

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Spínaný laboratorní zdroj s nastavitelnými výstupními parametry**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2017/2018

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš HUJER**  
Osobní číslo: **E16N0073P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Dopravní elektroinženýrství a autoelektronika**  
Název tématu: **Spínaný laboratorní zdroj s nastavitelnými výstupními parametry**  
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 :

Navrhnout obvodové řešení spínaného laboratorního zdroje, realizovat funkční vzorek a provést měření na vyrobeném vzorku laboratorního zdroje:

1. Prostudovat principy regulovaných laboratorních zdrojů a popsat možnosti konstrukcí výkonových obvodů lineárních a impulsních systémů.
2. Navrhnout obvodové řešení spínaného laboratorního zdroje s regulovaným výstupním napětím a regulovaným výstupním proudem včetně výpočtů důležitých obvodových prvků a parametrů.
3. Realizovat funkční vzorek zdroje.
4. Na realizovaném vzorku provést měření a zhodnocení výsledků.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

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


Seznam odborné literatury:

1. Faktor, Z.: Transformátory a cívky; BEN - technická literatura, Praha 2002
2. Krejčířík, A.: Napájecí zdroje I., II. a III.; BEN - technická literatura, Praha 1997
3. Billings, K.: Switchmode power supply handbook, McGraw-Hill Handbooks, 1999, 2nd edition, ISBN 0-07-006719-8


Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.**  
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání diplomové práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2018**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev  
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na návrh a samotnou realizaci funkčního vzorku spínaného laboratorního zdroje. Vytvořil jsem blokové schéma zdroje a následně detailně popsal jeho jednotlivé části, ze kterých je složen. Součástí práce je také teoretický rozbor lineárních a spínaných zdrojů, kde jsem vysvětlil jejich princip a možnosti konstrukce. Práci jsem také doplnil o popis několika spínaných měničů, které jsou pro laboratorní zdroje důležité. V závěru práce jsou zobrazeny nejdůležitější charakteristiky získané simulací a také samotným testováním vytvořených prototypů.

## **Klíčová slova**

Lineární zdroj, spínané měniče, snižující měnič, vstupní obvody, zpětná vazba, lineární stabilizátor.

## **Abstract**

The thesis is focused on the design and realization of a functional sample switching power supply. I created a block diagram of the source and subsequently described the individual parts from which it is composed. A part of the thesis is also a theoretical analysis of linear and switching power supplies, where I have explained the principle and construction possibilities. The thesis is also completed the description of several switching converters, which are important for power supply. At the conclusion of the work are shown the most important characteristics obtained by the simulations and testing of the developed prototypes too.

## **Key words**

Linear power supply, switching converters, buck converter, input circuits, feedback, linear stabilizer.

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou 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 diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 17.5.2018

Lukáš Hujer

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucími práce doc. Ing. Jiřímu Hammerbauerovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení diplomové práce. Zároveň bych chtěl poděkovat celé svojí rodině za trpělivost a podporu během celé doby studia.

## Obsah

Úvod.....	10
Seznam zkratk .....	11
<b>1. Regulované laboratorní zdroje .....</b>	<b>12</b>
1.1 Lineární zdroj .....	12
1.2 Spínaný zdroj.....	14
1.2.1 Rozdělení spínaných zdrojů .....	14
1.2.2 Princip činnosti.....	15
1.2.3 Výhody a nevýhody spínaných zdrojů .....	17
1.2.3.1 Výhody.....	18
1.2.3.2 Nevýhody.....	18
1.3 Předregulátory .....	19
1.3.1 Předregulátor s přepínáním odboček transformátoru .....	19
1.3.2 Předregulátor se spínaným měničem na malé napětí .....	20
1.3.3 Síťový spínaný předregulátor .....	20
1.4 Lineární stabilizátor.....	21
1.4.1 Stabilizátory s pevným/nastavitelným výstupním napětím.....	21
1.4.2 Lineární stabilizátor s proudovým omezením.....	22
1.4.3 Plovoucí lineární stabilizátor s proudovým omezením .....	23
<b>2. Spínané měniče.....</b>	<b>24</b>
2.1 Snižující měnič – „Buck“ .....	24
2.2 Blokující jednočinný měnič – „Flyback“ .....	26
2.3 Propustný jednočinný měnič – „Forward“ .....	27
<b>3. Návrh vzorku spínaného zdroje .....</b>	<b>28</b>
3.1 Požadavky na laboratorní zdroj .....	28
3.2 Blokové schéma zdroje.....	29
3.3 Spínaný předregulátor .....	29
3.3.1 Funkční blokové schéma čipu .....	29
3.3.2 Napájení řídicího čipu .....	31
3.3.3 Budící stupeň.....	32
3.3.4 Výpočet parametrů oscilátoru .....	33
3.3.5 Výpočet výstupního filtru .....	34
3.4 Lineární stabilizátor.....	35



3.4.1	Možnosti zapojení .....	35
3.4.2	Konkrétní zapojení .....	36
3.4.3	Zpětná vazba .....	37
3.5	Napájení zdroje.....	38
3.5.1	Transformátor.....	38
3.5.2	Vstupní obvody .....	38
3.6	Zobrazení naměřených hodnot .....	39
<b>4.</b>	<b>Testování parametrů zdroje .....</b>	<b>40</b>
4.1	Simulace .....	40
4.1.1	Zatěžovací charakteristika.....	41
4.1.2	Regulační charakteristika .....	41
4.2	Realizované prototypy.....	42
4.2.1	První testovací vzorek .....	42
4.2.2	Druhý testovací vzorek .....	42
4.3	Měření parametrů .....	43
4.3.1	Zatěžovací charakteristika.....	43
4.3.2	Naměřené hodnoty .....	44
4.3.3	Zvlnění .....	44
4.3.4	Průběhy z osciloskopu.....	45
<b>Závěr.....</b>	<b>.....</b>	<b>46</b>
<b>Použitá literatura .....</b>	<b>.....</b>	<b>47</b>
<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>.....</b>	<b>49</b>
<b>Seznam příloh .....</b>	<b>.....</b>	<b>1</b>

## Úvod

Cílem této diplomové práce je vytvořit funkční vzorek spínaného laboratorního zdroje. Celou práci jsem rozdělil do několika bloků. První část se zaměřuje na popis jednotlivých částí laboratorního zdroje. Vysvětlil jsem zde princip funkce jak lineárních, tak i spínaných zdrojů a popsal jsem jejich přednosti i nedostatky. Ve druhé části jsem představil některé základní typy spínaných měničů. Součástí každého měniče je schéma zapojení a jeho stručný popis. V práci se věnuji především měničům, které jsou pro laboratorní zdroje stěžejní. Ve třetí části se zaměřuji již na samotný návrh funkčního vzorku spínaného zdroje. V této části jsem nejprve představil blokové schéma zdroje a následně jsem provedl podrobný rozbor jednotlivých jeho částí. Tato kapitola také zahrnuje výpočty některých důležitých obvodových prvků a parametrů. Poslední část mojí diplomové práce se zabývá testováním parametrů navrženého zdroje. Jsou zde zobrazeny některé důležité charakteristiky získané jednak simulací, ale také samotným testováním vyrobených prototypů.

## **Seznam zkratk**

EI	Druh jádra transformátoru
$R_{\text{DS(on)}}$	Odpor kanálu tranzistoru
PWM	Pulsně šířková modulace
LDO	Stabilizátor s malým úbytkem napětí
$U_{\text{DROP}}$	Úbytek napětí
$U_{\text{ref,U}}$	Zdroj referenčního napětí
$U_{\text{ref,I}}$	Zdroj referenčního proudu
VPULSE	Typ zdroje používaný v programu PSpice
SMD	Součástka pro povrchovou montáž

# 1. Regulované laboratorní zdroje

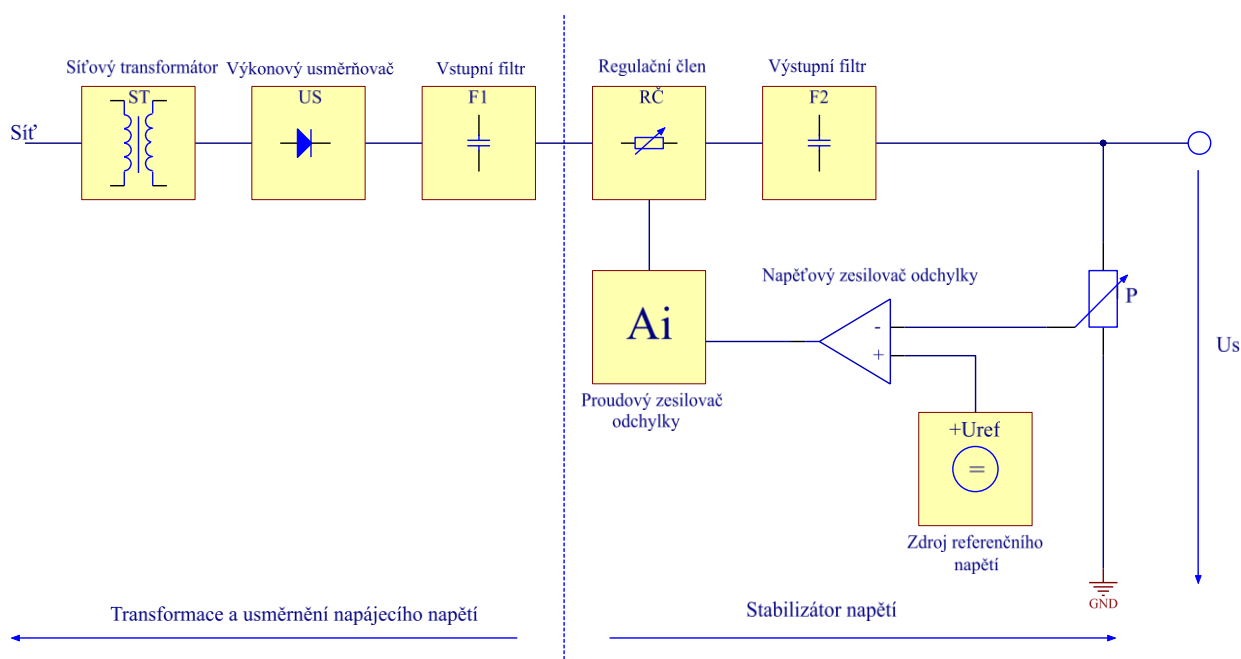
Regulovaný laboratorní zdroj je zařízení, které nám dodává do obvodu elektrickou energii požadované velikosti. Je nezbytným pomocníkem v každé elektrotechnické dílně. Většina laboratorních zdrojů disponuje také proudovým omezením, což zvyšuje jeho použitelnost [1].

## 1.1 Lineární zdroj

Klasický napájecí zdroj se skládá z transformátoru ST, který upravuje amplitudu střídavého napětí na jinou amplitudu požadované velikosti. Zároveň slouží ke galvanickému oddělení napájecího zdroje od rozvodné sítě. V současné době se nejčastěji používají transformátory na jádrech EI a toroidní. Transformátory postavené na plechách EI, ve srovnání s toroidními, mají větší hmotnost, rozměry, ale na druhou stranu jsou o něco levnější [2].

Sekundární vinutí transformátoru je připojeno na usměrňovač US. Jeho úkolem je usměrnit protékající proud, kdy na jeho výstupu dostaneme stejnosměrné pulzující napětí. Rozlišujeme usměrňovače jednofázové a třífázové. Nejčastěji využívaný jednofázový usměrňovač je Graetzův můstek. Výkonové usměrňovače využívají polovodičové diody a jsou řešeny tak, aby současně pracovaly jako zdvojovače kmitočtu.

Takto vzniklé napětí je následně vyhlazeno vstupním filtrem F1. Filtrem je nejčastěji elektrolytický kondenzátor doplněný o odrušovací kondenzátor. Kondenzátor spolu s odporem použitého transformátoru a usměrňovacími diodami tvoří integrační článek – dolní propust s kmitočtem daleko nižším, než je kmitočet sítě.



Obr. 1. 1 Blokové schéma lineárního napájecího zdroje [2]

Stabilizátor napětí se skládá z proudového zesilovače odchylky  $A_i$ , napěťového zesilovače odchylky, zdroje referenčního napětí  $U_{ref}$ , regulačního členu RČ a případně může být doplněn i o výstupní filtr F2. Akčním členem celého stabilizátoru je regulační člen RČ, který bývá většinou bipolární tranzistor ve vhodném zapojení, pracující jako spojitě proměnný odpor.

Zpětnovazební regulace je založena na určité nenulové odchylce mezi referenčním a výstupním stabilizovaným napětím na vstupu napěťového zesilovače odchylky. Takto zesílené napětí ovládá okamžitý odpor regulačního tranzistoru. Při snížení výstupního napětí se zvýší regulační odchylka a tranzistor je tedy buzen větším napětím. Bipolární tranzistor potřebuje na svém vstupu poměrně značný budící výkon, proto je stabilizátor doplněn o proudový zesilovač odchylky  $A_i$ . Úkolem celého stabilizátoru je udržet výstupní napětí na konstantní hodnotě a to i při změně zátěže nebo při kolísání vstupního napětí. Ilustrační blokové schéma lineárního napájecího zdroje je vidět na Obr. 1. 1.

## 1.2 Spínaný zdroj

První spínané zdroje se na trhu objevily někdy začátkem šedesátých let minulého století. V poslední době se začaly využívat prakticky ve všech odvětvích elektroniky i ostatního průmyslu. Dnešní spínané zdroje obsahují speciální integrované obvody, které v sobě zahrnují veškeré řízení spínaného zdroje. Většina napájecích zdrojů využívaných ve výpočetní technice je založena právě na principu spínaného zdroje. Není možné zkonstruovat lineární zdroj pro tak vysoké výkony, které například vyžadují osobní počítače (300 – 500W).

Hlavním rozdílem mezi spínaným a lineárním zdrojem je způsob používání výkonového regulačního členu. U spínaného zdroje je výkonový člen zatěžován pouze impulzně, tedy je střídavě spínán a rozepínán. Tyto zdroje mají větší účinnost než zdroje se spojitou regulací. Impulzní regulace nám dovolí stabilizovat výstupní napětí i v případech, kdy máme velké změny vstupního napětí. Ve spínaných zdrojích se jako výkonový člen využívá tranzistor typu MOSFET. Jeho odpor kanálu, označovaný  $R_{\text{DS(on)}}$ , je tím stěžejním parametrem každého výkonového tranzistoru a pohybuje se řádově v desítkách  $\text{m}\Omega$  [3].

### 1.2.1 Rozdělení spínaných zdrojů

Samotné spínané zdroje můžeme rozdělit do několika skupin. Základní dělení spínaných zdrojů uvádí většina literatury podle pracovního kmitočtu. Když opomeneme nepříliš používané spínané zdroje s frekvencí sítě, lze je tedy rozdělit na tři základní skupiny.

Při použití zdrojů s pracovním kmitočtem sítě nedosáhneme tak vysoké přesnosti. Navíc jsou tyto zdroje těžší a objemnější, ale na druhou stranu jsou zase levnější a jejich použití není nijak omezeno přenášeným výkonem. Spínané zdroje s kmitočtem vyšším než je kmitočet sítě, jsou menší a dosahují podstatně kvalitnější regulace výstupního napětí [4].

- **S transformátorem**
  - Jednočinné měniče
    - Propustné (Forward)
    - Blokující (Flyback)
  - Dvojčinné měniče
    - Push-Pull
    - Polomůstek s kondenzátory (Half Bridge)
    - Plný můstek (Full Bridge)

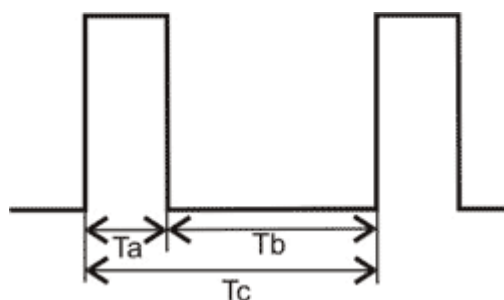
- **Bez transformátoru**
  - Se spínanými kondenzátory (nábojová pumpa)
  - Propustné měniče
    - Step-down (Buck - snižující)
  - Blokující měniče
    - Step-up (Boost - zvyšující)
    - Buck-Boost (snižující/zvyšující, invertující)
    - SEPIC měnič (neinvertující)
    - ČUK měnič (invertující)
- **Rezonanční měniče**

### 1.2.2 Princip činnosti

Základním principem a zároveň odlišností spínaných zdrojů je jejich nespojitost. To znamená, že výstupní napětí  $U_S$  je stabilizováno pouze v určitých časových intervalech. Výkonový tranzistor pracuje jako řízený spínač, to znamená, že je střídavě spínán a rozepínán. Z této úvahy je také patrné, že proud řízeným spínačem protéká pouze po vymezený časový interval. Mezi jeho kladné vlastnosti řadíme skutečnost, že na spínacím prvku dochází k malé výkonové ztrátě, která je téměř nezávislá na rozdílu vstupního a výstupního napětí [4].

Samotný princip činnosti spočívá ve vzájemné spolupráci výstupního filtru a regulačního prvku. Veškerá energie, odebraná v jednom aktivním intervalu  $T_A$  pracovního cyklu, je filtrem akumulována. Ve druhém okamžiku  $T_B$  je spínač rozepnut a veškerá energie, která byla v předchozím intervalu akumulována filtrem, je odebírána zátěží. Pomocí zpětnovazební smyčky řídíme jednotlivé délky časových intervalu  $T_A$  a  $T_B$ .

Řízením jednotlivých časových intervalů se snažíme minimalizovat odchylku výstupního napětí od jmenovité hodnoty. V pasivním intervalu se regulátor přímo nepodílí na kvalitě výstupního napětí. Výstupní napětí je regulováno takovým způsobem, abychom vyloučili vlivy vnějších podmínek – vstupní napětí a zatěžovací odpor. Pracovní cyklus spínaného zdroje je vidět níže na uvedeném Obr. 1. 2.



Obr. 1. 2 Pracovní cyklus spínaného zdroje, převzato z [4]

Pracovní cyklus může být ovládán třemi odlišnými způsoby:

**a) Konstantní interval  $T_A$ , proměnná perioda  $T_C$**

V této variantě je výkonový spínač sepnut na konstantní dobu  $T_A$ . Očekává se, že regulace bude účinná, tak aby v intervalu  $T_A$  byla veškerá energie akumulována filtrem a po rozpojení spínače v intervalu  $T_B$  byla energie odebrána zátěží. Při zmenšené výstupního napětí pod jmenovitou hodnotu aktivuje řídicí obvod znovu spínač. Změnou vnějších podmínek, se mi změní i perioda pracovního cyklu  $T_C$ .

**b) Konstantní interval  $T_B$ , proměnná perioda  $T_C$**

U tohoto regulačního principu je situace opačná než u předchozí varianty. Zde je spínač rozepnut na konstantní dobu během intervalu  $T_B$ . Naopak změnou aktivního intervalu  $T_A$  je výstupní napětí regulováno. Tím se mění doba periody  $T_C$ , ovšem s opačným smyslem než jako u předchozí regulace. Zvětšením výstupního proudu regulátoru se prodlouží aktivní interval  $T_A$ . V praktické oblasti se setkáváme s regulačními metodami, u kterých jsou proměnné oba intervaly  $T_A$ ,  $T_B$ , přičemž dochází i ke změně doby periody  $T_C$ .

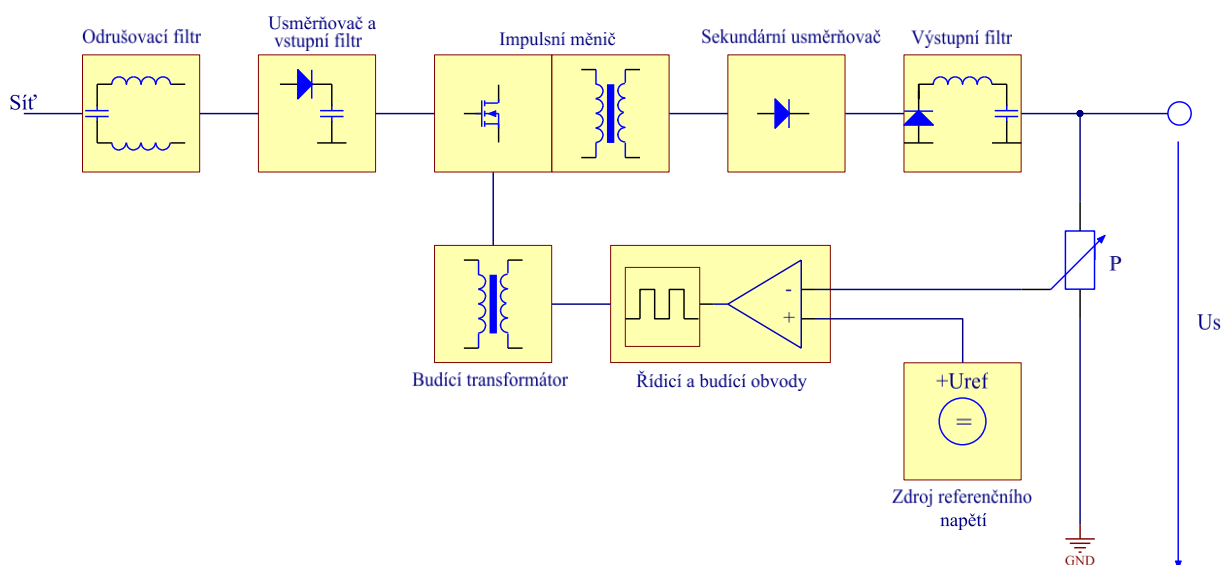
**c) Proměnný poměr intervalů  $T_A/T_B$ , konstantní perioda  $T_C$**

U této varianty dostáváme konstantní periodu  $T_C$  a lze tedy měnit výstupní napětí pouze změnami poměru mezi aktivním a pasivním intervalem. Tato varianta výhradě využívá pulsně šířkovou modulaci (PWM). Tento způsob regulace je asi nejpoužívanější princip ve spínaných zdrojích. Jejich nespornou výhodou je konstantní pracovní frekvence.



Spínané zdroje jsou vždy složeny z několika bloků, které jsou uzpůsobeny konkrétním požadavkům. Pro každou aplikaci jsou kladeny jiné nároky, proto může být každý blok jiný v závislosti na zvolené topologii. Blokové schéma spínaného zdroje, které využívá regulaci na primární straně je vidět na Obr. 1. 3.

Na vstup zdroje je přivedeno síťové napětí 230V/50Hz. Prvním blokem je EMC odrušovací filtr, který zajišťuje, aby nedocházelo k pronikání rušivého napětí ze zdroje do napájecí sítě. Následuje blok usměrňovače a vstupního filtru, kde se nám síťové napětí usměrní a zároveň vyhladí. Stejnoseměrné napětí se následně přivede na vstup impulsního měniče, který může být zapojen několika způsoby. Impulsní proud prochází primárním vinutím transformátoru měniče a indukuje v jeho sekundárním vinutí usměrněné napětí. Výstupní napětí z impulsního měniče je následně vyhlazeno pomocí výstupního filtru. Výstupní vyhlazené napětí se porovnává s referenčním napětím a jejich odchylka vhodně ovládá poměr aktivního a pasivního intervalu měniče.



Obr. 1. 3 Blokové schéma spínaného zdroje s regulací na primární straně [4]

### 1.2.3 Výhody a nevýhody spínaných zdrojů

V této části budou podrobně rozepsány přednosti a nedostatky impulzně regulovaných zdrojů. Z níže uvedených informací je patrné, že použitím spínaných zdrojů dosáhneme zlepšení některých podstatných parametrů, ale naopak některé parametry jsou z hlediska regulace pro nás nevýhodné.

### 1.2.3.1 Výhody

#### a) Velká energetická účinnost

Jejich velká účinnost je nespornou výhodou oproti klasickým lineárním zdrojům. Jednodušší varianta spínaných zdrojů dosahuje účinnosti přes 60%. Moderní spínané zdroje dosahují o něco větší účinnosti a to přibližně mezi 70 – 90 %. Takto vysokých hodnot nejsme schopni dosáhnout u lineárních zdrojů.

#### b) Velké výstupní výkony

Další podstatnou výhodou spínaných zdrojů jsou jejich vysoké výstupní výkony, které dosahují až desítky kW. U impulzních zdrojů je možné dosáhnout výstupních proudů od řádů desítek až stovek A.

#### c) Modifikovatelnost regulátorů

Základní zapojení impulzních zdrojů je možné modifikovat a realizovat s nimi různé funkce. Můžeme tím například získat inverzní polaritu výstupního napětí, vůči vstupnímu.

#### d) Výhodné konstrukční parametry

Použitím spínaných zdrojů docílíme zmenšení celkové hmotnosti zdroje a zmenší se i rozměry zařízení. Jde o další aspekt, díky kterému jsou spínané zdroje tak využívány.

### 1.2.3.2 Nevýhody

#### a) Zvlnění výstupního napětí

Zvlnění výstupního napětí u impulzní regulace má dynamický charakter. Je to především dáno v nespojitosti regulace v průběhu periody  $T_C$  jak na jedné straně, tak i na druhé straně výstupního filtru. Z tohoto důvodu se u spínaných zdrojů objevuje na výstupu větší zvlněné napětí než u klasických lineárních zdrojů. Na úrovni a průběhu daného zvlnění má podstatný vliv použitý typ regulace a také jakost výstupního filtru.

#### b) Dynamické parametry

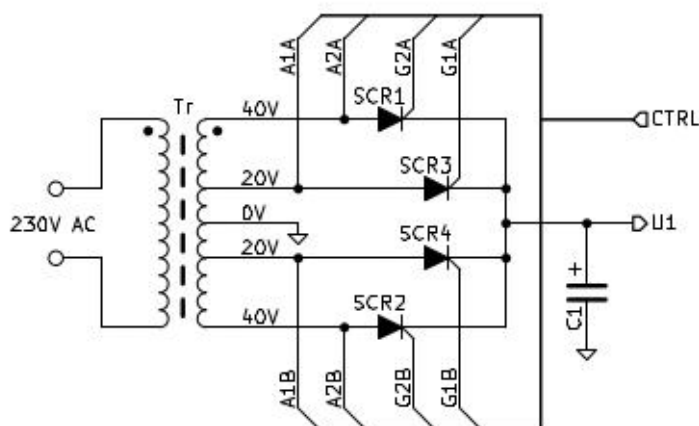
Další slabinou spínaných zdrojů je zhoršení dynamických parametrů a to hlavně odezva výstupního napětí na skokovou změnu zatěžovacího proudu. Dochází ke vzniku překmitů, které jsou důsledkem nespojitě regulace a nelinearity regulace. Spínané zdroje jsou také vhodné pro napájení zařízení s konstantní nebo pomalu proměnou zátěží.

## 1.3 Předregulátory

Předregulátor je ta část laboratorního zdroje, která mi dovoluje automatickou regulaci výstupního napětí dle aktuální potřeby. Tímto krokem jsme schopni docílit snížení výkonové ztráty na lineárních prvcích. Lze realizovat několik možných variant, které budou popsány v této kapitole [5].

### 1.3.1 Předregulátor s přepínáním odboček transformátoru

V okamžiku, kdy se rozhodneme pro svůj návrh využít transformátoru s železným jádrem, je nejjednodušší variantou předregulátor s přepínáním odboček na jeho sekundární straně. Tento způsob regulace je bezztrátový a dovolujeme optimalizovat vinutí pro různé hodnoty proudu a napětí. Přepínání odboček je možné realizovat pomocí tyristorů, triaků či za pomoci sady relé. K řízení těchto spínačů slouží jednoduché komparátory nebo je také možné využít mikrokontroléru vybaveného A/D převodníkem. Zjednodušené schéma zapojení je vidět na Obr. 1. 4, kde bylo využito dvojnásobně řízeného dvoucestného usměrňovače.

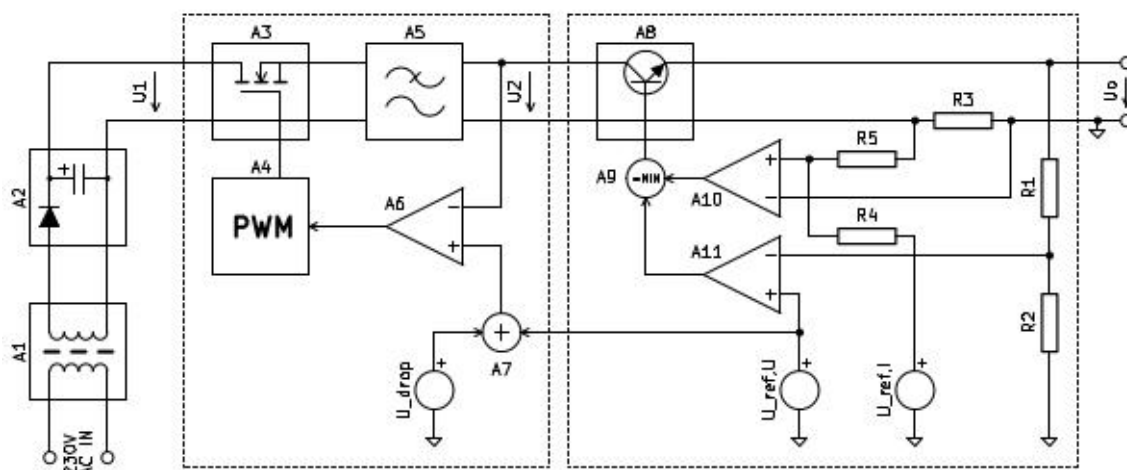


Obr. 1. 4 Předregulátor s přepínáním odboček transformátoru, převzato z [5]

Předregulátory založené na principu přepínání vinutí transformátoru vedou ke snížení ztrátového výkonu na regulačním prvku lineární části zdroje. Velkou výhodou tohoto principu je možnost krátkodobého přetížení transformátoru a síťového usměrňovače, a to až několika násobkem jmenovitého proudu. Podstatnou nevýhodou je složitost sekundárního vinutí transformátoru, jeho hmotnost a rozměry.

### 1.3.2 Předregulátor se spínaným měničem na malé napětí

Některé nevýhody předchozího zapojení jsme schopni kompenzovat použitím snižujícího spínaného měniče. Vznikne nám zapojení třístupňového napájecího zdroje, které obsahuje síťový transformátor, spínaný předregulátor a lineární stupeň. Síťový transformátor má pouze jedno sekundární vinutí, které musí být navrženo tak, abychom napětím  $U_1$  pokryli celý rozsah zdroje.



Obr. 1. 5 Třístupňový napájecí zdroj se síťovým transformátorem a spínaným předregulátorem, převzato z [5]

Další částí zdroje je spínaný předregulátor, který mi snižuje vstupní napětí  $U_1$  na hodnotu  $U_2$ . Řízení výstupního napětí  $U_2$  je možné odvodit od aktuálně nastavené hodnoty napětí  $U_0$ . Tato možnost má určitá omezení a to především v okamžiku, kdy bude lineární stabilizátor provozován v režimu konstantního proudu. Na sériovém regulačním prvku bychom dostali úbytek napětí o velikosti až  $U_2$ . Lepší variantou je řízení výstupního napětí předregulátoru, tak aby na lineárním stabilizátoru vznikala konstantní úbytek  $U_{DROP}$ .

### 1.3.3 Síťový spínaný předregulátor

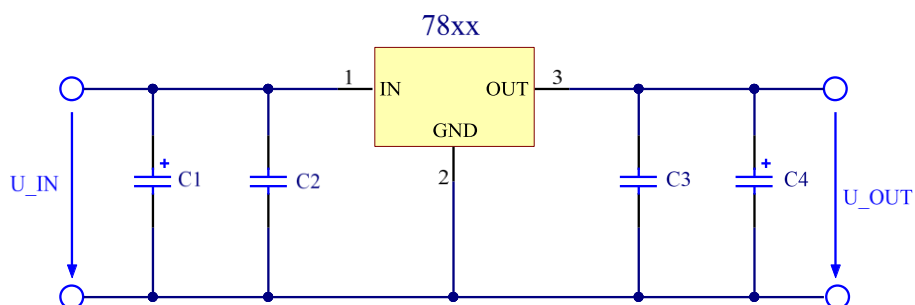
Poslední možností, jak u napájecích zdrojů vyřešit blok předregulátoru, je využít spínaného zdroje napájeného přímo z elektrické sítě. Hlavní a podstatnou výhodou je nahrazení velkého a těžkého transformátoru malým impulsním. Nesmíme také ale opomenout, že tato varianta má určité bloky, které je komplikované správně navrhnout – aktivní PFC filtr. Podrobnější rozbor této možnosti předregulátoru nebude detailně popsán, protože to není hlavní náplní práce.

## 1.4 Lineární stabilizátor

Lineární stabilizátory jsou velmi využívané ve většině lineárních zdrojů. Je zapotřebí podotknout, že lineární stupeň může být součástí i spínaného zdroje, což bude i v našem případě. Lineární stabilizátor je asi první volbou v okamžiku, kdy požadujeme kvalitní výstupní napětí a to z hlediska zvlnění a šumu [6]. Vstupní napětí musí být vždy větší než výstupní, tedy musíme zajistit minimální úbytek napětí  $U_{DROPMIN}$ . Tento úbytek bývá okolo 2 – 2,5V u běžných stabilizátorů a u tzv. LDO stabilizátorů nabývá hodnot menších než 100mV.

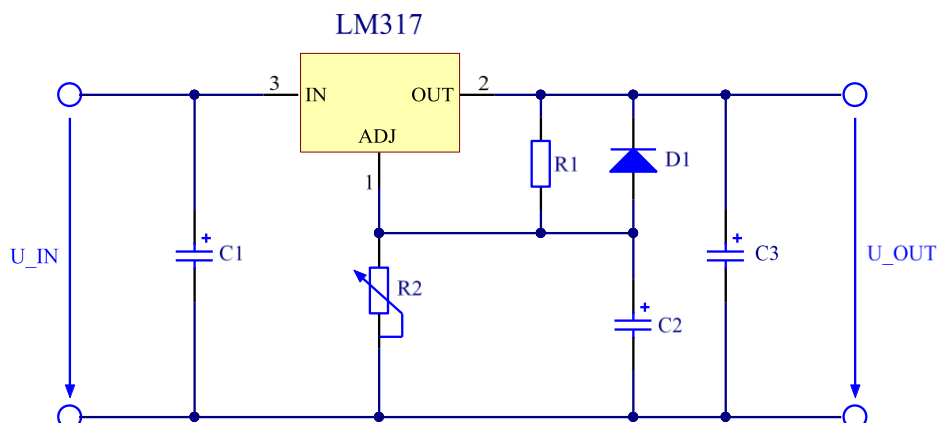
### 1.4.1 Stabilizátory s pevným/nastavitelným výstupním napětím

Pro stabilizaci pevného výstupního napětí využíváme integrovaných obvodů řady 78xx nebo 79xx, které stabilizují kladné či záporné napětí. Tyto obvody mohou na svém výstupu trvale udržovat různé velikosti napětí. Obsahují vestavěné ochrany proti přetížení, přehřátí či zkratu. Obvody tepelné ochrany zabraňují zničení stabilizátoru vlivem dlouhodobého ohřevu součástky. Zapojení tohoto typu stabilizátoru je vidět níže na Obr. 1. 6.



Obr. 1. 6 Stabilizátor s pevným výstupním napětím typu 78xx [7]

Stabilizátory s proměnným napětím pracují na principu přičítání proměnného napětí k referenčnímu napětí, tvořenému samotným stabilizátorem. Pro regulaci proměnného výstupního napětí standardně využíváme obvod LM317. Umožňuje stabilizovat kladné napětí, ale existuje i varianta, která umí stabilizovat záporné napětí, konkrétně LM337. Obvod obsahuje zdroj referenčního napětí, který je napájen konstantním proudem. Stabilizační prvek je řízen generátorem odchylky výstupního a referenčního napětí. Využívá se také přídavného rezistoru, pomocí kterého se k referenčnímu napětí přičítá další napětí. Ilustrační zapojení tohoto stabilizátoru je patrné z Obr. 1. 7.

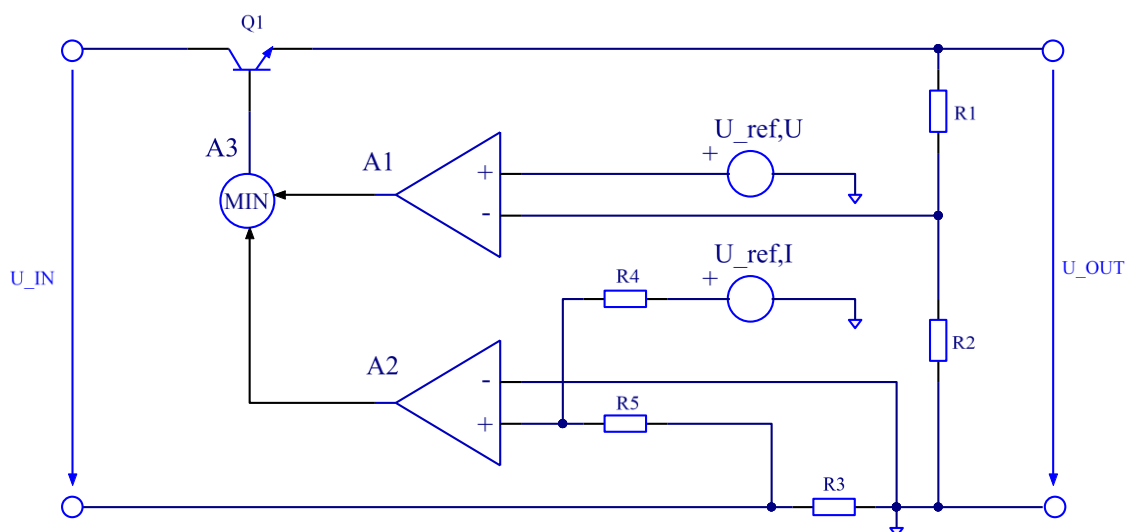


Obr. 1. 7 Stabilizátor s proměnným výstupním napětím typu LM317 [7]

Pro účely laboratorních zdrojů nejsou tyto typy stabilizátorů ovšem příliš vhodné, z důvodu proudového omezení, které je typicky nastaveno na pevnou hodnotu. Dalším jejich omezením je nízký ztrátový výkon, který je dán použitým pouzdrem typu TO-220. Jsou vhodné spíše pro testování elektronických obvodů s předem známými parametry.

#### 1.4.2 Lineární stabilizátor s proudovým omezením

Součástí této koncepce jsou dva chybové zesilovače A1, A2. Zesilovač A1 porovnává výstupní napětí prostřednictvím děliče R1/R2 s referenčním napětím  $U_{ref,U}$ . Takto vzniklý stav označujeme jako režim konstantního napětí. Výstupní napětí můžeme regulovat buď změnou referenčního napětí  $U_{ref,U}$  nebo hodnotami zpětnovazebního děliče. Obě tyto varianty se v laboratorních zdrojích používají.



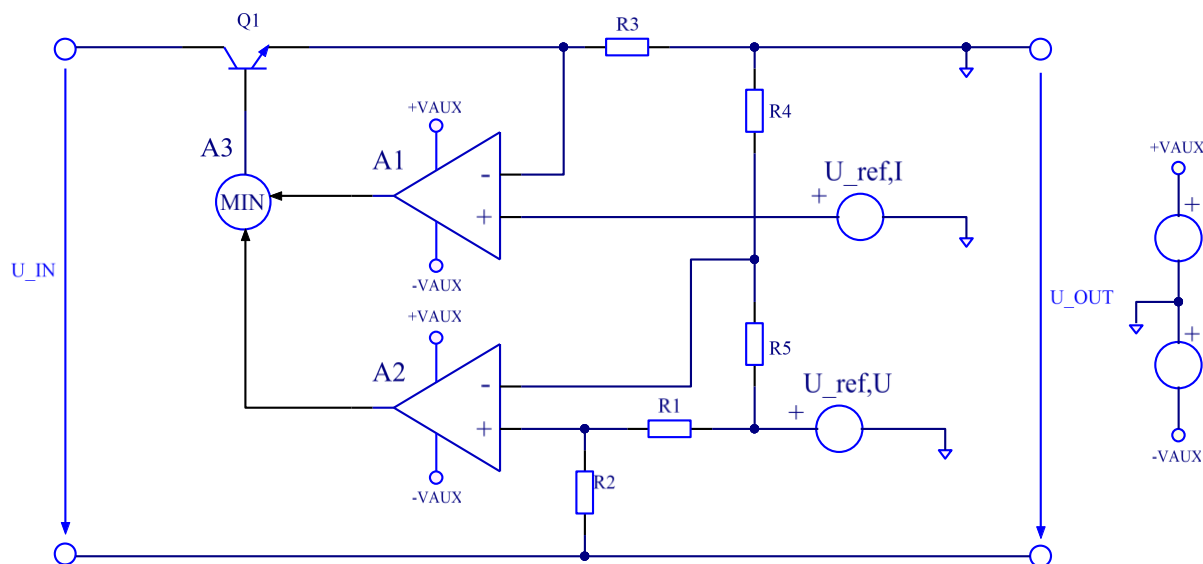
Obr. 1. 8 Lineární stabilizátor s proudovým omezením [5]

Proudová zpětná vazba obsahuje chybový zesilovač A2 a snímací rezistor R3. Proud procházející tímto rezistorem je převáděn na napětí. Toto napětí následně porovnává chybový zesilovač A2 s referenčním napětím  $U_{ref,I}$ . Blok A3 slouží jako porovnávací člen, který vybírá menších z výstupních napětí chybových zesilovačů A1, A2 a tím následně ovládá regulační člen Q1. Pro správné nastavení výstupního proudu lze využít změny rezistorů nebo změny referenčního napětí, stejně jako tomu bylo u napětí. Tento stav označujeme jako režim konstantního proudu.

### 1.4.3 Plovoucí lineární stabilizátor s proudovým omezením

Předchozí varianta lineárního stabilizátoru měla omezení z hlediska výstupního napětí. Toto napětí vycházelo z maximálního výstupního napětí, které nám vytvořil chybový zesilovač. Tento problém je u plovoucího stabilizátoru odstraněn tak, že střed symetrického napájení je připojen na výstupní potenciál zdroje, konkrétně kladný pól zdroje.

Celé zapojení využívá myšlenky, kdy v napěťovém režimu zdroje jsou zásahy do zpětnovazebního řízení pouze minimální. Velké změna zátěže vyžaduje pouze minimální zvýšení výstupního napětí chybového zesilovače. Velikost výstupního napětí je určena odporovým děličem R1, R2 a referenčním zdrojem napětí  $U_{ref,U}$ . V uzlu mezi rezistory R1, R2 je nulové napětí, tedy na obou vstupech operačního zesilovače A2 máme nulové napětí.



Obr. 1. 9 Plovoucí lineární stabilizátor s proudovým omezením [5]

Pro proudové omezení je plovoucí stabilizátor doplněn o snímací rezistor a druhý operační zesilovač A1, který porovnává úbytek na tomto rezistoru s referenčním napětím. Snímací rezistor je u plovoucího stabilizátoru přesunut do kladné větve zdroje.

## 2. Spínané měniče

Spínané měniče všeobecně řadíme mezi moderní elektronické prvky, které jsou v dnešní době součástí většiny elektronických zařízení. Umožňují prakticky bezeztrátový výkon mezi dvěma stejnosměrnými obvody. Rozdělení základních měničů jsem již popsal v kapitole 1.2.1. V této části budou vysvětleny principy pouze některých měničů, které jsou pro laboratorní zdroje stěžejní.

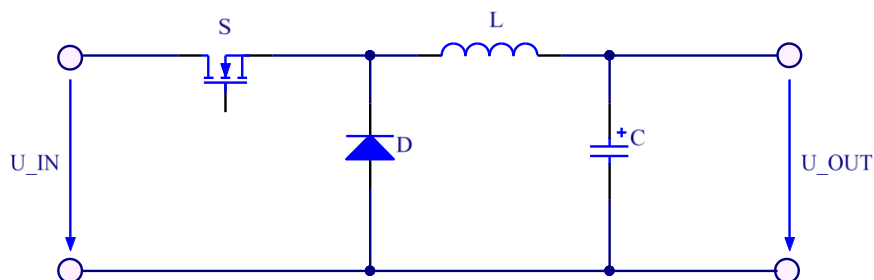
Samotná funkce spínaných měničů je založena na generování vysokofrekvenčního proudu. Tento proud může být následně transformován, usměrněn a nakonec vyhlazen. Existuje velké množství různých topologií, které umožňují napětí snižovat, zvyšovat či plynule regulovat v požadovaném rozsahu [ 5].

Vysoké účinnosti u těchto měničů dosahujeme díky tomu, že jsou prvky zatěžovány pouze pulsně, tedy dochází na nich k malým výkonovým ztrátám. Na druhou stranu je zapotřebí zmínit, že jejich výstupní napětí je značně zvlněné a doprovázené širokopásmovým šumem. Tento nedostatek je u laboratorních zdrojů kompenzován díky poslednímu stupni a tím je lineární regulátor.

### 2.1 Snižující měnič – „Buck“

Jak je již z názvu patrné, jde o měnič, který mění vstupní hodnotu napětí na nižší hodnotu výstupního napětí. Princip činnosti měniče můžeme popsat dvěma režimy. Prvním režimem je okamžik, kdy je spínací prvek sepnut a druhý režim nastává v okamžiku, kdy je spínač rozepnut.

Pokud je tranzistor sepnutý  $t_A$ , je do obvodu připojeno vstupní napájecí napětí a proud do zátěže protéká přes indukčnost  $L$ . V tomto režimu se indukčnost jeví jako spotřebič, kdy na ní vzniká úbytek napětí  $U_L$ . Zároveň dochází k nabíjení kondenzátoru  $C$  a tedy se na něm postupně zvyšuje napětí. Dioda je v tomto režimu v závěrném směru, tedy nepropouští žádný proud. To znamená, že všechny proud prochází přes kondenzátor do samotné zátěže [4].



Obr. 2. 1 Snižující propustný spínaný měnič [4]



V okamžiku, kdy je tranzistor rozpojený  $t_B$ , dojde k odpojení vstupního napětí. Cívka se v tomto režimu začne chovat jako zdroj a snaží se zároveň udržet směr a velikost proudu, tím také dojde k obrácení polaritě napětí na cívce. V této fázi je do zátěže dodávána energie, která byla v předchozím intervalu akumulována cívkou. Dioda je v tomto režimu v propustném směru a kondenzátor se začne postupně vybíjet a tedy i klesá výstupní napětí měniče. Názorné zapojení tohoto typu měniče je vidět na Obr. 2. 1.

Pro určení přenosové funkce snižujícího měniče můžeme pro bezztrátový ideální měnič, zavést pro nepřerušovaný režim rovnost energií  $WL(t_A) = WL(t_B)$ , ze kterých odvodíme následující vztahy:

$$i_L(t_A) = \frac{1}{L} \int_0^{t_A} U_L dt = \frac{1}{L} \int_0^{t_A} (U_{IN} - U_{OUT}) dt \quad (2.1)$$

$$i_L(t_B) = \frac{1}{L} \int_0^{t_B} U_L dt = \frac{1}{L} \int_0^{t_B} U_{OUT} dt \quad (2.2)$$

$$\frac{1}{L} \cdot U_{IN} \cdot t_A - \frac{1}{L} \cdot U_{OUT} \cdot t_A = \frac{1}{L} \cdot U_{OUT} \cdot t_B \quad (2.3)$$

$$U_{IN} \cdot t_A = U_{OUT} \cdot (t_B + t_A) \quad / \quad t_B + t_A = T \quad (2.4)$$

$$U_{IN} \cdot t_A = U_{OUT} \cdot T \quad (2.5)$$

$$U_{OUT} = U_{IN} \cdot \frac{t_A}{T} \quad (2.6)$$

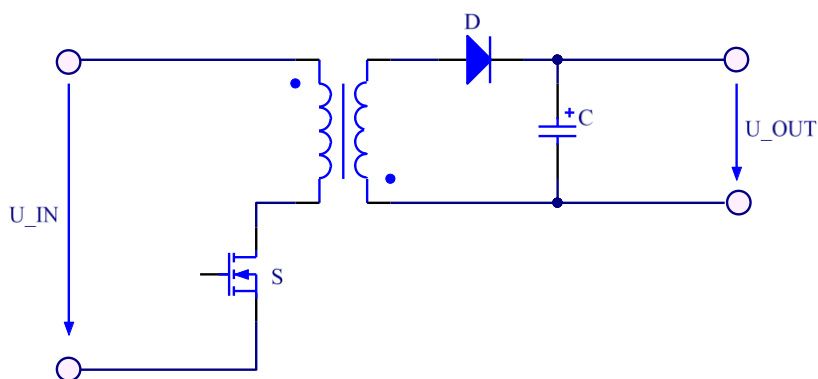
$$M = D \quad (2.7)$$

Pracovní cyklus nebo tzv. duty cycle je označován v rovnicích písmenem D. Jedná se vlastně o poměr  $t_A$  a celkové periody cyklu T. Mluvíme ve skutečnosti o střídě, která může nabývat hodnot od 0 do 1. V okamžiku, kdy bude střída nulová, zdroj nepracuje a výstupní napětí je nulové. Písmeno M ve výše uvedené rovnici označuje jako přenosovou funkci, která je dána poměrem výstupního napětí  $U_{OUT}$  a vstupního napětí  $U_{IN}$ .

## 2.2 Blokující jednočinný měnič – „Flyback“

Řadíme ho do rodiny blokujících měničů se spínaným primárním vinutím, jehož výstup je od vstupu galvanicky oddělen. Výkon u tohoto měniče neprochází přímo ze vstupu na výstup, proto i označení blokující měnič. Využívá se pro velkou část elektroniky s nízkou spotřebou energie, přibližně do 150W. Pro větší výkony je lepší využít dvojčinného zapojení. Flybacku využívají nabíječky mobilů, televize, osobní počítače a jiná spotřební elektronika.

V první fázi, kdy je tranzistor sepnutý, je napětí primárního vinutí transformátoru rovno vstupnímu napětí  $U_{IN}$ , což se projeví lineárním růstem proudu primárního vinutí. Zároveň je v tomto intervalu magnetickým obvodem akumulována určitá energie, předaná z napájecího zdroje přes aktivní spínač S. Během této fáze je proud sekundárním vinutím roven nule, protože je blokován diodou. Transformátor nepřenáší žádný stejnosměrný proud [8].



Obr. 2. 2 Blokující jednočinný měnič typu Flyback [4]

V okamžiku, kdy vypnu tranzistor, přestane protékat proud primárním vinutím a veškerá energie akumulovaná magnetickým obvodem v první fázi se dostane do sekundárního obvodu. Tato energie prochází přes propustně polarizovanou diodu, výstupní kondenzátor až do zátěže. Principiální schéma zapojení Flyback měniče je vidět na uvedeném Obr. 2. 2.

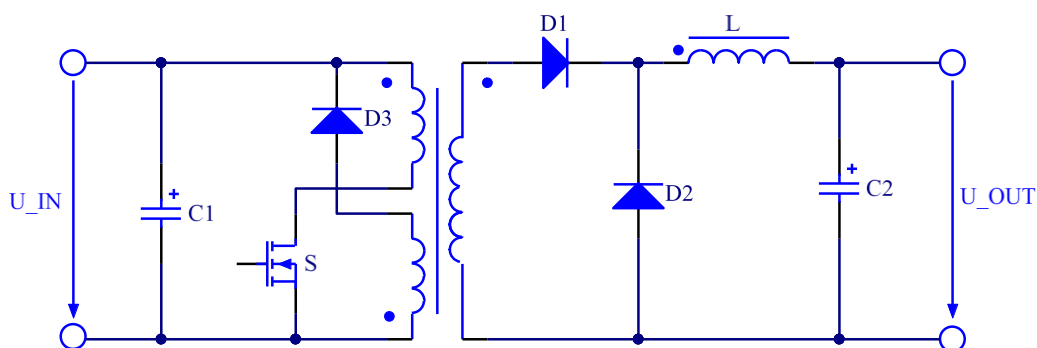
Transformátor není klasický transformátor, ale jde vlastně o akumulaci tlumivku s primárním a sekundárním vinutím. Pro dosažení co nejmenší rozptylové indukčnosti je vhodné mít co nejtěsnější vzájemnou vazbu mezi primárním a sekundárním vinutím a její velikost je také závislá na geometrickém uspořádání vinutí.

Tento typ měniče je vhodný spíše pro vysokonapěťové zdroje, protože nevyžaduje tak velký převodový poměr transformátoru jako propustný měnič. Další výhodou této koncepce je snadná realizace velkého výstupního napětí z malého vstupního napětí. Flyback je použitelný pouze pro malé výkony a sycení jádra transformátoru je přímo úměrné odebíranému proudu.

## 2.3 Propustný jednočinný měnič – „Forward“

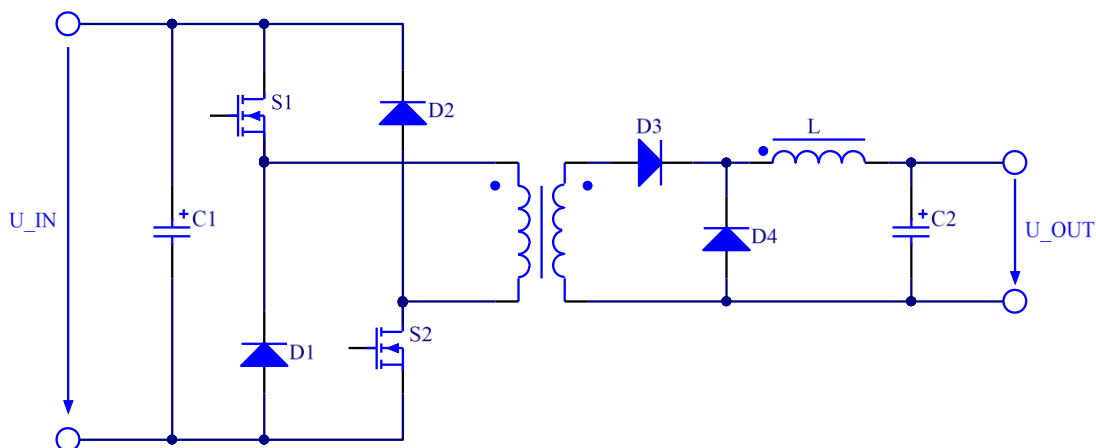
Propustný jednočinný měnič je velmi podobný svojí topologií snižujícímu měniči, který jsem popsal v kapitole 2.1. Do obvodu je mezi spínač a diodu zařazen navíc impulzní transformátor. V tomto případě transformátor neakumuluje do sebe žádnou energii, jako tomu bylo u měniče Flyback. Výhodou této topologie je možnost zatížit měnič podstatně větším výkonem ve srovnání s blokujícím měničem. Může být využit pro výkony až do 500W.

Při sepnutém spínači teče proud před indukčností  $L$  ze vstupního do výstupního obvodu. Po jeho rozepnutí je zátěž napájena energií akumulovanou indukčností  $L$  přes nyní propustně polarizovanou diodu  $D2$ . Primární i sekundární vinutí jsou stejně orientovány, tedy magnetický tok by měl projít v ideálním případě pouze mezi nimi [9].



Obr. 2. 3 Propustný jednočinný měnič [9]

Existují i jiné zapojení propustných jednočinných měničů. Jedna z možností obsahuje dva spínače, které jsou ovládány ve stejný okamžik. Během doby, kdy jsou oba tranzistory sepnuty se napětí na primárním vinutí rovná vstupnímu napětí. Po jejich rozepnutí se transformátor demagnetizuje pomocí diod  $D1$  a  $D2$ . V porovnání s jedním tranzistorem musí tento měnič blokovat pouze vstupní napětí a demagnetizační vinutí není potřeba. Propustný jednočinný měnič se dvěma spínači je přehledně zobrazen na Obr. 2. 4.



Obr. 2. 4 Propustný jednočinný měnič se dvěma spínači [9]

### 3. Návrh vzorku spínaného zdroje

V této kapitole bude podrobně popsána realizace samotného vzorku laboratorního zdroje. Nejprve zde budou popsány základní požadavky na laboratorní zdroj, které by měli být stanoveny u každého zařízení před samotnou realizací. Následně vysvětlím blokové schéma celého zdroje, kde popíšu jednotlivé základní části, ze kterých je zdroj zhotoven.

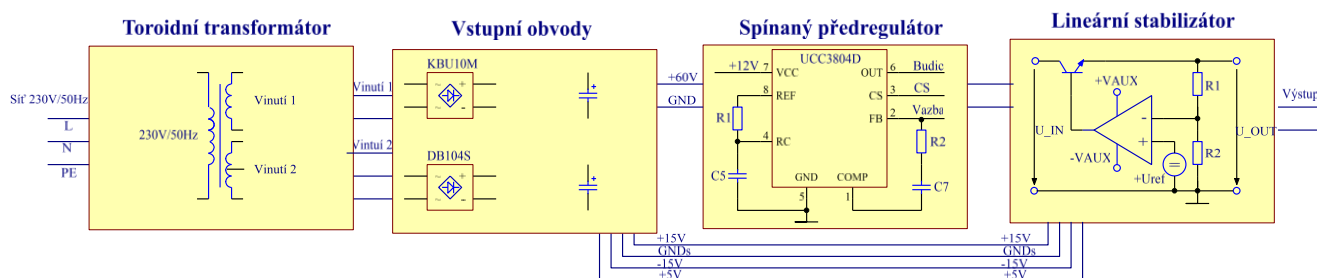
#### 3.1 Požadavky na laboratorní zdroj

Před samotným popisem laboratorního zdroje je nejprve nezbytné stanovit konkrétní požadavky, které budou na přístroj kladeny. Je nutné určit, v jakém prostředí bude zdroj provozován, tedy jaké okolní vlivy mohou ovlivnit jeho správnou funkci. V našem případě jde o zdroj středního výkonu, který bude využíván pro osobní účely v oblasti testování nejrůznějších elektronických obvodů.

1. **Výstupní rozsah** – od laboratorního zdroje požadujeme, aby výstupní napětí bylo regulovatelné v rozsahu 0 – 50V. Proud bude možné nastavit v rozsahu 0 – 5A. Takto navržený zdroj umožňuje napájení obvodů již od jednotek voltů až po testování výkonových obvodů.
2. **Malé zvlnění a šum** – laboratorní zdroj by měl mít na výstupních svorkách co nejmenší možné zvlnění a šumové napětí tak, aby nerušil okolní zařízení.
3. **Chování v mezních situacích** – je zapotřebí také definovat jak se bude zdroj chovat při krajních situacích. Požadujeme, aby měl ochranu proti tvrdému zkratu na výstupních svorkách.
4. **Měření výstupních parametrů** – je velmi vhodné zobrazovat na čelním panelu zdroje skutečné změřené hodnoty napětí a proudu na výstupu.
5. **Komfortní ovládání** – laboratorní zdroj bude možné ovládat pomocí prvků umístěných na čelním panelu. Zdroj by také měl být vybaven displejem, na kterém je možné zobrazit veškeré skutečné změřené hodnoty napětí a proudu na výstupu.

## 3.2 Blokové schéma zdroje

Laboratorní zdroj se skládá celkem ze čtyř částí, které jsou spolu úzce propojeny. Prvním blokem je toroidní transformátor, který má dvě sekundární vinutí. Druhou částí zdroje jsou vstupní obvody, které obsahují usměrňovače, filtrační kondenzátory a stabilizátory. Následujícím blokem v pořadí a zároveň nejdůležitější částí celého zdroje je spínaný předregulátor, který snižuje vstupní hodnotu napětí. Poslední částí laboratorního zdroje je lineární regulátor, který zajišťuje proudovou a napěťovou regulaci.



Obr. 3. 1 Blokové schéma laboratorního zdroje

## 3.3 Spínaný předregulátor

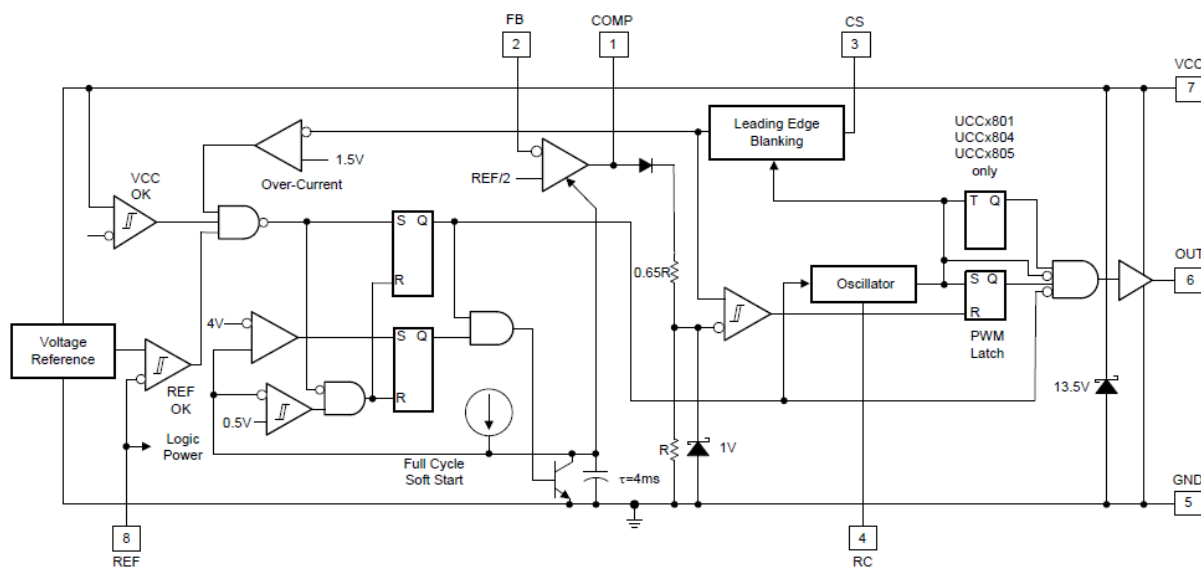
Pro návrh jsem využil obvodu od firmy Texas Instruments s označením UCC3804D. Řídicí čip je zapojen jako step-down měnič, který snižuje vstupní stejnosměrné napětí 60V na hodnotu 55V. Řadíme ho do rodiny obvodů, které vynikají vysokou rychlostí a nízkým odběrem. Všechny tyto obvody jsou snadno říditelné a ovladatelné. Nabízejí i další pokročilé funkce jako je ovládání pomocí interního soft startu. Využívají se pro nejrůznější aplikace v oblasti spínaných zdrojů, DC/DC měničů či bateriových zdrojů. Během návrhu jsem vycházel ze zapojení uvedeného v aplikačním listu řídicího čipu UCC3804 [11].

### 3.3.1 Funkční blokové schéma čipu

V následující části bude popsáno funkční blokové schéma řídicího čipu zobrazené na níže uvedeném Obr. 3. 2. Popíšu zde jednotlivé vstupní a výstupní piny a jejich hlavní funkce.

**COMP** Výstup chybového zesilovače a vstup PWM komparátoru. Chybový zesilovač má nízkou výstupní impedanci. Chybový zesilovač má vnitřní proudové omezení a pro dosažení nulového pracovního cyklu se doporučuje připojit COMP přímo na GND.

- FB** Invertující vstup chybového zesilovače.
- CS** Vstup do proudově závislých komparátorů. Tento čip má dva rozdílné komparátory: PWM a proudový komparátor. Obsahuje také digitální filtr.
- RC** Vstup do RC oscilátoru. Pro správné nastavení pevné pracovní frekvence je nutné připojit kondenzátor mezi vstup a GND a rezistor mezi piny REF a RC. Hodnota rezistoru se volí v rozmezí 10 – 200 k $\Omega$  a kondenzátor 100 – 1000 pF.



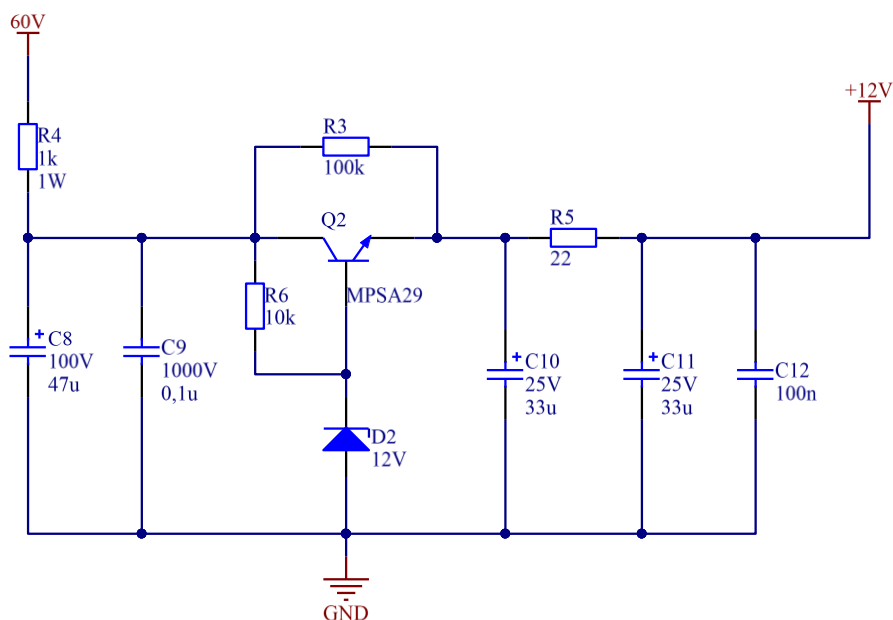
Obr. 3. 2 Funkční blokové schéma čipu UCC3804D, převzato z [10]

- GND** Referenční a napájecí zem pro všechny jeho funkce.
- OUT** Výstup čipu, který je schopen ovládat výkonový MOSFET tranzistor se špičkový proudem vyšším než 750mA. Skládá se z FET výstupních zařízení, které přepínají všechny cesty vedoucí k GND či všechny cesty k VCC. Výstupní stupeň má velmi nízkou impedanci.
- VCC** Napájecí pin čipu. Proud tekoucí do vstupu může být omezen pomocí rezistoru. Celkový proud je dán součtem vstupního klidového proudu a průměrného výstupního proudu. Je vhodné také zařadit poblíž napájecího pinu keramický kondenzátor.
- REF** Referenční napětí pro chybový zesilovač a také pro mnoho dalších funkcí čipu.

### 3.3.2 Napájení řídicího čipu

U spínaného předregulátoru bylo také nezbytné vyřešit samotné napájení řídicího čipu. Snižující měnič pracuje poměrně s vysokým napětím, v našem případě jde konkrétně o hodnotu 60V. Řídicí čip bohužel nemůže být napájen z takto vysokého potenciálu, proto je nutné tuto hodnotu nějakým způsobem snížit.

První variantou, jak tento problém vyřešit, je možnost zařadit do cesty rezistor, na kterém bude vznikat potřebný úbytek napětí. Jde o nejjednodušší variantu, kterou také popisuje výrobce čipu ve svém katalogovém listu [10]. Tato možnost není pro přesné nastavení vstupního napětí příliš vhodná. První nevýhodou je skutečnost, že na rezistoru bude docházet k velkým ztrátám. Další nevýhodou zapojení je nemožnost regulace vstupního napětí, tak jak řídicí čip požaduje.

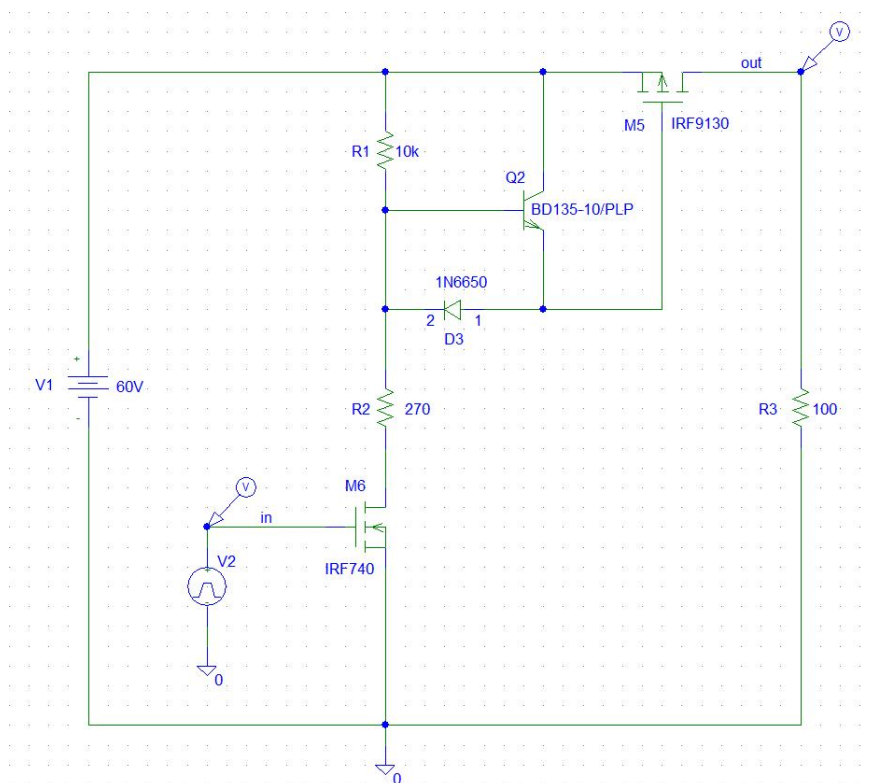


Obr. 3. 3 Schéma zapojení sériového stabilizátoru

Další variantou je zmíněný rezistor nahradit sériovým stabilizátorem. Z katalogového listu řídicího čipu [10] je možné získat hodnoty napětí, při kterých dojde k zapnutí a vypnutí čipu. Pro zapnutí čipu je nutné na vstupní pin č. 7 přivést hodnotu napětí 12,5V. Po jeho naběhnutí, je nutné tuto hodnotu snížit na tzv. provozní hodnotu, která je uváděna 12V. K vypnutí čipu dojde v okamžiku, kdy vstupní napětí klesne pod hodnotu 8,3V. Na výše uvedeném Obr. 3. 3 je vidět celé zapojení sériového stabilizátoru. V prvním okamžiku proud prochází přes rezistory R3 a R4. V tento moment je tranzistor Q2 prozatím uzavřen a po jeho otevření dojde zároveň k překlenutí rezistoru R3. Rezistor R5 zajišťuje pouze doplňkovou ochranu řídicího čipu.

### 3.3.3 Budicí stupeň

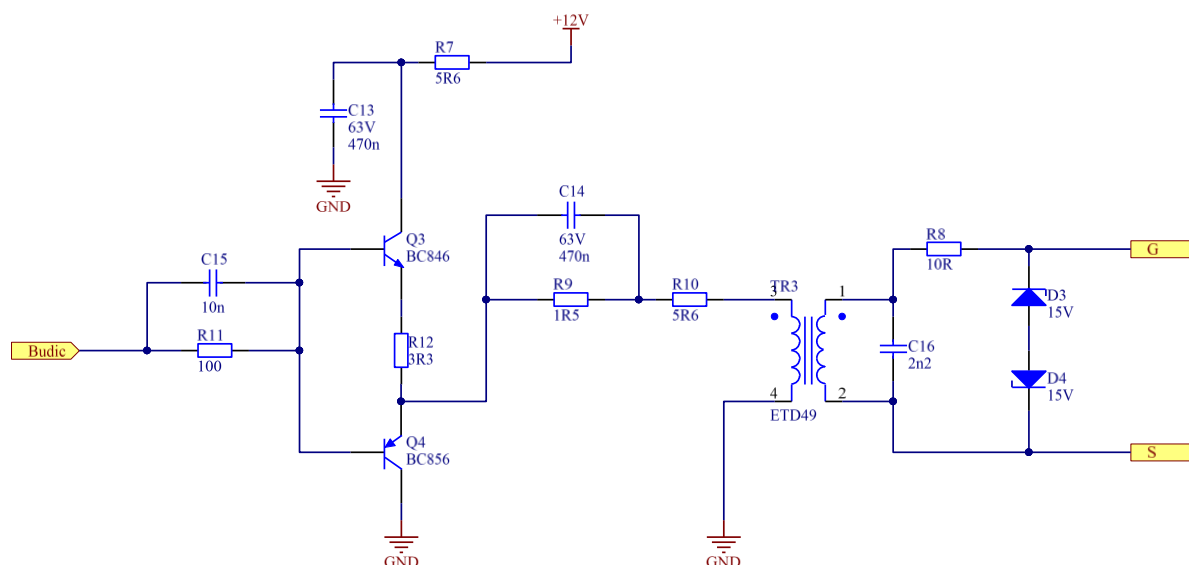
Podle původního záměru mělo být využito pouze jednoduchého zapojení budicího stupně, který je zobrazen níže na uvedeném Obr. 3. 4. Budicí stupeň byl otestován jednak v programu PSpice a zároveň jsem ho podrobil zkoumáním během testování spínaného předregulátoru. Na tranzistor M6 jsem v simulaci připojil zdroj VPULSE, který generoval signál podobný pulzům vycházející z výstupu řídicího čipu (pin č. 6). Tato varianta budicího stupně byla později zamítnuta, protože neumožňovala spínat námi požadovanou frekvenci.



Obr. 3. 4 Původní schéma zapojení budicího stupně simulované v programu PSpice

Navrhl jsem tedy novou variantu budiče, která je zobrazena níže na Obr. 3. 5. V levé části schématu je vstup označený jako Budič, který je propojen s výstupem řídicího čipu (pin č. 6). V pravé části je vidět impulzní transformátor, jehož sekundární vinutí budí výkonový tranzistor. Původní zapojení budiče nám umožňovalo spínat pouze P-MOS tranzistor, což bylo do jisté míry nevýhodné. Toto zapojení umožňuje ovládat oba dva typy unipolárních tranzistorů. Záleží pouze na zapojení vinutí impulzního transformátoru. Níže uvedené zapojení bude využito pro buzení N-MOS tranzistoru, se kterým dosahuje mnohem lepších parametrů než u P-MOS tranzistoru.





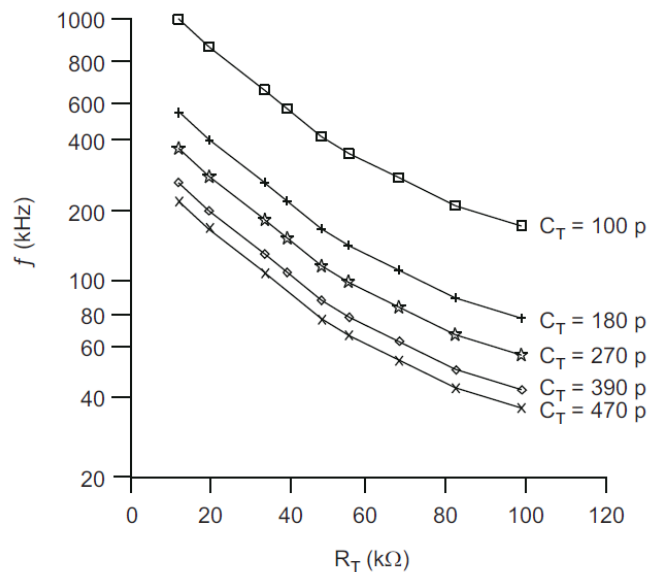
Obr. 3. 5 Nové schéma zapojení budicího stupně

### 3.3.4 Výpočet parametrů oscilátoru

Řídicí čip UCC3804D obsahuje oscilátor, který generuje pilový průběh. Doba náběhu mi udává časovou konstantou součástek  $R_T$  a  $C_T$ . Doba doběhu je naopak nastavena pomocí kapacity  $C_T$  a interního tranzistoru. Pro správnou činnost spínaného předregulátoru je nezbytné nastavit správnou frekvenci oscilátoru. Frekvence oscilátoru mi určuje pracovní frekvenci měniče.

Závislost frekvence oscilátoru na rezistoru  $R_T$  pro různé hodnoty kapacity  $C_T$  je zobrazena níže na Obr. 3. 6. Časovací rezistor  $R_T$  se doporučuje volit v rozsahu 10 – 200 k $\Omega$  a kondenzátor  $C_T$  v rozmezí 100 – 1000 pF. Po zvážení všech možností, jsem se rozhodl pro frekvenci oscilátoru 100 kHz. Je zapotřebí také podotknout, že řídicí čip obsahuje děličku kmitočtu, tedy na výstupu čipu dostaneme frekvenci přibližně rovnou hodnotě 50 kHz. Zvolil jsem rezistor  $R_T$  hodnoty 22 k $\Omega$  a kondenzátor  $C_T$  přibližně 820 pF.

Je také potřeba zmínit skutečnost, že volba frekvence oscilátoru ovlivňuje další parametry spínaného předregulátoru. Tedy především velikost frekvence je do jisté míry kompromisem mezi velikostí ztrát na indukčnosti a Schottkyho diodě.



Obr. 3. 6 Závislost frekvence oscilátoru na rezistoru  $R_T$  pro různé kapacity  $C_T$ , převzato z [10]

### 3.3.5 Výpočet výstupního filtru

Požadované hodnoty:  $f = 50 \text{ kHz}$ ,  $U_{POŽ} = 60 \text{ V}$ ,  $U_{IN} = 60 \text{ V}$ ,  $U_{SAT} = 0,8 \text{ V}$ ,  $U_D = 0,7 \text{ V}$ ,  $I_{OUT} = 5 \text{ A}$ .

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50 \cdot 10^3} = 20 \mu\text{s} \quad (4.1)$$

$$I_{PK} = I_{OUT} + \Delta i_L = 5 + 0,25 = 5,25 \text{ A} \quad (4.2)$$

$$\frac{t_{ON}}{t_{OFF}} = \frac{U_{OUT} + U_D}{U_{IN} - U_{SAT} - U_{OUT}} = \frac{25 + 0,7}{60 - 0,8 - 25} = 0,75 \quad (4.3)$$

$$t_{ON} = 0,75 * t_{OFF}, t_{OFF} = 11,5 \mu\text{s}, t_{ON} = 8,5 \mu\text{s} \quad (4.4)$$

$$L = \left( \frac{U_{POŽ} + U_D}{I_{PK}} \right) * t_{OFF} = \left( \frac{60 + 0,7}{5,25} \right) * 11,5 * 10^{-6} = 132,96 \mu\text{H} \quad (4.5)$$

$$C_{OUT} \geq \frac{I_{PK} * (t_{ON} + t_{OFF})}{8 * U_{RIPPLE}} = \frac{5,25 * (8,5 + 11,5) * 10^{-6}}{8 * 0,02} = 656,25 \mu\text{F} \quad (4.6)$$

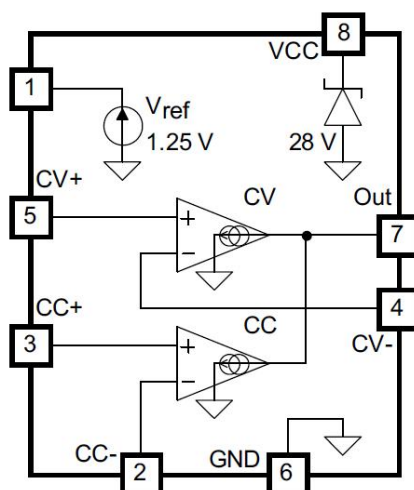
### 3.4 Lineární stabilizátor

Vzhledem k velkému výstupnímu napěťovému rozsahu 0 – 50V je nezbytné využít lineárního stabilizátoru jako výstupního bloku zdroje. Takto velký napěťový rozsah neumožňuje využít klasického zapojení stabilizátoru, které jsem popsal v kapitole 1.4.1. V následující kapitole vysvětlím různé možnosti řešení lineárního stupně. Popíšu zde také jejich přednosti a nedostatky a následně vyberu nejvhodnější variantu.

#### 3.4.1 Možnosti zapojení

Lineární stupeň lze zkonstruovat jako plovoucí stabilizátor 1.4.3 nebo jako stabilizátor s proudovým omezením 1.4.2. Po zvážení všech možných variant jsem se nakonec přiklonil ke stabilizátoru s proudovým omezením. Stabilizátor je možné sestavit buď přímo z diskretních součástek, tedy využít kvalitních operačních zesilovačů nebo využít speciálního čipu, který je pro tento způsob regulace určený.

První možností je pro návrh využít čipu, jehož součástí jsou některé součástky nezbytné pro návrh lineárního stabilizátoru. Prostudoval jsem tedy několik možných zapojení těchto čipů a nakonec jsem vybral model TSM1012. Tento čip obsahuje zdroj referenčního napětí a dva operační zesilovače, kdy jeden slouží pro regulaci napětí a druhý je pro řízení proudu. Tyto dva operační zesilovače musí být doplněny o přídatné rezistory, které mi určují samotnou limitaci proudové a napěťové vazby [12]. Vnitřní zapojení tohoto čipu je možné vidět na Obr. 3. 7.



Obr. 3. 7 Vnitřní zapojení řídicího čipu TSM1012, převzato z [12]

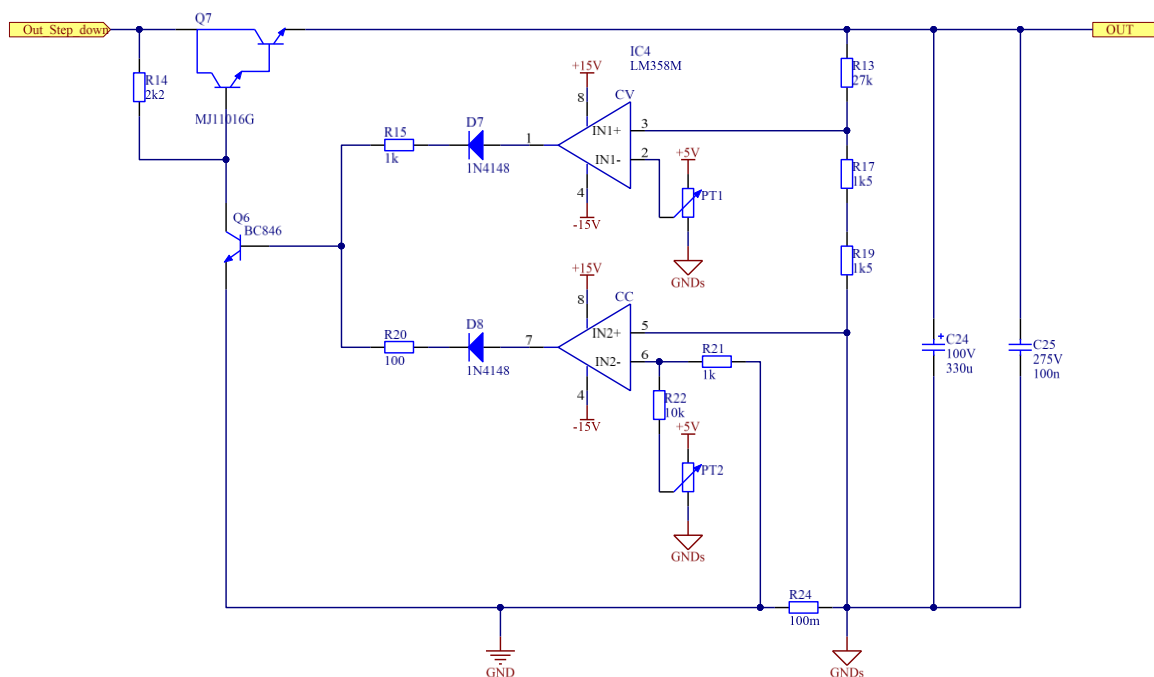
Další variantou je lineární stabilizátor postavit z kvalitních operačních zesilovačů. Předchozí možnost měla určitá omezení, tedy musel jsem vycházet z již navrženého vnitřního zapojení a tím pádem jsem nemohl některé věci nijak ovlivnit. Z tohoto důvodu jsem se nakonec rozhodl lineární stupeň sestavit ze dvou operačních zesilovačů.

### 3.4.2 Konkrétní zapojení

V této části popíšu konkrétní zapojení lineárního stabilizátoru, které budu využívat laboratorní zdroj. Jak jsem již popsal v předchozí kapitole 3.4.1 bude využito dvou operačních zesilovačů typu LM358 [13]. Fyzické zapojené lineárního stupně je na Obr. 3. 8.

První operační zesilovač CV zajišťuje napěťovou regulaci, kde výstupní napětí je snímáno pomocí napěťového děliče sestaveného z rezistorů R13, R17 a R19. Jeho úkolem je porovnávat napětí na tomto děliči s referenčním napětím. Zesílení napěťového stupně je 10. Zdroj referenčního napětí je regulovatelný v rozsahu 0 – 5V, tedy dostaneme na výstupu napětí v rozmezí 0 – 50V. Pro samotnou regulaci je využit potenciometr, jehož jezdec je připojen na vstup operačního zesilovače, na kterém tak vytváří napětí v rozmezí 0 – 5V.

Proudová regulace pracuje na podobném principu jako napěťová. V tom případě se o správné nastavení proudu stará operační zesilovač CC. Tento stupeň je kromě rezistorů R21, R22 také doplněn o rezistor R24, který mi snímá procházející proud. Tento proud je následně převeden na velikost napětí. Operační zesilovač CC tedy srovnává napětí na svém vstupu s referenčním napětím. Referenční zdroj je opět regulovatelný v rozmezí 0 – 5V, což nám ve výsledku vytvoří výstupní proud 0 – 5A. Stejně jako v předchozím případě je pro regulaci proudu využit potenciometr.



Obr. 3. 8 Schéma zapojení lineárního stabilizátoru

Tranzistor Q6 pracuje vlastně jako rozdílový člen, tedy porovnává výstupní napětí z operačních zesilovačů CV a CC. Tím přivře nebo více otevře výkonový tranzistor MJ11016G [14] na jehož výstupu dostanu požadovanou velikost napětí a proudu.

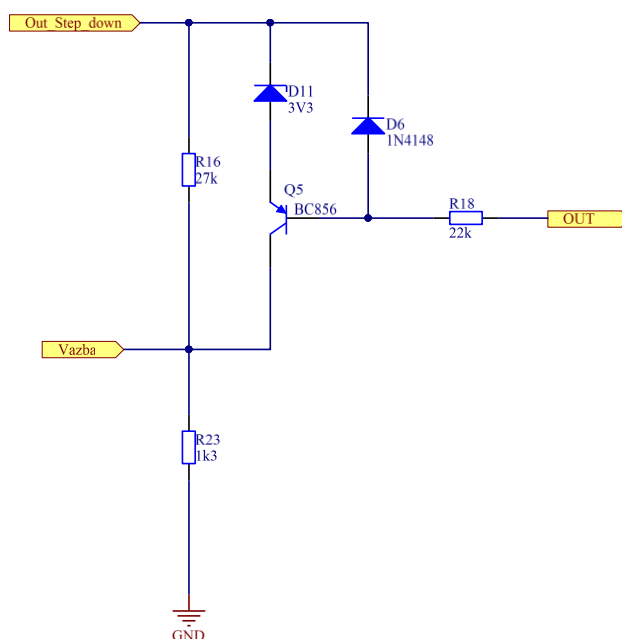
### 3.4.3 Zpětná vazba

Další důležitou částí laboratorního zdroje je zavedení zpětné vazby mezi spínaným předregulátorem a lineárním stabilizátorem. Aktuálně nastavená hodnota výstupního napětí lineárního regulátoru bude předávána do zpětné vazby spínaného předregulátoru. Existují dvě možnosti jak celou situaci správně vyřešit.

První variantou je mezi oba stupně zařadit sumační zesilovač. Tato možnost není vůbec špatná, ale na druhou stranu je zapotřebí podotknout, že to s sebou nese určité problémy. V tomto případě by bylo nutné řešit posuv přes součtový zesilovač a pak celý výsledek ještě invertovat.

Druhou možností je pro zpětnou vazbu mezi koncovým lineárním regulátorem a předregulátorem použít pouze jednodušší řešení s tranzistorem a Zenerovou diodou. Nebude zde nutné programově řešit posuv předregulátoru oproti výstupnímu stabilizátoru, jako tomu bylo v předchozí variantě. Po zvážení všech možností jsem se nakonec přiklonil právě k této možnosti.

Tato varianta je zobrazena na níže uvedeném Obr. 3. 9. V levé části jsou vidět zpětnovazební rezistory spínaného předregulátoru, do kterých je zavedena zpětná vazba z výstupu lineárního regulátoru a to pomocí PNP tranzistoru a Zenerovy diody 3V9. Spínaný předregulátor tedy pracuje s určitým napěťovým posuvem oproti lineárnímu stupni. Je tedy velmi důležité, aby oba stupně pracovaly v závěsu a jejich rozdíl napětí byl v každém bodě roven maximálně hodnotě 3,9V. Takto popsané charakteristiky je možné vidět v kapitole 4.1. Dioda D6 slouží pouze jako přídavná ochrana tranzistoru.



Obr. 3. 9 Zpětná vazba mezi lineárním regulátorem a předregulátorem

## 3.5 Napájení zdroje

### 3.5.1 Transformátor

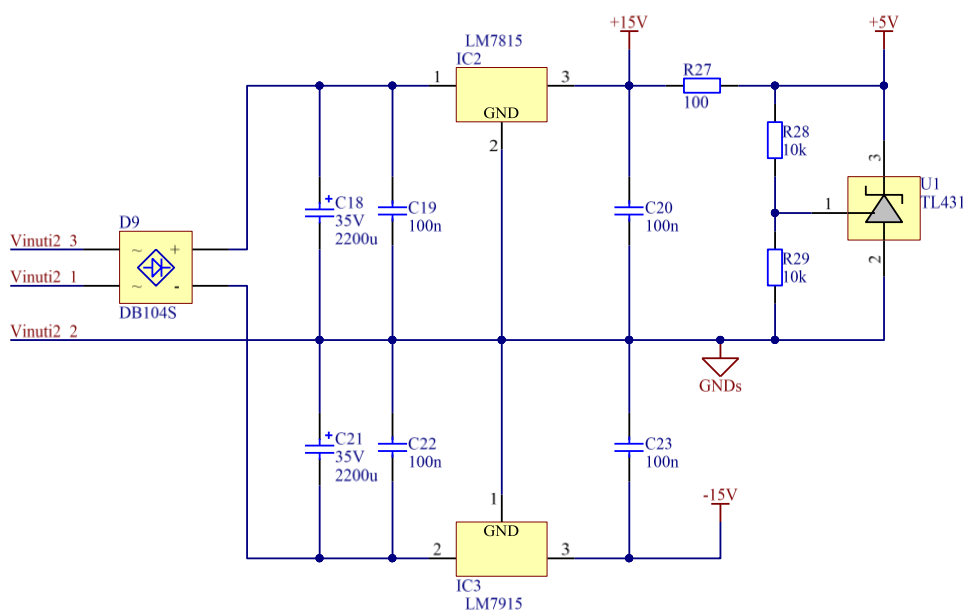
Celé zapojení laboratorního zdroje bude napájeno z toroidního transformátoru. Primární vinutí bude napájeno napětím z rozvodné sítě 230V/50Hz. Obsahuje dvě sekundární vinutí s izolovanými zeměmi. Transformátor si nechám navinout od externí firmy, která ho připraví dle mých zadaných požadavků.

První sekundární vinutí bude sloužit pro napájení spínaného předregulátoru, kde potřebujeme střídavé napětí rovné hodnotě 50V. Je nutné také toto vinutí dostatečně výkonově přizpůsobit, kdy počítáme, že zdrojem může trvale protékat proud až 5A.

Druhé sekundární vinutí bude výhradně sloužit pro napájení operačního zesilovače lineárního stupně. Toto vinutí bude připravené s vyvedeným středem, tak abych mohl vytvořit na výstupu symetrické napájení pro operační zesilovač. Tedy není potřeba, aby vinutí bylo přizpůsobené vysokému výkonu.

### 3.5.2 Vstupní obvody

První sekundární napětí transformátoru je usměrněno pomocí jednofázového usměrňovacího můstku KBU10M [15]. Tento typ usměrňovače je dostatečně dimenzovaný na protékající proud. Tímto typem usměrňovače může trvale protékat proud až 10A a impulzně až 250A. Následuje filtrační kondenzátor, jehož kapacitu jsem zvolil 1000 uF/100V. V tomto případě není potřeba řešit velikost výstupního zvlnění, protože spínaný předregulátor nepotřebuje natolik vyhlazené napětí.



Obr. 3. 10 Schéma zapojení symetrického napájení pro operační zesilovač

Druhé vinutí je tedy navrženo s vyvedeným středem. Celé zapojení této části je vidět na výše uvedeném Obr. 3.10. Součástí zapojení je SMD usměrňovací můstek, kterým může trvale protékat proud až 1A. Takto usměrněné napětí je následně vyhlazeno pomocí filtračního kondenzátoru 2200uF/35V. Následně je toto napětí stabilizováno pomocí stabilizátorů LM7815 [16] a LM7915 [17]. Pro regulaci napětí a proudu je ještě nezbytné vytvořit pomocné napětí 5V. Tuto problematiku jsem vyřešil použitím čipu TL431 [18], který slouží pro vytvoření referenčního napětí.

### 3.6 Zobrazení naměřených hodnot

U laboratorního zdroje je také důležité naměřené hodnoty nějakým způsobem zobrazit. Při samotném testování parametrů zdroje jsem narazil na několik problémů, které mi sebraly poměrně dost času. Nezbylo mi tedy dostatek času, abych se mohl naplno věnovat problematice jak zjištěné hodnoty zobrazit. Každopádně jsem navrhl dvě varianty, jak by bylo možné hodnoty zobrazit.

První ovšem komplikovanější variantou je využít pro zobrazení čipu a přídavného displeje. Pro snímání proudu je nutné ke snímacímu rezistoru také zařadit diferenční zesilovač. Na jeho výstupu budu dostávat analogové napětí, které následně přivedu na vstup A/D převodníku čipu. Tímto způsobem jsem schopen zjistit velikost protékajícího proudu. Pro zjištění velikost napětí použijeme hodnotu z výstupního odporového děliče, kterou patřičně zesílíme. Celé řízení může zajišťovat čip například od firmy ATmega.

Druhou variantou je využít displeje, který je pro tyto účely již navržen. Jeho součástí je přídavný bočník, který nám do měření zanáší určitou chybu. Nakonec jsem se přiklonil právě k této jednodušší variantě. Počítám, že do budoucna do zdroje dodělám i možnost zobrazení hodnot pomocí první výše popsané varianty.

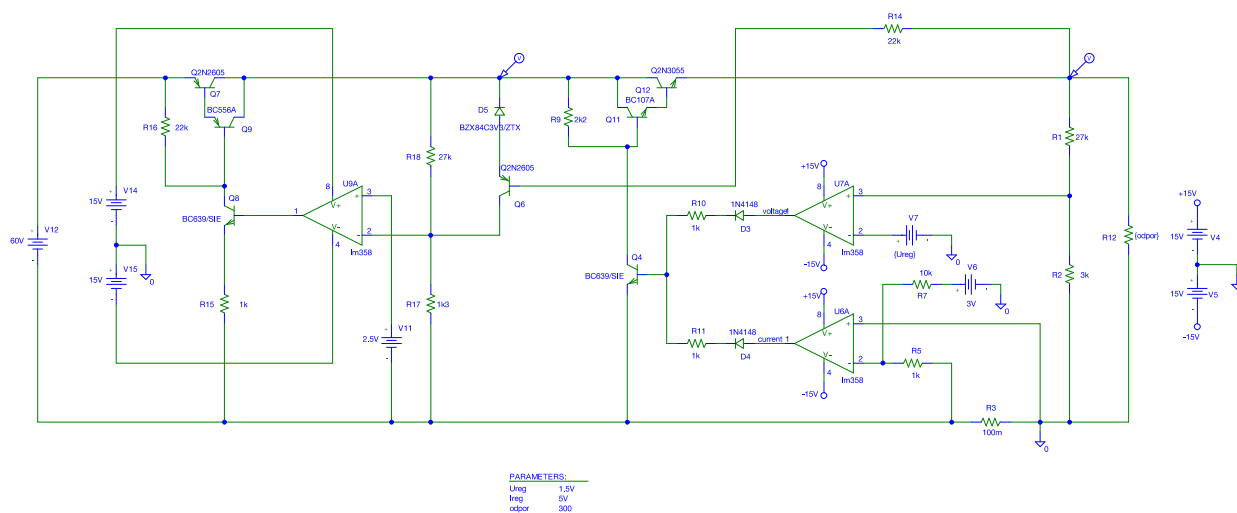
## 4. Testování parametrů zdroje

V této kapitole bude popsáno samotné testování laboratorního zdroje. V první části budou zde zobrazeny simulované části zdroje. V další části představím realizované prototypy, na kterých docházelo ke zkoušení jednotlivých částí zdroje. V poslední části této kapitoly zobrazím nejdůležitější naměřené charakteristiky zdroje.

### 4.1 Simulace

Před samotným testováním bylo nezbytné celé zapojení laboratorního zdroje vyzkoušet také simulačně. Nejdůležitější bylo ověřit chování předregulátoru, lineárního stupně a jejich následného spojení pomocí zpětné vazby, kterou jsem popsal v kapitole 3.4.3.

První stupeň, tedy snižující měnič, je dosti problematické tímto způsobem otestovat. Zkoušel jsem tento měnič simulovat v novější verzi PSpice 16.6, ale nejsem si zcela jistý, že simulace dává věrohodné výsledky. Z tohoto důvodu nebudu tyto výsledky zde prezentovat. Nakonec jsem tedy přistoupil k nahrazení impulzního stupně stupněm lineárním. U lineárního stabilizátoru nenastává žádný problém se simulací. Celé zapojení simulované části je vidět na níže uvedeném Obr. 4. 1.

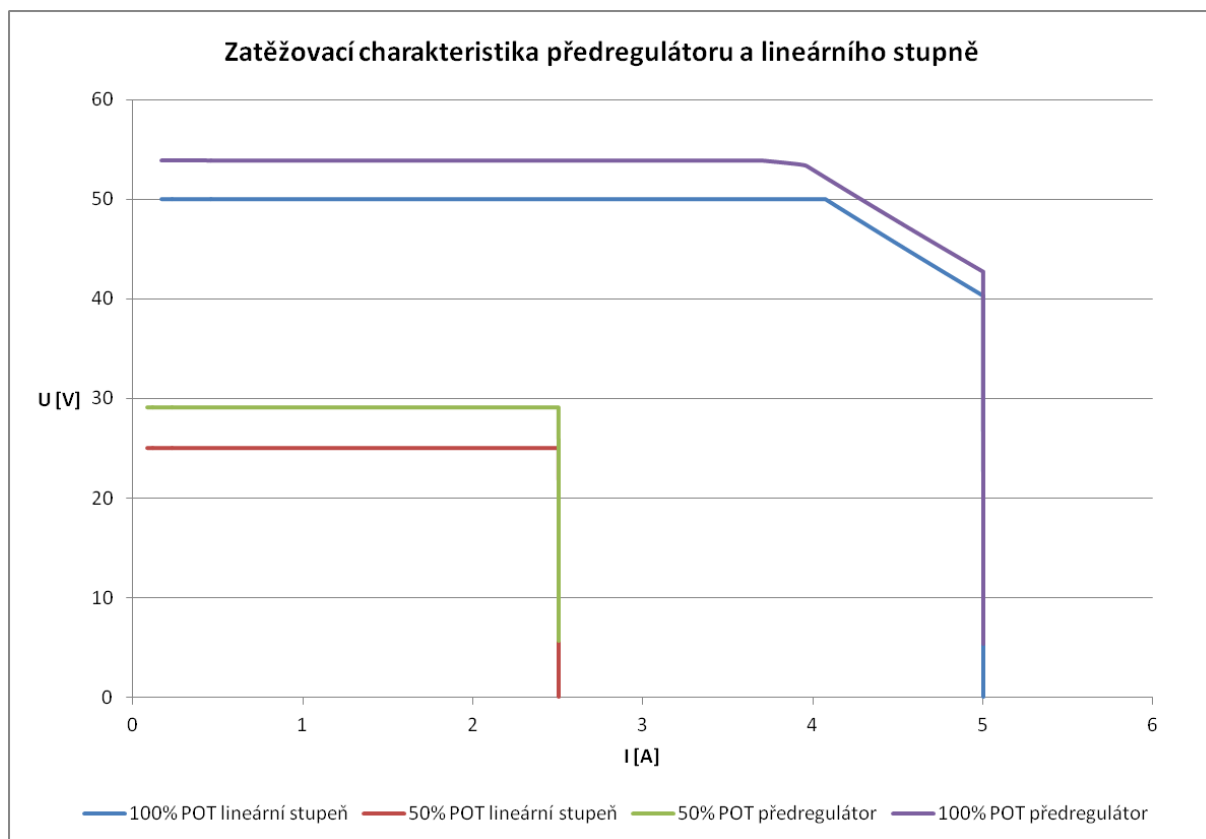


Obr. 4. 1 Schéma zapojení simulované části zdroje

Nejprve jsem simuloval zatěžovací charakteristiku jak samotného předregulátoru, tak i lineárního stupně. Zobrazené charakteristiky jsou pro poloviční a také i pro plný rozsah potenciometrů. Při plném napěťovém rozsahu je vidět pokles napětí, který mohl být způsobem nedostatečným proudem v buzení regulačního tranzistoru předregulátoru. Z regulačních charakteristik je patrný napěťový posuv předregulátoru a lineárního stupně.

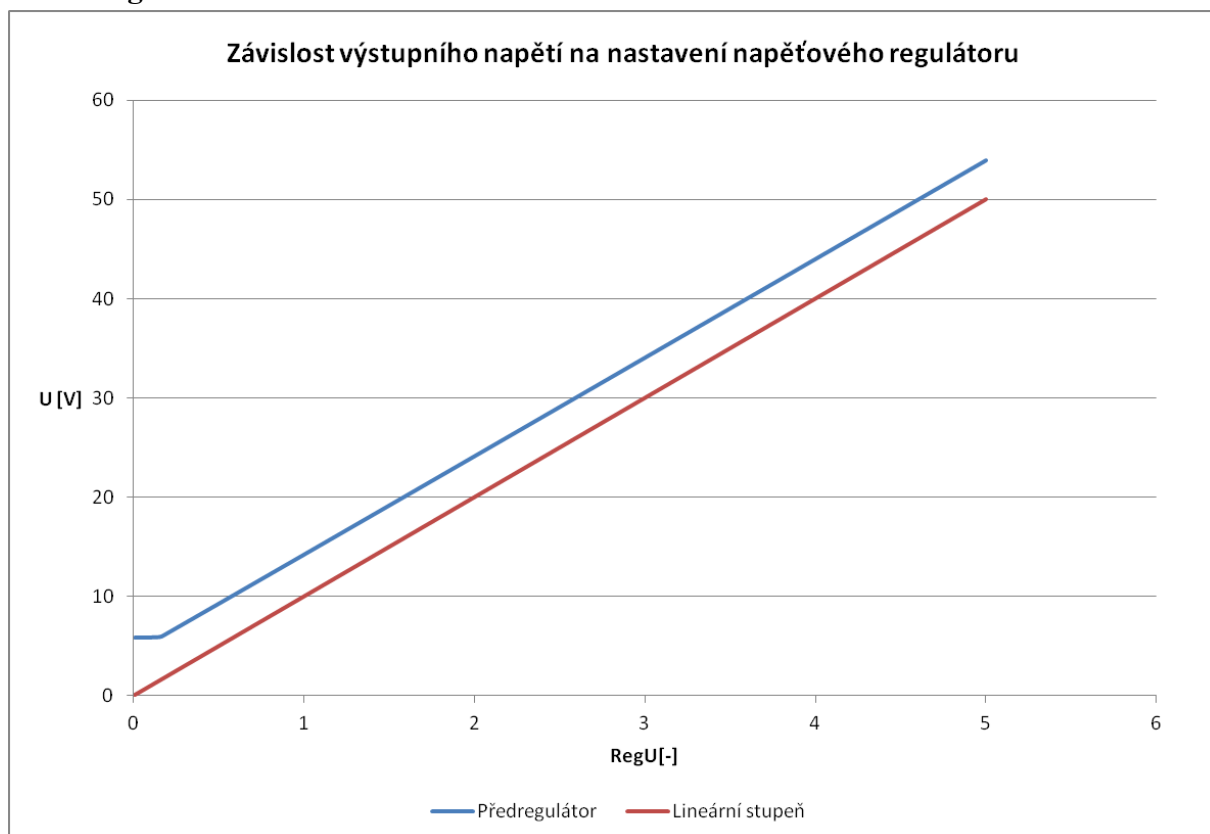


### 4.1.1 Zatěžovací charakteristika



Obr. 4. 2 Zatěžovací charakteristika předregulátoru a lineárního stupně

### 4.1.2 Regulační charakteristika



Obr. 4. 3 Regulační charakteristika předregulátoru a lineárního stupně

## 4.2 Realizované prototypy

### 4.2.1 První testovací vzorek

První testovací prototyp měl sloužit především k ověření základních funkcí spínaného předregulátoru. Celý měnič byl testován na prototypové desce. Jedna z prvních věcí, která byla na měniči testována, bylo správné navržení napájení řídicího čipu viz. 3.3.2. Dále bylo nutné navrhnout vhodné zapojení budiče viz. 3.3.3. S návrhem budičem také souvisel i výběr výkonového tranzistoru. Díky novému návrhu budiče jsem byl schopen v zapojení využít N-MOS tranzistoru, který jak je všeobecně známo dosahuje mnohem lepších parametrů než P-MOS.

Po odladění zmíněných problémů jsem napočítal hodnoty zpětnovazebních rezistorů, tak abych na výstupu měniče dostal konstantní napětí. Postupným zatěžováním měniče jsem narazil na problém, kdy docházelo k razantnímu poklesu výstupní napětí, v okamžiku, kdy zátěží tekla proud větší než 1A. Na první pohled se problém jevil jako nesprávně napočítaná indukčnost. Tedy přistoupil jsem k její výměně, ale situace se bohužel nijak nezměnila.

Dalším testováním se ověřilo, že problém není v samotné indukčnosti, ale může to být způsobeno parametry napětí do proudové zpětné vazby, která se bere z proudového transformátoru v závislosti na šířce impulzů z řídicího čipu. Přistoupil jsem tedy k novému návrhu této části. Vinutí proudového transformátoru jsem doplnil o potenciometr, jehož jezdec je připojen na vstup CS řídicího čipu. Jsem tedy schopen ovlivnit velikost pulzů, které jsou následně porovnávány pomocí řídicího čipu.

První testovací vzorek byl následně doplněn o lineární stupeň, kde bylo důležité ověřit správnou funkci napěťové a proudové regulace. Na testovací desku byly osazeny dva operační zesilovače spolu s přídatnými rezistory a celé zapojení lineárního stupně bylo následně otestováno.

### 4.2.2 Druhý testovací vzorek

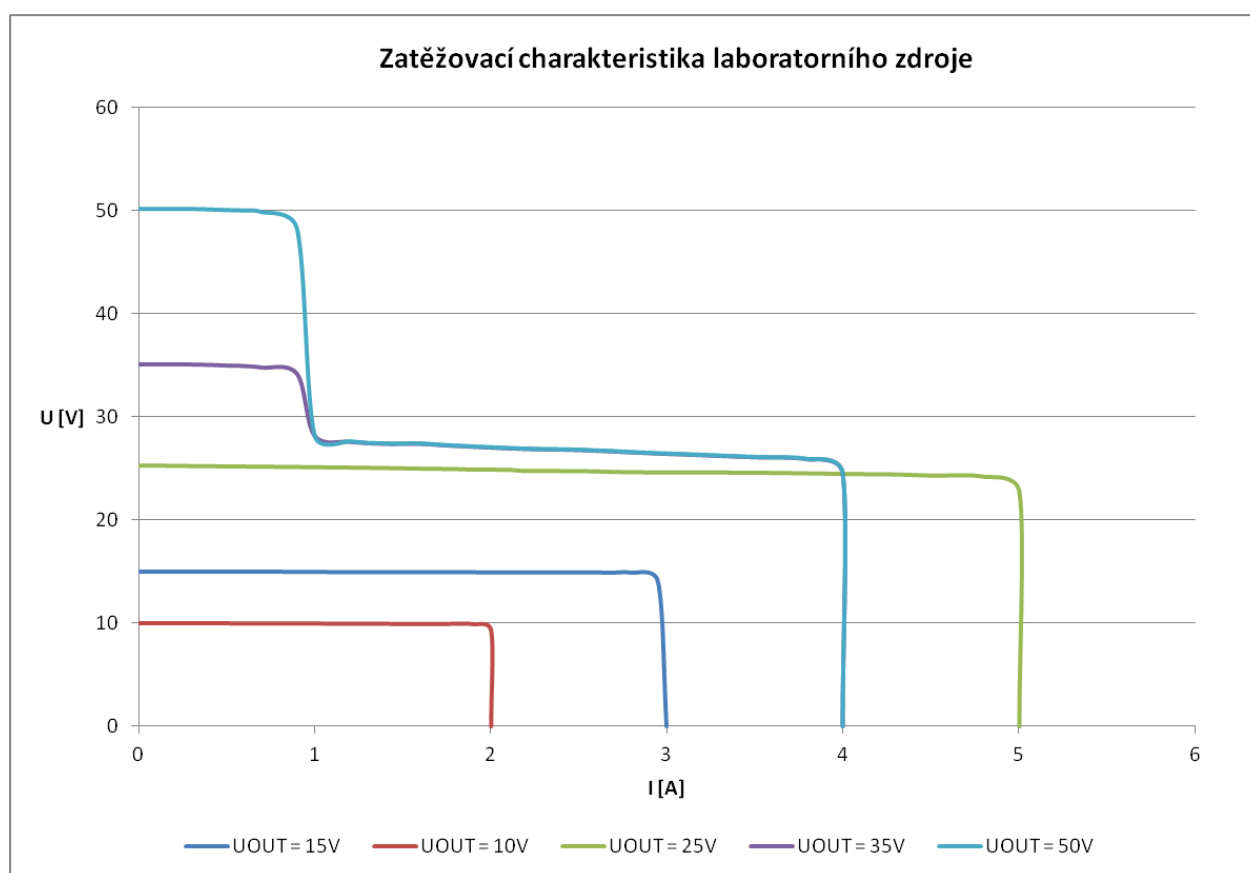
Druhý testovací vzorek byl již realizován na desce vyrobené na školní frézce. Původní varianta zdroje byla osazena převážně z vývodových součástek. Tato verze testovacího vzorku nahradila některé vývodové součástky za součástky určené pro povrchovou montáž. Bylo tedy nutné nejprve ověřit, zda se podařilo desku správně navrhnout. Dalším krokem bylo otestovat všechny problémy, na které jsem narazil při testování prvního vzorku. Tedy vyzkoušet správné napájení řídicího čipu, ověřit frekvenci oscilátoru, napěťový rozsah a další nezbytné věci.

Celý návrh desky jsem realizoval v programu Altium Designer. Je také zapotřebí zmínit, že to byla moje první deska vytvořená právě v tomto programu. Teď již vím, že další návrhy budu kreslit pouze v tomto programu. S návrhem desky jsem si opravdu vyhrál, kdy jsem dokonce většinu součástek doplnil o 3D modely, tak aby bylo patrné, jak celá deska bude ve skutečnosti vypadat.

## 4.3 Měření parametrů

V této části budou podrobně zobrazeny jednotlivé změřené parametry laboratorního zdroje. První velmi podstatnou charakteristikou je zatěžovací, ze které je možné vidět, jak se zdroj chová při různých zatíženích. Následně jsem zjistil velikost zvlnění pro mezní hodnoty napětí. Poslední částí této kapitoly jsou pulzy, které generuje řídicí čip spínaného předregulátoru.

### 4.3.1 Zatěžovací charakteristika



Obr. 4. 4 Zatěžovací charakteristika laboratorního zdroje

Z výše uvedené zatěžovací charakteristiky je vidět významný pokles napětí při nastavení výstupního napětí v rozmezí 28 - 50V. Tento problém u zdroje nastává v okamžiku, kdy překročí proud zátěží 1A. Uvedený problém souvisí s parametry napětí do proudové zpětné vazby, která se v našem případě bere z proudového transformátoru. Laboratorní zdroj je kvůli výše uvedeným problémům v současné době použitelný pouze v rozsahu 0 – 28V.

### 4.3.2 Naměřené hodnoty

Tab. 1 Naměřené hodnoty pro napětí  $U_{OUT} = 10V$  a proud  $I_{OUT} = 2A$

U [V]	10.01	10.01	10.01	10.01	9.99	9.98	9.98	9.97	9.97
I [A]	0	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.9	1	1
U [V]	9.96	9.95	9.94	9.94	9.94	9.93	9.92	9.91	9.3
I [A]	1.1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.7	1.9	2

Tab. 2 Naměřené hodnoty pro napětí  $U_{OUT} = 15V$  a proud  $I_{OUT} = 3A$

U [V]	15.01	15.01	15.01	15.01	14.99	14.98	14.98	14.97	14.97
I [A]	0	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	1	1.2	1.3
U [V]	14.96	14.95	14.94	14.94	14.94	14.93	14.92	14.91	14.1
I [A]	1.6	1.9	2	2.2	2.4	2.6	2.7	2.8	2.95

Tab. 3 Naměřené hodnoty pro napětí  $U_{OUT} = 25V$  a proud  $I_{OUT} = 5A$

U [V]	25.3	25.1	25	24.95	24.9	24.88	24.78	24.76	24.72
I [A]	0	1.2	1.6	1.8	1.9	2.1	2.2	2.5	2.6
U [V]	24.65	24.62	24.6	24.54	24.44	24.43	24.32	24.21	22.7
I [A]	2.8	3.1	3.5	3.8	4.2	4.3	4.5	4.8	5

Tab. 4 Naměřené hodnoty pro napětí  $U_{OUT} = 35V$  a proud  $I_{OUT} = 4A$

U [V]	35.1	35.1	35	34.95	34.8	34.2	28.2	27.6	27.4
I [A]	0	0.3	0.5	0.6	0.7	0.9	1	1.2	1.4
U [V]	27.4	27.2	26.9	26.8	26.5	26.3	26.1	25.9	24.5
I [A]	1.6	1.8	2.2	2.5	2.9	3.2	3.5	3.8	4

Tab. 5 Naměřené hodnoty pro napětí  $U_{OUT} = 50V$  a proud  $I_{OUT} = 4A$

U [V]	50.1	50.1	50	49.95	49.8	48.2	28.2	27.6	27.4
I [A]	0	0.3	0.5	0.6	0.7	0.9	1	1.2	1.4
U [V]	27.4	27.2	26.9	26.8	26.5	26.3	26.1	25.9	24.5
I [A]	1.6	1.8	2.2	2.5	2.9	3.2	3.5	3.8	4

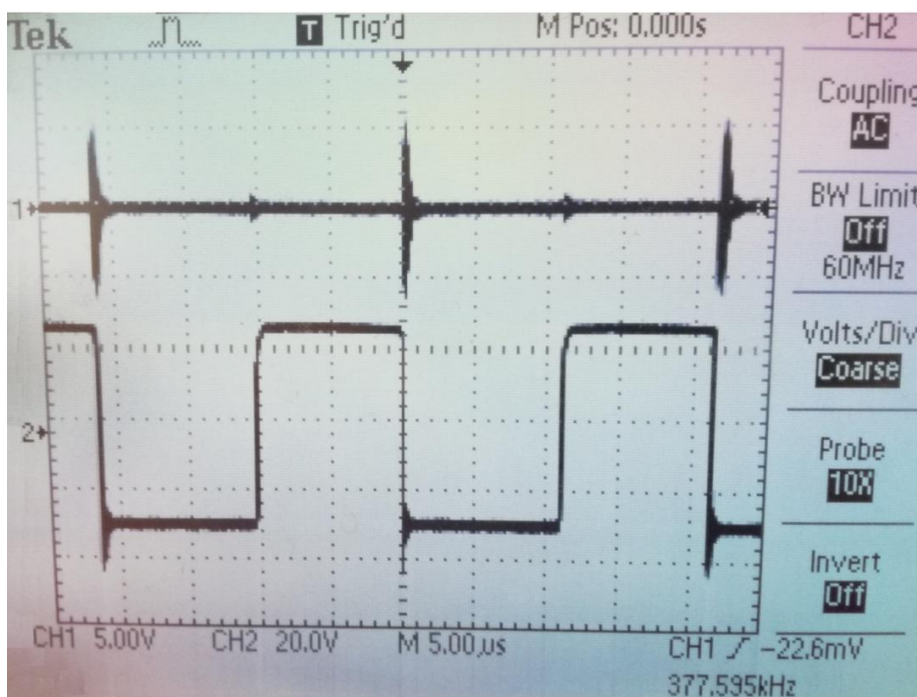
### 4.3.3 Zvlnění

Při maximální hodnotě výstupního napětí jsem na osciloskopu našel zvlnění přibližně rovné hodnotě 200mV. Zvlnění jsem našel těsně před zlomem zatěžovací charakteristiky. Při potenciometrech nastavených na polovinu jejich rozsahu jsem získal pouze nepatrnou velikost zvlnění a to 2mV.

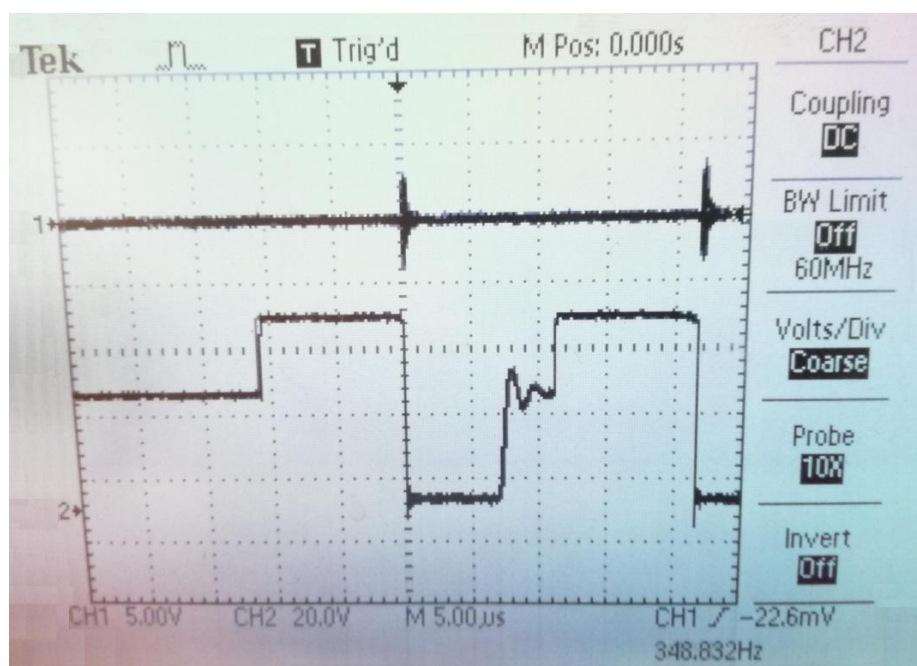
Tímto měřením jsem ověřil skutečnost, že zdroj poskytuje velmi kvalitní výstupní napětí, které nemá sklon ke kmitání. Velmi nízké hodnoty zvlnění jsem dosáhl díky správnému návrhu lineárního stabilizátoru.

#### 4.3.4 Průběhy z osciloskopu

První kanál osciloskopu zobrazuje napájecí napětí určené pro napájení řídicího čipu, které je při zatížení přibližně rovné hodnotě 10,9V. Druhý kanál osciloskopu ukazuje pulzy, které generuje řídicí čip na svém výstupu (pin č. 6). Na Obr. 4. je možné vidět pulzy generované při přerušovaném režimu a na Obr. 4. jsou naopak pulzy při nepřerušovaném režimu.



Obr. 4. 5 Pulzy generované čipem při nepřerušovaném režimu



Obr. 4. 6 Pulzy generované čipem při přerušovaném režimu

## Závěr

Cílem mojí diplomové práce bylo vytvořit funkční vzorek spínaného laboratorního zdroje. Takto navržený zdroj bude využit pro osobní účely v oblasti testování nejrůznějších elektronických obvodů. V první kapitole jsem popsal jednotlivé části, ze kterých je postavený každý laboratorní zdroj. Nastínil jsem zde také problematiku lineárních a spínaných zdrojů. Tím jsem dospěl k názoru, že pro větší výkony jsou v dnešní době více využívány právě spínané zdroje nebo blok zdroje doplněn o spínanou předregulaci jako tomu je v našem případě.

Ve druhé části jsem nastínil základní typy spínaných měničů. Popsal jsem jejich možnost využití, ale hlavně jsem zde také vysvětlil jejich princip, na kterém jsou založeny. Velkou pozornost jsem věnoval pouze několika základním zapojením, které jsou pro spínané zdroje velmi důležité. Pro návrh jsem využil zapojení snižujícího spínaného měniče, ale je také možné využít zapojení Flyback měniče. Je zapotřebí zmínit, že návrh a samotné zprovoznění Flyback měniče je mnohem složitější než zapojení námi použitého měniče.

Ve třetí části jsem popsal samotný návrh funkčního vzorku spínaného zdroje. V této části jsem nejprve představil jednotlivé části zdroje, ze kterých jsem ho zhotovil. Nejdůležitější částí celého zdroje je spínaný předregulátor. Během testování prvního prototypu jsem narazil na několik zásadních problémů, které bylo nezbytné vyřešit. Postupným zatěžováním měniče docházelo k velkému poklesu výstupního napětí, v okamžiku, kdy zátěží tekl proud větší než 1A. Tento problém se mi následně podařilo odstranit použitím nového zapojení určeného pro snímání velikosti procházejícího proudu.

V poslední části jsem se věnoval samotnému testování parametrů námi navrženého zapojení zdroje. Nejprve jsem ověřil zapojení zdroje pomocí simulace v programu PSpice. Vytvořil jsem zatěžovací charakteristiku jak spínaného předregulátoru, tak i lineárního stupně. Z regulačních charakteristik je vidět konstantní posuv napětí mezi oběma stupni.

Následně jsem změřil zatěžovací charakteristiky na jednom z testovaných prototypů, ze kterých je patrný pokles výstupního napětí. Problém nastává již při překročení hodnoty napětí 27,4V. Tento problém se mi bohužel nepodařilo vyřešit, ale je to nejspíše způsobeno parametry napětí do proudové zpětné vazby, která se bere z proudového transformátoru v závislosti na šířce pulzů z řídicího čipu. Testování lineárního stupně nepřineslo žádné zásadní problémy, lze ho tedy považovat za správně navržený.

Dospěl jsem k závěru, že i přes velké problémy se spínaným předregulátorem, jsem vytvořil zapojení laboratorního zdroje, které sice nesplňuje všechny moje kladené požadavky, ale pro účely testování je vhodné. Tato práce byla navržena pouze jako testovací prototyp určený pro další možné úpravy. Počítám s tím, že zapojení ještě vylepším, tak aby bylo možné zdroj regulovat v plném pracovním rozsahu.

## Použitá literatura

- [1] CHYTIL, Jiří. *Základy elektrotechniky - 7 - Zdroje napětí* [online]. 2008 [cit. 2018-02-21]. Dostupné z: <http://www.8bitu.cz/clanek/zaklady-elektrotechniky-7-zdroje-napeti>
- [2] OTÝPKA, Ing. Bc. Miloslav. *Napájecí zdroje* [online]. [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=21819&instance=2>
- [3] KREJČIŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje I., II. a III.* Praha: BEN - technická literatura, 1996. ISBN 80-86056-02-1(2,3).
- [4] HAMMERBAUER, Jiří. *Elektronické napájecí zdroje a akumulátory*. Plzeň: Západočeská univerzita, 1998. ISBN 80-708-2411-5.
- [5] HAVLÁT, Bc. Ladislav. *Precizní laboratorní zdroj s předřadným DC/DC konvertorem* [online]. [cit. 2018-02-21]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/68540/F3-DP-2017-Havlat-Ladislav-psu02-all.pdf>. Diplomová. ČVUT Praha.
- [6] CHYTIL, Jiří. *Stabilizátor 78xx a 79xx* [online]. [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <http://www.8bitu.cz/clanek/stabilizator-78xx-a-79xx/>
- [7] *Integrované stabilizátory* [online]. [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <http://oklike.c-a-v.com/soubory/stabil2.htm>
- [8] ZEMÁNEK, Ing. Miroslav. *Užití výkonových měničů ve zdrojích vysokého napětí*. [online]. 2009 [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=19284](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=19284). Dizertační.
- [9] KOPECKÝ, Ladislav. *Forward Converter* [online]. [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <http://free-energy.xf.cz/teorie/dc-dc/Forward-Converter.pdf>
- [10] Texas Instruments. *UCC180x, UCC280x, UCC380x Low-Power BiCMOS Current-Mode PWM Controllers* [online]. [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ucc2800.pdf>
- [11] Texas Instruments. *UCC3800/1/2/3/4/5 BiCMOS Current mode control ICs* [online]. [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slva149/slva149.pdf>

- [12] STMicroelectronics. *TSM1012* [online]. [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <http://www.st.com/resource/en/datasheet/tsm1012.pdf>
- [13] Texas Instruments. *LMx58-N Low-Power, Dual-Operational Amplifiers* [online]. [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm158-n.pdf>
- [14] ON Semiconductor. *MJ11015 (PNP); MJ11012, MJ11016 (NPN)* [online]. [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <http://www.onsemi.com/pub/Collateral/MJ11012-D.PDF>
- [15] DC KOMPONENTS. *KBU10M* [online]. [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/Document/631055c8ad324b1d1396b55d5f0bf78a/KBU10x-DTE.pdf>
- [16] ON Semiconductor. *LM78XX / LM78XXA 3-Terminal 1 A Positive Voltage Regulator* [online]. [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/Document/f1c7df2cf7bbaa88b33acdef6adfc2e/LM7812.pdf>
- [17] ON Semiconductor. *KA79XX / KA79XXA / LM79XX 3-Terminal 1 A Negative Voltage Regulator* [online]. [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/Document/248e08d682d958fba49d54dc12944518/LM7905.pdf>
- [18] Texas Instruments. *TL43xx Precision Programmable Reference* [online]. [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl431a.pdf>



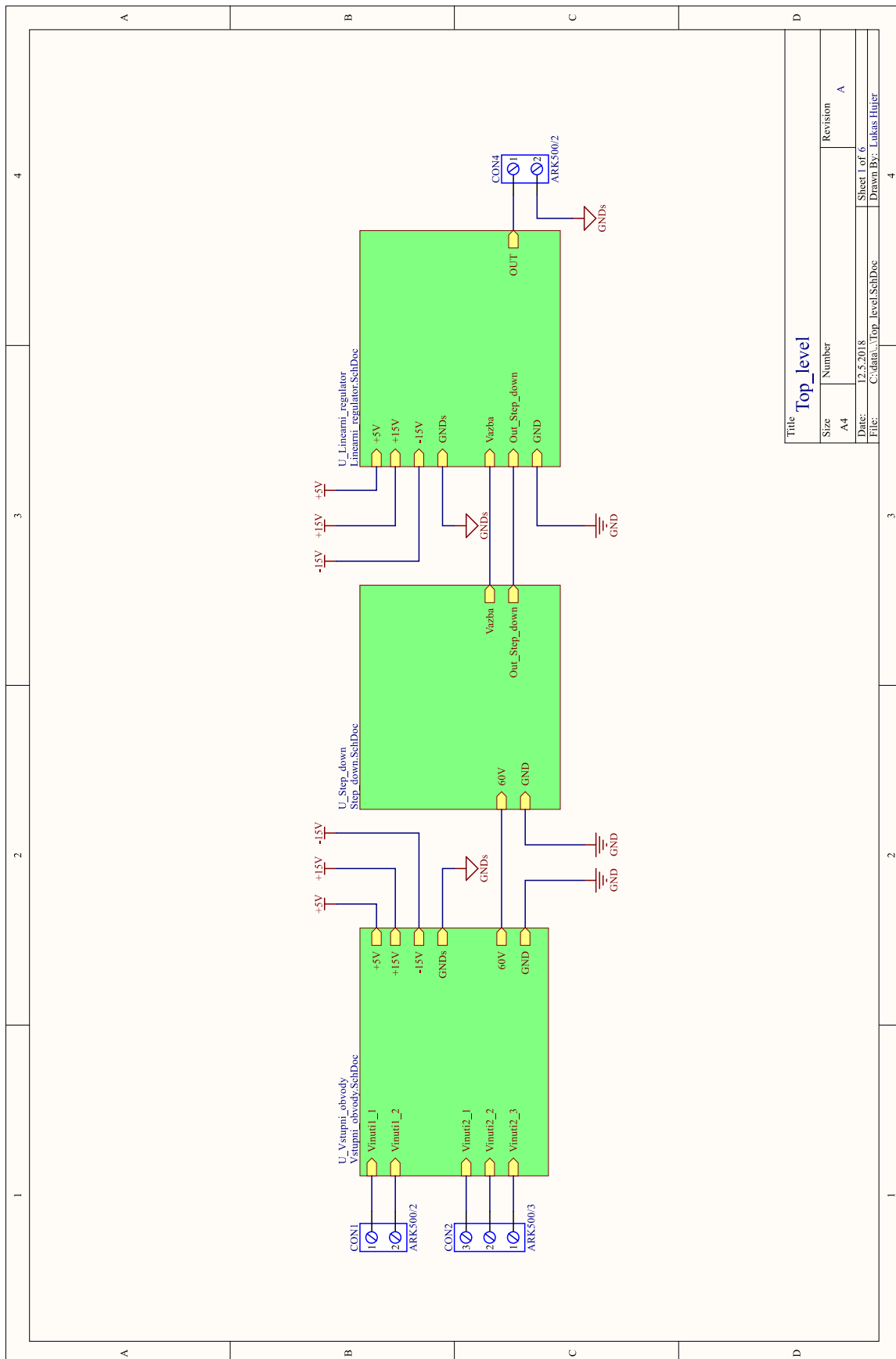
## Seznam obrázků

Obr. 1. 1	Blokové schéma lineárního napájecího zdroje.....	12
Obr. 1. 2	Pracovní cyklus spínaného zdroje.....	16
Obr. 1. 3	Blokové schéma spínaného zdroje s regulací na primární straně .....	17
Obr. 1. 4	Předregulátor s přepínáním odboček transformátoru.....	19
Obr. 1. 5	Třístupňový napájecí zdroj se síťovým transformátorem a spínan. předregulátorem ..	20
Obr. 1. 6	Stabilizátor s pevným výstupním napětím typu 78xx.....	21
Obr. 1. 7	Stabilizátor s proměnným výstupním napětím typu LM317 .....	22
Obr. 1. 8	Lineární stabilizátor s proudovým omezením.....	22
Obr. 1. 9	Plovoucí lineární stabilizátor s proudovým omezením.....	23
Obr. 2. 1	Snižující propustný spínaný měnič .....	24
Obr. 2. 2	Blokující jednočinný měnič typu Flyback .....	26
Obr. 2. 3	Propustný jednočinný měnič .....	27
Obr. 2. 4	Propustný jednočinný měnič se dvěma spínači.....	27
Obr. 3. 1	Blokové schéma laboratorního zdroje .....	29
Obr. 3. 2	Funkční blokové schéma čipu UCC3804D.....	30
Obr. 3. 3	Schéma zapojení sériového stabilizátoru .....	31
Obr. 3. 4	Původní schéma zapojení budícího stupně simulované v programu PSpice .....	32
Obr. 3. 5	Nové schéma zapojení budícího stupně .....	33
Obr. 3. 6	Závislost frekvence oscilátoru na rezistoru RT pro různé kapacity CT.....	34
Obr. 3. 7	Vnitřní zapojení řídicího čipu TSM1012 .....	35
Obr. 3. 8	Schéma zapojení lineárního stabilizátoru .....	36
Obr. 3. 9	Zpětná vazba mezi lineárním regulátorem a předregulátorem.....	37
Obr. 3. 10	Schéma zapojení symetrického napájení pro operační zesilovač .....	38
Obr. 4. 1	Schéma zapojení simulované části zdroje.....	40
Obr. 4. 2	Zatěžovací charakteristika předregulátoru a lineárního stupně.....	41
Obr. 4. 3	Regulační charakteristika předregulátoru a lineárního stupně.....	41
Obr. 4. 4	Zatěžovací charakteristika laboratorního zdroje .....	43
Obr. 4. 5	Pulzy generované čipem při nepřerušovaném režimu .....	45
Obr. 4. 6	Pulzy generované čipem při přerušovaném režimu .....	45

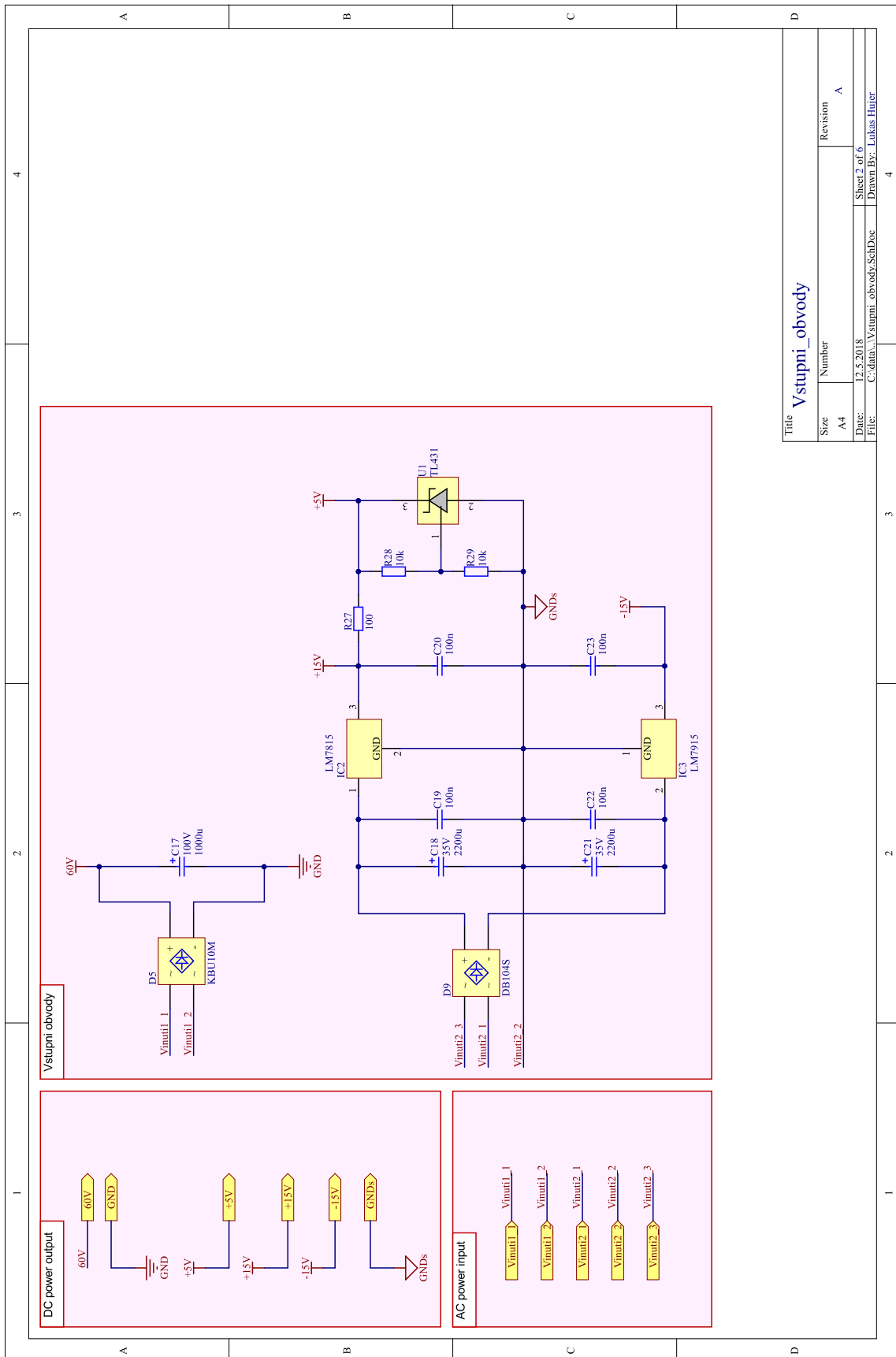
## **Seznam příloh**

- P1 – Blokové schéma laboratorního zdroje
- P2 – Schéma zapojení vstupních obvodů
- P3 – Blokové schéma spínaného předregulátoru
- P4 – Schéma zapojení řídicího čipu předregulátoru
- P5 – Schéma zapojení budiče předregulátoru
- P6 – Schéma zapojení lineárního stabilizátoru
- P7 – Seznam použitých součástek
- P8 – Motivy plošného spoje
- P9 – Fotky realizovaných prototypů
- P10 – Detailní pohled na navrženou desku

# P1 – Blokové schéma laboratorního zdroje

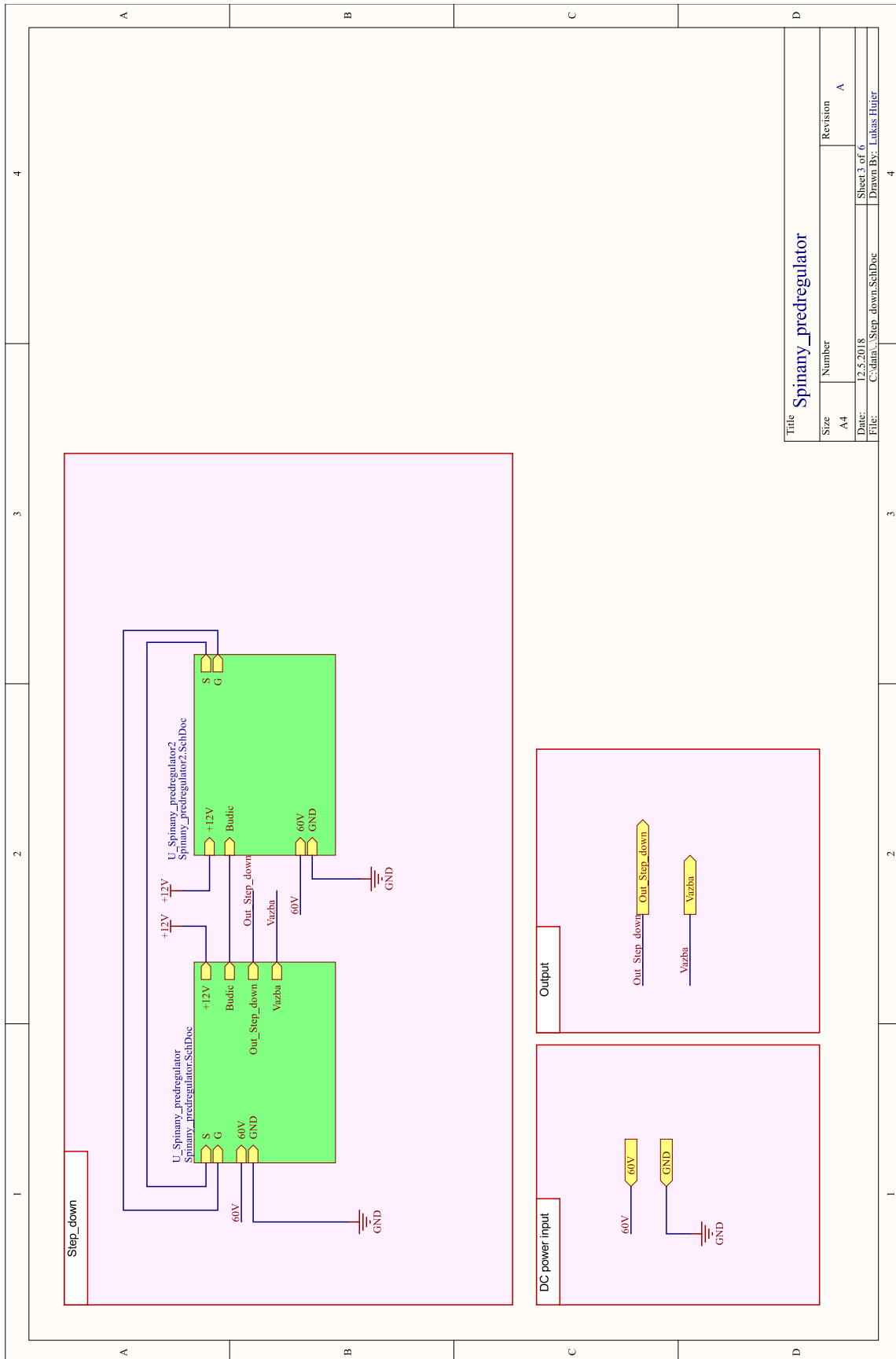


## P2 – Schéma zapojení vstupních obvodů

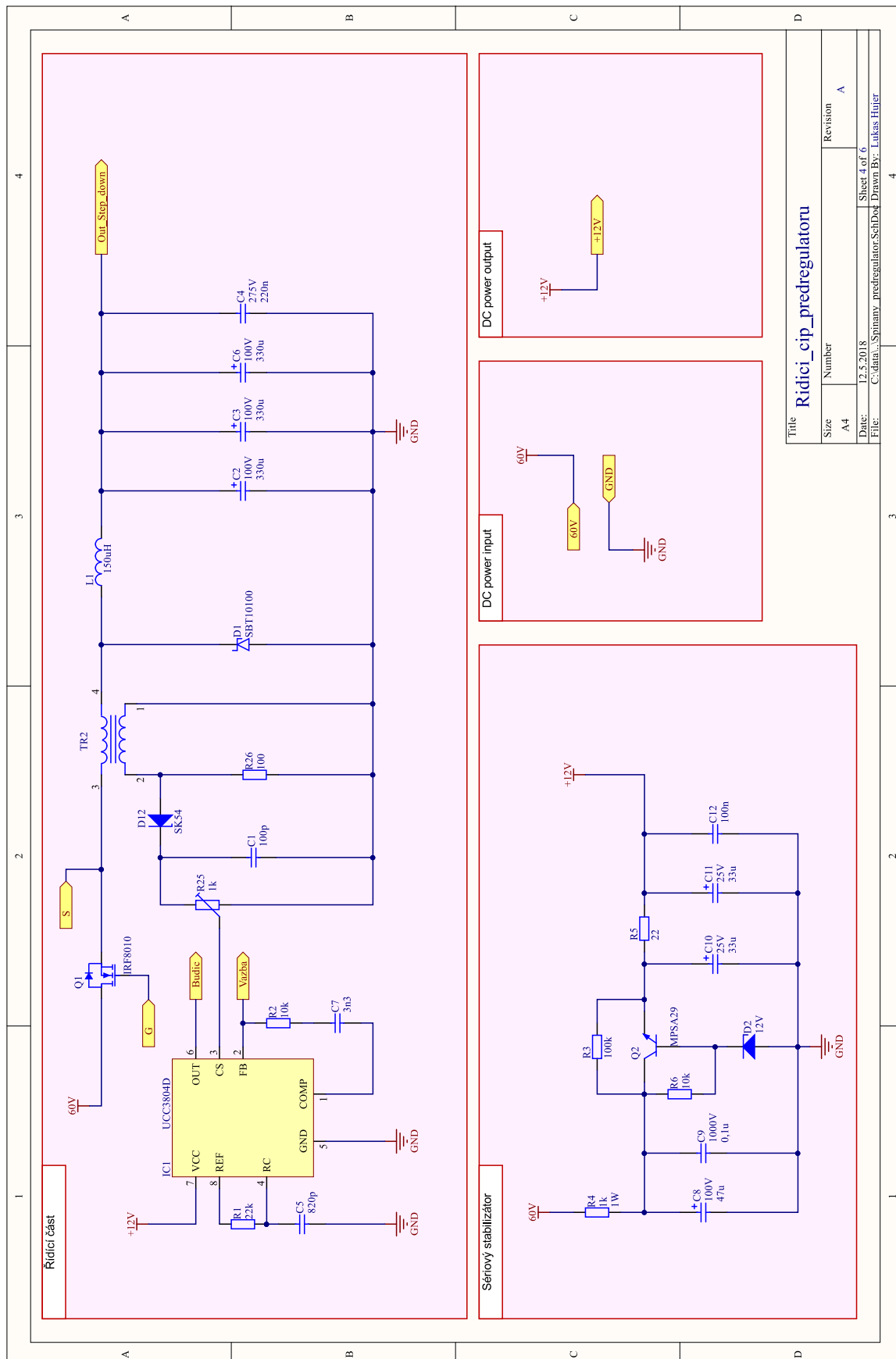


Title		Vstupni_obvody	
Size	Number	Revision	A
A4			
Date:	2.5.2018	Sheet 2 of 6	
File:	C:\data\3_Vstupni_obvody_SchDoc	Drawn By:	Lukas Hujer

### P3 – Blokové schéma spínaného předregulátoru

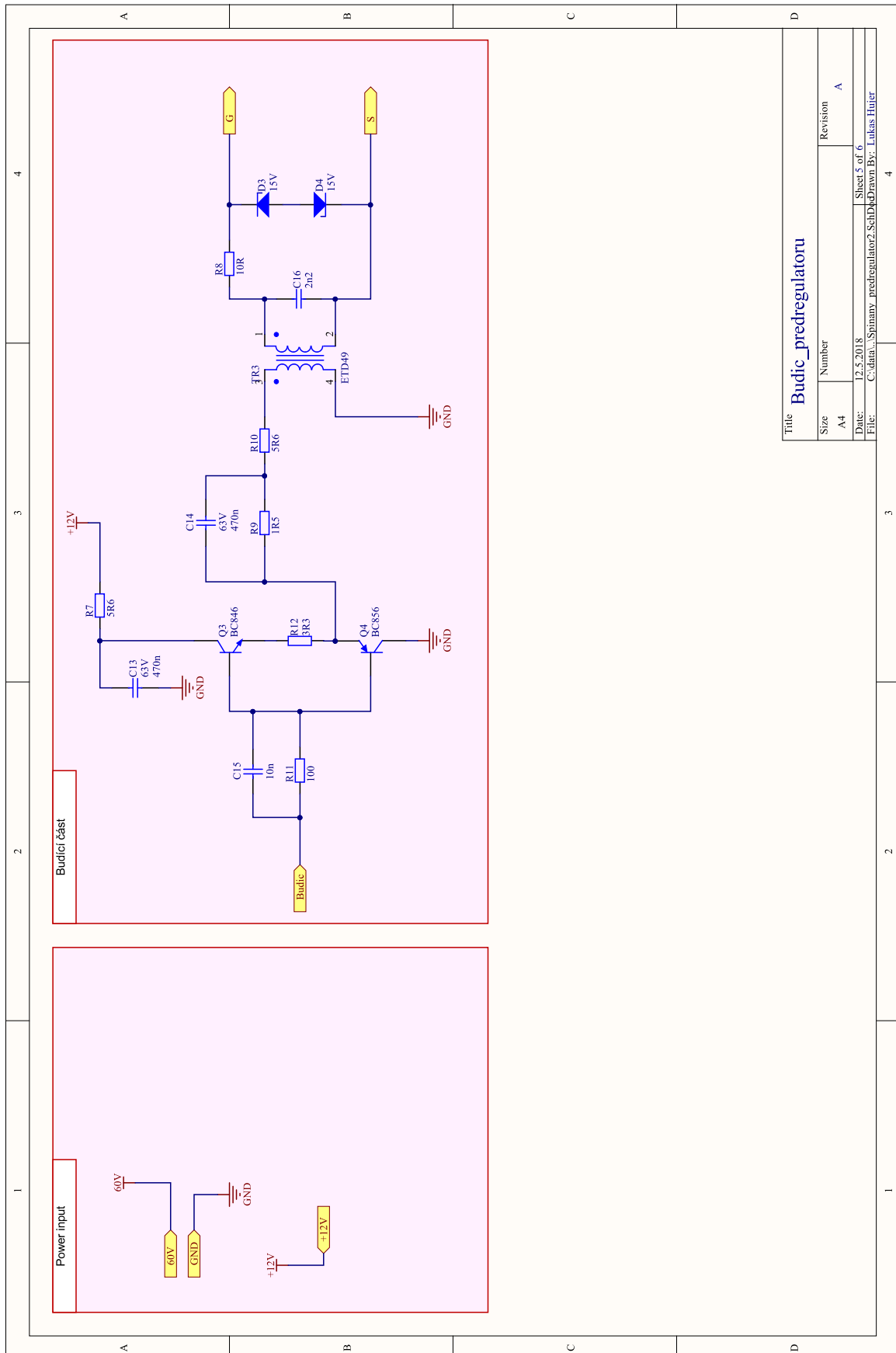


### P4 – Schéma zapojení řídicího čipu předregulátoru



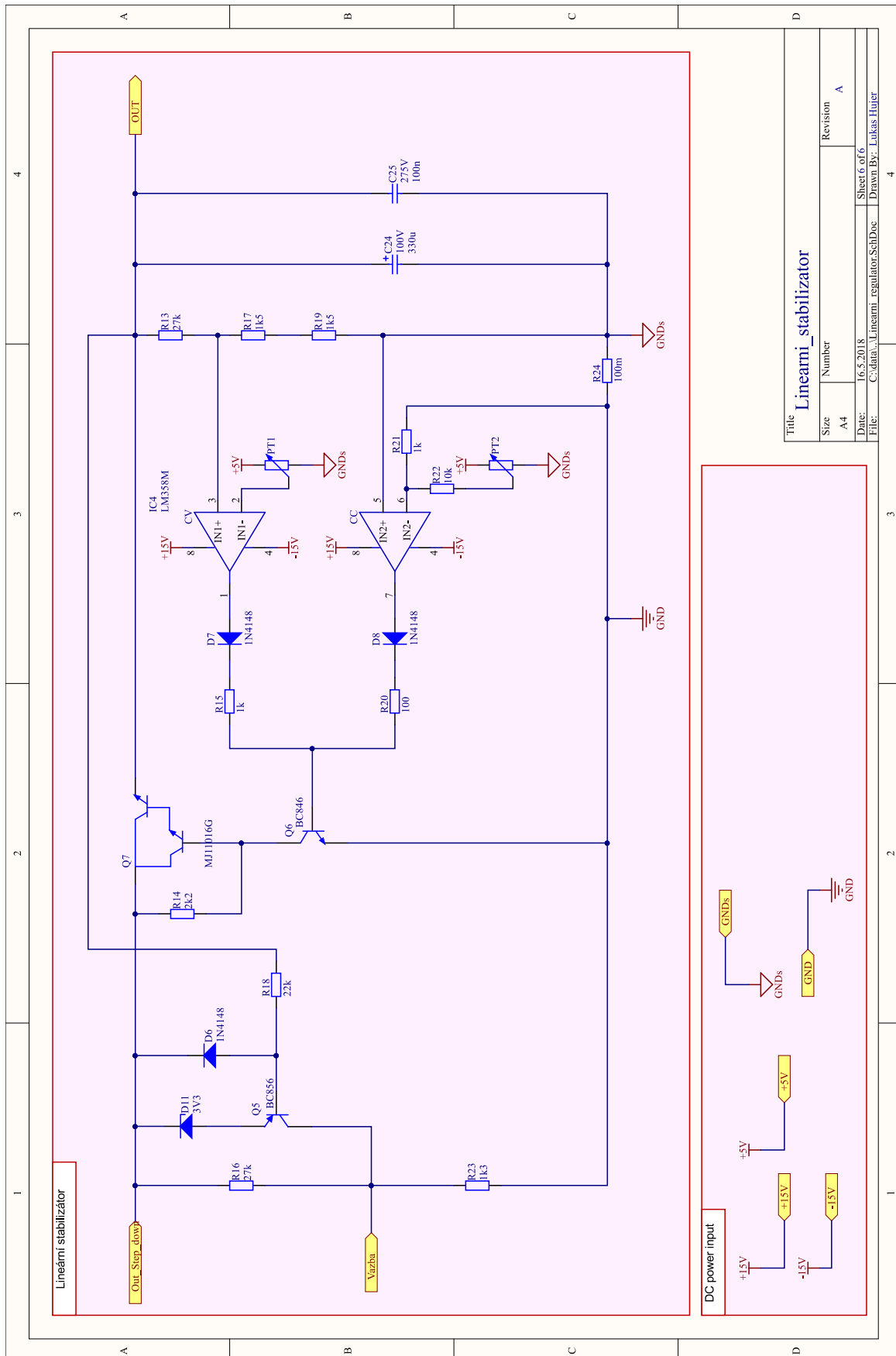
Title		
Size	Number	Revision
A4		A
Date:	Sheet 4 of 6	
File:	C:\data\...\Spinany_predregulator.SchDoc Drawn By: Lukas Hujer	

### P5 – Schéma zapojení budiče předregulátoru



Title Budič_pregulatoru		
Size A4	Number	Revision A
Date: 12.5.2018	Sheet 5 of 6	
File: C:\data\Spinary_pregulator2.SchDoc	Drawn By: Lukáš Hujer	

### P6 – Schéma zapojení lineárního stabilizátoru





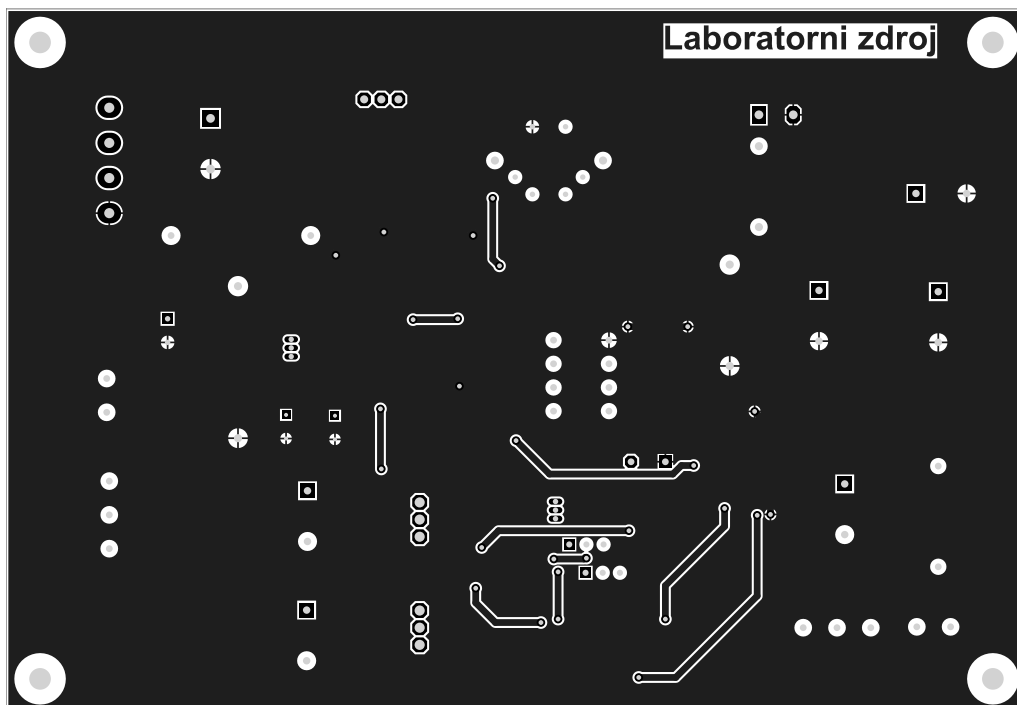
**P7 – Seznam použitých součástek**

Označení	Hodnota	Poznámka
<b>Rezistory</b>		
R1	22k	0805
R2	10k	0805
R3	100k	1206
R4	1k	1W
R5	22	1206
R6, R22	10k	1206
R7, R10	5R6	1206
R8	10R	1206
R9	1R5	1206
R11, R20, R26	100	1206
R12	3R3	1206
R13, R16	27k	1206
R14	2k2	1206
R15, R21	1k	1206
R17, R19	1k5	1206
R18	22k	1206
R23	1k3	1206
R24	100m	TO-220
R25	1k	Trimer
R27	100	1206
R28	10k	1206
R29	10k	1206
<b>Indukčnost</b>		
L1	150uH	
<b>Diody, diodové můstky</b>		
D1	SBT10100	Schottky
D2	12V	Zenerova
D3, D4	15V	Zenerova
D6, D7, D8	1N4148	miniMELF
D11	3V9	Zenerova
D12	SK54	Schottky
D5	KBU10M	Můstek 10A
D9	DB104S	Můstek 1A

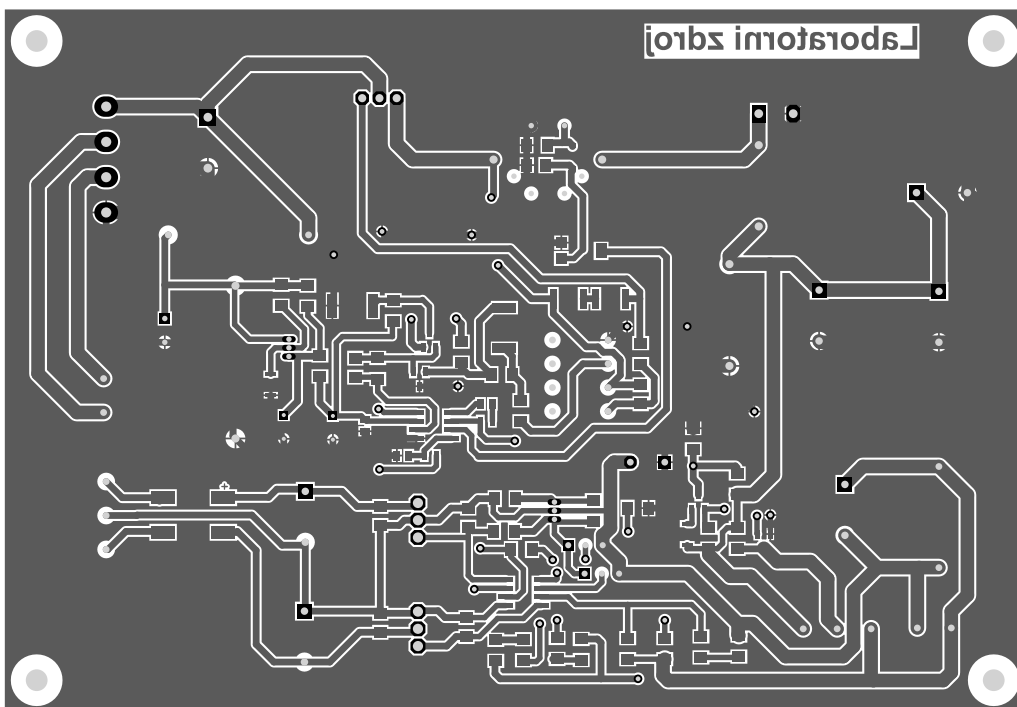
Označení	Hodnota	Poznámka
<b>Kondenzátory</b>		
C1	100p	1206
C2, C3, C6, C24	330μ	elyt 100V
C4	220n	foil 275V
C5	820p	0805
C7	3n3	0805
C8	47μ	elyt 100V
C9	0,1μ	foil 1000V
C10, C11	33μ	elyt 25V
C12, C19, C20	100n	1206
C22, C23	100n	1206
C13, C14	470n	SMD, 63V
C15	10n	1206
C16	2n2	1206
C17	1000μ	elyt 100V
C18, C21	2200μ	elyt 35V
C25	100n	foil 275V
<b>Integrované obvody</b>		
IC1	UCC3804D	DC/DC
IC2	LM7815	Stab +15V
IC3	LM7915	Stab -15V
IC4	LM358M	OZ
U1	TL431	Refer. zdroj
<b>Tranzistory</b>		
Q1	IRF8010	TO-220AB
Q2	MPSA29	TO92
Q3, Q6	BC846	SOT-23
Q4, Q5	BC856	SOT-23
Q7	MJ11016G	TO3
<b>Ostatní součástky</b>		
CON1, 2, 3,4	CMM5	16A/250V
PT1, PT2	1k	Potenciometr
TR2	Proudový transformátor	
TR3	Impulzní transformátor	

## P8 – Motivy plošného spoje

### P8.1 Motiv horní vrstvy součástek (TopLayer)

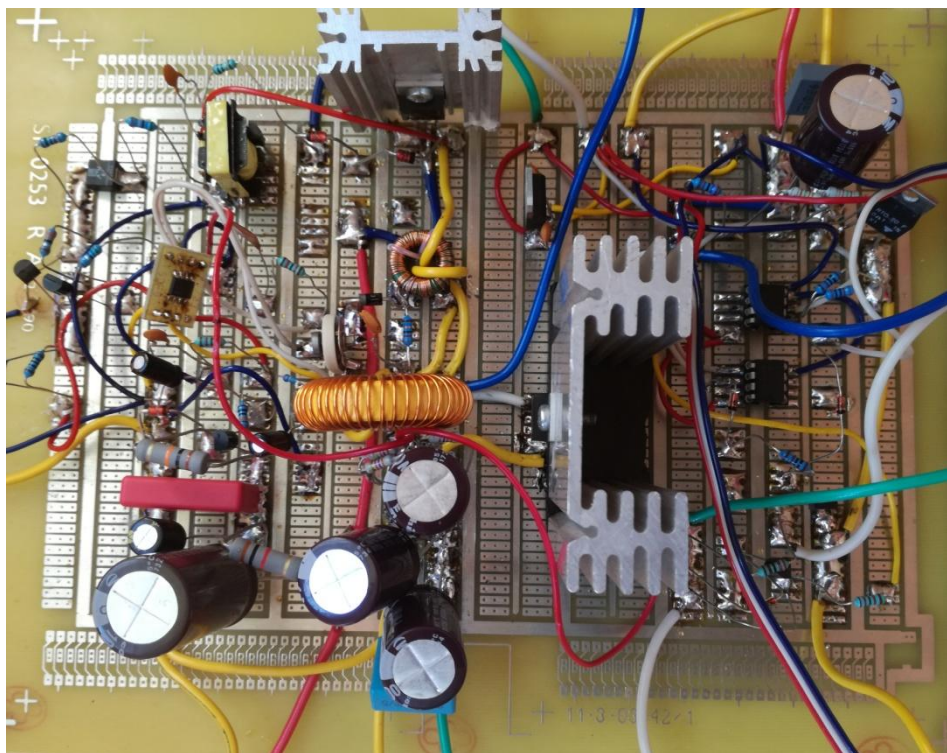


### P8.2 Motiv spodní vrstvy součástek (BotLayer)

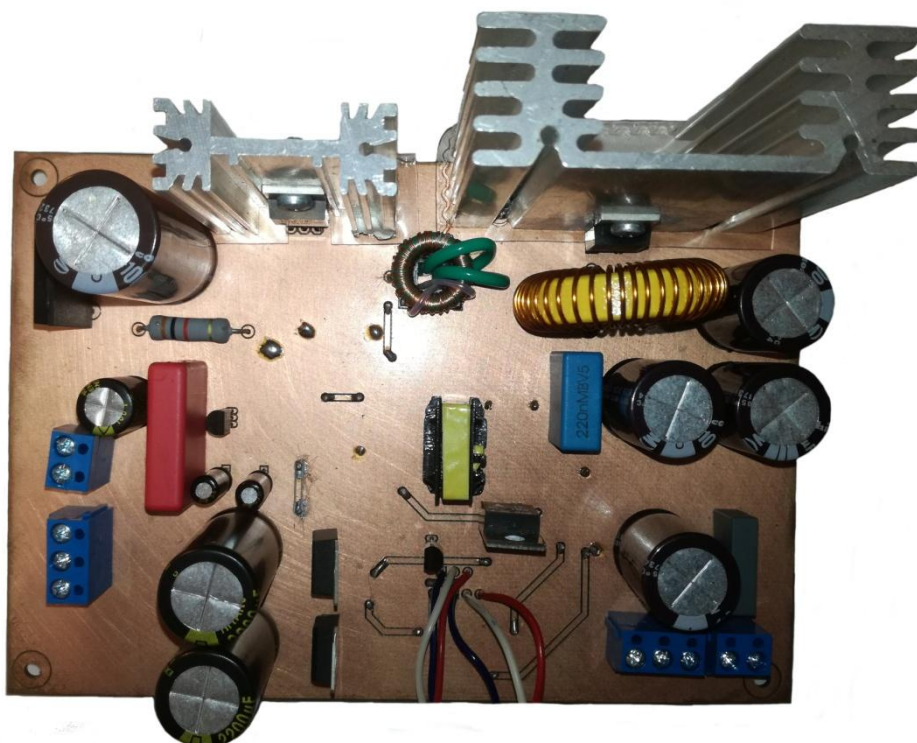


## P9 – Fotky realizovaných prototypů

### P9.1 První testovací vzorek

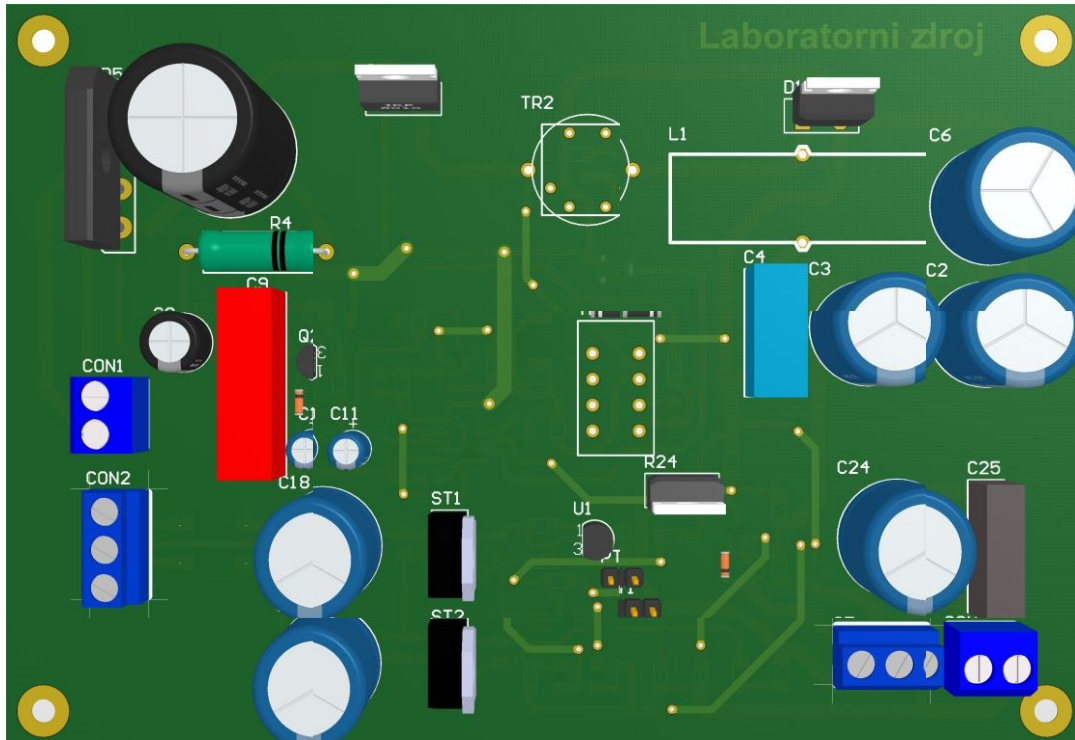


### P9.2 Druhý testovací vzorek



## P10 – Detailní pohled na navrženou desku

### P10.1 Pohled z horní vrstvy součástek (TopLayer)



### P10.2 Pohled ze spodní vrstvy součástek (BotLayer)

