 36 s., 4 příl. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Šebesta, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Laboratorní spínaný napájecí zdroj 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 jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 5. června 2009

.....
podpis autora

Poděkování

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

V Brně dne 5. června 2009

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod.....	7
1.1	Srovnání spínaných a lineárních zdrojů	7
1.2	Základní princip činnosti.....	8
1.3	Pracovní cyklus regulátoru.....	8
1.4	Základní typy měničů.....	9
2	Požadované parametry a celkový rozbor zapojení	11
2.1	Parametry a základní princip činnosti	11
3	Konkrétní návrh a výpočty.....	13
3.1	Vstupní část obvodu	13
3.2	Impulsní transformátor	16
3.3	Výstupní část obvodu	18
3.4	Funkce řídicího obvodu.....	20
3.5	Konkrétní výpočty hodnot jednotlivých součástí	21
4	Pomocné napájení a zapojení měřidel napětí a proudu.....	24
5	Naměřené průběhy a hodnoty	26
6	Závěr.....	28
7	Seznam použité literatury a jiných zdrojů.....	29
8	Přílohy	30

Seznam obrázků

Obr. 1.1 Blokové schéma spínaného zdroj.....	8
Obr. 1.2 Průběh spínaného napětí	9
Obr. 1.3 Blokující měnič	9
Obr. 1.4 Dvojitý měnič	10
Obr. 2.1 Propustný měnič	11
Obr. 2.2 Základní časové průběhy propustného měniče	12
Obr. 3.1 Rozměry jádra	16
Obr. 3.2 Blokové zapojení obvodu L200CV	19
Obr. 3.3 Zapojení L200CV	19
Obr. 3.4 Vnitřní zapojení obvodu UC3842	20
Obr. 3.5 Spotřeba proudu obvodu UC3842	20
Obr. 3.6 Schéma zapojení budící části obvodu	21
Obr. 4.1 Pomocné napájení	24
Obr. 4.2 Zapojení měřidel (pohled ze zadní strany)	25
Obr. 5.1 Průběh napětí na gate T_1	26
Obr. 5.2 Průběh napětí na primárním vinutí a na gate T_1	26
Obr. 5.3 Průběh napětí na sekundárním vinutí	26
Obr. 5.4 Průběh napětí na diodě D8	26
Obr. 5.5 a 5.6 Porovnání šířky pulsů na gate T_1 při výstupním napětí 30V a 20V	26
Obr. 5.7 Zvlnění na výstupu při zatížení 0,15 A	27
Obr. 5.8 Zatěžovací charakteristika zdroje	27

Seznam tabulek

Tab. 1.1 Porovnání lineárních stabilizovaných zdrojů s nerezonančními spínanými zdroji	7
Tab. 1.2 Porovnání klasických měničů	10
Tab. 2.1 Porovnání základních parametrů bipolárních tranzistorů a tranzistorů SIPMOS	11
Tab. 3.1 Základní parametry spínacího tranzistoru	15
Tab. 3.2 Rozměry jádra	16
Tab. 3.3 Parametry jednotlivých vinutí	17
Tab. 4.1 Nastavení rozsahů měřidel a desetinné tečky	25
Tab. 5.1 Zatěžovací charakteristika zdroje	27

1 Úvod

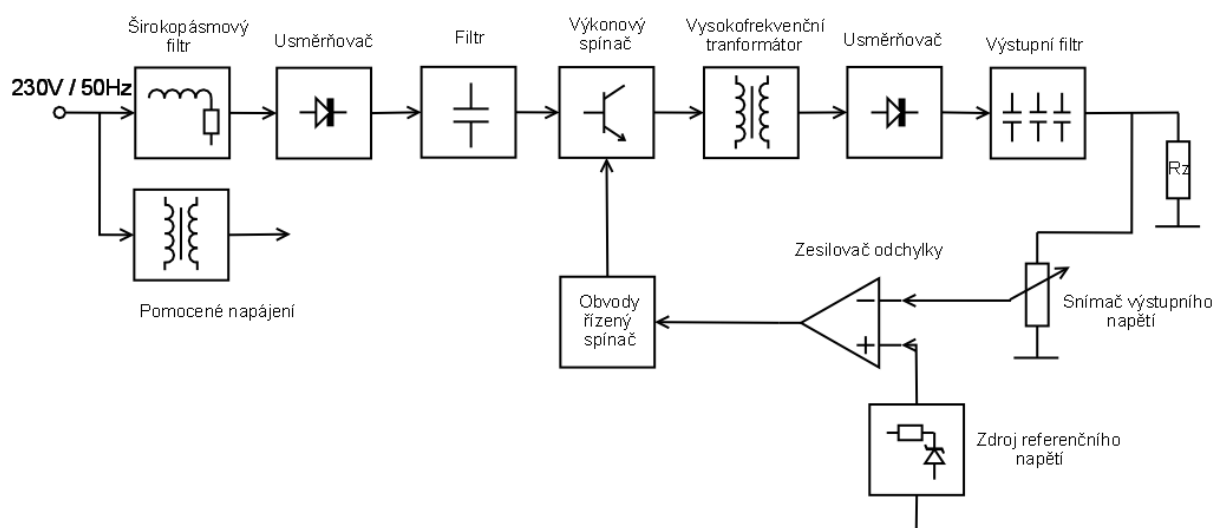
1.1 Srovnání spínaných a lineárních zdrojů

Spínané zdroje v dnešní době stále více nahrazují klasické lineární zdroje. Jejich hlavními přednostmi je menší velikost a to zejména transformátoru. Mají vyšší účinnost a odebíraný impulsní výkon může být podstatně větší, než jaký je možno odebrat v lineárním režimu za použití stejného výkonového prvku. Jejich koncepce, obvodová složitost a návrh je sice složitější, ale s klesající cenou součástek a jejich velkou dostupností (spínací tranzistory, integrované obvody plnící velké množství funkcí..) klesá i hranice výkonu, při které se vyplatí použít spínaný zdroj. V dnešní době pomalu ale jistě vytlačují klasické lineární zdroje. Typickým příkladem jsou nabíječky k mobilním telefonům apod. Při jejich konstrukci a použití si musíme dávat pozor zejména na rušení, které vzniká při spínání výkonových tranzistorů, což by mohlo vadit například v audiotechnice (nepříjemný pískot), na požadované výstupní zvlnění a pomalejší reakce výstupního napětí při náhlých změnách zatěžovacího proudu. Shrnutí základních parametrů a rozdílů je dobře patrné z následující tabulky.

specifikace	jednotky	napájecí zdroj	
		lineární	spínaný
rozsah napětí	V	10 až 100	1 až 1000
rozsah proudů	A	tisíciny až jednotky	jednotky až tisíce
rozsah výkonů	W	jednotky	Jednotky až desetitisíce
kmitočet usměrňovače napětí	Hz	50	50 desetitisíce až statisíce při úpravě účinníku
přesnost nastavení napětí	%	0,02 až 0,05	0,05 až 0,1
přesnost regulace výkonů	%	0,02 až 0,1	0,1 až 1
zvlnění výstupního napětí	mV _{ef} (š-š)	500 až 2000 mV _{ef}	25 až 100 mV(š-š)
rozsah vstupního napětí	%	± 10	± 30 některé zdroje v rozsahu až 4:1
účinnost	%	40 až 55	70 až 90
měrný výkon	W/cm ³	0,033	0,2 až 10
doba zotavení	ns	50 (100)	300 (2000)
přípustná doba výpadku vstupního napětí	ms	2	32

Tab. 1.1 Porovnání lineárních stabilizovaných zdrojů s nerezonančními spínanými zdroji [2]

1.2 Základní princip činnosti



Obr. 1.1 Blokové schéma spínaného zdroje

Základní princip činnosti si můžeme názorně vysvětlit na výše uvedeném schématu. Na vstup zdroje je přivedeno síťové napětí (230V/50Hz). Prochází vstupním odrušovacím filtrem, který může být zapojený dvojím způsobem: a) Zamezuje pronikání rušivých vlivů ze sítě do zdroje. b) Zamezuje pronikání rušivých vlivů ze zdroje do sítě. Dále je napětí usměrněno pomocí diod (Graetzův můstek) a vyhlazeno na vstupním kondenzátoru. Následně je pomocí spínacího prvku tvarováno na obdélkový průběh o frekvenci okolo 50 - 200 kHz. Přivádí se na vysokofrekvenční transformátor, jež zároveň poskytuje galvanické oddělení od sítě. Ze sekundární strany je napětí opět usměrněno rychlými diodami, vyhlazeno kvalitním kondenzátorem(y) a připraveno k dalšímu použití.

Stabilitu výstupního napětí zajišťuje zpětná vazba, která je z výstupu zdroje zavedena do obvodu, jež řídí spínání. Pomocí změny šířky pulzu se určuje velikost výstupního napětí. Řídící obvod opět musí zajišťovat galvanické oddělení výstupního napětí od síťového. To se realizuje pomocným transformátorem nebo optickým vazebním členem.

V neposlední řadě může být součástí zdroje i pomocné napájení například pro řídicí obvod.

1.3 Pracovní cyklus regulátoru

Základní princip činnosti regulace spočívá v řízení velikosti střídý impulsů.

Perioda T_{on} : spínací prvek sepnut

T_{off} : spínací prvek je rozepnut

T : určuje celkovou délku periody a platí.

$$T = T_{on} + T_{off} \quad (1.1)$$

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.2)$$

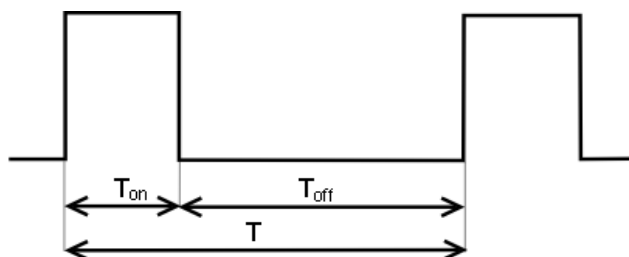
Řídící obvody mohou pracovat ve dvou základních režimech

a) S konstantní frekvencí

Mají kmitočet spínání stálý, tzn. perioda T je stálá a mění se poměr T_{on}/T_{off} .

b) S proměnnou frekvencí

Mají kmitočet spínání proměnný, tzn. konstantní interval T_{on} a proměnná perioda T , nebo konstantní interval T_{off} a proměnná perioda T .



Obr. 1.2 Průběh spínaného napětí

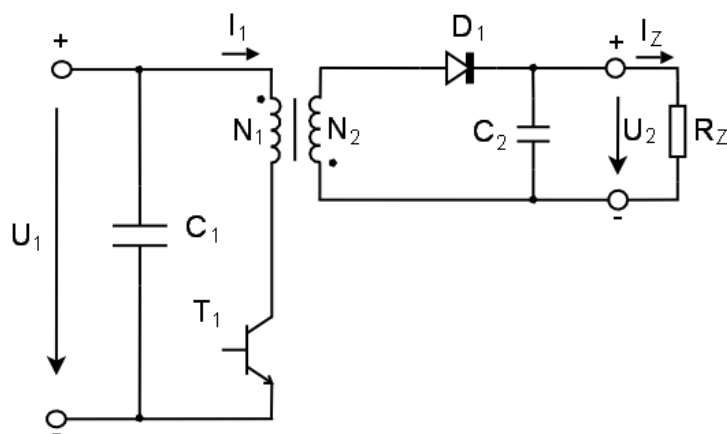
1.4 Základní typy měničů

a) Propustný (Forward)

Přenos energie ze vstupního obvodu do výstupního probíhá v aktivním intervalu T_{on} . Účelem demagnetizačního vinutí je zabránit, aby se nepřesycovalo jádro impulsního transformátoru, které v intervalu T_{on} akumuluje energii, která není výstupním obvodem v intervalu T_{off} odebírána. Demagnetizační vinutí má stejný počet závitů jako primární, ale opačný smysl vinutí. Bližší popis a schéma zapojení je v kapitole 2.1.

b) Blokující (Flyback)

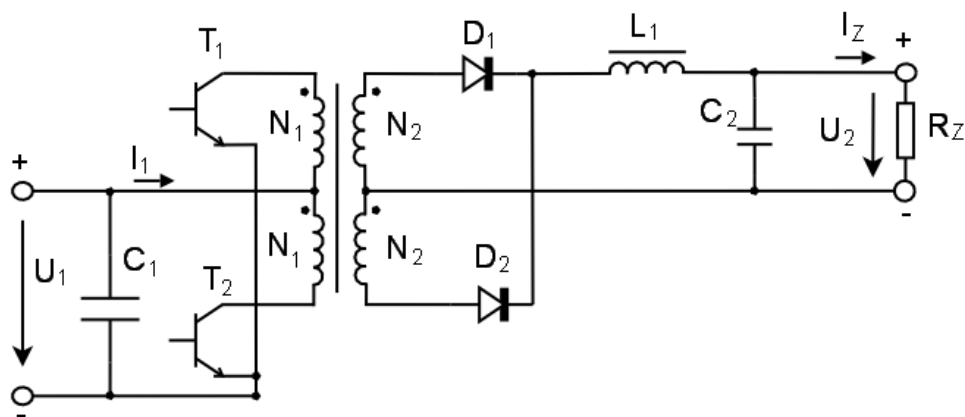
V době T_{on} je tranzistor sepnutý a vstupní energie se akumuluje v primární indukčnosti transformátoru (proud a magnetický tok v jádře lineárně narůstají). Jelikož je dioda D_1 uzavřená, do zátěže je dodávána energie pouze z výstupního kondenzátoru C_2 . V době T_{off} nastane uzavření tranzistoru a energie, která byla akumulována v transformátoru, se přes sekundární vinutí a otevřenou diodu přesouvá do kondenzátoru C_2 a tím pádem i do zátěže. Mezitím magnetický tok v jádře klesá k nule.



Obr. 1.3 Blokující měnič

c) Dvojčinný (Push-Pull)

Do primárního vinutí je spínán proud obou polarit dvěma spínacími součástkami, které pracují v inverzním zapojení. V podstatě je tvořen dvěma jednočinnými propustnými měniči.



Obr. 1.4 Dvojčinný měnič

Stručný přehled a srovnání klasických měničů a jejich oblasti použití:

Typ zapojení	Rozsah výkonů	Oblast použití
Měniče bez indukčnosti		
nábojové pumpy	podle typu IO, bývá vnitřně omezen na max. 0,5 W	získání jiné hodnoty napětí s malým proudovým zatížením
Měniče bez transformátoru		
zvyšující (step-up)	do 30 W	získání jiné hodnoty napětí, bez galvanického oddělení vstupu a výstupu, větší proudové zatížení
snižující (step-down)		
invertující		
Měniče s transformátorem		
propustný	do 250 W	spínané zdroje ze síťového napětí
blokující	do 100 W	
Dvojčinné měniče s transformátorem		
push-pull	do 250 W	spínané zdroje v PC
dvoucestný polomost	50 – 400 W	
plný most	přes 500 W	řízení motoru

Tab. 1.2 Porovnání klasických měničů [7]

2 Požadované parametry a celkový rozbor zapojení

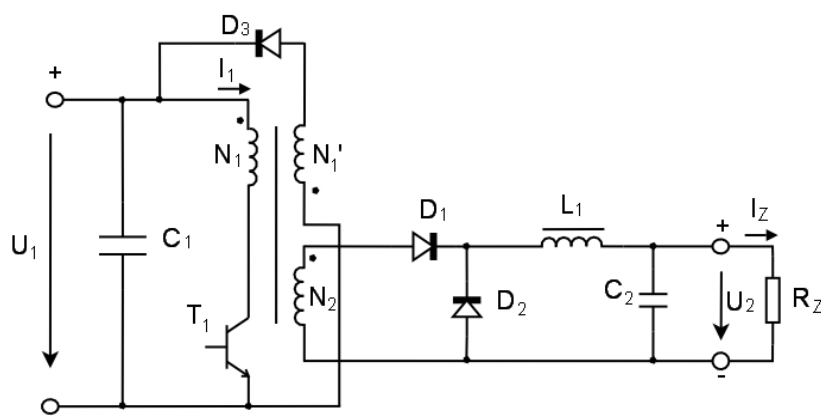
2.1 Parametry a základní princip činnosti

Výstupní napětí regulovatelné.....3 - 30 V
Maximální zatěžovací proud1,0 A
Minimální zatěžovací proud.....0,1 A
Vstupní síťové napětí.....230 V (+10% -15%)
Frekvence měniče.....50 kHz

Síťové napětí je přivedeno na odrušovací filtr. Pomocí diodového můstku je napětí dvoucestně usměrněno a vyhlazeno filtračním elektrolytickým a foliovým kondenzátorem WIMA – MKS4. Nyní se usměrněné síťové napětí přemění na impulsní (obdélníkové) pomocí spínacího tranzistoru BUZ 80 (IRFBG30). Jedná se o tranzistory SIPMOS při jejichž výrobě se používá technologie dvojí iontové implementace, přičemž tranzistor je tvořen z několika tisíc elementárních tranzistorů řazených paralelně na jediném křemíkovém čipu. Jejich uplatnění najdeme zejména v aplikacích, kde je potřeba spínání velkých výkonů. Oproti bipolárním tranzistorům mají mnoho výhod, což je přehledně zobrazeno v následující tabulce.

Parametr	Bipolární tranzistor	Tranzistor SIPMOS
vstupní odpor	malý (proudové řízení)	velký ($> 10^9 \Omega$)
výkonové zesílení	100 až 2000	staticky nekonečno
náběžná hrana	50 až 500 ns	10 až 200 ns
sestupná hrana	500 až 2000 ns	10 až 600 ns
doba saturace	1 až 5 μ s	0
mezní frekvence	<100 MHz	GHz
odpor přechodu	0,3 Ω	0,03 až 2 Ω
přetížitelnost	špatná (druhý průraz)	dobrá (není druhý průraz)
paralelní spojování	nutná přídavná zapojení	možné bez omezení
kompatibilita s TTL	ne	ano
buzení	0,1 až 10A	5V, max. 100 mA při odporu generátoru 50 Ω

Tab. 2.1 Porovnání základních parametrů bipolárních tranzistorů a tranzistorů SIPMOS [3]



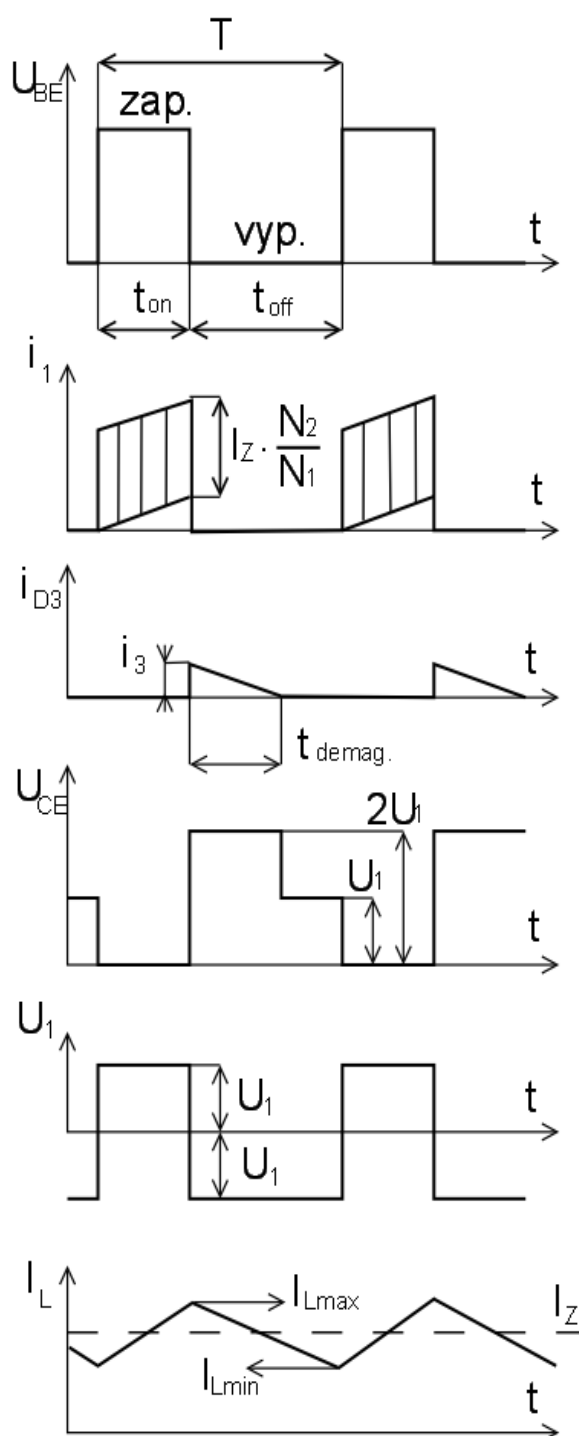
Obr. 2.1 Propustný měnič

Princip činnosti propustného měniče a celkového zapojení:

V době T_{on} je tranzistor T_1 sepnutý, takže energie prochází transformátorem měniče, otevřenou diodou D_1 a tlumivkou L_1 do výstupního kondenzátoru a zátěže. Zároveň se energie akumuluje v primární indukčnosti transformátoru měniče a v tlumivce L_1 . Po dobu T_{off} tranzistor nevede a dioda D_1 je uzavřena. Energie z tlumivky je převáděna do zátěže R_z přes rekuperační diodu D_2 a energie nahromaděná v primární indukčnosti transformátoru se vrací přes demagnetizační vinutí a diodu D_3 zpět do nabíjecího kondenzátoru C_1 . Demagnetizační vinutí má stejný počet závitů jako primární, ale opačný smysl vinutí. V době T_{off} je tranzistor namáhán dvojnásobným napětím U_1 .

Transformátor zajišťuje galvanické oddělení od sítě. Na sekundární straně je impulsní napětí usměrněno diodami a pomocí LC filtru převedeno na stejnosměrné napětí s minimálním zvlněním.

Z výstupu je zavedena zpětná vazba na anodu optočlenu a napěťový regulátor TL 431 s pevně nastaveným výstupním napětím. Pomocí regulačního odporu se zvyšuje nebo snižuje protékající proud optočlenem a tím i jeho svítivost (přenos). Ten zároveň poskytuje galvanické oddělení od vstupní části obvodu, kde se vyskytuje nebezpečné napětí. Přes odporový dělič je napětí z optočlenu přivedeno na vstup č.2 integrovaného obvodu UC3842. Zde se porovnává s polovinou referenční hodnoty. Při překročení této úrovně se zúží budící pulsy, tím pádem dojde i ke zkrácení doby sepnutí tranzistoru T_1 a snížení velikosti výstupního napětí. Naopak při poklesu pod tuto hranici se budící pulsy rozšíří a zvětší se výstupní napětí. Pomocí vnějších součástek je nastavena pevná frekvence 50 kHz. Výstupní pulsy jsou na vývodu č.6.



Obr. 2.2 Základní časové průběhy propustného měniče

3 Konkrétní návrh a výpočty

3.1 Vstupní část obvodu

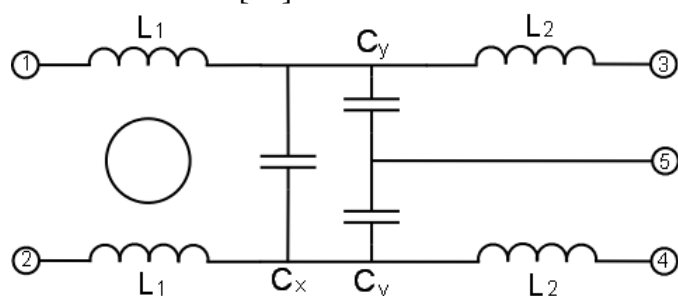
Varistor

Jedná se o nelineární polovodičový prvek, jehož odpor je závislý na napětí a slouží jako přepětěová ochrana. Činnost varistoru je dobře patrná z VA charakteristiky. Zvyšuje-li se napětí, dochází k pozvolnému, lineárnímu vzrůstu proudu. Po dosažení hranice napětí U_h prudce poklesne vnitřní odpor, který byl po celý předchozí případ téměř konstantní. K dalšímu vzrůstu napětí téměř nedochází, ale je velký nárůst proudu.

Termistor

Je elektrotechnická součástka, jejíž odpor závisí na teplotě. V zapojení jsem použil typ NTC (s negativním teplotním koeficientem). V praxi funguje tak, že po zapnutí síťového napětí utlumí počáteční proudový náraz. Poté se termistor zahřeje a jeho hodnota se sníží k nule.

Odrušovací filtr [13]



Parametry:

Jmenovité napětí / frekvence - 250V / 50-60 Hz

Jmenovitý proud – 2,5 A

Jmenovité kapacity ($f=1\text{kHz}$) - $C_x = 100 \text{ nF}$, $C_y = 2,5 \text{ nF}$

Jmenovité indukčnosti - $L_1 = 2 \times 2,7 \text{ mH}$, $L_2 = 2 \times 10 \text{ } \mu\text{H}$

Usměrňovací diody D_1 - D_4 (Můstkový usměrňovač) [podle 1]

Jednou diodou teče pouze polovina výstupního stejnosměrného proudu – rozhodující je střední hodnota proudu diodou za dobu periody, ta způsobuje výkonové (tepelné) namáhání diody. Proudově jsou diody mnohonásobně přetížitelné. Napětově se diody v můstkovém usměrňovači dimenzují velmi komplikovaně. Jedna úvaha vychází z předpokladu, že závěrné napětí se rozloží pravidelně na obě diody po jedné polovině a pak lze diodu navrhnout s podmínkou:

$$U_R > U_0 > U_{\max} \cdot \sqrt{2} = 253 \cdot \sqrt{2} = 357,8V \quad (3.1)$$

Jiná úvaha vychází z předpokladu, že dvě současně závěrně polarizované diody jsou velmi odlišné a jejich závěrná napětí budou též velmi odlišná. Potom je zapotřebí dimenzovat všechny diody na plné závěrné napětí: $U_0 + \sqrt{2} \cdot U_{\text{vst}} = 2 \cdot U_0$

Vztahem

$$U_R > 2 \cdot U_0 = 2 \cdot U_{\max} \cdot \sqrt{2} = 2 \cdot 253 \cdot \sqrt{2} = 715,6V \quad (3.2)$$

Skutečná hodnota leží někde uvnitř uvedeného intervalu vzhledem k tomu, že po část periody, když jsou dvě diody můstku namáhané závěrným napětím, jsou zbylé dvě diody ve směru propustném a zabezpečují rozložení napětí na diodách ve stejném poměru.

Nabíjecí kondenzátor [podle 2]

Síťové napětí je v rozmezí 230V (+10% -15%) tj. 195,5V_{ef} (276,5V_{max}) – 253V_{ef} (357,8V_{max}). Z můstkového usměrňovače se odebírá výkon pro spínaný zdroj s výstupním napětím $U_{\text{výst}} = 35\text{V}$ a proudem $I_{\text{výst}} = 0,15 - 1,5\text{A}$. Úbytek na diodách zapojených v sérii uvažujeme 2V. Za jednu periodu se kondenzátor nabije dvakrát a výkon odtékající do zátěže je $P_0 = 52,5\text{W}$. Tento výkon zvětšený o ztráty ve zdroji musí krýt kondenzátor.

Energie dodaná z kondenzátoru:

$$E = \frac{P_o \cdot 1}{2 \cdot f \cdot \eta} = \frac{52,5 \cdot 1}{2 \cdot 50 \cdot 0,8} = 0,656 \text{ Ws} \quad (3.3)$$

Pro minimální napětí na kondenzátoru, které kolísá od 274,5V do $0,85 \times 274,5 = 233,3\text{V}$ je potřebná velikost kondenzátoru, která se určí z energie v něm obsažené.

$$C = \frac{2 \cdot E}{\Delta U^2} = \frac{2 \cdot 0,656}{274,5^2 - 233,3^2} = 62,7 \mu\text{F} \quad (3.4)$$

Volím elektrolyt radiální 100uF/400V s vývody snap-in.

Vybíjecí odpor

Při vypnutí zdroje se ještě poměrně dlouho může držet vysoké napětí na vstupním nabíjecím kondenzátoru. Je vhodné paralelně k němu zařadit vybíjecí odpor. Z vypočtené časové konstanty by se měl vybit nejpozději do 22 vteřin.

$$I_{R1} = \frac{U_{C1\text{max}}}{R_1} = \frac{357,8}{220 \cdot 10^3} = 1,62 \text{ mA} \quad (3.5)$$

$$P_{R1} = R_1 \cdot I_{R1}^2 = 220 \cdot 10^3 \cdot (1,62 \cdot 10^{-3})^2 = 0,58 \text{ W} \quad (3.6)$$

$$\tau = R_1 \cdot C_1 = 220 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 22 \text{ s} \quad (3.7)$$

Odlehčovací obvody spínačů [3]

Obvod z prvků D_6 , R_2 a C_3 snižuje rozpínací ztráty tranzistoru měniče. V době sepnutí tranzistoru T_1 se přes odpor R_2 nabíjí kondenzátor C_3 na hodnotu stejnosměrného napětí na kondenzátoru C_1 . V době rozpínání přechází energie z kondenzátoru C_3 přes diodu D_6 do transformátoru Tr_1 . Tím dochází ke zpomalení napětíové hrany na tranzistoru T_1 měniče a jeho impulsní proud I_d zaniká již při nízkém napětí U_{ds} .

$$P_{\text{Istř}} = P_I \cdot f \cdot \tau = \frac{I_m^2 \cdot R_2}{2} \cdot f \cdot \tau = \frac{\left(\frac{U_m}{R_2}\right)^2 \cdot R_2}{2} \cdot f \cdot \tau = \frac{\left(\frac{357,8}{1000}\right)^2 \cdot 1000}{2} \cdot 50 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 3,2 \text{ W} \quad (3.8)$$

P_I – výkonová ztráta při obdélníkovém pulzu na R_2

$P_{\text{Istř}}$ – střední hodnota výkonové ztráty při dané frekvenci a šířce impulsu.

Odpor R_3 a kondenzátor C_4 působí jako tlumicí člen pro vysokofrekvenční zákmity vznikající při činnosti měniče v hranách sekundárních napět'ových impulsů. Tím je omezeno i napět'ové namáhání obou sekundárních diod D_7, D_8 .

$$P_{Istr} = P_I \cdot f \cdot \tau = \frac{I_m^2 \cdot R_3}{2} \cdot f \cdot \tau = \frac{\left(\frac{U_{2IM}}{R_3}\right)^2 \cdot R_3}{2} \cdot f \cdot \tau = \frac{\left(\frac{112,7}{120}\right)^2 \cdot 120}{2} \cdot 50 \cdot 10^3 \cdot 1,2 \cdot 10^{-6} = 3,18W$$

(3.9)

Spínací tranzistor - určení proudového a napět'ového namáhání tranzistoru měniče [4]

Proud i_1 tekoucí tranzistorem T_1 a současně i primárním vinutím Tr_1 se skládá ze 3 složek.

a) Aktivní proud (tekoucí do zátěže) v přepočtu velikosti

$$I'_Z = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_{Z \max} = \frac{29}{81} \cdot 1,5 = 0,54 A$$

(3.10)

b) Magnetizační proud

$$I_{magn} = 0,12 A \text{ (podle vzorce 3.16)}$$

c) Pilovitý proud tlumivkou L_1 přepočtený na primár

$$I'_0 = \frac{N_2 \cdot I_{Z \min}}{N_1} = \frac{29 \cdot 0,15}{81} = 0,054 A$$

(3.11)

Pro maximální hodnotu proudu $I_{1 \max}$ platí:

$$I_{1 \max} = I'_Z + I_{magn} + I'_0 = 0,54 + 0,12 + 0,054 = 0,714 A$$

(3.12)

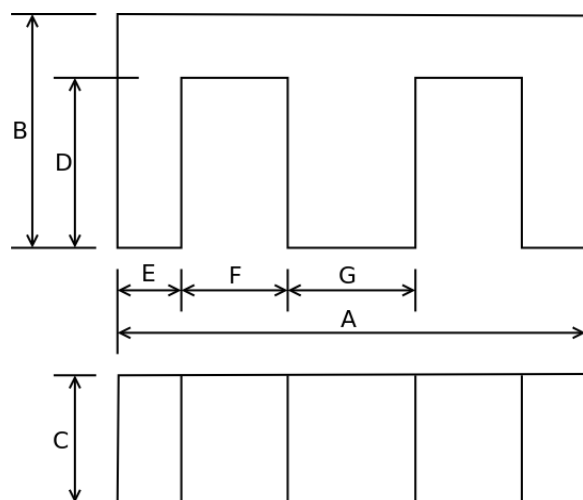
Přehled základních parametrů, typ **BUZ 80A** (Vhodným ekvivalentem může být **IRFBG30**)

Typ	U_{DS} [V]	$U_{GS(th)}$ [V]	U_{GS} [V]	I_D [A]	I_{impuls} [A]	R_{DSon} [Ω]	P_D [W]	t_{on} [ns]	t_{off} [ns]	Pouzdro
BUZ 80A	800	Min 2.1 Typ 3 Max 4	$\pm 20V$	3	12	3	75	110	300	TO-220

Tab. 3.1 Základní parametry spínacího tranzistoru [11]

3.2 Impulsní transformátor

Návrh podle [2 a 4]



Součinitel indukčnosti: $A_L = 4,47 \cdot 10^{-6} \text{ H/z}^2$

Průřez jádra: 184 mm^2

Obsah okénka: 287 mm^2

Hmota 77 ze které je uvedené jádro, odpovídá přibližně hmotě H22 z produkce bývalého podniku Pramet. V tabulkách [1] jsem pro tuto hmotu našel $B_{\max} = 0,36 \text{ T}$, ale v jiném návodu [4] bylo počítáno pro tento materiál s hodnotou $B_{\max} = 0,18$. Proto jsem radši volil hodnotu $0,18 \text{ T}$.

Rozměr	A	B	C	D	E	F	G
Délka [mm]	42,67	20,96	15,37	15,06	5,95	9,53	11,89

Obr. 3.1 a Tab. 3.2 Rozměry jádra [15]

Minimální počet závitů primárního vinutí s ohledem na sycení

$$N_1 = \frac{U_{1\max} \cdot t_{1\max}}{B_{\max} \cdot S} = \frac{357,8 \cdot 7,5 \cdot 10^{-6}}{0,18 \cdot 1,84 \cdot 10^{-4}} = 81 \text{ závitů} \quad (3.13)$$

Minimální indukčnost primárního vinutí $L_{P\min}$

$$L_{P\min} = A_{L\min} \cdot N_1^2 = 3,3525 \cdot 10^{-6} \cdot 81^2 = 22 \text{ mH} \quad (3.14, 3.15)$$

$$\text{kde } A_{L\min} = A_L - 25\% = 4,47 \cdot 10^{-6} \cdot 0,75 = 3,3535 \cdot 10^{-6} \text{ H / z}^2$$

Kontrola magnetizačního proudu transformátorem

$$I_{\text{magn}} = \frac{U_{1\max} \cdot t_{1\max}}{L_{P\min}} = \frac{357,8 \cdot 7,5 \cdot 10^{-6}}{22 \cdot 10^{-3}} = 0,12 \text{ A} \quad (3.16)$$

Určení převodu provedeme pro minimální napětí $U_{1\min}$ na kondenzátoru C_1 a pro maximální šířku impulsů měniče $t_{1\max}$. Minimální napětí sítě $230\text{V} - 15\% = 195,5\text{V}$, tj. vrcholové napětí na kondenzátoru C_1 je $U_1' = 195,5 \cdot \sqrt{2} = 276,5\text{V}$. Od této hodnoty je ještě nutno odečíst velikost zvlnění $\Delta U_1'$, kterou je možno určit experimentálně, odhadnout nebo vypočítat např. pomocí Kammerloherova diagramu pro maximální výstupní zátěž. Pro $C_1 = 100 \mu\text{F}$ vychází $\Delta U_1' = 20\text{V}$. Proto $U_{1\min} = U_1' - \Delta U_1' = 256,5\text{V}$.

Počet sekundárních závitů transformátoru vypočítáme potom následovně

$$N_2 = \frac{U_2}{U_{1\min}} \cdot N_1 \cdot \frac{T}{t_{1\max}} = \frac{35}{256,5} \cdot 81 \cdot \frac{20 \cdot 10^{-6}}{7,5 \cdot 10^{-6}} = 29 \text{ závitů} \quad (3.17)$$

Uřídíme ještě šířky impulsů měniče pro síťové napájecí napětí $U = 230V$ a $U = 253 V$

Pro $U = 230V$ je amplituda impulsního napětí na sekundárním vinutí Tr_1 :

$$U_{2iM} = \frac{N_2}{N_1} \cdot U_1 = \frac{29}{81} \cdot (230 \cdot \sqrt{2}) = 116,45V \quad (3.18)$$

Šířka impulsu:

$$t_1 = \frac{U_2 \cdot T}{U_{2iM}} = \frac{35 \cdot 20 \cdot 10^{-6}}{116,45} = 6,0 \mu s \quad (3.19)$$

Pro $U = 253V$

$$U_{2iM} = 128,1V$$

$$t_1 = 5,46 \mu s$$

U_{2iM} je také maximální napětíové namáhání usměrňovacích diod D_7, D_8 v závěrném směru. Šířka nejvyššího pulzu je $5,46 \mu s$. Diody D_7, D_8 jsou voleny s ohledem na uvedené závěrné napětí a maximální zatěžovací proud s uvažováním určité rezervy.

Kontrola výstupního napětí

$$U_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot U_1 \cdot \frac{t_1}{T} = \frac{29}{81} \cdot 256,5 \cdot \frac{7,5 \cdot 10^{-6}}{20 \cdot 10^{-6}} = 34,4V \quad (3.20)$$

Shrnutí dosažených parametrů

Vinutí	Počet závitů	Průměr drátu	Proudová hustota
Primární	81	0,50 mm	3,0 A/mm ²
Demagnetizační	81	0,25 mm	2,5 A/mm ²
Sekundární	29	0,67 mm	4,0 A/mm ²

Tab. 3.3 Parametry jednotlivých vinutí

Ke snížení rozptylové indukčnosti jsem zvolil následující způsob vinutí. Nejprve je navinuta polovina primárního vinutí, následuje sekundární, demagnetizační a v nejnižší vrstvě je druhá polovina primárního vinutí. Velikost jádra by šla zmenšit při profesionálním zhotovení. Já jsem však navíjel ručně, takže dráty nejsou tolik stažené jako při strojním vinutí. Také jsem z důvodu bezpečnosti volil dostatečně silné izolace mezi jednotlivými vinutími a na povrchu ještě umístil stínící měděnou fólii.

3.3 Výstupní část obvodu

Usměrňovací diody D7,D8 [14]

Rychlé diody BYW98/200

Mezi nejdůležitější parametry patří:

Maximální střední hodnota proudu v propustném směru $I_{FAV} = 3A$

Maximální hodnota závěrného napětí opakovatelná $U_{RRM} = 200V$

Vypínací zotavovací doba $t_{rr} = 35ns$

Tlumivka [2]

Výstupní indukčnost L_1 je určena tak, aby omezovala š-š zvlnění proudu, a výstupní kondenzátor $C_{6,7}$, aby omezoval zvlnění š-š napětí.

Maximální dovolené zvlnění proudu š-š je omezeno minimem průměrného zatížení. Bude-li minimální proud proud 150 mA, bude činnost měniče na hranici přerušovaného provozu. Hodnota indukčnosti tlumivky se určí z kolísání proudu tlumivky o 300mA.

$$L_0 = U_0 \cdot \frac{\Delta t}{\Delta I_L} = U_0 \cdot \frac{t_{off}}{2 \cdot I_{z \min}} = 35 \cdot \frac{12,5 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 0,15} = 1,46 mH \quad (3.21)$$

Filtrační kondenzátor

Uvažuji interval, kdy je zátěží odebírán proud u kondenzátoru $C_{6,7}$, což je u propustného měniče perioda t_{on} .

$$C_{f \min} \geq \frac{t_{on} \cdot I_z}{\Delta U_S} \geq \frac{7,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1,5}{20 \cdot 10^{-3}} \geq 562,5 \mu F \quad (3.22)$$

Potřebná kapacita filtračního kondenzátoru je závislá na proudovém odběru. Čím větší potřebujeme odebírat proud, tím větší filtrační kondenzátor potřebujeme. Doporučená kapacita filtračního kondenzátoru je přibližně 2000 μF na každý ampér odebíraného proudu. Použití větší kapacity není na závadu, spíše zlepšuje celkové vlastnosti zdroje. [8]

Volím paralelní kombinaci 2 kondenzátorů s nízkým ESR a určenými do obvodů s vysokými frekvencemi. Jeden kondenzátor má velikost 1000 $\mu F/50V$ a ESR 36 m Ω .

Zátěžový odpor

Je zde z důvodu minimálního proudového odběru na výstupu zdroje. Ten je asi 10% I_{Zmax} .

$$R_4 = \frac{U_z}{I_{z \min}} = \frac{35}{0,15} = 233,3 \Omega \quad (3.23)$$

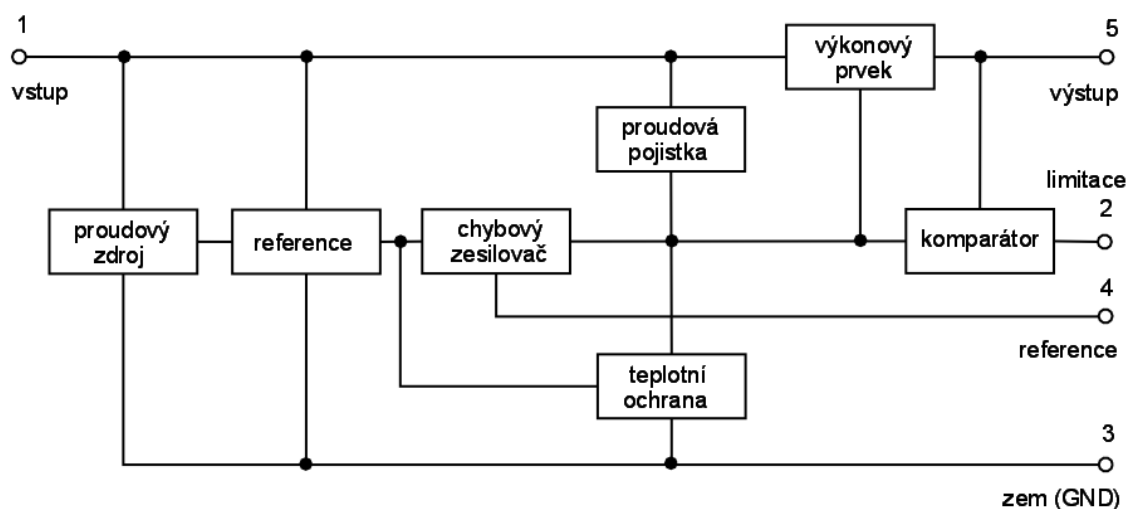
$$P_{R4} = R_4 \cdot I_{z \min}^2 = 233,3 \cdot 0,15^2 = 5,25 W \quad (3.24)$$

Pro $R_4 = 220 \Omega$

$$I_{z \min} = \frac{U_z}{R_4} = \frac{35}{220} = 0,16 A \quad (3.25)$$

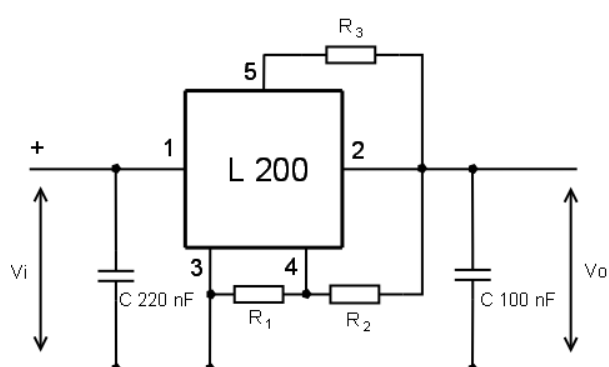
$$P_{R4} = R_4 \cdot I_{z \min}^2 = 220 \cdot 0,16^2 = 5,63 W \quad (3.26)$$

Stabilizátor L200



Obr. 3.2 Blokové zapojení obvodu L200CV [16]

L200 je integrovaný obvod vycházející ze známého obvodu pro zdroje napětí 723. Jedná se o pozitivní napěťový zdroj, obsahující nastavitelné proudové omezení, schopný dodávat proud 2A a napětí od 2,85 do 36 V. Napětí na výstupu a proudové omezení se dá spočítat pomocí následujících vztahů. Při proudovém omezení napěťový komparátor reaguje na napětí 0,45V (tolerance 0,38V až 0,52V) mezi výstupy 2 a 5. [9]



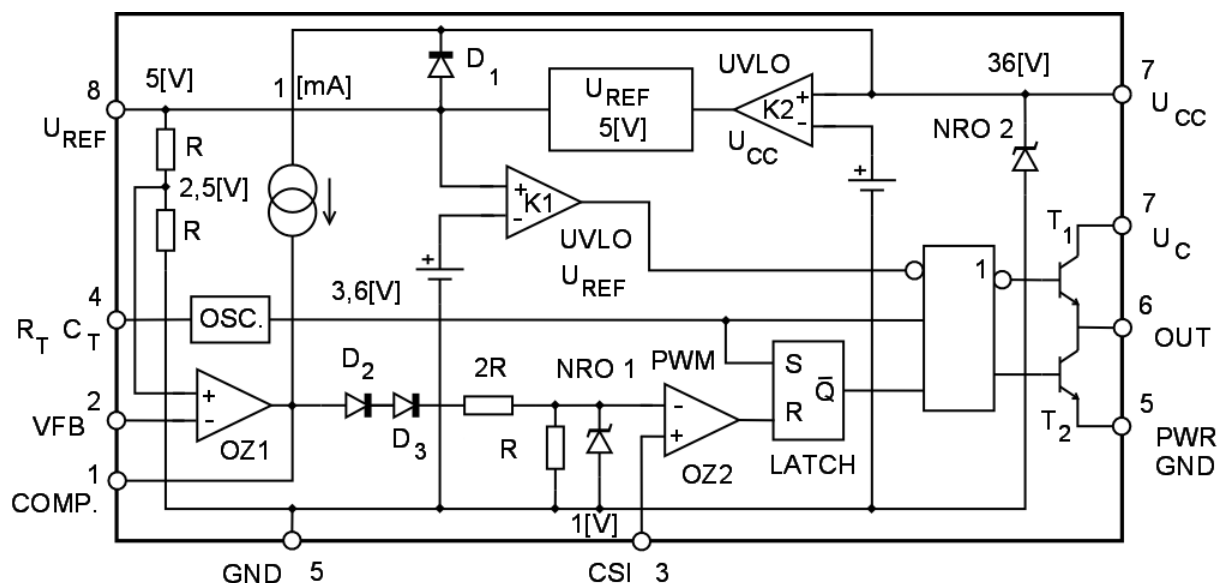
Obr. 3.3 Zapojení L200CV [16]

$$V_0 = V_{ref} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = 2,75 \cdot \left(1 + \frac{4,7 \cdot 10^3}{470}\right) = 30,25V \quad (3.27)$$

$$I_{0(max)} = \frac{V_{5-2}}{R_3} = \frac{0,45}{0,45} = 1A \quad (3.28)$$

V celkovém schématu je uvedené jiné zapojení s obvodem L200. To však nebylo nakonec optimální. Výstupní napětí nebylo při větším zatěžovacím proudu dostatečně stabilizováno. Bohužel byla už navržena a vyhotovena deska plošných spojů. I přesto jsem dočasně předělal desku na toto zapojení a naměřil potřebné hodnoty, které vykazovaly podstatně lepší výsledky. Taktéž byla odzkoušena proudová ochrana, která bez problému fungovala.

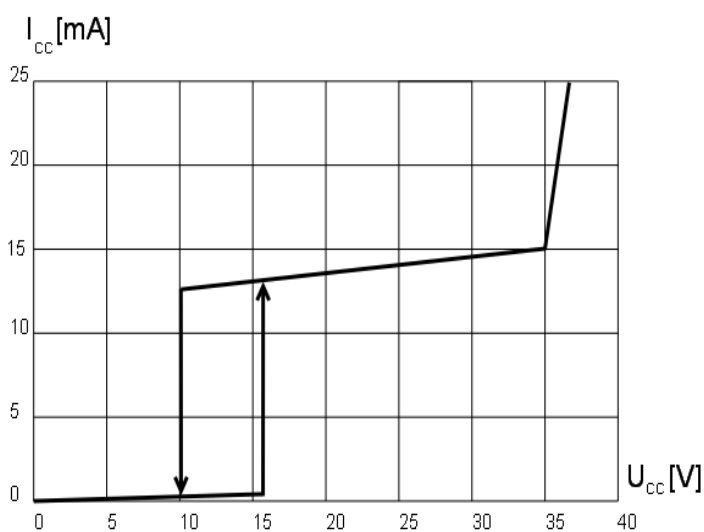
3.4 Funkce řídicího obvodu



Obr. 3.4 Vnitřní zapojení obvodu UC3842 [1]

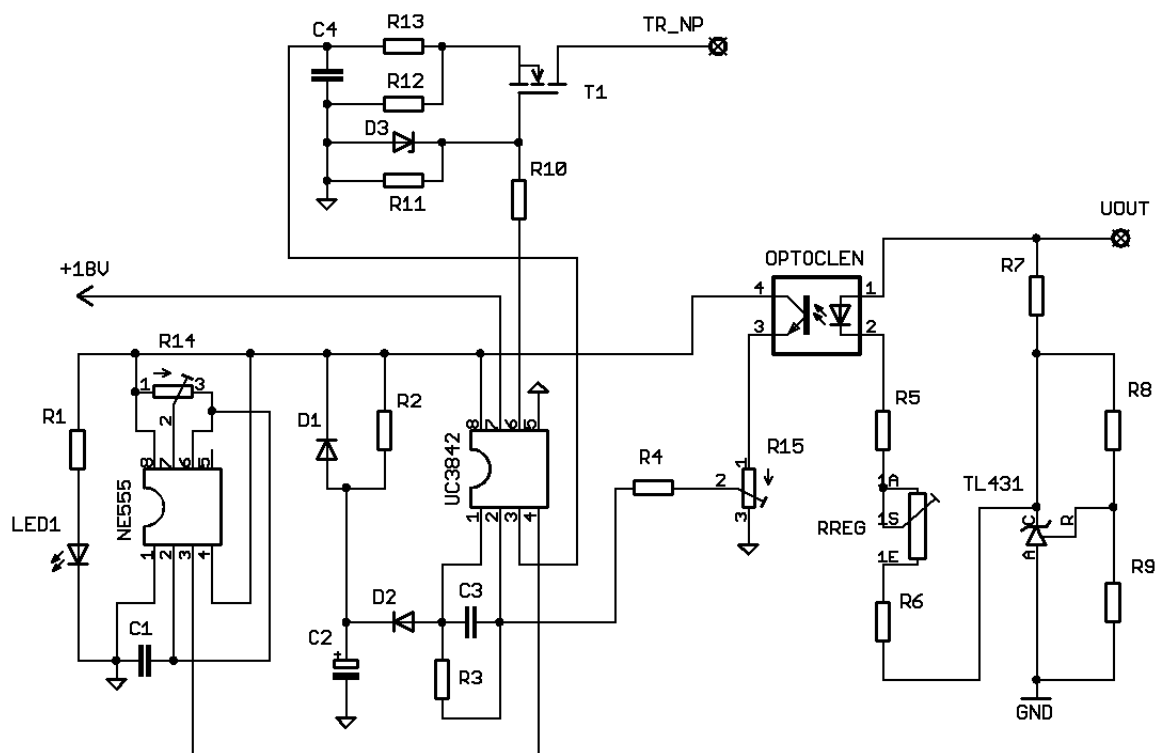
Obvod UC3842 a jeho varianty jsou určeny pro realizaci spínaných zdrojů s pevnou pracovní frekvencí. Ta se dá nastavit vnějšími časovacími prvky. Odpojem R_T zapojeným mezi vývody 8,4 a kondenzátorem C_T zapojeným mezi vývody 4,5. Primární funkcí obvodu je buzení externích tranzistorů MOSFET. Vnitřní zdroj referenčního napětí je 5V s přesností 1%. Má zabudovanou ochranu proti zkratu a může být použit i pro odběr proudu. Napájecí napětí leží v pracovním intervalu 10V až 36V. Je zde však zavedena hysterese a obvod začíná pracovat až po dosažení 16V. Proti napěťovému přetížení je chráněn členem NRO 2 a přestává pracovat při poklesu napájecího napětí pod 10V. Tyto závislosti a také proudové odběry je dobře vidět na následujícím grafu. Klidový odběr se pohybuje zhruba okolo 14 mA a maximální proudové zatížení je 25 mA při napětí 36V. Pro hlídání poklesu referenčního i napájecího napětí jsou v obvodu dva ULVO (Undervoltage Lockout). Na výstupu je dvojice PNP tranzistorů, pracujících jako zdroj napětí.

Výstupní napětí zdroje je pomocí zpětnovazební smyčky přivedeno na svorku 2, což je invertující vstup OZ1 a porovnává se s polovinou referenčního napětí. Z výstupu OZ1 prochází přes dvě diody, které způsobí úbytek asi 1,4V a dále je vyděleno děličem $2R - R$ na jednu třetinu. Takto upravené napětí se přivede na invertující vstup OZ2, který má funkci PWM komparátoru, kde se porovnává s napětím vzniklým průchodem spínaného proudu na externím odporu.



Obr. 3.5 Spotřeba proudu obvodu UC3842 [1]

3.5 Konkrétní výpočty hodnot jednotlivých součástek



Obr. 3.6 Schéma zapojení budící části obvodu (číslování je pouze informativní pro následující výpočty)

Vzorce podle [1 a 6]

K nastavení frekvence a maximální střídy je použit časovač NE555, pomocí kterého jde provést i synchronizace s dalšími obvody UC3842. Střídu můžeme vypočítat podle následujícího vzorce.

$$s = \frac{t_1}{T} = \frac{R_A}{2R_A + R_B} = \frac{7,5 \cdot 10^{-6}}{20 \cdot 10^{-6}} = 0,375 \quad (3.29)$$

R_A volím $5 \text{ k}\Omega$ a z předchozího vzorce si vyjádřím a dopočítám R_B .

$$R_B = \frac{R_A - 2 \cdot s \cdot R_A}{s} = \frac{5 \cdot 10^3 - 2 \cdot 0,375 \cdot 5 \cdot 10^3}{0,375} = 3,33 \text{ k}\Omega \quad (3.30)$$

Pokud se rezistory R_A a R_B realizují jako jeden potenciometr, je možné při zachování kmitočtu nastavovat střídu signálu. Frekvence oscilátoru je:

$$f = \frac{1,44}{(R_A + 2 \cdot R_B) \cdot C} \Rightarrow \quad (3.31)$$

$$C = \frac{1,44}{f \cdot (R_A + 2 \cdot R_B)} = \frac{1,44}{50 \cdot 10^3 \cdot (5 \cdot 10^3 + 2 \cdot 3,33 \cdot 10^3)} = 2,47 \text{ nF}$$

Časovací obvod NE555 je napájen z referenčního zdroje obvodu UC3842. Činnost obvodu je signalizována svítící led diodou LED₁. Při velikosti odporu 2,4 kΩ a napětí referenčního zdroje 5V vychází proudový odběr přibližně 2 mA, což je zanedbatelné.

Zapojením odporu R₂ a kondenzátoru C₂ zajistíme měkký start obvodu. Ze zdroje referenčního napětí přes odpor R₂ = 1 MΩ a ze svorky 1 přes diodu D₂ se nabíjí kondenzátor C₂. Po tuto dobu kondenzátor omezuje velikost výstupního proudu. Doba měkkého startu obvodu vypočteme následovně.

$$t_s = 3600 \cdot C_2 = 3600 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 0,36 \text{ s} \quad (3.32)$$

Hodnotu výstupního napětí zdroje nastavujeme děličem výstupního napětí, který tvoří trimr R₁₅. Jeho středové napětí se porovnává na invertujícím vstupu s polovinou referenčního napětí. Hodnota zpětnovazební odporu R₃ musí být vždy větší než 8,8 kΩ a zesílení OZ₁ se obvykle nastavuje na hodnotu A_u = 30. Ještě je podle výrobce doporučeno provést kompenzaci OZ₁ pomocí kondenzátoru C₃, který je paralelně připojen k odporu R₃ a společně tvoří integrační člen. Časová konstanta však musí být menší, než je doba periody zesilovaného pilovitého napětí z výstupu zdroje. Platí:

$$\tau = R_3 \cdot C_3 < T = \frac{1}{f_{osc}} [s] \quad (3.33)$$

Zesílení se vypočítá podle následujícího vztahu. Odporů R_{T1} a R_{T2} tvoří trimr R₁₅.

$$A_u = \frac{-u_{výst}}{u_{vst}} = - \left(\frac{R_3}{R_4 + \frac{R_{T1} \cdot R_{T2}}{R_{T1} + R_{T2}}} + 1 \right) [dB] \quad (3.34)$$

$$R_3 = (A_u + 1) \cdot \left(R_4 + \frac{R_{T1} \cdot R_{T2}}{R_{T1} + R_{T2}} \right) = (30 + 1) \cdot \left(4,7 \cdot 10^3 + \frac{250 \cdot 250}{250 + 250} \right) = 149,58 \text{ k}\Omega \quad (3.35)$$

Při zvolené hodnotě kondenzátoru C₃ = 100 pF a odporu okolo 150 kΩ je časová konstanta $\tau = R_3 \cdot C_3 = 150 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-12} = 15 \mu\text{s}$. Zesílení je nastaveno zhruba na hodnotu 30 dB a zpětnovazební odpor splňuje podmínku, že musí být větší než 8,8 kΩ.

Na výstupu č.6 IO UC3842 jsou obdélníkové řídicí impulsy pro spínací tranzistor T₁. Zenerova dioda D₃ omezuje případné napětíové špičky na hodnotu U_{GS}, která je povolena výrobcem. Proud prochází spínacím tranzistorem a zároveň i odporem R₁₂, který slouží jako proudová ochrana. Napětí na něm je přivedeno na vstup č.3 a při překročení hodnoty 1V se výstupní impulsy okamžitě omezí. Pro potlačení napětíových špiček na tomto odporu slouží odpor R₁₃ a kondenzátor C₄. Jejich časová konstanta musí být menší než perioda pracovního cyklu. $\tau = R_{13} \cdot C_4 = 560 \cdot 1 \cdot 10^{-9} = 0,56 \mu\text{s}$.

Výstupní napětí ze zdroje U_{OUT} je přivedeno na anodu optočlenu a napěťový regulátor TL431. Pomocí odporů R_8 a R_9 je nastaveno přesné výstupní referenční napětí. [10]

$$U_v = \left(1 + \frac{R_8}{R_9}\right) \cdot U_{REF} = \left(1 + \frac{4,7 \cdot 10^3}{4,7 \cdot 10^3}\right) \cdot 2,5 = 5V \quad (3.36)$$

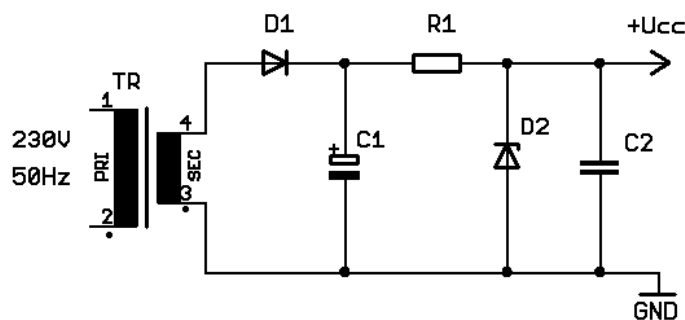
Pro spolehlivou stabilizaci výstupního napětí je potřeba příčný proud 1 až 100 mA

$$I = \frac{U_{OUT} - 5}{R_7} = \frac{3 \rightarrow 31}{1,5 \cdot 10^3} = 2 \rightarrow 20,6 mA \quad (3.37)$$

Pomocí potenciometru R_{REG} a odporů R_5 , R_6 je regulována velikost proudu diodou optočlenu. Ten způsobí osvit fototranzistoru, který je připojen na výstupní svorku č.8 (referenční napětí 5V). A toto napětí je přes odpor R_4 přivedeno na vstup č.2. Princip regulace výstupního napětí spočívá ve změně velikosti napětí na vstupu č.2 v blízkém rozmezí okolo 2,5V. Pokud zmenšíme odpor potenciometru R_{REG} dojde ke zvýšení proudu diodou, tím pádem i vyšší svítivosti a zvýšení napětí na vstupu č.2, což má za následek snižování šířky impulsů a tím i výstupního napětí. Naopak při zvýšení regulačního odporu se smyčka chová opačně a dochází k rozšíření výstupních impulsů a zvýšení výstupního napětí.

4 Pomocné napájení a zapojení měřidel napětí a proudu

Napájení IO UC3842 a modulů měřidel napětí a proudu je vyřešeno pomocí transformátoru, jehož sekundární napětí je jednocestně usměrněno, filtrováno a stabilizováno pomocí stabilizátoru se zenerovou diodou.



Obr. 4.1 Pomocné napájení

a) Výpočet hodnot součástek pro napájení UC3842

$$R_1 = \frac{U_{C1} - U_{D2}}{I_{R1}} = \frac{22 - 18}{35 \cdot 10^{-3}} = 114,3 \Omega \quad (4.1)$$

I_{R1} se skládá z proudu tekoucího do zátěže a proudu tekoucího zenerovou diodou. Ten se volí přibližně jedna třetina nebo větší z proudu zatěžovacího. Odpor R_1 volím 120Ω . Nyní ještě vypočtu výkonové ztráty na odporu i zenerové diodě a vyberu vhodné součástky.

$$P_{R1} = R_1 \cdot I_{R1}^2 = 120 \cdot 0,035^2 = 0,147 W \quad (4.2)$$

$$P_{D2} = U_{D2} \cdot I_{D2} = 18 \cdot 0,01 = 0,18 W \quad (4.3)$$

b) Výpočet hodnot součástek pro napájení modulů měřidel

$$R_1 = \frac{U_{C1} - U_{D2}}{I_{R1}} = \frac{30 - 8,2}{6 \cdot 10^{-3}} = 3,63 k\Omega \quad (4.4)$$

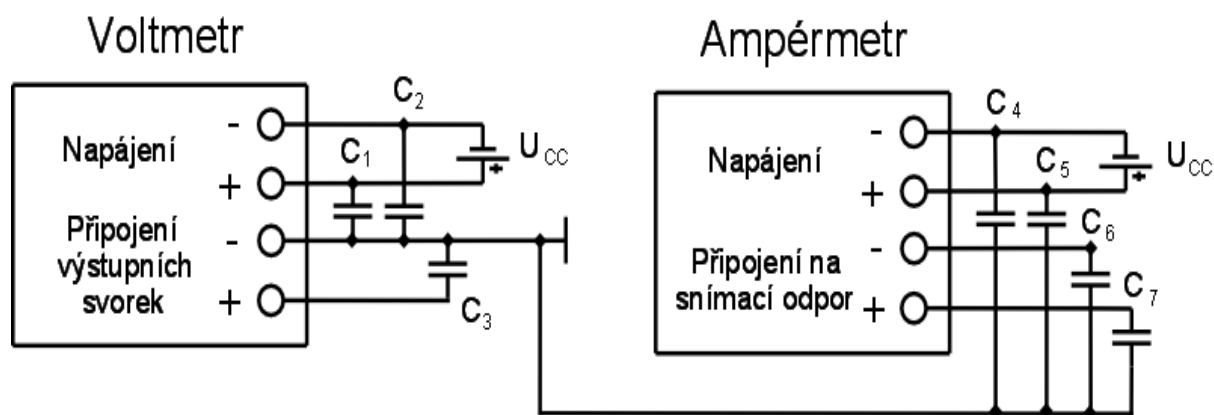
Odpor R_1 volím $3,3 k\Omega$.

$$P_{R1} = R \cdot I_{R1}^2 = 3,3 \cdot 10^3 \cdot 0,006^2 = 0,119 W \quad (4.5)$$

$$P_{D2} = U_{D2} \cdot I_{D2} = 8,2 \cdot 0,005 = 0,041 W \quad (4.6)$$

Jelikož odebírané proudy jsou minimální, jsou i výkonové ztráty zanedbatelné.

Pro měření napětí a proudu jsem použil dvě LCD panelová měřidla HD-3438, která jsou běžně k dostání například v obchodech GM Electronic. Je důležité poznamenat, že v uvedeném zapojení (voltmetr a ampérmetr) použité měřicí moduly nemohou mít společnou napájecí a měřicí zem a je třeba pro každý vytvořit galvanicky oddělené napájení.



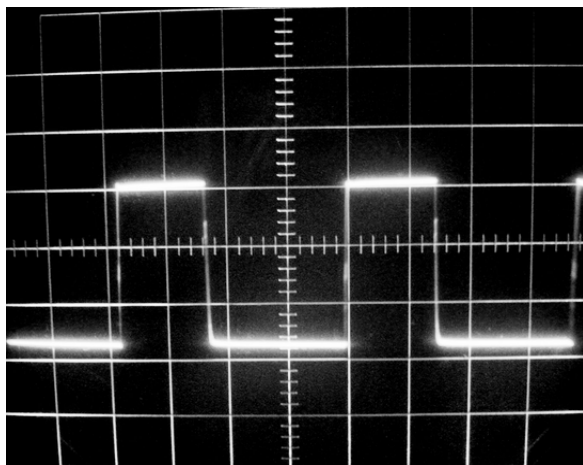
Obr. 4.2 Zapojení měřidel (pohled ze zadní strany)

Měřidla jsou napájena stejnosměrným napájecím napětím 8,2V a každé má proudový odběr 1 mA. U voltmetru jsou výstupní svorky připojeny přímo na výstup zdroje, kdežto u ampérmetru se snímá napětí na snímacím odporu o velikosti 1 Ω . To znamená, že při průchodu proudu např. 0,5 A, je na odporu úbytek 0,5 V. Podle popisu v datasheetu jsem nastavil rozsahy pro maximální měřené napětí a desetinnou tečku. Po spuštění zdroje měřidla však ukazovala nesmyslné údaje. Tento problém jsem vyřešil blokováním napájení a přívodů keramickými kondenzátory 100nF.

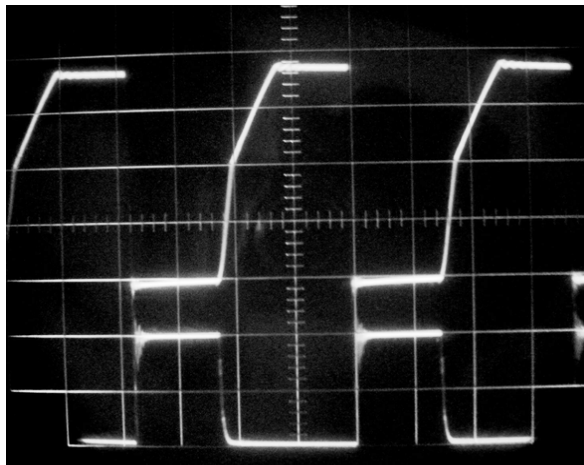
Maximální měřené napětí	Hodnoty rezistorů R_A a R_B	Desetinná tečka
200 mV	-	Propojte pájecí body P3
20 V	Odstraňte propojku na pozici R_B a nahraďte ji rezistorem 9,9 M Ω . Do pozice R_A zapojte rezistor 100 k Ω	Propojte pájecí body P2
200 V	Odstraňte propojku na pozici R_B a nahraďte ji rezistorem 9,99 M Ω . Do pozice R_A zapojte rezistor 10 k Ω	Propojte pájecí body P3
500 V	Odstraňte propojku na pozici R_B a nahraďte ji rezistorem 9,999 M Ω . Do pozice R_A zapojte rezistor 1 k Ω	-

Tab. 4.1 Nastavení rozsahů měřidel a desetinné tečky [5]

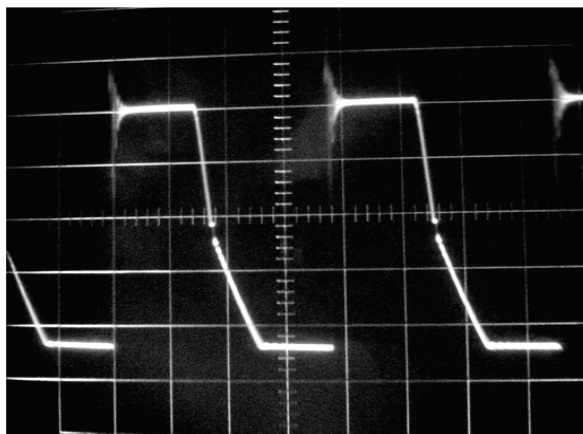
5 Naměřené průběhy a hodnoty



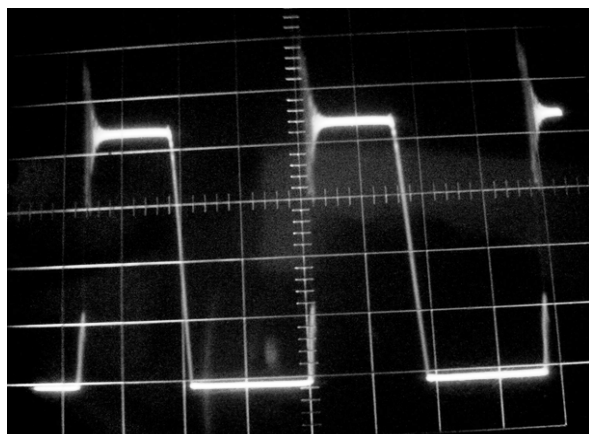
Obr. 5.1 Průběh napětí na gate T_1
(5V/d, 5μs/d)



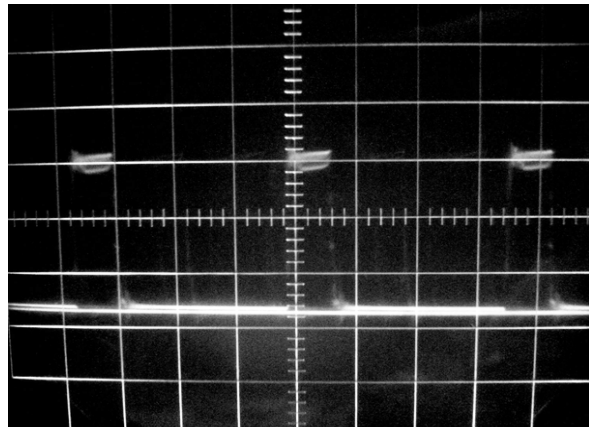
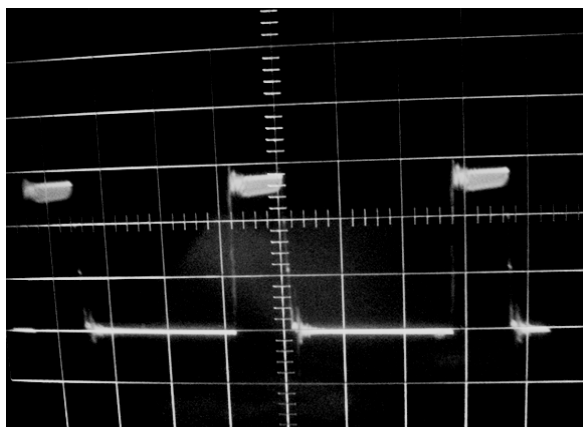
Obr. 5.2 Průběh napětí na primárním
vinutí a na gate T_1
(100V/d, 5μs/d a 5V/d, 5μs/d)



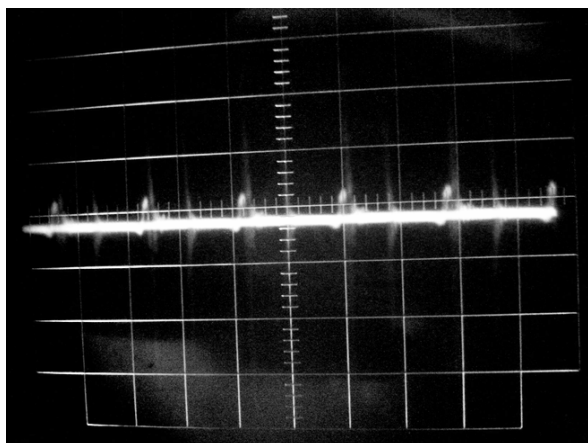
Obr. 5.3 Průběh napětí na sekundárním vinutí
(20V/d, 5μs/d)



Obr. 5.4 Průběh napětí na diodě D8
(10V/d, 5μs/d)



Obr. 5.5 a 5.6 Porovnání šířky pulsů na gate T_1 při výstupním napětí 30V a 20V. Při 10 V byl budící pulz ještě užší. (5V/d, 5μs/d)



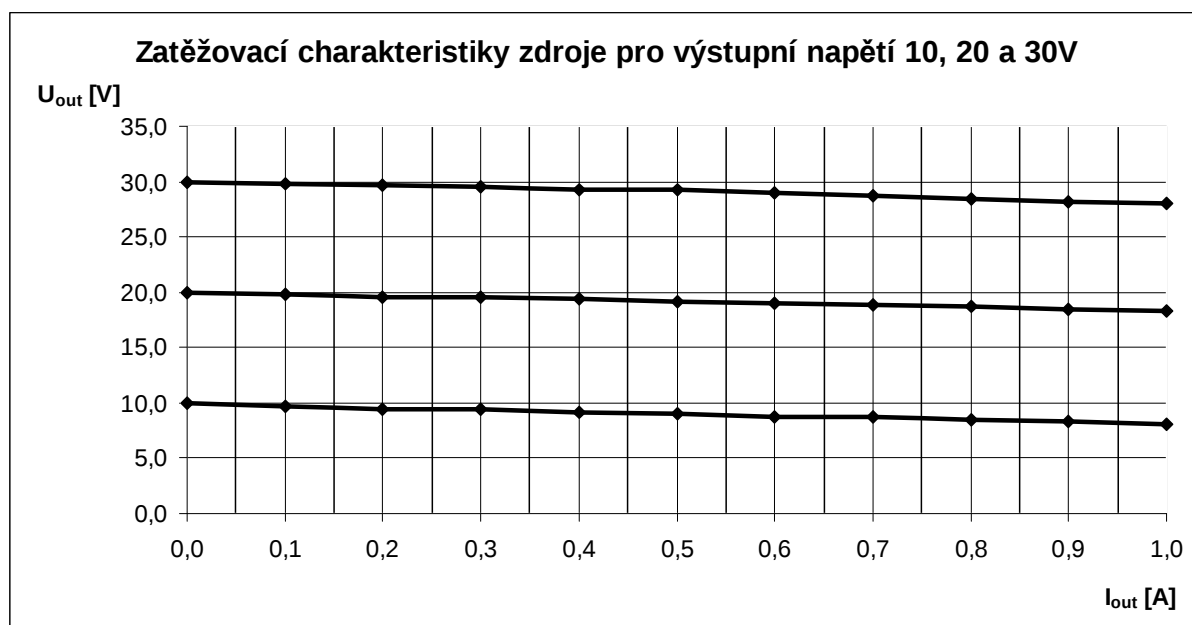
Obr. 5.7 Zvlnění na výstupu při zatížení 0,15 A
(100mV/d, 5μs/d)

Při dalších měřeních zvlnění nepřesahovalo velikost 200 mV.

Stabilita se změnou síťového napětí (+10%, -15%): $\Delta U_{\text{out}} = 0 \text{ V}$.

$I_{\text{OUT}} [\text{A}]$	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$U_{\text{OUT } 10} [\text{V}]$	10,0	9,7	9,5	9,4	9,2	9,0	8,8	8,7	8,5	8,4	8,1
$U_{\text{OUT } 20} [\text{V}]$	20,0	19,8	19,6	19,5	19,4	19,2	19,0	18,9	18,7	18,5	18,3
$U_{\text{OUT } 30} [\text{V}]$	30,0	29,8	29,7	29,5	29,3	29,2	29,0	28,7	28,5	28,2	28,0

Tab. 5.1 Zatěžovací charakteristika zdroje



Obr. 5.8 Zatěžovací charakteristika zdroje

6 Závěr

V bakalářské práci jsem navázal na semestrální projekt. Nejprve se mi podařilo odstranit nepříjemné rušení, které způsobovalo při zvýšení zatěžovacího proudu deformaci budícího pulsu. To mělo za následek trvalé sepnutí spínacího tranzistoru a jeho zničení. Příčinou byl vysokofrekvenční transformátor. Znovu jsem přepočítal závity, snížil hodnotu syčení a maximální střídu zvolil 0,375. To znamená, že maximální doba sepnutí je vůči celkové periodě 7,5 μ s. U propustného měniče je podmínka: doba sepnutí spínacího tranzistoru musí být menší než polovina periody. Tato podmínka byla tedy splněna s dostatečnou rezervou. Také jsem zvolil jiný způsob vinutí, aby došlo ke snížení rozptylové indukčnosti. Polovina primárního vinutí je navinuta v nejspodnější vrstvě a druhá polovina v nejhornější. Mezi nimi je navinuto sekundární a demagnetizační vinutí. Na povrchu je umístěna stínící měděná folie proti vyzařování.

Místo předchozího zastaralého IO B260D jsem zvolil modernější typ UC3842 a navrhl nový budící obvod, který je podrobněji popsán v kapitolách 3.4 a 3.5. Jelikož IO je přímo propojen s výkonovým tranzistorem a tím pádem i nebezpečnou částí zdroje, je zpětná vazba z výstupu zdroje vedena přes optočlen, který zajišťuje galvanické oddělení vstupní a výstupní části.

Měnič je navržen na maximální zatěžovací proud 1,5A a výstupní napětí 35V. Na jeho výstupu je zapojen stabilizátor L200 se zenerovou diodou. Je důležité zmínit, že proud na výstupu zdroje je ještě zmenšen o proud tekoucí pevným zátěžovým odporem a proud tekoucí odporem R_5 sloužící ke stabilizační funkci zenerovy diody. V primární části je snímací odpor, který funguje jako proudová ochrana. Spočítal jsem, že při maximálním dovoleném zatížení teče v primárním okruhu proud 0,71 A. To znamená, že při velikosti odporu 1,2 Ω dojde k úbytku napětí 1V, které je potřebné pro omezení výstupních pulzů, při proudu 0,83A. Při testování této ochrany jsem však narazil na jisté problémy. K omezení proudu došlo již při velikosti $I_{out} = 0,45A$. Na osciloskopu jsem zaznamenal záškuby na snímacím odporu, které pravděpodobně způsobily předčasné omezování. Zkusil jsem blokovat přímo vstup č.3 řídicího obvodu kondenzátorem 10nF a výstupní proud potom šel zvýšit až na požadovanou hodnotu. Přesto jsem pro jistotu zařadil do obvodu ještě rychlou pojistku o hodnotě 1A.

Chtěl bych také poznamenat, že hodně času mi mimo jiné zabralo odstranění závad ze semestrálního projektu, návrh a testování nové verze budícího obvodu a další činnosti spojené zejména s výběrem součástek, návrhem desky, jejím osazením a celkovou mechanickou konstrukcí, s kterými jsem doposud neměl téměř žádné zkušenosti. Z toho také plynuly některé chyby, kterých jsem se při realizaci dopouštěl. Například ne zcela dokončená výstupní část s obvodem L200, kde původní zapojení, které je zde popsáno, nebylo zcela vyhovující. Proto jsem se ho rozhodl ještě upravit a v improvizovaném provedení odzkoušet. Naměřené hodnoty zatěžovací charakteristiky byly podstatně lepší a zavedl jsem také proudovou ochranu, která bezpečně fungovala. Mohu konstatovat, že zdroj je funkční a umožňuje plynulou regulaci výstupního napětí v rozmezí 3 až 30V. Taktéž je schopen dodat požadovaný zatěžovací proud a dal by se použít pro napájení v laboratoři.

Celé zapojení je provedeno na jedné osazovací desce, která je umístěna do krabičky, jak je popsáno a vyfoceno v příloze č.3. Zdroj obsahuje LCD měřidla napětí a proudu, které mají vlastní napájení z pomocných zdrojů. Jejich výhodou je velmi malý odběr proudu a také přibližně poloviční cena oproti LED měřidlům.

V části č.5 jsou zobrazeny některé důležité průběhy a další naměřené hodnoty.

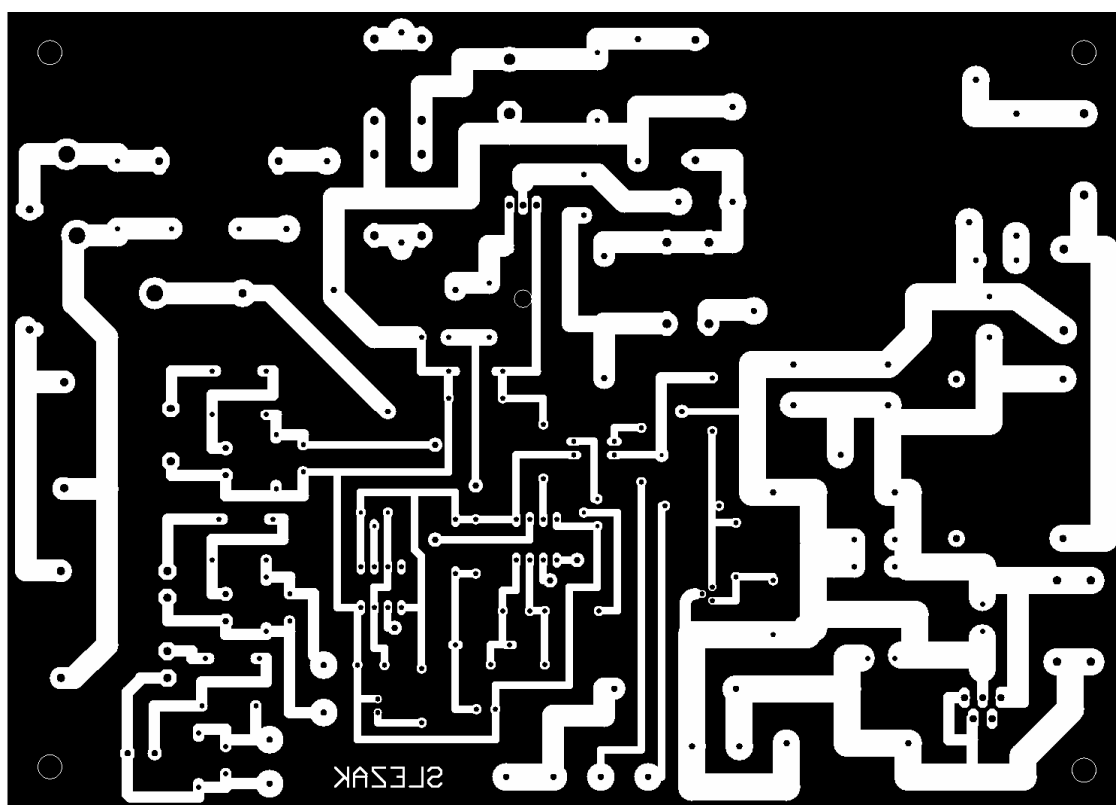
Celková cena součástek a materiálu na výrobu činila 1586 Kč (nezahrnuje desku plošných spojů). Tato cena by šla ještě zredukovat při použití menšího jádra vysokofrekvenčního transformátoru a zvolením jiného způsobu napájení IO UC3842 a měřících modulů. I přesto je tato cena stále podstatně nižší, než za jakou se prodávají podobné zdroje v obchodech.

7 Seznam použité literatury a jiných zdrojů

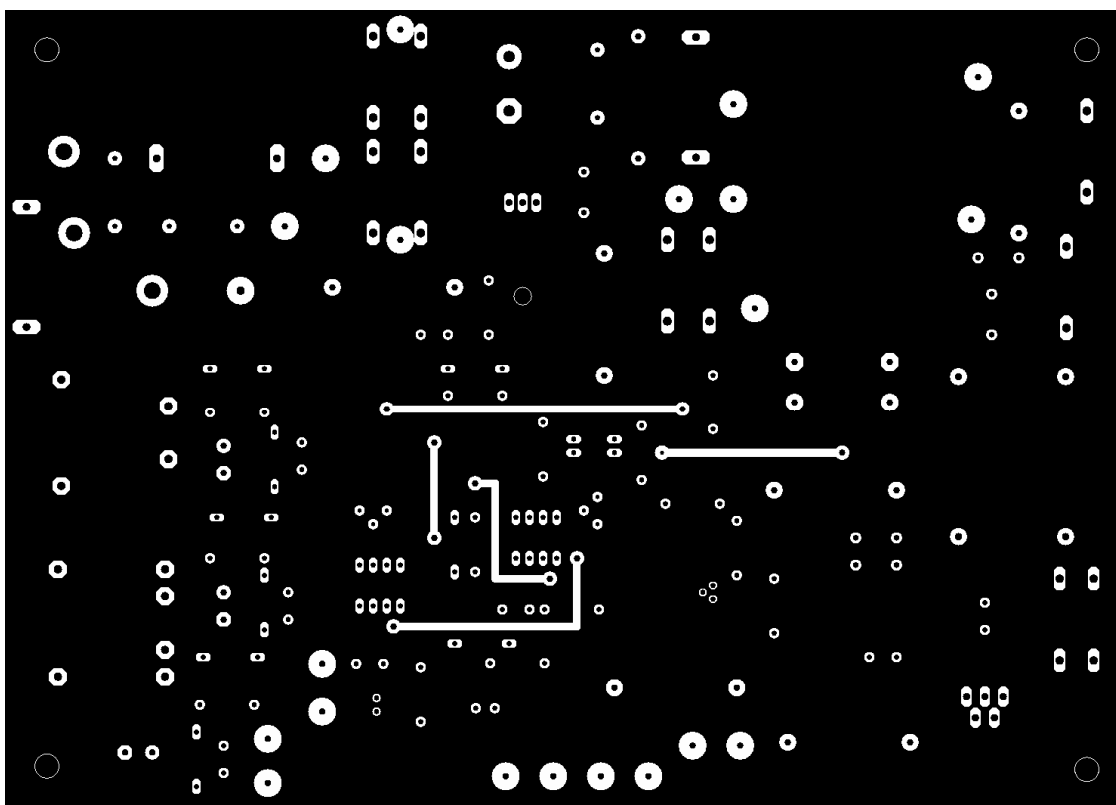
- [1] KREJČÍŘÍK, Alexander. Napájecí zdroje I.- III. BEN - technická literatura, Praha, 1997.
- [2] FAKTOR, Zdeněk. Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje. BEN - technická literatura, Praha, 2002. 243 s. ISBN 80-86056-91-0.
- [3] PARKAN, Petr; PATÁK, Zdeněk. Impulsně regulovaný napájecí zdroj s výkonovými tranzistory MOS. Sdělovací technika, 1982, č. 10, s. 363-367.
- [4] NESVATBA, Josef; PARKAN, Petr; PATÁK, Zdeněk. Konkrétní realizace impulsně regulovaného napájecího zdroje. Sdělovací technika, 1976, č. 12, s. 463-467.
- [5] GM Electronic – elektronický katalog. Dostupný z WWW: <<http://www.gme.cz>>
- [6] KREJČÍŘÍK, Alexander. Spínané zdroje. Konstrukční elektronika A Radio, 2000, roč. 5, č. 3 a 4, s. 1-40 a 1-39.
- [7] ŠEBESTA, Jiří. Přednášky k předmětu Napájení elektronických zařízení, 2007, FEKT VUT v Brně.
- [8] SLÁNSKÝ, Michal. Napájecí stabilizovaný regulovatelný zdroj s obvodem L200 [online]. Dostupný z WWW: <<http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Konstrukce/ART1815-Napajeci-stabilizovany-regulovatelný-zdroj-s-obvodem-L200.html>>
- [9] Redakce HW serveru. Stabilizátor L200 [online]. Dostupný z WWW: <<http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Dokumentace/ART826-Stabilizator-L200.html>>
- [10] Redakce HW serveru. TL431 - mnohem více než Zenerova dioda [online]. Dostupný z WWW: <<http://hw.cz/Produkty/Nove-soucastky/ART725-TL431---mnohem-vice-nez-Zenerova-dioda.html>>
- [11] Katalogový list SIEMENS: BUZ 80A
- [12] Katalogový list VISHAY: SFH615A / SFH6156
- [13] Katalogový list FILTANA: FS 241, 242
- [14] Katalogový list ST Microelectronics: BYW98/200
- [15] Katalogový list AMIDON: FERRITE 'E' CORES
- [16] Katalogový list SGS-Thomson Microelectronics: L200

Příloha č.1: Kompletní schéma zapojení

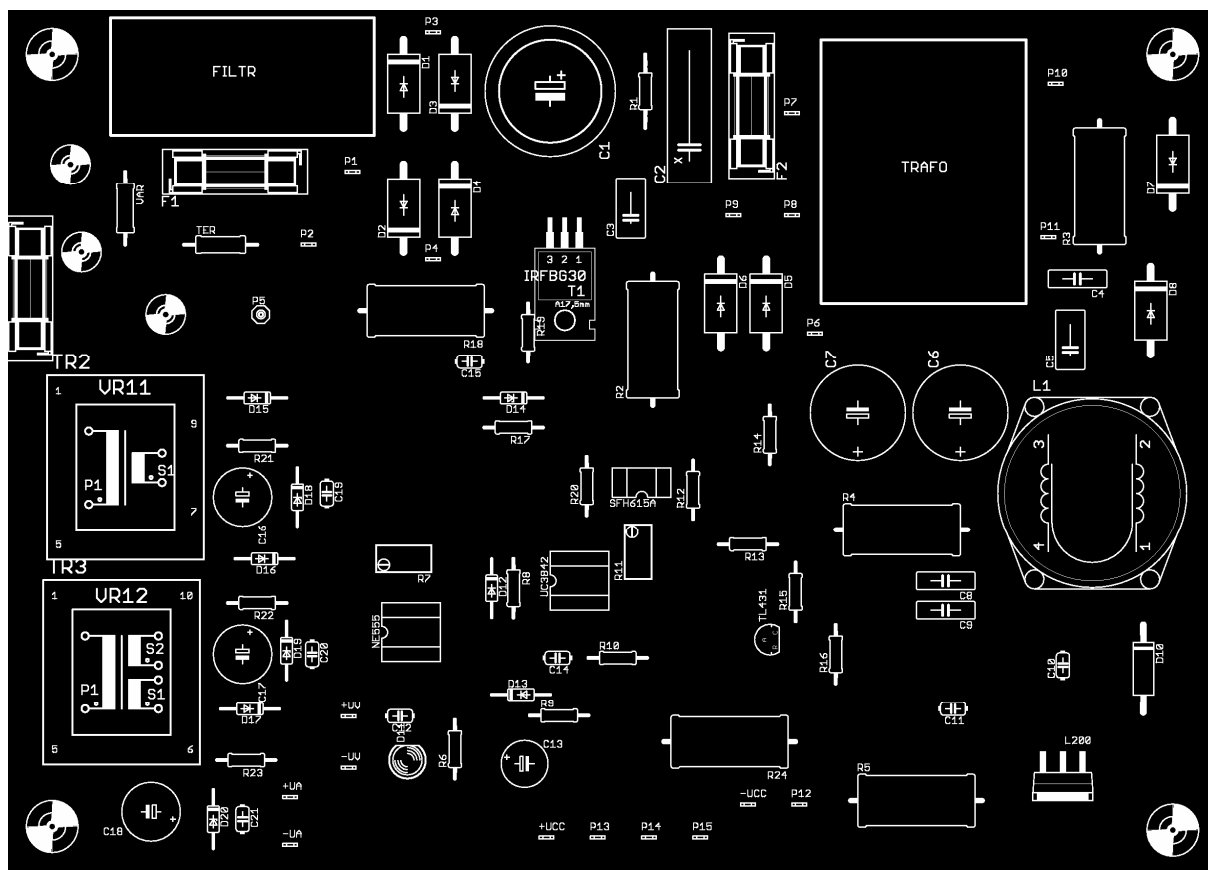




Motiv spodní strany plošného spoje

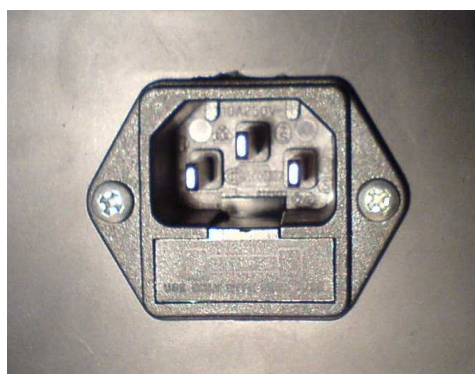
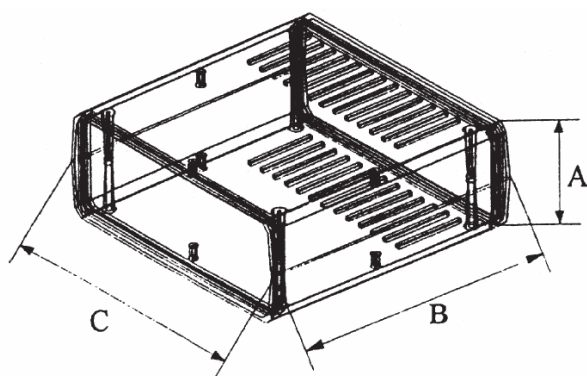


Motiv vrchní strany plošného spoje (Spoje jsou řešeny pomocí drátových propojek)



Osazovací plán

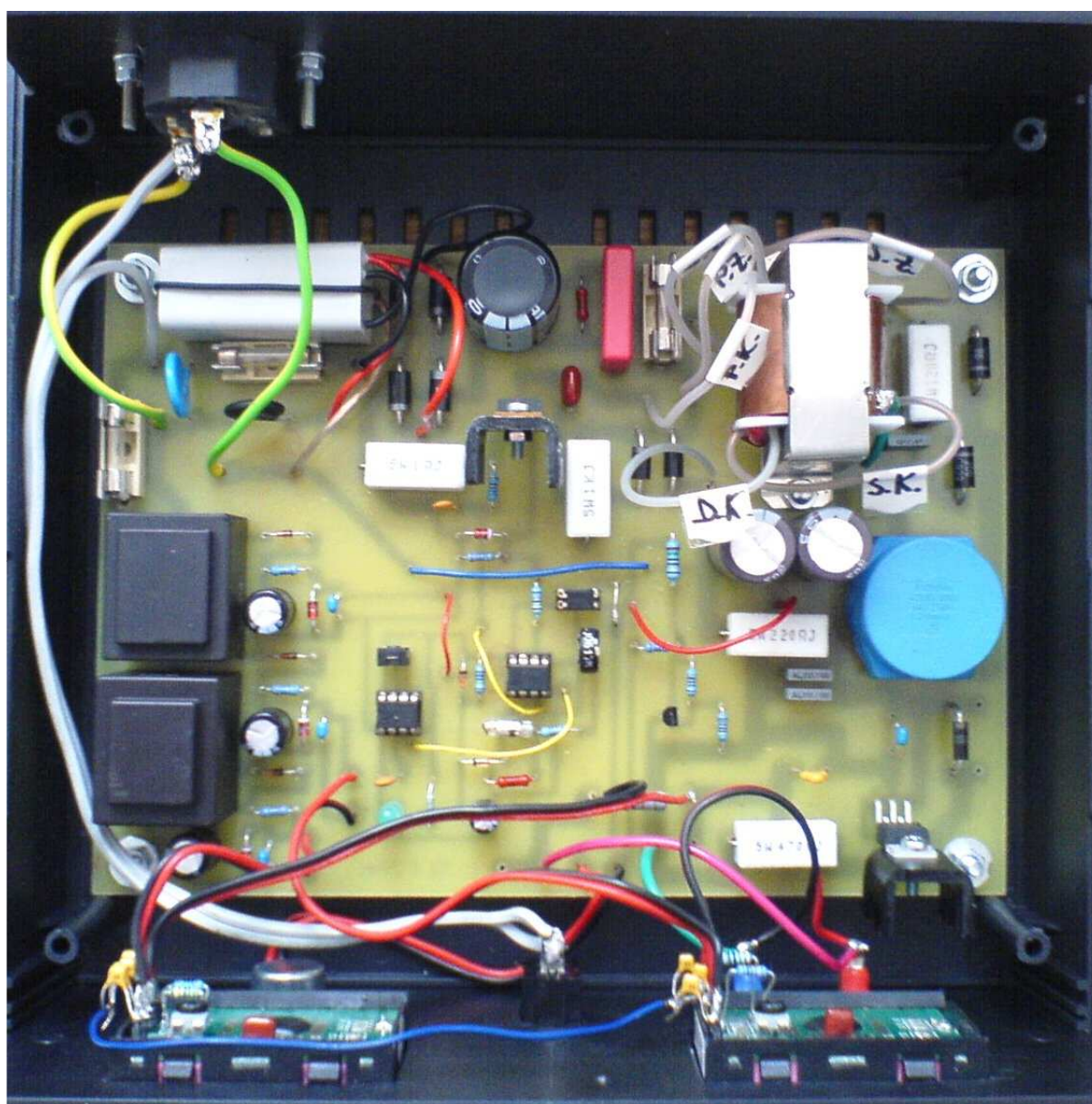
Příloha č.3: Mechanická konstrukce



Pro upevnění desky, měřidel a dalších součástí jsem použil krabičku z černého polypropylenu o rozměrech 92 x 217 x 235 (a x b x c). Skládá se ze 2 hlavních dílů, 2 čel a spojení je pomocí 4 vrtů. Také má větrací otvory pro lepší odvod teplého vzduchu. Na druhém obrázku je síťová přípojka, která obsahuje pojistkový držák. [5]



Přední panel (vlevo - ampérmetr, vpravo – voltmetr)



Celkové uspořádání bez horního krytu

Příloha č.4: Seznam součástek

Označení součástky	Hodnota	Typ součástky	Dodavatel	Označení položky u dodavatele	Cena
C1	100u/450V	elyt radiální	GM	E100M/450V	40,00
C2	100n/1kV	fól. kond.	GM	MKS4-100N/1KV	20,00
C3	1n/630V	fól. kond. MKT	GM	CF7-1N0/J	3,50
C4	10n/400V	fól. kond. MKT	GM	CF6-10N/J	2,50
C5	100n/100V	fól. kond. MKT	GM	CF4-100N/J	3,50
C6	1000u/50V	Cap Xon rad. Low ESR, HiFreq	GM	E1000M/50VI	46,50
C7	1000u/50V	Cap Xon rad. Low ESR, HiFreq	GM	E1000M/50VI	46,50
C8	33n/100V	fól. kond. MKT	GM	CF4-33N/J	1,00
C9	33n/100V	fól. kond. MKT	GM	CF4-33N/J	1,00
C10	220n/63V	keramický kond.	GM	CK 220N/63V	3,00
C11	100n/63V	keramický kond.	GM	CK 100N/63V	1,00
C12	1n5/500V	keramický kond.	GM	CK 1N5/500V	1,50
C13	100u/25V	elyt radiální	GM	E100M/25V	1,00
C14	100p/500V	keramický kond.	GM	CK 100P/500V	1,50
C15	1n/500V	keramický kond.	GM	CK 1N/500V	1,50
C16	220u/50V	elyt radiální	GM	E220M/50V	3,50
C17	220u/50V	elyt radiální	GM	E220M/50V	3,50
C18	220u/50V	elyt radiální	GM	E220M/50V	3,50
C19	100n/50V	keramický kond.	GM	CK 100N X7R	3,00
C20	100n/50V	keramický kond.	GM	CK 100N X7R	3,00
C21	100n/50V	keramický kond.	GM	CK 100N X7R	3,00
D1	1N5408 1000V, 3A	usměrňovací dioda	GM	1N5408	1,50
D2	1N5408 1000V, 3A	usměrňovací dioda	GM	1N5408	1,50
D3	1N5408 1000V, 3A	usměrňovací dioda	GM	1N5408	1,50
D4	1N5408 1000V, 3A	usměrňovací dioda	GM	1N5408	1,50
D5	RGP30M 1000V, 3A	rychlá dioda	GM	RGP30M	4,00
D6	RGP30M 1000V, 3A	rychlá dioda	GM	RGP30M	4,00
D7	BYW98/200 200V, 3,0A	superrychlá, 35ns	GES	BYW 98-200	7,90
D8	BYW98/200 200V, 3,0A	superrychlá, 35ns	GES	BYW 98-200	7,90
D10	1N5337B-TAP	zener. dioda 4,7V	GES	1N5337B-TAP	7,90
D11	LED zelená	nízko-příkonová	GES	L-53LGD	2,41
D12	1N4148	univerzální dioda	GM	1N4148	1,00
D13	1N4148	univerzální dioda	GM	1N4148	1,00
D14	BZX83V015	zenerova dioda	GM	BZX83V015	1,00
D15	1N4148	univerzální dioda	GM	1N4148	1,00

D16	1N4148	univerzální dioda	GM	1N4148	1,00
D17	1N4148	univerzální dioda	GM	1N4148	1,00
D18	BZX85V018	zenerova dioda	GM	BZX85V018	1,50
D19	BZX83V008.2	zenerova dioda	GM	BZX83V008.2	1,00
D20	BZX83V008.2	zenerova dioda	GM	BZX83V008.2	1,00
F1	0,4 A	trub. pojistka	GM	POJ.0.4A	3,00
F2	1A	rychlá pojistka	GM	FSF01	2,70
F3	80mA	rychlá pojistka	GM	FSF00.08	9,50
L1	2x1mH8	tlumivka	GM	RSD42H3260	79,00
IO1	NE555	časovač 555	GM	NE555	4,00
IO2	UC3842	obvod pro spínané zdroje	GM	UC3842A	16,00
IO3	SFH615A	optočlen	GM	SFH615-3	11,00
IO4	TL431	volt-reff	GM	TL431	3,50
IO5	L200	napěťový reg.	GM	L200CV	35,00
R1	220k	rezistor	GM	RR 220K	1,00
R2	1k/5W	odpor metal oxidový	GM	RR W5-1K0	5,00
R3	120/5W	odpor metal oxidový	GM	RR W5-120R	5,00
R4	220/5W	odpor metal oxidový	GM	RR W5-220R	5,00
R5	470/5W	odpor metal oxidový	GM	RR W5-470R	5,00
R6	2k4	rezistor	GM	RR 2K4	1,00
R7	10k	trimr	GM	PT625K010	3,00
R8	1M	rezistor	GM	RR 1M	1,00
R9	150k	rezistor	GM	RR 150K	1,00
R10	4k7	rezistor	GM	RR 4K7	1,00
R11	500	trimr	GM	PT15HE500	8,44
R12	0	propojka	-	-	0,00
R13	150	rezistor	GM	RR 150R	1,00
R14	1k5	rezistor	GM	RR 1K5	1,00
R15	4k7	rezistor	GM	RR 4K7	1,00
R16	4k7	rezistor	GM	RR 4K7	1,00
R17	3k6	rezistor	GM	RR 3K6	1,00
R18	1,2/5W	odpor metal oxidový	GM	RR W5-1.2R	5,00
R19	560	rezistor	GM	RR 560R	1,00
R20	24	rezistor	GM	RR 24R	1,00
R21	120	rezistor	GM	RR 120R	1,00
R22	3k3	rezistor	GM	RR 3K3	1,00
R23	3k3	rezistor	GM	RR 3K3	1,00
R24	1/2W	odpor metalizovaný	GM	RR W2 E001	2,00
T1	IRFBG30	N-MOSFET	GM	IRFBG30	35,00
TER	3,0A	NTC termistor	GES	SC13 20R0/3,0A	13,50
VAR	250V, 390V, 4500A	Varistor	GM	VCR14D391KAR	5,00

Další součástky

Označení součástky	Hodnota	Typ součástky	Dodavatel	Označení položky u dodavatele	Cena
FS 241	100nF/X2 + 2x2,2nF/Y2 + 2x10uH + 2x2,7mH	odrušovací filtr, 250VAC 2,5A	GES	TC 241B	135,00
Tr1	feritové jádro		GES	EA-77-625	299,00
Tr2	1.9VA 1x18V	trafo	GM	TR EI30/12,5-1X18	80
Tr3	3VA 2x18V	trafo	GM	TR EI30/18-2X18	100
Držák na pojistky	počet - 3 x		GM	KS21SW	16,50
Patice pro IO	počet - 3 x		GM	DIL08PZ	11,70
Chladič	počet - 2 x		GM	V71103	23,00
Síťová pojistka	0,4A	trub. pojistka	GM	POJ.0.4A	3,00
Napájecí síťová vidlice + pojistka	-		GM	GSI	33,00
Měřicí moduly	počet - 2 x		GM	HD-3438	190,00
Zdířky	počet - 2 x			SBZ BLUE a RED	14,00
Regulační potenciometr	5k	potenciometr	GM	PC1621NBK005	8,00
Síťový vypínač	přepínač kolébkový		GM	P-H8600VB01T	10,00
Kondenzátory u měřidel	100n	keramický kond.	GM	CK 100N/63V	7 x 1,00
Odpory pro nastavení rozsahů měřidel:					
R _A – Voltmetr	10k	rezistor	GM	RR 10k	1,00
R _B – Voltmetr	10M	rezistor	GM	RR 10M	1,00
R _A – Ampérmetr	100k	rezistor	GM	RR 100k	1,00
R _B – Ampérmetr	10M	rezistor	GM	RR 10M	1,00
Krabička	rozměry 92x217x235		GM	U-KP14	130,00
Železářství	šrouby, podložky a matice				cca 8,00

Celková cena materiálu: 1586 Kč (nezahrnuje desku plošných spojů)

Ceny součástek jsou aktuální ke dni 30.5.2009.

GM značí GM Electronic, s r. o.

GES značí GES-ELECTRONICS, a.s.