

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

---

Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektroniky a informačních technologií

# BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Víceúrovňový lineární napájecí zdroj**

Autor práce: Jakub Brichta  
Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Kubík, Ph.D.

---

2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2021/2022

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jakub BRICHTA**  
Osobní číslo: **E19B0079P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**  
Téma práce: **Víceúrovňový napájecí zdroj**  
Zadávací katedra: **Katedra elektroniky a informačních technologií**

### Zásady pro vypracování

1. Prostudujte zapojení lineárních zdrojů napětí.
2. Navrhněte síťový napájecí zdroj s výstupem +5 V / 5 A, +12 V / 2 A a -12 V / 2 A.
3. Navržený zdroj realizujte a změřte jeho parametry.
4. Zhodnoťte naměřené parametry a diskutujte možné vylepšení návrhu zdroje.




Rozsah bakalářské práce: **30 – 40**  
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

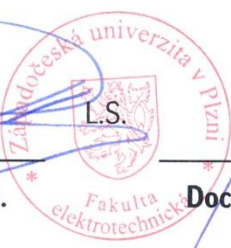
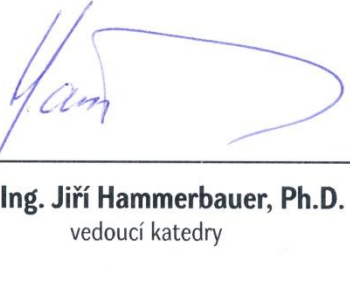
Seznam doporučené literatury:

1. Hammerbauer, J.: Elektronické napájecí zdroje a akumulátory. Západočeská univerzita, Elektrotechnická fakulta, 1996. ISBN 80-7082-411-5.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zdeněk Kubík, Ph.D.**  
Katedra elektroniky a informačních technologií

Datum zadání bakalářské práce: **8. října 2021**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2022**

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

  
  
**Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 8. října 2021

## **Abstrakt**

Cílem této práce je navrhnout a zkonstruovat lineární napájecí zdroj určený pro napájení testovaných zařízení v bezodrazové komoře při testech elektromagnetické kompatibility. V návrhu bude zohledněna potřebná odolnost proti vysokofrekvenčnímu rušení a nízká úroveň vyzařovaných emisí. Navrhovaný zdroj bude mít jeden kanál 5 V / 5 A a jeden kanál  $\pm 12$  V / 2 A. Součástí práce je úvod do problematiky lineárních zdrojů a podrobně popsání kompletní návrh jednotlivých elektrických a mechanických částí zdroje. Dále jsou součástí výsledky měření elektrických parametrů zdroje a testů elektromagnetické kompatibility.

## **Klíčová slova**

víceúrovňový lineární napájecí zdroj, stabilizovaný zdroj, stabilizátor, EMC

## **Abstract**

The aim of this thesis is to design and construct a linear power supply which can be used to power tested devices in an anti-reflection chamber during electromagnetic compatibility tests. The design must take into account the required immunity to high frequency interference and low levels of radiated emissions. The proposed source has one channel 5 V / 5 A and one channel  $\pm 12$  V / 2 A. Part of the work is an introduction to the issues of linear sources and a detailed description of the complete electrical and mechanical parts of the source. The results of measuring the electrical parameters of the source and electromagnetic compatibility tests are also included.

## **Key Words**

multilevel linear power supply, stabilized power supply, stabilizer, EMC

## **Prohlášení**

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

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

V Plzni dne 26. května 2022

Jakub Brichta

.....

Podpis

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Zdeňkovi Kubíkovi, Ph.D., vedoucímu mé bakalářské práce, za odborné rady, vedení a za zprostředkování testů EMC v bezodrazové komoře.

# Obsah

Úvod.....	1
1 Lineární napájecí zdroje.....	2
1.1 Topologie síťového lineárního zdroje napětí .....	3
1.2 Princip činnosti lineárního stabilizátoru.....	3
1.2.1 Sériové stabilizátory.....	6
1.2.2 Paralelní stabilizátory.....	10
1.3 Zdroje s nesymetrickým výstupem.....	11
1.4 Zdroje se symetrickým výstupem.....	12
1.5 Proudové posílení stabilizátorů .....	14
2 Návrh zdroje.....	16
2.1 Připojení k rozvodné síti 230 V AC.....	16
2.2 Síťový transformátor .....	17
2.3 Návrh usměrňovačů a filtrů.....	20
2.3.1 Usměrňovač.....	20
2.3.2 Vyhlažovací filtr.....	22
2.4 Návrh stabilizátorů .....	25
2.4.1 Návrh stabilizátoru 5 V / 5 A .....	28
2.4.2 Návrh stabilizátorů 12 V / 2 A .....	33
2.4.3 Odrušení a ochrana stabilizátorů .....	36
2.5 Výstupy zdroje .....	40
2.6 Výsledky počítačové simulace obvodů navrhovaného zdroje.....	41
2.6.1 Simulace - zatěžovací charakteristika .....	41
2.6.2 Simulace - časové průběhy vstupního a výstupního napětí stabilizátorů .....	42
2.7 Tepelná bilance .....	44
2.7.1 Tepelná bilance 5 V kanálu.....	44
2.7.2 Tepelná bilance 12 V kanálů.....	45
3 Konstrukce zdroje .....	46
3.1 Desky plošných spojů.....	46
3.2 Šasi zdroje .....	47
3.2.1 Popis čelních panelů zdroje.....	49
4 Testování a měření .....	50



4.1	Zatěžovací charakteristiky zdroje.....	51
4.2	Zvlnění výstupního napětí.....	53
4.3	Měření ztrátového výkonu na řídicích tranzistorech.....	56
4.4	Zkoušky EMC.....	57
4.5	Porovnání výsledků měření se simulací.....	60
5	Závěr.....	61
	Literatura.....	62
	Přílohy.....	64
	Příloha A Schéma zapojení.....	64
	A.1 Schéma zapojení síťového transformátoru.....	64
	A.2 Schéma zapojení 12 V stabilizátoru.....	65
	A.3 Schéma zapojení 5 V stabilizátoru.....	66
	A.4 Schéma zapojení USB modulu a 5 V výstupů.....	67
	A.5 Schéma zapojení 12 V výstupů.....	68
	Příloha B Osazovací výkresy.....	69
	B.1 Osazovací výkres 12 V stabilizátoru (TOP).....	69
	B.2 Osazovací výkres 12 V stabilizátoru (BOT).....	69
	B.3 Osazovací výkres 5 V stabilizátoru (TOP).....	70
	B.4 Osazovací výkres 5 V stabilizátoru (BOT).....	70
	B.5 Osazovací plán USB modulu (TOP).....	71
	B.6 Osazovací plán USB modulu (BOT).....	71
	Příloha C Předlohy DPS.....	72
	C.1 Předloha DPS 12 V stabilizátoru.....	72
	C.2 Předloha DPS 5 V stabilizátoru.....	72
	C.3 Předloha DPS USB modulu.....	73
	Příloha D Kusovník.....	74
	Příloha E Model šasi zdroje.....	77
	Příloha F Fotodokumentace.....	79
	Příloha G Data z měření.....	81
	G.1 Zatěžovací charakteristika 12 V kanálu 1.....	81
	G.2 Zatěžovací charakteristika 12 V kanálu 2.....	82
	G.3 Zatěžovací charakteristika 5 V kanálu.....	82
	Příloha H Schéma zapojení testovacího modulu stabilizátoru z diskretních součástek.....	83

## Seznam symbolů a zkratek

Značka	Popisek	Jednotka
$A$	Napětové zesílení operačního zesilovače	(-)
$ČSN$	Česká státní norma	(-)
$DPS$	Deska plošného spoje	(-)
$ESR$	Ekvivalentní sériový odpor	( $\Omega$ )
$f_r$	Rezonanční frekvence	(Hz)
$H_{FE}$	Stejnsměrný proudový zesilovací činitel tranzistoru	(-)
$I$	Elektrický proud	(A)
$I_b$	Proud bázi tranzistoru	(A)
$I_c$	Proud kolektorem tranzistoru	(A)
$IEC$	Mezinárodní elektrotechnická komise	(-)
$I_z$	Výstupní proud zdroje (proud zátěží)	(A)
$k$	Transformační poměr (převod)	(-)
$N$	Počet závitů	(-)
$OZ$	Operační zesilovač	(-)
$P$	Elektrický výkon	(W)
$P_{cmax}$	Maximální ztrátový výkon tranzistoru	(W)
$P_Z$	Ztrátový výkon	(W)
$PWM$	Pulzně šířková modulace	(-)
$R$	Elektrický odpor	(R)
$R_{TH\_HS}$	Tepelný odpor chladiče	( $^{\circ}C/W$ )
$R_{TH\_CHS}$	Tepelný odpor přechodu pouzdro-chladič	( $^{\circ}C/W$ )
$R_{TH\_JC}$	Tepelný odpor přechodu čip-pouzdro	( $^{\circ}C/W$ )
$S$	Zdánlivý výkon	(VA)
$SMD$	Technologie pro povrchovou montáž	(-)
$T_a$	Teplota okolí	( $^{\circ}C$ )
$THT$	Technologie s drátovými vývody	(-)
$T_{max}$	Maximální teplota čipu polovodičové součástky	( $^{\circ}C$ )
$U$	Elektrické napětí	(V)
$U_{be}$	Napětí mezi bázi a emitorem tranzistoru	(V)
$U_{ce}$	Napětí mezi kolektorem a emitorem tranzistoru	(V)
$u_d$	Diferenční napětí mezi vstupy operačního zesilovače	(V)
$u_D(t)$	Okamžitá hodnota stejnosměrného napětí na výstupu usměrňovače	(V)
$U_{in}$	Vstupní napětí stabilizátoru	(V)
$U_o$	Výstupní napětí operačního zesilovače	(V)
$U_{out}$	Výstupní napětí napájecího zdroje	(V)
$U_p$	Prahové napětí polovodičové diody	(V)
$U_{ref}$	Referenční napětí	(V)
$U_{sek}$	Efektivní hodnota výstupního napětí transformátoru	(V)
$U_{sense}$	Napětí mezi bázi a emitorem tranzistoru nadproudové ochrany	(V)
$U_{ss}$	Stejnsměrná složka napětí na výstupu usměrňovače	(V)
$U_1$	Vstupní napětí	(V)
$U_2$	Výstupní napětí	(V)
$USB$	Univerzální sériová sběrnice	(-)
$\Delta U$	Rozdílové napětí	(V)
$\Delta u_{pp}$	Zvlnění (střídavá složka napětí na výstupu usměrňovače/zdroje)	(V)
$\phi$	Magnetický tok	(Wb)
$\omega$	Úhlová frekvence	( $s^{-1}$ )

## Seznam obrázků

<i>Obr. 1.1</i>	<i>Obecné blokové schéma lineárního síťového zdroje napětí</i>	<i>3</i>
<i>Obr. 1.2</i>	<i>Zjednodušené schéma lineárního stabilizátoru napětí</i>	<i>4</i>
<i>Obr. 1.3</i>	<i>Blokové schéma sériového stabilizátoru (rezistor <math>R_z</math> představuje zátěž stabilizátoru)</i>	<i>6</i>
<i>Obr. 1.4</i>	<i>Nadproudová ochrana sériového stabilizátoru</i>	<i>6</i>
<i>Obr. 1.5</i>	<i>Zatěžovací charakteristika (<math>U_2 = f(I_z)</math>) stabilizátoru s nadproudovou ochranou (orientačně)</i>	<i>7</i>
<i>Obr. 1.6</i>	<i>Zatěžovací charakteristika (<math>U_2 = f(I_z)</math>) stabilizátoru s nadproudovou ochranou typu Foldback (orientačně)</i>	<i>7</i>
<i>Obr. 1.7</i>	<i>Zapojení třísvorkových stabilizátorů řady 78xx a 79xx (orientačně)</i>	<i>9</i>
<i>Obr. 1.8</i>	<i>Zapojení třísvorkových stabilizátorů LM 317 a LM 337 (orientačně)</i>	<i>9</i>
<i>Obr. 1.9</i>	<i>Blokové schéma paralelního stabilizátoru (rezistor <math>R_z</math> představuje zátěž stabilizátoru)</i>	<i>10</i>
<i>Obr. 1.10</i>	<i>Zapojení zdroje referenčního napětí TL 431</i>	<i>11</i>
<i>Obr. 1.11</i>	<i>Zapojení nesymetrického zdroje se stabilizátorem kladného napětí řady 78xx</i>	<i>11</i>
<i>Obr. 1.12</i>	<i>Zapojení nesymetrického zdroje se stabilizátorem záporného napětí řady 79xx</i>	<i>12</i>
<i>Obr. 1.13</i>	<i>Zapojení symetrického zdroje se dvěma identickými nesymetrickými zdroji</i>	<i>12</i>
<i>Obr. 1.14</i>	<i>Zapojení symetrického zdroje se stabilizátorem kladného a záporného napětí</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 1.15</i>	<i>Zapojení symetrického zdroje s operačním zesilovačem</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 1.16</i>	<i>Zapojení stabilizátorů řady 78xx a 79xx s proudovým posílením</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 2.1</i>	<i>Blokové schéma zdroje</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 2.2</i>	<i>Výkres síťového konektoru C-14 [21]</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 2.3</i>	<i>Principiální schéma transformátoru</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2.4</i>	<i>Schéma zapojení transformátoru</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 2.5</i>	<i>Štítek použitého transformátoru</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 2.6</i>	<i>Schéma zapojení jednofázového můstkového usměrňovače</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 2.7</i>	<i>Časový průběh napětí na vstupu usměrňovače <math>u(t)</math> (modrý průběh) a výstupního napětí <math>u_d(t)</math> (černý průběh) (orientačně)</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 2.8</i>	<i>Časový průběh napětí na vyhlazovacím kondenzátoru (orientačně)</i>	<i>23</i>

<i>Obr. 2.9 Schéma zapojení vyhlazovacího filtru 5 V zdroje</i> .....	24
<i>Obr. 2.10 Schéma zapojení usměrňovače a vyhlazovacího filtru 12 V zdrojů</i> .....	25
<i>Obr. 2.11 Stabilizační charakteristika (<math>U_2 = f(U_1)</math>) modulu z diskrétních součástek s výstupním napětím 5 V (<math>U_1</math> vstupní napětí, <math>U_2</math> výstupní napětí) .....</i>	26
<i>Obr. 2.12 Stabilizační charakteristika (<math>U_2 = f(U_1)</math>) modulu s integrovaným stabilizátorem LM 723 s výstupním napětím 12 V (<math>U_1</math> vstupní napětí, <math>U_2</math> výstupní napětí) .....</i>	26
<i>Obr. 2.13 Blokové schéma integrovaného stabilizátoru LM 723 [20]</i> .....	27
<i>Obr. 2.14 Základní zapojení stabilizátoru LM 723 s výstupním napětím menším než 7, 15 V (<math>V_I</math> - vstupní napětí, <math>V_O</math> - výstupní napětí) [20]</i> .....	28
<i>Obr. 2.15 Schéma zapojení 5 V / 5 A stabilizátoru</i> .....	29
<i>Obr. 2.16 Obvod detekce nadproudu</i> .....	31
<i>Obr. 2.17 Základní zapojení stabilizátoru LM 723 s výstupním napětím větším než 7, 15 V (<math>V_I</math> - vstupní napětí, <math>V_O</math> - výstupní napětí) [20]</i> .....	33
<i>Obr. 2.18 Schéma zapojení 12 V / 2 A stabilizátoru</i> .....	34
<i>Obr. 2.19 Zjednodušený model skutečného kondenzátoru</i> .....	37
<i>Obr. 2.20 Kmitočtová závislost impedance skutečných kondenzátorů (1 nF, 10 nF, 100 nF) [7]</i> .....	38
<i>Obr. 2.21 Schéma zapojení symetrického 12 V výstupu zdroje</i> .....	40
<i>Obr. 2.22 Zatěžovací charakteristika 5 V stabilizátoru</i> .....	41
<i>Obr. 2.23 Zatěžovací charakteristika 12 V stabilizátoru</i> .....	42
<i>Obr. 2.24 Časové průběhy vstupního napětí <math>u_{in}</math> a výstupního napětí <math>u_{out}</math> 5 V stabilizátoru při odběru proudu 5 A</i> .....	43
<i>Obr. 2.25 Časové průběhy vstupního napětí <math>u_{in}</math> a výstupního napětí <math>u_{out}</math> 12 V stabilizátoru při odběru proudu 2 A</i> .....	43
<i>Obr 3.1 desky plošných spojů (vlevo 5 V modul, uprostřed a zprava 12 V moduly)</i> .....	46
<i>Obr 3.2 Pohled na moduly zdrojů umístěné v šasi</i> .....	47
<i>Obr. 3.3 Vizualizace šasi napájecího zdroje</i> .....	48
<i>Obr 3.4 Popis ovládacích prvků zdroje</i> .....	49
<i>Obr. 4.1 Ilustrační snímek z měřicího pracoviště</i> .....	50
<i>Obr. 4.2 Elektronická aktivní zátěž</i> .....	51
<i>Obr. 4.3 Zatěžovací charakteristika 5 V kanálu</i> .....	52
<i>Obr. 4.4 Zatěžovací charakteristiky 12 V kanálů</i> .....	53
<i>Obr. 4.5 Oscilogram s časovým průběhem výstupního napětí 5 V kanálu</i> .....	54
<i>Obr. 4.6 Oscilogram s časovým průběhem výstupního napětí 12 V kanálu I</i> .....	55

<i>Obr. 4.7 Oscilogram s časovým průběhem výstupního napětí 12 V kanálu 2.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 4.8 Uspořádání měřicí sestavy pro testování dle normy</i>	
<i>ČSN EN 61000-4-3 ed.3 .....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 4.9 Uspořádání měřicí sestavy pro testování dle normy</i>	
<i>ČSN EN 61000-4-6 ed.4 s elektromagnetickou kleštinou EM 101 .....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 4.10 Uspořádání měřicí sestavy pro testování dle normy</i>	
<i>ČSN EN 61000-4-6 ed.4 s vazební sítí CDN M2 .....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 4.11 Naměřené kmitočtové spektrum vyzařovaných emisí .....</i>	<i>59</i>

## Seznam tabulek

<i>Tab. 1.1 Přehled stabilizátorů kladného napětí řady 78xx [25] .....</i>	<i>8</i>
<i>Tab. 1.2 Přehled stabilizátorů záporného napětí řady 79xx [26] .....</i>	<i>8</i>
<i>Tab. 2.1 Doporučené kapacity k odrušení různých kmitočtových pásem [3] .....</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 4.1 Výsledky měření ztrátového výkonu na řídicích tranzistorech .....</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 4.2 Změřené parametry a parametry ze simulace 5 V / 5 A kanálu zdroje .....</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 4.3 Změřené parametry a parametry ze simulace 12 V / 2 A kanálů zdroje .....</i>	<i>60</i>

## Úvod

V laboratořích FEL ZČU se při zkouškách EMC používají k napájení některých testovaných zařízení spínané zdroje, které jsou v dnešní době velice oblíbené díky své obecně vysoké účinnosti při malých rozměrech oproti zdrojům lineárním. Jejich zastoupení je majoritní ve všech odvětvích elektroniky.

Hlavní odlišností spínaných zdrojů od zdrojů lineárních je způsob řízení výkonového řídicího prvku a tím i řízení velikosti výstupního napětí. U spínaných zdrojů je výkonový řídicí prvek periodicky spínán a rozepínán, tím je řízena střední hodnota výstupního napětí. Pracuje tedy ve spínacím režimu a díky tomu na něm vzniká jen minimální výkonová ztráta. Pro řízení výkonového prvku se nejčastěji používá PWM signál o kmitočtu řádově desítek kHz až jednotek MHz, což umožňuje použít konstrukčně malé vysokofrekvenční transformátory. Vyplývá z tohoto ale jedna nežádoucí vlastnost a tou je vznikající vysokofrekvenční rušení generované a vyzářované těmito zdroji.

Lineární napájecí zdroje proto nalézají uplatnění v aplikacích, kde toto rušení má vliv na funkčnost napájeného zařízení. Často těmito zařízeními bývají nízkošumové zesilovače, audiotechnika a měřicí technika.

Cílem této bakalářské práce je navrhnout a zhotovit lineární víceúrovňový napájecí zdroj s jedním nesymetrickým výstupem  $5\text{ V} / 5\text{ A}$  a jedním symetrickým výstupem  $\pm 12\text{ V} / 2\text{ A}$ . Navrhovaný zdroj je určen pro napájení zařízení testovaných v bezodrazové komoře při zkouškách elektromagnetické kompatibility (dále jen EMC), z čehož vyplývá požadavek na jeho odolnost proti elektromagnetickému rušení. Ani zdroj sám o sobě nesmí generovat příliš silné elektromagnetické rušení, aby nedocházelo k zatížení výsledků zkoušek EMC chybou způsobenou tímto rušením. Z tohoto důvodu byla zvolena právě topologie lineárního (spojitě regulovaného) zdroje. Lineární zdroje sice mají menší účinnost a větší rozměry než zdroje spínané stejného výkonu, ale jejich elektromagnetické rušení je minimální oproti spínaným zdrojům.

Práce je rozdělena na několik částí. V první části práce bude popsána zvolená koncepce zdroje. Následovat bude část práce zabývající se návrhem a výběrem vhodných komponent dílčích funkčních bloků zdroje od síťového transformátoru až po výstup zdroje. Předposlední část bude věnována tepelnému dimenzování výkonových částí a mechanické konstrukci zdroje. Poslední část práce bude věnována měření parametrů a testování zhotoveného zdroje. Měřením parametrů zdroje bude ověřena správnost návrhu a konstrukce celého zařízení.

# 1 Lineární napájecí zdroje

Lineární napájecí zdroj je zařízení, které k řízení a stabilizaci výstupního napětí využívá spojitý regulátor označovaný jako napěťový, respektive proudový stabilizátor (pak se jedná o zdroj proudu).

Lineární zdroje lze rozdělit do několika skupin. Podle výkonu je lze rozdělit na:

- zdroje malého výkonu,
- zdroje středního výkonu,
- zdroje velkého výkonu.

Podle regulované výstupní veličiny je lze rozdělit na:

- napěťové zdroje,
- proudové zdroje.

Podle strany "vyššího napětí" je lze rozdělit na:

- síťové zdroje (napájené z rozvodné sítě),
- bateriové zdroje (napájené z baterie nebo akumulátoru),
- zdroje napájené ze solárních panelů,
- a jiné zdroje.

Podle uspořádání a polarity výstupů je lze rozdělit na:

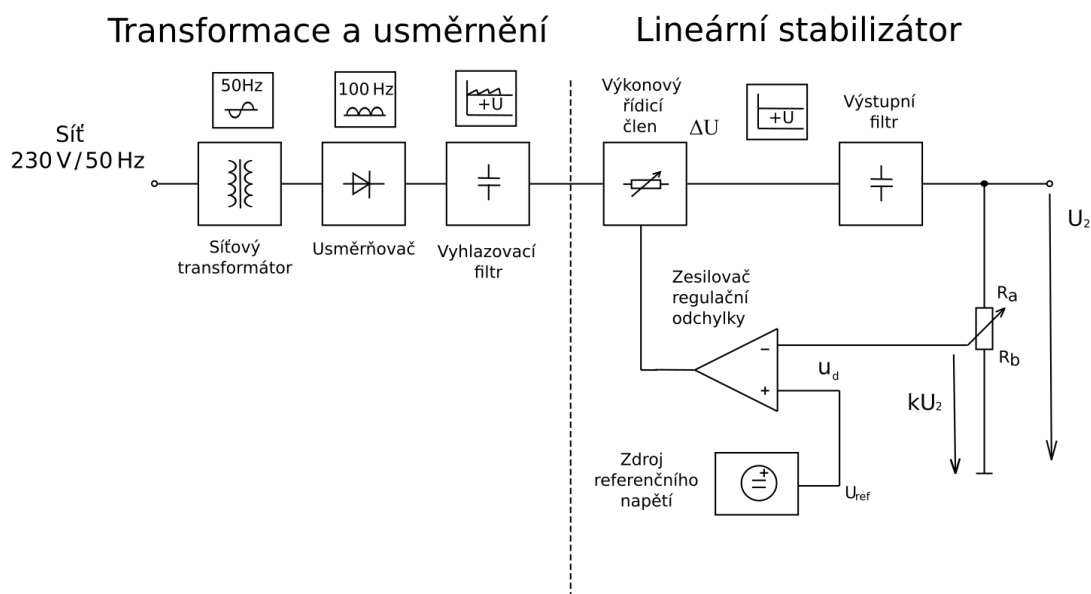
- zdroje kladného napětí,
- zdroje záporného napětí,
- zdroje se symetrickým výstupem,
- zdroje s nesymetrickým výstupem.

Tato práce se dále bude zabývat lineárními napěťovými zdroji napájenými z rozvodné sítě se symetrickým i nesymetrickým výstupem.



## 1.1 Topologie síťového lineárního zdroje napětí

Od síťového zdroje je požadováno stejnosměrné výstupní napětí, v ideálním případě bez superponované střídavé složky a bez závislosti na změně proudového zatížení. Z těchto požadavků vychází i topologické uspořádání tohoto typu zdroje. Popis bude prováděn v souladu s blokovým schématem, které je uvedeno na Obr. 1.1.



Obr. 1.1 Obecné blokové schéma lineárního síťového zdroje napětí

Vstupní napájecí napětí pro stabilizátor je získáno usměrněním a filtrací napětí z rozvodné sítě (nejčastěji 230 V / 50 Hz). Toto napětí je sníženo síťovým transformátorem na určitou nižší hladinu, jejíž velikost se mění s kolísáním napětí v rozvodné síti a s odběrem proudu při zatížení zdroje. S touto změnou je potřeba počítat v průběhu návrhu zdroje a volit toto napětí vyšší, než je minimální požadované pro správnou funkci stabilizátoru. [1]

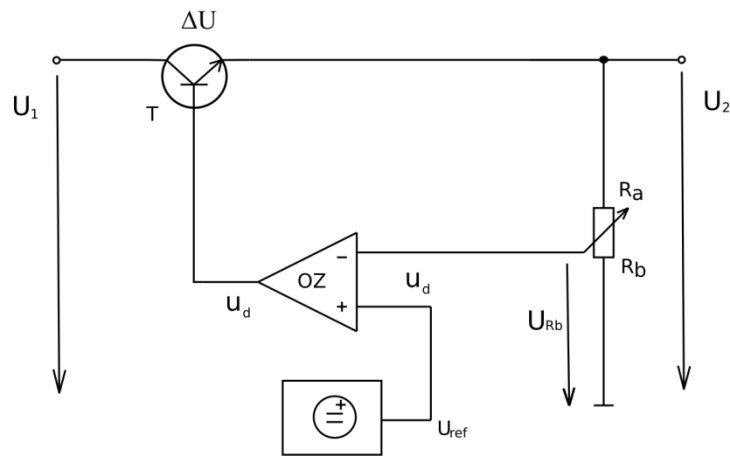
Usměrňovač využívá polovodičové diody a je zpravidla konstruován tak, aby současně sloužil jako zdvojovač kmitočtu. Vyhlažovací filtr je obecně dolní propustí s mezním kmitočtem mnohem nižším, než je kmitočet napětí na výstupu usměrňovače. Nejčastěji se používá kapacitní filtr. [1] Problematika těchto bloků je podrobněji popsána v kapitole 2.

## 1.2 Princip činnosti lineárního stabilizátoru

Úkolem stabilizátoru je nastavit a udržovat konstantní požadované výstupní napětí zdroje  $U_2$ . Řídicí výkonový člen v lineárním stabilizátoru pracuje jako spojitě řízený odpor. Tuto funkci zastává zpravidla bipolární tranzistor vhodně zapojený vůči zátěži zdroje.

Dynamické parametry stabilizátoru a jeho stabilita jsou ovlivňovány kmitočtovými vlastnostmi zpětnovazební regulační soustavy. Ke kmitočtové kompenzaci se používá výstupní filtr, který potlačuje šumová napětí na výstupu stabilizátoru. Krom toho je kmitočtově kompenzován samotný zesilovač regulační odchylky. [1]

Na Obr. 1.2 vidíme zjednodušené zapojení sériového lineárního stabilizátoru napětí se zápornou zpětnou vazbou. Označení sériový stabilizátor vychází ze zapojení řídicího prvku - tranzistoru do série se zátěží. Výstupní napětí  $U_2$  je pomocí zpětnovazební regulační smyčky udržováno na konstantní hodnotě, bez ohledu na kolísání vstupního napětí  $U_1$  a změně proudového zatížení výstupu zdroje. [1]



Obr. 1.2 Zjednodušené schéma lineárního stabilizátoru napětí

Zpětná vazba je zavedena pomocí odporového děliče složeného z rezistorů  $R_a$  a  $R_b$  (v blokovém schématu na Obr. 1.2 znázorněného jako říditelný dělič - potenciometr). Výstup z děliče je přiveden na invertující vstup (-) zesilovače regulační odchylky OZ, který je také označován jako chybový zesilovač. [1] Jedná se o operační zesilovač s napětěvým zesílením v otevřené smyčce  $A_{OL}$  řádově  $10^6$  (teoreticky nekonečným). Čím větší bude napětěvé i proudové zesílení tohoto zesilovače, tím menší bude diferenční napětí  $u_d$  ovlivňované proměnnými parametry na vstupu a výstupu stabilizátoru. Pokud budeme uvažovat teoreticky nekonečné napětěvé zesílení operačního zesilovače, pak bude platit [6]:

$$u_d = \lim_{A_{OL} \rightarrow \infty} \frac{u_o}{A_{OL}} = 0 \text{ (V)}, \quad (1.01)$$

kde  $u_d$  je diferenční napětí mezi neinvertujícím a invertujícím vstupem operačního zesilovače,  $A$  je napětěvé zesílení operačního zesilovače a  $u_o$  je výstupní napětí operačního zesilovače. Operační zesilovač svým výstupem řídí okamžitý odpor tranzistoru  $T$ , a tím

i výstupní napětí stabilizátoru  $U_2$  tak, aby platilo, že diferenční napětí na vstupu zesilovače bude stále velmi malé (ideálně nulové). Z toho vyplývá, že musí být udržován stav:

$$U_{Rb} \approx U_{ref}, \quad (1.02)$$

kde  $U_{Rb}$  je napětí na rezistoru  $R_b$  a  $U_{ref}$  je napětí referenční. Z této závislosti a vztahu pro výstupní napětí nezátíženého odporového děliče lze snadno odvodit vztah pro výstupní napětí  $U_2$ :

$$U_2 = U_{ref} \cdot \frac{R_a + R_b}{R_b} \quad (\text{V}). \quad (1.03)$$

Změnou poměru odporů rezistorů  $R_a$  a  $R_b$  lze snadno upravit velikost výstupního napětí v poměrně širokém rozmezí. [1]

Stabilita zdroje referenčního napětí má zásadní vliv na dlouhodobou a teplotní stabilitu výstupního napětí zdroje  $U_2$ . Důležitým faktorem ovlivňujícím stabilitu zdroje referenčního napětí je jeho teplotní závislost. Řešením jsou zdroje referenčního napětí s tepelně kompenzovanou Zenerovou diodou nebo dokonalejší reference typu Bandgap. Více informací o zdrojích referenčního napětí lze nalézt v [1].

Výkonový řídicí člen je nejčastěji tvořen bipolárním tranzistorem pracujícím v lineárním režimu jako spojitě řízený odpor. Výkonová ztráta  $P_z$ , která na něm vzniká, je úměrná součinu rozdílu vstupního a výstupního napětí stabilizátoru  $\Delta U$  a proudu odebíraného zátěží zdroje  $I_z$ . Tato ztráta je shora omezena maximálním ztrátovým výkonem tranzistoru  $P_{max}$ . Tranzistor proto musí být dostatečně výkonově dimenzován. [1]

Dále je potřeba odvádět z tranzistoru vzniklé teplo, aby nedošlo k jeho tepelné destrukci. Řešením je umístit jej na chladič s dostatečnými rozměry, případně zvolit aktivní metodu chlazení pomocí ventilátoru nebo proudící kapaliny.

Velká výkonová ztráta vede obecně k velmi špatné účinnosti lineárních zdrojů. Chladiče potřebné ke chlazení výkonového řídicího prvku také nemají zanedbatelné rozměry a zvětšují tak rozměry a hmotnost celého zařízení. [1]

Stabilizátory lze rozdělit dle zapojení výkonového řídicího prvku vůči zátěži zdroje do dvou skupin:

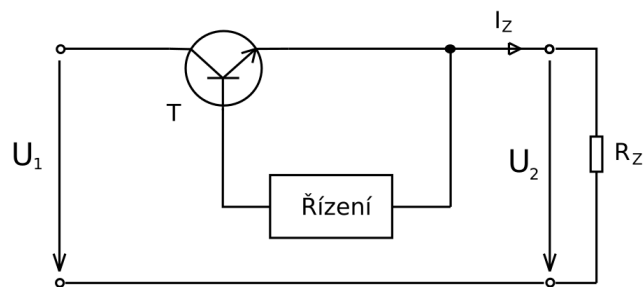
- sériové stabilizátory,
- paralelní stabilizátory.

### 1.2.1 Sériové stabilizátory

Označení sériový stabilizátor vychází ze zapojení výkonového řídicího prvku do série se zátěží zdroje, jak je patrné z blokového schématu na Obr. 1.3. Tato topologie stabilizátoru umožňuje velmi účinně omezovat velké změny výstupního napětí  $U_2$  při skokových změnách proudového zatížení zdroje.

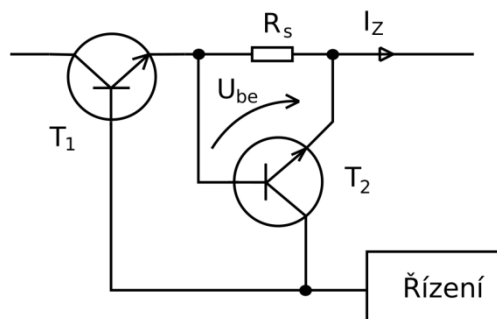
Napěťový úbytek  $\Delta U$  na řídicím prvku je za normálních podmínek podstatně menší než napětí na zátěži stabilizátoru  $U_2$ . Proud protékající řídicím prvkem je stejný jako proud protékající zátěží. Sériové stabilizátory jsou tedy vhodné pro zdroje vyšších výkonů.

Problém nastane ve chvíli, kdy dojde ke zkratu na zátěži. Pak se na výkonovém regulačním prvku objeví celé vstupní napětí  $U_1$  a teče jím zkratový proud, což může vést k tepelné destrukci řídicího prvku. Je tedy nutné stabilizátor vybavit nadproudovou ochranou reagující na nadproud s větší rychlostí než tepelné děje vedoucí k poškození řídicího prvku. [1]



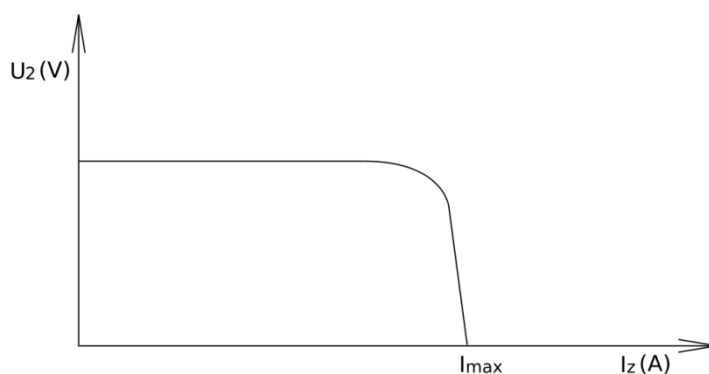
Obr. 1.3 Blokové schéma sériového stabilizátoru (rezistor  $R_z$  představuje zátěž stabilizátoru)

Nadproudovou ochranu lze realizovat mnoha způsoby s rozdílnými zatěžovacími charakteristikami. Jedno ze základních zapojení nadproudové ochrany je uvedeno na Obr. 1.4.



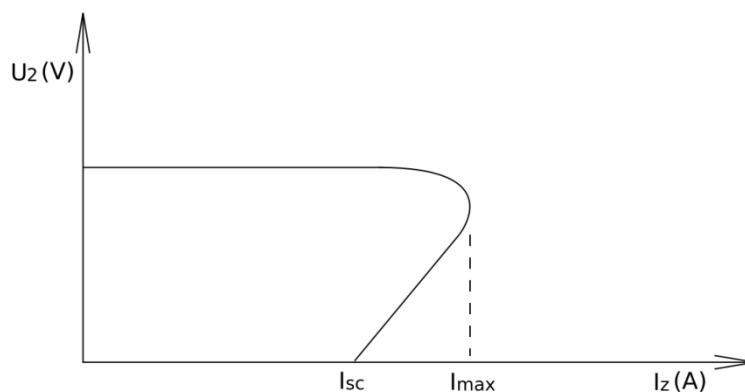
Obr. 1.4 Nadproudová ochrana sériového stabilizátoru

Do série s výkonovým řídicím prvkem je zapojen snímací rezistor proudu  $R_s$ , který slouží jako jednoduchý převodník proudu na napětí. Velikost napěťového úbytku na tomto rezistoru je úměrná velikosti protékajícího proudu  $I_z$  a velikosti odporu tohoto rezistoru. Tento rezistor je současně připojen mezi bází a emitor tranzistoru  $T_2$ . Pokud protékající proud vyvolá napěťový úbytek na rezistoru  $R_s$  větší, než je prahové napětí  $U_{be}$  tranzistoru  $T_2$ , dojde k jeho otevření. Tím dojde k omezení řídicího proudu do tranzistoru  $T_1$ , který se okamžitě přivře, a sníží tak výstupní napětí stabilizátoru. Velikost maximálního proudu je dána velikostí odporu snímacího rezistoru  $R_s$ .



Obr. 1.5 Zatěžovací charakteristika ( $U_2 = f(I_z)$ ) stabilizátoru s nadproudovou ochranou (orientačně)

Ze zatěžovací charakteristiky na Obr. 1.5 je patrná nevýhoda této nadproudové ochrany. Při překročení maximálního proudu  $I_{max}$  dojde k omezení napětí na zátěži, tím se zvedne úbytek napětí na výkonovém řídicím prvku  $\Delta U$ , kterým současně protéká i proud  $I_{max}$ . Na výkonovém řídicím prvku tak vznikne maximální možná výkonová ztráta  $P_z$ , na kterou musí být výkonový prvek a jeho chlazení dostatečně dimenzováno. Naskýtá se řešení tohoto problému například v podobě nadproudové ochrany typu Foldback. [1]



Obr. 1.6 Zatěžovací charakteristika ( $U_2 = f(I_z)$ ) stabilizátoru s nadproudovou ochranou typu Foldback (orientačně)

Mezi sériové stabilizátory patří velká skupina označovaná jako třísvorkové stabilizátory. Tento typ stabilizátorů je v praxi nejvíce rozšířen díky svojí snadné implementaci, minimálnímu množství potřebných okolních součástek a nízké ceně. V pouzdře třísvorkového stabilizátoru je integrován celý sériový zpětnovazební stabilizátor i s výkonovým řídicím členem a tepelnou, případně nadproudovou ochranou. Pouzdro pak má jednu vstupní svorku, jednu výstupní svorku a GND svorku. [2] Na trhu je celá řada provedení nejčastěji v pouzdrech TO 220 a TO 92 (THT provedení), dále pak v pouzdře DPAK nebo SOT 89 (SMD provedení).

Třísvorkové stabilizátory lze rozdělit na stabilizátory s pevným výstupním napětím a nastavitelným výstupním napětím. Obvody s pevným výstupním napětím nesou označení 78xx pro stabilizaci kladného napětí a 79xx pro stabilizaci záporného napětí. Další dvě číslice (místo xx) udávají hodnoty výstupních napětí stabilizátorů. Stručný přehled stabilizátorů v řadě 78xx a 79xx ukazuje Tab. 1.1 a Tab. 1.2

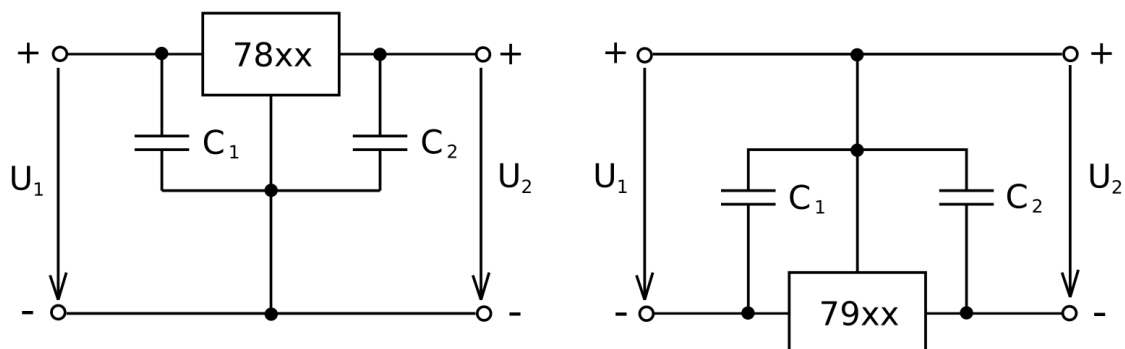
Tab. 1.1 Přehled stabilizátorů kladného napětí řady 78xx [25]

Označení	Výstupní napětí	Výstupní proud
7805	5 V	1 A
7806	6 V	
7808	8 V	
7885	8,5V	
7809	9 V	
7812	12 V	
7815	15 V	
7818	18 V	
7824	24 V	

Tab. 1.2 Přehled stabilizátorů záporného napětí řady 79xx [26]

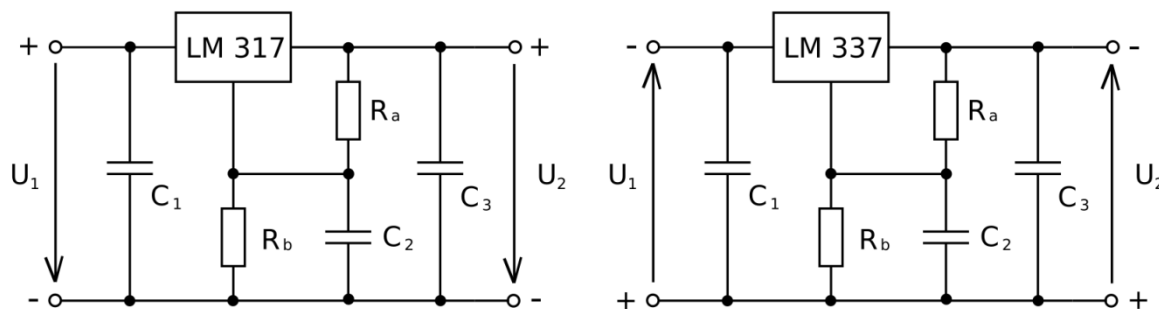
Označení	Výstupní napětí	Výstupní proud
7905	- 5 V	1 A
7908	- 8 V	
7912	- 12 V	
7915	- 15 V	

Dále jsou na trhu varianty 78Lxx a 79Lxx s výstupním proudem 0,1 A a 78Sxx a 79Sxx s výstupním proudem 2 A.



Obr. 1.7 Zapojení třísvorkových stabilizátorů řady 78xx a 79xx (orientačně)

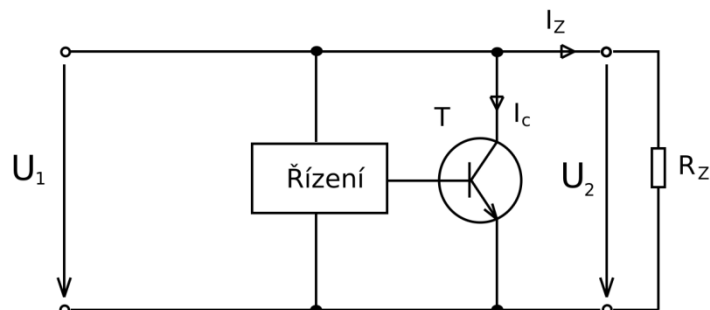
Mezi třísvorkovými stabilizátory s nastavitelným výstupním napětím je nejčastější variantou integrovaný stabilizátor kladného napětí LM 317 a záporného napětí LM 337, jejichž výstupní napětí lze nastavit v rozmezí 1,2 V až 37 V poměrem odporového děliče  $R_a$  a  $R_b$  zapojeného mezi výstupní svorkou a GND svorkou. Maximální výstupní proud tohoto stabilizátoru je 1 A. [1] Prodává se v pouzdře TO 220 (THT provedení), případně v pouzdře DPAK nebo SO 8 (SMD provedení).



Obr. 1.8 Zapojení třísvorkových stabilizátorů LM 317 a LM 337 (orientačně)

### 1.2.2 Paralelní stabilizátory

Označení paralelní stabilizátor opět vychází ze zapojení výkonového řídicího prvku vůči zátěži. U tohoto typu stabilizátoru je výkonový řídicí prvek zapojen k zátěži paralelně, jak je patrné také z blokového schématu uvedenému na Obr. 1.9.



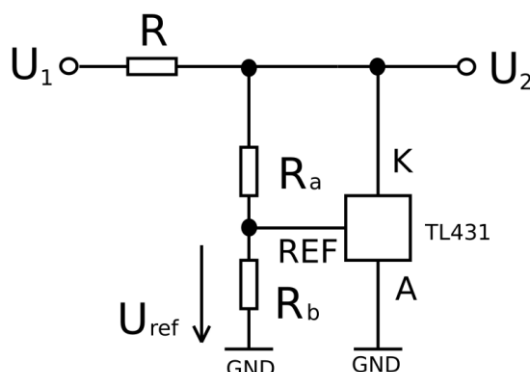
Obr. 1.9 Blokové schéma paralelního stabilizátoru (rezistor  $R_z$  představuje zátěž stabilizátoru)

Řídicí obvod řídí výkonový řídicí člen tak, aby na zátěži bylo požadované konstantní napětí. Z této konfigurace jsou patrné výhody a nevýhody tohoto typu stabilizátoru. Pokud poklesne proud zátěže  $I_z$ , vzroste proud protékající řídicím prvkem  $I_c$ . Na řídicím prvku je také celé výstupní napětí zdroje  $U_2$ , je tedy zřejmé, že bude výkonově dosti zatěžován. Pokud dojde k odpojení zátěže, bude všechen výkon právě na řídicím prvku, ten proto musí být na tento výkon dostatečně dimenzován. To je značnou nevýhodou tohoto typu stabilizátoru. Další nevýhodou je, že výkonový řídicí prvek musí udržet celé výstupní napětí  $U_2$ . Výhodou je, že paralelní stabilizátor je z principu odolný vůči zkratu a není potřeba jej doplňovat o žádný obvod nadproudové ochrany. Pokud se dostane výstup stabilizátoru do zkratu, nepoteče přes výkonový řídicí prvek žádný proud. Proti zkratu je ale chráněn pouze výkonový řídicí člen, nikoliv však zdroj vstupního napětí  $U_1$ , který může být zkratem poškozen. [1] Další výhodou je, že paralelní stabilizátor je odolný proti případnému přivedení vnějšího napětí na výstup zdroje, které může být například způsobeno připojením zátěže s nabitými filtračními kondenzátory na svém vstupu. Proud vyvolaný tímto vnějším napětím se uzavře skrze výkonový řídicí člen a zbytek stabilizátoru tak nebude ohrožen případným přepětím. [1]

Obecně jsou paralelní stabilizátory vhodné pro nízkovýkonové aplikace, kde požadujeme stálé napětí. Jejich využití není tak masivní jako v případě sériových stabilizátorů. Velmi často se používají například jako zdroje referenčního napětí. Mezi nejpoužívanější paralelní stabilizátory patří například napěťová reference TL 431.



Výstupní napětí této reference lze nastavit v rozmezí 2,5 V až 36 V při odběru proudu maximálně 100 mA. Výstupní napětí lze nastavit pomocí externího odporového děliče. [2] Základní zapojení reference TL 431 je uvedeno na Obr. 1.10.



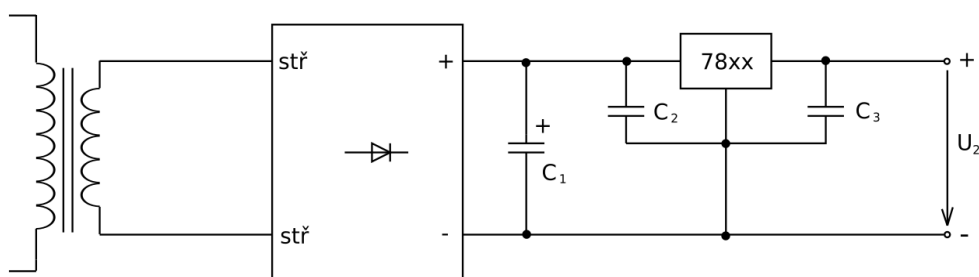
Obr. 1.10 Zapojení zdroje referenčního napětí TL 431

Napěťová reference TL 431 se standardně prodává v pouzdrech TO 92 (THT), TO 252 (SMD) a SOT 89 (SMD).

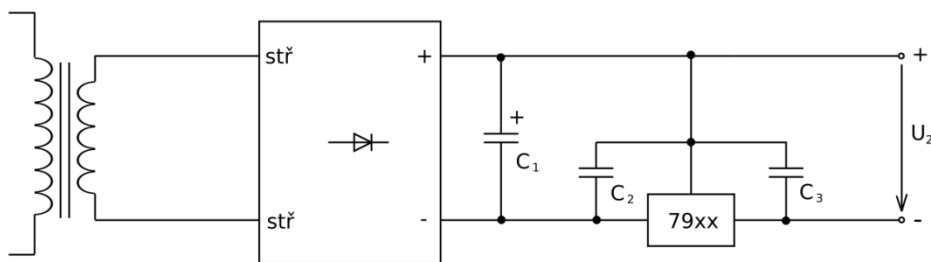
### 1.3 Zdroje s nesymetrickým výstupem

Výstupní napětí nesymetrického zdroje je pouze jedné polaritě (kladné nebo záporné). Zdroj označovaný jako nesymetrický má tedy pouze dvě výstupní svorky. Jedna svorka má kladný (+), respektive záporný potenciál (-) a druhá nulový potenciál (GND). Nesymetrické zdroje mají v praxi majoritní zastoupení, protože většina elektroniky vyžaduje právě nesymetrické napájení.

Nesymetrickými stabilizátory jsou například výše popsané obvody z řad 78xx a 79xx. Výhodou je, že tyto zdroje vyžadují síťový transformátor pouze s jedním sekundárním vinutím. [1] Příklady zapojení nesymetrických zdrojů kladného i záporného napětí jsou na Obr. 1.11 a Obr 1.12.



Obr. 1.11 Zapojení nesymetrického zdroje se stabilizátorem kladného napětí řady 78xx



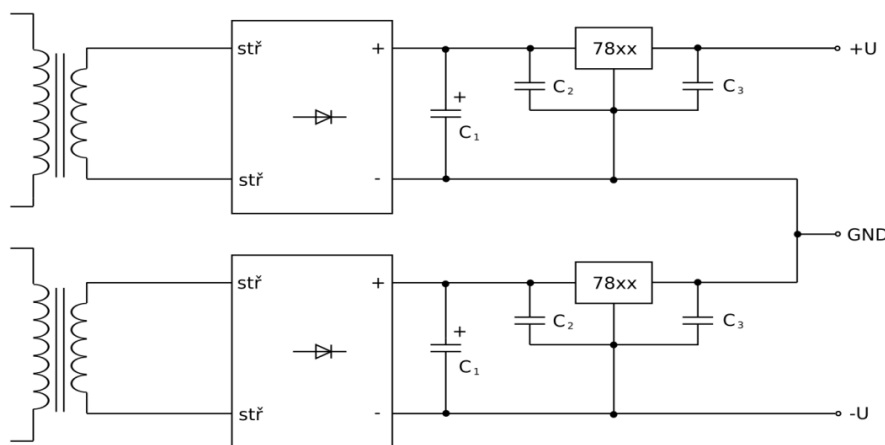
Obr. 1.12 Zapojení nesymetrického zdroje se stabilizátorem záporného napětí řady 79xx

Kondenzátory  $C_1$  a  $C_2$  připojené paralelně ke stabilizátorům slouží jako kmitočtová kompenzace zabráňující rozkmitání zpětnovazební regulační smyčky, která je uvnitř integrovaného stabilizátoru.

#### 1.4 Zdroje se symetrickým výstupem

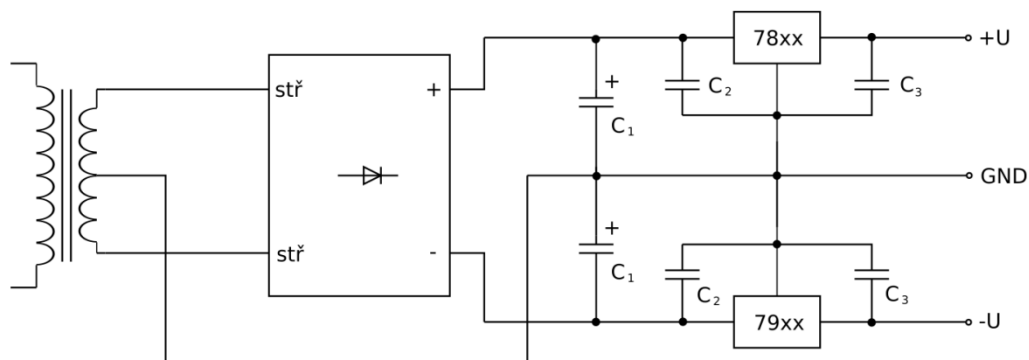
Symetrický výstup zdroje je tvořen svorkami s kladným potenciálem (+), záporným potenciálem (-) a nulovým potenciálem označovaným jako střed nebo GND. Absolutní hodnoty napětí můžou být obecně rozdílné, ale v případě symetrického výstupu jsou shodné (symetrické kolem nulového potenciálu). Zdroje se symetrickým výstupem se používají převážně pro napájení analogových systémů s operačními zesilovači, které vyžadují obě polarities napájecího napětí pro svoji správnou funkci při zpracovávání střídavých signálů. [1]

Zdroj se symetrickým výstupem lze realizovat několika způsoby. Nejjednodušší možnost realizace je spojení výstupů dvou identických nesymetrických zdrojů. Nevýhodou je nutnost použití transformátoru se dvěma oddělenými sekundárními vinutími (případně dvou samostatných transformátorů). [1] Zapojení symetrického zdroje se dvěma identickými nesymetrickými zdroji je vyobrazené na Obr. 1.13.



Obr. 1.13 Zapojení symetrického zdroje se dvěma identickými nesymetrickými zdroji

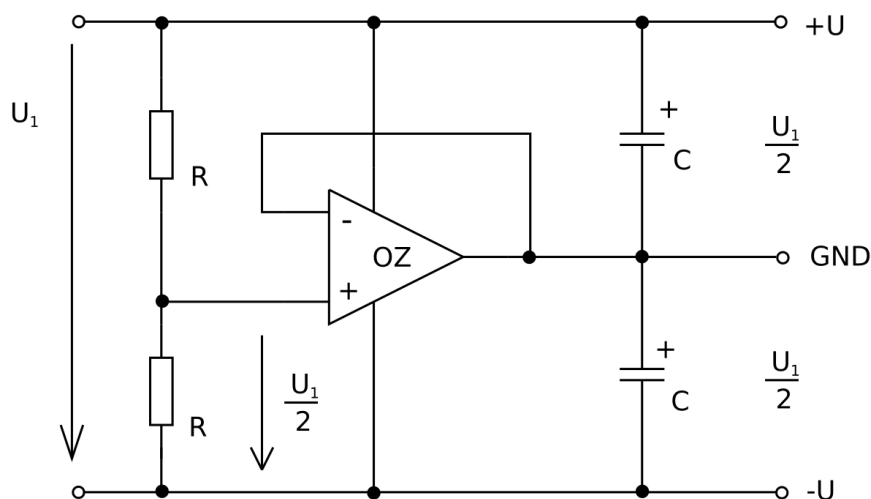
Další variantou zapojení symetrického zdroje je použití kombinace stabilizátoru kladného a záporného napětí s jedním transformátorem, který má vyvedený střed sekundárního vinutí. Výhodou je použití pouze jednoho usměrňovače. Zapojení této varianty symetrického zdroje je na Obr. 1.14.



Obr. 1.14 Zapojení symetrického zdroje se stabilizátorem kladného a záporného napětí

Kondenzátory  $C_1$  a  $C_2$  plní stejnou funkci jako v případě nesymetrických zdrojů. Na trhu je samozřejmě celá škála dalších integrovaných stabilizátorů jak kladného, tak záporného napětí, případně kombinované integrované obvody obsahující kladný i záporný stabilizátor v jednom pouzdře. Vyrábějí se jak v pouzdech pro technologii THT i SMD osazení. [1]

Zvláštní variantou je symetrický zdroj vytvořený ze zdroje nesymetrického za pomoci děliče napětí a operačního zesilovače. Schéma zapojení takového zdroje je uvedeno na Obr. 1.15.



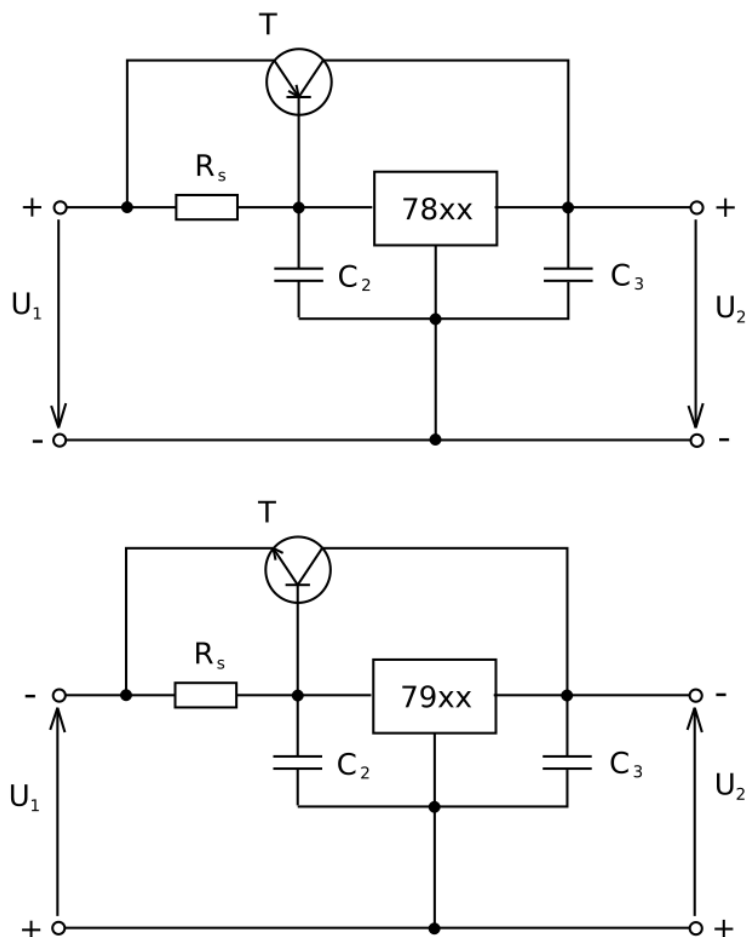
Obr. 1.15 Zapojení symetrického zdroje s operačním zesilovačem

Nejedná se přímo o stabilizátor napětí, ale jde pouze o určitý dělič napětí. Vstupní nesymetrické napětí  $U_I$  je rozděleno pomocí napěťového děliče (rezistory R) na polovinu a přivedeno na neinvertující vstup operačního zesilovače (+). Operační zesilovač je zde v zapojení napěťového sledovače. Udržuje na svém výstupu takové napětí, aby mezi invertujícím a neinvertujícím vstupem bylo minimální, ideálně nulové napětí (viz rovnice (1.01)). To znamená, že na výstupu  $OZ$  bude opět napětí  $U_I/2$ . Díky poměrně vysoké vstupní impedanci operačního zesilovače je napěťový dělič jen minimálně zatěžován odebíraným proudem a jeho výstupní napětí tak zůstává konstantní i při změně proudového zatížení výstupu zdroje. Zesilovač tedy plní funkci impedančního přizpůsobení a celý obvod tvoří umělý střed GND.

Tento obvod není určený pro velké výkony, odebíraný proud je omezen maximálním výstupním proudem použitého operačního zesilovače. Vhodný je například pro napájení jiných obvodů s operačními zesilovači vyžadujícími symetrické napájení. Zapojení lze ale doplnit o proudový zesilovač v podobě bipolárních tranzistorů na výstupu. Dále lze výstup zapojení doplnit o kladný a záporný stabilizátor napětí z řad 78xx a 79xx. Nevýhodou tohoto obvodu je, že pokud požadujeme na výstupu určité napětí, musíme na vstup přivést dvojnásobek tohoto napětí. Velikost vstupního napětí zdroje je limitována maximálním napájecím napětím použitého operačního zesilovače.

### 1.5 Proudové posílení stabilizátorů

Pokud je požadován větší výstupní proud stabilizátoru, je potřeba obvod doplnit o proudové posílení. Tím bývají zpravidla bipolární tranzistory, případně kaskáda bipolárních tranzistorů v tzv. Darlingtonově zapojení. Jako příklad je na Obr. 1.16 uvedeno zapojení stabilizátorů řady 78xx a 79xx s proudovým posílením.



Obr. 1.16 Zapojení stabilizátorů řady 78xx a 79xx s proudovým posílením

Princip činnosti je následující. Úkolem stabilizátoru je udržet konstantní výstupní napětí  $U_2$ . Proud protékající stabilizátorem současně vytváří úbytek napětí na snímacím rezistoru  $R_s$ , ke kterému je paralelně připojen přechod báze-emitor tranzistoru  $T$ . Pokud úbytek napětí překoná prahovou hodnotu napětí  $U_{be}$ , dojde k otevření tranzistoru, a tak proud do zátěže poteče skrz tranzistor. Stabilizátor tak bude zatěžován jen minimálním proudem. Velikost odporu rezistoru  $R_s$  je stanovena z následující rovnice:

$$R_s = \frac{U_{be}}{I_z} \approx \frac{0,7}{I_z} \quad (\Omega), \quad (1.04)$$

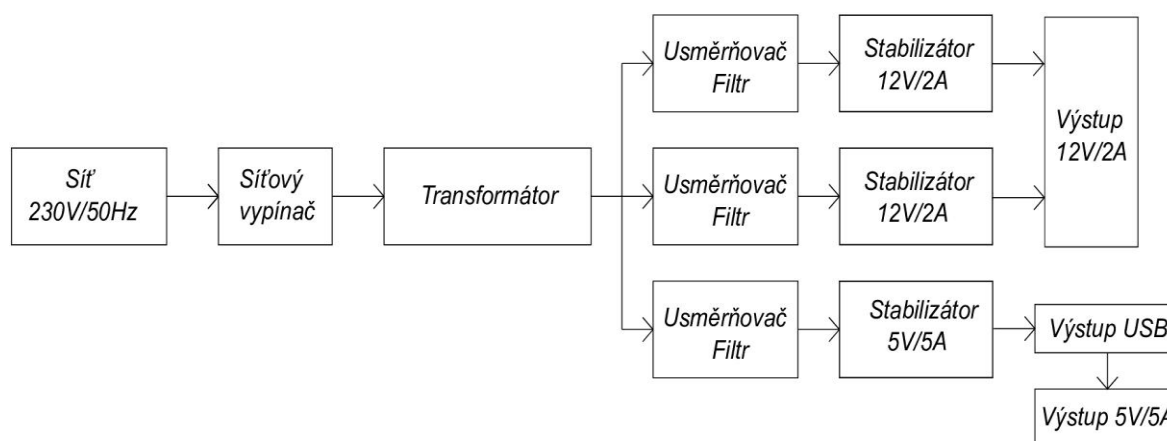
kde  $I_z$  je velikost proudu do zátěže, při které má dojít k otevření tranzistoru  $T$ , a tím k přemostění stabilizátoru. Je vhodné tento proud volit o něco menší, než je maximální povolený proud stabilizátoru. Pro stabilizování kladného napětí se použije tranzistor typu PNP a pro stabilizování záporného napětí tranzistor typu NPN. [2]

## 2 Návrh zdroje

Navrhovaný zdroj je složen z více funkčních bloků, které jsou vyobrazeny v blokovém schématu na Obr. 2.1. Toto blokové schéma vychází z klasické topologie lineárního napájecího zdroje obsahujícího síťový transformátor, usměrňovač, filtr a lineární stabilizátor. Podrobnému popisu bloků jsou věnovány následující kapitoly.

Kvůli požadavku na více úrovní výstupního napětí je zdroj rozvětven do více samostatných kanálů obsahujících vlastní blok usměrňovače, filtru a stabilizátoru požadované napěťové úrovně. Tyto bloky jsou tvořeny fyzicky samostatnými moduly na vlastním plošném spoji. V případě potřeby je tak celý zdroj snadno modifikovatelný a opravitelný.

Všechny kanály zdroje jsou napájeny z jednoho síťového transformátoru s více sekundárními vinutími.



Obr. 2.1 Blokové schéma zdroje

### 2.1 Připojení k rozvodné síti 230 V AC

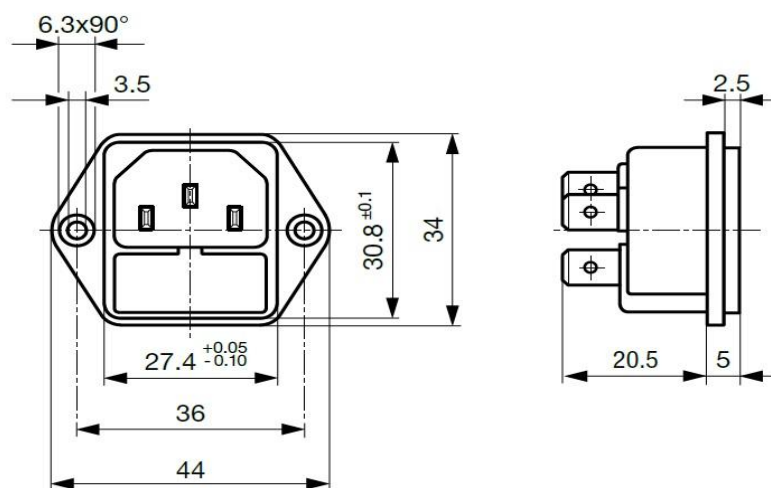
Zdroj je určen pro napájení z rozvodné sítě 230 V, 50 Hz / TN-S. Pro připojení zdroje k síti je zvolen síťový konektor C-14 podle standardu IEC 60320-1 (Obr. 2.1). Součástí tohoto síťového konektoru je i vestavěné pouzdro pro tavnou pojistku o rozměrech  $5 \times 20$  mm. Konektor je proudově dimenzován na 10 A. [21] Zatížitelnost konektoru je tedy vyhovující, protože odběr zdroje je maximálně 870 mA (viz kapitola 2.2). Konektor je umístěn na zadním panelu zdroje.

Ke konektoru jsou připojeny tři vodiče. Ochranný zeleno-žlutý vodič, označený jako "PE", je připojen na zemnicí šroub šasi zdroje. To zajišťuje ochranu proti úrazu

elektrickým proudem vlivem dotykového napětí na vodivých částech zdroje, které jsou přístupné pro obsluhu zdroje, v souladu s normou ČSN 33 2000-4-41 ed.3. [14]

Zbylé dva vodiče jsou přes hlavní síťový vypínač připojeny na svorky primárního vinutí transformátoru. Jeden z těchto vodičů je hnědý fázový vodič označený jako "L" a druhý je modrý nulový vodič označený jako "N" . [5]

Hlavní síťový vypínač je umístěn na čelním panelu zdroje. Jedná se o kolébkový typ se dvěma kontakty pro rozpinání fáze i nulového vodiče. Vypínač je dimenzován na 6 A, což je vyhovující (viz kapitola 2.2). Součástí vypínače je i doutnavka signalizující zapnutí zdroje.

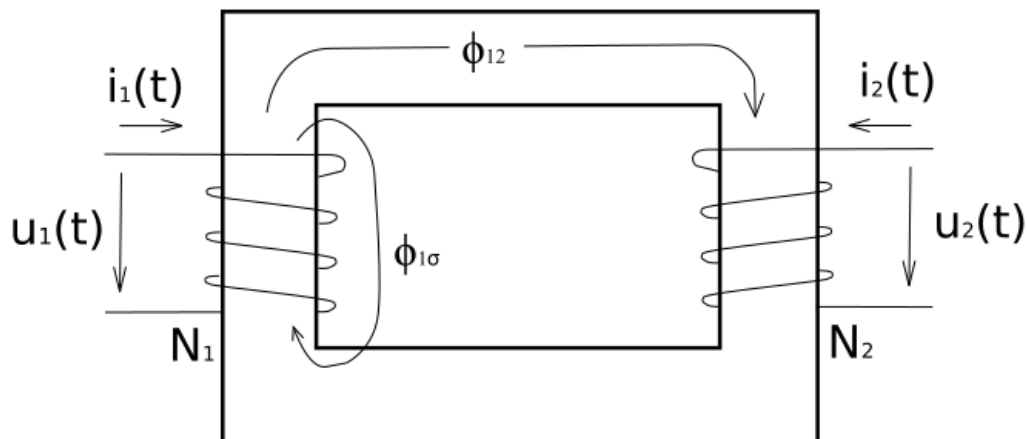


Obr. 2.2 Výkres síťového konektoru C-14 [21]

## 2.2 Síťový transformátor

Síťový transformátor je zařazen do skupiny netočivých elektrických strojů. Jeho úkolem je snižovat, respektive zvyšovat střídavé napětí a proudy v určitém transformačním poměru  $k$  (viz dále). Dále také galvanicky oddělit napájené zařízení od rozvodné sítě.

Princip činnosti transformátoru je založen na elektromagnetické indukci, z toho vyplývá i jeho konstrukční uspořádání, které je znázorněno na Obr. 2.3.



Obr. 2.3 Principiální schéma transformátoru

Primární cívka s  $N_1$  závitů buzená harmonickým síťovým proudem  $i_1(t)$  generuje harmonický indukční tok  $\phi_{12}$  a  $\phi_{1\sigma}$ . Tok  $\phi_{12}$  protéká jádrem transformátoru a sekundární cívkou s  $N_2$  závitů, označuje se jako hlavní magnetický tok. Tok  $\phi_{1\sigma}$  se uzavírá vně magnetického obvodu a označuje se jako rozptylový tok. Hlavní magnetický tok  $\phi_{12}$  indukuje napětí v sekundárním vinutí. Efektivní hodnotu tohoto napětí lze určit ze vztahu pro indukované napětí [8]:

$$U_1 = 4,44 \cdot \phi_{12max} \cdot f \cdot N_2 \quad (\text{V}), \quad (2.01)$$

kde  $\phi_{12max}$  je amplituda hlavního indukčního toku,  $f$  je kmitočet budícího proudu a  $N_2$  je počet závitů sekundárního vinutí transformátoru. Efektivní hodnotu indukovaného napětí lze taky určit pomocí transformačního poměru  $k$ .

Za předpokladu zanedbání ztrát v transformátoru lze říct, že zdánlivý výkon na primární straně  $S_1$  je roven zdánlivému výkonu  $S_2$  na straně sekundární. Transformační poměr pak lze odvodit takto [8]:

$$S_1 = S_2, \quad (2.02)$$

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2, \quad (2.03)$$

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (-), \quad (2.04)$$

kde veličiny označené indexem 1 popisují primární stranu a veličiny s indexem 2 sekundární stranu transformátoru.



Jádro transformátoru tvoří magnetický obvod z magneticky měkkého materiálu (pro síťové transformátory se nejčastěji používají oceli s příměsí křemíku) a slouží pro vedení magnetického toku. Konstrukce jádra transformátoru pak udává, o jaký typ transformátoru se jedná. Základní dělení je na jádrový typ, plášťový typ a toroidní typ. [8]

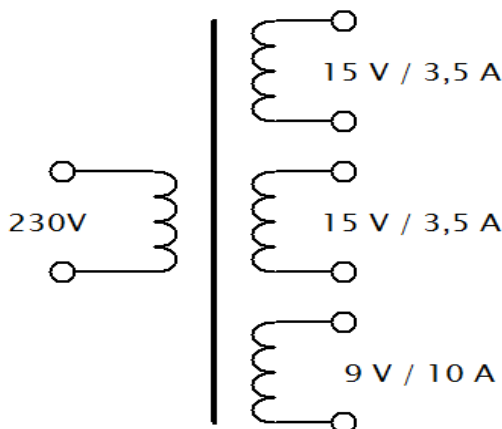
V navrhovaném zdroji je použit jednofázový plášťový typ transformátoru. Primární i sekundární vinutí je umístěno ve vrstvách na středovém sloupku jádra transformátoru. Tento typ byl zvolen z důvodu nižšího magnetizačního proudu díky rozptylovému toku  $\phi_{1\sigma}$ , který zvyšuje impedanci primárního vinutí. Zdánlivý výkon transformátoru  $S = 200 \text{ VA}$ , transformátor je tedy dostatečně dimenzován pro plné zatížení všech kanálů zdroje najednou.

Primární vinutí je jištěno tavnou pojistkou umístěnou v síťovém konektoru. Vypínací proud pojistky je dán maximálním povoleným proudem primárního vinutí:

$$I_{1max} = \frac{S_1}{U_1} = \frac{200}{230} = 0,9 \text{ A}, \quad (2.05)$$

kde  $I_{1max}$  je maximální proud primárním vinutím. Zvolena byla pomalá tavná pojistka pro vypínací proud 1 A.

Jak je zřejmé z Obr. 2.4, sekundární strana transformátoru je rozdělena na tři samostatná sekundární vinutí.

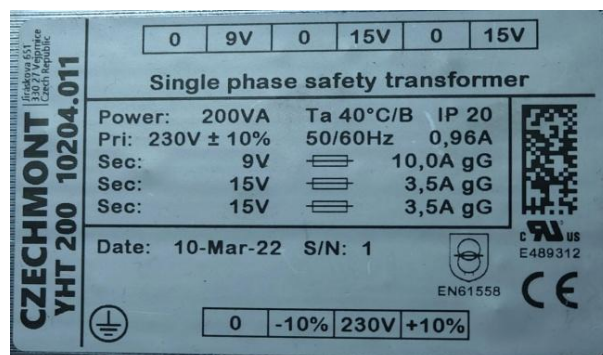


Obr. 2.4 Schéma zapojení transformátoru

Sekundární vinutí s parametry 15 V / 3,5 A jsou určena pro 12 V kanály a vinutí s parametry 9 V / 10 A pro 5 V kanál. Použité stabilizátory potřebují vstupní napětí o 2 V vyšší, než je napětí na jejich výstupu, proto byla sekundární napětí volena s určitou rezervou. S rezervou byly voleny i proudy sekundárních vinutí.

Sekundární vinutí jsou opět chráněna tavnými pojistkami, které jsou umístěny v pouzdrech na zadním panelu zdroje. Pro 5 V kanál byla zvolena rychlá tavná pojistka s vypínacím proudem 10 A a pro 12 V kanály byly zvoleny rychlé tavné pojistky s vypínacím proudem 4 A. Všechny pojistky mají rozměr 5 × 20 mm.

Transformátor byl vyroben na zakázku u firmy CZECHMONT s.r.o. a nese označení YHT 200. Štítek s parametry je na Obr. 2.5.



Obr. 2.5 Štítek použitého transformátoru

## 2.3 Návrh usměrňovačů a filtrů

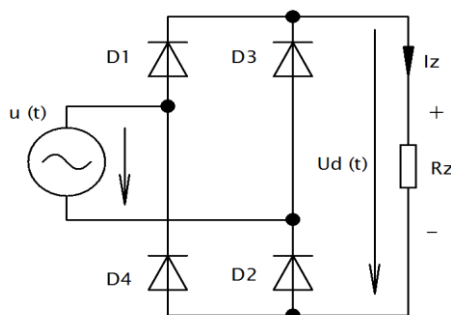
### 2.3.1 Usměrňovač

Dalšími funkčními bloky v blokovém schématu (Obr. 2.1) jsou usměrňovače a filtry. Výstupní napětí, resp. proudy transformátoru mají harmonický časový průběh s frekvencí 50 Hz. Funkcí usměrňovače je přeměnit střídavý časový průběh těchto napětí, resp. proudů na průběh periodicky pulzující, který má nenulovou stejnosměrnou složku.

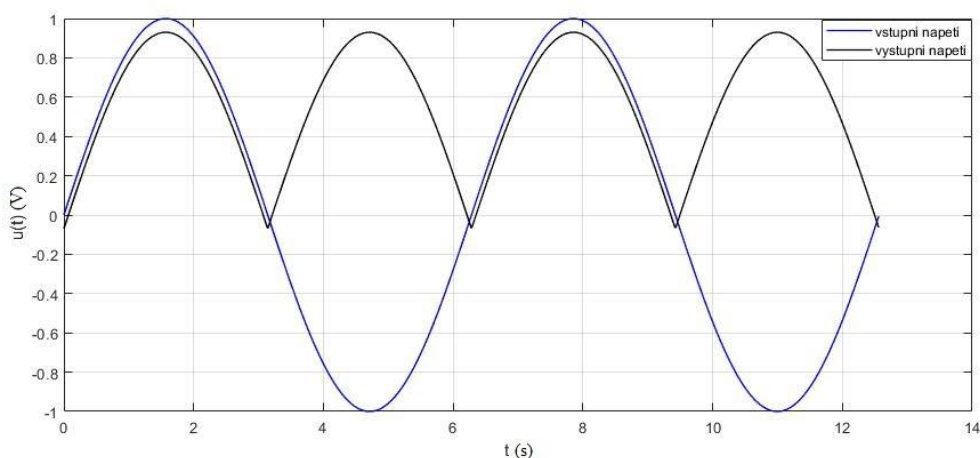
Základem usměrňovače je polovodičová dioda (v případě neřízených usměrňovačů), kterou protéká proud pouze v propustném směru od anody ke katodě. K tomu, aby diodou proud protékal, musí být napětí na anodě vyšší než napětí na katodě. Rozdíl těchto napětí se nazývá prahové napětí a u křemíkových usměrňovacích diod je přibližně  $U_p = 0,7$  V. V závěrném (opačném) směru protéká diodou jen velmi malý zbytkový proud a dioda prakticky nevede. [4]

Usměrňovače lze rozdělit na několik skupin, a to podle počtu fází, podle počtu diod v cestě mezi zátěží a sekundárním vinutím transformátoru, případně podle možnosti řízení velikosti střední hodnoty výstupního napětí.

V navrhovaném zdroji jsou použity jednofázové neřízené můstkové usměrňovače. Pro podobné aplikace je to nejběžněji používaný typ usměrňovače a na trhu je nabízen v mnoha variantách malých i velkých výkonů v monolitických provedeních. Jeho výhodou je relativně malé zvlnění výstupního napětí.



Obr. 2.6 Schéma zapojení jednofázového můstkového usměrňovače



Obr. 2.7 Časový průběh napětí na vstupu usměrňovače  $u(t)$  (modrý průběh) a výstupního napětí  $u_d(t)$  (černý průběh) (orientačně)

Na Obr. 2.6 je schéma zapojení jednofázového můstkového usměrňovače. Napětí  $u(t)$  je napětí na výstupu sekundárního vinutí transformátoru a napětí  $u_D(t)$  je stejnosměrné periodicky pulzující napětí na zátěži. V kladné půlplně napětí  $u(t)$  jsou v propustném směru orientovány diody  $D_1$  a  $D_2$ . Proud  $I_z$  teče skrze zátěž tvořenou rezistorem  $R_z$  ve směru šipky. Pro zápornou půlplně napětí  $u(t)$  jsou v propustném směru orientovány diody  $D_3$  a  $D_4$  a proud  $I_z$  teče opět ve směru šipky. [4]

Přibližné časové průběhy napětí  $u(t)$  a  $u_D(t)$  jsou vidět na Obr. 2.7. Z průběhů je patrný i úbytek napětí na diodách, který způsobuje rozdíl amplitud mezi vstupním a výstupním napětím. V cestě jsou vždy dvě diody, takže úbytek je roven dvojnásobku jejich prahového napětí  $U_p$ . Dále je zřejmé, že napětí  $u_D(t)$  má periodický průběh s dvojnásobnou frekvencí než vstupní napětí  $u(t)$ .

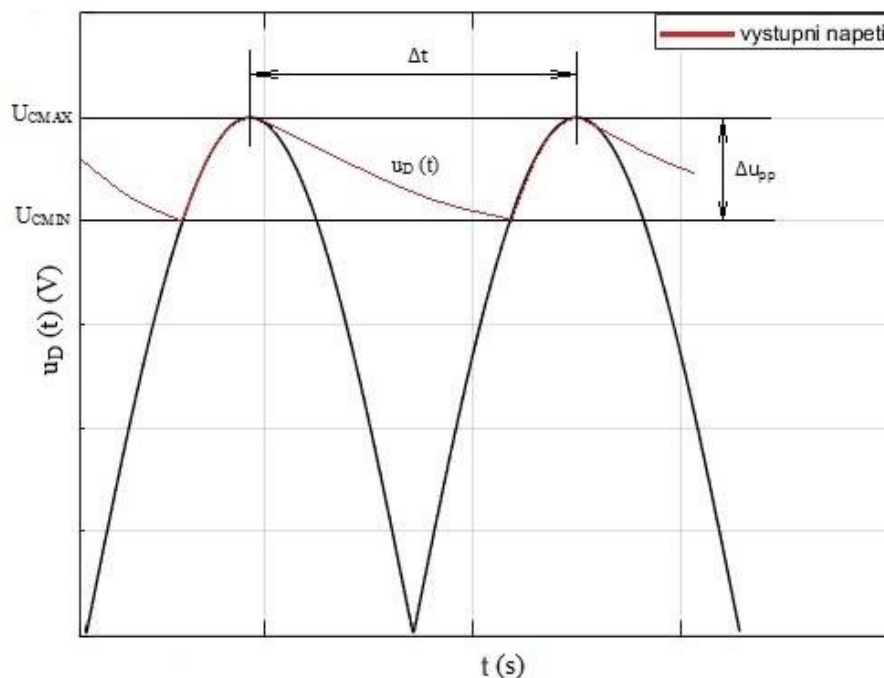
Pro 5 V kanál byl zvolen usměrňovací můstek MBR 154 od výrobce DC COMPONENTS. Jedná se o monolitický usměrňovač v pouzdře MBR - 25, který má proudovou zatížitelnost až 15 A a maximální závěrné napětí 400 V. [23] Je tedy dostatečně dimenzován na provoz zdroje. Usměrňovač je umístěn na jednom z bočních chladičů zdroje, aby byl dostatečně chlazen. Jeho připojení je provedeno rozebíratelně pomocí faston konektorů. Pouzdro má kovovou styčnou plochu, bylo tedy nutné jej elektricky izolovat. K elektrickému izolování byla použita silikonová teplovodivá podložka s tepelným odporem 0,16 K/W.

V případě 12 V kanálů byl zvolen usměrňovač B250C7000A od výrobce DIOTEC SEMICONDUCTOR. Opět jde o monolitický usměrňovač s proudovou zatížitelností až 7 A a maximálním závěrným napětím 600 V. [22] Je zde opět dostatečná výkonová rezerva. Usměrňovače 12 V kanálů jsou umístěné přímo na desce plošného spoje modulů zdrojů.

### 2.3.2 Vyhlažovací filtr

Výstupní napětí z usměrňovače je sice stejnosměrné, ale má superponovanou střídavou složku, která je nežádoucí. K jejímu potlačení je za usměrňovačem zařazen vyhlazovací filtr obecně typu dolní propust. [1] Nejčastěji je tento filtr tvořen vyhlazovacími kondenzátory paralelně připojenými na výstup usměrňovače. V době otevření diod usměrňovače je kondenzátor nabíjen proudem z transformátoru až do amplitudy výstupního napětí  $u_D(t)$ . Jakmile je napětí na kondenzátoru větší než okamžitá hodnota napětí  $u(t)$ , dojde k zavření diod a zdrojem proudu do zátěže se stává kondenzátor do chvíle, než opět nevzroste okamžitá hodnota vstupního napětí  $u(t)$  a nedojde k opětovnému otevření diod. Celý tento děj se opakuje s frekvencí  $f = 100$  Hz (uvažujeme - li sítíovou frekvencí 50 Hz na vstupu). Rozdíl mezi minimem a maximem napětí na kondenzátoru se označuje jako zvlnění  $\Delta u_{pp}$ , které je superponováno na stejnosměrné složce  $U_{ss}$ . [4]

Velikost  $\Delta u_{pp}$  je úměrná proudu odebíranému zátěží zdroje a nepřímo úměrná kapacitě vyhlazovacího kondenzátoru.



Obr. 2.8 Časový průběh napětí na vyhlazovacím kondenzátoru (orientačně)

Na Obr. 2.8 je znázorněn časový průběh napětí  $u_D(t)$  na vyhlazovacím kondenzátoru. Napětí se pohybuje v rozmezí  $U_{Cmin}$  až  $U_{Cmax}$ . Napětí  $U_{Cmin}$  vychází z požadavku nejmenšího možného napětí na vstupu stabilizátoru a napětí  $U_{Cmax}$  je rovno amplitudě napětí  $u_D$ . Amplituda  $u_D$  je dána amplitudou vstupního napětí usměrňovače  $u(t)$  zmenšenou o dvojnásobek prahového napětí  $U_p$ . Velikost kapacity se stanoví ze vztahu pro proud kondenzátoru  $I_c$  následujícím způsobem:

$$I_c \approx I_z \approx C \cdot \frac{\Delta u_{pp}}{\Delta t} \quad (\text{A}), \quad (2.06)$$

kde  $I_z$  je proud odebíraný zátěží zdroje,  $C$  je kapacita vyhlazovacího kondenzátoru a  $\Delta t$  je perioda napětí  $u_D(t)$ . Z tohoto vztahu pak úpravou získáme vztah pro výpočet kapacity vyhlazovacího kondenzátoru pro jednofázový můstkový usměrňovač:

$$C \approx I_z \cdot \frac{\Delta t}{\Delta u_{pp}} = \frac{I_z}{2 \cdot f \cdot (U_{Cmax} - U_{Cmin})} \quad (\text{F}), \quad (2.07)$$

kde  $f$  je frekvence napájecí sítě 50 Hz. Tímto způsobem lze stanovit nejmenší potřebnou hodnotu kapacity vyhlazovacího kondenzátoru tak, aby mělo výstupní napětí usměrňovače požadované zvlnění.

Teoretická velikost vyhlazovací kapacity pro 5 V kanál zdroje byla vypočtena podle vztahu (2.07) následujícím způsobem:

$$U_{Cmax} = U_{sek} \cdot \sqrt{2} - 2 \cdot U_p = 9 \cdot \sqrt{2} - 2 \cdot 0,7 = 11,33 \text{ V} \quad (2.08)$$

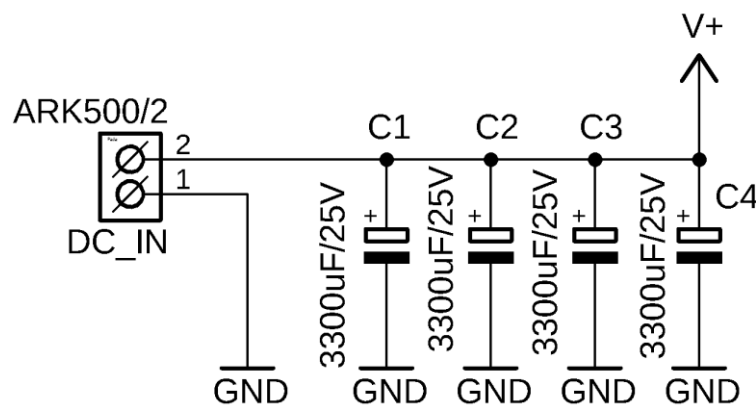
$$U_{Cmin} = U_{out} + U_{stab} = 5 + 2 = 7 \text{ V} \quad (2.09)$$

$$I_z = 5 \text{ A} \quad (2.10)$$

$$C = \frac{I_z}{2 \cdot f \cdot (U_{Cmax} - U_{Cmin})} = \frac{5}{2 \cdot 50 \cdot (11,33 - 7)} = 11,5 \text{ mF}, \quad (2.11)$$

kde  $U_{sek}$  je efektivní hodnota napětí sekundárního vinutí transformátoru pro 5 V kanál (viz kapitola 2.2),  $U_{out}$  je požadované napětí na výstupních svorkách zdroje a  $U_{stab}$  je rozdílové napětí mezi vstupem a výstupem stabilizátoru, které stabilizátor potřebuje pro svoji správnou činnost. [20]

V průběhu počítačové simulace zapojení zdroje bylo zjištěno, že kapacita 11,5 mF není dostačující a byla zvednuta na hodnotu 13,2 mF. Celý filtr je složen ze čtyř paralelně zapojených elektrolytických kondenzátorů o hodnotě 3,3 mF. Napěťově jsou kondenzátory dimenzovány na 25 V, což představuje dostatečnou rezervu. Výstup z usměrňovače je připojen přes svorkovnici ARK500/2 označenou DC\_IN.



Obr. 2.9 Schéma zapojení vyhlazovacího filtru 5 V zdroje

Pro 12 V kanály byla teoretická hodnota vyhlazovacích kondenzátorů stanovena podle vztahu (2.07) následujícím způsobem:

$$U_{Cmax} = U_{sek} \cdot \sqrt{2} - 2 \cdot U_p = 15 \cdot \sqrt{2} - 2 \cdot 0,7 = 19,81 \text{ V} \quad (2.12)$$

$$U_{Cmin} = U_{out} + U_{stab} = 12 + 2 = 14 \text{ V} \quad (2.13)$$

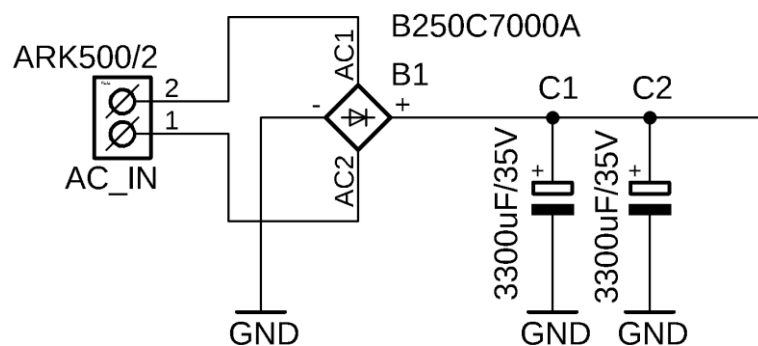
$$I_z = 2 \text{ A} \quad (2.14)$$

$$C = \frac{I_z}{2 \cdot f \cdot (U_{Cmax} - U_{Cmin})} = \frac{2}{2 \cdot 50 \cdot (19,81 - 14)} = 3,4 \text{ mF}, \quad (2.15)$$

kde  $U_{sek}$  je efektivní hodnota napětí sekundárního vinutí transformátoru pro 12 V kanály (viz kapitola 2.2) a  $U_{out}$  je požadované napětí na výstupních svorkách zdroje.

Opět bylo v průběhu počítačové simulace zapojení zdroje zjištěno, že kapacita 3,4 mF není dostačující. Byla tedy nahrazena paralelní kombinací dvou kondenzátorů o kapacitě 3,3 mF. Výsledná kapacita 6,6 mF je více než dostačující a zvlnění je minimální i při jmenovitém zatížení zdroje. Kondenzátory jsou na napětí 35 V, což je vyhovující s dostatečnou napěťovou rezervou.

Sekundární vinutí transformátoru je připojeno přes svorkovnici ARK500/2 označenou jako AC\_IN.



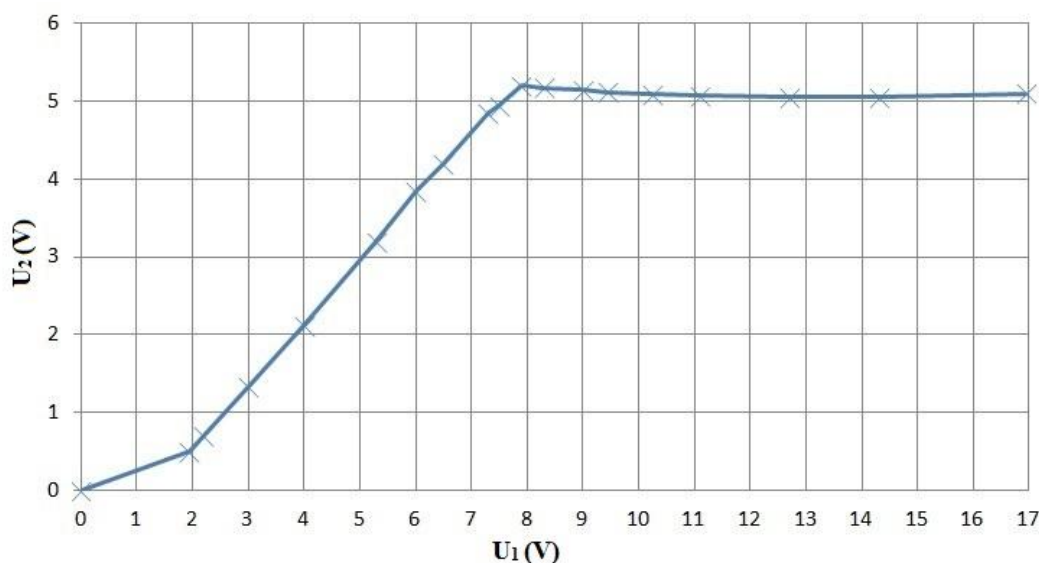
Obr. 2.10 Schéma zapojení usměrňovače a vyhlazovacího filtru 12 V zdrojů

## 2.4 Návrh stabilizátorů

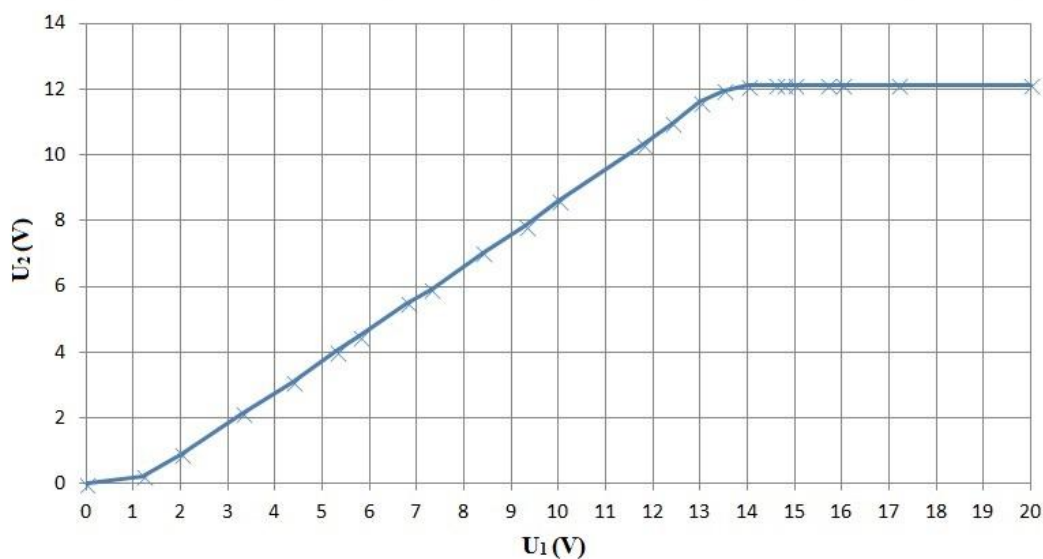
Po blocích usměrňovačů a filtrů v blokovém schématu na Obr. 2.1 následují bloky stabilizátorů. Princip funkce lineárních sériových napěťových stabilizátorů byl popsán již v kapitole 1 a tato část práce je věnována volbě a návrhu konkrétního obvodového řešení.

Parametry stabilizátoru mají zásadní vliv na velikost a stabilitu výstupního napětí při různých odběrech proudu zátěží. Součástí stabilizátorů jsou také obvody nadproudové ochrany, které limitují výstupní proud v případě poruchy zátěže nebo zkratu výstupních svorek zdroje. Určují tak maximální možný proud dodávaný zdrojem a chrání zdroj před poškozením. Nadproudová ochrana je doplněna signalizací nadproudu. Z těchto požadavků vyplývají hlavní kritéria pro volbu obvodového řešení. Dalšími kritérii je jednoduchost a minimální nároky na údržbu. V případě poruchy pak snadná opravitelnost modulů.

V průběhu volby bylo vybíráno mezi variantou stabilizátoru z diskretních součástek a variantou s obvodem typu 723. Byly navrženy a zhotoveny dva testovací moduly. Jeden modul s výstupním napětím 5 V se stabilizátorem z diskretních součástek osazený operačním zesilovačem TL 082P (příloha H) a napět'ovou referencí LM 431. Druhý modul s výstupním napětím 12 V osazený integrovaným stabilizátorem LM 723. Na modulech bylo provedeno měření stabilizační charakteristiky, tedy závislosti výstupního napětí stabilizátoru  $U_2$  na vstupním napětí stabilizátoru  $U_1$ .



Obr. 2.11 Stabilizační charakteristika ( $U_2 = f(U_1)$ ) modulu z diskretních součástek s výstupním napětím 5 V ( $U_1$  vstupní napětí,  $U_2$  výstupní napětí)

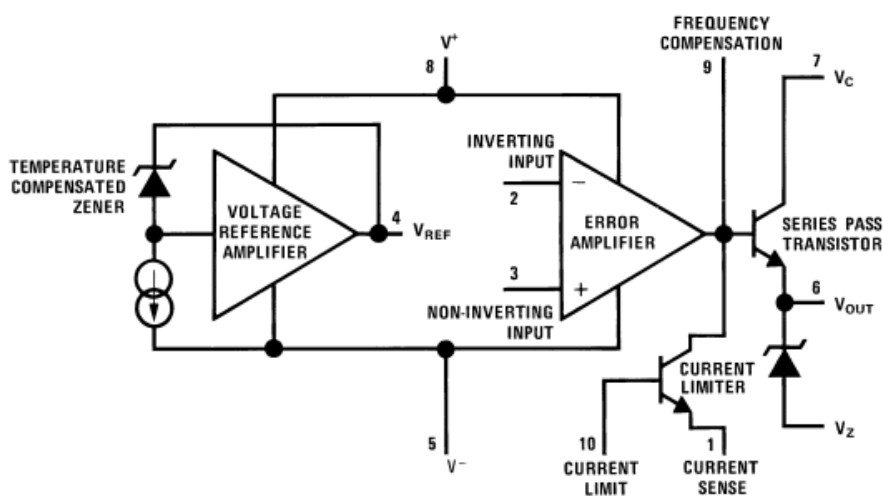


Obr. 2.12 Stabilizační charakteristika ( $U_2 = f(U_1)$ ) modulu s integrovaným stabilizátorem LM 723 s výstupním napětím 12 V ( $U_1$  vstupní napětí,  $U_2$  výstupní napětí)



Z naměřených stabilizačních charakteristik je patrné, že modul s integrovaným stabilizátorem LM 723 vykazuje lepší stabilitu výstupního napětí  $U_2$ . Další výhodou integrovaného stabilizátoru LM 723 je velikost rozdílu mezi vstupním a výstupním napětím, který činí 2 V. Tento napěťový rozdíl je požadován co nejmenší kvůli nižším ztrátám na stabilizátoru, respektive tepelným ztrátám na regulačním prvku stabilizátoru (viz dále).

Z těchto důvodů bylo zvoleno řešení založené na integrovaném stabilizátoru LM 723. Tento typ stabilizátoru navíc obsahuje i obvody nadproudové ochrany.

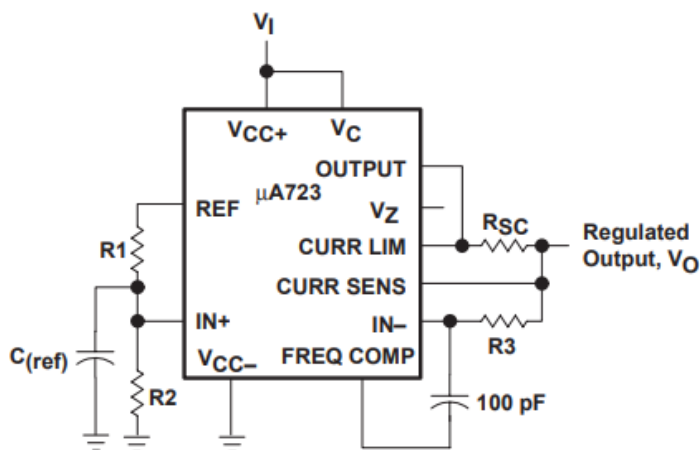


Obr. 2.13 Blokové schéma integrovaného stabilizátoru LM 723 [20]

Na Obr. 2.13 je uvedeno blokové schéma integrovaného stabilizátoru LM 723. Integrovaný obvod obsahuje zesilovač regulační odchylky, tepelně kompenzovaný zdroj referenčního napětí ( $U_{ref} = 7,15 \text{ V}$ ) se zesilovačem referenčního napětí, sériový výkonový tranzistor a tranzistor pro omezení výstupního proudu zdroje. Výstupy všech těchto částí jsou vyvedeny na piny pouzdra integrovaného obvodu, to umožňuje zapojení zdroje v řadě variant. [20] V základním zapojení je obvod schopný stabilizovat výstupní napětí v rozmezí 2 V až 37 V s maximálním proudem 150 mA. [20] K proudovému omezení dochází po přivedení napětí mezi piny označené CL (CURRENT LIMIT) a CS (CURRENT SENSE). Toto napětí sepne tranzistor proudového omezení, který svede proud z báze tranzistoru řídicího napětí. Tranzistor, který řídí napětí, se tak přivře a omezí napětí na výstupu zdroje. Velikost napětí mezi vstupy CL a CS pro aktivování nadproudové ochrany je 0,65 V. [20] Integrovaný obvod LM 723 je vyráběn v provedení THT i SMD. Z důvodu snadnější opravitelnosti byla zvolena THT varianta v pouzdře DIP 14.

### 2.4.1 Návrh stabilizátoru 5 V / 5 A

Obvodové řešení 5 V stabilizátoru použitého ve zdroji vychází ze základního zapojení stabilizátoru LM 723 pro výstupní napětí menší než  $U_{ref}$ , tedy 7,15 V. Toto základní zapojení je uvedeno na Obr. 2.14.



Obr. 2.14 Základní zapojení stabilizátoru LM 723 s výstupním napětím menším než 7,15 V ( $V_I$  - vstupní napětí,  $V_O$  - výstupní napětí) [20]

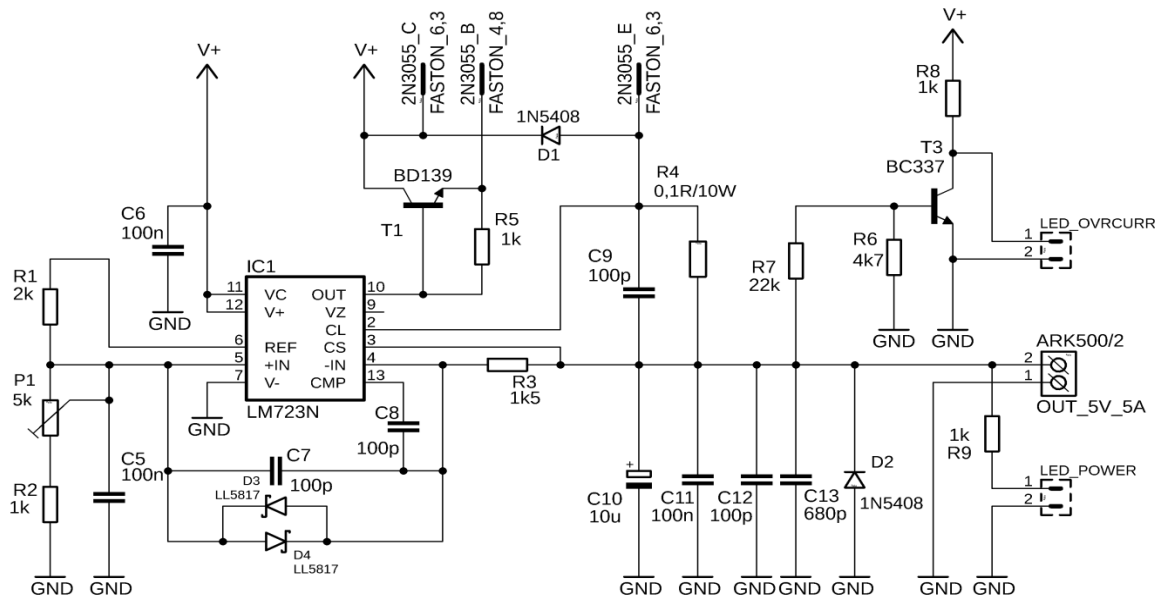
U tohoto zapojení může být na výstupu napětí rovné maximálně velikosti referenčního napětí  $U_{ref}$ , protože ve zpětné vazbě (IN-) není vložen žádný napěťový dělič, který by snižoval velikost výstupního napětí celého stabilizátoru (Kapitola 1). LM 723 v sobě interně obsahuje zdroj referenčního napětí, jehož výstup je vyveden na pin označovaný jako REF. Rezistory  $R_1$  a  $R_2$  tvoří napěťový dělič, jehož poměrem lze nastavit velikost napětí na neinvertujícím vstupu zesilovače regulační odchylky (IN+), a tím i velikost výstupního napětí.

Rezistor  $R_3$  slouží pro kompenzaci vstupní proudové nesymetrie zesilovače regulační odchylky a jeho velikost je dána paralelní kombinací rezistorů  $R_1$  a  $R_2$ . [20]

Na rezistoru  $R_{SC}$  je snímán úbytek napětí, který je úměrný odebíranému proudu. Pokud toto napětí překročí hodnotu 0,65 V, dojde k otevření tranzistoru nadproudové ochrany (viz Obr. 2.13), a tím se omezí výstupní napětí zdroje.

Kondenzátor připojený mezi vývody IN- a FREQ COMP slouží jako kmitočtová kompenzace zabraňující rozkmitání regulátoru. Doporučená hodnota je 100 pF. [20]

Kondenzátor  $C_{(ref)}$  slouží k potlačení šumu výstupního napětí. Jeho hodnota není nijak kritická, ale nesmí příliš zvyšovat časovou konstantu ustálení. [20]



Obr. 2.15 Schéma zapojení 5 V / 5 A stabilizátoru

Na Obr. 2.15 je kompletní schéma zapojení 5 V stabilizátoru doplněného o všechny potřebné periférie.

Na výstupu děliče  $R_1$  a  $R_2$  je požadováno napětí 5 V. Odpor rezistoru  $R_1$  byl zvolen na hodnotu 2 k $\Omega$ . Ze vztahu pro napěťový dělič:

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (V), \quad (2.16)$$

kde  $U_1$  je vstupní napětí děliče a  $U_2$  je výstupní napětí děliče, byla doložena velikost odporu rezistoru  $R_2$  jako:

$$R_2 = \frac{U_2 \cdot R_1}{U_1 - U_2} = \frac{U_{out} \cdot R_1}{U_{ref} - U_{out}} = \frac{5 \cdot 2}{7.15 - 5} = 4,45 \text{ k}\Omega, \quad (2.17)$$

kde  $U_{out}$  je výstupní napětí na svorkách zdroje a  $U_{ref}$  je referenční napětí. Kvůli možnosti nastavení přesné hodnoty výstupního napětí byl místo rezistoru zvolen odporový trimr  $P_1$  o velikosti 5 k $\Omega$  v sérii s rezistorem  $R_2$ . Paralelně k trimru  $P_1$  a rezistoru  $R_2$  je zařazen kondenzátor  $C_5$ . Jeho kapacita byla zvolena podle katalogového listu [20] na hodnotu 100 nF. Je to vhodný kompromis mezi úrovní šumu výstupního napětí a časovou konstantou ustálení. [20]

Velikost odporu rezistoru  $R_3$  je dána výslednou hodnotou paralelní kombinace rezistorů  $R_1$  a  $R_2$ . Výpočet je proveden pro hodnotu výstupního napětí 5 V tak, že za velikost odporu rezistoru  $R_2$  je dosazena hodnota 4,45 k $\Omega$ . Rezistor  $R_3$  má hodnotu odporu:

$$R_3 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{4,45 \cdot 2}{4,45 + 2} = 1,38 \text{ k}\Omega. \quad (2.18)$$

Z řady E12 byla zvolena hodnota odporu 1,5 k $\Omega$ . Přes tento rezistor je zavedena zpětná vazba z výstupu zdroje.

Dalším krokem je stanovení velikosti odporu snímacího rezistoru proudu  $R_4$ . Hodnota tohoto rezistoru je volena tak, aby zdroj měl jistou proudovou rezervu a byl schopný dodat požadovaných 5 A při napětí 5 V. Byl tedy zvolen rezistor s odporem 0,1  $\Omega$ . Maximální proud  $I_{max}$ , který je zdroj schopný dodat, se určí podle vztahu:

$$I_{max} = \frac{U_{sense}}{R_4} = \frac{0,65}{0,1} = 6,5 \text{ A}, \quad (2.19)$$

kde  $U_{sense}$  je napětí mezi bází s emitorem tranzistoru nadproudové ochrany (viz Obr. 2.13). Rezistor  $R_4$  musí být také dostatečně výkonově dimenzován. Minimální ztrátový výkon  $P_{zmin}$  tohoto rezistoru se stanoví podle vztahu:

$$P_{zmin} = R_4 \cdot I_{max}^2 = 0,1 \cdot 6,5^2 = 4,22 \text{ W}. \quad (2.20)$$

S ohledem na dlouhodobé výkonové zatížení tohoto rezistoru byl zvolen výkonový rezistor se ztrátovým výkonem 10 W.

Stabilizátor LM 723 je schopný dodat maximální proud 150 mA, proto bylo nutné na jeho výstup zařadit proudový zesilovač tvořený dvojicí tranzistorů  $T_1$  a  $T_2$  (tranzistor  $T_2$  není ve schématu na Obr. 2.15 uveden, protože je umístěn mimo modul stabilizátoru na chladiči).

Jako tranzistor  $T_2$  byl zvolen typ 2N3255. Jedná se o tranzistor NPN v pouzdře TO 3 s kolektorovým proudem  $I_c = 15 \text{ A}$ , napětím mezi kolektorem a emitorem  $U_{ce} = 60 \text{ V}$  a maximálním ztrátovým výkonem  $P_{cmax} = 115 \text{ W}$ . [15] Tranzistor je umístěn na chladiči a k modulu stabilizátoru je připojen pomocí faston konektorů. Výhodou pouzdra TO 3 je velikost styčné plochy s chladičem, čímž je dosažen efektivnější přechod tepla z pouzdra tranzistoru do chladiče.

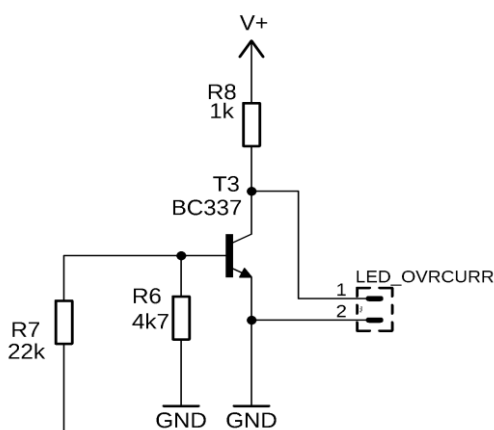
Nejmenší hodnota stejnosměrného proudového zesilovacího činitele  $H_{FE}$  tranzistoru  $T_2$  je (při  $I_c = 10 \text{ A}$  a  $U_{ce} = 4 \text{ V}$ ) rovna 5. [15] Největší možná hodnota proudu  $I_b$  tekoucího do báze tranzistoru  $T_2$  (při proudu  $I_c = 6,5 \text{ A}$ ) je:

$$I_b = \frac{I_c}{H_{FE}} = \frac{6,5}{5} = 1,3 \text{ A}. \quad (2.21)$$

Počítačovou simulací obvodu bylo zjištěno, že proud  $I_b$  je ve skutečnosti roven maximálně hodnotě 0,55 A. Chybu výpočtu podle rovnice (2.21) způsobil předpoklad, že parametr  $H_{FE}$  je konstantní. Tento parametr se ovšem mění s velikostí napětí  $U_{ce}$ , takže výpočet (2.21) je pouze orientační.

Proud procházející bází tranzistoru  $T_2$  je stále moc velký, a proto má tranzistor  $T_2$  v bázi zařazen pomocný tranzistor  $T_1$ . Jako tranzistor  $T_1$  byl zvolen typ BD 139. Jedná se opět o tranzistor typu NPN tentokrát v pouzdře TO 126 s napětím  $U_{ce} = 45$  V a proudem  $I_c = 1,5$  A. Tyto parametry jsou dostačující. Proudový zesilovací činitel  $H_{FE}$  tohoto tranzistoru se pohybuje v rozmezí 25 - 250. [16] Velikost proudu teoreticky odebíraného z výstupu stabilizátoru LM 723 lze opět vypočítat podle rovnice (2.21). Pro nejnižší hodnotu parametru  $H_{FE}$  tranzistoru  $T_1$  a proud  $I_c = 1,3$  A vychází proud, odebíraný z výstupu LM 723 roven 52 mA. Takto velký proud již lze bez problému odebírat z výstupu stabilizátoru LM 723. Paralelně k tranzistoru  $T_2$  je zapojena ochranná dioda 1N5408.

Další částí modulu stabilizátoru je signalizace nadproudu. Obvod signalizace je tvořen napěťovým děličem z rezistorů  $R_6$  a  $R_7$ , tranzistorem  $T_3$  a LED diodou (připojenou na konektor s označením LED\_OVRCURR) s předřadným rezistorem  $R_8$ . Princip této signalizace spočívá ve sledování výstupního napětí stabilizátoru. Pokud je na výstupu napětí 5 V, je tranzistor  $T_3$  v saturaci a skrze LED diodu neteče žádný proud. Jakmile se zvedne odebíraný proud, napětí na výstupu stabilizátoru poklesne vlivem nadproudové ochrany, a tím dojde k zavření tranzistoru  $T_3$ . Proud tak poteče skrze LED diodu a ta se rozsvítí.



Obr. 2.16 Obvod detekce nadproudu

Pro signalizaci nadproudu byla použita červená LED dioda HLMP - 3316. Požadovaný proud touto diodou  $I_D = 10$  mA a napětí na diodě  $U_D = 2$  V. [24] Detekce je napájena ze vstupního napětí stabilizátoru  $U_{in}$ , které má hodnotu:

$$U_{in} = U_{sek} \cdot \sqrt{2} - 2 \cdot U_p = 9 \cdot \sqrt{2} - 2 \cdot 0,7 = 11,33 \text{ V.} \quad (2.22)$$

Předřadný rezistor  $R_8$  slouží ke snížení proudu diodou a kolektorem tranzistoru  $T_3$ . Velikost jeho odporu je určena následujícím způsobem:

$$R_8 = \frac{U_{in} - U_D}{I_D} = \frac{11,33 - 2}{10 \cdot 10^{-3}} = 933 \Omega. \quad (2.23)$$

Z řady E12 byla vybrána hodnota odporu 1 k $\Omega$ . LED dioda signalizace nadproudu je umístěna na čelním panelu napájecího zdroje a k modulu stabilizátoru je připojena pomocí konektoru PSH02.

Poměr odporů rezistorů napěťového děliče tvořeného rezistory  $R_6$  a  $R_7$  určuje úroveň výstupního napětí, při které dojde k aktivování signalizace nadproudu. Tato úroveň je přibližně 3,5 V. Velikosti odporů rezistorů jsou stanoveny ze vztahu pro výpočet výstupního napětí děliče:

$$R_6 = \frac{U_{be} \cdot R_7}{U_{out} - U_{be}} = \frac{0,6 \cdot 22}{3,5 - 0,6} = 4,55 \text{ k}\Omega, \quad (2.24)$$

kde  $U_{be}$  je napětí mezi bází a emitorem tranzistoru  $T_3$  potřebné k jeho otevření a  $U_{out}$  je úroveň výstupního napětí, při které má dojít k aktivování signalizace. Velikost odporu  $R_7$  byla zvolena na hodnotu 22 k $\Omega$ .

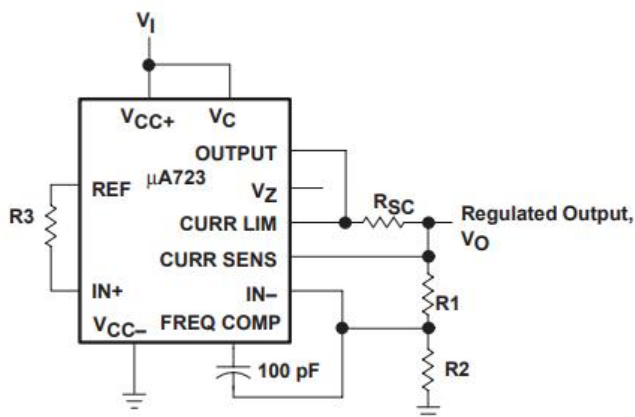
Toto řešení obvodu signalizace nadproudu je velice jednoduché a je vhodné právě pro zdroje s pevně nastaveným výstupním napětím.

Detekci bezchybného provozu stabilizátoru signalizuje zelená LED dioda HLMP - 3507 připojená přes předřadný rezistor  $R_9$  na výstup stabilizátoru. Stejně jako LED dioda signalizující nadproud je i tato LED dioda připojena k modulu stabilizátoru přes konektor PSH02.

Na výstup stabilizátoru je dále zařazena ochranná dioda  $D2$  typu 1N5408 (viz dále).

### 2.4.2 Návrh stabilizátorů 12 V / 2 A

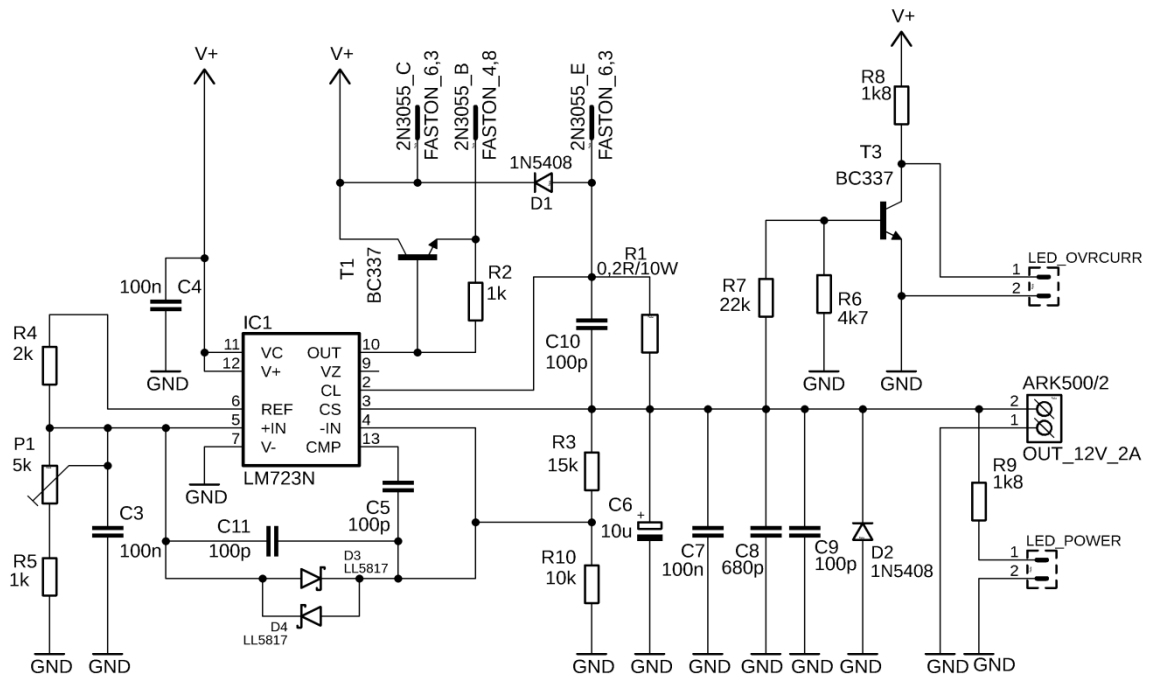
Obvodové řešení 12 V stabilizátorů kladné i záporné větve symetrického 12 V / 2 A kanálu je stejné. Vychází ze základního zapojení integrovaného stabilizátoru LM 723 pro výstupní napětí větší než je hodnota referenčního napětí  $U_{ref}$ , tedy 7,15 V.



Obr. 2.17 Základní zapojení stabilizátoru LM 723 s výstupním napětím větším než 7,15 V ( $V_1$  - vstupní napětí,  $V_O$  - výstupní napětí) [20]

Toto zapojení můžeme vidět na Obr 2.17. Stabilizátor LM 723 má ve zpětné vazbě vložený napěťový dělič tvořený rezistory  $R_1$  a  $R_2$ . Tento dělič snižuje výstupní napětí stabilizátoru. Jeho výstup je přiveden na invertující vstup (IN-) zesilovače regulační odchylky. Napětí na výstupu stabilizátoru se ustálí na hodnotě, při které bude na výstupu děliče napětí o velikosti  $U_{ref}$ . Velikost výstupního napětí pak lze stanovit podle rovnice (1.03). Podle katalogového listu může být výstupní napětí samotného stabilizátoru LM 723 až 37 V. [20]

Rezistor  $R_{SC}$  slouží pro snímání velikosti odebíraného proudu a rezistor  $R_3$  pro kompenzaci vstupní proudové nesymetrie zesilovače regulační odchylky. [20]



Obr. 2.18 Schéma zapojení 12 V / 2 A stabilizátoru

Na Obr. 2.18 je kompletní zapojení modulů stabilizátoru 12 V / 2 A se všemi potřebnými perifériemi.

Velikost reference byla zvolena na hodnotu 5 V, stejně jako u 5 V stabilizátoru. Kvůli možnosti nastavení přesné hodnoty výstupního napětí stabilizátoru byl na výstup ze zdroje referenčního napětí vložen napěťový dělič tvořený rezistorem  $R_4$  a sériovou kombinací odporového trimru  $P_1$  a rezistoru  $R_5$ .

Ve zpětnovazebním obvodu stabilizátoru je vložen druhý napěťový dělič, jehož úkolem je snížit velikost požadovaného výstupního napětí stabilizátoru na hodnotu  $U_{ref}$ , tedy na 5 V. Velikost odporu rezistoru  $R_{10}$  byla zvolena na 10 k $\Omega$  a velikost odporu rezistoru  $R_3$  byla stanovena výpočtem ze vztahu pro napěťový dělič (2.16) na hodnotu:

$$R_3 = \frac{R_{10} \cdot (U_{out} - U_{ref})}{U_{ref}} = \frac{10 \cdot (12 - 5)}{5} = 14 \text{ k}\Omega, \quad (2.25)$$

kde  $U_{out}$  je požadované výstupní napětí stabilizátoru. Z řady E 12 byl vybrán rezistor s hodnotou odporu 15 k $\Omega$ .

Dalším krokem je stanovení velikosti odporu proudového snímacího rezistoru  $R_1$ . Stejně jako u 5 V stabilizátoru i zde je velikost odporu tohoto rezistoru volena tak, aby zdroj byl schopný dodat proud 2 A při plném výstupním napětí 12 V, tedy aby k aktivování nadproudové ochrany došlo až při odběru většího proudu než 2 A.



Aby byl dodržen tento požadavek, byla zvolena velikost odporu  $0,2 \Omega$ . Proud, při kterém se nadproudová ochrana aktivuje, je dán rovnicí (2.19) a má velikost:

$$I_{max} = \frac{0,65}{0,2} = 3,25 \text{ A.} \quad (2.26)$$

Minimální ztrátový výkon rezistoru  $R_I$  je stanoven podle rovnice (2.20) na hodnotu:

$$P_{zmin} = 0,2 \cdot 3,25^2 = 2,11 \text{ W.} \quad (2.26)$$

S ohledem na dlouhodobé výkonové zatížení snímacího rezistoru  $R_I$  byl zvolen rezistor se ztrátovým výkonem 10 W.

Výkonová řídicí část stabilizátoru je opět tvořena Darlingtonovým zapojením jako v případě 5 V stabilizátoru (tranzistor  $T_2$  není ve schématu na Obr. 2.18 uveden, protože je umístěn na chladiči mimo modul stabilizátoru). Jako tranzistor  $T_2$  byl opět zvolen typ 2N3055. Výkonově je tento tranzistor předdimenzován a bylo by možné zvolit jiný typ tranzistoru pro menší výkony a v menším pouzdře. Typ 2N3055 zde byl zvolen hlavně kvůli jednotnosti montáže všech výkonových tranzistorů. Také kvůli již zmíněným výhodám pouzdra TO 3.

Pokud budeme uvažovat nejmenší hodnotu stejnosměrného proudového zesilovacího činitele  $H_{FE}$  (při  $I_c = 4 \text{ A}$  a  $U_{ce} = 4 \text{ V}$ ), tedy hodnotu 20 uvedenou v katalogovém listu [20], potom poteče do báze tranzistoru  $T_2$  proud o velikosti:

$$I_b = \frac{I_{cmax}}{H_{FE}} = \frac{3,25}{20} = 0,163 \text{ mA,} \quad (2.27)$$

kde  $I_{cmax}$  je maximální hodnota proudu, kterou zdroj dodá do zátěže, vypočítaná podle rovnice (2.26). Vypočtený proud  $I_b$  se shoduje i s počítačovou simulací.

Jako pomocný tranzistor  $T_1$  byl zvolen typ BC337 v pouzdře TO - 92, jehož maximální kolektorový proud  $I_c = 800 \text{ mA}$ , maximální napětí  $U_{ce} = 45 \text{ V}$  a maximální ztrátový výkon  $P_{cmax} = 625 \text{ mW}$ . [17] Tranzistor BC337 má tedy vyhovující parametry. Podle katalogového listu je jeho nejmenší stejnosměrný proudový zesilovací činitel  $H_{FE}$  roven hodnotě 160. Z rovnice (2.27) lze dopočítat proud  $I_b$ , který poteče do báze tranzistoru  $T_1$ , pokud kolektorem  $T_1$  poteče proud  $I_c = 0,163 \text{ mA}$ . Za těchto podmínek vychází velikost proudu  $I_b$  rovna 1 mA, takto velký proud již lze bez problémů odebírat přímo z výstupu stabilizátoru LM 723.

Další částí modulů stabilizátoru je signalizace nadproudu. Řešení signalizace je stejné jako u 5 V modulu. Napěťová úroveň signalizace je zde nastavena na hodnotu 3,5 V. Pokud výstupní napětí klesne pod tuto hladinu, signalizace nadproudu se aktivuje. Pro signalizaci je opět použita červená LED dioda HLMP - 3316.

12 V moduly mají na svém vstupu vyšší napětí, než bylo v případě 5 V modulu, a proto bylo potřeba upravit hodnotu odporu předřadného rezistoru signalizační LED diody. Velikost napájecího napětí  $U_{in}$  je rovna:

$$U_{in} = U_{sek} \cdot \sqrt{2} - 2 \cdot U_p = 15 \cdot \sqrt{2} - 2 \cdot 0,7 = 19,8 \text{ V}, \quad (2.28)$$

kde  $U_{sek}$  je efektivní hodnota napětí sekundárního vinutí transformátoru a  $U_p$  je prahové napětí diod v usměrňovači. Velikost odporu předřadného rezistoru  $R_8$  je určena podle rovnice (2.28) jako:

$$R_8 = \frac{U_{in} - U_D}{I_D} = \frac{19,8 - 2}{10 \cdot 10^{-3}} = 1,78 \text{ k}\Omega, \quad (2.29)$$

kde  $U_D$  je potřebné napětí na LED diodě, které je rovné hodnotě 2 V, a  $I_D$  je potřebný proud protékající diodou rovný hodnotě 10 mA. Z řady E 12 byl zvolen rezistor s hodnotou odporu 1,8 k $\Omega$ .

Na výstupu zdroje je zařazena zelená LED dioda HLMP - 3507 signalizující bezchybný chod stabilizátoru. Obě signální LED diody jsou umístěné na čelním panelu zdroje v blízkosti příslušných svorek výstupu.

V obvodu stabilizátoru jsou dále zařazeny ochranné diody  $D_1$  a  $D_2$  typu 1N5408 (viz dále).

### 2.4.3 Odrušení a ochrana stabilizátorů

Protože vedení mezi výstupy zdroje a napájeným zařízením bude při zkouškách EMC vystavováno elektromagnetickému rušení, je potřeba moduly stabilizátorů odrušit. Problematika metod odrušování je velice rozsáhlá a přesahuje rámec této práce, takže se jí tato práce bude věnovat pouze okrajově z praktického hlediska.

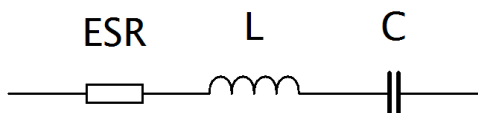
Pro odrušení bylo využito filtračních kondenzátorů připojených paralelně na výstupy stabilizátorů. U 5 V modulu jsou to kondenzátory  $C_{11}$ ,  $C_{12}$  a  $C_{13}$ , v případě 12 V modulů jsou to kondenzátory  $C_7$ ,  $C_8$  a  $C_9$ . Úkolem těchto kondenzátorů je potlačit symetrické složky rušení vnikající skrze svorky zdroje [3]. Rušivý signál by jinak ovlivňoval

napětíovou i proudovou regulační smyčku zdroje a mohlo by dojít k jejich poškození, případně k poškození testovaného zařízení vlivem přepětí na výstupu zdroje.

Ideální kondenzátor by měl mít pro stejnosměrný signál impedanci blížíící se nekonečnu. S rostoucí frekvencí signálu by jeho impedance měla lineárně klesat a v nekonečnu by se měla blížit k nule. Toto tvrzení vyplývá ze vztahu pro impedanci ideálního kondenzátoru [8]:

$$|Z_C| = X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad (\Omega), \quad (2.30)$$

kde  $|Z_C|$  je modul (velikost) impedance,  $X_C$  je reaktance a  $\omega$  je úhlová frekvence úměrná frekvenci signálu. Skutečný kondenzátor vlivem svojí konstrukce vykazuje krom kapacity také parazitní indukčnost přívodních vodičů a elektrod  $L$  a tzv. ekvivalentní sériový odpor  $ESR$ , který je tvořený odporem přívodních vodičů a ztrátami v dielektriku kondenzátoru. [8] Zjednodušený model reálného kondenzátoru je uveden na Obr. 2.19.



Obr. 2.19 Zjednodušený model skutečného kondenzátoru

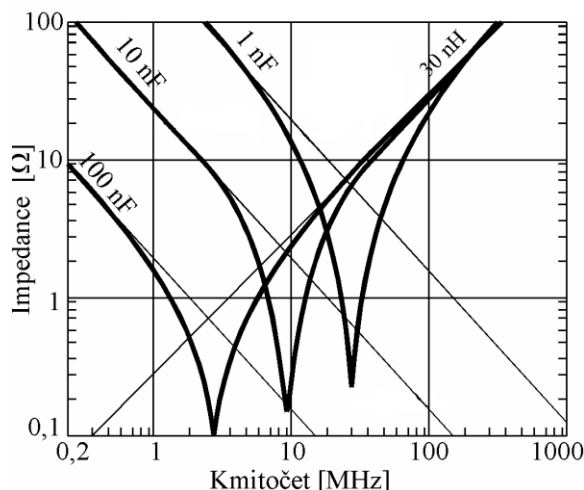
Je patrné, že skutečný kondenzátor se chová jako sériový rezonanční obvod s určitým rezonančním kmitočtem  $f_r$  daným podle Thomsonova vztahu:

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (\text{Hz}), \quad (2.31)$$

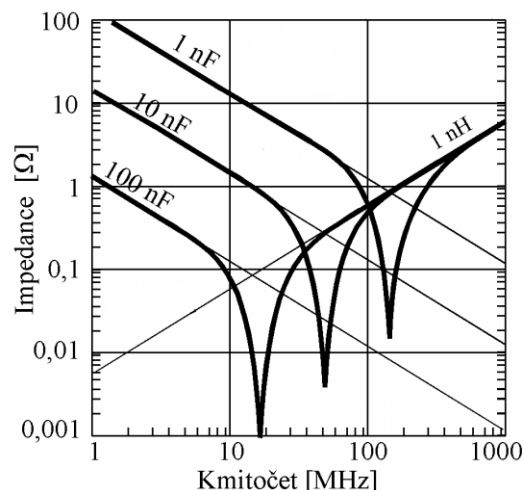
kde  $L$  je velikost parazitní indukčnosti a  $C$  je kapacita kondenzátoru.

Pro frekvence menší než je rezonanční kmitočet  $f_r$ , vykazuje kondenzátor kapacitní charakter impedance. Na rezonančním kmitočtu  $f_r$  se kondenzátor chová pouze jako činný odpor s velikostí rovnou hodnotě  $ESR$ . Pro kmitočet větší než je rezonanční kmitočet  $f_r$ , vykazuje kondenzátor induktivní charakter impedance. Reálný kondenzátor je tedy použitelný pouze pro kmitočty menší, než je jeho rezonanční kmitočet  $f_r$ . [8]

Velikost parazitní indukčnosti je úměrná délce vývodů kondenzátorů, je tedy zřejmé, že kondenzátory v provedení THT ji budou mít větší oproti kondenzátorům v SMD provedení. [7] Orientační závislost impedance na kmitočtu reálných kondenzátorů v THT a SMD provedení je uvedena na Obr. 2.20.



Keramické kondenzátory s vývody 0,25“



Keramické kondenzátory SMD 0805

Obr. 2.20 Kmitočtová závislost impedance skutečných kondenzátorů (1 nF, 10 nF, 100 nF) [7]

Z uvedeného vyplývá, že kondenzátory v SMD provedení jsou použitelné do vyšších kmitočtů než kondenzátory v THT provedení se stejnou kapacitou. Z tohoto důvodu jsou všechny použité filtrační kondenzátory v SMD provedení. Kvůli pokrytí větší šířky pásma kmitočtů je použito paralelní řazení více kondenzátorů s různými hodnotami kapacity od 100 pF do 100 nF. [7]

Dalším doplňkem, který zabraňuje rozkmitání regulační smyčky napětí, je antiparalelní kombinace diod  $D_3$  a  $D_4$  vřazená mezi vstupy zesilovače regulační odchylky u všech modulů stabilizátorů. Tyto diody zabraňují případnému zvýšení diferenčního napětí  $u_d$  mezi invertujícím a neinvertujícím vstupem zesilovače regulační odchylky vlivem rušení. Ve skutečnosti bude minimální napětí mezi těmito vstupy rovné prahovému napětí  $U_p$  těchto diod. Z tohoto důvodu byly zvoleny Schottkyho diody, které mají prahové napětí přibližně 0,3 V. Další parametry těchto diod nejsou nijak kritické a proto byl typ volen spíše podle dostupnosti u dodavatele. Paralelně k těmto diodám je vřazen kondenzátor s kapacitou 100 pF.

Další kondenzátor je zařazen paralelně k proudovému snímacímu rezistoru nadproudové ochrany stabilizátorů. Tento kondenzátor zajišťuje potlačení střídavého úbytku napětí na rezistoru vzniklého vlivem průchodu střídavých rušivých proudů. Toto napětí by jinak ovlivňovalo správnou funkčnost nadproudových ochran stabilizátorů. Velikosti kapacit kondenzátorů byly stanoveny v souladu s Obr. 2.20 a Tab. 2.1.

Tab. 2.1 Doporučené kapacity k odrušení různých kmitočtových pásem [3]

Odrůšované kmitočtové pásmo	Doporučené hodnoty odrušovacích kondenzátorů
10 kHz - 0,5 MHz	5 - 4 - 2 - 1 - 0,5 $\mu$ F
0,5 - 6 MHz	0,5 - 0,25 - 0,1 $\mu$ F
6 - 30 MHz	100 nF až 1 nF
nad 30 MHz	méně než 1 nF

Během měření na testovacích modulech stabilizátorů v EMC komoře bylo zjištěno, že použité výše popsané metody odrušení nejsou dostačující. Proto byla za každý modul stabilizátoru vřazena dvojice odrušovacích feritových filtrů, potlačujících nesymetrické složky rušení. První filtr s rezonančním kmitočtem 100 MHz má označení Würth 74271733 a druhý filtr s rezonančním kmitočtem 300 MHz má označení Würth 74271633. [18] [19] Každou dvojicí filtrů jsou protaženy dva závity vodičů. Tento způsob odrušení se při měření projevil jako vyhovující.

Již dříve bylo zmíněno, že všechny moduly obsahují ochranné diody  $D_1$  a  $D_2$ . Tyto diody chrání stabilizátory před případným vnějším napětím v obou polaritách, které se může objevit na výstupu zdroje. Důvodem vzniklé situace mohou být například nabitě filtrační kondenzátory v napájeném zařízení. Napětí přivedené na výstup zdroje by nadměrně zatěžovalo přechod báze - emitor řídicího tranzistoru  $T_2$  závěrným napětím a mohlo by dojít k jeho destrukci. [2]

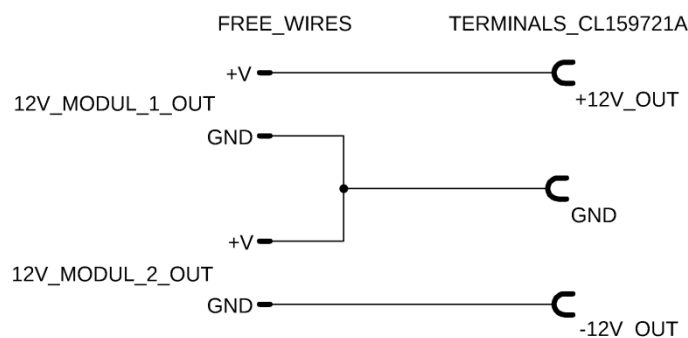
## 2.5 Výstupy zdroje

Poslední částí blokového schématu zdroje (Obr. 2.1) jsou výstupy jednotlivých kanálů zdroje. Volba konektorů použitých na výstupech zdroje vychází z požadavku na univerzálnost zdroje a umožňuje připojení široké škály napájených zařízení.

5 V kanál má výstup opatřený svorkami s označením CL159721A umožňujícími připojení 4 mm banánků i odizolovaného vodiče bez konektoru. Svorky jsou barevně odlišeny podle polarity. Červenou barvou je označena svorka s kladným potenciálem (+5 V) a černou barvou svorka s nulovým potenciálem (GND).

V současnosti je standardem napájení skrze USB, proto je zdroj vybaven také 5 V výstupy v podobě USB typu A a B.

Výstupy 12 V stabilizátorů jsou zapojeny do symetrického výstupu. Propojením GND jednoho modulu s kladným pólem druhého modulu vznikl symetrický výstup +12 V, GND a -12 V. Schéma zapojení symetrického 12 V výstupu je na Obr. 2.21.



Obr. 2.21 Schéma zapojení symetrického 12 V výstupu zdroje

Pro symetrický 12 V výstup je použit stejný typ svorek jako u 5 V výstupu. Červenou barvou je označena svorka s kladným potenciálem (+12 V), černou barvou svorka s nulovým potenciálem (GND) a modrou barvou svorka se záporným potenciálem (-12 V).

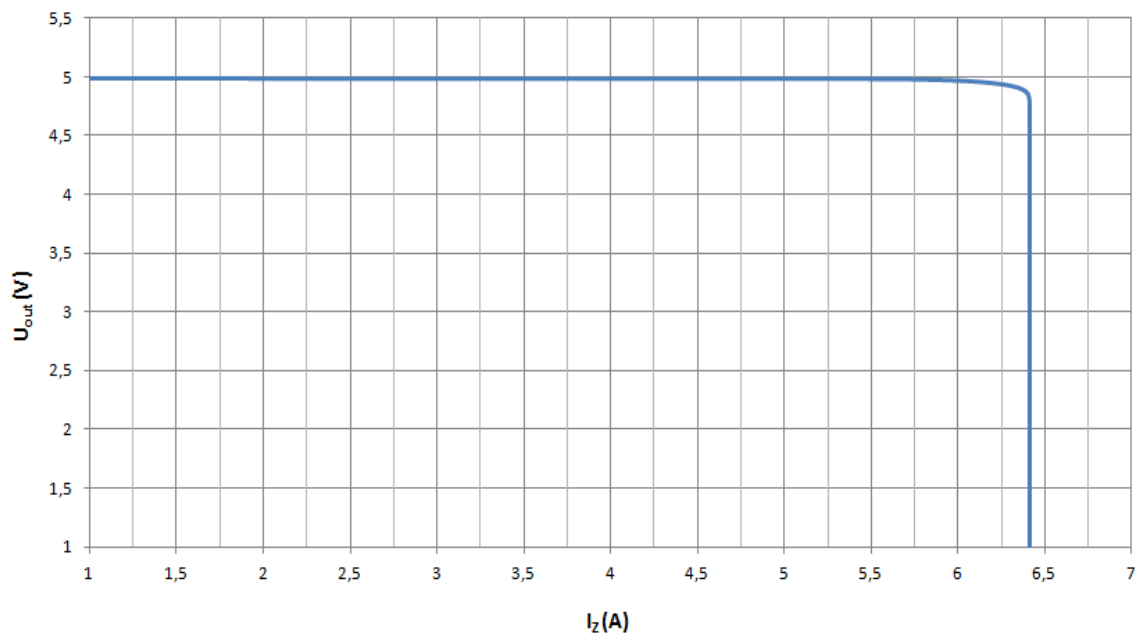
Na čelním panelu zdroje je dále umístěna zemnicí svorka připojená přes zemnicí šroub šasi na ochranný vodič "PE". Tato svorka je označena zelenou barvou.

## 2.6 Výsledky počítačové simulace obvodů navrhovaného zdroje

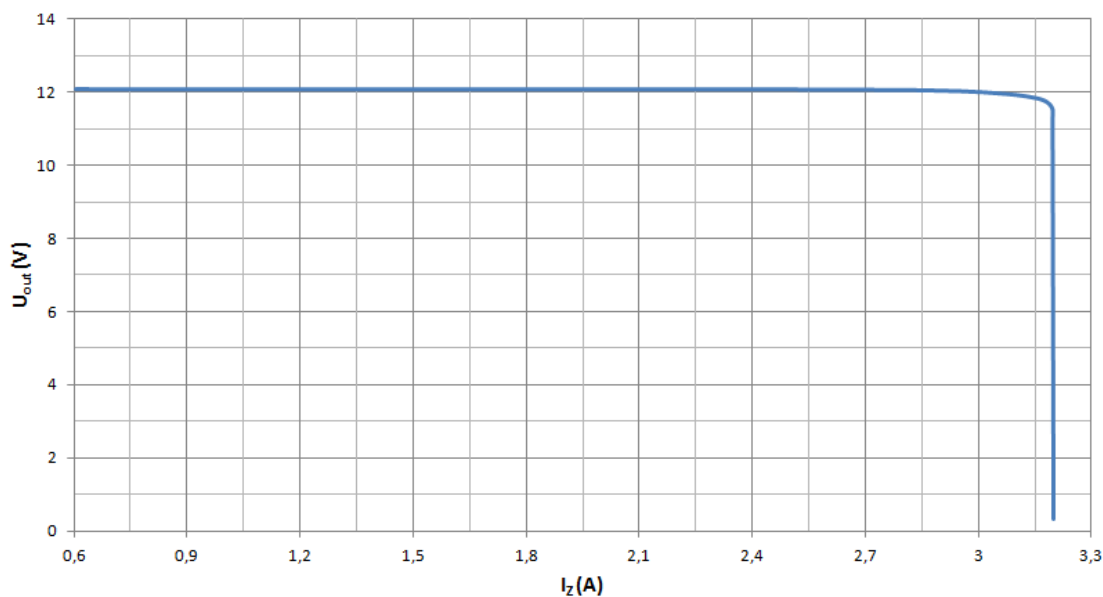
Ověření správnosti návrhu usměrňovačů, filtrů a stabilizátorů bylo provedeno pomocí počítačové simulace v programu LTspice. Tento krok pomohl usnadnit případné úpravy a vylepšení návrhu před samotnou praktickou realizací zdroje.

### 2.6.1 Simulace - zatěžovací charakteristika

Ze zatěžovacích charakteristik (závislosti výstupního napětí zdroje  $U_{out}$  na odebíraném proudu zátěží  $I_z$ ) bylo ověřeno, zda je na výstupu stabilizátoru požadované napětí a jestli je správně navržena nadproudová ochrana zdroje. Zatěžovací charakteristika 5 V stabilizátoru je na Obr. 2.22 a 12 V stabilizátoru na Obr. 2.23.



Obr. 2.22 Zatěžovací charakteristika 5 V stabilizátoru



Obr. 2.23 Zatěžovací charakteristika 12 V stabilizátoru

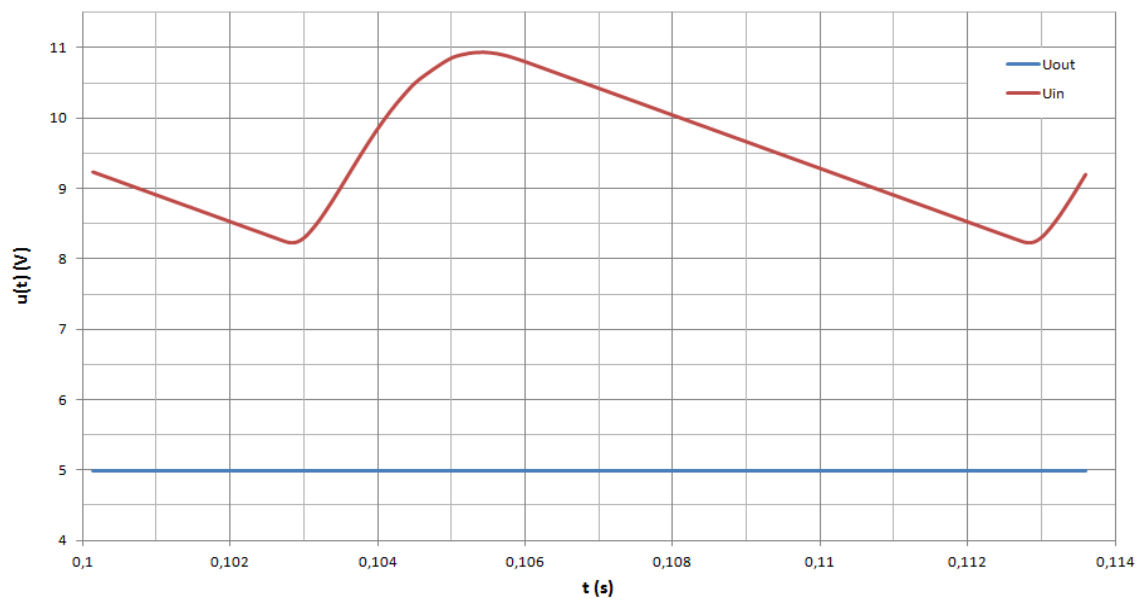
Z obou zatěžovacích charakteristik je patrné, že teoretický návrh stabilizátorů je správný. 5 V stabilizátor má požadované výstupní napětí 5 V a k limitaci výstupního proudu dochází přibližně na předpokládaných 6,5 A. Parametry 12 V stabilizátoru jsou taktéž v souladu s teoretickým návrhem. Výstupní napětí zde činí požadovaných 12 V a k proudové limitaci dochází při 3,25 A.

### 2.6.2 Simulace - časové průběhy vstupního a výstupního napětí stabilizátorů

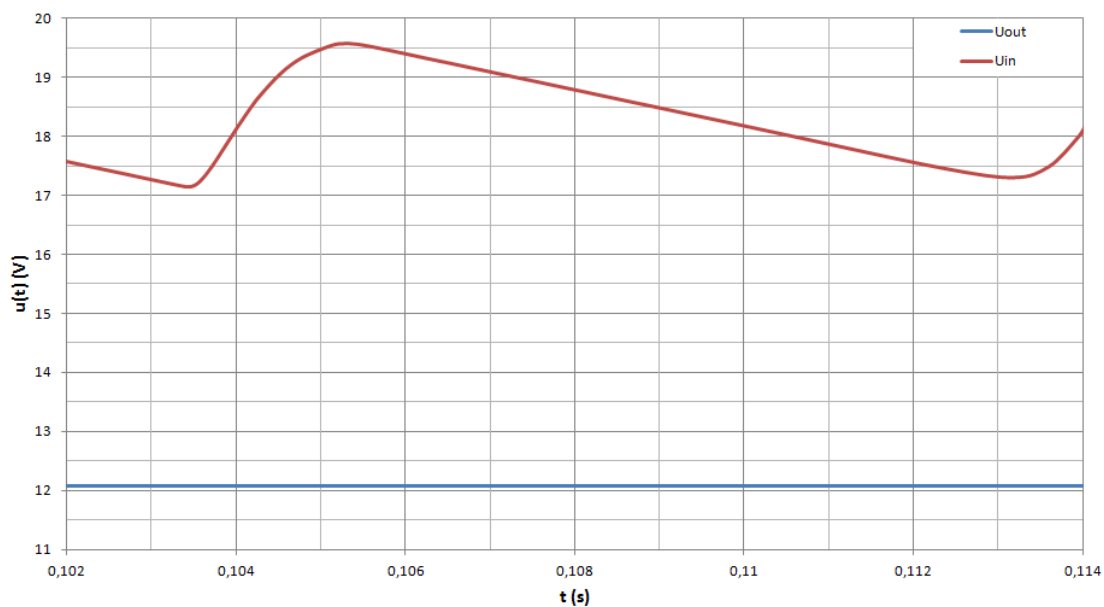
Z časových průběhů vstupních napětí  $U_{in}$  a výstupních napětí  $U_{out}$  stabilizátorů byla ověřena správnost návrhu vyhlazovacích filtrů tvořených vyhlazovacími kondenzátory (viz kapitola 2.3.2). Simulace byla provedena při jmenovité zátěži obou stabilizátorů.

Časový průběh vstupního a výstupního napětí 5 V stabilizátoru je na Obr. 2.24 a 12 V stabilizátorů na Obr. 2.25.





Obr. 2.24 Časové průběhy vstupního napětí  $u_{in}$  (modrý průběh) a výstupního napětí  $u_{out}$  (zelený průběh) 5 V stabilizátoru při odběru proudu 5 A



Obr. 2.25 Časové průběhy vstupního napětí  $u_{in}$  (zelený průběh) a výstupního napětí  $u_{out}$  (modrý průběh) 12 V stabilizátoru při odběru proudu 2 A

Z časových průběhů je patrné, že výstupní napětí stabilizátorů  $U_{out}$  mají takřka nulové zvlnění  $\Delta u_{pp}$ , parametry síťového transformátoru i vyhlazovací filtry jsou tedy navrženy optimálně.

## 2.7 Tepelná bilance

Vznikající ztrátový výkon na výkonových částech zdroje je potřeba efektivně chladit. Dlouhodobé tepelné přetížení vede k degradaci součástek a může dojít i k okamžité destrukci. [9] Návrh chlazení vychází z nejkritičtějšího provozního režimu, ve kterém se zdroj může nacházet. Tímto režimem je zkrat na výstupech zdroje, tedy stav, kdy řídicími tranzistory teče maximální proud  $I_{max}$  a je na nich nejvyšší napěťový úbytek  $\Delta U$ .

### 2.7.1 Tepelná bilance 5 V kanálu

Velikost ztrátového výkonu  $P_Z$  na řídicím tranzistoru 5 V stabilizátoru ( $T_2$  - 2N3055) je stanovena podle rovnice:

$$P_{zmax} = \Delta U_{max} \cdot I_{zmax} = U_{in} \cdot I_{max} = 11,33 \cdot 6,5 = 73,6 \text{ W}, \quad (2.32)$$

kde  $\Delta U_{max}$  je maximální hodnota napětí mezi kolektorem a emitorem tranzistoru  $T_2$ ,  $I_{zmax}$  je maximální hodnota proudu protékajícího kolektorem tranzistoru  $T_2$ ,  $U_{in}$  je vstupní napětí stabilizátoru a  $I_{max}$  je zkratový proud zdroje (maximální proud kanálu).

Pro tento ztrátový výkon je potřeba navrhnout vhodné rozměry chladiče s vhodným tepelným odporem  $R_{TH\_HS}$  (heatsink). Maximální teplota čipu tranzistoru 2N3055, kterou výrobce udává v katalogovém listu, je 200 °C. Pro výpočet chladiče byla tato teplota snížena kvůli životnosti tranzistoru na 190 °C. Okolní teplota je uvažována 50 °C. Tepelný odpor chladiče je stanoven podle rovnice [9]:

$$R_{TH\_HS} = \frac{T_{max} - T_a}{P_{zmax}} - (R_{TH\_JC} + R_{TH\_CHS}), \quad (2.32)$$

$$R_{TH\_HS} = \frac{190 - 50}{73,6} - (1,52 + 0,25) = 0,13 \text{ °C/W},$$

kde  $T_{max}$  je maximální teplota čipu tranzistoru,  $T_a$  je teplota prostředí (ambient),  $R_{TH\_JC}$  je tepelný odpor přechodu mezi čipem a pouzdrem tranzistoru (pro 2N3055 výrobce v katalogu udává hodnotu 1,52 °C/W) a  $R_{TH\_CHS}$  je tepelný odpor použité izolační podložky pod pouzdrem tranzistoru.

Z konstrukčních i ekonomických důvodů byl zvolen chladič z řady SK 501 od výrobce Fischer elektronik s rozměry 300 × 40 × 110 mm. Tepelný odpor udávaný výrobcem je v rozmezí 0,3 - 0,5 °C/W. Chlazení je tedy dimenzováno s dostatečnou rezervou na ztrátový výkon při dlouhodobém odběru jmenovitého proudu 5 A. Není však dostatečně dimenzován na dlouhodobý stav zkratu.

### 2.7.2 Tepelná bilance 12 V kanálů

Řídicí tranzistory 12 V stabilizátorů ( $T_2$  - 2N3055) jsou umístěny na stejném chladiči. Ztrátový výkon  $P_{zmax}$  jednoho kanálu je stanoven podle rovnice (2.32):

$$P_{zmax} = U_{in} \cdot I_{max} = 19,8 \cdot 3,25 = 64,3 \text{ W}, \quad (2.33)$$

kde  $U_{in}$  je vstupní napětí stabilizátoru a  $I_{max}$  je zkratový proud zdroje (maximální proud kanálu). Protože kanály 12 V zdroje jsou navrženy se stejnými parametry, lze předpokládat stejné ztrátové výkony. Pro výpočet tepelného odporu chladiče bude uvažována teplota čipu tranzistoru 2N3055 o velikosti 190 °C. Pro teplotu okolí bude uvažováno 50 °C. Tepelný odpor chladiče je stanoven podle rovnice (2.34) [9]:

$$R_{TH_{HS}} = \frac{T_{max} - T_a}{P_{zmax}} - (R_{TH_{JC}} + R_{TH_{CHS}}), \quad (2.34)$$

$$R_{TH_{HS}} = \frac{190 - 50}{128,6} - (1,52 + 0,25) = 0,4 \text{ °C/W},$$

kde  $T_{max}$  je maximální teplota čipu tranzistoru,  $T_a$  je teplota prostředí (ambient),  $R_{TH_{JC}}$  je tepelný odpor přechodu mezi čipem a pouzdrem tranzistoru (pro 2N3055 výrobce v katalogu udává hodnotu 1,52 °C/W) a  $R_{TH_{CHS}}$  je tepelný odpor použité izolační podložky pod pouzdrem tranzistoru.

Opět byl zvolen chladič SK 501 od výrobce Fischer elektronik s rozměry 300 × 40 × 110 mm, takže je zřejmé, že chlazení je dostatečně dimenzováno jak pro ztrátový výkon při odběru jmenovitého proudu 2 A, tak pro dlouhodobý stav zkratu výstupu.

### 3 Konstrukce zdroje

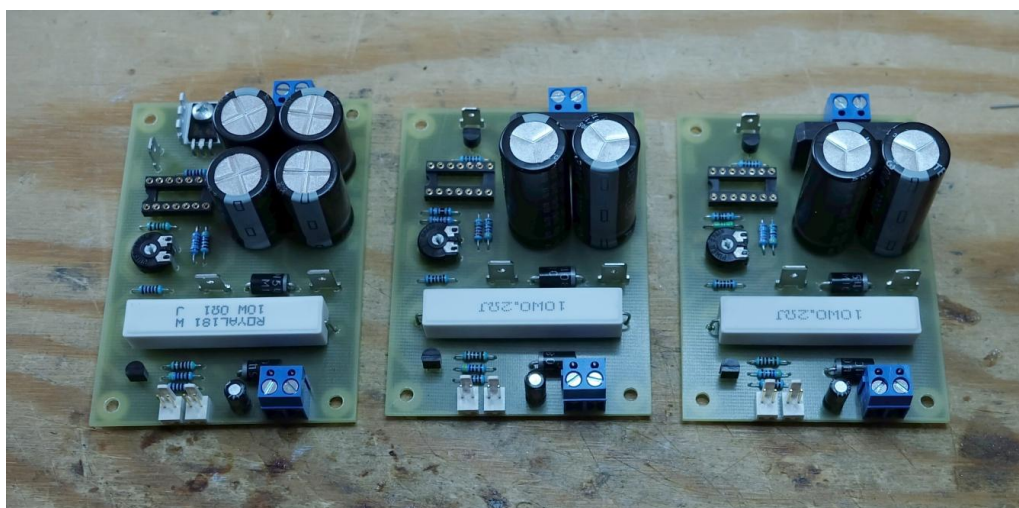
#### 3.1 Desky plošných spojů

Zdroj je tvořen třemi moduly na vlastních deskách plošného spoje (dále jen DPS). Na DPS 5 V zdroje o rozměrech  $91 \times 65$  mm je umístěn vyhlazovací filtr a stabilizátor, usměrňovač je umístěn mimo DPS na chladiči. Na DPS 12 V zdrojů o rozměrech  $86 \times 65$  mm jsou umístěny usměrňovače, vyhlazovací filtry i stabilizátory. Na samostatné čtvrté DPS jsou umístěny USB konektory. Tato DPS má rozměry  $62 \times 25$  mm a slouží jako konstrukční doplněk pro mechanické upevnění USB konektorů k šasi zdroje. Jednotlivé moduly jsou propojeny pomocí svorkovnic ARK500/2 a konektorů PSH02.

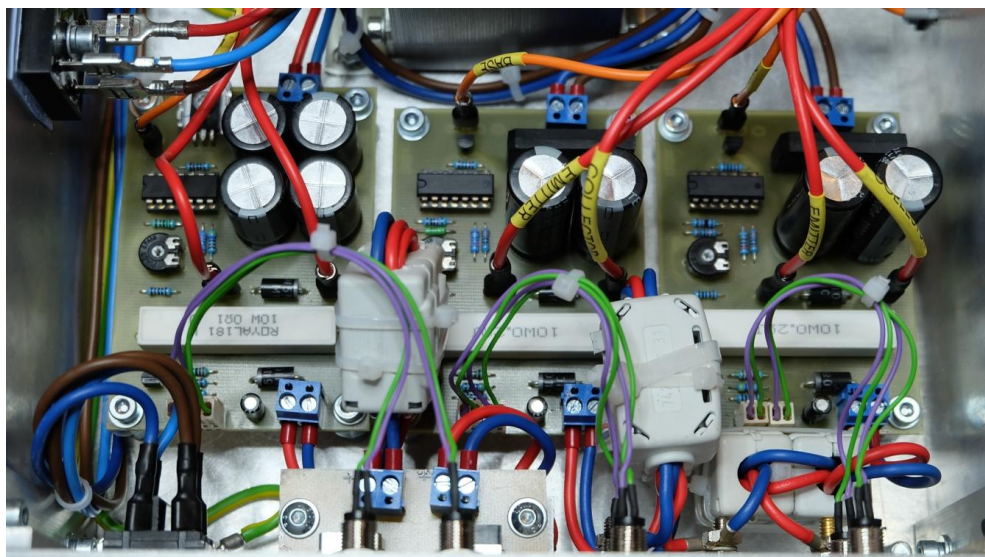
DPS jsou navrženy jako jednostranné v konstrukční třídě IV (příloha C). [7] Jejich návrh byl proveden v programu EAGLE a vyrobeny byly frézováním na CNC frézce.

Pro DPS byla zvolena kombinace technologií osazení SMD a THT jako vhodný kompromis mezi opravitelností zařízení a dodržením požadavků vysokofrekvenčního odrušení. V SMD pouzdrech 1206 jsou osazeny filtrační kondenzátory (viz 2.4.3). Ochranné diody na vstupech zesilovačů regulačních odchylek jsou též osazeny v SMD pouzdrech, konkrétně v pouzdrech MELF. V THT pouzdrech jsou osazeny zbylé součástky.

Integrované stabilizátory LM 723 jsou umístěny v patičkách DIP 14, aby je v případě poškození šlo snadno vyměnit.



Obr. 3.1 Osazené desky plošných spojů (vlevo 5 V modul, uprostřed a zprava 12 V moduly)



Obr. 3.2 Pohled na moduly zdrojů umístěné v šasi

Zvláštní důraz byl kladen při osazování výkonových rezistorů nadproudové ochrany. Kvůli jejich poměrně vysoké teplotě při průtoku proudu do zátěže musejí být umístěny v určité vzdálenosti od povrchu DPS, aby nedošlo k jeho degradaci teplem.

### 3.2 Šasi zdroje

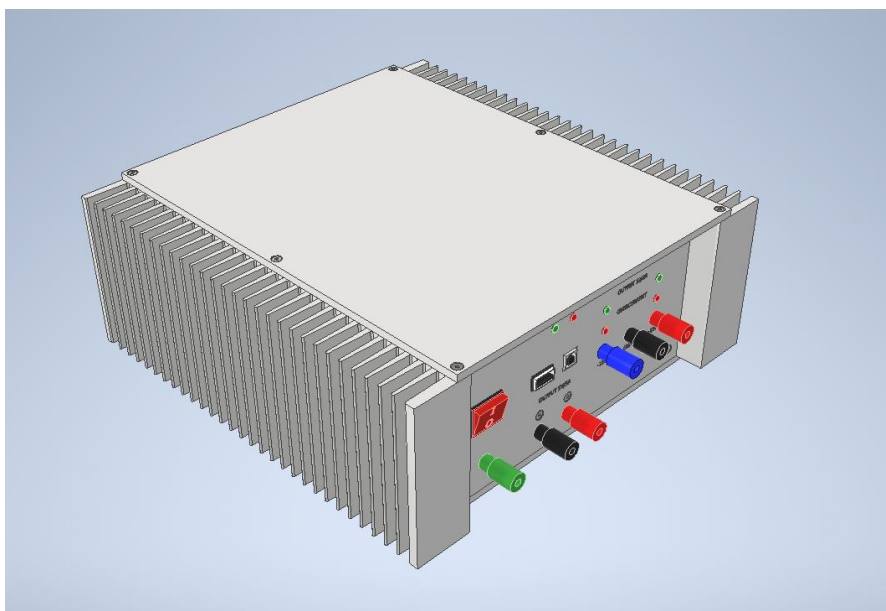
Hlavním požadavkem na konstrukci zdroje je mechanická odolnost. Tento požadavek byl hlavním kritériem při návrhu šasi celého zdroje. Zdroj je určen pro provoz v suchém a chemicky neagresivním prostředí s nízkou úrovní prašnosti. Proto nejsou na výběr materiálu a volbu povrchové úpravy kladeny žádné vysoké nároky. Pro svoji relativně nízkou hmotnost a snadnou tvárnost byl zvolen jako materiál šasi zdroje hliníkový plech. Šířka plechu byla volena s ohledem na hmotnost síťového transformátoru. Pro základnu a víko šasi byl zvolen plech o šířce 5 mm. Čelní panely jsou vyrobeny z plechu o šířce 3 mm. Celkové rozměry zdroje jsou  $300 \times 295 \times 130$  mm.

Boční stěny šasi tvoří chladiče výkonových prvků zdroje. Jak je uvedeno v podkapitole 2.7 Tepelná bilance, byly zvoleny chladiče SK 501 od výrobce Fischer elektronik s rozměry  $300 \times 40 \times 110$  mm. Čela chladičů jsou široká 10 mm, takže chladiče jsou dostatečně robustní, aby udržely celou konstrukci šasi. Základna a víko šasi jsou připevněny ke chladičům šesti šrouby se závitem M4. Čelní panely jsou ke chladičům připevněny pomocí hliníkových L profilů se závity M4. Šířka materiálu L profilů je 4 mm, takže do nich bylo také možno vyříznout závity.

Povrchová úprava vnějších částí zdroje byla provedena pouze přebroušením brusným papírem s různou zrnitostí.

Pro umístění tranzistorů 2N3055 v pouzdech TO 3 byly vyfrézovány otvory v žebrování chladičů. Frézování bylo provedeno na CNC frézce. Protože pouzdra tranzistoru nejsou na stejném napěťovém potenciálu jako chladiče (na pouzdře tranzistorů je vyveden kolektor), bylo je nutné izolovat. K izolování byly použity slídové izolační podložky s šířkou 0,05 mm. Tranzistory jsou upevněny pomocí šroubů se závitem M3. Na tyto šrouby jsou taktéž navlečeny izolační dutinky z PVC.

Plošné spoje modulů stabilizátorů jsou umístěny na distančních sloupcích o délce 10 mm. Distanční sloupky mají vnitřní závit M4. Plošný spoj s USB konektory je připevněn k čelnímu panelu pomocí L profilu a je též připevněn pomocí šroubů se závitem M4. Toto řešení zajišťuje konstrukčně nejlepší možnost upevnění USB konektorů v otvorech v čelním panelu.



*Obr. 3.3 Vizualizace šasi napájecího zdroje*

Šasi je umístěné na čtyřech gumových podstavcích. Ty jsou uchyceny na závitových osičkách se závitem M6. Vnitřní závit je vyříznut přímo v základové desce zdroje. Krom nožek slouží gumové bloky k tlumení případných nárazů stroje. Součástí šasi je také mosazný šroub sloužící jako zemnicí bod zdroje. Na tento šroub je přiveden ochranný vodič "PE". Dále je šasi vybaveno výsuvným madlem pro snadnější transport. Madlo je umístěno na víku šasi (madlo není součástí vizualizace na Obr. 3.3).

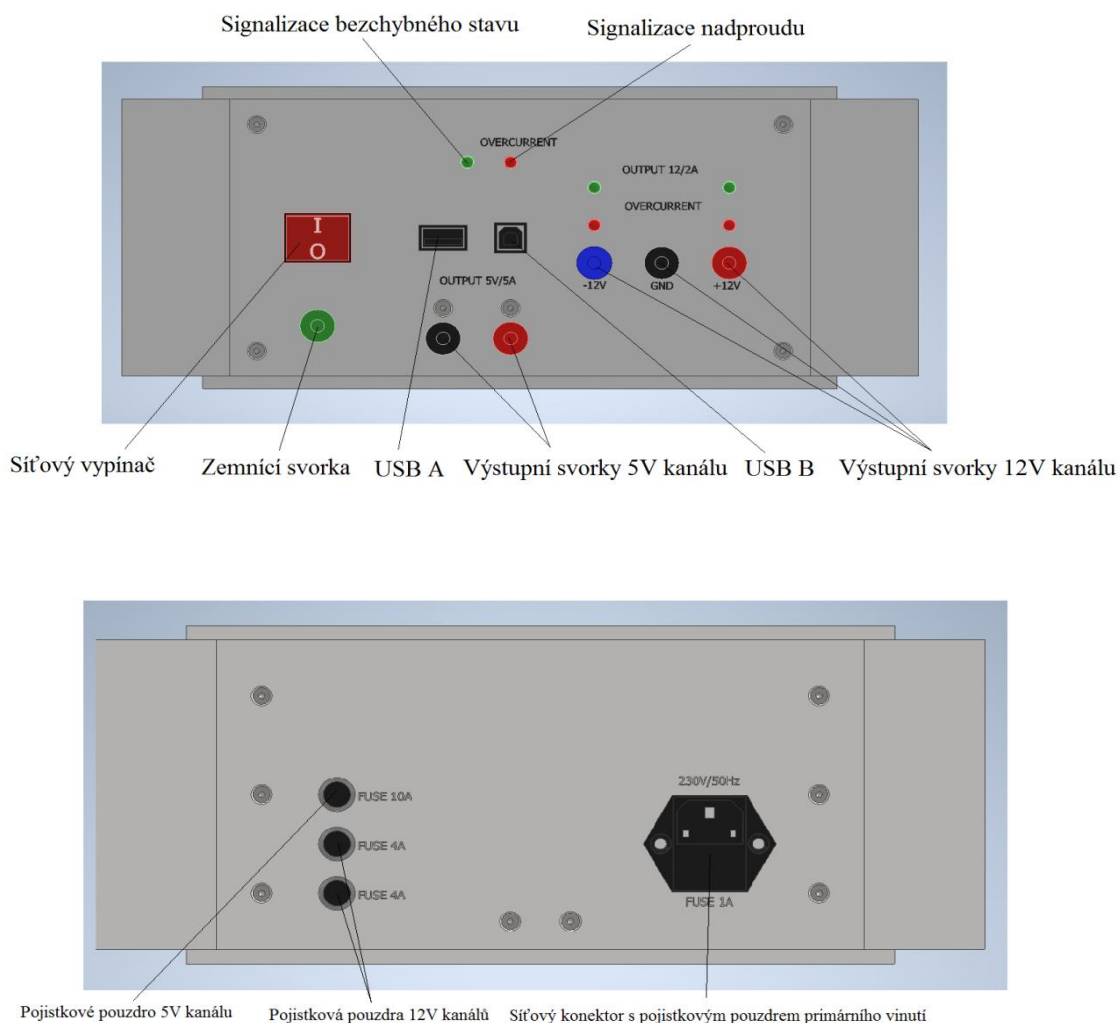
Celé šasi je navrženo tak, aby bylo snadno rozebíratelné v případě potřeby opravy některé hůře dostupné části. Všechny šrouby jsou na imbus 2,5 mm.

### 3.2.1 Popis čelních panelů zdroje

Čelní panely jsou zapuštěny o délku nejdelších prvků. Toto zapuštění slouží jako ochrana ovládacích prvků a svorkovnic proti poškození případným nárazem.

Na předním panelu se nachází síťový vypínač zdroje, výstupní USB konektory a svorkovnice 5 V a 12 V kanálů. Všechny prvky jsou uspořádány tak, aby byly kanály od sebe snadno rozeznatelné. Každý kanál je vybaven dvěma kontrolkami signalizujícími bezchybný chod a nadproud. Kontrolky jsou uchyceny v kovových objímkách se závitem pro uchycení. Na zadním panelu se nachází síťový konektor a pojistková pouzdra s tavnými pojistkami jistícími jednotlivé kanály zdroje.

Na obou panelech jsou umístěny samolepící štítky s popiskami v angličtině (viz Obr. 3.4).



Obr. 3.4 Popis ovládacích prvků zdroje

## 4 Testování a měření

Pro ověření funkčnosti zdroje a splnění všech požadavků bylo provedeno měření reálných parametrů zdroje. Cílem měření bylo ověřit tvrdost zdroje, funkčnost nadproudových ochran jednotlivých kanálů a chování stabilizátorů při různých režimech zatížení. Výsledky měření jsou v závěru porovnány s provedenou počítačovou simulací. Součástí měření byla také série testů EMC, jejichž cílem bylo ověřit, zda zdroj splňuje požadavky na odolnost proti elektromagnetickému rušení a zda sám o sobě není zdrojem elektromagnetického rušení.

Pro měření proudu byl použit multimetr OWON OW18A (True RMS), napětí bylo měřeno pomocí digitálního osciloskopu SIGLENT SDS 1104X-E. Dále pak byla použita elektronická aktivní zátěž 0 - 10 A (Obr. 4.2) zkonstruovaná v rámci vývoje a ověřování testovacích modulů stabilizátorů.



Obr. 4.1 Ilustrační snímek z měřícího pracoviště





Obr. 4.2 Elektronická aktivní zátěž

#### 4.1 Zatěžovací charakteristiky zdroje

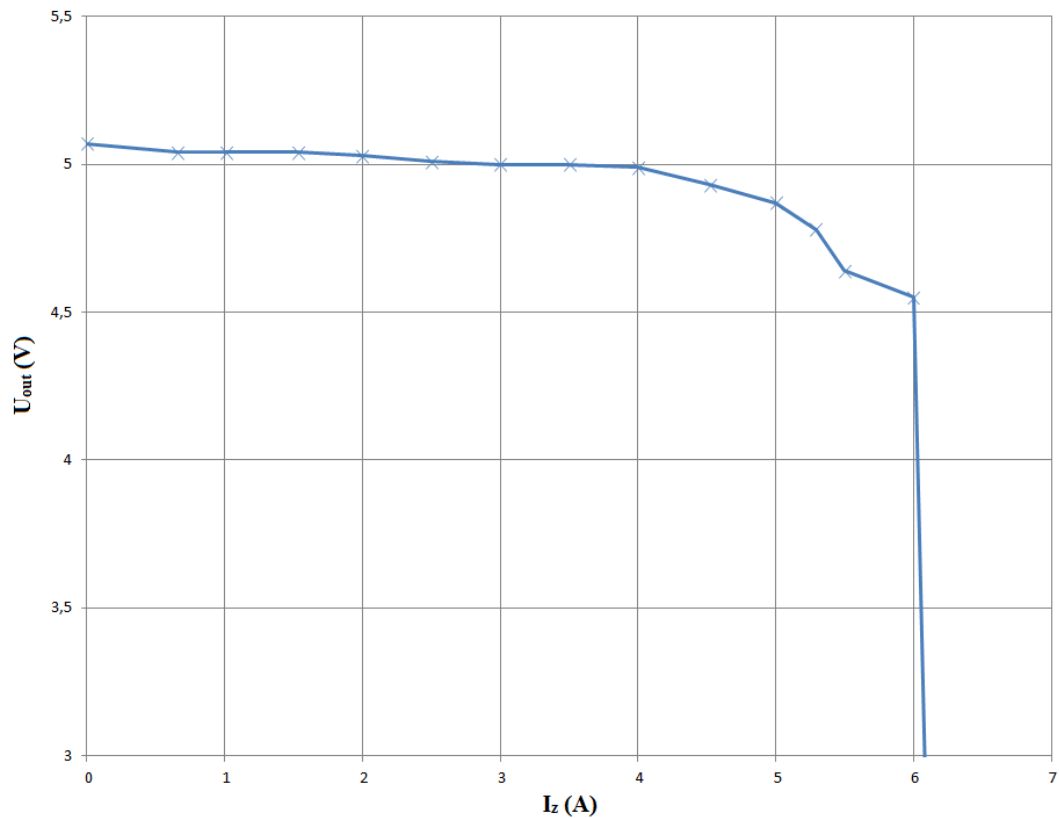
Zatěžovací charakteristika je závislost výstupního napětí zdroje  $U_{out}$  na odebíraném proudu zátěží  $I_z$ . Pro ideální zdroj napětí platí, že výstupní napětí tohoto zdroje je konstantní a nezávislé na odebíraném proudu. [1] Reálný zdroj vykazuje určitý vnitřní odpor  $R_V$ , na kterém vzniká úbytek napětí  $\Delta U$  vlivem protékajícího proudu  $I_z$ . Velikost tohoto odporu pak ovlivňuje tvrdost zdroje (nezávislost napětí  $U_{out}$  na proudu  $I_z$ ). Velikost vnitřního odporu zdroje je definována podle vztahu [1]:

$$R_V = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{U_{out} - U_z}{I_z} \quad (\Omega), \quad (4.01)$$

kde  $\Delta I$  je změna odebíraného proudu  $I_z$ ,  $\Delta U$  je změna výstupního napětí zdroje,  $U_{out}$  je výstupní napětí zdroje naprázdno ( $I_z = 0$  A) a  $U_z$  je výstupní napětí zdroje při odebíraném proudu  $I_z$ . Při výpočtu vnitřního odporu zdroje je vhodné zohlednit i vnitřní odpor a přesnost použitého voltmetru a ampérmetru.

Snahou je, aby vnitřní odpor zdroje byl co nejmenší. Velikost změny  $\Delta U$  lze ovlivnit kvalitou použitého napěťového stabilizátoru.

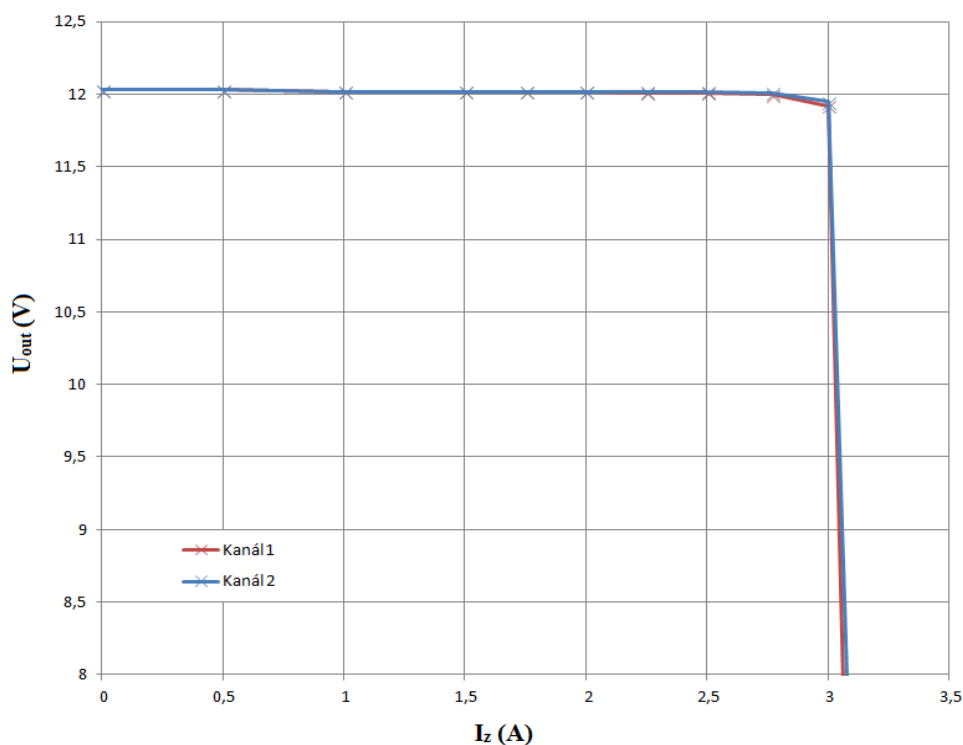
Naměřená zatěžovací charakteristika 5 V kanálu je uvedena na Obr. 4.3. Naměřené hodnoty jsou v příloze G.3



Obr. 4.3 Zatěžovací charakteristika 5 V kanálu

Z průběhu charakteristiky lze konstatovat, že 5 V kanál vykazuje dostatečnou tvrdost. Pokles výstupního napětí  $U_{out}$  s narůstajícím zatěžovacím proudem  $I_z$  je minimální. K limitaci proudu nadproudovou ochranou kanálu došlo při odběru proudu 6 A.

Ve výsledcích měření ovšem není zanesena korekce chyby měřících přístrojů, což je třeba brát v úvahu. Ale i tak jsou parametry 5 V kanálu dostatečně uspokojivé. Tabulky naměřených hodnot jsou uvedeny v příloze G.3.



Obr. 4.4 Zatěžovací charakteristiky 12 V kanálů

Na Obr. 4.4 jsou vedeny zatěžovací charakteristiky 12 V kanálů. Parametry obou kanálů by měly být teoreticky stejné, takže i obě zatěžovací charakteristiky jsou si podobné. Lze opět konstatovat, že pokles výstupního napětí  $U_{out}$  s narůstajícím zatěžovacím proudem  $I_z$  je minimální, a kanály tak vykazují dostatečnou tvrdost. K limitaci proudu nadproudovou ochranou kanálů došlo při odběru proudu 3 A. Tabulky naměřených hodnot jsou uvedeny v příloze G.1 a G.2.

## 4.2 Zvlnění výstupního napětí

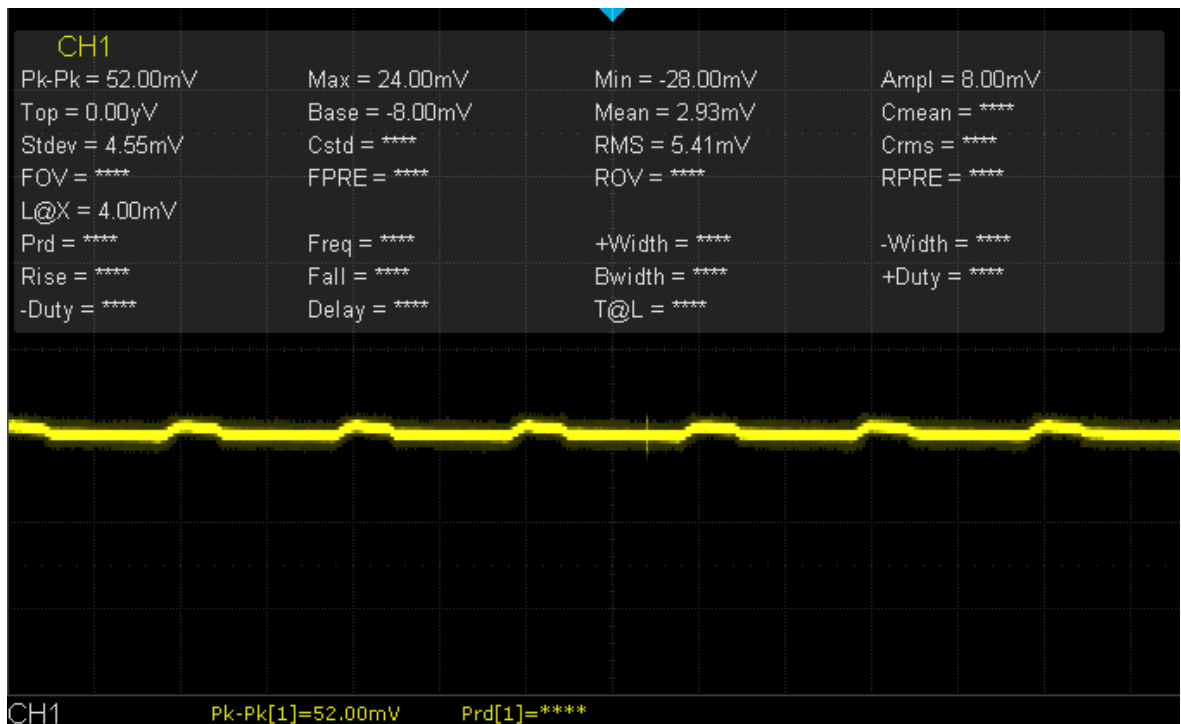
Dalším důležitým parametrem, který byl měřen, je zvlnění výstupního napětí při jmenovité zátěži kanálů. Z výsledků tohoto měření lze usoudit, že velikost kapacity vyhlazovacích kondenzátorů za usměrňovačem byla zvolena správně. Zvlnění je způsobeno superponovanou střídavou složkou výstupního napětí kanálů  $U_{out}$ . S rostoucím proudem  $I_z$  dochází k rychlejšímu vybíjení filtračních kondenzátorů. Tím dochází k poklesu napětí na mez, kde stabilizátor již nedokáže kvalitně stabilizovat, a vzniknou tak periodicky se opakující poklesy napětí na jeho výstupu. Kmitočet zvlnění je roven dvojnásobku kmitočtu rozvodné sítě, ze které je zdroj napájen, a zpravidla to bývá 100 Hz. Příliš velké zvlnění pak může způsobit nesprávnou funkci napájeného zařízení.



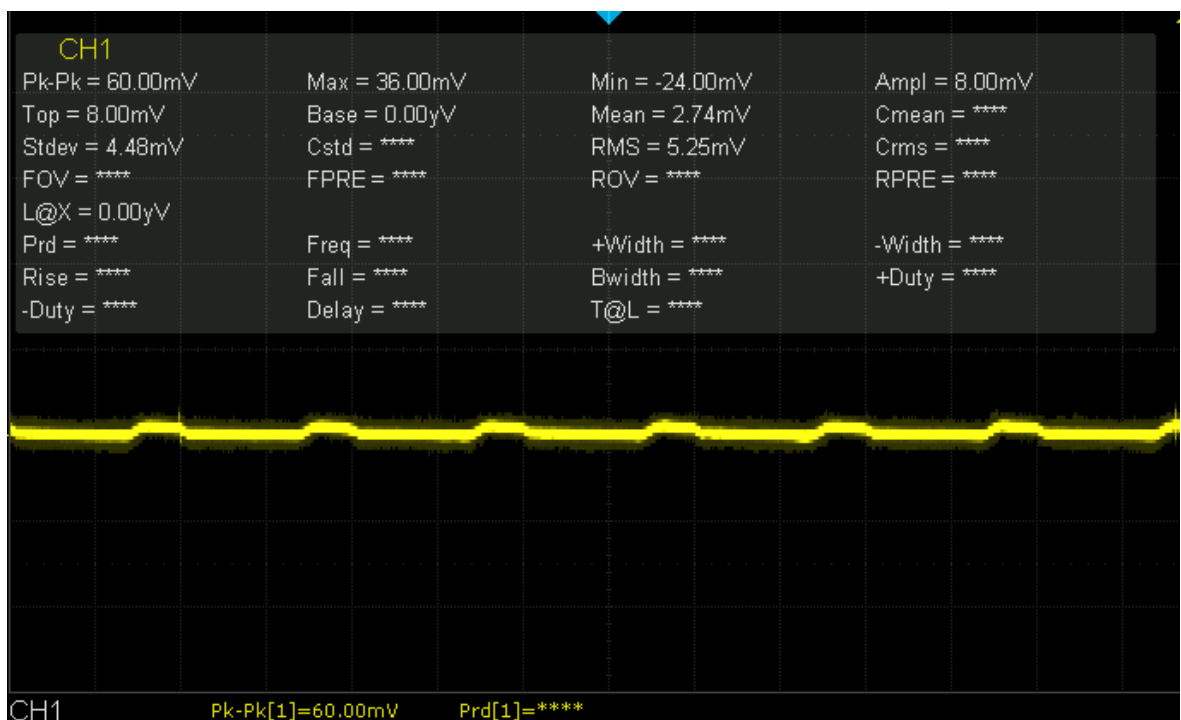
Obr. 4.5 Oscilogram s časovým průběhem výstupního napětí 5 V kanálu

Na Obr. 4.5 je uveden snímek z osciloskopu s časovým průběhem výstupního napětí 5 V kanálu při odběru jmenovitého zatěžovacího proudu 5 A. Zvlnění napětí má velikost 688 mV a kmitočet předpokládaných 100 Hz. Hodnota zvlnění je poměrně velká, to je zapříčiněno nízkou kapacitou vyhlazovacích kondenzátorů.

Na Obr. 4.6 a Obr. 4.7 jsou uvedeny snímky z osciloskopu s časovými průběhy výstupního napětí 12 V kanálů. Měření bylo opět provedeno při odběru jmenovitého zatěžovacího proudu 2 A. Velikosti zvlnění se u obou kanálů pohybují okolo hodnoty 55 mV. Lze tedy konstatovat, že zvlnění je minimální a vyhlazovací filtr je navržen optimálně.



Obr. 4.6 Oscilogram s časovým průběhem výstupního napětí 12 V kanálu 1



Obr. 4.7 Oscilogram s časovým průběhem výstupního napětí 12 V kanálu 2

### 4.3 Měření ztrátového výkonu na řídicích tranzistorech

Pro ověření výpočtů a úvah v podkapitole 2.7 Tepelná bilance bylo provedeno měření ztrátového výkonu na řídicích tranzistorech 2N3055. Ztrátový výkon byl měřen při jmenovitém zatížení a pro stav zkratu jednotlivých kanálů. Výsledky jsou uvedeny v Tab. 4.1.

Tab. 4.1 Výsledky měření ztrátového výkonu na řídicích tranzistorech

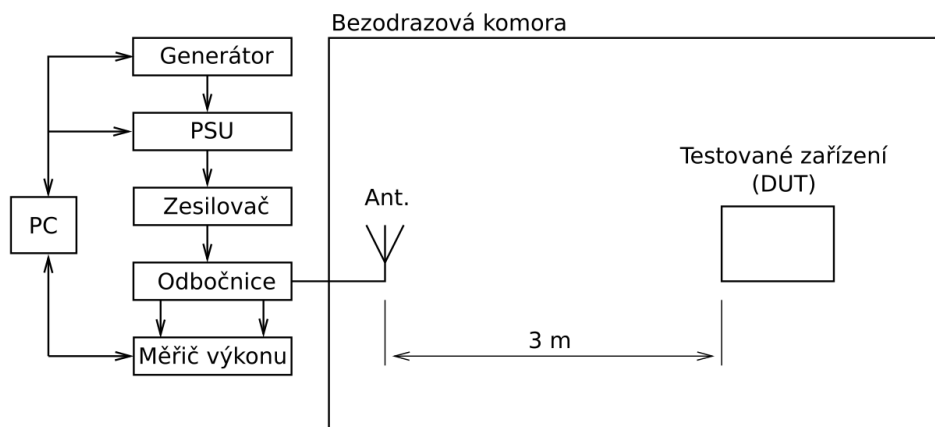
Kanál	5 V kanál	+12 V kanál	-12 V kanál
$\Delta U (U_{ce})$ (V) při jmenovitém zatížení	4,7	7	7
Jmenovitý proud $I_z$ (A)	5	2	2
$P_z$ (W)	23,5	14	14
$\Delta U (U_{ce})$ (V) při zkratu výstupu	8,9	18	17,9
Zkratový proud $I_z$ (A)	6,21	3,2	3,2
$P_z$ (W)	55,27	57,6	57,3

#### 4.4 Zkoušky EMC

Na zdroji byl proveden test odolnosti proti vyzařovanému elektromagnetickému poli dle normy ČSN EN 61000-4-3 ed.3. [11] Tato norma ustanovuje metodiku postupu zkoušky a zkušební úrovně signálu. Testování bylo provedeno ve dvou konfiguracích v kmitočtovém rozsahu 80 MHz až 1 GHz s vertikální i horizontální polarizací antény. V první konfiguraci byly zdroj a zátěž zdroje umístěny mimo ozařovanou zónu. V ozařované zóně bylo umístěno pouze vedení propojující zdroj se zátěží. Ve druhé konfiguraci byl zdroj i zátěž umístěny přímo v ozařované zóně. Mezi zdrojem a zátěží bylo 1 m dlouhé propojovací vedení. [10]

Bez feritových filtrů na výstupech zdroje došlo k narušení činnosti stabilizátorů v podobě kolísání výstupních napětí i přes zavedená opatření pro odrušení zdroje, popsaná v kapitole 2. Po doplnění feritových filtrů byly výsledky testů uspokojivé.

Pro testování byl použit VF generátor R&S SML03, VF zesilovač Frankonia FLH 200B, přepínač Frankonia RSU, měřič výkonu Frankonia PMS 1084 a anténa BTA-M. Uspořádání měřicí sestavy pro testování dle normy ČSN EN 61000-4-3 ed.3 [11] je uvedeno na Obr. 4.8

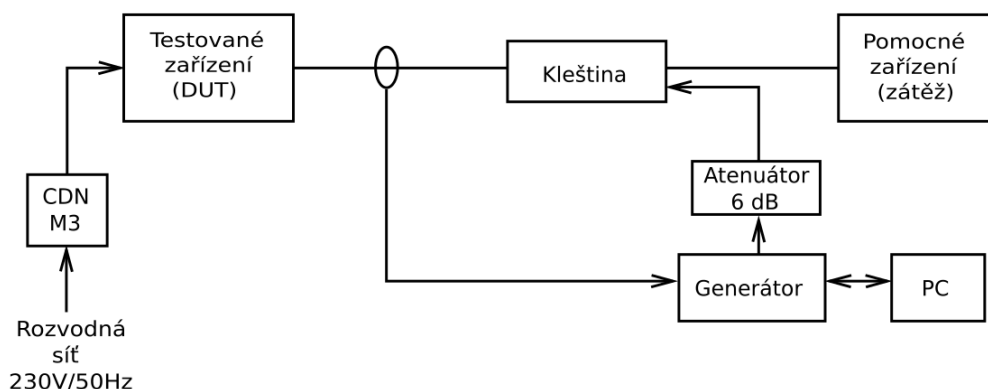


Obr. 4.8 Uspořádání měřicí sestavy pro testování dle normy ČSN EN 61000-4-3 ed.3

Dalším provedeným testem byl test odolnosti proti rušením šířeným vedením, indukovaným vysokofrekvenčními poli dle normy ČSN EN 61000-4-6 ed.4. [12] V případě tohoto testu není vnějším polem ozařováno celé zařízení, ale rušivé signály jsou zavedeny přímo do napájecích a komunikačních vedení. Vedením se pak tyto rušivé signály šíří do testovaného zařízení.

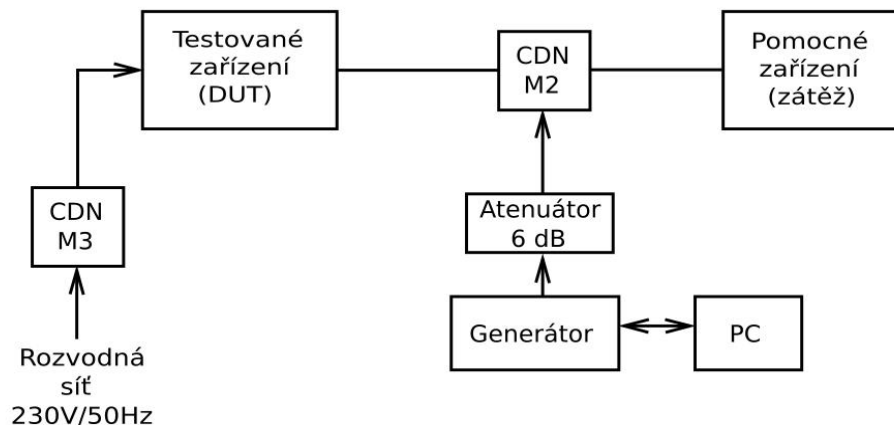
Provedený test byl uskutečněn v kmitočtovém rozsahu 150 kHz až 80 MHz opět ve dvou konfiguracích. V první konfiguraci bylo rušení do vedení mezi zátěží a zdrojem zavedeno pomocí elektromagnetické kleštiny EM 101. I přes zavedená odrušovací opatření docházelo v rozsahu 6 až 80 MHz při zkušební úrovni 10 V a 16 až 25 MHz při zkušební úrovni 3 V k narušení činnosti zdroje. Tento nežádoucí jev se nepodařilo odstranit, nicméně provedený test simuloval situaci, která v běžném provozu pravděpodobně nenastane, protože zdroj byl v této konfiguraci na pozici testovaného zařízení. Ve druhé konfiguraci byl zdroj zapojen jako pomocné zařízení. K navázání vysokofrekvenčního signálu do vedení byla použita vazební síť CDN M2. Tento test simuloval reálné použití zdroje jako pomocného napájecího zařízení pro napájení testovaného objektu. Výsledek tohoto testu byl uspokojivý, protože narušení činnosti se neprojevílo. [10]

V testovací sestavě byl použit generátor VF rušení CWS 500D, elektromagnetická kleština EM 101, oddělovací síť CDN M3 (na 230 V), vazební síť CDN M2, 6 dB útlumový článek (atenuátor) a proudová sonda FCC F-55. Uspořádání těchto testovacích sestav je uvedeno na Obr. 4.9 a Obr. 4.10



Obr. 4.9 Uspořádání měřicí sestavy pro testování dle normy ČSN EN 61000-4-6 ed.4 s elektromagnetickou kleštinou EM 101

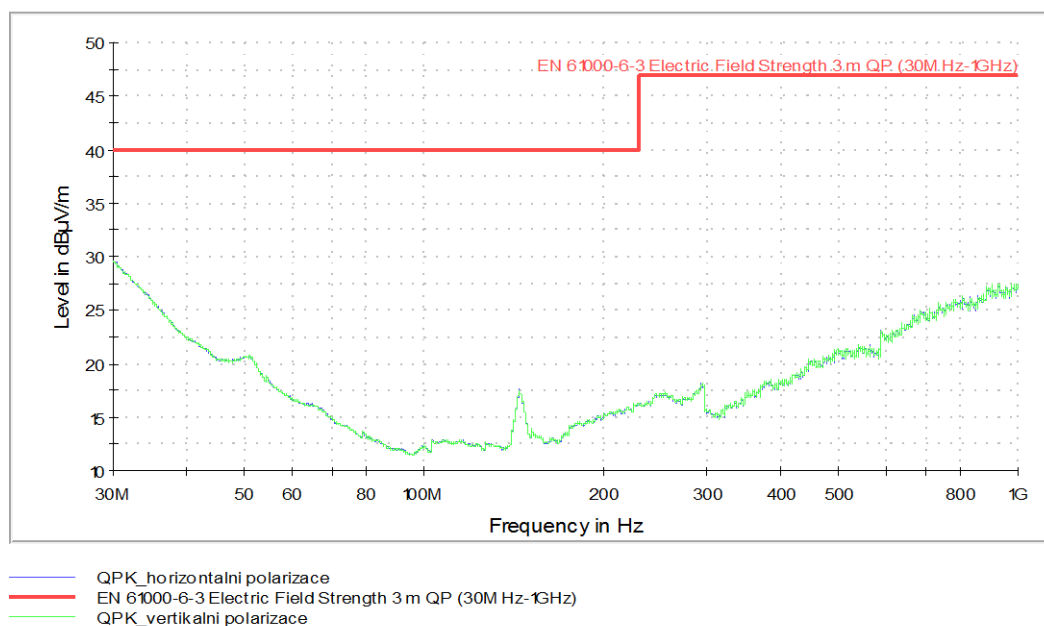




Obr. 4.10 Uspořádání měřicí sestavy pro testování dle normy ČSN EN 61000-4-6 ed.4 s vazební sítí CDN M2

Poslední provedené měření bylo měření vyzařovaných emisí dle normy ČSN EN 55011 ed.4. [13] Zdroj se zátěží byl umístěn ve vzdálenosti 3 m od měřicí antény ve výšce 1 m nad referenční zemní rovinou. Měření bylo provedeno s vertikální i horizontální polarizací antény v pásmu 30 MHz až 1 GHz. V obou případech bylo naměřeno pouze šumové pozadí komory bez viditelných emisí vyzařovaných napájecím zdrojem. Výsledek tohoto měření je též uspokojivý.

Pro měření byl použit měřicí přijímač R&S ESR7 a anténa BTA-M. Na Obr. 4.11 je uvedeno kmitočtové spektrum vyzařovaných emisí i s vynesenu limitní křivkou dle normy EN 61000-6-3 [27] pro vyhodnocení výsledků.



Obr. 4.11 Naměřené kmitočtové spektrum vyzařovaných emisí

#### 4.5 Porovnání výsledků měření se simulací

V tabulkách Tab. 4.2 a Tab. 4.3 jsou uvedeny změřené parametry a parametry ze simulace v programu LTspice.

Tab. 4.2 Změřené parametry a parametry ze simulace 5 V / 5 A kanálu zdroje

Parametr	$U_{out}$ (V) na prázdkno	$U_{out}$ (V) při odběru $I_z$ 5 A	Zvlnění $\Delta U_{pp}$ (mV) při odběru $I_z$ 5 A	Maximální proud $I_z$ (A)
Výsledek simulace	5	5	0	6,5
Skutečný (naměřený) parametr	5,07	4,87	668	6

Tab. 4.3 Změřené parametry a parametry ze simulace 12 V / 2 A kanálů zdroje

Parametr	$U_{out}$ (V) na prázdkno	$U_{out}$ (V) při odběru $I_z$ 5 A	Zvlnění $\Delta U_{pp}$ (mV) při odběru $I_z$ 5 A	Maximální proud $I_z$ (A)
Výsledek simulace	12	12	0	3,25
Skutečný (naměřený) parametr	12,03	12,02	$\pm 55$	3

Změřené a simulací získané parametry se dle předpokladu lehce rozcházejí. To lze odůvodnit tím, že v simulaci byly použity modely ideálních součástek s parametry nezávislými na teplotě. Právě závislost parametrů součástek na teplotě má největší podíl na vzniklých rozdílech. Skutečné součástky také vykazují parazitní parametry, jako je indukčnost, kapacita, případně ekvivalentní sériový odpor ESR u kondenzátorů, které se také projevují na výsledných reálných parametrech zdroje. Rozdílnost výsledků způsobuje dále fakt, že v simulaci byl použit ideální zdroj napětí s nulovým vnitřním odporem. Díky tomu nedocházelo k poklesu jeho napětí při odběru zatěžovacího proudu. Skutečný použitý transformátor má nenulový vnitřní odpor, na kterém vznikají úbytky napětí při odběru proudu. Kolísání výstupního napětí zdroje je též způsobeno kolísáním napětí v rozvodné síti v rozmezí 10 %. Tyto poklesy se podílí na velikosti zvlnění výstupního napětí jednotlivých kanálů zdroje.

V praxi pak nelze zanedbat ani vlastní odpor vodičů, kterými jsou jednotlivé části zdroje propojeny, případně odpor vodivých cest na deskách plošných spojů.

## 5 Závěr

Úkolem této práce bylo navrhnout a zkonstruovat víceúrovňový napájecí zdroj s 5 V / 5 A výstupem a  $\pm 12$  V / 2 A výstupem, určený pro napájení testovaných zařízení v bezodrazové komoře při EMC testech.

Zkonstruovaný zdroj odpovídá svými parametry zadání a lze jej používat pro činnost v bezodrazové komoře, návrh by bylo možné ještě vylepšit. Kanál s výstupním napětím 5 V vykazuje při jmenovitém zatěžovacím proudu 5 A zvlnění 668 mV. Toto zvlnění je poměrně velké a mohlo by způsobovat potíže například při napájení digitální elektroniky citlivé na poklesy napětí. Řešením problému je zvýšit kapacitu vyhlazovacích kondenzátorů, která je nyní 13,2 mF.

Dále by bylo vhodné zdokonalit chlazení zdroje. Podle výpočtů tepelné bilance není chlazení optimalizováno na dlouhodobý zkrat 5 V kanálu zdroje. Vylepšení by spočívalo v použití aktivního chlazení například pomocí ventilátorů řízených termostatem.

Výpočty tepelné bilance ovšem vycházejí z teoretických úvah a díky tomu jsou pouze orientační. Při testování zdroje bylo prokázáno, že řídicí tranzistory stabilizátorů se zahřívají jen minimálně, a to i při dlouhodobějším zkratu na výstupech. Měřením bylo zjištěno, že ztrátové výkony na všech tranzistorech jsou nižší oproti teoretickým předpokladům. Ve výsledku je chlazení tranzistorů navrženo optimálně. Nejvyšších teplot dosahovaly usměrňovače 12 V kanálů, které nejsou umístěny na chladičích. Tato teplota se pohybovala okolo 45 °C. Ztrátový výkon na usměrňovači je přibližně 4,2 W, tepelný odpor přechodu pouzdro-čip je 15 °C/W. Z těchto parametrů lze stanovit, že maximální teplota čipu bude 108 °C, což nepřekračuje maximální teplotu udávanou v katalogovém listu výrobce, která je až 150 °C. Přesto by bylo vhodné i tyto usměrňovače umístit na chladič.

Byl dodržen i požadavek na opravitelnost zdroje v případě poruchy. Šasi zdroje je snadno rozebíratelné, což umožňuje přístup ke všem částem zdroje. Celková mechanická konstrukce zdroje je dostatečně odolná, jak bylo požadováno.

Z výše uvedeného vyplývá, že se podařilo dosáhnout cíle této bakalářské práce, tj. navrhnout a zkonstruovat víceúrovňový lineární napájecí zdroj s požadovanými vlastnostmi a funkcemi.

## Literatura

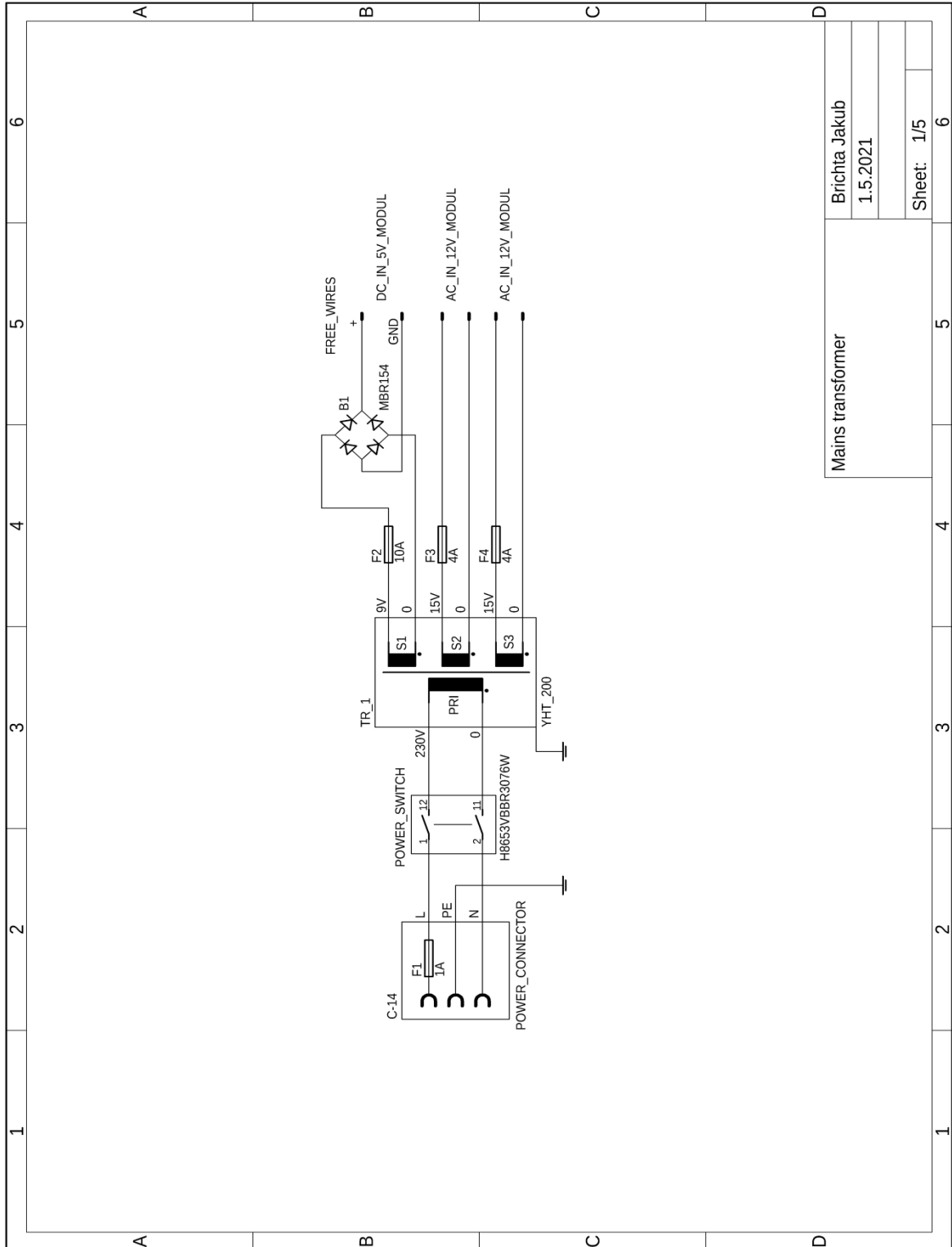
- [1] HAMMERBAUER, Jiří. *Elektronické napájecí zdroje a akumulátory*. Vyd. 2. Plzeň: Západočeská univerzita, 1998. ISBN 80-7082-411-5.
- [2] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Lineární napájecí zdroje*. Praha: BEN - technická literatura, 2001. ISBN 80-7300-002-4.
- [3] LODR, Jakub. *Měření útlumových charakteristik síťových filtrů*. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Zdeněk Kubík.
- [4] VOBECKÝ, Jan a Vít ZÁHLAVA. *Elektronika: součástky a obvody, principy a příklady*. 3., rozš. vyd. Praha: Grada, 2005. ISBN 80-247-1241-5.
- [5] BASTIAN, Peter. *Praktická elektrotechnika*. 2., dopl. vyd. Praha: Europa-Sobotáles, 2006. ISBN 80-86706-15-X.
- [6] BRTNÍK, Bohumil. *Navrhování a analýza elektronických obvodů*. Praha: BEN - technická literatura, 2019. ISBN 978-80-7300-557-3.
- [7] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu*. Praha: BEN - technická literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-266-4.
- [8] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky - 1. díl*. Praha: BEN - technická literatura, 2007. ISBN 80-7300-146-2.
- [9] FUKÁTKO, Tomáš a Jaroslav FUKÁTKO. *Teplo a chlazení v elektrotechnice*. Praha: BEN - technická literatura. ISBN 80-7300-199-3.
- [10] SVAČINA, Jiří. *Základy elektromagnetické kompatibility (EMC) Část 5: Elektromagnetická odolnost a její testování*. [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01025/index.html>
- [11] ČSN EN 61000-4-3 ed.3: *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 4-3: Zkušební a měřicí technika - Vyzařované vysokofrekvenční elektromagnetické pole - Zkouška odolnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
- [12] ČSN EN 61000-4-6 ed.4: *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 4-6: Zkušební a měřicí technika - Odolnost proti rušením šířeným vedením, indukovaným vysokofrekvenčními poli*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
- [13] ČSN EN 55011 ed.4: *Průmyslová, vědecká a zdravotnická zařízení - Charakteristiky vysokofrekvenčního rušení - Meze a metody měření*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [14] ČSN 33 2000-4-41 ed. 3: *Elektrické instalace nízkého napětí - Část 4-41: Ochranná opatření pro zajištění bezpečnosti - Ochrana před úrazem elektrickým proudem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [15] *Katalogový list k tranzistoru 2N3055* [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.215-574.1.pdf>
- [16] *Katalogový list k tranzistoru BD139* [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/7082fb0b9e5fff31683a4e92ad96f2ae/BD139.pdf>
- [17] *Katalogový list k tranzistoru BC337* [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z:

- <https://www.tme.eu/Document/c9a83153861efad4411800af89017cdd/bc337bk.pdf>
- [18] *Katalogový list k feritovému filtru 74271633S* [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/445/74271633S-1720444.pdf>
- [19] *Katalogový list k feritovému filtru 74271733S* [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/445/74271733S-1720472.pdf>
- [20] *Katalogový list ke stabilizátoru LM 723CN* [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.331-008.1.pdf>
- [21] *Katalogový list k síťovému konektoru C14* [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://docs.rs-online.com/1b33/0900766b8141c237.pdf>
- [22] *Katalogový list k usměrňovači B250C7000A* [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/ce5c85a649346f0292c65c0dae86e2ad/b40c700040.pdf>
- [23] *Katalogový list k usměrňovači MBR154* [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: [https://www.tme.eu/Document/bacebd5e621a1ef5a38b2f9b7e3b9d68/MBR15xx\\_ser.pdf](https://www.tme.eu/Document/bacebd5e621a1ef5a38b2f9b7e3b9d68/MBR15xx_ser.pdf)
- [24] *Katalogový list k LED diodě HLMP-3316* [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/d318624d8caee2bea850378c07113653/HLMP-3316.pdf>
- [25] *Katalogový list ke stabilizátorům řady 78xx* [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/8217daac9d5b35ecea59dc4f4710cd3e/17805.pdf>
- [26] *Katalogový list ke stabilizátorům řady 79xx* [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/179.pdf>
- [27] ČSN EN 61000-6-3: *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 6-3: Kmenové normy - Emise - Prostředí obytné, obchodní a lehkého průmyslu* [online]. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2002.

# Přílohy

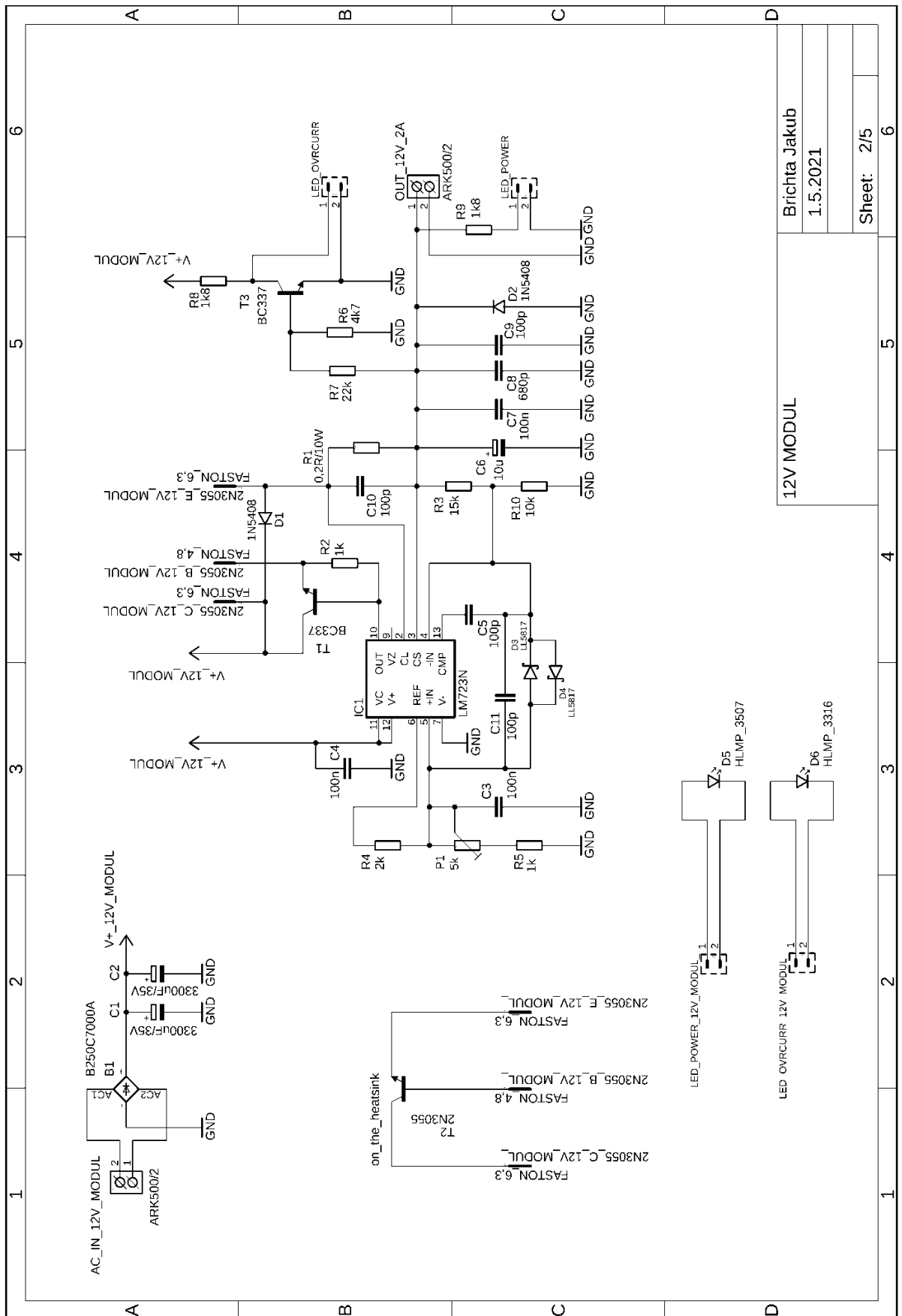
## Příloha A Schéma zapojení

### A.1 Schéma zapojení síťového transformátoru



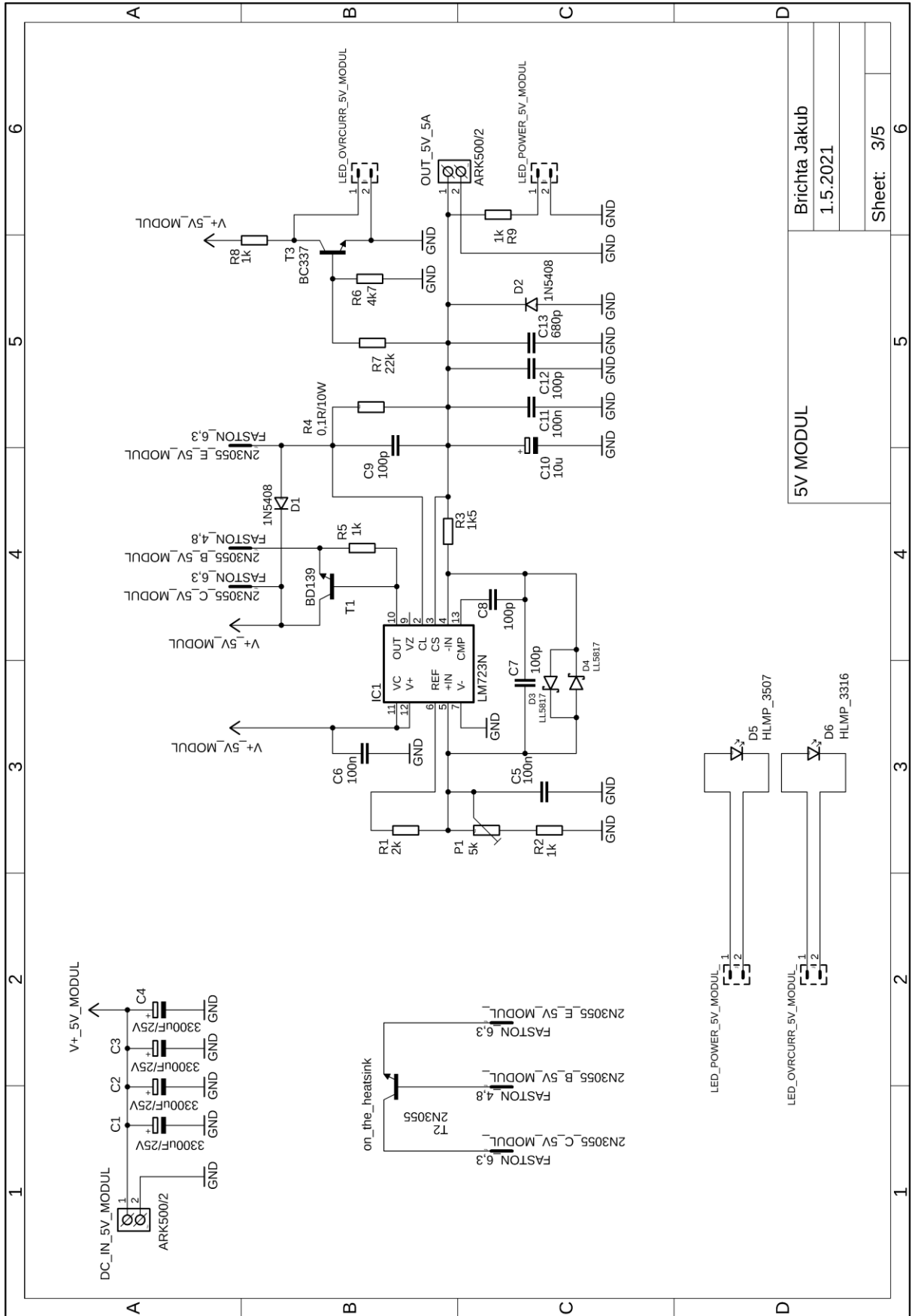
Mains transformer		Brichta Jakub
		1.5.2021
		Sheet: 1/5
		6

A.2 Schéma zapojení 12 V stabilizátoru



12V MODULE	
Brichta Jakub	
1.5.2021	
Sheet: 2/5	

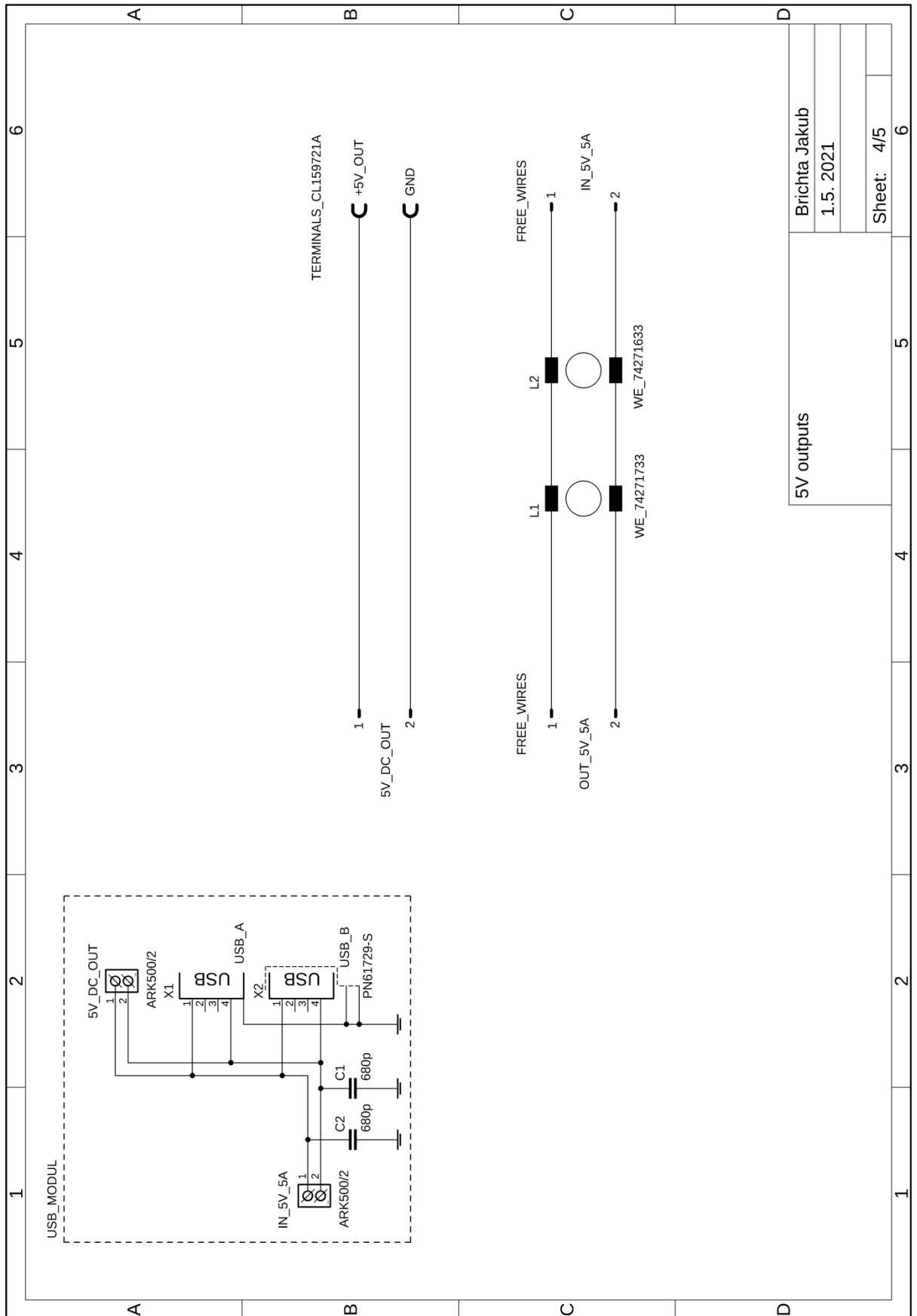
A.3 Schéma zapojení 5 V stabilizátoru



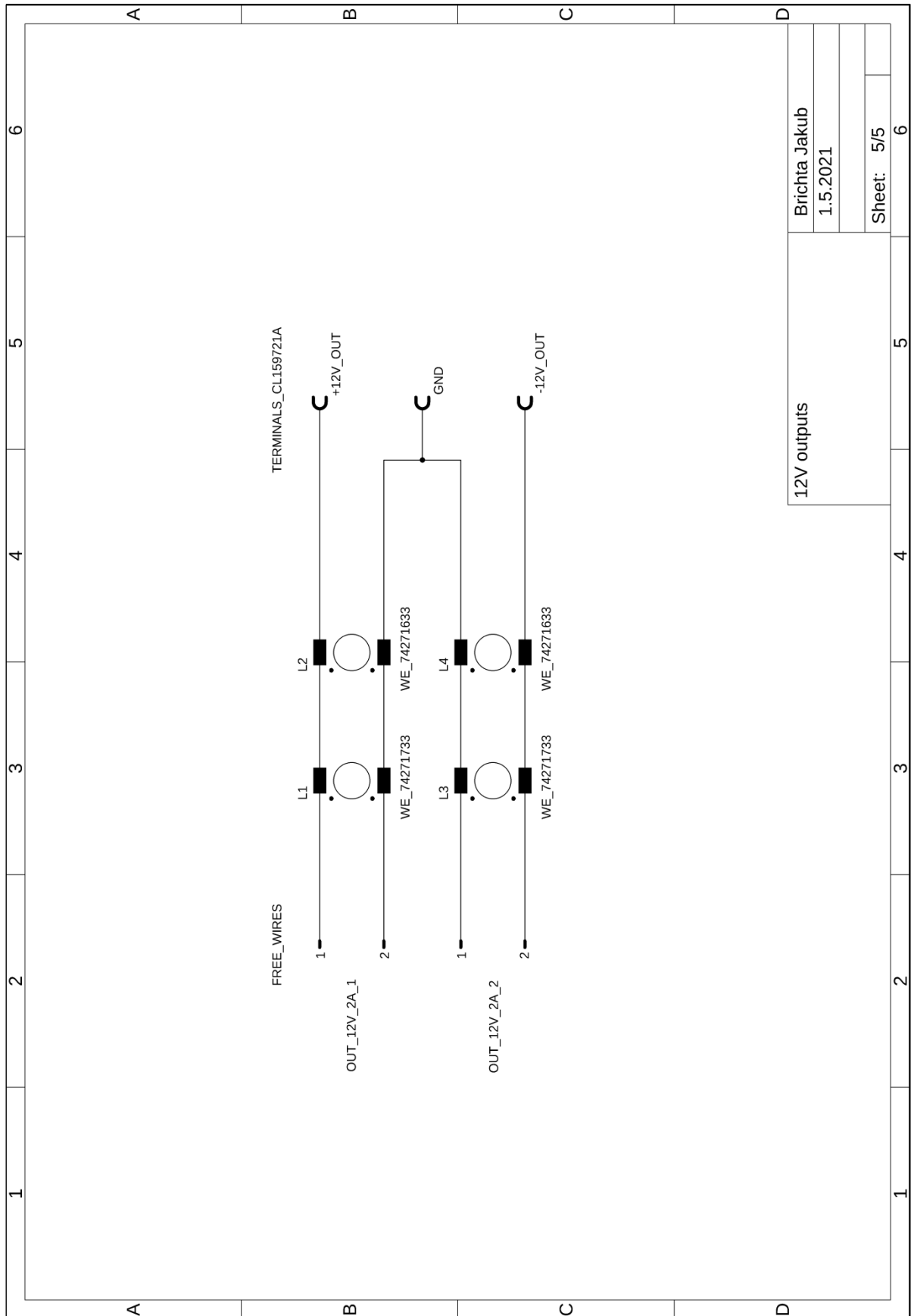
5V MODULE	
Brichta Jakub	
1.5.2021	
Sheet:	3/5



**A.4 Schéma zapojení USB modulu a 5 V výstupů**

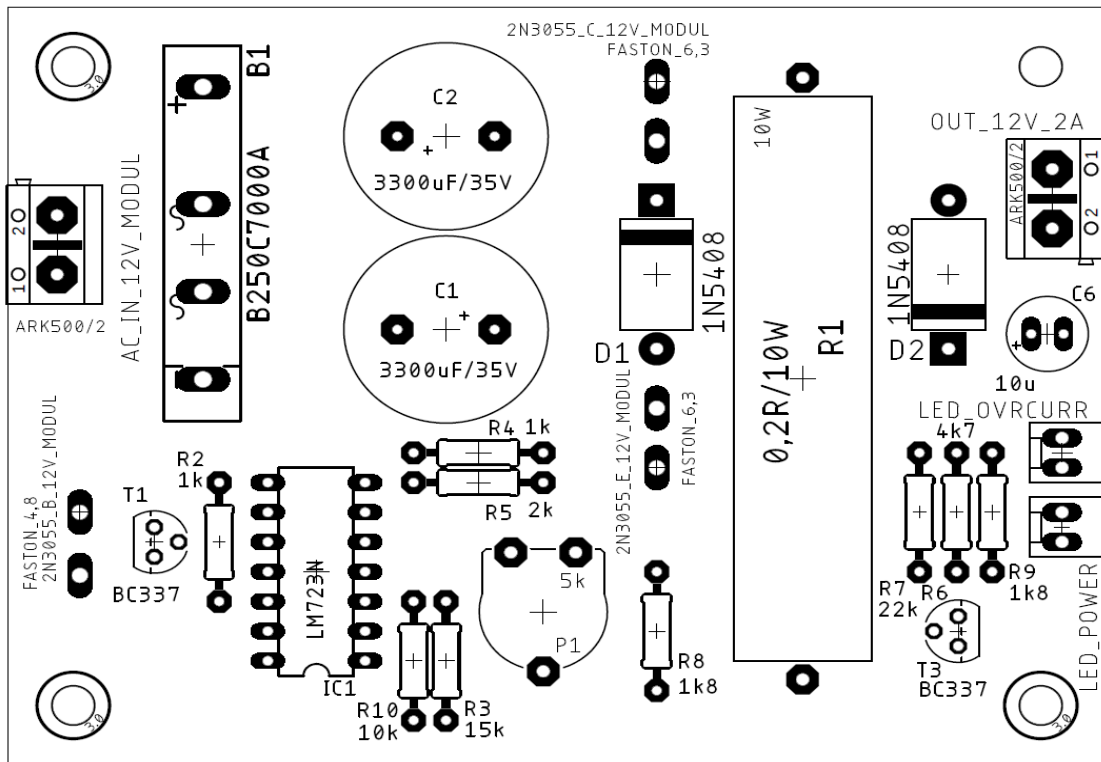


### A.5 Schéma zapojení 12 V výstupů

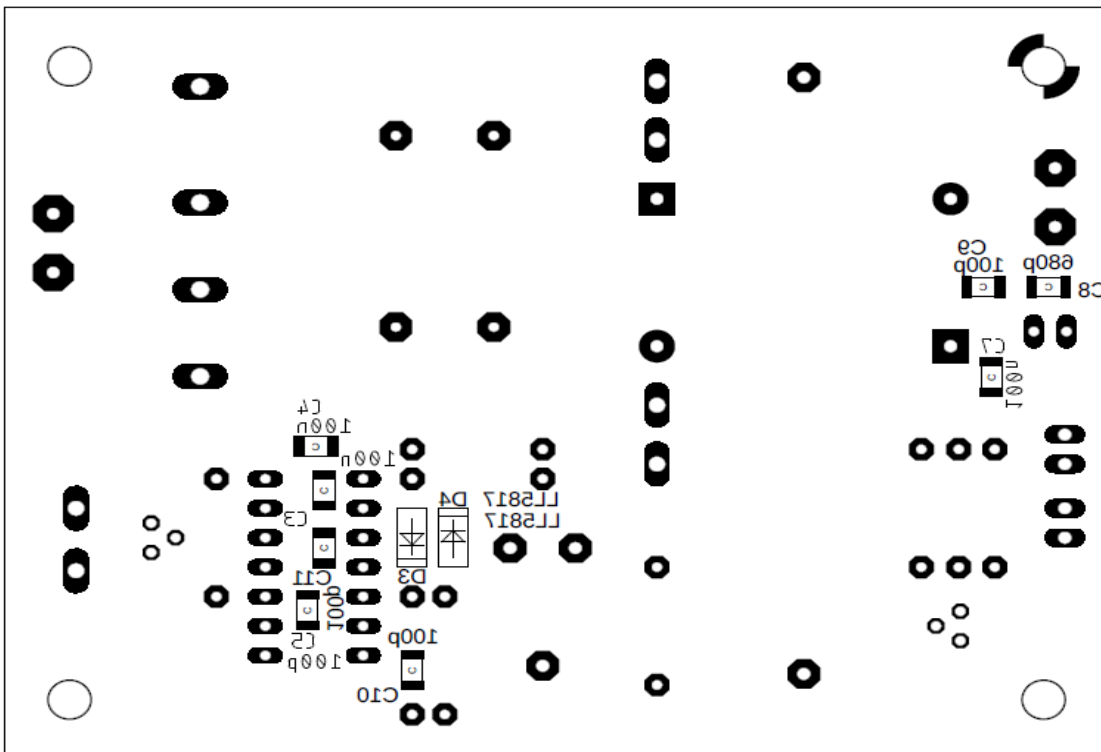


Příloha B Osazovací výkresy

B.1 Osazovací výkres 12 V stabilizátoru (TOP)

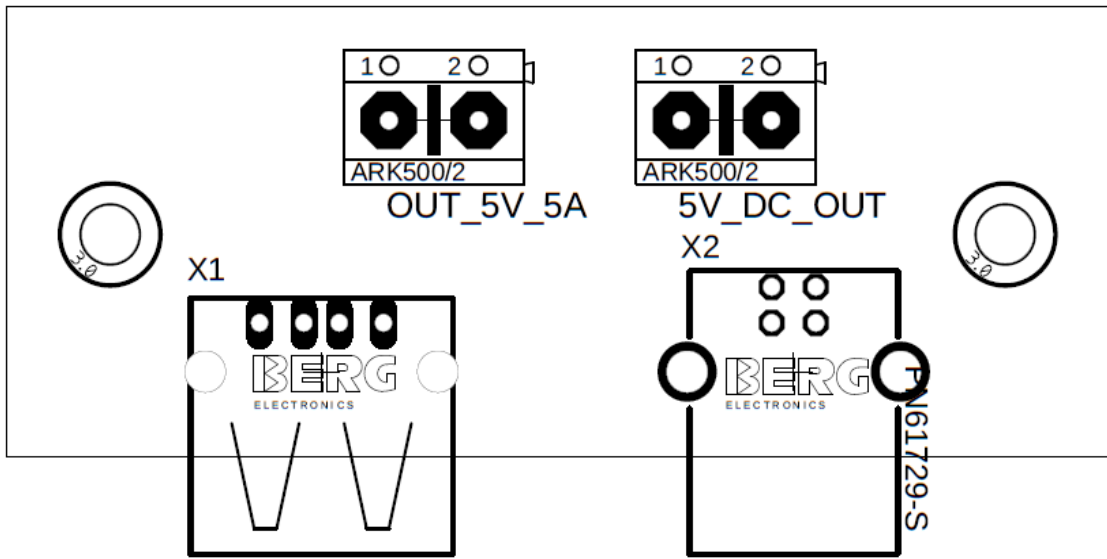


B.2 Osazovací výkres 12 V stabilizátoru (BOT)

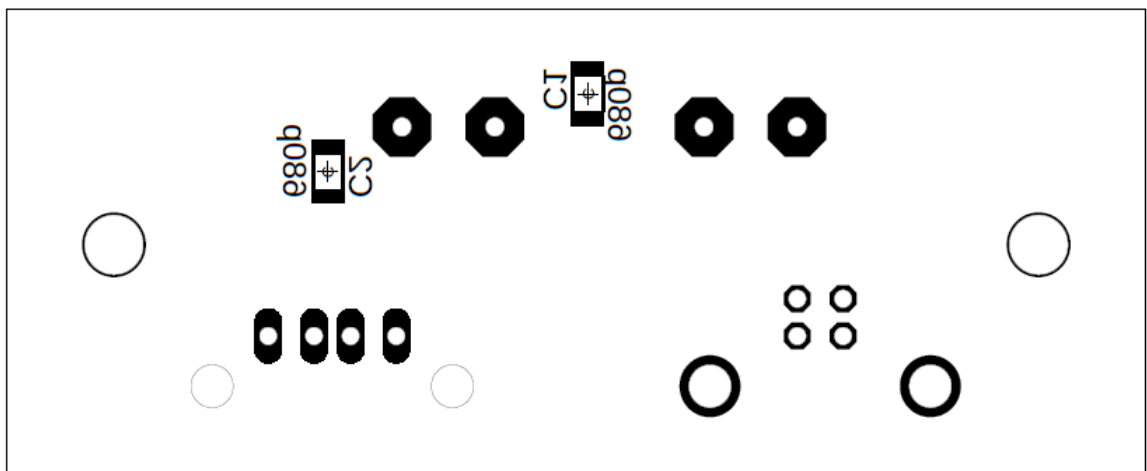


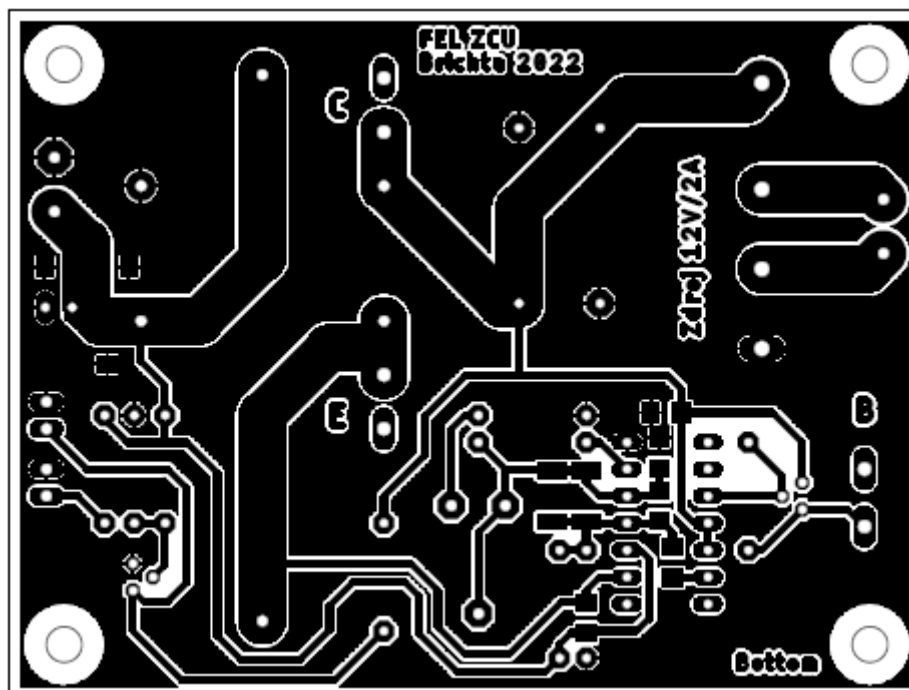


**B.5 Osazovací plán USB modulu (TOP)**

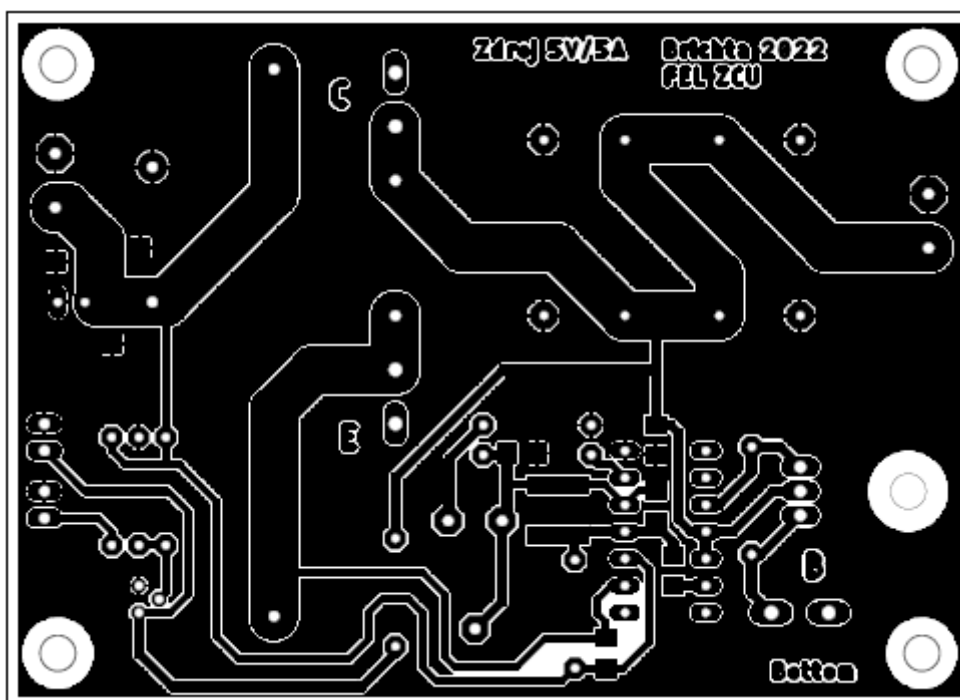


**B.6 Osazovací plán USB modulu (BOT)**



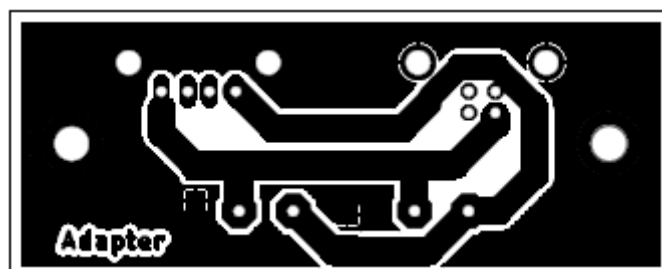
**Příloha C Předlohy DPS****C.1 Předloha DPS 12 V stabilizátoru**

Rozměry: 86 × 65 mm

**C.2 Předloha DPS 5 V stabilizátoru**

Rozměry: 91 × 65 mm

### C.3 Předloha DPS USB modulu



Rozměry: 62 × 25 mm

## Příloha D Kusovník

12 V stabilizátor - seznam součástek			
Označení	Hodnota	Pouzdro	Poznámka
R1	0,2R/10W	10x9x49 mm	Výkonový rezistor v keramickém pouzdře
R2	1k	0207	Metalizovaný rezistor, tol. 1%
R3	15k	0207	Metalizovaný rezistor, tol. 1%
R4	2k	0207	Metalizovaný rezistor, tol. 1%
R5	1k	0207	Metalizovaný rezistor, tol. 1%
R6	4k7	0207	Metalizovaný rezistor, tol. 1%
R7	22k	0207	Metalizovaný rezistor, tol. 1%
R8	1k8	0207	Metalizovaný rezistor, tol. 1%
R9	1k8	0207	Metalizovaný rezistor, tol. 1%
P1	5k	10,3x10,3x6 mm	Lineární uhlíkový trimr, ležatý, 0,15W
C1	3,3mF/35V	16x40 mm	Elektrolytický kondenzátor radiální, +105°C
C2	3,3mF/35V	16x40 mm	Elektrolytický kondenzátor radiální, +105°C
C3	100nF	1206	Keramický kondenzátor X7R
C4	100nF	1206	Keramický kondenzátor X7R
C5	100pF	1206	Keramický kondenzátor X7R
C6	10μF	5x11 mm	Elektrolytický kondenzátor radiální, +105°C
C7	100nF	1206	Keramický kondenzátor X7R
C8	680pF	1206	Keramický kondenzátor X7R
C9	100pF	1206	Keramický kondenzátor X7R
C10	100pF	1206	Keramický kondenzátor X7R
C11	100pF	1206	Keramický kondenzátor X7R
D1	1N5408	DO201AD	Usměrňovací dioda, 1000V/3A
D2	1N5408	DO201AD	Usměrňovací dioda, 1000V/3A
D3	LL5817	MELF	Schottkyho dioda usměrňovací, 20V/1A
D4	LL5818	MELF	Schottkyho dioda usměrňovací, 20V/1A
T1	BC337	TO92	Bipolární tranzistor NPN, 50V/0,8A, 625mW
T2	2N3055	TO3	Bipolární tranzistor NPN, 100V/15A, 117W
T3	BC337	TO92	Bipolární tranzistor NPN, 50V/0,8A, 625mW
IC1	LM 723	DIL14	Integrovaný stabilizátor napětí 2 až 37V, 0,15A
B1	B250C7000A	–	Usměrňovací můstek 15A/400V - na fastony
svorkovnice	–	ARK500/2	Svorkovnice do DPS - rozteč 5mm
svorkovnice	–	ARK500/2	Svorkovnice do DPS - rozteč 5mm
faston	–	6,3	Faston konektor do DPS, rozměr 6,3mm
faston	–	4,8	Faston konektor do DPS, rozměr 4,8mm
faston	–	6,3	Faston konektor do DPS, rozměr 6,3mm
konektor	–	PSH02	Konektor se zámkem do DPS, 2 piny, 2,54 mm
konektor	–	PSH02	Konektor se zámkem do DPS, 2 piny, 2,54 mm

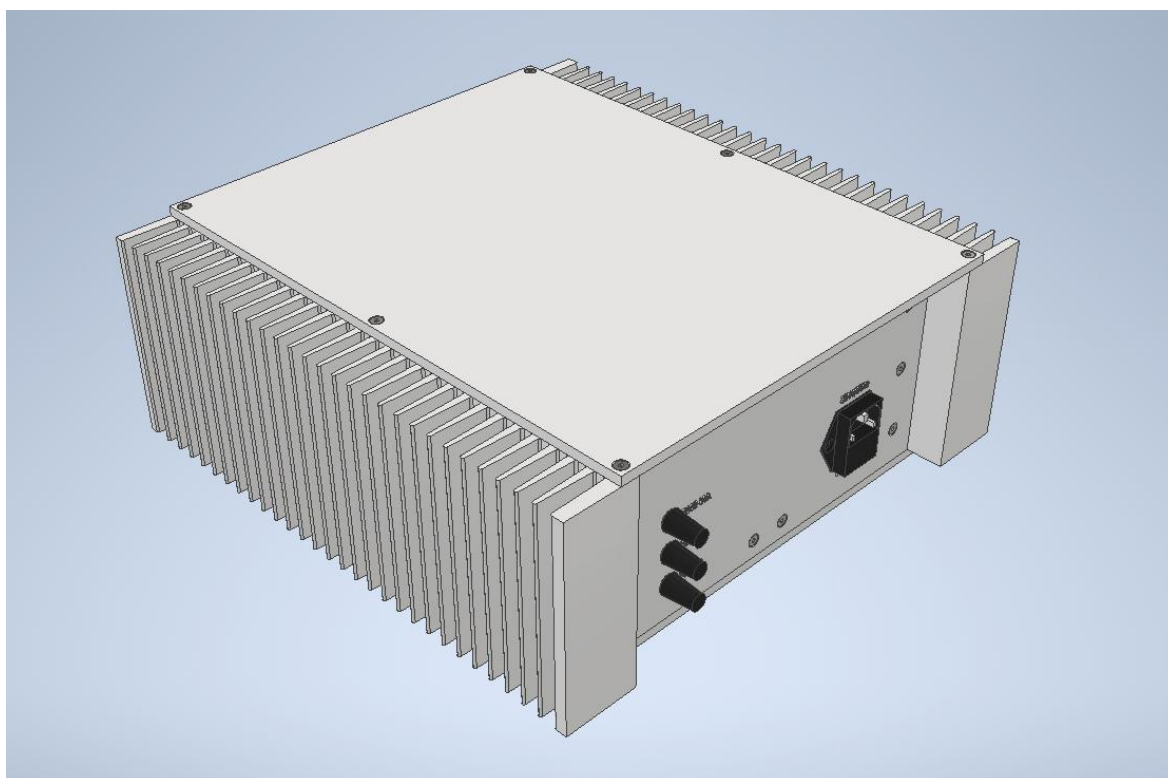
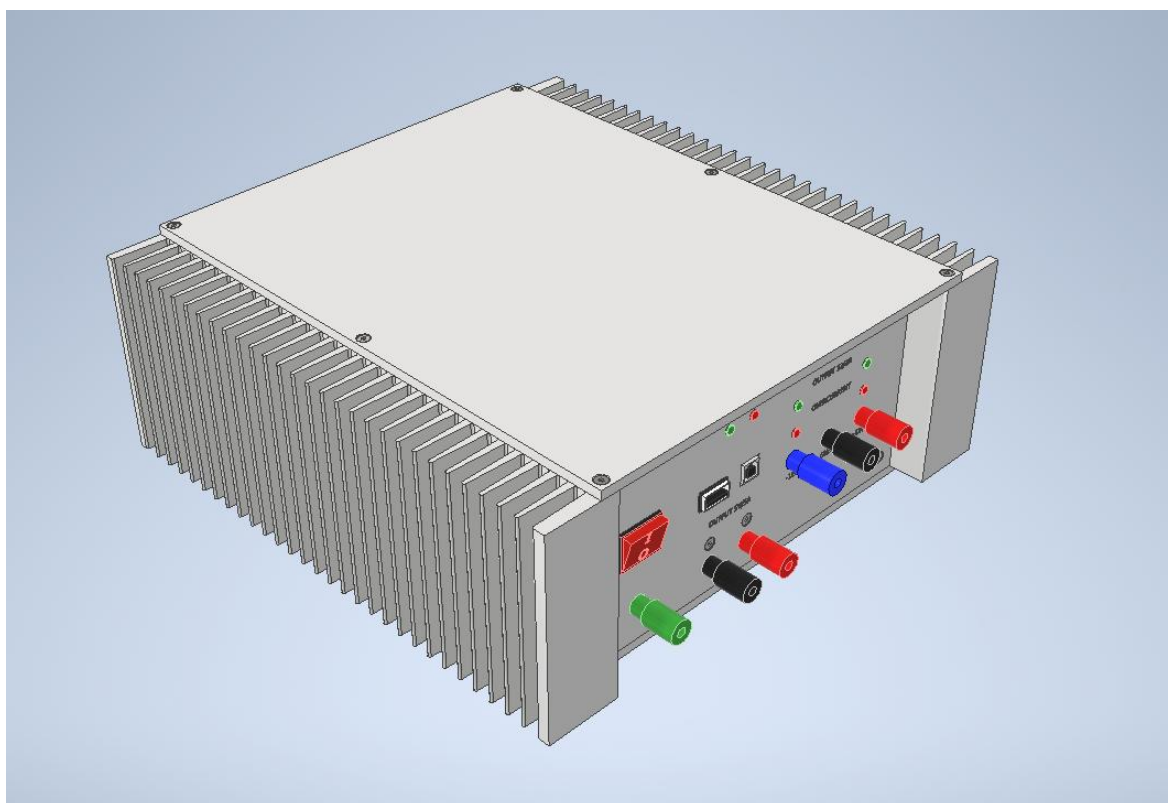


5 V stabilizátor - seznam součástek			
Označení	Hodnota	Pouzdro	Poznámka
R1	2k	0207	Metalizovaný rezistor, tol. 1%
R2	1k	0207	Metalizovaný rezistor, tol. 1%
R3	1k5	0207	Metalizovaný rezistor, tol. 1%
R4	0,1R/10W	10x9x49 mm	Výkonový rezistor v keramickém pouzdře
R5	1k	0207	Metalizovaný rezistor, tol. 1%
R6	4k7	0207	Metalizovaný rezistor, tol. 1%
R7	22k	0207	Metalizovaný rezistor, tol. 1%
R8	1k	0207	Metalizovaný rezistor, tol. 1%
R9	1k	0207	Metalizovaný rezistor, tol. 1%
P1	5k	10,3x10,3x6 mm	Lineární uhlíkový trimr, ležatý, 0,15W
C1	3,3mF/25V	16x31,5 mm	Elektrolytický kondenzátor radiální, +105°C
C2	3,3mF/25V	16x31,5 mm	Elektrolytický kondenzátor radiální, +105°C
C3	3,3mF/25V	16x31,5 mm	Elektrolytický kondenzátor radiální, +105°C
C4	3,3mF/25V	16x31,5 mm	Elektrolytický kondenzátor radiální, +105°C
C5	100nF	1206	Keramický kondenzátor X7R
C6	100nF	1206	Keramický kondenzátor X7R
C7	100pF	1206	Keramický kondenzátor X7R
C8	100pF	1206	Keramický kondenzátor X7R
C9	100pF	1206	Keramický kondenzátor X7R
C10	10μF	5x11 mm	Elektrolytický kondenzátor radiální, +105°C
C11	100nF	1206	Keramický kondenzátor X7R
C12	100pF	1206	Keramický kondenzátor X7R
C13	680pF	1206	Keramický kondenzátor X7R
D1	1N5408	DO201AD	Usměrňovací dioda, 1000V/3A
D2	1N5408	DO201AD	Usměrňovací dioda, 1000V/3A
D3	LL5817	MELF	Schottkyho dioda usměrňovací, 20V/1A
D4	LL5818	MELF	Schottkyho dioda usměrňovací, 20V/1A
T1	BD139	SOT32	Bipolární tranzistor NPN, 80V/1,5A, 12W
T2	2N3055	TO3	Bipolární tranzistor NPN, 100V/15A, 117W
T3	BC337	TO92	Bipolární tranzistor NPN, 50V/0,8A, 625mW
IC1	LM 723	DIL14	Integrovaný stabilizátor napětí 2 až 37V, 0,15A
B1	MBR154	MBR 25	Usměrňovací můstek 15A/400V - na fastony
svorkovnice	–	ARK500/2	Svorkovnice do DPS - rozteč 5mm
svorkovnice	–	ARK500/2	Svorkovnice do DPS - rozteč 5mm
faston	–	6,3	Faston konektor do DPS, rozměr 6,3mm
faston	–	4,8	Faston konektor do DPS, rozměr 4,8mm
faston	–	6,3	Faston konektor do DPS, rozměr 6,3mm
konektor	–	PSH02	Konektor se zámkem do DPS, 2 piny, 2,54 mm
konektor	–	PSH02	Konektor se zámkem do DPS, 2 piny, 2,54 mm
chladič	–	V7236A	Chladič 13x19x6 mm

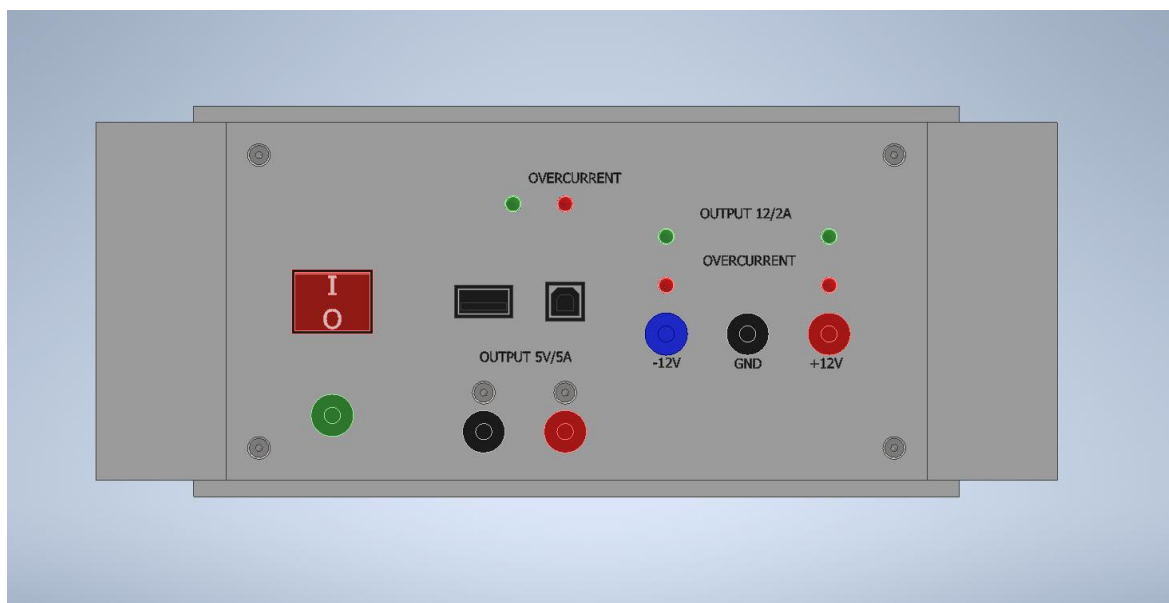
USB modul - seznam součástek			
Označení	Hodnota	Pouzdro	Poznámka
X1	292303-1	–	USB zásuvka typ A do DPS, 90°
X2	292304-1	–	USB zásuvka typ B do DPS, 90°
svorkovnice	–	ARK500/2	Svorkovnice do DPS - rozteč 5mm
svorkovnice	–	ARK500/2	Svorkovnice do DPS - rozteč 5mm

Ostatní materiál		
Označení	Počet kusů	Poznámka
H8653VBBR3076W	1X	Síťový vypínač typu ROCKER, 10A/250V
PLED-51 NICKEL PLATE	6X	Objímka pro LED 5mm
CL159730	1X	svorkovnice, 4mm banánek, modrá
CL159721A	2X	svorkovnice, 4mm banánek, červená
CL159709	2X	svorkovnice, 4mm banánek, černá
CL159740	1X	svorkovnice, 4mm banánek, zelená
6200.2100	1X	Síťový napájecí konektor IEC 60320
3101.0210	3X	Pouzdro pro 5x20mm tav. pojistku
HLMP-3316	3X	LED dioda 5mm, červená
HLMP-3507	3X	LED dioda 5mm, zelená
Izolační podložka	3X	Slídová izolační podložka pod TO3
YHT 200	1X	Síťový transformátor 9V/10A, 2x15V/3,5A
74271733	3X	Odrůšovací ferit, 100MHz
74271633	3X	Odrůšovací ferit, 300MHz

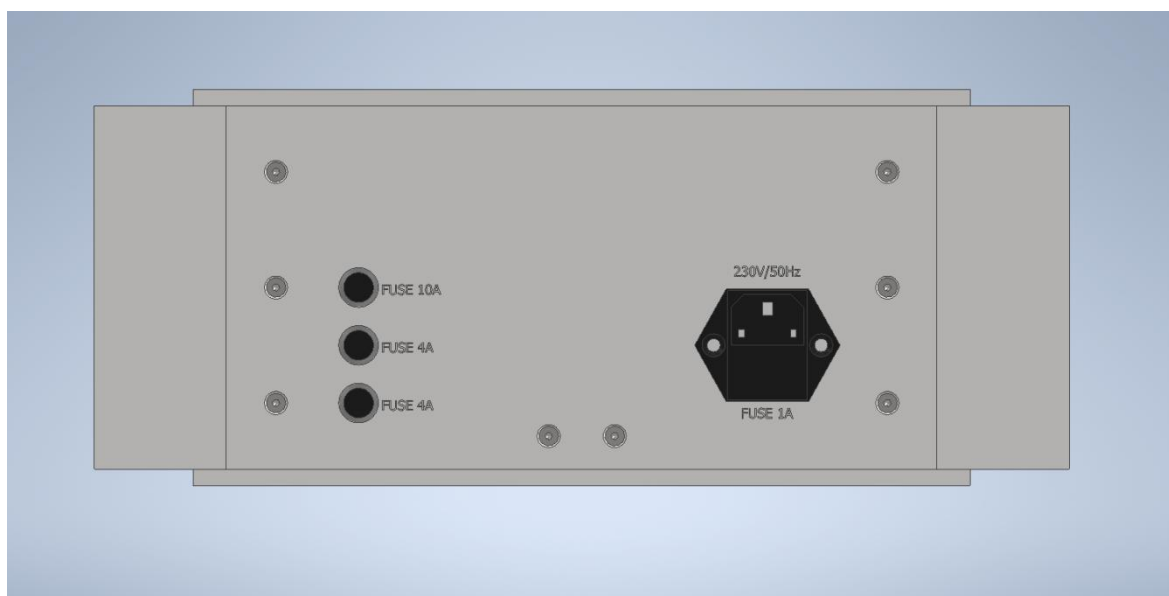
## Příloha E Model šasi zdroje



*3D pohled*



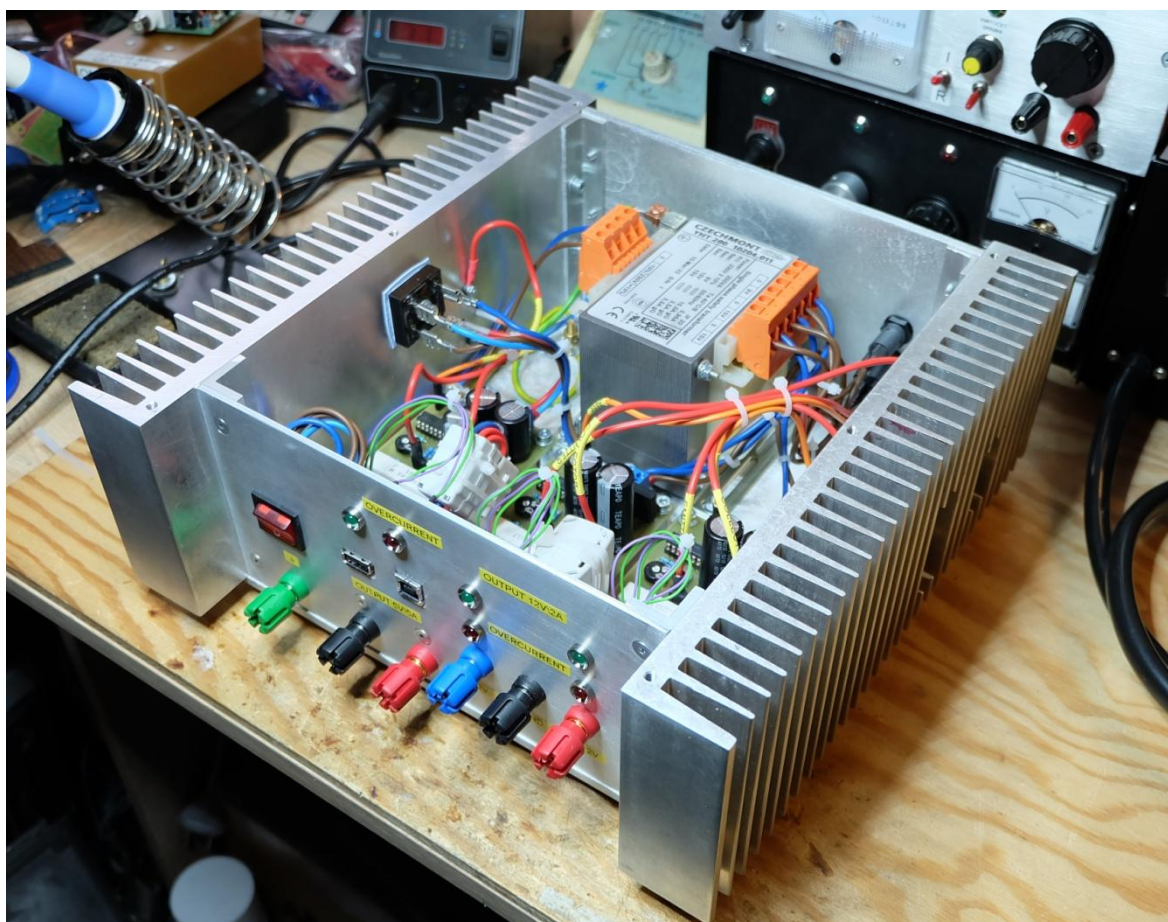
*Pohled na přední čelní panel*



*Pohled na zadní čelní panel*

**Příloha F Fotodokumentace**







## Příloha G Data z měření

### G.1 Zatěžovací charakteristika 12 V kanálu 1

$I_z$ (A)	$U_{out}$ (V)
0	12,03
0,5	12,03
1	12,02
1,5	12,02
1,75	12,02
2	12,02
2,25	12,01
2,5	12,01
2,77	12
3	11,92
3,18	0,25

**G.2 Zatěžovací charakteristika 12 V kanálu 2**

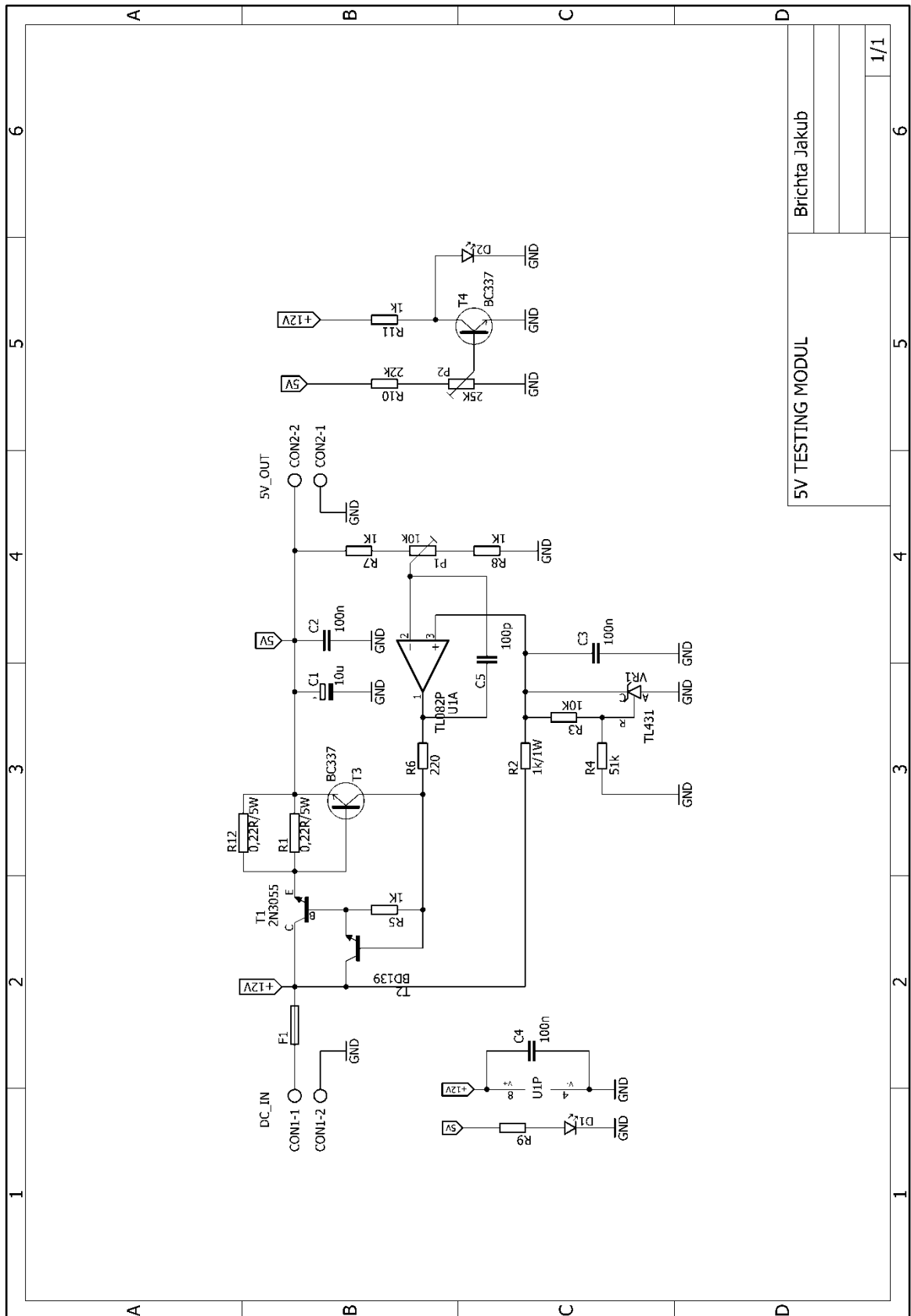
$I_z$ (A)	$U_{out}$ (V)
0	12,03
0,5	12,03
1	12,02
1,5	12,02
1,75	12,02
2	12,02
2,25	12,02
2,5	12,02
2,77	12,01
3	11,95
3,23	0,26

**G.3 Zatěžovací charakteristika 5 V kanálu**

$I$ (A)	$U$ (V)
0	5,07
0,66	5,04
1,01	5,04
1,53	5,04
2	5,03
2,5	5,01
3	5
3,5	5
4	4,99
4,52	4,93
5	4,87
5,29	4,78
5,5	4,64
6	4,55
6,21	0,45



**Příloha H Schéma zapojení testovacího modulu stabilizátoru z diskretních součástek**



5V TESTING MODUL		Brichta Jakub	
		1/1	