

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra aplikované elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Regulovatelný zdroj s impulsní předregulací

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš KULHÁNEK**
Osobní číslo: **E16B0080P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **Regulovatelný zdroj s impulsní předregulací**
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište možnosti obvodových zapojení regulovatelných lineárních zdrojů.
2. Popište možnosti předregulace lineárních zdrojů.
3. Navrhněte lineární regulovatelný zdroj 0-50V/3A s impulsním předregulátorem.
4. Realizujte funkční vzorek a proveďte měření a zhodnocení výsledků.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **Hammerbauer, J.: Elektronické napájecí zdroje a akumulátory, Skripta ZČU Plzeň 1998**
2. **Krejčířík, A.: Napájecí zdroje I., II. a III.; BEN- technická literatura, Praha 1997**
3. **Faktor, Z.: Transformátory a cívky; BEN- technická literatura, Praha 2002**

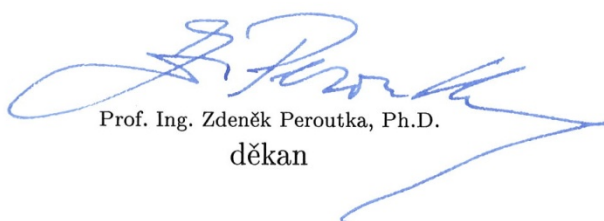
Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Pavel Valenta

Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **5. října 2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13. června 2019**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na problematiku lineárních, regulovatelných napájecích zdrojů s předregulací napětí. V práci jsou popsány možnosti lineárních zdrojů, jejich regulace napětí a možnosti předregulace napětí. Dále se práce zabývá konkrétním návrhem regulovatelného, lineárního zdroje s impulsní předregulací a jeho praktickou realizací. Celé zapojení je rozdělené na dva funkční bloky, a to předregulační měnič a lineární regulátor s pomocnými zdroji. Oba bloky jsou realizovány na oddělených deskách plošných spojů. Funkčnost celého zařízení je ověřena měřením. V závěru práce jsou uvedeny výsledky a nedostatky návrhu a praktické realizace.

Klíčová slova

Lineární napájecí zdroj, regulovatelný napájecí zdroj napětí, předregulace napětí, zpětnovazební stabilizátor, DC/DC měnič, LM5085

Abstract

This bachelor thesis is focused on problematics of linear regulated power supply with voltage pre-regulation. In this thesis are described possibilities of linear power sources, their voltage regulation and possibilities of voltage pre-regulation. This thesis further deals with specific design of regulated linear power supply with impulse pre-regulation and its implementation. The entire circuit is divided in two functional parts, one is pre-regulation converter and the other is linear regulator with auxiliary power supplies. Both parts are implemented on separated printed circuit boards. The functionality of the entire device is verified with measurement. In conclusion of this thesis are presented the results and lack of design and implementation.

Keywords

Linear power supply, regulated power supply, voltage pre-regulation, feedback regulator, DC/DC converter, LM5085

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....
Podpis

V Plzni dne 12.6.2019

Tomáš Kulháněk

Obsah

1	ÚVOD	7
2	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
3	TEORETICKÁ ČÁST	9
3.1	TOPOLOGIE LINEÁRNÍCH ZDROJŮ	9
3.1.1	<i>Transformátor</i>	9
3.1.2	<i>Usměrňovač</i>	10
3.1.3	<i>Filtr</i>	11
3.1.4	<i>Stabilizátor</i>	11
3.2	STABILIZÁTORY NAPĚTÍ	11
3.2.1	<i>Sériový stabilizátor</i>	11
3.2.2	<i>Paralelní stabilizátor</i>	12
3.2.3	<i>Zpětnovazební stabilizátor</i>	13
3.2.4	<i>Integrované stabilizátory</i>	14
3.2.5	<i>Regulace napětí stabilizátoru</i>	15
3.2.6	<i>Omezení proudu stabilizátoru</i>	16
3.3	PŘEDREGULACE NAPĚTÍ	17
3.3.1	<i>Regulační transformátor</i>	18
3.3.2	<i>Tyristorová předregulace</i>	18
3.3.3	<i>Přepínání vinutí transformátoru</i>	19
3.3.4	<i>Impulzní předregulace</i>	20
4	PRAKTICKÁ ČÁST	22
4.1	NÁVRH PŘEDREGULAČNÍHO MĚNIČE	22
4.1.1	<i>Stanovení prvků regulátoru</i>	23
4.2	NÁVRH LINEÁRNÍHO STABILIZÁTORU	28
4.2.1	<i>Stanovení prvků regulátoru</i>	30
4.3	NÁVRH OBVODU PRO ŘÍZENÍ PŘEDREGULAČNÍHO MĚNIČE	34
4.4	NÁVRH POMOCNÉHO ZDROJE	35
4.5	NÁVRH DPS	38
5	MĚŘENÍ	40
5.1	SESTAVENÝ MĚŘENÝ VZOREK	40
5.2	MĚŘENÍ ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKY	41
5.3	MĚŘENÍ ÚČINNOSTI	43
6	ZÁVĚR	44
7	POUŽITÁ LITERATURA	46
8	PŘÍLOHY	47

1 Úvod

Tato práce je zaměřena na problematiku lineárních zdrojů, možnosti jejich předregulace a konkrétněji pak na předregulaci impulzní. Předregulace se využívá ke snížení ztrátového výkonu lineárního regulátoru a zvýšení účinnosti celého zapojení.

Cílem práce bylo navrhnout zapojení lineárního regulovatelného stabilizátoru s impulsní předregulací a ověření jeho parametrů měření.

Bakalářská práce je rozdělena na teoretickou část, praktickou část a na část měření. V teoretické části jsou popsány lineární napájecí zdroje, jejich možnosti regulace a omezení výstupního proudu. Dále jsou v teoretické části popsány možnosti předregulace napětí pro lineární regulátory. V praktické části je uveden návrh zapojení předregulačního měniče, lineárního regulátoru a jejich pomocných obvodů. Jsou zde popsány jejich funkce a přiloženy návrhy desek plošných spojů. V poslední části práce měření jsou uvedeny výsledky z ověření funkce zapojení.

2 Seznam symbolů a zkratek

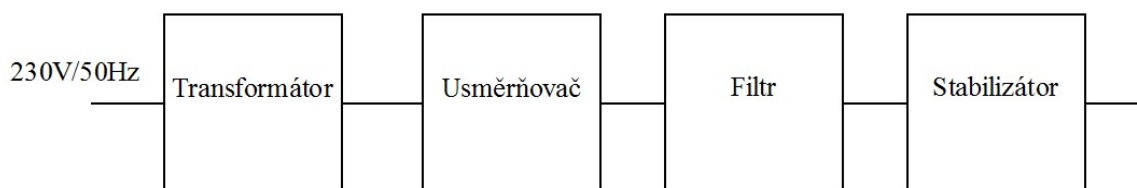
k	transformační poměr
U_{vst}	vstupní napětí
$U_{\text{výst}}$	výstupní napětí
$U_{\text{vst (max)}}$	maximální vstupní napětí
P_T	výkonová ztráta
h_{21e}	proudový zesilovací činitel tranzistoru
$I_{\text{výst}}$	výstupní napětí
OZ	operační zesilovač
U_{ref}	referenční napětí
P_z	ztrátový výkon
F_s	spínací frekvence
U_{DS}	napětí drain - source
I_D	proud drainem
P_D	maximální ztrátový výkon
U_{GS}	napětí gate - source
$t_{\text{d(on)}}$	doba sepnutí
$t_{\text{d(off)}}$	doby vypnutí
$R_{\text{DS(ON)}}$	odpor drain – source v sepnutém stavu
U_{SW}	napětí na otevřené diodě
R_θ	tepelný odpor
ϑ	teplota
t_{on}	doba sepnutí
U_{adj}	řídící napětí
U_{ripple}	zvlnění napětí
$I_{\text{OR(max)}}$	maximální zvlnění proudu
SR	rychlost přeběhu
GBW	Gain–bandwidth product
B	proudový zesilovací činitel
U_{sat}	saturační napětí
G	zesílení (gain)
T_j	teplota PN přechodu
η	účinnost

3 Teoretická část

3.1 Topologie lineárních zdrojů

Základní topologie lineárního zdroje se skládá ze síťového transformátoru, usměrňovače, filtru a stabilizátoru.

Blokové schéma lineárního zdroje je naznačeno na Obr. 1.



Obr. 1: Blokové schéma lineárního zdroje

3.1.1 Transformátor

Síťový transformátor slouží k transformaci střídavého síťového napětí na napětí o jiné velikosti a ke galvanickému oddělení napájecího zdroje od elektrické sítě. Charakteristickou veličinou transformátoru je tzv. transformační poměr k :

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} \quad (1)$$

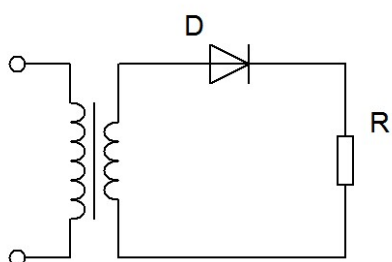
kde N_1 je počet závitů primárního vinutí, N_2 je počet závitů sekundárního vinutí, U_1 je napětí na primární straně a U_2 je napětí na sekundární straně.

Pokud je $k > 1$, je napětí na sekundární straně větší než napětí na primární straně a jedná se o zvyšující transformátor. Pokud je $k < 1$, je napětí na sekundární straně nižší než napětí na straně primární a jedná se o snižující transformátor. Zvláštním případem je $k = 1$, kdy je na primární straně stejně velké napětí jako na straně sekundární. V tomto případě se jedná o tzv. oddělovací transformátor.

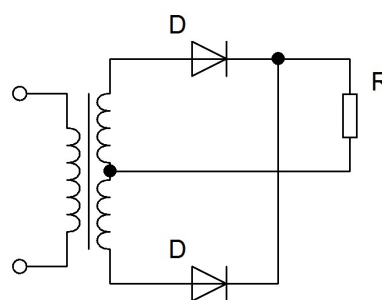
3.1.2 Usměrňovač

Usměrňovač je zařízení, které slouží k přeměně (usměrnění) střídavého napětí na napětí stejnosměrné. Základní rozdělení usměrňovačů je na jednofázové a třífázové. Pro tuto aplikaci mají význam usměrňovače jednofázové, které můžeme dále rozdělit na tři druhy:

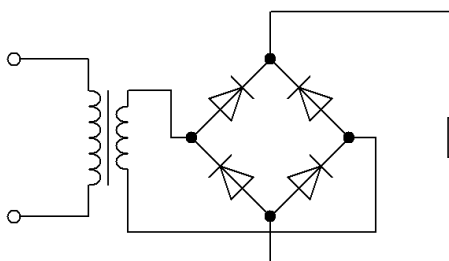
1. Jednocestný usměrňovač
2. Dvoucestný usměrňovač
3. Můstkový usměrňovač



Obr. 2: Schéma zapojení jednocestného usměrňovače



Obr. 3: Schéma zapojení dvoucestného usměrňovače



Obr. 4: Schéma zapojení můstkového usměrňovače

3.1.3 Filtr

Filtrační člen má za úkol vyhladit usměrněné pulzující napětí na výstupu usměrňovače. V dnešních zdrojích se používají výhradně jednoduché kapacitní filtry.

Velikost filtrační kapacity lze vypočítat ze vztahu:

$$C = I_c \frac{\Delta t}{\Delta u_c} \quad (2)$$

kde Δu_c je maximální pokles napětí na kondenzátoru za dobu Δt při zatížení proudem I_c .

3.1.4 Stabilizátor

Stabilizátor slouží ke stabilizaci dané veličiny na výstupu zdroje na konstantní hodnotu. Stabilizátor navíc snižuje střídavou složku výstupní veličiny, tudíž pracuje jako filtr.

Na výstupu zdroje můžeme požadovat stabilizované výstupní napětí nebo stabilizovaný výstupní proud. V následující kapitole jsou popsány stabilizátory napětí.

3.2 Stabilizátory napětí

Napětí na výstupu stabilizátoru by mělo být pokud možno stabilně konstantní a nemělo by být závislé na žádných jiných vlivech. Vlivy ovlivňující stabilitu výstupního napětí jsou například: zatěžovací proud, teplota okolí apod.

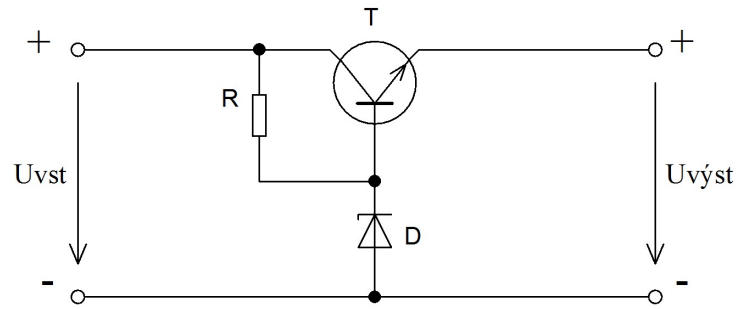
3.2.1 Sériový stabilizátor

Jako regulační člen se v tomto zapojení zpravidla používá bipolární tranzistor, který je zařazen v sérii se zátěží. Tranzistor se zde chová jako řízený odpor, který je řízen proudem do báze a vzniká na něm úbytek napětí U_{ce} . Pro výstupní napětí tedy platí:

$$U_{výst} = U_{vst} - U_{ce} \quad (3)$$

Regulačním tranzistorem zde prochází stejně velký proud jako zátěží, proto tranzistor musí být na tento proud dostatečně dimenzován. Také musí být dimenzován na výkonnou ztrátu, kterou tvoří procházející proud a úbytek napětí na tranzistoru. Výkonovou ztrátu lze určit pomocí vzorce:

$$P_T = U_{ce} \cdot I \quad (4)$$



Obr. 5: Nejjednodušší sériový stabilizátor s tranzistorem [1]

Nejjednodušší zapojení sériového stabilizátoru je nakresleno na Obr. 5. Stabilizační dioda D udržuje bázi tranzistoru T na stálém napětí. Tranzistor pracuje v zapojení se společným kolektorem, tedy jako emitorový sledovač. Zvětšuje výstupní výkon paralelního regulátoru se Zenerovo diodou a zmenšuje jeho dynamický odpor. [1]

Pro hodnotu Zenerova napětí platí vztah:

$$U_{ZD} = U_{výst} + U_{BE} \quad (5)$$

kde U_{ZD} je hodnota Zenerovo napětí, $U_{výst}$ je požadované výstupní napětí a U_{BE} je úbytek napětí báze-emitor použitého tranzistoru.

Hodnotu rezistoru R lze vypočítat podle vztahu:

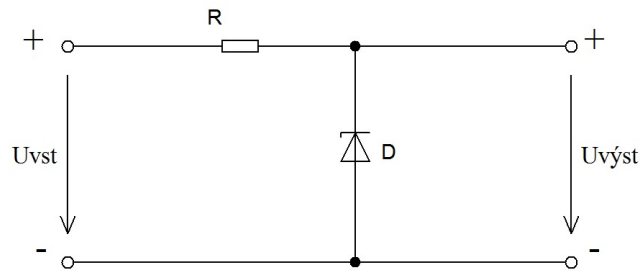
$$R = \frac{(U_{vst} - U_{ZD})}{I_{ZD} + \frac{I_{výst}}{h_{21e}}} \quad (6)$$

kde U_{vst} je vstupní napětí stabilizátoru, U_{ZD} je Zenerovo napětí vypočítané podle předchozího vztahu (5), I_{ZD} je proud Zenerovo diodou, $I_{výst}$ je výstupní proud stabilizátoru a h_{21e} je proudový zesilovací činitel použitého tranzistoru.

V případě tohoto zapojení se jedná o sériový stabilizátor bez zpětné vazby.

3.2.2 Paralelní stabilizátor

Na Obr. 6 je uveden jednoduchý paralelní stabilizátor napětí se Zenerovou diodou. Pokud napětí na vstupu stabilizátoru U_{vst} stoupne nad hodnotu Zenerova napětí použité diody D, začne diodou procházet závěrný proud, který na sériovém rezistoru R vytvoří úbytek napětí. Výstupní napětí $U_{výst}$ je dáno zenerovým napětím diody D.



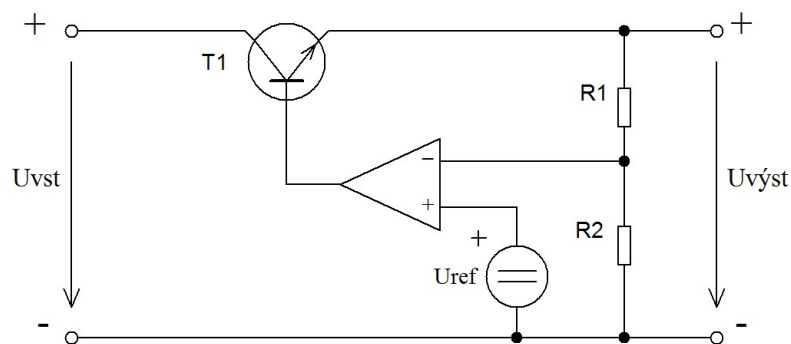
Obr. 6: Paralelní stabilizátor se Zenerovou diodou

3.2.3 Zpětnovazební stabilizátor

Zpětnovazební stabilizátor funguje na principu snímání hodnoty napětí na výstupu stabilizátoru a jeho porovnávání se známým referenčním napětím.

Na Obr. 7 je uvedeno základní zapojení zpětnovazebního stabilizátoru s operačním zesilovačem. Operační zesilovač svým výstupem ovládá tranzistor T_1 . Přes napěťový dělič je na invertující vstup přivedeno vydělené napětí na výstupu stabilizátoru. Na neinvertující vstup OZ je přivedeno referenční napětí. Tyto dvě napětí udržuje operační zesilovač shodná.

Pokud napětí na výstupu stabilizátoru vzroste, vzroste napětí na invertujícím vstupu operačního zesilovače. Klesne proud do báze regulačního tranzistoru a tím se na něm vytvoří větší úbytek napětí. Pro pokles výstupního napětí je funkce analogická.



Obr. 7: Schéma zpětnovazebního stabilizátoru

Výstupní napětí zpětnovazebního stabilizátoru je určeno následujícím vztahem:

$$U_{výst} = U_{ref} \cdot \left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \quad (7)$$

3.2.4 Integrované stabilizátory

Jedná se o integrované obvody, které jsou přímo určeny pro konstrukci stabilizátorů napětí, respektive stabilizátorů proudu. Tyto integrované obvody značně zjednodušují návrh a zapojení napájecích zdrojů. Vybraný integrovaný obvod je poté v návrhu jen doplněn několika vnějšími součástkami podle specifikace výrobce.

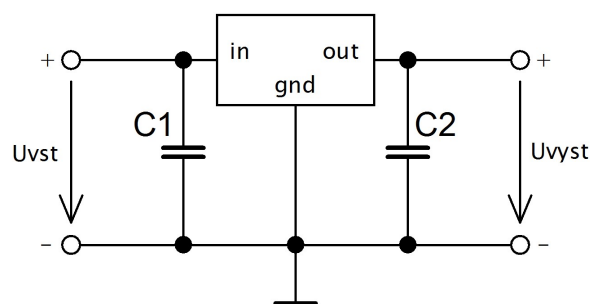
Většina těchto obvodů obsahuje i další funkce, například limitaci výstupního proudu nebo teplotní ochranu. Jedny z nejpoužívanějších integrovaných stabilizátorů jsou třísvorkové stabilizátory řady 78xx/79xx.

3.2.4.1 Stabilizátory řady 78xx/79xx

Stabilizátory řady 78xx/79xx jsou integrované, monolitické stabilizátory s pevným výstupním napětím. Vnitřní topologie stabilizátoru zahrnuje celé zapojení sériového zpětnovazebního regulátoru včetně výkonového členu a obvodu pro ochranu proti tepelnému přetížení.

Verze integrovaného stabilizátoru 78xx je určena pro stabilizaci kladného napětí, verze 79xx pro stabilizaci záporného napětí. Posledním dvojčíslím kódu je označeno výstupní napětí stabilizátoru. Označovací kód může obsahovat za prvním dvojčíslím ještě písmeno (např. 78L05), které označuje maximální proudové zatížení obvodu.

Zapojení kladného stabilizátoru 78xx je uvedeno na Obr. 8.



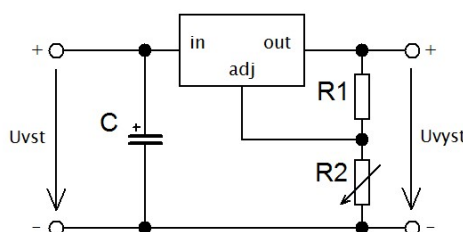
Obr. 8: Zapojení integrovaného stabilizátoru 78xx

3.2.5 Regulace napětí stabilizátoru

Pokud požadujeme univerzálnější napájecí zdroj (např. zdroj pro laboratorní měření) budeme potřebovat regulaci jeho výstupního napětí.

Na trhu jsou dostupné integrované stabilizátory, které jsou určeny pro regulované napájecí zdroje (např. stabilizátor LM317 nebo výkonnější LM350). Základní zapojení stabilizátoru je na Obr. 9. Obvod udržuje mezi piny OUTPUT a ADJUST stálý rozdíl napětí 1,25 V. Mezi tyto dva piny je připojen napěťový dělič, pomocí kterého je možné nastavit libovolné výstupní napětí (od 1,25 V do 37 V). Přenos napěťového děliče lze měnit potenciometrem na místě R_2 . Nevýhodou zapojení tohoto stabilizátoru je minimální výstupní napětí 1,25 V, což může být pro nějaké aplikace nevhodné. Další nevýhodou je, že pokud se v potenciometru přeruší kontakt mezi jezdcem a odporovou dráhou (potenciometr začne lidově "chrastit"), objeví se na výstupu stabilizátoru plné výstupní napětí, které může v mezím případě zničit napájené zařízení. Výstupní napětí zpětnovazebního stabilizátoru je určeno následujícím vztahem:

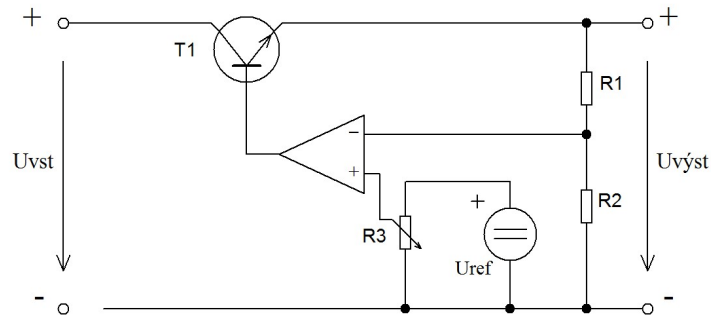
$$U_{výst} = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (8)$$



Obr. 9: Schéma zapojení integrovaného stabilizátoru LM317

Lepším způsobem je využití zpětnovazebního regulátoru, u kterého se použije proměnný zdroj referenčního napětí. Jako proměnný zdroj se může využít pevný zdroj napětí s potenciometrem jako proměnným děličem napětí. Toto zapojení je ukázáno na Obr. 10. Výstupní napětí je regulovatelné od hodnoty 0V až do napětí daného referenčním zdrojem a dělicím poměrem děliče napětí z rezistorů R_1 a R_2 .

Místo referenčního zdroje s potenciometrem může být k regulaci využit DA převodník a výstupní napětí tak regulovat pomocí mikrokontroléru.

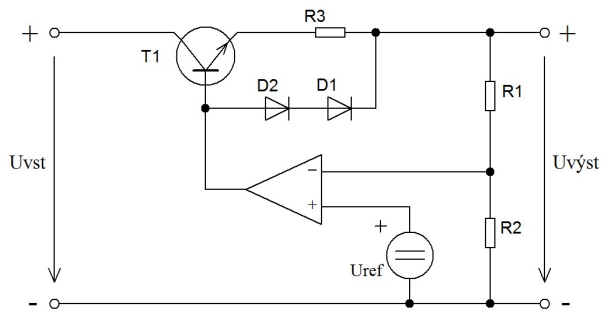


Obr. 10: Schéma zapojení zpětnovazebního stabilizátoru s regulací výstupního napětí

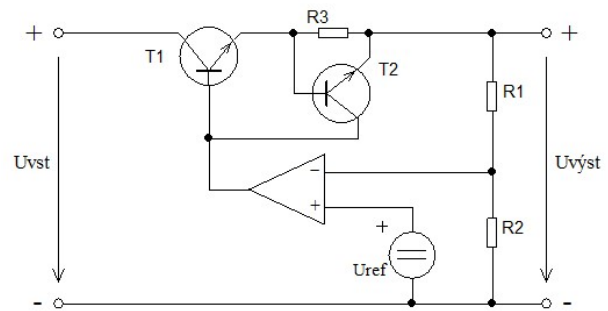
3.2.6 Omezení proudu stabilizátoru

Proudové omezení je důležité jak pro bezpečnost samotného regulátoru, tak pro bezpečnost napájeného zařízení. Zároveň slouží jako ochrana proti zkratu na výstupu. K ochraně se často využívá tavná pojistka, která je zapojena sériově s regulačním tranzistorem. Reakční doba tavné pojistky je větší, než je doba destrukce výkonového prvku, proto tento způsob ochrany není zcela účinný a používá se jako doplnění elektronické ochrany.

Elektronické omezení může být nastavené na konstantní hodnotu proudu nebo je možné zapojení, které umožňuje jeho regulaci. Nejjednodušší zapojení s omezením proudu na konstantní hodnotu je na Obr. 11. Pokud úbytek napětí na rezistoru R_3 vyvolaný výstupním proudem dosáhne velikosti součtu prahových napětí diod D_1 a D_2 zmenšeného o přibližně $0,7V$, začne část regulačního proudu z operačního zesilovače téci těmito diodami. Tímto způsobem se omezí proud tekoucí do báze tranzistoru T_1 , tranzistor se dále neotevírá a je omezen výstupní proud. Druhé zapojení s omezením na konstantní hodnotu je zobrazeno na Obr. 12, kde je použit bipolární tranzistor. Funkce tohoto obvodu je analogická jako u obvodu s diodami. Pokud úbytek napětí na rezistoru R_3 dosáhne hodnoty přibližně $0,7 V$, tranzistor T_2 se začíná otevírat, a procházejí jím část regulačního proudu z operačního zesilovače a omezovat tak proud do báze tranzistoru T_1 . Druhé zapojení s tranzistorem má větší strmost omezení.



Obr. 11: Omezení výstupního proudu diodami



Obr. 12: Omezení výstupního proudu tranzistorem

Pokud požadujeme nastavitelné omezení výstupního proudu, je možné u předchozích dvou zapojení nahradit rezistor R_3 rezistorem nastavitelným. Tento nastavitelný rezistor musí být z pravidla konstruován na vysoký ztrátový výkon, proto se tato modifikace často, zvláště pro větší výstupní proudy, nevyužívá.

Lépe je využít zapojení, které bude na pevném a přesném rezistoru snímat výstupní proud a napětí reprezentující tento výstupní proud porovnávat s referenční hodnotou.

3.3 Předregulace napětí

Předregulace je metoda, která slouží ke snížení napětí před samotným lineárním stabilizátorem. Toto zapojení se využívá pro snížení výkonového zatížení na regulačním prvku stabilizátoru. Ztrátový výkon na regulačním prvku lze vypočítat podle vztahu:

$$P_Z = I_Z \cdot (U_1 - U_2) \quad (9)$$

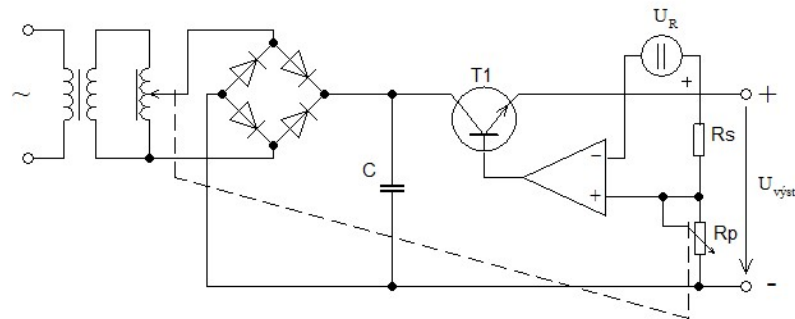
kde P_Z je ztrátový výkon, I_Z je proud tekoucí regulačním prvku, U_1 vstupní napětí regulátoru, U_2 výstupní napětí regulátoru. Je patrné, že ztrátový výkon úměrně roste s úbytkem napětí na regulačním prvku. Maximální ztrátový výkon nastává při výstupním napětí U_2 blízkém nule a maximálním zatěžovacím proudem I_Z . Na tento výkon musí být regulační prvek dimenzován, v případě vyšších výkonů musí mít dostatečně dimenzovaný chladič obvodu. K minimalizaci ztrátového výkonu je vhodné snížit úbytek napětí na regulačním prvku.

Předregulační stupeň má za úkol regulovat vstupní napětí a tím tedy úbytek napětí na regulačním prvku samotného stabilizátoru v závislosti na jeho výstupním napětí. V podstatě se jedná o regulátor s "hrubou" regulací.

Zařazení předregulačního stupně může zhoršit některé výstupní parametry lineárního regulátoru a to například zvlnění výstupního napětí nebo reakci regulátoru na skokovou změnu zatěžovacího proudu.

3.3.1 Regulační transformátor

Jedním z nejjednodušších způsobů předregulace je aplikace regulačního transformátoru. Zapojení je na Obr. 13.

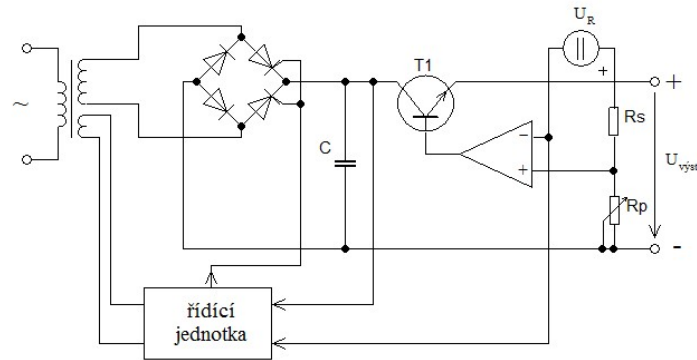


Obr. 13: Transformátorová předregulace sériového regulátoru [1]

Jezdec regulačního transformátoru, který řídí vstupní napětí je mechanicky spřažen s odporem R_p . Zmenšuje-li se výstupní napětí regulátoru změnou odporu R_p , zmenšuje se současně napětí primárního zdroje. Tento jednoduchý způsob ale přináší problémy v mechanické konstrukci, v provedení regulačního transformátoru a pod. [1]

3.3.2 Tyristorová předregulace

Uspořádání tyristorové předregulace je na Obr. 14. Tyristory jsou zapojeny ve dvou ramenech můstkového usměrňovače a tvoří tak polořízený usměrňovací můstek. Řízením doby sepnutí tyristorů v každé půlvlně kmitočtu sítě je možné měnit úhel sepnutí usměrňovače.



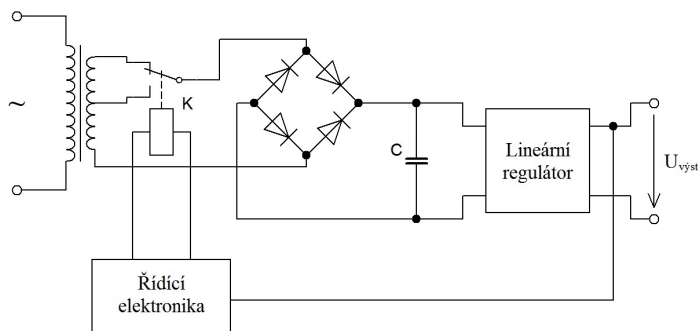
Obr. 14: Tyristorová předregulace sériového stabilizátoru [1]

K řízení tyristorů slouží řídicí jednotka, která pracuje ve shodě s regulací výstupního napětí regulátoru. Tím je úbytek napětí na regulačním členu držen na stálé hodnotě, a to i při změnách proudu zátěže, výstupního napětí a napětí vstupního. [1]

Spínání tyristorů v řízeném usměrňovači způsobuje rušení jak na výstupu usměrňovače, které se může dostávat na výstup regulátoru, tak rušení zpět do napájecí sítě.

3.3.3 Přepínání vinutí transformátoru

Tato předregulace nemění vstupní napětí pro lineární regulátor spojitě, nýbrž je skokově přepíná. Napětí se mění pomocí připojování respektive odpojování sekundárních vinutí transformátoru. Transformátor pro toto zapojení má více sekundárních vinutí nebo ze sekundárního vinutí vyvedeny odbočky. Na Obr. 15 je naznačeno řešení pro dvě napěťové hladiny. Přepínání odbočky vinutí zajišťuje přepínací kontakt relé K. Podle požadovaného výstupního napětí se připojí polovina sekundárního vinutí nebo celé vinutí transformátoru. Připojením poloviny vinutí klesá hodnota vstupního napětí lineárního regulátoru přibližně na polovinu, a tím je omezen maximální ztrátový výkon regulačního členu lineárního regulátoru. Pro řízení přepínání relé na místě řídicí elektroniky, může být s výhodou použit komparátor s hysterezí a vhodný zdroj referenčního napětí.



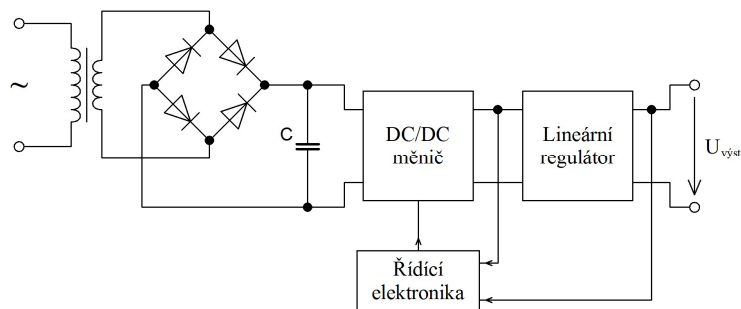
Obr. 15: Přepínání vinutí transformátoru pro dvě napět'ové hladiny

Tato předregulace se v dnešní době, pro svou jednoduchost, hojně využívá v komerčně prodávaných laboratorních zdrojích.

Nevýhodou tohoto zapojení je možná poruchovost relé, jelikož se mechanický kontakt častým přepínáním opotřebovává. Další nevýhodou je možná pomalá reakce relé. Obě tyto nevýhody lze odstranit přepínáním pomocí polovodičových prvků, většinou triaků. S použitím triaků rostou nároky na řídicí elektroniku, jelikož nevhodným řízením vzniká rušení. Další nevýhodou představuje úbytek napětí na polovodičovém prvku v sepnutém stavu, který způsobuje výkonovou ztrátu.

3.3.4 Impulzní předregulace

U této předregulace je vlastnímu lineárnímu regulátoru předřazen DC/DC snižující měnič. DC/DC měnič vyžaduje na svém vstupu stejnosměrné napětí. Tento měnič musí být navrhnout s regulací výstupního napětí pomocí řídicího signálu. Velikost výstupního napětí předregulačního stupně je závislá na výstupním napětí lineárního zdroje a musí být oproti tomuto napětí o potřebnou hodnotu zvětšené, jelikož lineární regulátor ke své funkci potřebuje úbytek napětí na regulačním členu. Na Obr. 16 je naznačeno schéma zapojení lineárního regulátoru s impulzní předregulací. Udržet stálý úbytek napětí na regulačním členu má za úkol řídicí elektronika.



Obr. 16: Principiální schéma impulsní předregulace

Impulzní regulátor pracuje se spínacími frekvencemi v řádech 10 až 100 kHz a může způsobovat rušení svého okolí. Toto rušení může pronikat na výstup lineárního regulátoru a být tak superponováno na výstupní napětí.

4 Praktická část

4.1 Návrh předregulačního měniče

Předregulační měnič bude DC/DC snižující měnič realizovaný pomocí obvodu LM5085.

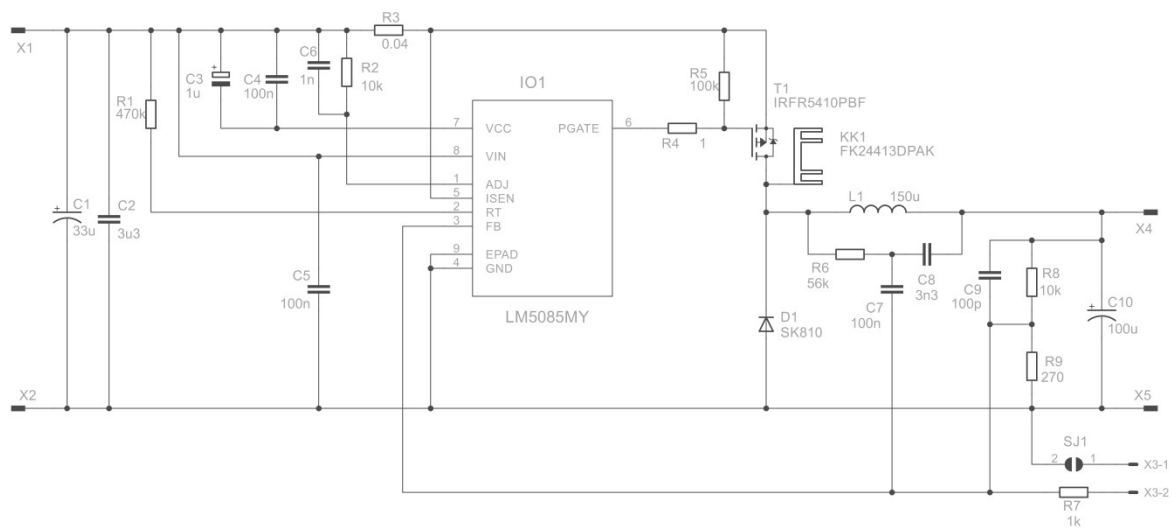
Základní vlastnosti obvodu LM5085[2]:

- M5085-Q1 je výrobek pro automobilový průmysl, který má kvalifikaci AEC-Q100 (-40°C do 125°C provozní teploty)
- Široký rozsah vstupního napětí od 4,5V do 75V
- Nastavitelné omezení proudu použitím $R_{DS(ON)}$ nebo snímacího rezistoru
- Nastavitelná spínací frekvence do 1MHz
- Bez potřeby kompenzační smyčky
- Ultra-rychlá přechodová odezva
- Nastavitelné výstupní napětí od 1,2V
- Precizní 2% zpětnovazební reference
- Možnost provozu 100% střídy
- Vnitřní soft-start časovač
- Integrovaný regulátor předpětí vysokého napětí
- Tepelná ochrana

Na Obr. 17 je uvedeno schéma zapojení předregulačního měniče. Jedná se o katalogové zapojení integrovaného uvedeného integrovaného obvodu. Zapojení je doplněno o rezistor pro řízení výstupního napětí pomocí řídicího napětí zapojeného ve zpětnovazebním snímacím děliči.

Stejnoseměrné vstupní napětí je přivedeno na elektrolytický kondenzátor C_1 , který slouží pro potlačení vlivu indukčnosti přívodních vodičů. Kapacita C_1 je doplněna o keramický kondenzátor C_2 z důvodu odebíraného vysokofrekvenčního pulzního proudu. Toto napětí je dále vedeno přes snímací rezistor R_3 na source P-MOSFET tranzistoru T_1 . Rezistorem R_2 je nastaveno proudové omezení obvodu. Ze vstupního napětí je také napájen řídicí integrovaný obvod IO_1 LM5085 a přes rezistor R_1 je nastavena doba sepnutí t_{ON} . Napájecí napětí pro IO_1 je blokováno kondenzátorem C_5 . Kondenzátory C_3 a C_4 filtrují napětí V_{CC} vnitřního regulátoru a je z nich získávaný proud pro gate tranzistoru. Gate tranzistoru T_1 je řízen pomocí IO_1 na pinu PGATE.

Na rozdíl od katalogového zapojení je mezi pin PGATE a gate tranzistoru zařazen rezistor pro omezení proudu. Dále je doplněn pull-up rezistor mezi gate a source pro případ nedefinovaného napětí na výstupním pinu PGATE. Pokud je T_1 otevřen teče proud přes cívku, která akumuluje energii. Po uzavření T_1 budí cívka proud tekoucí diodou D_1 . Výstupní napětí je nastaveno zpětnovazebním napěťovým děličem složeným z rezistorů R_8 a R_9 , ke kterému je přidán rezistor R_7 pro regulaci výstupního napětí pomocí řídicího napětí. Pro toto zpětnovazební zapojení a výstupní napětí platí dále uvedený vztah (13). Výstupní napětí je filtrováno elektrolytickým kondenzátorem C_{10} . Prvky R_6 , C_8 a C_7 slouží pro omezení zvlnění.



Obr. 17: Schéma zapojení předregulačního měniče

4.1.1 Stanovení prvků regulátoru

T_1 : Jako výkonový tranzistor T_1 bude použit P-MOSFET s označením IRFR5410PBF, základní parametry tranzistoru jsou uvedeny v následující tabulce[3]:

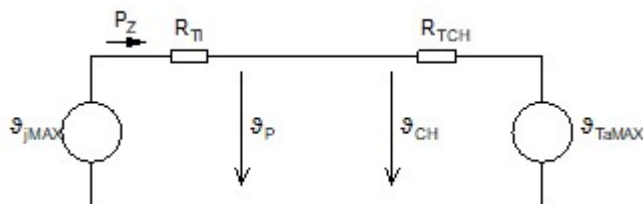
U_{DS}	-100V
I_D	-13A
P_D	66W
U_{GS}	$\pm 20V$
$R_{DS(on)}$ ($U_{GS} = 10V$; $I_D = -7,8A$)	0,205 Ω
$t_{d(ON)}$	15ns
$t_{d(OFF)}$	45ns

Provedení tranzistoru je SMD v pouzdru DPAK.

Jelikož má tento tranzistor v sepnutém stavu poměrně vysoký odpor kanálu, musí být vybaven odpovídajícím chladičem.

Tepelné parametry tranzistoru jsou uvedeny v následující tabulce[3]:

T_j	-55 až 150 °C
$R_{\theta JC}$	1,9 °C/W
$R_{\theta JA}$ (on PCB)	50 °C/W
$R_{\theta JA}$	110 °C/W



Obr. 18: Náhradní schéma chladicího obvodu předregulačního měniče

R_{T1} : Tepelný odpor přechod - pouzdro
 R_{TCH} : Tepelný odpor chladiče
 ϑ_{jMAX} : Maximální teplota přechodu
 ϑ_{TaMAX} : Teplota okolí
 ϑ_P : Teplota pouzdra součástky
 ϑ_{CH} : Teplota chladiče
 P_Z : Ztrátový výkon součástky

Pro náhradní schéma uvedené na Obr. 18 platí následující rovnice:

$$P_Z \cdot (R_{T1} + R_{TCH}) + \vartheta_{aMAX} = \vartheta_{jMAX} \quad (10)$$

Jednoduchou úpravou lze dostat vzorec pro výpočet tepelného odporu chladiče R_{TCH} :

$$R_{TCH} = \frac{\vartheta_{jMAX} - \vartheta_{aMAX}}{P_Z} - (R_{T1} + R_{T1}) \quad (11)$$

Znamé hodnoty potřebné pro výpočet tepelného odporu chladiče R_{TCH} :

$$R_{T1} = 1,9 \text{ °C/W}$$

$$\vartheta_{jMAX} = 150 \text{ °C}$$

$$\vartheta_{TaMAX} = 30 \text{ °C}$$

$$P_Z = 5 \text{ W}$$

Pro tyto zadané hodnoty vychází podle vzorce (11) tepelný odpor chladiče

$$R_{TCH} = 22 \text{ °C/W.}$$

D₁: Jako dioda D1 bude použita Schottkyho dioda s označením SK810-DIO.

Základní parametry diody jsou uvedeny v následující tabulce[4]:

U_{RRM}	100 V
I_F	8 A
I_{FSM}	150 A
U_F	>0,5 V

Dioda je v provedení SMD v pouzdru SMC.

R₁: Regulátor LM5085 funguje s konstantní dobou sepnutí. Doba sepnutí lze určit ze vzorce:

$$t_{ON} = \frac{1,45 \cdot 10^{-7} \cdot (R_T + 1,4)}{(U_{IN} - 1,56 + \frac{R_T}{3167})} + 50 \cdot 10^{-9} \quad (12)$$

kde t_{ON} [s] je doba sepnutí, R_T hodnota rezistoru a U_{IN} hodnota vstupního napětí měniče.

Pro vstupní napětí $U_{IN} = 70V$ a dobu sepnutí $t_{ON}=1\mu s$ vychází velikost rezistoru $R_T=470k$.

R₇, R₈, R₉: Pro výstupní napětí platí vztah:

$$U_{OUT} = U_{REF} \cdot \left(1 + \frac{R_8}{R_9} + \frac{R_8}{R_7}\right) - U_{ADJ} \cdot \frac{R_8}{R_7} \quad (13)$$

kde U_{OUT} je výstupní napětí, U_{REF} je referenční napětí regulátoru a U_{ADJ} je řídicí napětí regulátoru.

Pro požadované hodnoty: $U_{OUT} = 60 V$

$$U_{REF} = 1,25 V$$

$$U_{ADJ} = 6 V$$

vychází hodnoty rezistorů: $R_7 = 1 k\Omega$

$$R_8 = 10 k\Omega$$

$$R_9 = 270 \Omega$$

L₁: Pro indukčnost L₁ platí vztah:

$$L_1 = \frac{t_{ON(min)} \cdot (U_{IN(max)} - U_{OUT})}{I_{OR(max)}} \quad (14)$$

kde $t_{ON(min)}$ je minimální doba sepnutí, $U_{IN(max)}$ je maximální vstupní napětí, U_{OUT} je výstupní napětí, $I_{OR(max)}$ je maximální zvlnění proudu.

Pro minimální napájecí napětí $U_{IN(max)} = 75$ V vychází doba $t_{ON(min)} = 0,93$ μ s.

Pro hodnoty: $U_{IN(max)} = 75$ V

$$I_{OR(max)} = 0,5 \text{ A}$$

vychází hodnota indukčnosti přibližně $L_1 = 150$ μ H.

C₁₀: Pro velikost kapacity C₁₀ platí vztah:

$$C_{OUT} = \frac{I_{OR(max)}}{8 \cdot F_S \cdot U_{ripple}} \quad (15)$$

kde F_S je spínací frekvence a U_{ripple} je zvlnění výstupního napětí.

Spínací frekvence F_S pro výstupní napětí $U_{OUT} = 10$ V vychází $F_S = 135$ kHz.

Pro hodnoty: $I_{OR(max)} = 0,5$ A

$$U_{ripple} = 0,005 \text{ V}$$

vychází hodnota výstupního kondenzátoru $C_{10} = 100$ μ F.

C₇, R₆ a C₈: Velikosti prvků R₆ a C₈ jsou dány postupem:

$$U_A = U_{OUT} - \left(U_{SW} \cdot \left(1 - \frac{U_{OUT}}{U_{IN(min)}} \right) \right) \quad (16)$$

$$R_6 \cdot C_8 = \frac{(U_{IN(min)} - U_A) \cdot t_{ON}}{\Delta U} \quad (17)$$

kde U_{SW} je úbytek napětí na diodě v sepnutém stavu a ΔU je amplituda zvlnění.

Pro zadané hodnoty: $U_{SW} = 0,6$ V

$$\Delta U = 0,02 \text{ V}$$

Vychází hodnota součinu $R_6 \cdot C_8 = 202 \cdot 10^{-6}$. Z tohoto součinu jsou dále vypočítány hodnoty prvků R₆ a C₈:

$R_6 = 56$ k Ω , $C_8 = 3,3$ nF.

Pro hodnotu kapacity C₇ platí:

$$C_7 \gg C_8 \quad (18)$$

Je zvolena hodnota kapacity $C_7 = 100$ nF.

C₂, R₃: Proudové omezení obvodu je nastaveno hodnotou rezistoru R₂. Hodnota procházejícího proudu je snímána na rezistoru R₃. Pro velikost rezistoru R₂ platí vztah:

$$R_2 = \frac{I_{CL} \cdot R_3}{40 \cdot 10^{-6}} \quad (19)$$

$$I_{CL} = I_{MAX} + \frac{I_{OR}}{2} \quad (20)$$

kde I_{MAX} hodnota maximálního proudu regulátorem a I_{OR} je zvlnění proudu.

Pro hodnoty: R₃ = 0,04 Ω

$$I_{MAX} = 4 \text{ A}$$

$$I_{OR} = 0,5 \text{ A}$$

Vychází hodnota rezistoru R₂ = 4,7 kΩ.

Rezistor R₂ je podle katalogového listu přemostěn kondenzátorem C₆ = 1 nF.

C₁, C₂, C₅: Pro vstupní kapacity C₁, C₂ a kapacitu C₅ platí následující vztah:

$$C_1 + C_2 + C_5 = \frac{I_{OUT(max)} \cdot t_{ON(max)}}{\Delta U} \quad (21)$$

kde I_{OUT(max)} je maximální výstupní proud, t_{ON(max)} je maximální doba sepnutí a ΔU je maximální pokles napětí na kondenzátoru.

Pro hodnoty: I_{OUT(max)} = 4 A

$$t_{ON(max)} = 1,2 \text{ } \mu\text{s}$$

$$\Delta U = 0,2 \text{ V}$$

vychází hodnota součtu kapacit C₁ + C₂ + C₅ = 24 μF.

Jednotlivé kapacity jsou zvoleny: C₁ = 33 μF, C₂ = 3,3 μF a C₅ = 100 nF.

4.2 Návrh lineárního stabilizátoru

Lineární stabilizátor má za úkol jemnou regulaci výstupního napětí a omezení výstupního proudu. Základem zapojení jsou dva zpětnovazební regulátory, jeden pro regulaci napětí a druhý pro regulaci proudu. Schéma zapojení lineárního regulátoru je ukázáno na Obr. 19.

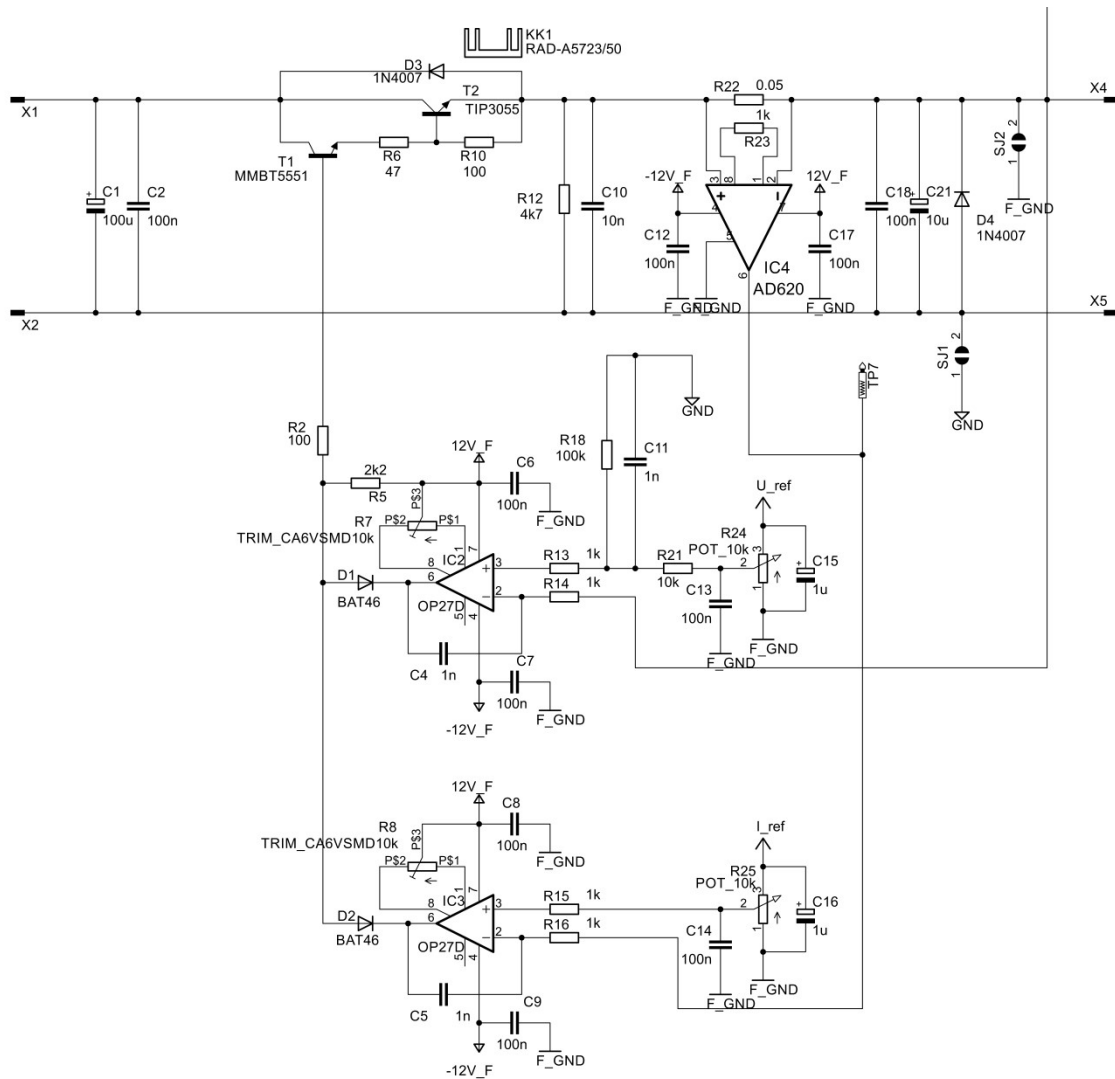
Vstupní napětí je filtrováno kondenzátory C_1 a C_2 . Následuje výkonový tranzistor T_2 , který slouží k samotné regulaci napětí. Bázový proud pro tranzistor T_2 je řízen tranzistorem T_1 , který posiluje výstupní proud z operačních zesilovačů. Tranzistor T_1 a T_2 v podstatě tvoří Darlingtonovo zapojení. Báze tranzistoru T_1 je připojena přes rezistor R_5 na kladné plovoucí napájecí napětí operačních zesilovačů. Operační zesilovač IC_2 slouží jako chybový zesilovač pro regulátor napětí. Výstupní napětí je snímáno invertujícím vstupem tohoto operačního zesilovače. Na neinvertující vstup je přivedeno regulovatelné referenční napětí pomocí potenciometru R_{24} přes napěťový dělič složený z rezistorů R_{18} a R_{21} , který slouží pro nastavení poměru mezi výstupním a referenčním napětím. Pokud je na výstupu regulátoru větší napětí než referenční napětí dělené napěťovým děličem, je na výstupu operačního zesilovače záporné saturační napětí, které přes diodu D_1 stáhne napětí na bázi tranzistoru na toto záporné saturační napětí. Tím je zmenšen proud do báze tranzistoru T_1 a T_2 a omezeno výstupní napětí.

Proudový regulátor funguje analogicky jako napěťový regulátor. Výstupní proud regulátoru je snímán pomocí přístrojového zesilovače IC_4 na rezistoru R_{22} . Zisk přístrojového zesilovače je nastaven pomocí rezistoru R_{23} . Jako rozdílový zesilovač pro regulátor proudu slouží operační zesilovač IC_3 . Na invertující vstup je přivedeno napětí z přístrojového zesilovače IC_4 , které reprezentuje výstupní proud regulátoru. Na neinvertující vstup je přivedeno referenční napětí regulovatelné potenciometrem R_{25} .

Operační zesilovače IC_2 a IC_3 jsou opatřeny trimry R_7 a R_8 pro nastavení nulového napěťového offsetu.

Referenční napětí přivedené na potenciometry R_{24} a R_{25} je filtrováno elektrolytickými kondenzátory C_{15} a C_{16} . Napětí na výstupu potenciometrů je filtrováno keramickými kondenzátory C_{13} a C_{14} . Kladné a záporné napájení pro operační zesilovače a přístrojový zesilovač je u každého z nich filtrováno keramickými kondenzátory C_6 , C_7 , C_8 , C_9 , C_{12} a C_{17} .

Výstupní napětí regulátoru je filtrováno kondenzátory C_{18} a C_{21} . Dioda D_4 na výstupu regulátoru, zapojena v závěrném směru slouží k ochraně před připojením přepólovaného napětí na výstup. Dioda D_3 chrání zapojení před vstupním proudem z výstupu zdroje.



Obr. 19: Schéma zapojení lineárního regulátoru

4.2.1 Stanovení prvků regulátoru

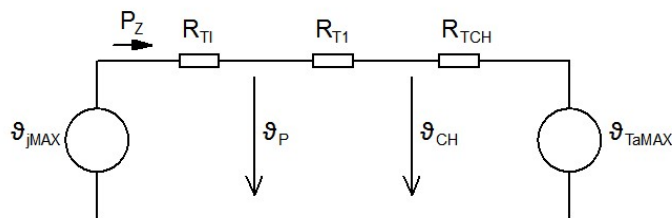
T₂: Jako regulační tranzistor bude použit výkonový tranzistor NPN s označením TIP3055. Základní parametry jsou uvedeny v následující tabulce[5]:

U_{CE}	100 V
I_C	15 A
P_D	90 W
h_{FE} ($I_C = 4A, U_{CE} = 4V$)	20 - 70
h_{FE} ($I_C = 4A, U_{CE} = 4V$)	5

Provedení tranzistoru je THT s pouzdrem TO-247.

Tranzistor T_2 musí být z důvodu velkého ztrátového výkonu umístěn na chladiči. V následující tabulce jsou uvedeny tepelné parametry tranzistoru[5]:

T_j	-65 až 150 °C
$R_{\theta JC}$	1,5 °C/W
$R_{\theta JA}$	35 °C/W



Obr. 20: Náhradní schéma chladičového obvodu lineárního regulátoru

R_{Tl} : Tepelný odpor přechod - pouzdro
 R_{T1} : Tepelný odpor pouzdro - chladič
 R_{TCH} : Tepelný odpor chladiče
 ϑ_{jMAX} : Maximální teplota přechodu
 ϑ_{TaMAX} : Teplota okolí
 ϑ_p : Teplota pouzdra součástky
 ϑ_{CH} : Teplota chladiče
 P_Z : Ztrátový výkon součástky

Pro náhradní schéma uvedené na Obr. 20 platí následující rovnice:

$$P_Z \cdot (R_{Tl} + R_{T1} + R_{TCH}) + \vartheta_{aMAX} = \vartheta_{jMAX} \quad (22)$$

Jednoduchou úpravou lze dostat vzorec pro výpočet tepelného odporu chladiče R_{TCH} :

$$R_{TCH} = \frac{\vartheta_{jMAX} - \vartheta_{aMAX}}{P_Z} - (R_{Tl} + R_{T1}) \quad (23)$$

Znamé hodnoty potřebné pro výpočet tepelného odporu chladiče R_{TCH} :

$$R_{T1} = 1,5 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$R_{T1} = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$\vartheta_{jMAX} = 150 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\vartheta_{TaMAX} = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$P_Z = 30 \text{ W}$$

Pro tyto zadané hodnoty vychází podle vzorce (23) tepelný odpor chladiče $R_{TCH} = 2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$.

T₁: Tranzistor T_1 má za úkol budit výkonový tranzistor T_2 . Potřebný budicí proud do báze tranzistoru T_2 lze vypočítat ze vzorce (24). Tento budicí proud musí dodat tranzistor T_1 .

$$I_{B2} = I_{C1} = \frac{I_{C2}}{\beta_2} \quad (24)$$

kde I_{B2} je bázový proud tranzistoru T_2 , I_{C1} je kolektorový proud tranzistoru T_1 , I_{C2} je kolektorový proud tranzistoru T_2 , tedy výstupní proud regulátoru a β_2 je proudové zesílení tranzistoru T_2 .

Pro parametry: $I_{C2} = 3 \text{ A}$

$$\beta_2 = 20$$

vychází bázový proud tranzistoru T_2 , resp. kolektorový proud tranzistoru T_1 $I_{B2} = I_{C1} = 150 \text{ mA}$.

Jako tranzistor T_1 je vybrán bipolární NPN tranzistor s označením MMBT5551LT1G. Parametry tranzistoru T_1 jsou uvedeny v následující tabulce[6]:

U_{CE}	160 V
I_C	0,6 A
P_D	225 mW
h_{FE} ($I_C = 50 \text{ mA}$, $U_{CE} = 5 \text{ V}$)	30

Tranzistor je v provedení SMD v pouzdru SOT-23.

Bázový proud tranzistoru T1 lze určit ze vztahu:

$$I_{B1} = \frac{I_{C1}}{\beta_1} \quad (25)$$

Pro hodnotu kolektorového proudu $I_{C1} = 150 \text{ mA}$ vychází bázový proud $I_{B1} = 5 \text{ mA}$.

R₅, R₂: Rezistor R₅ omezuje proud tekoucí z kladné větve napájecího napětí do vstupu operačních zesilovačů v případě záporného saturačního napětí na jejich výstupu. Zároveň spolu s rezistorem R₂ omezuje bázový proud tranzistoru T₁. Velikost rezistoru R₅ lze určit ze vztahu:

$$R_5 = \frac{U_{VCCF} - (-U_{sat})}{I_{OPmax}} \quad (26)$$

kde U_{VCCF} je kladné napájecí napětí operačních zesilovačů, $-U_{sat}$ je záporné saturační napětí operačních zesilovačů a I_{OPmax} je maximální proud výstupu operačního zesilovače.

Pro hodnoty: $U_{VCCF} = 12 \text{ V}$

$$-U_{sat} = -10 \text{ V}$$

$$I_{OPmax} = 10 \text{ mA}$$

Vychází hodnota rezistoru $R_5 = 2,2 \text{ k}\Omega$.

Velikost rezistoru R₂ lze určit ze vztahu:

$$R_2 = \frac{U_{VCCF}}{I_{B1}} - R_5 \quad (27)$$

Pro hodnoty: $U_{VCCF} = 12 \text{ V}$

$$I_{B1} = 5,2 \text{ mA}$$

vychází velikost rezistoru $R_2 = 100 \Omega$.

IC₂, IC₃: Na místě IC₂ a IC₃ budou použity operační zesilovače s označením OP27G. Parametry operačního zesilovače OP27G jsou uvedeny v následující tabulce[7]:

SR	2,8 V/ μ s
GBW	8 MHz
Supply voltage	$\pm 22 \text{ V}$

Operační zesilovače jsou v provedení SMD v pouzdru SO8.

D₁, D₂: Na místě D₁ a D₂ budou použity Schottkyho diody s označením BAT46 v provedení SMD v pouzdru MINIMELF (SOD80).

R₁₈, R₂₁: Rezistory R₁₈ a R₂₁ slouží pro nastavení rozsahu řízení výstupního napětí. Pro výstupní napětí platí vztah:

$$U_{výst} = U_{ref} \frac{R_{18}}{R_{21}} \quad (28)$$

kde $U_{výst}$ je výstupní napětí stabilizátoru, U_{ref} je referenční napětí.

Pro hodnoty: $U_{výst} = 50 \text{ V}$

$$U_{ref} = 5 \text{ V}$$

Vychází hodnoty rezistorů $R_{18} = 100 \text{ k}\Omega$ a $R_{21} = 10 \text{ k}\Omega$.

IC₄: Na místě IC₄ bude použitý přístrojový zesilovač s označením AD620. Přístrojový zesilovač je v provedení SMD v pouzdru SO8. Zisk přístrojového zesilovače je nastaven rezistorem R₂₃.

R₂₃: Velikost rezistoru R₂₃ je dána vztahem:

$$R_{23} = \frac{49,4 \cdot 10^3}{G - 1} \quad (29)$$

kde G je nastavený zisk.

Potřebný zisk lze určit ze vztahu:

$$G = \frac{U_I}{I_{výst} \cdot R_{22}} \quad (30)$$

kde U_I je napětí na výstupu přístrojového zesilovače reprezentující výstupní proud, $I_{výst}$ je výstupní proud stabilizátoru a R_{22} je hodnota snímacího rezistoru.

Pro hodnoty: $U_I = 6 \text{ V}$

$$I_{výst} = 3 \text{ A}$$

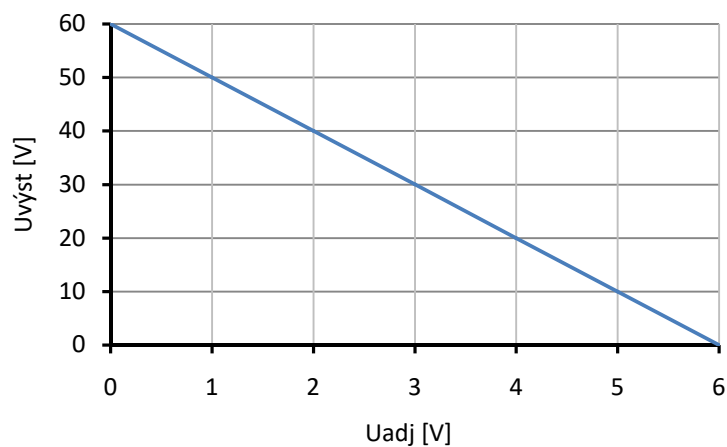
$$R_{22} = 0,04 \Omega$$

vychází potřebný zisk přístrojového zesilovače $G = 50$ a tedy podle vzorce (29) vychází hodnota rezistoru $R_{23} = 1 \text{ k}\Omega$.

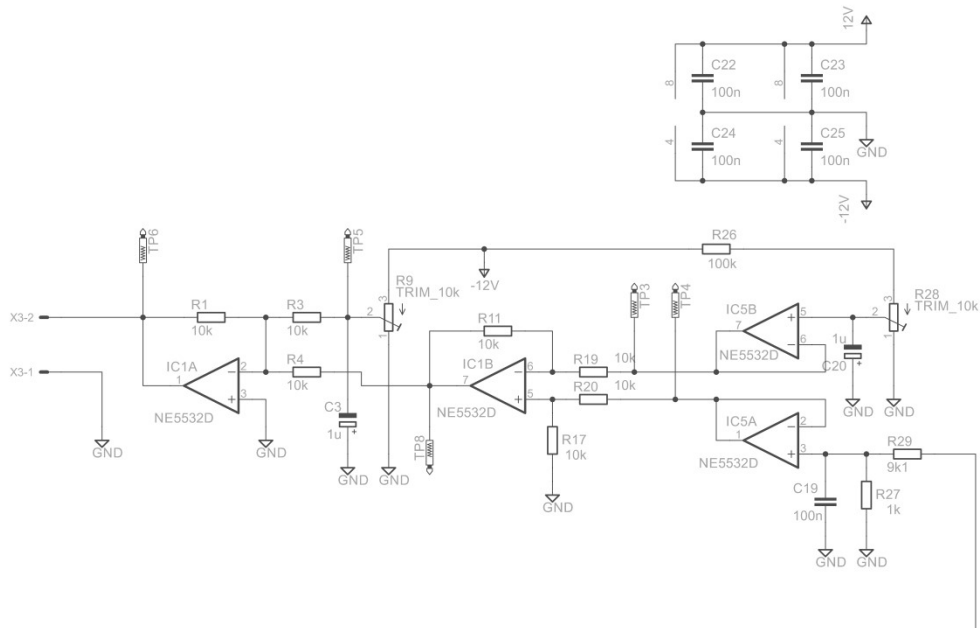
4.3 Návrh obvodu pro řízení předregulačního měniče

Tento obvod má za úkol řídit výstupní napětí předregulačního měniče v závislosti na výstupním napětí lineárního regulátoru. Na Obr. 21 je ukázána závislost výstupního napětí předregulačního měniče $U_{\text{výst}}$ na vstupním řídicím napětí U_{adj} . Jak je z grafu patrné, maximální výstupní napětí nastává při nulovém řídicím napětí, analogicky pro maximální řídicí napětí je na výstupu nulové napětí.

Schéma řídicího obvodu je zobrazeno na Obr. 22. Zapojení snímá výstupní napětí lineárního regulátoru pomocí napěťového děliče složeného z rezistorů R_{27} a R_{29} . Zapojení s operačním zesilovačem IC_{1B} slouží k přičtení konstantní hodnoty napětí ke snímanému, dělenému napětí na výstupu lineárního regulátoru. Toto přičtené napětí reprezentuje úbytek napětí na regulačním členu lineárního regulátoru a je nastavitelné víceotáčkovým trimrem R_{28} . Další část obvodu složená z operačního zesilovače IC_{1A} má za úkol produkovat vhodnou řídicí charakteristiku na základě charakteristiky zobrazené na Obr. 21.



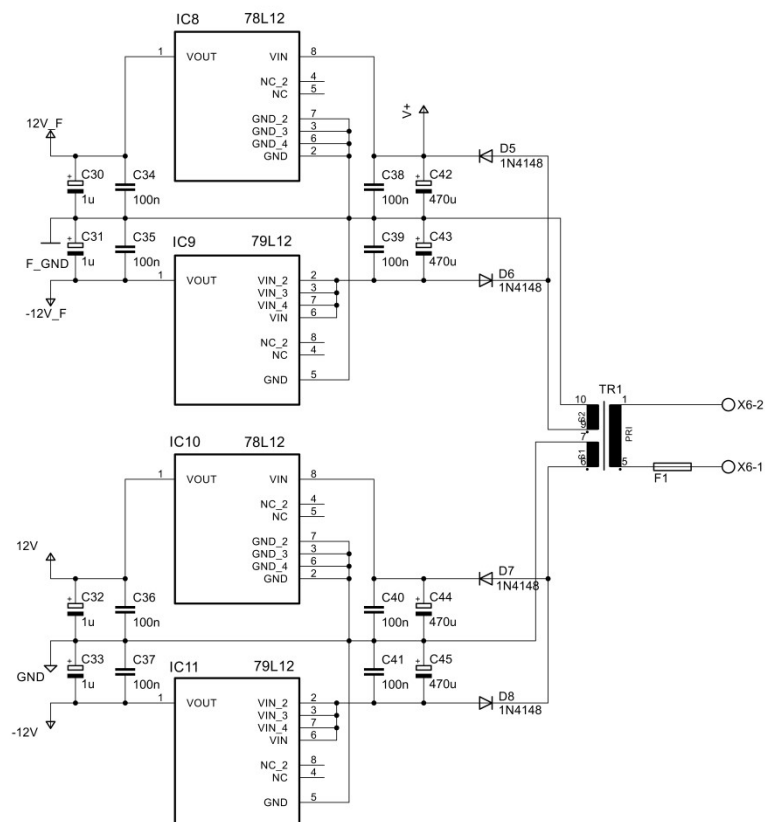
Obr. 21: Závislost výstupního napětí předregulačního měniče na řídicím napětí



Obr. 22: Schéma zapojení obvodu pro řízení předregulačního měnič

4.4 Návrh pomocného zdroje

Pomocný zdroj se skládá z části pro napájení operačních zesilovačů řízení lineárního regulátoru, poté z části pro napájení operačních zesilovačů řídicího obvodu předregulačního měniče a z části referenčních zdrojů.



Obr. 23: Schéma zapojení pomocného zdroje

Na Obr. 23 je ukázáno schéma zapojení napájecích zdrojů pro napájení operačních zesilovačů lineárního regulátoru a operačních zesilovačů řídicího obvodu předregulačního měniče. Pomocný zdroj je napájen ze sítě přes transformátor TR_1 se dvěma sekundárními vinutími. Z každého sekundárního vinutí je získáváno pomocí jednocestného usměrnění diodami D_5 , D_6 , D_7 a D_8 symetrické stejnosměrné napětí. Usměrněné napětí je vyhlazeno pomocí elektrolytických kondenzátoru C_{42} , C_{43} , C_{44} a C_{45} . Napětí je dále stabilizováno integrovanými stabilizátory řady 78L12 a 79L12.

Stabilizátory IC_8 typu 78L12 a IC_9 typu 79L12 slouží k napájení řídicích obvodů lineárního regulátoru. Zem tohoto symetrického napětí je připojena k výstupu lineárního regulátoru a vzniká tak plovoucí napájecí napětí.

Stabilizátory IC_{10} typu 78L12 a IC_{11} typu 79L12 slouží k napájení operačních zesilovačů řídicího obvodu předregulačního měniče.

C_{42} , C_{43} , C_{44} , C_{45} : Velikost filtračních kapacit je dána vzorcem (2) uvedeným v teoretické části práce.

Pro hodnoty: $I_c = 50 \text{ mA}$

$$\Delta t = 20 \text{ ms}$$

$$\Delta u_c = 2 \text{ V}$$

Vychází hodnota kapacit $C_{42} = C_{43} = C_{44} = C_{45} = 470 \mu\text{F}$.

Pro regulaci výstupního napětí a výstupního proudu jsou použity dva nezávislé referenční zdroje. Na Obr. 24 je ukázáno schéma zapojení referenčních zdrojů. Jedná se o dva totožné paralelní regulátory s napěťovou referencí typu TL431D. Napětí lze regulovat od referenční hodnoty 2,5V do maximální nastaveného napětí. Maximální výstupní napětí lze určit ze vzorce:

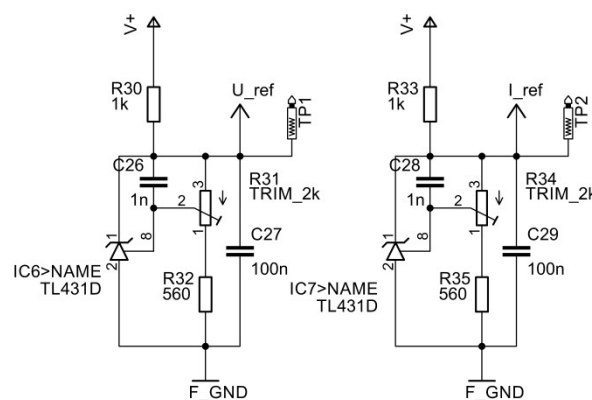
$$U_{out} = U_{ref} \frac{R_{31} + R_{32}}{R_{32}} \quad (31)$$

Pro hodnoty: $R_{31} = 2 \text{ k}\Omega$

$$R_{32} = 560 \Omega$$

vychází maximální výstupní napětí $U_{out} = 11 \text{ V}$.

Pomocí víceotáčkového trimru R_{31} se nastavuje referenční napětí pro regulaci výstupního napětí lineárního regulátoru. Pomocí trimru R_{34} lze nastavit maximální výstupní proud lineárního regulátoru.

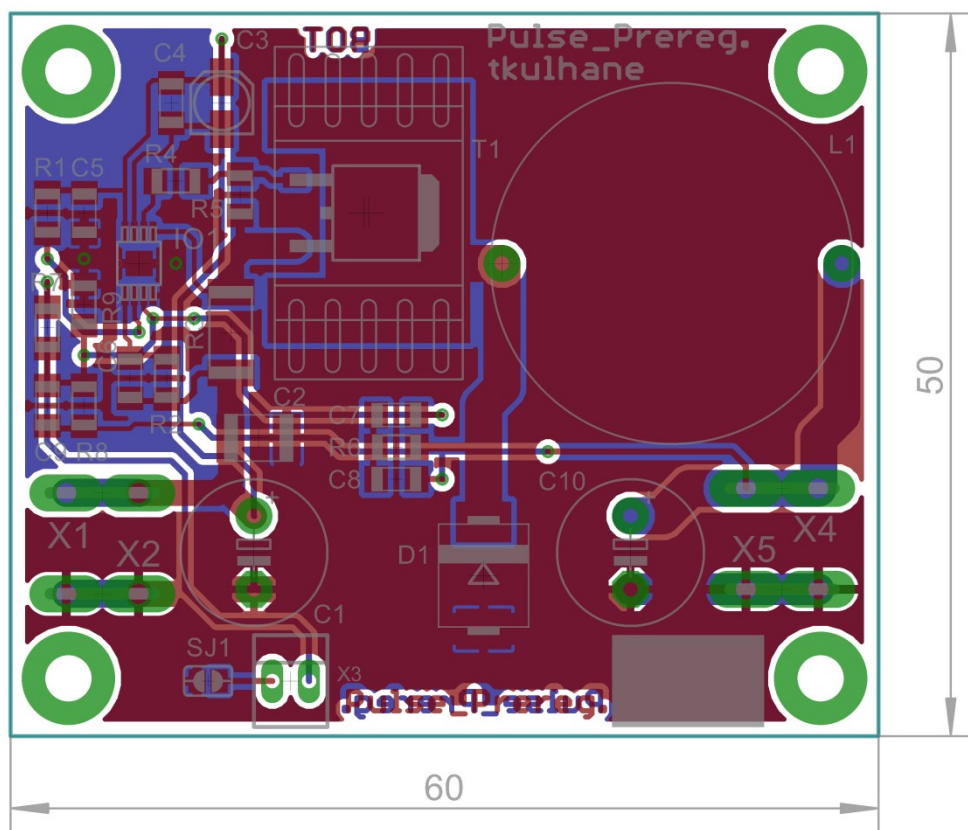


Obr. 24: Schéma zapojení referenčních zdrojů napětí

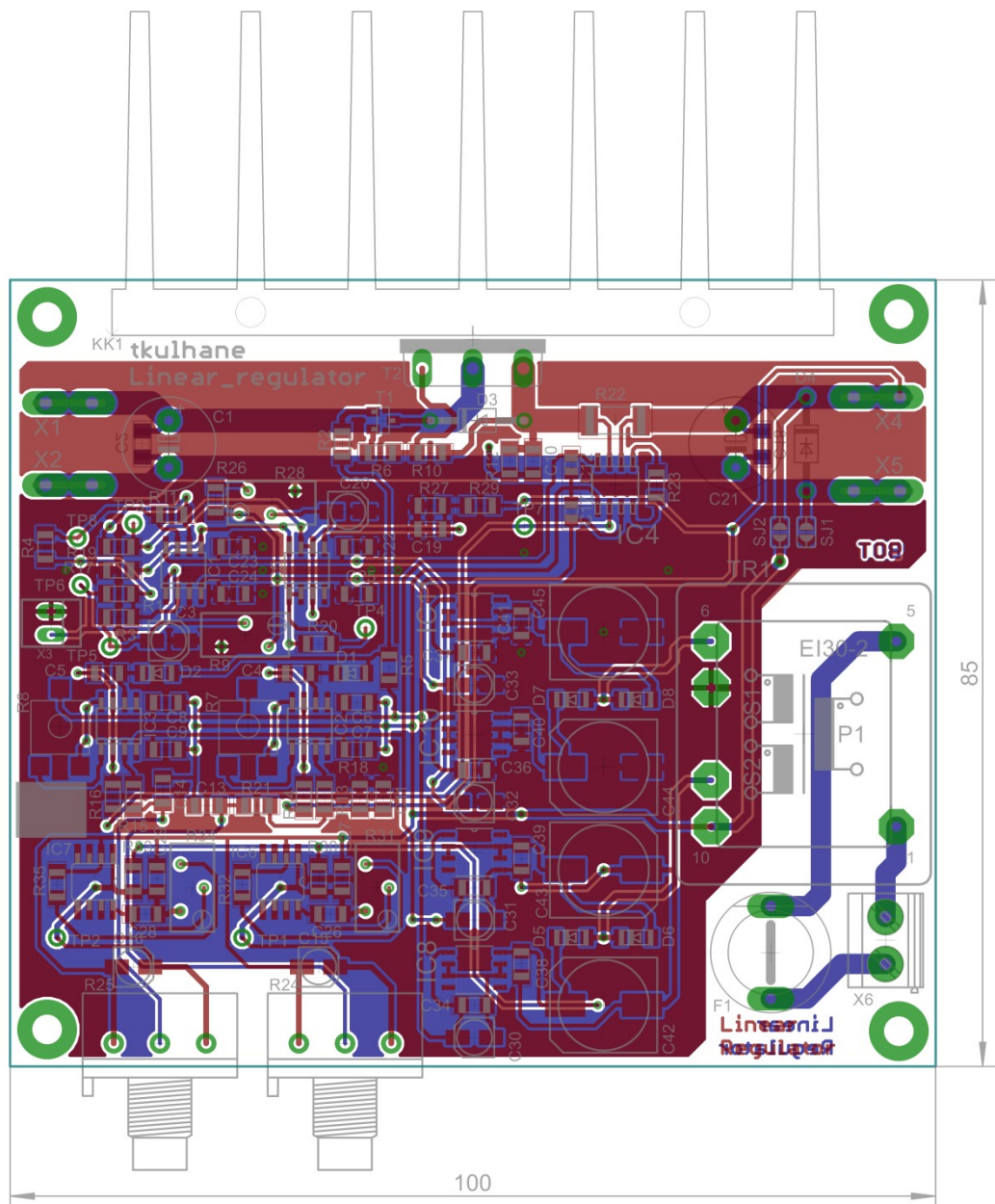
4.5 Návrh DPS

Pro návrh desek plošných spojů byl využit návrhový software Eagle 7.2.0. Celé zapojení bude rozdělené na dvě desky plošných spojů. První deska, ukázaná na Obr. 25 obsahuje předregulační měnič. Na druhé desce, ukázané na Obr. 26 je lineární regulátor, pomocný zdroj s referenčními zdroji a obvod pro řízení předregulačního měniče. Obě desky plošných spojů jsou navrženy jako oboustranné a prokovené s nepájivou maskou a servisním potiskem. Desky plošných spojů jsou vyrobeny čínskou firmou JLCPCB.

Pro připojení vstupních a výstupních napětí předregulačního měniče a lineárního regulátoru jsou použity konektory typu faston. Pro propojení řídicího napětí pro řízení předregulačního měniče jsou použity konektory typu MOLEX KK254. Pro připojení síťového napětí pro pomocný zdroj na desce lineárního regulátoru je použita šroubovací svorkovnice do DPS.



Obr. 25: Deska plošného spoje předregulačního měniče



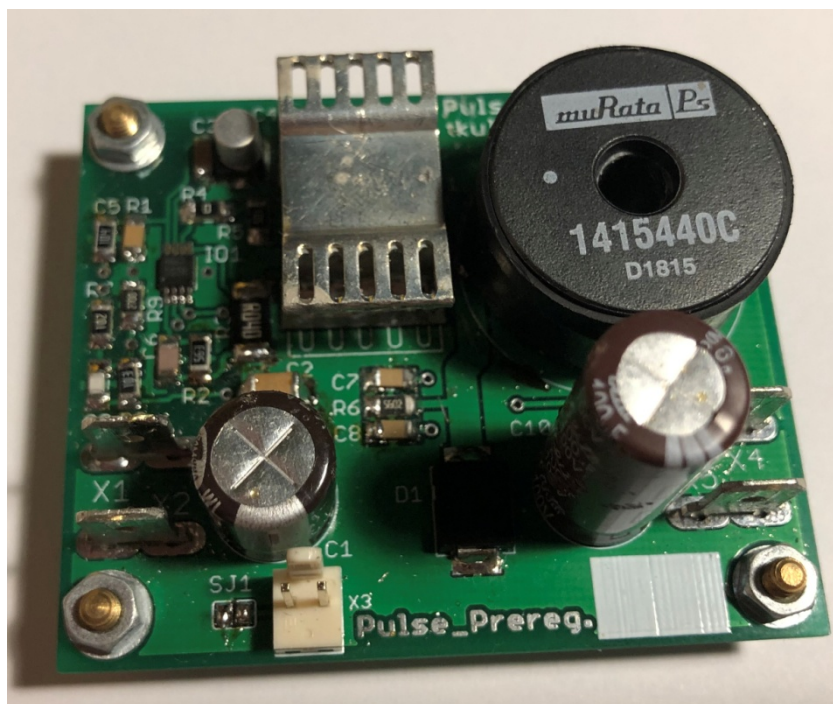
Obr. 26: Deska plošného spoje lineárního regulátoru

5 Měření

Pro napájení měřeného vzorku byly zvoleny dva transformátory zapojeny sériově, každý se sekundárním napětím 24 V, v součtu tedy 48 V. Vyhlažovací kondenzátor na výstupu můstkového usměrňovače měl hodnotu kapacity 6800 μF . Nezatížené výstupní napětí usměrňovače a tedy vstupní napětí předregulačního stupně mělo hodnotu 67,9 V. Na výstupu předregulačního stupně a tedy na vstupu lineárního regulátoru bylo udržováno napětí přibližně o 6 V větší než požadované výstupní napětí lineárního regulátoru.

5.1 Sestavený měřený vzorek

V této kapitole jsou uvedeny fotografie osazených desek plošných spojů předregulačního měniče a lineárního regulátoru. Na Obr. 27 je ukázána osazená deska předregulačního měniče. Na Obr. 28 je osazená deska lineárního regulátoru.



Obr. 27: Fotografie osazené desky předregulačního měniče

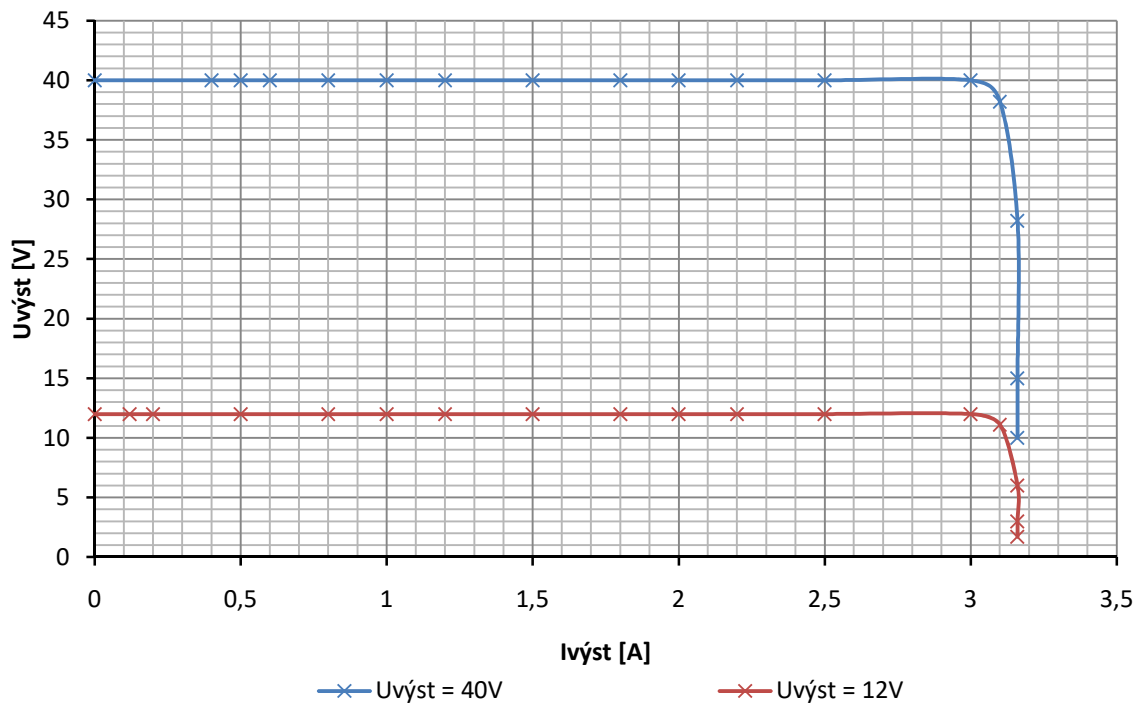


Obr. 28: Fotografie osazené desky lineárního regulátoru

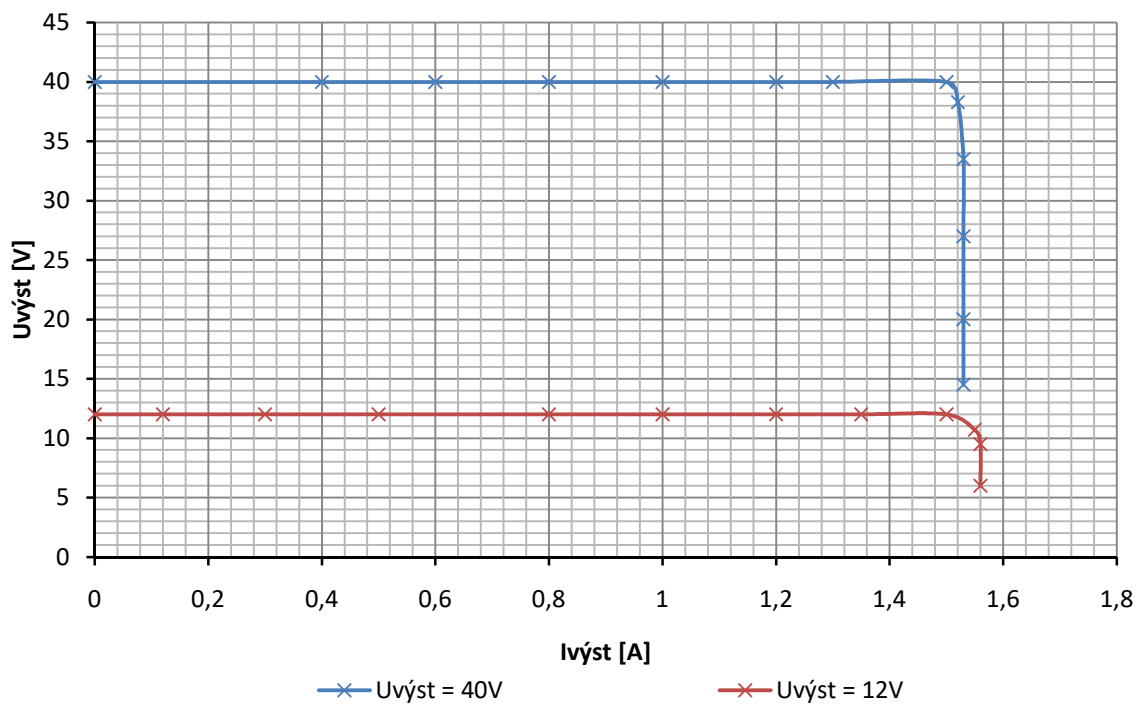
5.2 Měření zatěžovací charakteristiky

Zatěžovací charakteristika ukazuje závislost výstupního napětí regulátoru na jeho výstupním proudu.

Zatěžovací charakteristika byla v tomto případě změřena pro dvě hodnoty proudového omezení a pro dvě hodnoty výstupního napětí regulátoru. Zatěžovací charakteristika pro proudové omezení na maximum je ukázána na Obr. 29. Pro nastavení proudového omezení na polovinu je zatěžovací charakteristika zobrazena na Obr. 30.



Obr. 29: Naměřená zatěžovací charakteristika pro maximální proudové omezení



Obr. 30: Naměřená zatěžovací charakteristika pro poloviční proudové omezení

5.3 Měření účinnosti

Všeobecně je účinnost definována jako poměr výkonu P_2 na výstupu zařízení, zde konkrétně napájecího zdroje, a příkonu P_1 , tedy celkového výkonu odebíraného zařízením ze sítě. Následující vztah vyjadřuje účinnost v procentech:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \quad (32)$$

V následující tabulce jsou naměřené hodnoty vstupních a výstupních veličin regulátoru, následně vypočítané hodnoty výkonu, příkonu a výsledné účinnosti:

U_1 [V]	I_1 [A]	U_2 [V]	I_2 [A]	P_1 [W]	P_2 [W]	η [%]
63,2	0,330	40	0,4	20,86	16	76,72
61,0	0,850	40	1,0	51,85	40	77,15
59,2	1,350	40	1,5	79,92	60	75,08
57,1	1,880	40	2,0	107,35	80	74,52
54,2	2,850	40	3,0	154,47	120	77,68

6 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout a zrealizovat regulovatelný zdroj s impulsní předregulací. Zapojení je doplněné o nastavitelné proudové omezení. Možnosti zapojení lineárních zdrojů, regulace výstupního napětí a proudové omezení byly popsány v teoretické části práce v kapitole 3.2. Dále byly v kapitole 3.3 teoretické části popsány možnosti předregulace napětí.

Předregulační měnič byl realizován pomocí integrovaného obvodu LM5085 v katalogovém zapojení. Vlastnosti integrovaného obvodu LM5085 byly popsány v praktické části práce v kapitole 4.1.

Lineární regulátor byl realizován jako zpětnovazební regulátor napětí a proudu. V podstatě se jedná o dva nezávislé regulátory řídící jeden výkonový prvek. Funkce lineárního regulátoru je popsána v kapitole 4.2. Návrh pomocných obvodů, tedy pomocného zdroje a řídicího obvodu předregulace, je v kapitolách 4.3 a 4.4 praktické části.

Celé zapojení je rozdělené na dva bloky, impulsní předregulace a lineární zdroj s pomocnými obvody. Oba tyto bloky jsou realizovány na vlastních deskách plošných spojů. Plošné spoje jsou navrženy a vyrobeny jako oboustranné a prokovené s nepájivou maskou a servisním potiskem. Návrh desek plošných spojů probíhal v návrhovém softwaru Eagle 7.2.0 a byly vyrobeny čínskou firmou JLCPCB. Jejich návrh je popsán v kapitole 4.5. Byl sestaven vzorek, který byl ověřován měřením.

V době měření vykazoval sestavený vzorek impulzního předregulátoru zvláštní chování, konkrétně při určitém výstupním napětí a určitém zatěžovacím proudu produkoval na výstupu zvlnění napětí v řádu několika jednotek voltů. Předregulační stupeň tímto chováním nepříznivě ovlivňoval funkci lineárního regulátoru, konkrétně zvlnění výstupního napětí a reakci na skokové zatížení. Z tohoto důvodu nebyly parametry výstupního zvlnění a reakce na skokové zatížení dále měřeny a nebyly uvedeny v této práci. Podobné chování vykazoval i druhý sestavený vzorek impulzního předregulátoru. Z této skutečnosti tedy plyne chyba v návrhu předregulačního měniče, chybné volbě součástek nebo chybně navržené desky plošného spoje.

Hodnota výstupního napětí regulátoru je říditelná v rozsahu od 0V do hodnoty 50V. Hodnota výstupního proudu, tedy nastavitelné proudové omezení, je nastavitelné v rozsahu hodnot od 0A do 3A. Nastavením referenčních napětí pomocí trimrů na desce plošného spoje lineárního regulátoru lze rozsah výstupního napětí a výstupního proudu upravit.

Na vzorku byly změřeny parametry zatěžovacích charakteristik a účinnost celého zapojení. Zatěžovací charakteristiky byly změřeny pro dvě různá proudová omezení a dvě různé hodnoty výstupního napětí. Naměřené zatěžovací charakteristiky jsou uvedeny v kapitole 5.2. Ze zatěžovacích charakteristik je patrná stabilizace výstupního napětí, regulátor tedy pracuje jako zdroj konstantního napětí až do hodnoty proudového omezení, kdy výstupní napětí klesá a regulátor začíná fungovat jako zdroj konstantního proudu.

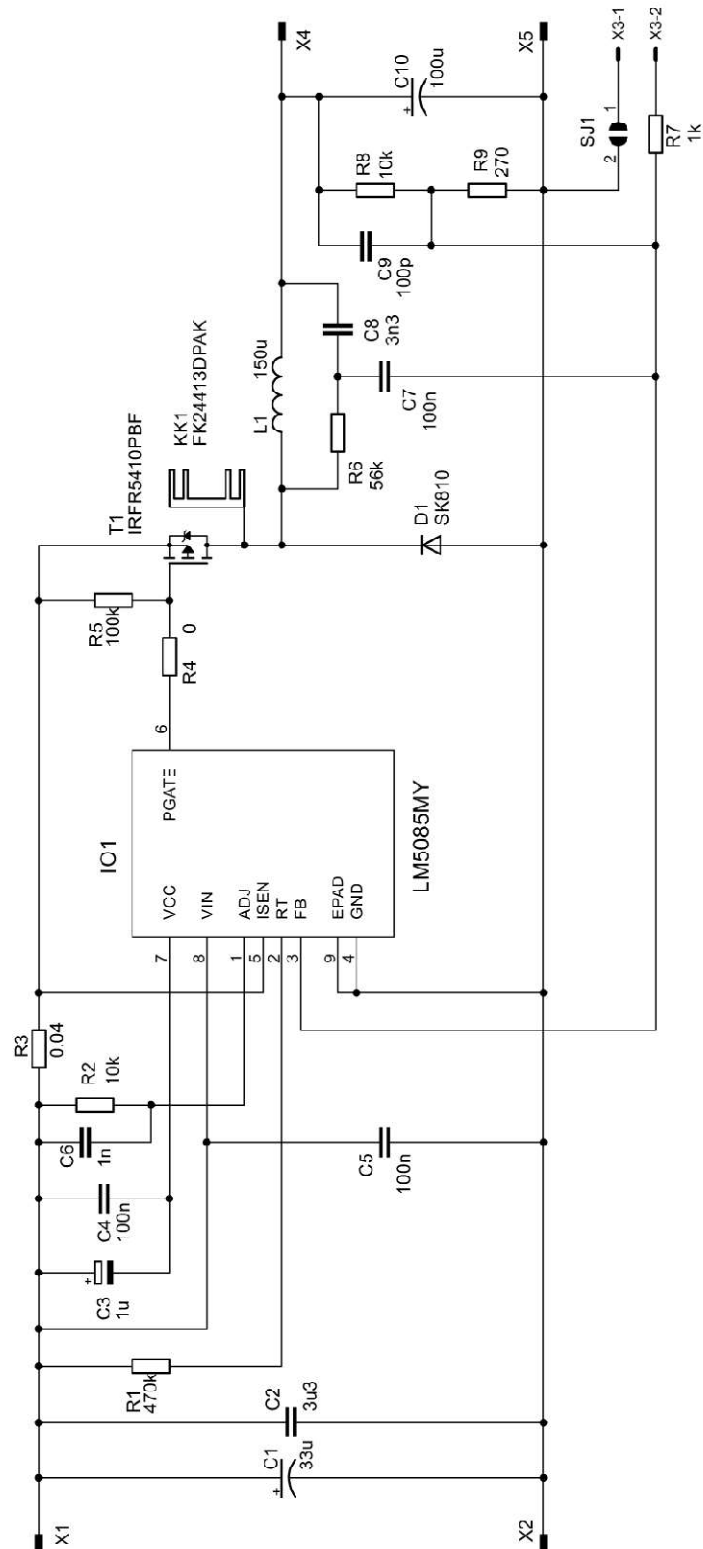
Naměřená účinnost je uvedena v kapitole 5.3. Měření účinnosti probíhalo při jedné konstantní hodnotě výstupního napětí, konkrétně $U_{\text{výst}} = 40\text{V}$ a při různých hodnotách výstupního proudu. Účinnost zapojení dosahuje téměř 78%. Měření účinnosti mohlo být nepříznivě ovlivněno dříve popsanou, chybnou funkcí impulzního předregulátoru.

7 Použitá literatura

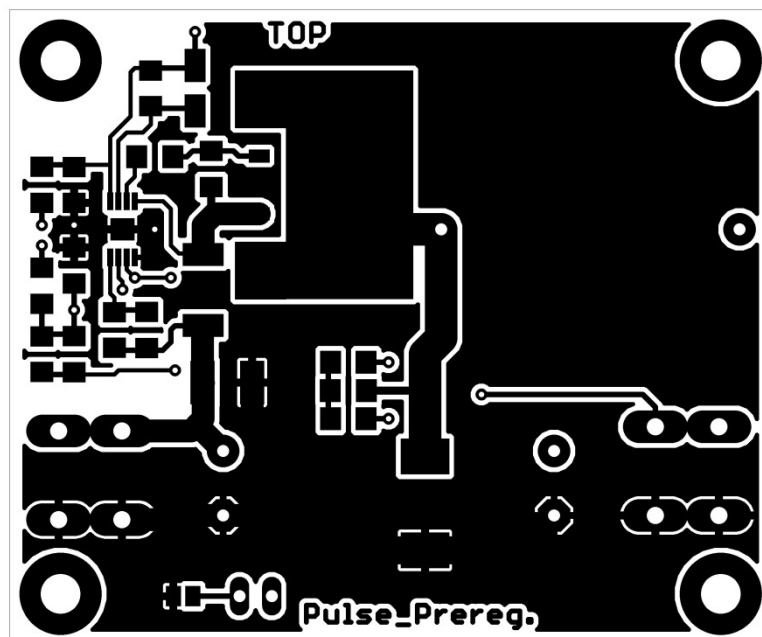
- [1] HAMMERBAUER, Jiří. Elektronické napájecí zdroje a akumulátory. Plzeň: Fakulta elektrotechnická, 1998. ISBN 80-7082-411-5
- [2] Texas Instruments. [online katalogový list]. LM5085/-Q1. ©2015 [cit. 8.6.2019].
Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm5085.pdf>
- [3] International Rectifier. [online katalogový list]. Data Sheet - IRFR5410. ©2011 [cit. 8.6.2019]. Dostupné z:
<https://www.infineon.com/dgdl/irfr5410pbf.pdf?fileId=5546d462533600a4015356356f622107>
- [4] DIOTEC SEMICONDUCTOR. [online katalogový list]. SK810. ©2018 [cit. 8.6.2019]. Dostupné z:
<https://www.tme.eu/Document/15c8c6b1fb3c8473a45871ce353fa423/sk82.pdf>
- [5] STMicroelectronics. [online katalogový list]. TIP3055. ©2008 [cit. 8.6.2019].
Dostupné z:
<https://www.tme.eu/Document/208f8a9b15d60460f542b73e4ab04c5d/tip2955.pdf>
- [6] ON SEMICONDUCTOR. [online katalogový list]. MMBT5551LT1G. ©2011 [cit. 8.6.2019]. Dostupné z:
<https://www.tme.eu/Document/c4d7f76794d8b459e7d7f92f50e84c7d/MMBT5551LT1G.PDF>
- [7] ANALOG DEVICES. [online katalogový list]. OP27GSZ. ©2006 [cit. 8.6.2019].
Dostupné z:
<https://www.tme.eu/Document/cb37c000803c84f576c78ef443341db9/op27epz.pdf>

8 Přílohy

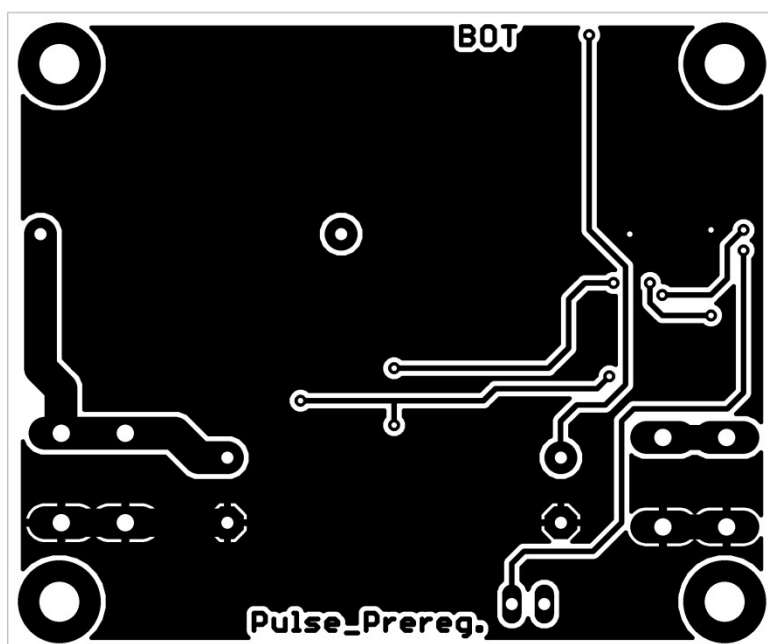
Příloha A – Dokumentace impulzního předregulátoru



Obr. A 1: Schéma zapojení desky plošného spoje impulzního předregulátoru



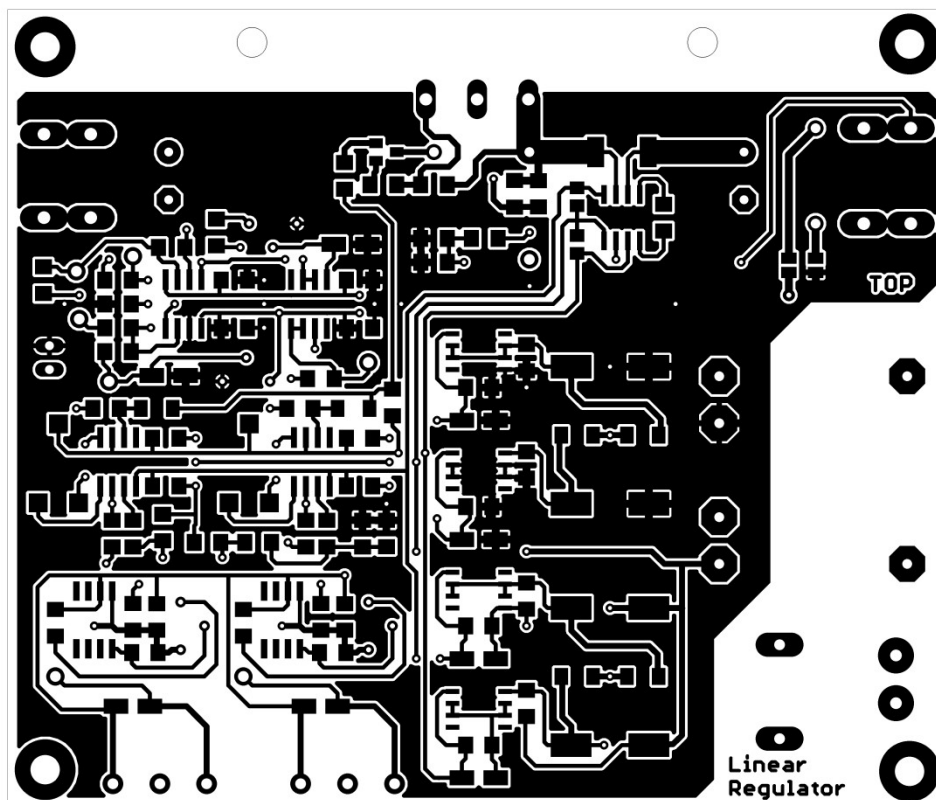
Obr. A 2: Deska plošného spoje impulzního předregulátoru, strana součástek (TOP)



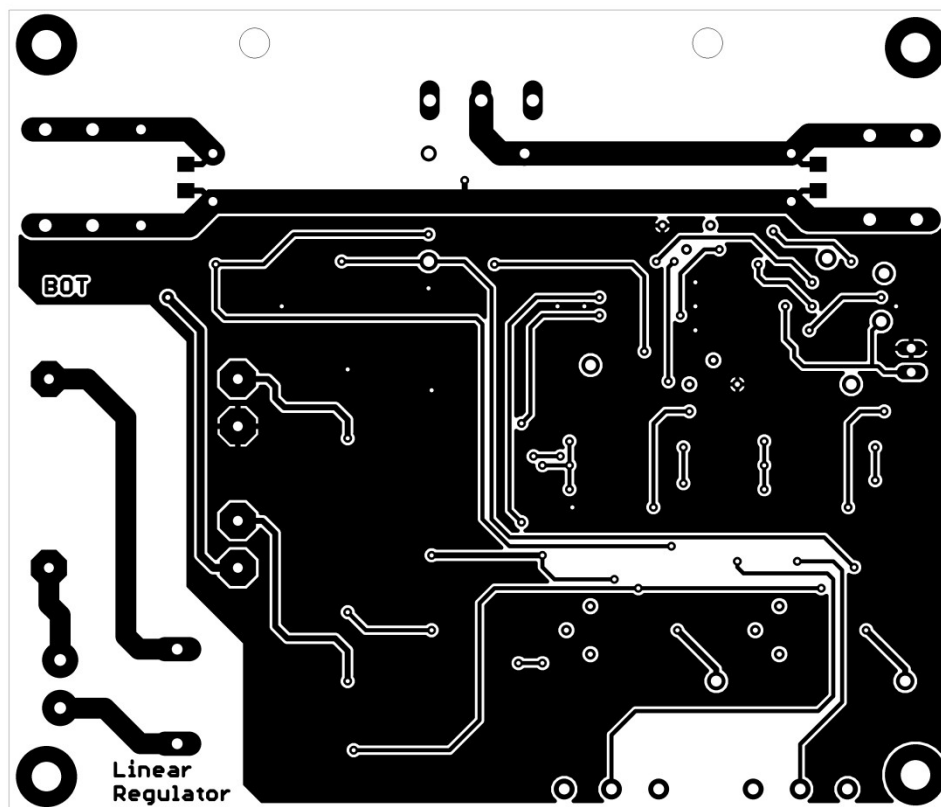
Obr. A 3: Deska plošného spoje impulzního předregulátoru, strana mědi (BOTTOM)

Seznam součástek

Součástka	Počet	Hodnota	Popis	Pouzdro
X3	1		22-23-2021	22-23-2021
X1, X2, X4, X5	4		PIN2F061.100	F061.100
SJ1	1		SJ	SJ
R4	1	0	R-EU_R1206	R1206
R3	1	0.04	R-EU_R2512	R2512
R5	1	100k	R-EU_R1206	R1206
C4, C5, C7	3	100n	C-EUC1206	C1206
C9	1	100p	C-EUC1206	C1206
C10	1	100u	CPOL-USE5-10.5	E5-10,5
R2, R8	2	10k	R-EU_R1206	R1206
L1	1	150u	1415440C	1415440C
R7	1	1k	R-EU_R1206	R1206
C6	1	1n	C-EUC1206	C1206
C3	1	1u	CPOL-EU153CLV-0405	153CLV-0405
R9	1	270	R-EU_R1206	R1206
C1	1	33u	CPOL-USE5-10.5	E5-10,5
C8	1	3n3	C-EUC1206	C1206
C2	1	3u3	C-EUC1812	C1812
R1	1	470k	R-EU_R1206	R1206
R6	1	56k	R-EU_R1206	R1206
KK1	1	FK24413DPAK	DPAKFK24413	FK24413DPAK
T1	1	IRFR5410PBF	FDD4141TO252	TO252
IO1	1	LM5085MY	LM5085MY	SOP65P490X110-9N
D1	1	SK810	DIODE-SMC	SMC



Obr. B 2: Deska plošného spoje lineárního regulátoru, strana součástek (TOP)



Obr. B 3: Deska plošného spoje lineárního regulátoru, strana mědi (BOTTOM)

Seznam součástek

Součástka	Počet	Hodnota	Popis	Pouzdro
TR1	1		EI30-2	EI30-2
F1	1		KS9VPFT45	PTF45
X1, X2, X4, X5	4		PIN2F061.100	F061.100
SJ1, SJ2	2		SJ	SJ
R22	1	0.05	R-EU_R2512	R2512
R2, R10	2	100	R-EU_R1206	R1206
R18, R26	2	100k	R-EU_R1206	R1206
C12, C17	2	100n	C-EUC0805	C0805
C2, C6, C7, C8, C9, C13, C14, C18, C19, C22, C23, C24, C25, C27, C29, C34, C35, C36, C37, C38, C39, C40, C41	23	100n	C-EUC1206	C1206
C1	1	100u	CPOL-EUE5-10.5	E5-10,5
R1, R3, R4, R11, R17, R19, R20, R21	8	10k	R-EU_R1206	R1206
C10	1	10n	C-EUC1206	C1206
C21	1	10u	CPOL-EUE5-10.5	E5-10,5
D3, D4	2	1N4007	1N4004	DO41-10
D5, D6, D7, D8	4	1N4148	DIODE-MINIMELF	MINIMELF
R13, R14, R15, R16, R23, R27, R30, R33	8	1k	R-EU_R1206	R1206
C4, C5, C11, C26, C28	5	1n	C-EUC1206	C1206
C3, C15, C16, C20, C30, C31, C32, C33	8	1u	CPOL-EU153CLV-0405	153CLV-0405
X3	1	22-23-2021	22-23-2021	22-23-2021
R5	1	2k2	R-EU_R1206	R1206
R6	1	47	R-EU_R1206	R1206
C42, C43, C44, C45	4	470u	CPOL-EU140CLH-1010	140CLH-1010
R12	1	4k7	R-EU_R1206	R1206
R32, R35	2	560	R-EU_R1206	R1206
R29	1	9k1	R-EU_R1206	R1206
IC4	1	AD620	AD620BRZ-RL-REEL7	SOIC127P600X175-8N
D1, D2	2	BAT46	DIODE-MINIMELF	MINIMELF
IC8, IC10	2	L78L05ACD13TR	L78L05ACD13TR	SOIC127P600X175-8N
IC9, IC11	2	L79L05ACD	L79L05ACD	SOIC127P600X175-8N
X6	1	MKDSN1,5/2-5,08	MKDSN1,5/2-5,08	MKDSN1,5/2-5,08
T1	1	MMBT5551	BC846	SOT23
IC1, IC5	2	NE5532D	NE5532D	SO08
IC2, IC3	2	OP27D	OP27D	SO08
R24, R25	2	POT_10k	3RP/1610N	3RP/1610N
TP1, TP2, TP3, TP4, TP5, TP6, TP7, TP8	8	PTR1	PTR1	P1,2
KK1	1	RAD-A5723/50	RAD-A5723/50	RAD-A5723/50
T2	1	TIP3055	TIP3055	TOP3AV
IC6, IC7	2	TL431D	TL431D	SO08
R9, R28	2	TRIM_10k	R-TRIMMT93YB	RTRIMT93YB
R31, R34	2	TRIM_2k	R-TRIMMT93YB	RTRIMT93YB
R7, R8	2	TRIM_CA6VSMD10k	TRIM_CA6VSMD	CA6VSMD

Příloha C – Tabulky naměřených hodnot zatěžovací charakteristiky

Naměřené hodnoty pro proudové omezení nastavené na polovinu rozsahu.

I_2 [A]	U_2 [V]
0	12
0,12	12
0,3	12
0,5	12
0,8	12
1	12
1,2	12
1,35	12
1,5	12
1,55	10,7
1,56	9,5
1,56	6
1,56	4

I_2 [A]	U_2 [V]
0	40
0,4	40
0,6	40
0,8	40
1	40
1,2	40
1,3	40
1,5	40
1,52	38,3
1,53	33,5
1,53	27
1,53	20
1,53	14,5

Naměřené hodnoty pro proudové omezení nastavené na maximální rozsah.

I_2 [A]	U_2 [V]
0	12
0,12	12
0,2	12
0,5	12
0,8	12
1	12
1,2	12
1,5	12
1,8	12
2	12
2,2	12
2,5	12
3	12
3,1	11,1
3,16	6
3,16	3
3,16	1,7

I_2 [A]	U_2 [V]
0	40
0,4	40
0,5	40
0,6	40
0,8	40
1	40
1,2	40
1,5	40
1,8	40
2	40
2,2	40
2,5	40
3	40
3,1	38,2
3,16	28,2
3,16	15
3,16	10