

Univerzita Hradec Králové

Přírodovědecká fakulta

Katedra fyziky

Nastavitelný síťový zdroj

Bakalářská práce

Autor: Dominik Holec

Studijní program: B1701 – Fyzika

Studijní obor: Fyzikálně – technická měření a výpočetní technika

Vedoucí práce: Ing. Karol Radocha, Ph.D.

Hradec Králové

červenec 2017

Univerzita Hradec Králové

Přírodovědecká fakulta

Zadání bakalářské práce

Autor:	Dominik Holec
Studijní program:	B 1701 Fyzika
Studijní obor:	Fyzikálně – technická měření a výpočetní technika
Název práce:	Nastavitelný síťový zdroj
Název práce v AJ:	Variable regulated power supply
Cíl a metody práce:	Tato bakalářská práce v teoretické části ukáže rozdělení napájecích zdrojů a jejich jednotlivých částí, z kterých se nastavitelné zdroje skládají. V praktické části se věnuje nastavitelnému síťovému zdroji, popisu jeho zapojení a měřením jeho výstupních parametrů.
Garantující pracoviště:	katedra fyziky Přírodovědecké fakulty UHK
Vedoucí práce:	Ing. Karol Radocha, Ph.D.
Konzultant:	
Oponent:	Doc. RNDr. Josef Hubeňák, CSc.
Datum zadání práce:	31.5.2016
Datum odevzdání práce:	10.8.2017

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma nastavitelný síťový zdroj zpracoval samostatně pod vedením vedoucího práce a použil jsem jen literaturu uvedenou v seznamu použité literatury, který je součástí bakalářské práce.

V Jaroměři dne 8.8.2017

Dominik Holec

Poděkování:

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Karol Radocha, Ph.D. za cenné rady a připomínky, které mi poskytl při psaní bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat své přítelkyni Bc. Kateřině Brychové za pomoc při úpravě textu.

Dominik Holec

Anotace

HOLEC, Dominik. *Nastavitelný síťový zdroj*. Hradec Králové, 2017. Bakalářská práce. Univerzita Hradec Králové, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce: Ing. Karol Radocha, Ph.D.

Tato práce pojednává o konstrukci lineárního laboratorního zdroje s výstupními tranzistory typu MOSFET. Zdroj bude schopen pracovat jak v režimu konstantního napětí v rozsahu 0 - 27 V tak v režimu konstantního proudu v rozsahu 0 – 1,8 A. Oba režimy budou indikovány LED diodami. Provozní parametry, napětí a proud, budou zobrazovány na LCD displejích. Součástí práce bude taktéž teoretický popis funkce zdroje.

Klíčová slova

Laboratorní zdroj, lineární stabilizátor, MOSFET, regulace napětí, proudová ochrana.

Annotation

This study deals with the construction of a linear laboratory source with MOSFET output transistors. The source will be operational both in the mode of constant voltage ranging from 0 to 27 V, and in the mode of constant current ranging from 0 to 1,8 A. Both these modes will be indicated by LEDs. The operating parameters, voltage and current, will be displayed on LED monitors. Theoretical description of the source's functionality will be also included.

HOLEC, Dominik. *Variable regulated power supply*. Hradec Králové, 2017. Bachelor thesis. University of Hradec Králové, Faculty of Science. Leader of the Bachelor Degree Thesis: Ing. Karol Radocha, Ph.D.

Keywords

Laboratory power supply, linear mode, MOSFET, voltage regulation, current protection

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Síťové napájecí zdroje.....	2
2.1	Síťový lineární zdroj s regulovatelným napětím	2
2.2	Spínané zdroje s regulovatelným napětím.....	3
2.3	Princip činnosti spínaného zdroje regulovatelným napětím.....	3
3	Transformátory pro napájecí zdroje běžného výkonu.....	5
3.1	Popis funkce.	5
3.2	Základní vzorce	7
3.3	Vzorce pro návrh transformátoru	7
3.4	Použití transformátorů ve zdrojích	9
4	Usměřňovače.....	11
4.1	Jednocestný usměřňovač	11
4.2	Dvoucestný usměřňovač.....	15
4.3	Dvoucestný můstkový usměřňovač	17
5	Lineární stabilizátory.....	20
5.1	Parametrické (lineární) stabilizátory	21
5.2	Stabilizátor s diodou	21
5.3	Stabilizátor se Zenerovou diodou.....	26
5.4	Stabilizátor s tranzistorem	29
5.5	Integrované stabilizátory	30
6	Tranzistory	32
6.1	Rozdělení tranzistorů.....	32
6.2	Základní zapojení bipolárních tranzistorů	34
6.3	Základní zapojení unipolárních tranzistorů	35
6.4	Zapojení zesilovače s tranzistorem typu JFET	37
6.5	Zapojení zesilovače s tranzistorem typu MOSFET s indukovaným kanálem.....	39

7	Konstrukce a popis sestaveného zdroje.....	41
7.1	Návrh	41
7.2	Schéma zapojení	42
7.3	Regulace napětí.....	43
7.4	Regulace proudu	43
7.5	Signalizace.....	43
7.6	Ochrana.....	44
7.7	Mařící moduly	44
7.8	Použité součástky:	46
7.9	Stavba a osazení zdroje.....	47
7.10	Oživování a testování.....	48
7.11	Problémy při oživování.....	49
8	Měření parametrů zdroje	50
8.1	Měření V-A charakteristiky	50
8.2	Měření teplotní závislosti chladiče	51
8.3	Měřicí přístroje	52
8.4	Technické údaje panelového měřidla	53
8.5	Konstrukce panelového měřidla	53
9	Seznamy zdrojů.....	54
9.1	Seznam použité literatury	54
9.2	Seznam použitých internetových zdrojů.....	54
9.3	Seznam obrázků a jejich zdrojů.....	55

1 Úvod

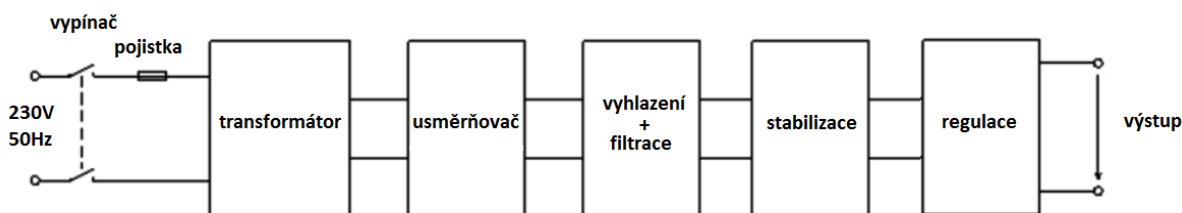
Tato práce se věnuje především stabilizovaným lineárním napájecím zdrojům s regulovatelným napětím. Větší část této práce je věnována teoretickému popisu jednotlivých částí. V první kapitole popisuje rozdělení na dva základní typy zdrojů používané v elektrotechnické praxi. Tyto typy jsou následně popsány v blokových schématech, z kterých se tyto zdroje obecně skládají. V následujících kapitolách jsou tyto jednotlivé bloky síťového lineárního zdroje s regulovatelným napětím podrobněji rozebrány. Jsou zde popsány jednotlivé druhy a typy těchto bloků včetně některých vzorců a rovnic potřebných k výpočtům daných parametrů. Také obsahuje popis základních zapojení jak unipolárních tak bipolárních tranzistorů. V závěru této práce je popsána praktická část, ve které dochází k sestavení stabilizovaného lineárního zdroje s regulovatelným napětím. Dané parametry tohoto zdroje jsou: nastavitelné napětí od 0 až 27 Voltů stejnosměrného napětí a maximálním proudem až 1,8 Ampéry. Daný zdroj rovněž obsahuje nastavitelnou proudovou ochranu, která chrání zapojení před příliš velkým zkratovým proudem.

2 Síťové napájecí zdroje

Síťové řízené napájecí zdroje rozdělujeme do dvou skupin, a to na lineární a spínané. Tyto dva typy zdrojů se dále dělí na zdroje s pevným nebo nastavitelným napětím. Každý z těchto typů (lineárních nebo spínaných) má pochopitelně jiné přednosti. U řízeného lineárního zdroje je to především nízká úroveň rušení a konstrukční jednoduchost. Nevýhoda spočívá v nízké účinnosti a větší hmotnosti, která se dá srovnat pomocí přepočtu na výstupní výkon. Řízený spínaný zdroj má podstatně menší hmotnost, zejména díky menšímu transformátoru. V zapojení se vyskytuje množství spínacích prvků, které však produkují rušivé signály. Ve výsledku má tento zdroj pomalejší reakce na rychlé změny zatěžovacího proudu. Má však podstatně větší účinnost.

2.1 Síťový lineární zdroj s regulovatelným napětím

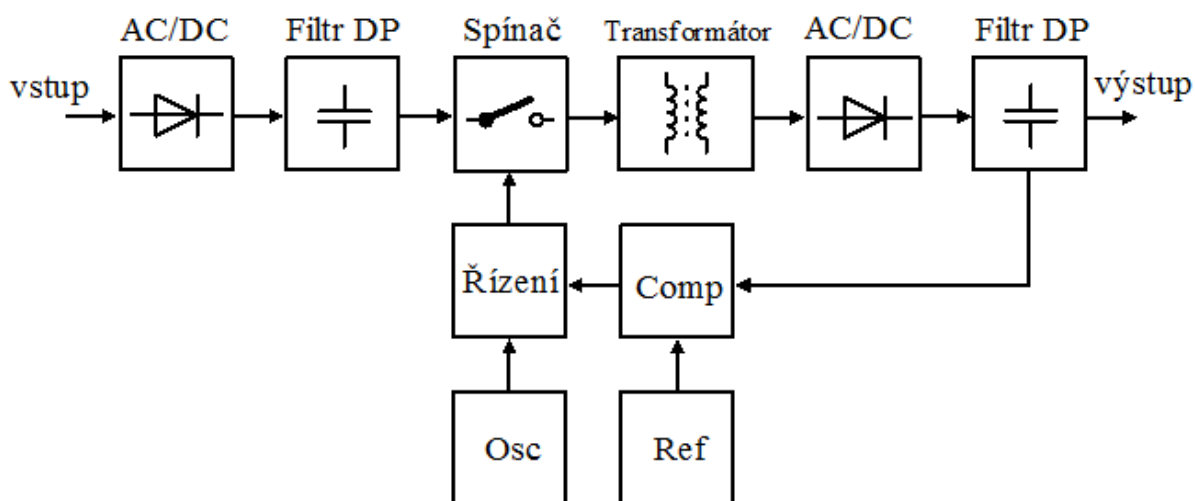
Konstrukce lineárního zdroje s pevným a nastavitelným napětím se v blokovém schématu liší pouze posledním blokem regulace. Jeho hodnota výstupního konstantního napětí je dána konstrukcí. Princip regulovatelného lineárního zdroje napětí, je na rozdíl od spínaného zdroje popsán jednoduše, protože se jednotlivým blokům věnují jednotlivé kapitoly této práce. Nejdříve se nám v prvním bloku označeném jako transformátor převede síťové napětí 230 Voltů na požadovanou hodnotu. Většinou, je tato hodnota kolem 24 Voltů. Záleží na daných parametrech zdroje. Po transformaci napětí na nižší hodnotu je potřeba toto střídavé napětí usměrnit. O to se stará blok s názvem Usměrňovač. Většinou se toto napětí usměrňuje pomocí křemíkových diod. S pomocí bloku vyhlazení + filtrace (kde se uplatňují především filtrační elektrolytické kondenzátory), máme k dispozici stejnosměrné napětí o předem zvolené hodnotě. Toto napětí se následně stabilizuje a blokem regulace se může daná výstupní hodnota zdroje nastavit pomocí potenciometrů na požadovanou hodnotu.



Obrázek 1: Blokové schéma síťového lineárního zdroje s regulovatelným napětím.

2.2 Spínané zdroje s regulovatelným napětím

Tyto zdroje mají svou konstrukci složitější, což je patrné z blokového schématu. Princip činnosti se může v daných zapojeních lišit. Některé bloky mohou být v různých typech vynechány, nebo naopak přidány či pozměněny. Blokové schéma použité na obrázku 2.2 je proto pouze obecné. Jak už bylo zmíněno, mají spínané zdroje větší účinnost. Důvodem je to, že když dojde k sepnutí spínače, teče jím relativně velký proud. Úbytek napětí je ovšem velmi malý. Pokud ale dojde k rozepnutí spínacího prvku, je daný úbytek napětí velký a teče zde pouze velmi malý proud. Velikost ztrátového výkonu je při sepnutí i rozepnutí poměrně malá. Využití tohoto jevu je hlavní důvod používání spínaných zdrojů.



Obrázek 2: Blokové schéma spínacího zdroje.

2.3 Princip činnosti spínaného zdroje regulovatelným napětím

První kroky z principu činnosti jsou podobné jako u lineárního stabilizovaného zdroje. Pouze transformátor není použit hned na začátku blokového schématu, ale až za spínačem. Nejdříve se vstupní střídavé napětí ze sítě usměrní a vyhladí filtrem typu DP (dolní propust). Ten zamezí propouštění vysokých frekvencí. Na vstup spínacího obvodu už je tedy přivedeno vyhlazené stejnosměrné napětí.

Spínací část tvoří většinou unipolární či bipolární tranzistor, který ještě bývá připojen k pomocným obvodům a diodám.

Spínání tranzistoru ve spínači je řízeno pomocí oscilátoru o dané frekvenci. Z výstupu tohoto bloku už vychází stejnosměrné napětí, které je díky oscilátoru přeměněno opět na střídavé napětí. Jeho průběh už je však obdélníkový či trojúhelníkový. Ve spínacím obvodu se většinou dosahuje kmitočtu mezi 100kHz až 1Mhz, může však dosahovat i 50Hz . To záleží opět na druhu zapojení a použití. Platí zde vztah, který obecně říká, že čím většího kmitočtu dosáhneme, tím bude větší i účinnost napájecího zdroje. Výsledná hodnota tohoto střídavého napětí je poté transformátorem upravena podle potřeby. Nakonec je výstupní hodnota střídavého napětí z transformátoru opět usměrněna a vyhlazena podle daných výstupních parametrů zdroje.

V tomto obecném principu je znázorněna i zpětná vazba, která zodpovídá za daný průběh a ve které je obsažena logika řízení spínacích prvků. Díky této zpětné vazbě můžeme regulovat a stabilizovat výstupní napětí. Také zpětná vazba obsahuje blok s názvem Comp, kde jsou použity komparátory. To jsou obvody, které slouží k porovnání dvou napětí. A blok ref, který je právě zdrojem referenčního napětí, které slouží jako jedno z porovnávaných napětí pro komparátor.

3 Transformátory pro napájecí zdroje běžného výkonu

Transformátory jsou zařízení, která nám pomáhají transformovat požadované napětí z rozvodné sítě o velikosti 230 Voltů a kmitočtem 50 Hz na požadované napětí, s kterým poté můžeme dále pracovat. Popsány budou principy transformátoru pracující pouze s jednou fází. Připojením transformátoru do daného zapojení dojde ke galvanickému oddělení od rozvodné napájecí sítě. Nejvíce jsou používány transformátory klasické a toroidní. Jejich konstrukce se v zásadě liší ve tvaru jader. Klasický transformátor má jádro tvořené z plechů o tvaru EI, zatímco toroidní transformátor má jádro prstencového tvaru. Z toho plyne několik rozdílných vlastností. Klasický EI transformátor má oproti toroidnímu velké rozměry, větší váhu a také poměrně velké rozptylové pole. Toroidní transformátor také potřebuje díky své konstrukci kratší vinutí a tím pádem je zdrojem „tvrdého“ napětí. Toho se dá využít například u zapojení, ve kterých může dojít ke krátkodobému přetížení.

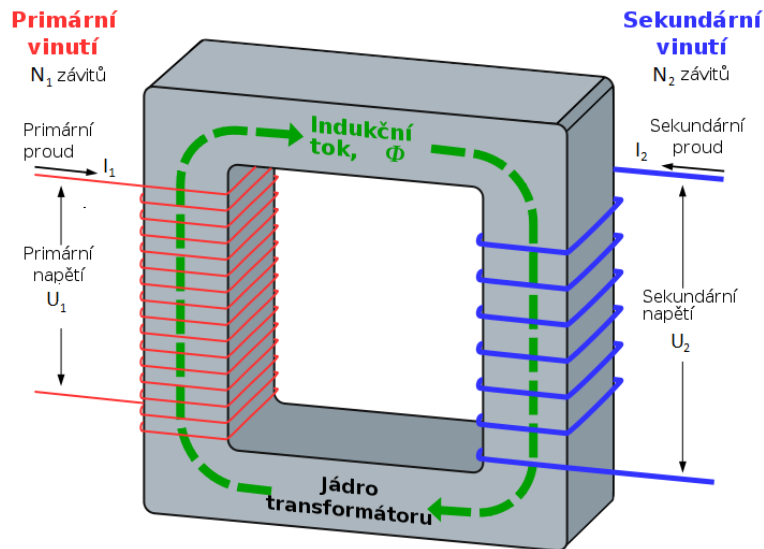


Obrázek 3: Na levé straně Toroidní transformátor, na pravé klasický EI transformátor.

3.1 Popis funkce.

Princip činnosti bude popsán na obecné struktuře transformátoru. Ta se skládá z několika základních prvků. Je to primární a sekundární vinutí o N závitů s indukčností L , které jsou v praxi tvořeny měděným drátem se smaltovou povrchovou úpravou kvůli vzájemné izolaci, a magneticky vodivým jádrem složeným z transformátorových (železných) plechů, které jsou pomocí naneseného laku izolovány. Celý transformátor využívá princip elektromagnetické

indukce. Vzorci, nezbytné k popsání činnosti, vycházejí z Maxwellových rovnic zformulovaných již v roce 1865.



Obrázek 4: Základní princip transformátoru.

Aby začal transformátor fungovat, nejprve se musí na vstup, tedy na primární cívku s N_1 závitů, připojit napětí U_1 . V tomto případě se jedná o střídavé napětí 230V s kmitočtem 50 Hz. Vinutím začne protékat magnetizační proud. Vlivem protékajícího proudu vzniká magnetický tok značený písmenem ϕ . Jelikož se jedná o střídavé napětí, které ve svém časovém průběhu mění svou hodnotu, tak i vytvořený magnetický tok ϕ bude mít časově proměnný průběh. Železné jádro zesiluje vzniklou magnetickou indukci. Vlivem jejího působení se na sekundární cívce s N_2 závitů indukují napětí. Platí zde Lenzův zákon. Jednotlivé závitů této cívky indukují stejné napětí. Sečtením těchto jednotlivých napětí dostáváme výslednou hodnotu napětí U_2 na sekundární cívce. Z toho je patrné, že počet závitů cívky ovlivňuje indukované napětí. To roste v závislosti na přidávání závitů a na dosažení co největší změny magnetického toku v co nejkratším čase.

3.2 Základní vzorce

Transformátorový poměr p pro ideální bezztrátový transformátor se dá vypočítat podle vzorce:

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}.$$

Napětí na primární a sekundární cívce jsou hodnoty U_1 a U_2 s počty závitů N_1 a N_2 . Proud primárním a sekundárním vinutím je dán hodnotou I_1 a I_2 . Pokud budeme tento poměr počítat pro oddělovací transformátor, je jasné, že hodnota p musí být rovna jedné.

Dále můžeme podle odvozených vzorců vypočítat indukované napětí u_2 na sekundární cívce pomocí vztahu:

$$u_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{\sqrt{2}} * N_2 * \phi.$$

Písmeno f je velikost frekvence vstupního napětí na primární cívce. Počet závitů sekundární cívkky je N_2 a velikost magnetického indukčního toku je ϕ .

Velikost magnetického indukčního toku ϕ vyvolaná střídavým napětím na primární cívce je dána vzorcem:

$$\phi = \frac{1}{2 * N_1 * \pi * f} * \sqrt{2} * U_1.$$

Tento vztah vychází z předchozího vzorce. Počet závitů na primárním vinutí je N_1 , efektivní hodnota napětí na primární cívce je U_2 .

3.3 Vzorce pro návrh transformátoru

Pokud chceme navrhnout napájecí transformátor typu EI s klasickými požadavky, které jsou pro běžnou praxi dostačující, zanedbáváme u výpočtu některé parametry. Proto nám k návrhu stačí pouze zjednodušené vzorce.

Výpočet výkonu, který se přenáší z primární cívkky na sekundární cívkku vypočítáme podle daného vztahu:

$$P = \frac{1}{\eta} \sum_{i=1}^n U_i I_i \quad [W; V, A].$$

Písmenem η se označuje účinnost transformátoru. Ta se udává v % a nabývá hodnoty kolem 0,8 až 0,95. Za U_i a I_i dosazujeme velikosti požadovaného napětí a proudu v sekundární cívce transformátoru. Těchto cívek, může být až n . Pro výpočet průřezu jádra S použijeme tento vztah, který platí pouze pro frekvenci 50 Hz a proudovou hustotu o velikosti $J_i = 3 \text{ A/mm}^2$

$$S \cong \sqrt{\frac{P}{B}} \quad [cm^2; W, T].$$

V tomto vzorci se při použití EI jádra za magnetickou indukci B většinou dosazuje hodnota mezi 0,9 až 1,1 Tesla. Obvykle volíme hodnotu $B = 1 \text{ T}$. Tím nám na pravé straně rovnice vznikne pouze \sqrt{P} . Množství závitů potřebné k dosažení hodnoty 1 volt, se zjistí vzorcem:

$$N_{1v} = \frac{1}{4,44fBS} \quad [V^{-1}; Hz, T, cm^2].$$

Pokud dosadíme hodnoty $f = 50\text{Hz}$ a $B = 1\text{T}$ do vzorce, vyjde nám výpočet N_{1v} takto:

$$N_{1v} \cong \frac{45}{S} \quad [V^{-1}; cm^2].$$

Tento vzorec dále využijeme k výpočtu počtu závitů jednotlivých vinutí N_i , který je dán vztahem:

$$N_i = k_u * N_{1v} * U_i \quad [V^{-1}, V].$$

Hodnoty konstanty k_u , která představuje krytí ztrát na daných vinutích, volíme u každé cívky různě. Pro primární vinutí dosazujeme hodnotu kolem 0,95 a u sekundárního vinutí kolem 1,04.

Další důležitý parametr, který ovlivňuje vlastnosti transformátoru je průměr použitých vodičů. Průměry vodičů se udávají bez přidané izolace. Volí se podle

zvolených proudů a daná hodnota se dá najít v příslušných tabulkách. Můžeme jí také vypočítat podle vzorce:

$$d_i = \sqrt{\frac{I_i}{0,785 * J_s}} \left[mm; A, \frac{A}{mm^2} \right].$$

Zde volíme proudovou hustotu pro vnitřní vinutí o velikosti $J_s = 2,5 A/mm^2$ a $J_s = 4 A/mm^2$ pro vnější vinutí. Také musíme po těchto výpočtech zkontrolovat, zda je rozměrově reálné umístění těchto cívek. Musí se počítat s nanesenou impregnací a podobně.

3.4 Použití transformátorů ve zdrojích

Transformátory mají mnoho možných využití především pak v napájecích zdrojích. Zde jsou kvůli svým přednostem poměrně často využívány toroidní transformátory, které jsou rovnou připravené pro montáž na desku plošných spojů. Při klasickém použití u nich však může dojít k vyhození proudového jističe a to především u transformátorů zkonstruovaných pro větší výkony. Proto musíme zabezpečit, aby při spuštění zdroje nedosahoval nárazový proud tak velkých hodnot. Vzniklý problém se obvykle řeší připojením termistoru typu NTC. Jeho konstrukce umožňuje při zvýšení teploty vlivem protékání velkých proudů snížit svůj odpor. Tím na něm vzniká výkonová ztráta, která tento problém eliminuje. Pokud však chceme použít transformátor pro spínané zdroje, musíme dbát na použití kvalitního jádra. V těchto zapojeních dosahuje napětí na cívkách transformátoru velkých kmitočtů řádově větších jak kHz. Vlivem těchto velkých kmitočtů by na nekvalitním jádru mohly vznikat velké ztráty. Při takto velkých kmitočtech také dochází k tomu, že proud neteče rovnoměrně v celém průřezu vodiče. To má za následek rychlejší zahřívání vodiče. Tento jev je znám jako skin efekt. Charakterizuje ho hloubka vniku, kterou značí koeficient δ . Ta je definována jako hloubka pod povrchem daného vodiče, kde proudová hustota klesne na hodnotu $\frac{1}{e}$ (cca 0,37) proudové hustoty na povrchu vodiče J_s . Je dána vztahem:

$$\delta = \sqrt{\frac{2 * \rho}{2 * \pi * f * \mu}} \quad [m; \Omega m, Hz].$$

Kde je ρ hodnota měrného odporu vodiče, f je frekvence napětí a hodnota μ značí danou permeabilitu materiálu. Jak je ze vzorce patrné s rostoucí frekvencí hloubka vniku klesá. Proto se většinou použité vodiče povrchově upravují třeba postříbřením a splétají se.

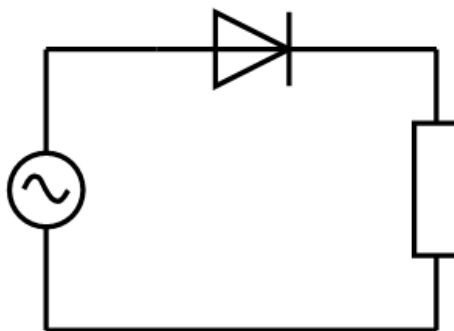
4 Usměrňovače

Použití usměrňovačů v elektrotechnice je zjednodušeně kvůli střídavým proudům užívaných v rozvodné elektrické síti. V napájecích zdrojích se nacházejí ihned za transformátorem. Slouží nám k jejich usměrnění nejčastěji za pomoci polovodičových diod, které využívají vlastnosti PN přechodu. Využitím této vlastnosti vedou elektrický proud pouze jedním směrem a díky tomu propouštějí pouze jednu složku (kladnou nebo zápornou) střídavého proudu. Během používání usměrňovačů v praxi se jejich základní rozdělení závislé na daném napětí, zvlnění nebo proudu rozdělilo do několika typů. Téměř všechny tyto typy se používají s připojeným nabíjecím kondenzátorem.

4.1 Jednocestný usměrňovač

Jedná se o nejjednodušší variantu usměrňovače. Při jeho použití musíme počítat s jeho vlastnostmi. Jednocestný usměrňovač se používá v zapojení, kde se vyskytují vysoká napětí a malé proudy. Též se vyznačuje poměrně velkým zvlněním. Tyto vlastnosti platí pro síťový kmitočet o velikosti 50 Hz. Zapojení podle schématu je zcela jednoduché. K zátěži se sériově připojí vhodná výkonová polovodičová součástka. K obvodu je také připojen zdroj střídavého napětí (obrázek 5.). Výběr polovodičové diody záleží na požadované střední hodnotě výstupního proudu a je dán vztahem:

$$I = I_{výst} = I_{\vartheta}$$



Obrázek 5: Jednocestný usměrňovač

V katalogu se pak dají tyto diody snadno najít pomocí parametru, označeným I_F . To nám uvádí velikost střední hodnoty proudu protékajícího diodou v propustném směru. Vždy je dobré tuto hodnotu naddimenzovat a to minimálně o 100% požadované hodnoty. Další věc, na kterou je potřeba brát ohled při výběru polovodičové diody, je závěrné napětí podle špičkové hodnoty sekundárního napětí na transformátoru. Místo střídavého zdroje, který je zobrazený ve schématu zapojení, se může také jednat o transformátor s primárním a sekundárním vinutím. Pokud totiž použijeme zapojení jednocestného usměřovače s kondenzátorem na výstupní straně a elektrický obvod, bude zcela bez odběru proudu, kondenzátor se nabije na tuto špičkovou hodnotu. V tomto případě je dioda napětově namáhána součtem špičkového sekundárního napětí transformátoru a maximálního napětí na tomto kondenzátoru. Toto napětí je dáno vztahem:

$$U_{Rmax} = u_{sek} * \sqrt{2} + U_0 = 2 * \sqrt{2} * u_{sek}.$$

Vstupní napětí pro usměřovač je dáno vztahem:

$$U_{sek} = U_{vst}.$$

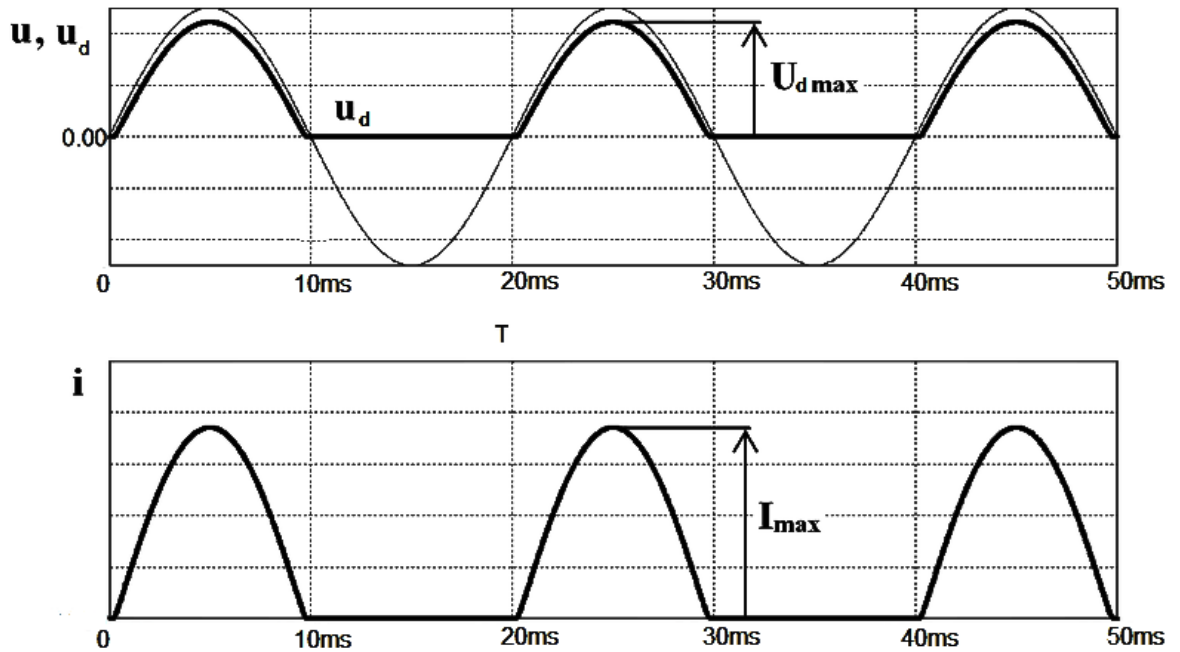
Za předpokladu že platí $U_R > U_{Rmax}$, tak námi zvolená dioda musí mít rezervu od 20 do 100%.

Hodnota maximálního napětí je dána vztahem:

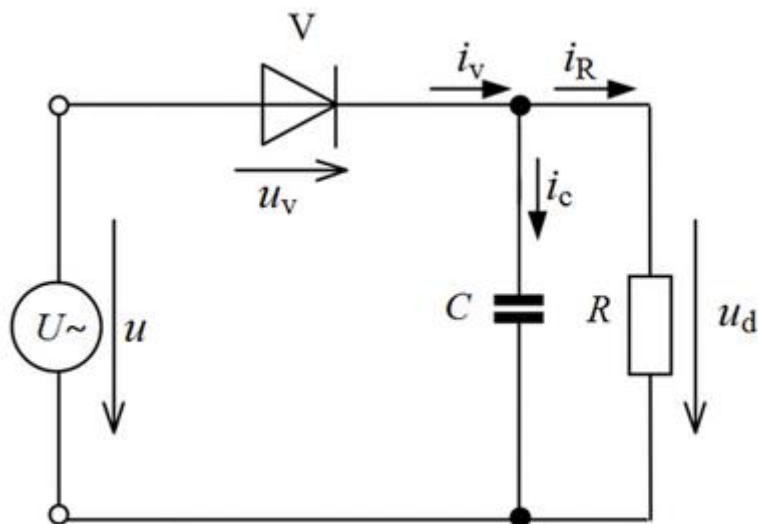
$$u_{vst} * \sqrt{2}.$$

Při použití jednocestného usměřovače bez přidaného kondenzátoru se nám na výstupu objeví pouze jedna půlvlna vstupního napětí, a proto nám obvodem bude protékat pulzující stejnosměrný proud. Z toho je logicky patrné, že tento usměřovač má pouze poloviční účinnost. Úbytek na použité diodě bude 0,7V. Dále se dá také vypočítat střední hodnota usměřeného napětí naprázdno ($\omega.t = \theta$) :

$$U_d = U_{av} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi U_m * \sin(\theta) d(\theta) = \frac{U_m}{2\pi} [-\cos(\theta)]_0^\pi = \frac{U_m}{\pi} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} * U = 0,45 * U.$$



Obrázek 6: Časové průběhy

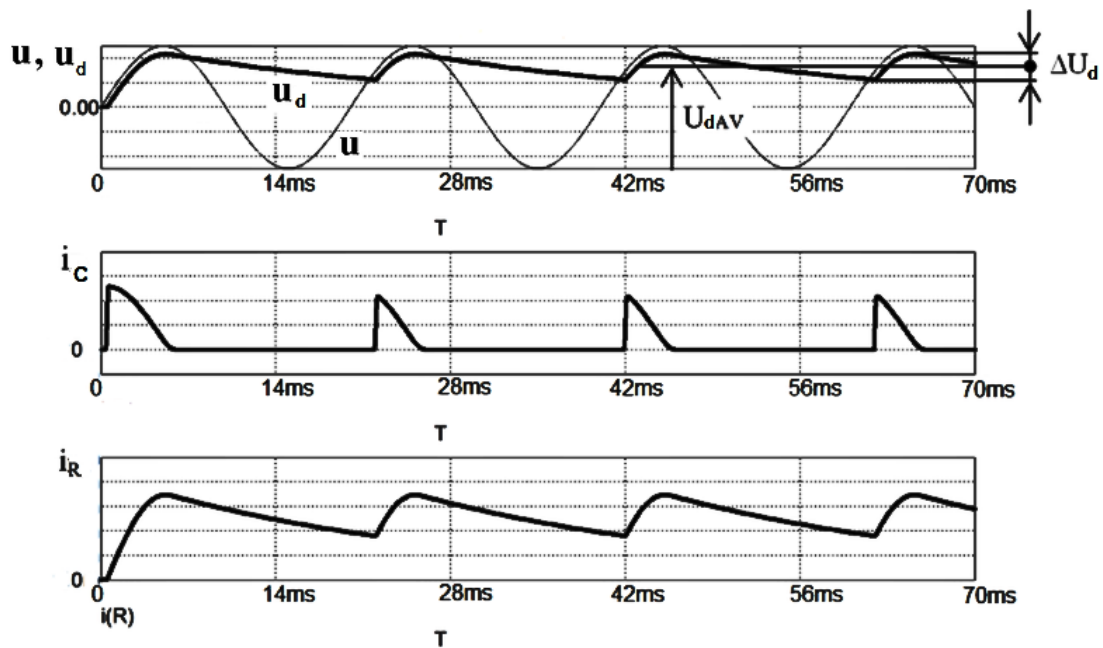


Obrázek 7: Jednocestný usměrňovač s kondenzátorem na výstupu.

Připojený kondenzátor na výstupu jednocestného usměřovače se používá k vyhlazení pulzujícího napětí. Kapacita tohoto nabíjecího kondenzátoru se dá snadno vypočítat použitím empirického vztahu:

$$C_{Nmin} = 600 * \frac{I}{p * U_0} \quad [\mu F; mA, \%, V].$$

Na použitém schématu zapojení jednocestného usměřovače s připojeným kondenzátorem se dá celý princip krásně vysvětlit. Dioda označená písmenem V, na které vzniká okamžitá hodnota napětí u_v a protéká okamžitá hodnota proudu i_v , je připojena v propustném směru. V tomto případě mohou při připojení zátěže nastat dva stavy. Při průchodu kladné půlvlny, kdy je okamžitá hodnota napětí $u > u_d$, začne diodou V protékat proud o velikosti i_v . Dioda se ocitne v sepnutém stavu. Tento proud následně začne nabíjet kondenzátor C. Poté se s poklesem kladné půlvlny, kdy okamžitá hodnota napětí klesne pod propustné napětí diody V (platí tedy $u < u_d$), začne kondenzátor C vybíjet do připojené zátěže. Toto vybíjení má exponenciální průběh a je krásně zobrazeno na obrázku. Při aplikování Ohmova zákona je jasné, že s klesajícím napětím nám začne klesat i proud na zátěži. Ve chvíli, kdy proud protékající kondenzátorem je roven proudu protékající zátěží, se dioda V uzavře. Okamžitá hodnota proudu, která diodou protékala, totiž klesla k nule. To v důsledku způsobí uzavření diody a její polarizování do závěrného směru, ve kterém diodou po celou dobu neteče žádný proud. To že si jsou proudy i_c a i_R rovny, znamená, že kondenzátor C už sám napájí celou zátěž svým proudem. Ve chvíli opětovného nárůstu napětí, se dioda opět přepne do sepnutého stavu a celý jev se opakuje pořád dokola.



Obrázek 8: Časové průběhy.

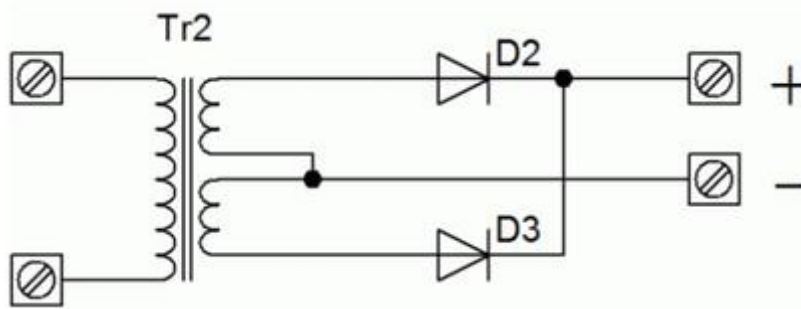
4.2 Dvoucestný usměrňovač

U dvoucestného usměrňovače jsou některé principy shodné jako u usměrňovače jednocestného. K základnímu zapojení s diodou se pouze paralelně přidá další dioda připojená v nepropustném směru. Střídavé napětí na vstupu tohoto usměrňovače si obě diody rozdělí, takže každou diodou teče polovina výstupního stejnosměrného proudu. U tohoto zapojení je podstatná střední hodnota proudu protékajícího diodou za periodu T . Výběr diody podle daného napětí se provádí stejně, jako v předchozím jednocestném usměrňovači.

Hodnota napětí, na kterou diodu dimenzujeme:

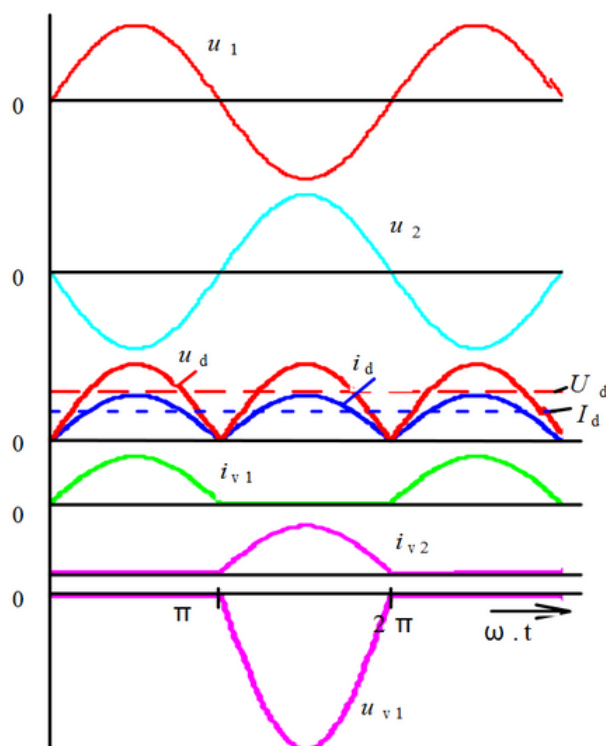
$$U_R > 2 * U_0.$$

Obecně jsou diody zkonstruovány tak, že jsou proudově přetížitelné. Také je potřeba zmínit, že k tomuto zapojení je potřeba speciálního transformátoru, který má na sekundární cívce dvě vinutí, nebo odbočku. To kvůli jednoduché funkci. Při spuštění tohoto elektrického obvodu musí být na horním výstupu použitého transformátoru kladné napětí. V ten samý moment by se mělo na dolním výstupu z transformátoru vyskytovat napětí opačné polarity.



Obrázek 9: Dvoucestný usměrňovač se dvěma diodami.

Princip činnosti je opět jednoduchý. Při nárůstu výstupního střídavého napětí z transformátoru, tedy výskytu kladné půlvlny tohoto střídavého napětí, je dioda D2 v propustném stavu a prochází jí proud do zátěže, která je připojena na výstup tohoto usměrňovače. Stejný princip jako u jednocestného usměrňovače. Pokud se kladné napětí vyskytne na dolním vývodu z transformátoru, dioda D3 se otevře a také jí začne protékat proud do zátěže. Z toho je patrné, že se tyto dvě diody vzájemně doplňují a v obou půlvlnách střídavého proudu teče proud do zátěže.

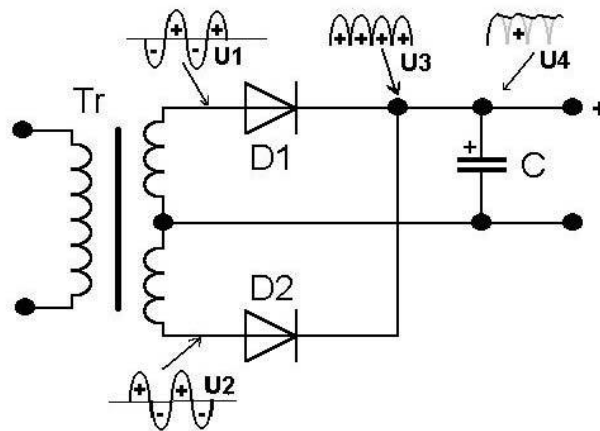


Obrázek 10: Časové průběhy obvodových veličin.

Jako u jednocestného, tak i u dvoucestného usměrňovače se na výstupu připojuje filtrační kondenzátor připojený paralelně k zátěži. Jeho hodnota je v tomto zapojení menší. Výběr se provede opět na základě požadavku výstupního zvlnění a to tímto vzorcem:

$$C_N = 300 * \frac{I}{p * U_0}. \quad [\mu\text{F}; \text{mA}, \%, \text{V}].$$

Další důležitá charakteristika je ta, že zvlněné výstupního napětí dosahuje dvojnásobné frekvence, než je frekvence střídavého proudu na vstupu usměrňovače. Ta při použití klasického síťového napětí dosahuje 100 Hz. Použití tohoto řešení je pro úlohy s malými výkony a rovněž malými napětími. Ve výsledku se však tento způsob usměrnění skoro nepoužívá kvůli nízkým cenám diod. Vyplatí se však například v trakčních usměrňovačích, kde tečou veliké proudy a diody tím pádem potřebují chlazení, které je rozměrově dost problematické.

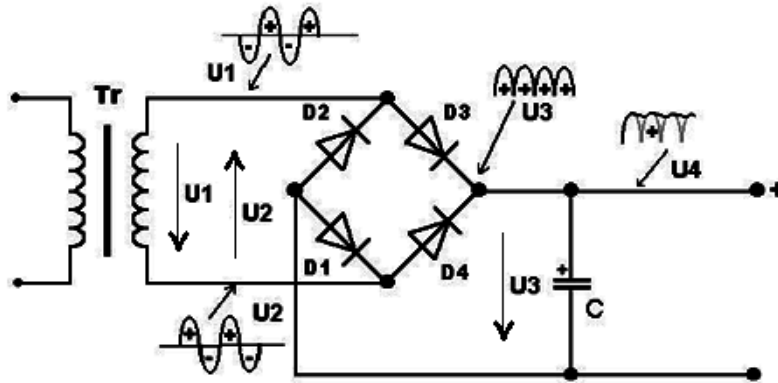


Obrázek 11: Zapojení dvoucestného usměrňovače s půleným vinutím a kondenzátorem.

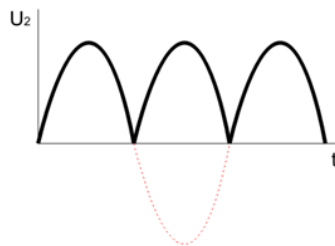
4.3 Dvoucestný můstkový usměrňovač

Tento druh usměrňovače je o něco složitější, ale asi nejpoužívanější k usměrnění síťového napětí. Také jsem ho využil ve svém síťovém zdroji. Usměrňovač si vystačí s klasickým transformátorem a v zapojení je použito čtyř diod. Tím se dosáhne kvalitnějšího usměrnění, ale na každé z diod dochází k úbytku napětí. Takže celkový úbytek napětí na diodách bude logicky větší, než u předchozího dvoucestného usměrňovače. Tato nevýhoda se však projevuje jen při průchodu

větších proudů, jinak je použití vcelku bezproblémové. Tento můstkový usměrňovač se používá v zapojení jak pro jednofázovou tak i pro třífázovou soustavu.



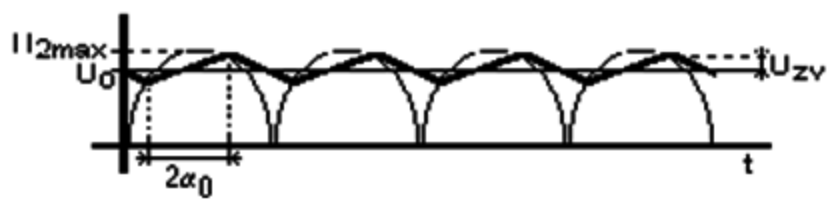
Obrázek 12: Zapojení dvoucestného můstkového usměrňovače.



Obrázek 13: Časový průběh napětí můstkového usměrňovače na výstupu (bez připojeného kondenzátoru).

Výsledné zapojení vznikne vzájemným spojením dvou jednocestných usměrňovačů sériově. V místě, kde jsou k sobě diody připojeny s opačnou polaritou, se připojí vstupní střídavé napájecí napětí. Princip tohoto zapojení je následující. Na výstup můstkového usměrňovače připojíme zátěž. Při výskytu kladné půlvlny na vstupním napětí, které je ve schématu označené jako U_1 , se dioda D_3 otevře a prochází jí proud přímo na zátěž. Ze zátěže teče proud dále přes diodu D_1 zpět do transformátoru. V druhé polovině probíhající periody, kdy se mezi diodami D_1 a D_4 objeví rovněž kladná půlvlna vstupního napětí označeného U_2 , se otvírá dioda D_4 . Tou proteče proud opět na zátěž a dále skrz diodu D_2 zpět do transformátoru. Zátěží tak teče proud stejným směrem v obou půlvlnách. To nám opět způsobuje dvojnásobný kmitočet výstupního napětí oproti vstupnímu. Proto se na výstup opět připojuje paralelně k usměrňovači sběrací kondenzátor

označený C. Ten nám na výstupu zajistí přibližně pilovitý průběh napětí, vhodný k další aplikaci.



Obrázek 14: Časový průběh napětí můstkového usměrňovače na výstupu s připojeným kondenzátorem.

5 Lineární stabilizátory

Jako další nezbytný prvek, který obsahují laboratorní zdroje, jsou stabilizátory napětí. Jejich aplikace nám umožňuje stabilizovat požadovanou hodnotu napětí na jeho výstupu. Jeho funkce nám umožňuje dosáhnout co nejmenšího zvlnění, které vzniklo při usměrnění daného napětí. Jeho primární funkce je však dosáhnout co nejstabilnější hodnoty napětí na jeho výstupu. Musí mít schopnost tuto hodnotu stabilizovat i v momentech, kdy dochází ke změnám některých veličin. Nejčastěji se jedná o teplotu, vstupní napětí a výstupní proud. Na ostatních vlivech většinou nezáleží. Při podezření na špatnou funkčnost může hrát roli například vliv elektromagnetického rušení, nebo stárnutí dané součástky. Použitý stabilizátor musí být rovněž schopen dodávat do požadované zátěže dostatečný výkon. K tomu aby mohl daný stabilizátor fungovat, musí obsahovat regulační prvek. Jako základní rozdělení se dá určit právě podle druhu připojení tohoto regulačního prvku, a to na paralelní a sériové. Základní vlastnost, která je pro každý stabilizátor podstatná, se nazývá činitel stabilizace a značí se písmenem S . Ten určuje poměr kolísání napětí na vstupu usměrňovače oproti kolísání napětí na jeho výstupu. Tento vztah se pochopitelně určuje při konstantní zátěži na výstupu.

Výpočet činitele stabilizace S při konstantním odporu R_z :

$$S = \frac{\frac{\Delta U_1}{U_1}}{\frac{\Delta U_2}{U_2}}$$

Jako další podstatná vlastnost stabilizátoru je velikost jeho vnitřního odporu R_{Tst} při konstantním napětí U_1 . Ten je dán vztahem:

$$R_{Tst} = \frac{\Delta U_2}{\Delta I_2}$$

Z daných vzorců je pochopitelné, že je ideální stabilizátor musí mít činitel stabilizace nekonečný a naopak vnitřní odpor roven nule.



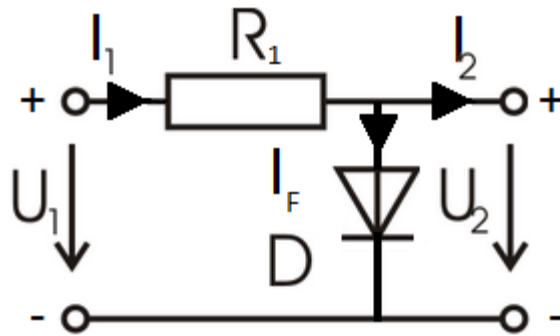
Obrázek 15: Ideální stabilizátor

5.1 Parametrické (lineární) stabilizátory

V zapojeních s parametrickým stabilizátorem se často používá jako regulační prvek klasická křemíková dioda, Zenerova dioda nebo tranzistor. U těchto součástek se využívají zejména jejich průběhy voltampérových charakteristik. Funkce těchto stabilizátorů spočívá na principu vzniklého rozdílu mezi stejnosměrným odporem a odporem dynamickým u předem zvoleného stabilizačního prvku. Tento rozdíl se nachází v pracovním bodě. Díky těmto vlastnostem můžeme rozeznat, zda se jedná o parametrický stabilizátor proudu, nebo napětí. Pokud je totiž dynamický odpor v pracovním bodě daného regulačního prvku podstatně větší, jedná se o stabilizátor proudu. Typickým příkladem je třeba výstupní charakteristika tranzistoru. Naopak při výrazně nižší hodnotě dynamického odporu se jedná o parametrický stabilizátor napětí. Jako třeba u diody v propustném směru, či Zenerově diodě.

5.2 Stabilizátor s diodou

Tento jednoduchý stabilizátor skládající se pouze z odporu a křemíkové diody se využívá zejména tam, kde je potřeba stabilizovat především malá napětí. To je vidět na voltampérové charakteristice polovodičových diod. V propustném směru nám za kolenem strmě stoupá proud.

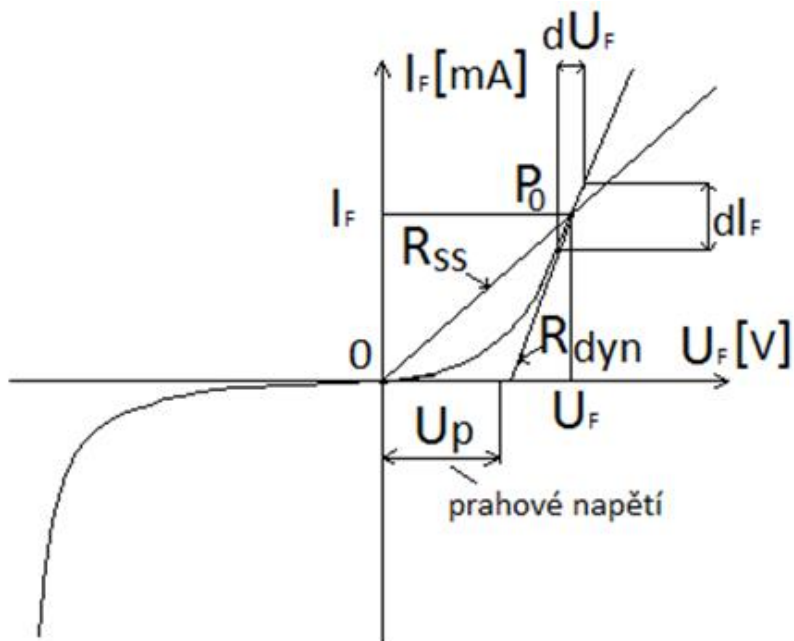


Obrázek 16: Stabilizátor s diodou.

Výpočet odporu R_1 je dán vztahem:

$$R_1 = \frac{U_1 - U_F}{I_1}.$$

V tomto vzorci nám U_1 představuje nestabilizované vstupní napětí. Hodnota U_F je propustné napětí diody, které vznikne průchodem proudu I_F . Rovněž nám U_F určuje velikost stabilizovaného napětí na výstupu stabilizátoru. Dále je pomocí prvního Kirchhoffova zákona dána hodnota proudu I_1 , která je součtem proudu tekoucího diodou označeného I_F a proudem I_2 tekoucím do zátěže připojené na výstupu. Proud protékající diodou, musí být větší než proud tekoucí do zátěže. Tato podmínka musí být splněna, protože jinak by se při nulovém odběru proudu do zátěže stala daná dioda přetížena nadměrnou hodnotou proudu. V opačném případě se musí docílit toho, aby při větším proudovém odběru neklesl proud protékající diodou. Ten by při větším poklesu mohl způsobit prudký pokles napětí. To je vidět ve voltampérové charakteristice diody. Užití tohoto zapojení je pak zejména pro jednoduché obvody vyžadující nízkého napětí a malého proudu. U křemíkové diody je hodnota propustného napětí přibližně 0,7V.



Obrázek 17: Voltampérová charakteristika diody.

Například při požadavku proudu dodávaného do zátěže o velikosti 1 mA vypočteme stejnosměrný odpor diody pro proud protékající diodou $I_F = 10 \text{ mA}$ takto:

$$R_{ss} = \frac{U_F}{I_F} = \frac{0,7}{0,01} = 70[\Omega].$$

Při pohledu na obrázek, se může v oblasti strmého stoupání voltampérové charakteristiky v bodě P_0 odhadnout dynamický odpor označený R_{dyn} řádově na desítky ohmů.

U výpočtu činitele stabilizace proudu musíme předpokládat konstantní napětí na vstupu stabilizátoru, které je označeno U_1 . Je dán jako podíl změny napětí na stabilizátoru přímo závislém na změně proudu tekoucího do zátěže na výstupu.

Vzorec:

$$S_I = \frac{dU_2}{dI_2}.$$

Pokud ale dojde k nárůstu proudu tekoucího do zátěže o dI_2 , tak nám logicky klesne proud protékající diodou D. V tomto případě se dá počítat s hodnotou,

která je přibližně stejně velká jako vzniklý nárůst proudu na zátěži dI_2 . Velikost změny napětí na výstupu stabilizátoru je rovna změně napětí na diodě D. Platí tedy že $dU_2 = dU_F$. Z těchto znalostí pak můžeme vypočítat proudový činitel stabilizace tímto vztahem:

$$S_I = \frac{dU_2}{dI_2} = \frac{dU_F}{dI_F} = R_{dyn}.$$

Z těchto vztahů je tedy patrné, že k tomu abychom dosáhli co nejmenší změny napětí na výstupu stabilizátoru (které je pochopitelně závislé na změně proudu tekoucím zátěží), musí mít použítá dioda co nejmenší hodnotu dynamického odporu. Z voltampérové charakteristiky je patrné, že průběh propustné části diody, nacházející se v oblasti za kolenem, musí být co nejstrmější. Z toho nám plyne tento vzorec:

$$dU_2 = R_{dyn} * dI_2.$$

Abychom dosáhli ideálního činitele stabilizace proudu, muselo by platit několik podmínek. Především by muselo být nekonečně velké napájecí napětí a odpor R_1 by musel rovněž dosahovat nekonečné hodnoty. To by vedlo ke konstantní hodnotě vstupního proudu I_1 . Tím pádem, by se změna výstupního proudu dI_2 rovnala změně proudu protékajícího diodou dI_F . Z toho vyplývá, že ideální činitel stabilizace proudu by byl roven nule. V použitých zapojeních se proto doporučuje vstupní napětí podstatně větší než je vzniklý úbytek napětí na diodě. Tím dosáhneme podstatně lepší hodnoty činitele stabilizace. Pokud chceme vypočítat činitel stabilizace napětí, musíme předpokládat, že hodnota výstupního proudu je konstantní. Jedná se opět o podíl rozdílu výstupního a vstupního napětí usměřovače:

$$S_U = \frac{dU_2}{dU_1}.$$

U dalších kroků jsou postupy podobné jako při předchozích výpočtech. Změna napájecího proudu je pochopitelně závislá na změně vstupního napětí. Také opět předpokládáme, že odpor R_1 je dostatečně velký. Poté platí:

$$dI_1 = \frac{dU_1}{R_1}.$$

Pokud aplikujeme podmínku, že odpor zátěže R_Z (připojený na výstup stabilizátoru) je podstatně větší než odpor dynamický R_{dyn} , změní se výstupní napětí podle tohoto vzorce:

$$dU_2 = dI_1 * R_{dyn} = \frac{dU_1 * R_{dyn}}{R_1}.$$

Dále pak činitel napět'ové stabilizace daný vztahem:

$$S_U = \frac{dU_2}{dU_1} = \frac{R_{dyn}}{R_1}.$$

Stejně jako u činitele stabilizace proudu tak i u činitele napět'ové stabilizace je v ideálním případě výsledek roven nule. Docílením takového výsledku se nejlépe přiblížíme buď dostatečně velkým vstupním napětím, výběrem dostatečně velkého odporu R_1 , nebo zvolením správné diody. U ní by měla hodnota dynamického odporu R_{dyn} dosahovat co nejnižších hodnot.

Výkonová účinnost stabilizátoru se vypočítá pomocí vzorce:

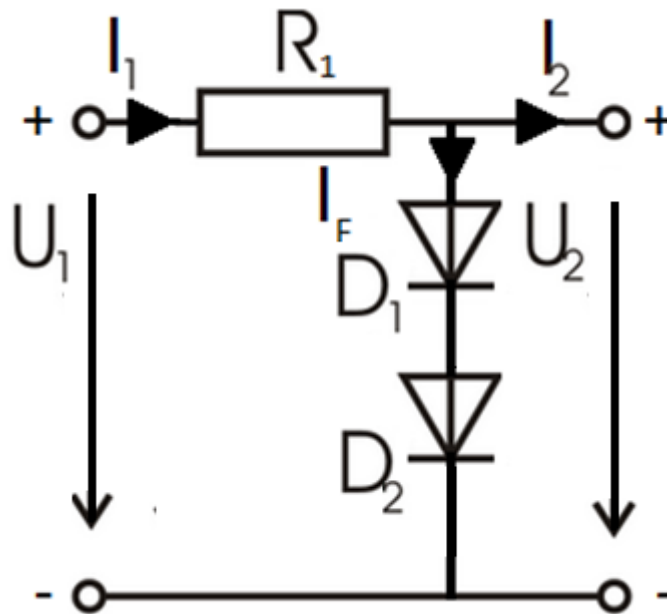
$$v = \frac{U_2 * I_2}{U_1 * I_1} * 100 [\%].$$

Je dána součinem výstupního napětí a proudu proti vstupnímu napětí a proudu. Zajímavé je, že když budeme chtít dosáhnout co nejlepší stabilizace, získáním co nejlepších hodnot činitele stabilizace napětí a činitele stabilizace proudu, bude mít daný stabilizátor nulovou výkonovou účinnost. V obvodech s větší napět'ovou náročností se dá do tohoto zapojení přidat ještě další diody do série, jak je patrné z obrázku. V tomto řešení musí být u všech použitých diod správně nastaven pracovní bod. Jak je ale vidět, toto řešení je ale zbytečně komplikované a vyjde určitě snadněji použít Zenerovu diodu.

Výpočet činitele teplotní stabilizace pro běžnou křemíkovou diodu je dán tímto vztahem:

$$S_{\tau} = \frac{dU_2}{d\tau} = \frac{dU_F}{d\tau} = \alpha_{TKUF} = -2,10^{-3} \left[\frac{V}{K} \right] = \text{konstanta}.$$

Teplotní koeficient značený α_{TKUF} je tedy roven hodnotě -2 [mV/K]. Z toho je patrné, že napětí vzniklé na diodě bude se stoupající hodnotou teploty klesat.

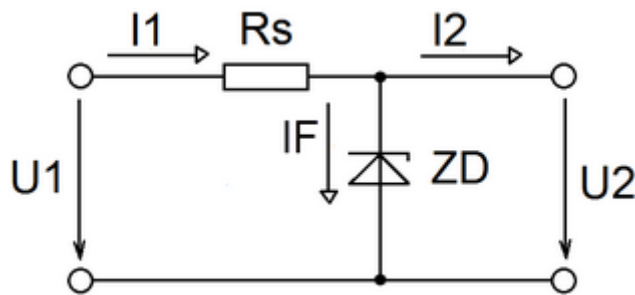


Obrázek 18: Stabilizátor s dvěma diodami

5.3 Stabilizátor se Zenerovou diodou.

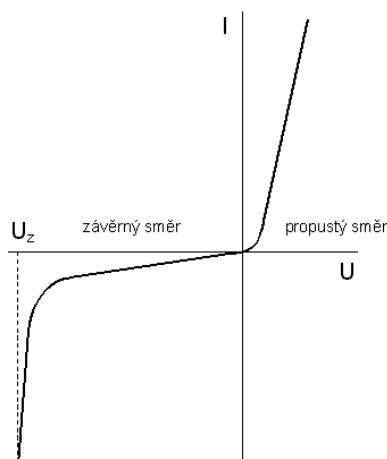
Tento stabilizátor je využíván ke stabilizaci napětí. K pochopení jeho vlastností, je potřeba zjistit princip činnosti Zenerovy diody. Ta je zvláštní tím, že se do elektrického obvodu připojuje opačně, než klasická dioda. Tedy v závěrném směru. Zde využívá Zenerova průrazu, který vzniká na PN přechodu. Z fyzikálního hlediska je PN přechod místo, ve kterém se nevyskytují žádné vodivostní částice, které by byly volné. Při připojení diody v závěrném směru do elektrického obvodu, vznikne díky velkému odporu na PN přechodu

elektrostatické pole s relativně velkou elektrickou intenzitou. Ta dosahuje řádově stovky kVm^{-1} .



Obrázek 19: Zapojení stabilizátoru se Zenerovou diodou.

Vzniklá elektrická síla, která v krystalu polovodiče působí na její elektrony a následně je vytrhne z jejich vazeb. Tím začne prudce klesat odpor tohoto přechodu z desítek $M\Omega$ na jednotky Ω . A logicky se zvětšuje vodivost. Díky tomu nám diodou začne protékat proud. Velká výhoda je ta, že proud protéká při téměř konstantním napětí. Toto napětí je pojmenováno jako Zenerovo napětí a v obrázku je označeno jako U_z . Většinou dosahuje hodnot 3, 6, 9 a více voltů. V průběhu voltampérové charakteristiky je tento jev vidět. Na levé části této charakteristiky je zobrazen téměř kolmý průběh k ose napětí. Z té je jasně patrné, že protékající proud může měnit svou hodnotu, zatímco napětí je téměř stejné.



Obrázek 20: Voltampérová charakteristika Zenerovy diody.

V samotné konstrukci Zenerovy diody je dosaženo opravu úzkého PN přechodu, který je široký zhruba 1 μm. Tato šířka se nejčastěji využívá pro napětí do 3 Voltů. Další zajímavá vlastnost se objevuje při zkoumání teplotní závislosti. Zde při nárůstu teploty dochází k poklesu napětí. Pokud je potřeba aplikovat diodu pro větší napětí, musí se šířka PN přechodu také zvětšit. Většinou u napětí větších než 6 Voltů, dochází v diodě k takzvanému lavinovému průrazu. Uvolněné elektrony při těchto vyšších napětích získávají větší kinetickou energii, se kterou mohou při průchodu narážet do jiných elektronů obsažených v krystalové mřížce daného polovodiče. Tímto nárazem může dojít k uvolnění elektronů z mřížky a tím pádem dochází k lavinovému efektu. Teplotní závislost se zde však projevuje zcela opačně. Při nárůstu teploty dochází i ke zvýšení napětí. Při zapojení Zenerovy diody do stabilizátoru nehraje roli její napěťové dimenzování, proto u ní můžeme očekávat stejné vlastnosti. Teplotní stabilizace se vypočítá pomocí vzorce:

$$S_{\tau} = \frac{dU_2}{dT} = \alpha_{TKUZ}.$$

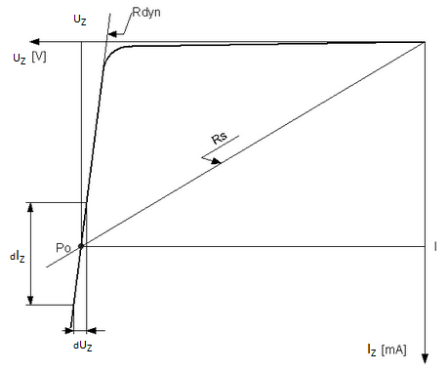
Výpočet činitele stabilizace proudu:

$$S_I = \frac{dU_2}{dI_2} = R_{dyn}.$$

Výpočet činitele stabilizace napětí:

$$S_U = \frac{dU_2}{dU_1} = \frac{R_{dyn}}{R_1}.$$

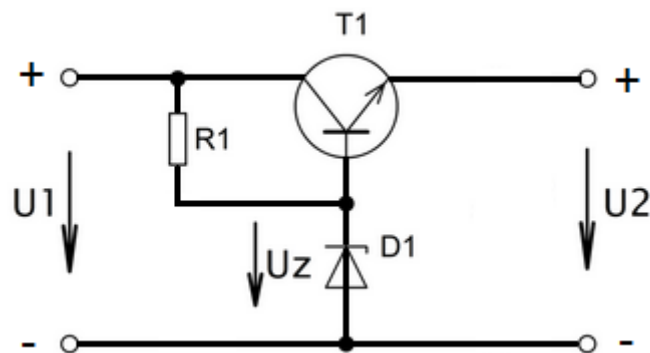
Dynamický odpor je daný odpor Zenerovy diody v jeho pracovním bodě. Je zřejmé, že tyto vzorce jsou totožné jako u předchozího stabilizátoru s klasickou křemíkovou diodou. Stejně vzorce se rovněž používají pro výpočet závěrného proudu tekoucího Zenerovou diodou a vstupního napětí i proudu.



Obrázek 21: Závěrná část voltampérové charakteristiky Zenerovy diody.

5.4 Stabilizátor s tranzistorem

Zapojení stabilizátoru s tranzistorem by se rovněž dalo nazvat jako zpětnovazební stabilizátor. Jak je již z názvu zřejmé, je v něm použit jako regulační prvek klasický tranzistor typu NPN. Ze schématu zapojení je také jasné, že se jedná o sériový stabilizátor. Tranzistor T1 je totiž s kombinací Zenerovy diody označené D1 zapojen v sérii. Mezi odpor R1 a zápornou svorku (tedy paralelně k diodě) a na výstup stabilizátoru, se obvykle ještě připojují elektrolytické kondenzátory. Ty kombinací s diodou zajišťují dostatečnou filtraci na výstupním napětí U_2 . Využití tohoto zapojení je vhodné zejména pro velké zatěžovací proudy, u kterých je potřeba dosáhnout co nejstabilnější hodnoty výstupního napětí.



Obrázek 22: Zapojení stabilizátoru s tranzistorem.

Princip činnosti tohoto stabilizátoru je následující. Aby se neztratila regulační schopnost tranzistoru T1 a tím pádem zůstal stabilizátor v chodu, musíme zabezpečit, aby nepracoval v oblasti saturace. Z tohoto důvodu je k tranzistoru

připojena v sérii dioda D1. Její funkce je dodávat do báze tranzistoru konstantní napětí. Toto napětí je dostatečně stabilní. Dioda je totiž proudově zatížená jen velmi slabým proudem, který teče do báze tranzistoru T1. Z hlediska funkčnosti však nesmí tento proud na diodě klesnout pod minimální hodnotu. Tranzistor by nemohl měnit svůj dynamický odpor. Jeho změnou se na výstupu stabilizátoru udržuje velikost napětí U_2 . To se dá vypočítat pomocí vztahu:

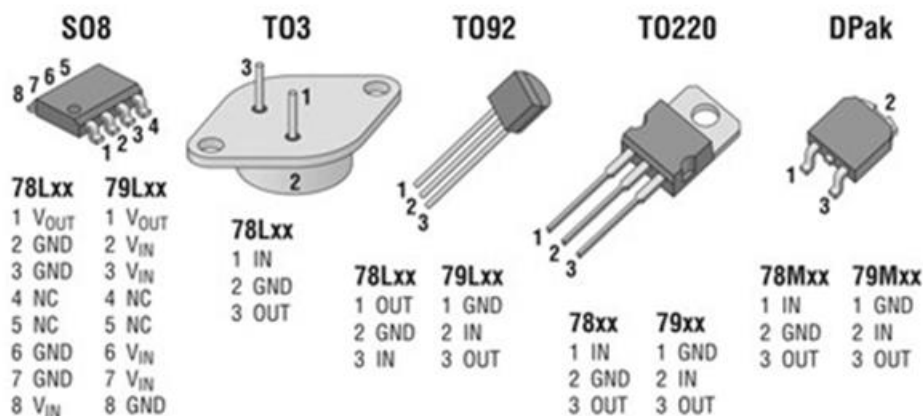
$$U_2 = U_Z - U_{BE}.$$

Pomocí tohoto vzorce je vidět, že v zapojení funguje zpětná vazba a to záporná. Pokud nám totiž napětí na výstupu stoupne, způsobí to v obvodu pokles napětí U_{BE} (napětí mezi bází a emitorem tranzistoru). Zde se hodnota pohybuje okolo 0,6 Voltů. To nám zapříčiní částečné přivření tranzistoru T1 a díky tomu výstupní napětí U_2 klesne. V opačném případě, kdy napětí na výstupu U_2 o něco klesne, postup proběhne přesně opačně. Pomocí znalosti Ohmova zákona a některých vlastností tranzistoru, se dá vypočítat hodnota odporu R1. Kromě vstupního napětí U_1 , Zenerova napětí U_Z a hodnoty proudu I_Z procházejícím danou diodou, musíme zjistit hodnotu proudu protékajícího kolektorem značenou I_C a katalogový údaj proudového zesilovacího činitele h_{21} . Poté stačí pouze dosadit do vzorce:

$$R1 = \frac{U_1 - U_Z}{I_Z + \frac{I_C}{h_{21}}}$$

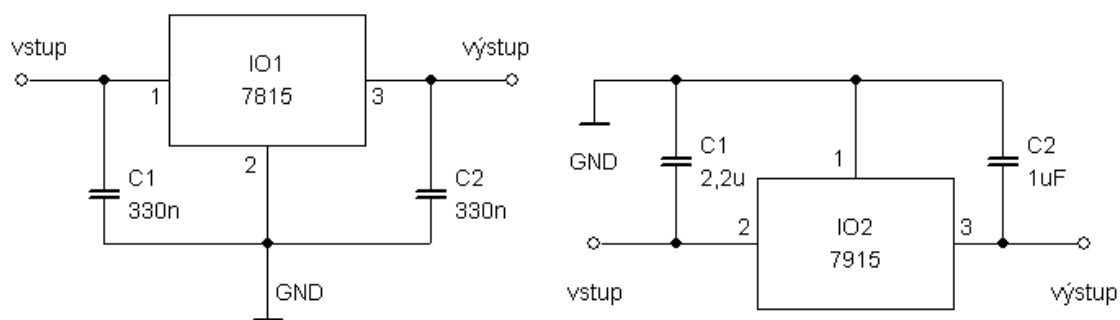
5.5 Integrované stabilizátory

Tyto stabilizátory jsou v praxi nejvíce používané. Jedná se o složitější obvody, které jsou integrovány do relativně malých plastových či kovových pouzder. Z těchto pouzder jsou tyto integrované obvody vyvedeny většinou do tří vývodů podle druhu zapojení. Mají poměrně malou pořizovací cenu a dají se rozdělit na dva typy. Jsou to stabilizátory s nastavitelným výstupním napětím a stabilizátory se stálým výstupním napětím. Jejich parametry, označení vývodů a typy pouzder jsou obsaženy v technické dokumentaci dané výrobcem.



Obrázek 23: Pouzdra pro integrované stabilizátory řady 78xx,79xx

V dokumentaci je rovněž obsaženo doporučené zapojení pro dané úlohy. Většinou musíme dodržet hodnotu vstupního napětí alespoň o 3 volty větší, než je hodnota potřebného stabilizovaného napětí. V zapojeních také hraje roli, jaké výkony daná aplikace vyžaduje. Pokud mají stabilizátorem protékat velké proudy, jsou na integrovaných obvodech připraveny plochy pro chlazení. Na ty se zpravidla pomocí teplovodivé pasty připevní dostatečně velký chladič.

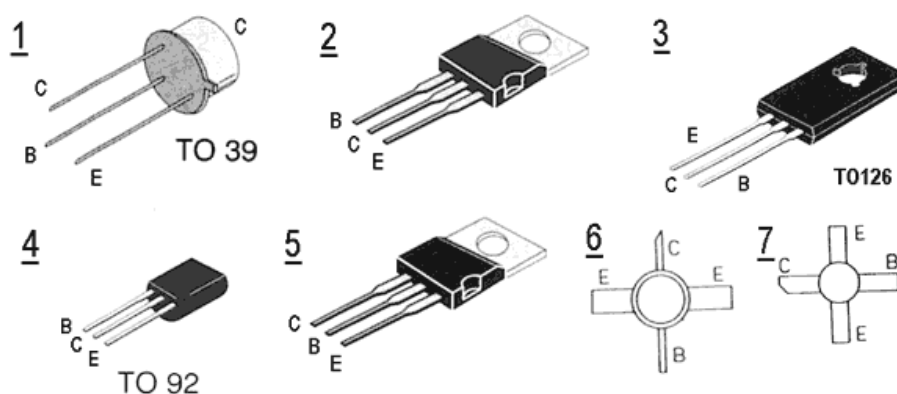


Obrázek 24: Zapojení stabilizátoru 7815 kladného napětí a stabilizátoru záporného napětí 7915.

Integrované obvody ve svém návrhu rovněž obsahují proudovou ochranu. Také mají v celku odolnou konstrukci vůči zkratu na výstupu stabilizátoru. Podle doporučených zapojení od výrobce se na vstup a výstup přidávají keramické kondenzátory daných hodnot. Ty pak dosahují lepší stability.

6 Tranzistory

Velice důležitou roli v zapojení jak pro spínaný tak i stabilizovaný síťový zdroj hraje tranzistor. Jedná se o základní aktivní polovodičovou součástku s dvojicí přechodů PN používanou v elektrotechnice. Její uplatnění je téměř v každém zařízení v podobě integrovaných obvodů, jako je třeba procesor nebo jakákoliv paměť. Bývají stejně jako stabilizátory implantovány do různých pouzder. U těch rovněž záleží, na jaké parametry jsou stavěny. Pochopitelně u tranzistorů s většími výkony jsou pouzdra opatřena vývodem na chladič. Rovněž jsou elektrody tranzistoru BCE (báze, kolektor, emitor), nebo GDS (gate, drain, source) kvůli konstrukci u různých pouzder zapojeny jinak. Proto je potřeba před zapojením součástky zjistit, jak je daný tranzistor zkonstruován a o jaký typ se jedná. Tranzistory se dělí na unipolární a bipolární. Rozdíl mezi nimi vzniká podle toho, jaký se při zesilování podílí typ nosičů nábojů. Buď se jedná o vodivostní elektrony a díry (bipolární), nebo se podílí jen vodivostní elektrony nebo díry (unipolární).



Obrázek 25: Pouzdra tranzistorů typu NPN.

6.1 Rozdělení tranzistorů

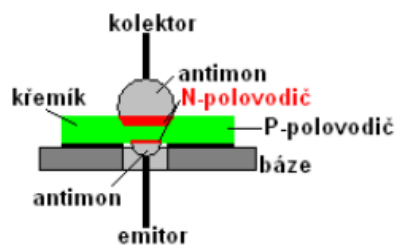
Tranzistory se v základě dělí na unipolární a bipolární. Rozdíl mezi nimi se týká podle toho, jaký se při zesilování podílí typ nosičů nábojů. Buď se jedná o vodivostní elektrony a díry (bipolární), nebo se podílí jen vodivostní elektrony nebo díry (unipolární). Bipolární se dále rozdělují na NPN a PNP. Rozdíl spočívá pouze v použití vrstev. Mezi dvě vrstvy polovodiče s vodivostí N nebo P vložíme vrstvu s opačnou vodivostí. Elektrody jsou tedy označeny B, C, E. U unipolárních

tranzistorů je rozdělení daleko složitější. Typů je hned několik a jsou vidět na obrázku.

bipolární		Unipolární tranzistory						
		unipolární	JFET a MESFET		FET - tranzistory			
			MOSFET tranzistory		P - kanál		N - kanál	
NPN	PNP	typ-N	P-kanál	N-kanál	indukovaný	zabudovaný	indukovaný	zabudovaný

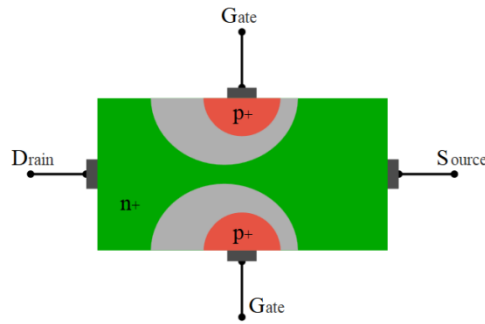
Obrázek 26: Základní rozdělení Tranzistorů.

Rozdílná je pochopitelně i konstrukce jak unipolárních tak bipolárních tranzistorů. Bipolární se tedy skládá ze tří na sobě položených vrstev. Tyto vrstvy mají v sobě zabudovaný vodivý kontakt, který slouží k připojení do elektrického obvodu.



Obrázek 27: Konstrukce bipolárního tranzistoru.

Unipolární tranzistor má díky své konstrukci velký vstupní odpor. Proto se jim také říká FET tranzistory. Zkratka FET znamená Field-Effect Tranzistors . V překladu tranzistory řízené elektrickým polem. Skládají se z křemíkového monokrystalu. Ten je vyroben s dotací typu N nebo P. Tento monokrystal má v sobě opět připojeny vodivé elektrody, které slouží k jeho připojení do obvodu. Jak je vidět na obrázku 28. Mezi elektrodou Source a Drain, je elektroda s názvem Gate. Ta je tvořena dvěma elektrodami.



Obrázek 28: Konstrukce unipolárního tranzistoru.

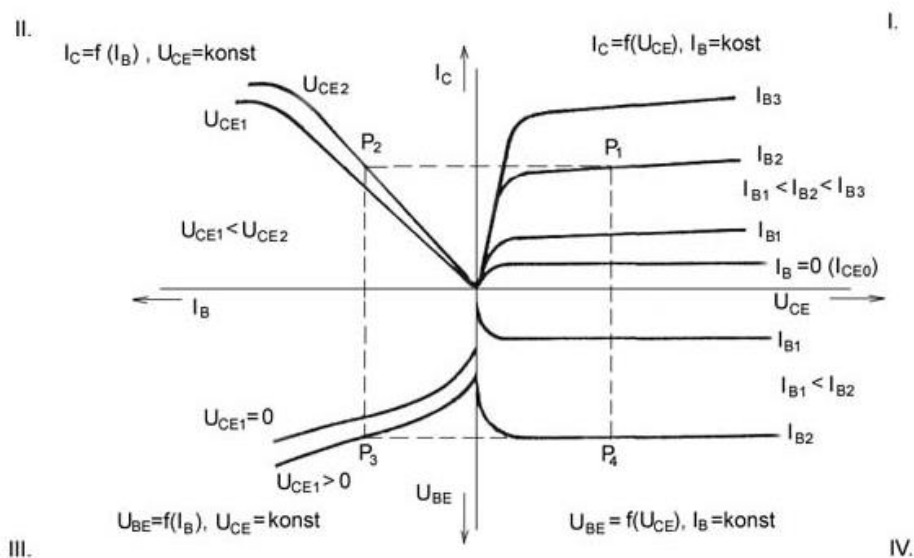
6.2 Základní zapojení bipolárních tranzistorů

U základních zapojení je potřeba, aby jedna z elektrod tranzistoru (B, C, E), byla společná jak pro vstup i výstup obvodu. Z toho je patrné, že počet základních zapojení jsou tři. Jedná se o zapojení SB (společná báze), SE (společný emitor), SC (společný kolektor). Každé zapojení má jiné použití jak z pohledu napěťového, proudového nebo výkonového zesílení. Liší se také vstupním a výstupním odporem a fázovým posunem vstupního a výstupního napětí. Tyto zapojení jsou zakreslena na obrázku 29.

Druh zapojení	SE	SC	SB
Tranzistor PNP			
Tranzistor NPN			
Zesílení proudové napěťové výkonové	10 až 200 10 až 100 100 až 2000	10 až 200 0,9 až 0,99 10 až 200	0,9 až 0,995 10 až 100 10 až 100
Impedance vstupní výstupní	10 Ω až 1 kΩ 10 kΩ až 100 kΩ	10 kΩ až 100 kΩ 100 Ω až 1 kΩ	10 Ω až 100 Ω 100 kΩ až 1 MΩ
Fázový posun mezi vstupním a výstupním napětím - proudem	180° 0°	0° 180°	0° 0°
Výhody	nejlepší přizpůsobení velké zesílení	vhodný jako měnič impedance	nejvyšší f_{mez} vhodný jako měnič impedance

Obrázek 29: Základní zapojení bipolárních tranzistorů.

Voltampérová charakteristika bipolárního tranzistoru je zobrazena na obrázku 30. Graf je rozdělený na čtyři kvadranty a každý z nich je na sobě závislý. V kvadrant I. jsou zobrazeny výstupní charakteristiky naprázdno. Jak je patrné s růstem proudu I_b na bázi tranzistoru dochází i k nárůstu výstupního proudu na kolektoru I_c . Proudový zesilovací činitel β , určuje strmost proudového průběhu ve druhém kvadrantu. Je známá jako proudová převodní charakteristika nakrátko. Vstupní charakteristika nakrátko pro hodnotu U_{CE} , která se většinou udává pouze pro jednu danou hodnotu, se nachází ve III. kvadrantu. Vstupní charakteristika nemá veliký vliv na toto napětí, a proto ho můžeme zanedbat. V posledním IV. kvadrantu je znázorněna závislost vstupního a výstupního napětí. Samozřejmě vstupní napětí zde ovlivňuje výstupní. Jak je vidět, velikost bazového proudu I_b zde může dosahovat různých hodnot. Díky zpětné napěťové převodní charakteristice naprázdno, můžeme vidět tuto napěťovou závislost. Nastavením a polohou pracovního bodu tranzistoru, můžeme zajistit požadované vlastnosti.

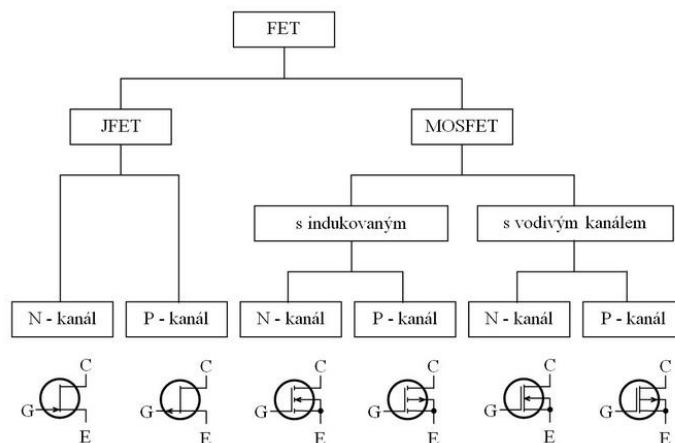


Obrázek 30: Voltampérová charakteristika bipolárního tranzistoru v zapojení se společným emitorem.

6.3 Základní zapojení unipolárních tranzistorů

Unipolární tranzistory se tedy dělí na několik typů. Všechny typy těchto tranzistorů v sobě obsahují název FET (Field Effect Transistor). Ty se dále dělí na

tranzistory JFET a tranzistory typu MOSFET .JFET je zkratka pro Junction gate FET. Tento tranzistor je zkonstruován tak, že jeho řídicí elektroda je oddělena od polovodiče kanálu závěrně polarizovaným přechodem PN. Tranzistory typu MOSFET, obsahují kovové hradlo. To má na povrchu aplikovanou velmi tenkou vrstvu oxidu křemičitého. Proto mají tento název z překladu Metal-Oxid-Semiconductor FET. Tyto tranzistory řízené elektrickým polem jsou rovněž aktivními elektronickými prvky. Průtok proudu mezi kolektorem (drain) a emitorem (source) reguluje velikost elektrostatického pole. Díky tomuto poli se tedy mění vodivost kanálu mezi těmito elektrodami. Toto pole pochopitelně vzniká napětím přivedeným na řídicí elektrodu, která se nazývá Gate. Rovněž tuto elektrodu můžeme nazývat hradlem.



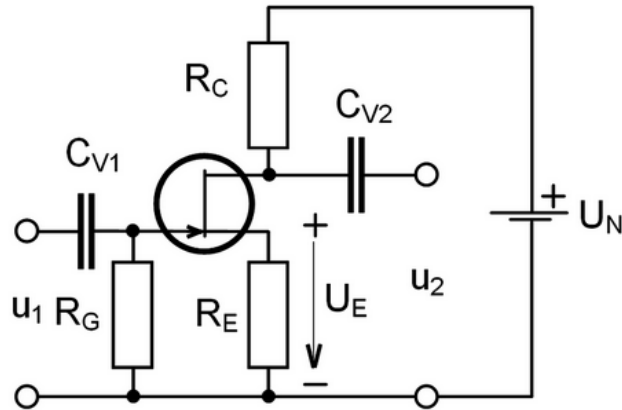
Obrázek 31: Rozdělení typů FET tranzistorů s jejich schématickými značkami.

Základní zapojení unipolárních tranzistorů se nejlépe vysvětluje v zapojení, kde jsou použity jako zesilovací prvky. Jelikož zapojení a typů je hodně, princip činnosti je zde popsán na zesilovači s tranzistorem JFET a MOSFET s indukovaným kanálem. Zesilovač s tranzistorem FET se nejčastěji využívá v zapojeních se společným emitorem. Při nastavení pracovního bodu musí nejprve dojít k nastavení takzvaného klidového pracovního bodu. Tento klidový pracovní bod se nastavuje předpětím, které vzniká mezi elektrodou Gate a Source (emitor) značeno U_{GE} . Jak je vidět, toto nastavení probíhá zcela jiným způsobem, než u bipolárních tranzistorů, kde se pracovní bod nastavuje proudem protékajícím bází I_B . Dané napětí, které je potřeba k nastavení klidového pracovního bodu je u

každého typu tranzistoru jiné. Výjimku tvoří pouze tranzistory typu MOSFET, u kterých se tento klidový bod nastavovat nemusí. Pokud chceme toto předpětí nastavit, musíme na elektrodu Gate připojit zdroj, u kterého bude zajištěná opačná polarita. Toto nastavení se nejčastěji řeší připojením dvou odporů před elektrodu Gate a za elektrodu emitoru (Source) proti zemi. Odpor připojený před elektrodu Gate musí dosahovat velikosti řádově $M\Omega$. V zapojení se nazývá jako mřížkový nebo svodový odpor.

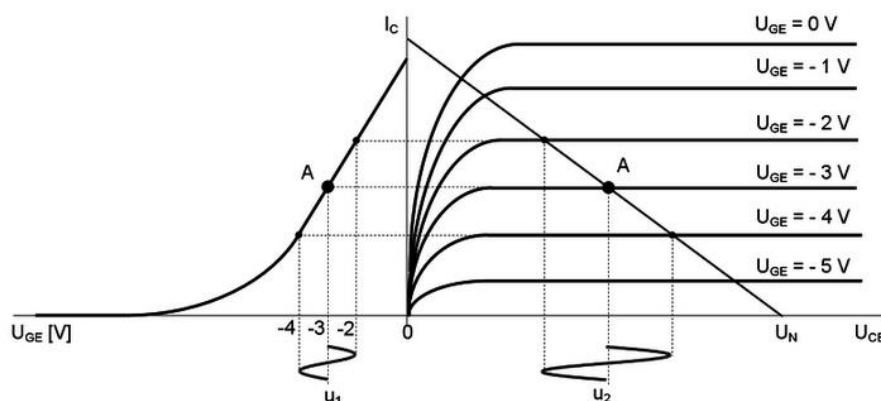
6.4 Zapojení zesilovače s tranzistorem typu JFET

V tomto zapojení se musíme pochopitelně nejdříve postarat o nastavení pracovního bodu. Stejně jako u bipolárních tranzistorů, kde se pracovní bod pohybuje v I. kvadrantu uprostřed zatěžovací přímky, tak i zde se pracovní bod musí nacházet na stejném místě. Tuto hodnotu rovněž nastavujeme velikostí odporu umístěného před elektrodou kolektoru (drain), který označíme R_C . Jeho velikostí nastavujeme předpětí, mezi bází (gate) a emitorem (source). Emitor daného tranzistoru má svůj vnitřní odpor. Díky němu na něm vzniká právě vytvořené předpětí. Vlivem protékajícího proudu kolektorem, který teče na výstup vzniká na odporu emitoru k úbytku napětí U_E . Toto napětí je stejnosměrné. Vlivem vzniklého úbytku stejnosměrného napětí vzniká na elektrodě gate větší hodnota záporného napětí, které se zvětší právě o toto napětí U_E . Aby došlo k propojení mřížky gate a emitoru, je v obvodu připojen odpor, ve schématu značený jako R_G . Toto propojení je stejnosměrné. Hodnota odporu R_G může dosahovat více jak desítky $M\Omega$. Takto relativně velká hodnota odporu se přidává z důvodu neklesání vstupního odporu celého zapojení.



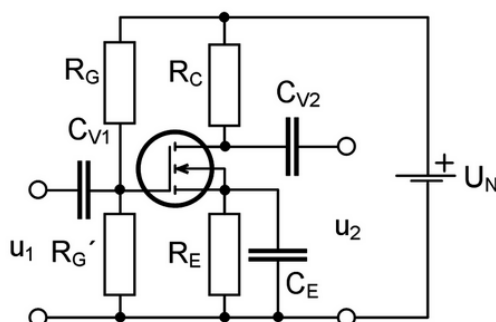
Obrázek 32: Zapojení zesilovače s tranzistorem typu MOSFET s indukovaným kanálem.

Nastavení zesilovače tedy záleží v nastavení potřebné veličiny, tedy napětím U_{GE} . Jak je vidět na obrázku 33. dochází změnou tohoto napětí, na které přichází vstupní signál označený jako u_1 ke změně, tedy zesílení napětí u_2 . Vlivem změny u_1 na vstupní charakteristice kde vzniká změna polohy klidového pracovního bodu, dochází i ke změně pracovního bodu na zatěžovací přímce. Dochází zde ke změně výstupního proudu, který protéká kolektorem I_c . Tento proud tedy musí také protékat odporem R_c . Tím dochází ke změně úbytku napětí, která v důsledku rovněž vyvolává změnu úbytku napětí mezi kolektorem a emitorem U_{CE} . Tato vzniklá změna se ve výsledku projeví na výstupním zesíleném napětí u_2 . Jak je vidět ve schématu zapojení, tato změna napětí musí projít přes kondenzátor C_{V2} . Pokud dojde k zatížení výstupu, dochází rovněž ke snížení odporu zesilovače. Pracovní bod A se bude pohybovat po dané zatěžovací přímce.



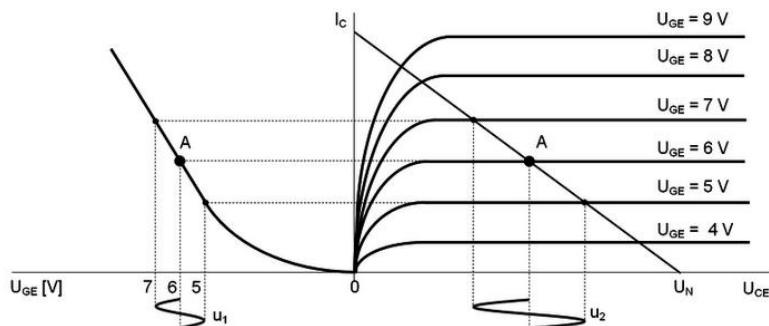
Obrázek 33: Princip zesílení tranzistoru JFET.

6.5 Zapojení zesilovače s tranzistorem typu MOSFET s indukovaným kanálem. Toto zapojení je založené na podobném principu jako u zesilovače tranzistorem typu JFET. V tomto typu tranzistoru se potřebná hodnota vzniklého předpětí mezi elektrodou (mřížkou) gate a emitorem nastavuje pomocí odporového děliče. Ten se podle schématu na obrázku 34. skládá z odporu R_G a R'_G . Z důvodu možné střídavé záporné zpětné vazby, se do obvodu přidává kondenzátor C_E .

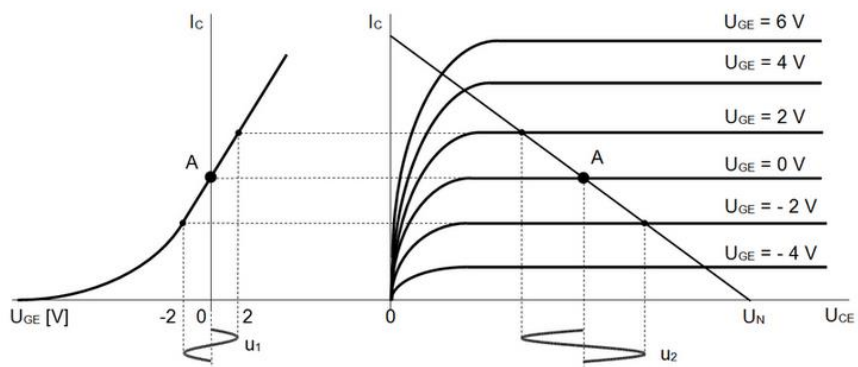


Obrázek 34: Zapojení zesilovače s tranzistorem typu MOSFET s indukovaným kanálem.

Pokud se jedná o zapojení zesilovače, ve kterém je použit tranzistor typu MOSFET s vodivým kanálem, tak je jeho zapojení stejné jako na obrázku 34. V tomto zapojení může tranzistor zesilovat i bez vzniklého předpětí, které vzniká mezi gate a emitorem. Výstupní charakteristika u tohoto zesilovače je ale jiná, než u zapojení MOSFETu s indukovaným kanálem.



Obrázek 35: Princip zesílení tranzistoru MOSFET s indukovaným kanálem



Obrázek 36: Princip zesílení tranzistoru MOSFET s vodivým kanálem

7 Konstrukce a popis sestaveného zdroje

Síťový zdroj nastavitelného napětí tvoří spolu s páječkou a multimetrem k základním potřebám každého elektrotechnika. Z těchto důvodů jsem si vybral toto téma, protože mi tento zdroj dlouhou dobu chyběl. Zdroj je, co se týče konstrukce a zapojení velice jednoduchý a na všechny základní úlohy zcela dostačující. Jeho rozsah napětí a proudu zcela bez problému pokryje většinu potřebných úloh a měření jak na analogových tak digitálních zapojení. Také je v tomto zapojení použito omezení proudu, což je velká výhoda z důvodu ochrany před zkratem, nebo přetížením napájených obvodů

7.1 Návrh

Princip tohoto zapojení, spočívá v tom, že střídavé napětí, které jde na vstup toroidního transformátoru o hodnotě 230V je přetransformováno na 24V střídavého napětí. Toto střídavé napětí je následně usměrněno klasickým způsobem, na diodovém usměrňovači, který se podle schématu nachází logicky ihned za transformátorem.

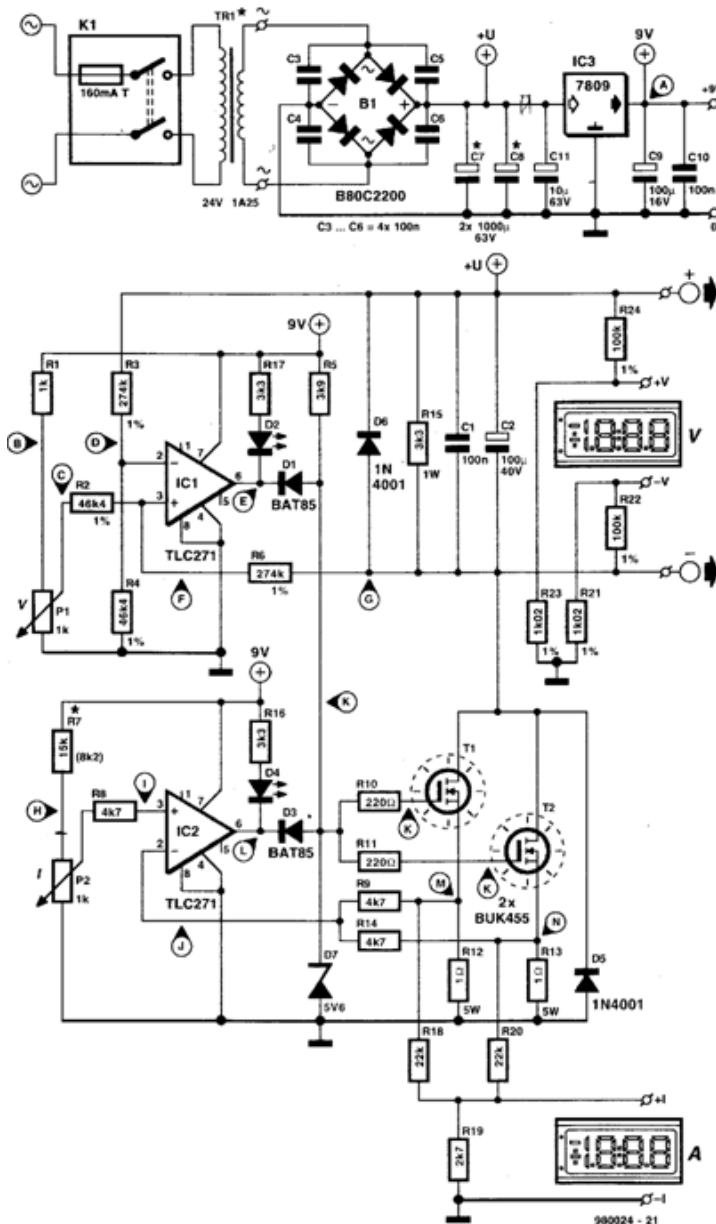
Toto napětí je následně stabilizováno a regulováno pomocí dvou paralelně zapojených FET tranzistorů, ve schématu označených jako T1 a T2. Oba tyto FET tranzistory jsou zapojeny mezi kostrou (místo s nulovým napětíovým potenciálem) a zápornou výstupní svorkou zdroje.

Dále pak jsou FET tranzistory řízeny operačními zesilovači označené jako IC1 a IC2. Zesilovače v tomto zapojení průběžně porovnávají vstupní napětí nebo výstupní proud s námi nastavenou hodnotou pomocí potenciometrů P1 a P2. Za pozornost v tomto Návrhu stojí zapojení FET tranzistorů. Převážná většina regulovatelných zdrojů, které jsem při hledání objevil, má totiž FET tranzistory zapojené jako sledovače. V tomto zapojení je však zapojení méně obvyklé. Napětí na elektrodě tranzistoru gate, musí být o 6 Voltů vyšší, než na elektrodě Source. V tomto zapojení je tento problém řešen tím, že elektrodu gate, je možné řídit napětím proti interní kostře síťového zdroje a ne proti kladnému napájecímu napětí.

Také je zde zajímavým způsobem řešeno pomocné napětí pro regulaci. To je tvořeno klasickým stabilizátorem pevného napětí 7809, které současně slouží i

jako zdroj referenčního napětí. Operační zesilovače jsou taktéž napájeny stabilizovaným zdrojem o hodnotě +9V. Nastavování požadované hodnoty napětí se nastavuje potenciometrem P1, omezení proudu se nastavuje potenciometrem P2.

7.2 Schéma zapojení



Obrázek 37: Schéma stabilizovaného síťového zdroje.

7.3 Regulace napětí

Ze zapojení je patrné, že napětí na kondenzátoru C2 je plovoucí. Jinými slovy je rovněž spojeno s nestabilizovaným napětím zdroje. Elektroda Drain obou FET tranzistorů T1 a T2 je spojena se zápornou svorkou na výstupu zdroje. Se zemí (místem s nulovým napěťovým potenciálem) je ovšem spojeno referenční napětí na vstupu regulace. Proto je zde napěťový dělič složený z odporů R3/R4 (R2/R6) na vstupu do operačního zesilovače IC1 (IC2). Na těchto odporech se žadaná hodnota, kterou si nastavíme pomocí potenciometru P1, porovnává s výstupním napětím. Zde je ovšem nutné dodržet s co největší přesností hodnotu odporů. Jejich hodnota musí být co nejvíce shodná. Proto se zde aplikují odpory s co nejmenší tolerancí. V tomto případě je zde použita 1% tolerance.

7.4 Regulace proudu

U regulace proudu je použit poměrně osvědčený a jednoduchý způsob řízení. Měří se zde úbytek napětí na bočníku. V tomto případě se bočník skládá z odporů R12 a R14 v obvodu elektrod Source FET tranzistorů. Tyto bočníky mají relativně velký odpor a to až 1 ohm. A to kvůli tomu, že FET tranzistory vycházejí rozdílně. Například při odběru zdroje o velikosti 2A což vlastně znamená, že každým tranzistorem T1 a T2 teče proud o velikosti 1A je logicky velikost napětí na každém bočníku 1V. Z těchto dvou rozdílných napětí je díky odporům R9 a R14 vytvořen průměr. To má výhodu v tom, že když jsou proudy ne zcela ideálně rozděleny na oba tranzistory, je i přes to naměřena skutečná hodnota protékajícího proudu. Tato hodnota je pak v operačním zesilovači IC2 porovnávána s námi nastavenou hodnotou pomocí potenciometru P2. Pokud protékající proud překročí nastavenou hranici, tak jednoduše klesne výstupní napětí operačního zesilovače a dále také přes diodu D3 klesne vybuzení FET tranzistorů. Dále jsou zde pod označením D1 a D3 použity Schotkyho diody a to kvůli jistotě, že tranzistory T1 a T2 budou dostatečně zavřeny.

7.5 Signalizace

Signalizaci aktivní regulace proudu i napětí je provedena pomocí dvou červených LED diod D2 a D4. Zde jsou diody zapojeny paralelně, i když by šly zapojit jednodušeji do série s diodami D1 a D3. Hrozilo by však nebezpečí, že by FET tranzistory T1 a T2 nebylo možné, úplně zavřít. Tento problém by se jistě dal vyřešit pomocí záporného napájecího napětí, nicméně vyjde určitě levněji

zapojení LED diod paralelně. Vzhledem k tomu, že odběr zdroje se tímto zapojením zvětší o zhruba 2mA je jasné, že se jedná o zcela zanedbatelnou hodnotu.

7.6 Ochrana

Před nečekaně velkým vstupním napětím, nebo napětím se špatně zvolenou polaritou je tento zdroj chráněn dvojicí diod D5 a D6. Další ochranu představuje odpor R15, který v tomto zapojení určuje minimální výstupní napětí. Ztrácí se na něm malý proud přes odpor R6 a případný svod obou FET tranzistorů. Poslední prvek zajišťující stabilitu zdroje, jsou kondenzátory C1 a C2. Ty při náhlých změnách na zátěži zlepšují stabilitu celého zdroje.

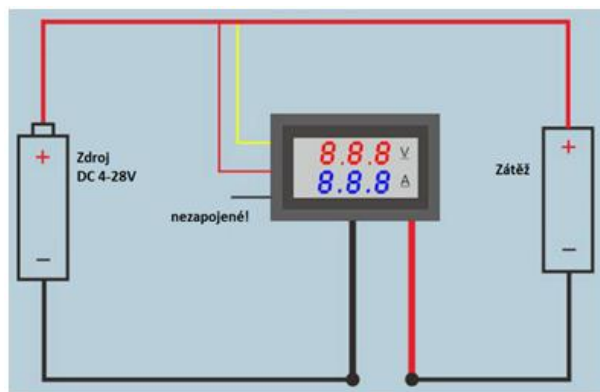
7.7 Mařící moduly

Pro připojení digitálních měřících přístrojů, je v návrhu desky plošných spojů připraven dělič napětí, který je tvořen sedmi odpory od R18 až po R24. Tyto děliče napětí jsou určeny pro následnou indikaci nastaveného napětí a proudu. Odpory v děliči R18, R19 a R20 jsou zapojeny paralelně k obvodu s elektrodami Drain obou FET tranzistorů T1 a T2, které tvoří i odpory. Toto zapojení, je připraveno pro měření protékajícího proudu.

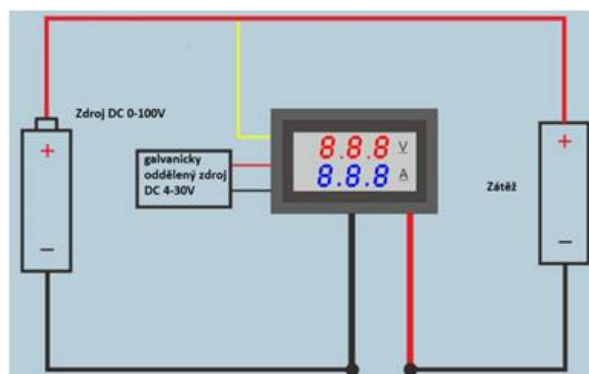
K měření aktuálního napětí na výstupu zdroje slouží dělič napětí složený ze čtyř odporů R21, R22, R23 a R24. A to kvůli plovoucímu napětí, které se zde vyskytuje. Při nastavení rozsahu na použitém digitálním modulu nastaveného na rozsah 0,2 Voltů (který je připojen mezi body označené +-V ve schématu zapojení), se musí toto napětí snížit z hodnoty 20 Voltů na hodnotu 0,2 Voltů. To znamená 100x snížit jeho hodnotu. U obvyklých modulů je častá hodnota zobrazení 3 ½ digitu. To v tomto případě představuje maximální zobrazenou hodnotu 19,99 Voltu. Pro zobrazení hodnoty 20,0 voltů (kdy se vlastně vzdáme přesnosti jednoho digitu), musíme změnit hodnoty odporů R21 a R23 na 100 Ohmů. Pro nedostačující rozsah jsem ale tyto moduly nahradil jiným typem.

Na předním panelu zdroje je umístěno panelové digitální měřidlo, které má v sobě obsažen jak voltmetr zobrazující nastavené napětí červeným LED displejem, tak ampérmetr zobrazující aktuální proud modrým LED displejem. Rozsah měřeného napětí má od 0 až po 100 Voltů stejnosměrného napětí. Rozsah měřeného proudu má od 0 do 10 Ampér stejnosměrného proudu. Obnovovací

frekvence použitého měřidla činí 0,5 sekundy. Bez kabeláže jsou rozměry 48x29x21mm. Toto panelové měřidlo má dvě možnosti napájení. Jde napájet přímo ze zdroje, kde by se dalo připojit rovnou za usměrňovač a stabilizátor IC3 na dané napětí 9V. Nebo z galvanicky odděleného zdroje v rozmezí 5-30 Voltů stejnosměrného napětí. V tomto případě je použita druhá varianta. Z přechozího řešení za použití jiného panelového měřidla, které šlo zapojit pouze s galvanicky odděleným zdrojem, jsem se rozhodl tento typ napájení použít i v tomto případě. Ve zdroji se proto nachází baterie o velikosti napětí 9 Voltů. Panelové měřidlo se uvádí do chodu zapnutím dvoupólového vypínače, který slouží i k zapnutí napájení zdroje přímo ze sítě.



Obrázek 38: Zapojení při napájení z měřeného zdroje.



Obrázek 39: Zapojení pro měření ze samostatného zdroje (0-100V DC).

7.8 Použité součástky:

Rezistory:	Kondenzátory:
R1=1k	C1,C3...C6,C100=100n
R2,R4=46k4 1%	C2=100μ/40 V stojatý
R3,R6=274k 1%	C7,C8=2200μ/63 V
R5=3k9	C9=100μ/16 V stojatý
R7=8k2	C11= 10μ/63 V
R8,R9,R14=4k7	
R10,R11=220R	Polovodiče:
R12,R13=1R/5W	B1-Diodový můstek8A
R15=3k31/1W	D1,D3=BAT85
R16,R17=3k3	D2,D4= LED červená
R18,R20=22k	D5,D6=1N400x
R19=2k7	D7=5v6/400mW
R21,R23=1k02 1%	T1,T2=BUK 455-100A
R22,R24=100k 1%	IC1,IC2=TLC271CP
P1,P2=1k lin.	IC3=7809

Obrázek 40: Rozpiska součástek

Dále jsou použity součástky: Skříň KP12, 2Ks panelových svorek, toroidní transformátor 24V/50VA, vypínač, pojistka 2A a průchodka pro síťový kabel se zajištěním proti vytržení.

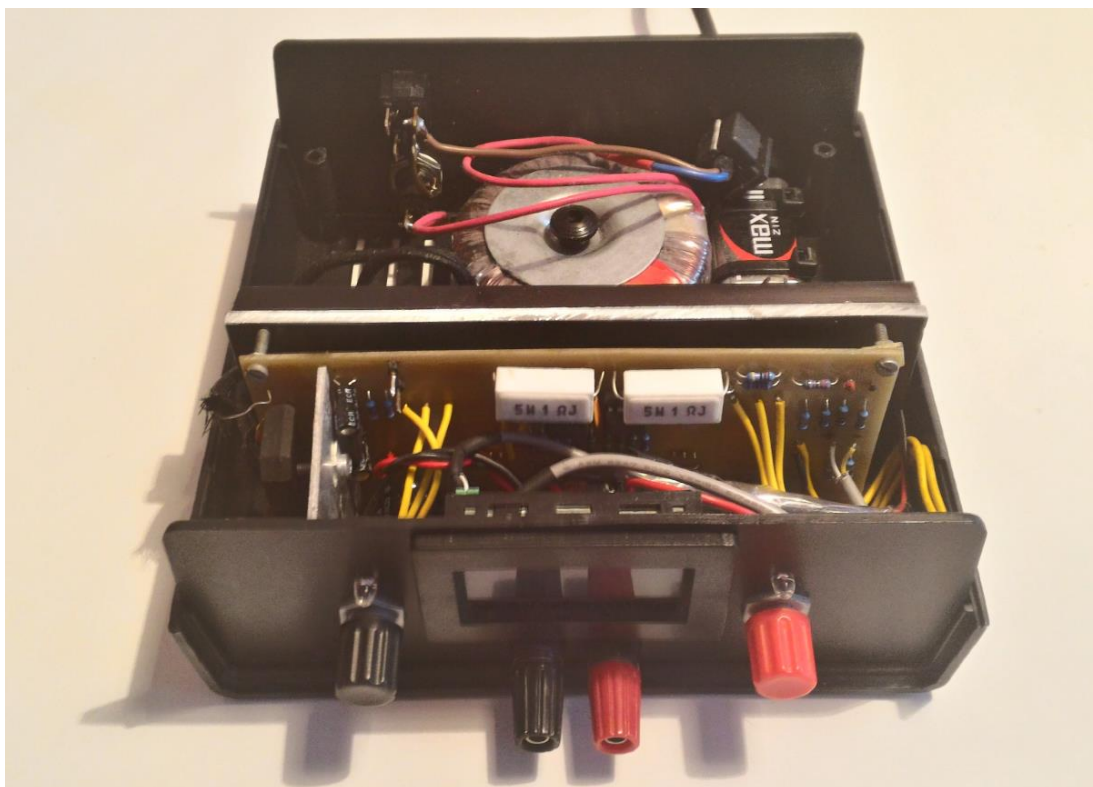
Cena:

Rezistory:	Cena	Kondenzátory:	Cena	Dále:	Cena
R1=1k	1 Kč	C1,C3...C6,C100=100n	12 Kč	Průchodka	10 Kč
R2,R4=46k4 1%	2,50 Kč	C2=100μ/40 V stojatý	5 Kč	Zajištění protivytržení	12 Kč
R3,R6=274k 1%	2,50 Kč	C7,C8=2200μ/63 V	46 Kč	Transformátor	345 Kč
R5=3k9	1 Kč	C9=100μ/16 V stojatý	6 Kč	Pojistka 2A	3 Kč
R7=8k2	1 Kč	C11= 10μ/63 V	5 Kč	Vypínač	21 Kč
R8,R9,R14=4k7	3 Kč			Pouzdro na pojistku	18 Kč
R10,R11=220R	2 Kč	Polovodiče:		Chladič	120 Kč
R12,R13=1R/5W	7 Kč	Diodový můstek 8A	10 Kč	Panelové svorky	64 Kč
R15=3k31/1W	7 Kč	D1,D3=BAT85	4 Kč	Skříň KP 11	70 Kč
R16,R17=3k3	2 Kč	D2,D4= LED červená	12 Kč	Panelové měřidlo	250 Kč
R18,R20=22k	2 Kč	D5,D6=1N400x	3 Kč	Součet	773 Kč
R19=2k7	1 Kč	D7=5v6/400mW	6 Kč		
R21,R23=1k02 1%	6 Kč	T1,T2=BUK 455-100A	82 Kč		
R22,R24=100k 1%	6 Kč	IC1,IC2=TLC271CP	26 Kč		
P1,P2=1k lin.	70 Kč	IC3=7809	12 Kč		
Součet	114 Kč	Součet	229 Kč	CELKEM	1 256 Kč

Obrázek 41: Tabulka s cenami jednotlivých komponent

7.9 Stavba a osazení zdroje

Osazená deska plošných spojů, která byla navržena v programu Eagle pro návrh DPS se následně vyleptala a osadila součástkami dle schématu. Toto osazení není ničím zvláštní. Potenciometry pro regulaci proudu a napětí P1 a P2 jsou kvůli chladiči na stabilizátoru IC3, připojeny na desku pomocí drátků. Díky zvolené plastové krabičce KP12, bylo možné ve spodní straně vyvrtat dva otvory pro upevnění celé desky plošných spojů i se všemi použitými chladiči. FET tranzistory jsou připájeny z druhé strany osazené desky. Díky tomu bylo možné přidělat relativně velký chladič zcela bez problému na zadní stranu krabičky a tím využít chladicí otvory. Tento chladič je od desky plošných spojů chráněn čtyřmi distančními šroubky umístěných v každém rohu. Díky tomu je zcela zabráněno možnému zkratu mezi jednotlivými cestami desky a chladičem. Proto je možné vynechat použití izolačních podložek. Ty by sice vyřešili problém před případným zkratem, ale špatně odvádějí vzniklé teplo na chladič. Použitím tepelně vodivé pasty, se podstatně zlepšuje odvod vzniklého tepla, na obou tranzistorech. To kvůli velkým teplotám, které zde vznikají v důsledku velkých zátěží na výstupu zdroje. Tepelná závislost chladiče je zobrazena na obrázku 47. Toroidní transformátor je skrz chladicí žebra upevněn šroubem a opatřen podložkami, kvůli velkým teplotám, které zde při dlouhých odběrech vznikají. Nicméně toto opatření je podle mě zcela nedostačující, a proto bych tento zdroj zatím nedoporučoval k napájení zátěže po delší dobu. Účinnost chlazení lze podstatně zlepšit malým ventilátorem pro CPU.



Obrázek 42: Foto osazení zdroje

7.10 Oživování a testování

Po úplném osazení desky plošných spojů a jejím důkladném zkontrolování dochází k jejímu testování. Nejprve se připojil transformátor a poté se zapnulo síťové napětí. Dále se pomocí voltmetru měřili příslušné hodnoty napětí v jednotlivých bodech zapojení. Za stabilizátorem IC3 hodnota 9 Voltů. Dále pak napětí kolem integrovaného obvodu IC1 a také na obou FET tranzistorech. Vyzkoušela se rovněž regulace napětí a proudu. Rozsah tohoto napětí se pohybuje od 1,4 až 27 Voltů. Poměrně velká hodnota na dolním konci rozsahu napětí, která se reguluje potenciometrem P1, je pravděpodobně způsobena dělicím poměrem děličů napětí. Ten je tvořen odpory R3/R4 a R6/R2 a zřejmě u něj není dosaženo dostatečně přesné hodnoty. Tento problém půjde určitě odstranit dostatečně velkým odporem (řádově stovky $K\Omega$), připojeným paralelně k odporu R2 nebo R4. Co nejpřesnější hodnota tohoto rezistoru se zjistí připojením odporového trimru, který po nastavení co nejnižší hodnoty na výstupu (ideálně 0 Voltů) odpojíme, změříme jeho nastavenou hodnotu odporu a dosadíme rezistor s nejbližší hodnotou z řady E. Pro napětí na výstupech, kde probíhá indikace napětí,

může také docházet k ovlivňování naměřeného napětí. Opět je zde mohou způsobovat děliče napětí tvořené odpory R22/27 a R24/R23. Řešení tohoto problému opět spočívá k připojení trimru paralelně k odporu R21 nebo R23 a nastavení jeho ideální hodnoty (desítky $K\Omega$). Dále se rovněž vyzkouší hodnota proudového omezení. Ta se dá regulovat od nuly až po 1,8 Ampér a funguje zcela spolehlivě.

7.11 Problémy při ožívování

Při ožívování, jsem se dopustil hned několika chyb, které vedly ke zničení několika jeho součástek. Při prvním zapojení do sítě, jsem omylem prohodil primární a sekundární vinutí na transformátoru. Po tomto zapojení se stal výrobek nefunkční. Po změření součástek bylo jasné, že byl zničen diodový usměrňovač a dioda D6, která chránila zdroj před příliš velkým napětím. Po výměně těchto chybných součástek, fungoval zdroj zcela bez problému. Ožívování jsem však prováděl na klasickém transformátoru, který jsem nakonec kvůli velkým rozměrům a hmotnosti nahradil transformátorem toroidním. U této výměny se mi opět podařilo prohodit primární vinutí se sekundárním. Zdroj se stal znovu nefunkční. Po opětovném měření však diodový můstek nejevil známky poškození. Proto jsem opět vyměnil diodu D5 a také D6. Po této změně už bylo jasné, že je vadný stabilizátor 7809. Po jeho výměně začal zdroj opět fungovat zcela bez problémů.

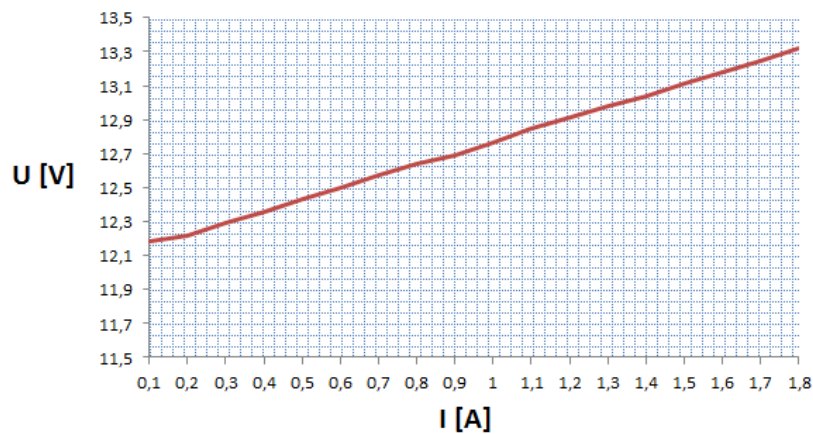
8 Měření parametrů zdroje

8.1 Měření V-A charakteristiky

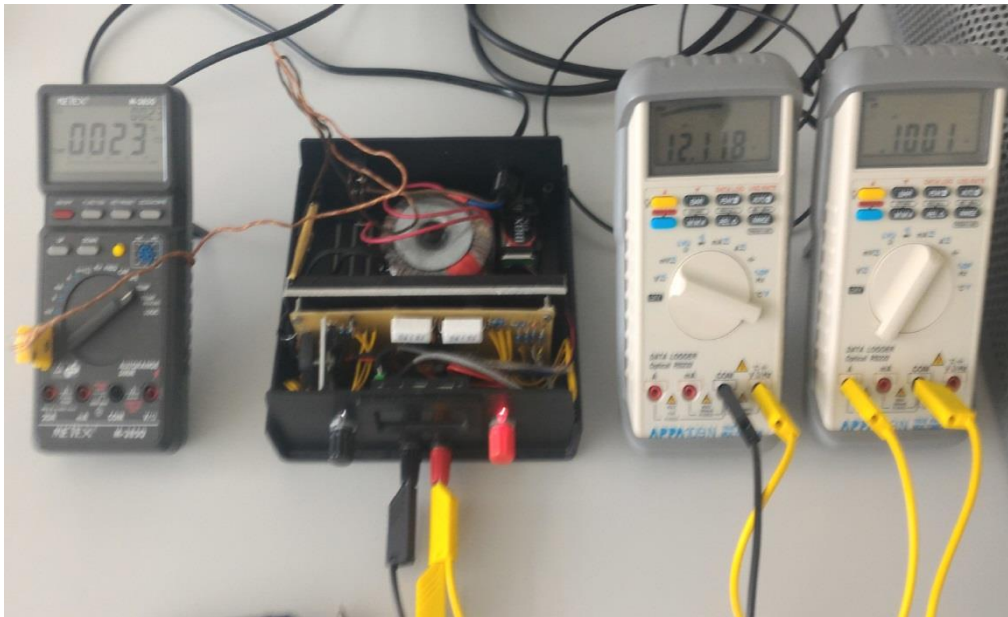
Měření výstupní charakteristiky se provádělo připojením dvou reostatů o velikosti 108Ω a 12Ω do série na výstup zdroje. Dva typy reostatu o rozdílné velikosti odporu jsou zvoleny kvůli lepšímu nastavení protékajícího proudu. Sériově k odporům byl připojen ampérmetr a paralelně mezi odpory a zdroj voltmetr.

I [A]	0,057	0,1	0,2	0,3	0,402	0,5013	0,6009	0,7006	0,8019	0,9087
U [V]	12,128	12,117	12,088	12,059	12,029	12	11,97	11,937	11,891	11,857
I [A]	1,0071	1,1078	1,2006	1,3002	1,4034	1,4989	1,6005	1,7049	1,8031	
U [V]	11,84	11,809	11,779	11,742	11,713	11,683	11,648	11,613	11,578	

Obrázek 43: Naměřené hodnoty V-A charakteristiky zdroje



Obrázek 44: V-A charakteristika zdroje



Obrázek 45: Foto měření V-A charakteristiky zdroje

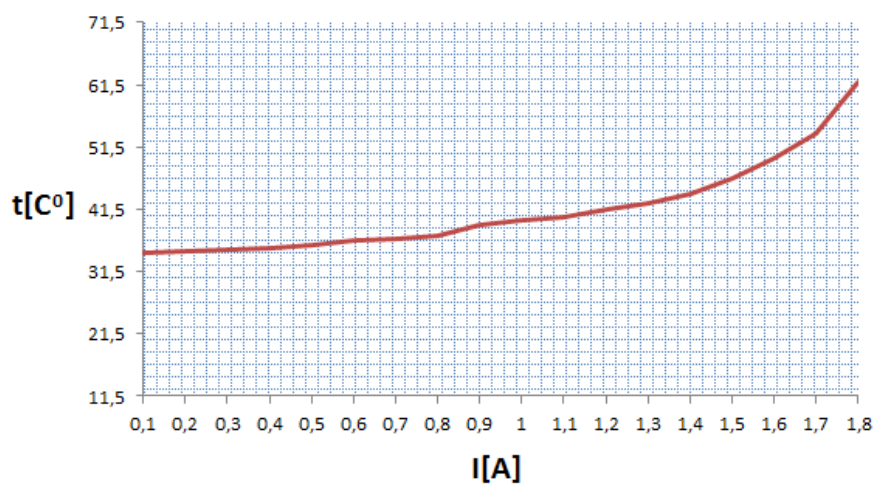
8.2 Měření teplotní závislosti chladiče

-Měření se provádělo při napětí 18 V a na hodnotu ustálení se čekalo 2 minuty.

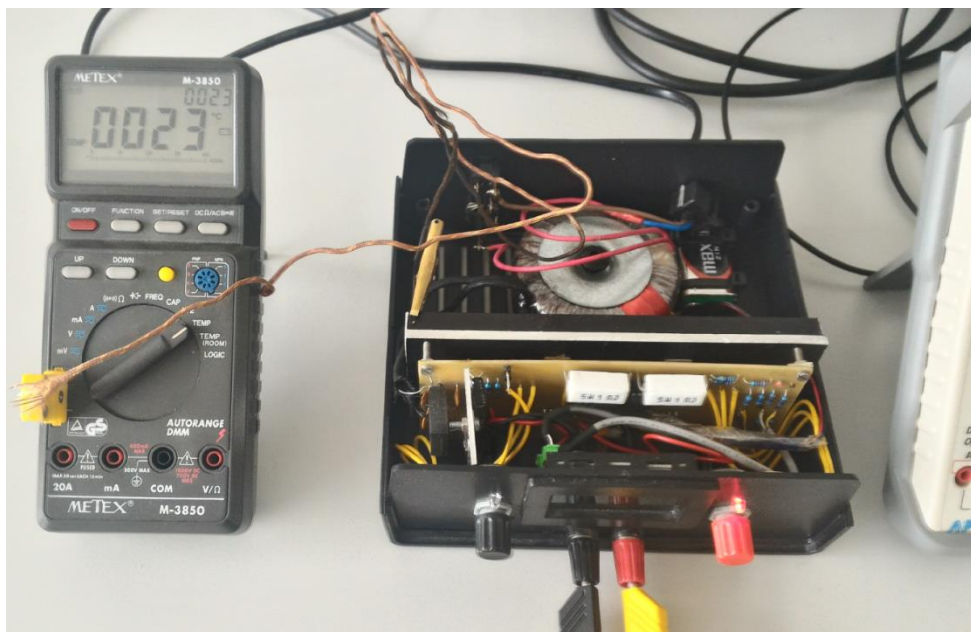
V tabulce jsou zobrazeny hodnoty protékajícího proudu a vzniklé teploty.

I [A]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
t [C°]	34,4	34,5	34,6	34,8	35,3	35,8	36	36,4	38
I [A]	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
t [C°]	38,7	39,1	40,3	41,2	42,5	45	48	52	60

Obrázek 46: Naměřené hodnoty teploty



Obrázek 47: Graf teplotní závislosti chladiče



Obrázek 48: Foto měření teplotní závislosti chladiče

Vzhledem k tomu, že na dobu ustálení jsem ponechal pouze 2minuty a napětí bylo 18V, po skončení měření jsem nechal téct maximální proud 1,8 Ampéry při napětí 12V. Zjistil jsem že po 15 minutách překročila teplota chladiče 80 stupňů. Proto bych zdroj nedoporučoval k takovému zatížení déle než 10 minut do doby, než bude namontován ventilátor.

8.3 Měřicí přístroje

Výrobce	Přístroj	Typ	V.č.	Veličina	Třída přesnosti	Rozsahy
Metex	Multimetr	M3270	160909	U	$\pm (0,8 \% \text{ rdg} + 2 \text{ dig})$	20V,200V
Metex	Multimetr	M3270	160923	I	$\pm (2,0 \% \text{ rdg} + 3 \text{ dig})$	10A
Greisenger	Teploměr	GTH1150	35447	C°	+/-1%	----

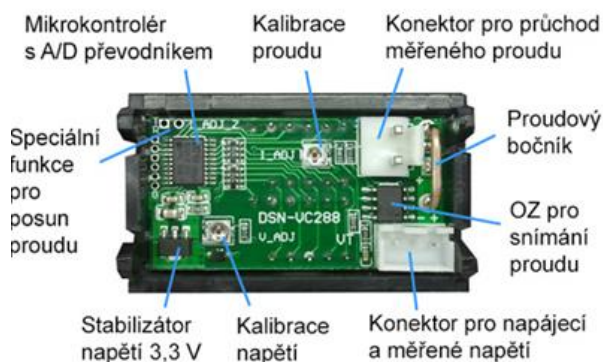
Obrázek 49: Tabulka použitých přístrojů

8.4 Technické údaje panelového měřidla

- Pracovní teplota: -10 - 65 °C
- Měřicí cyklus: 300ms
- Přesnost naměřené hodnoty napětí: 0,1%
- Přesnost naměřené hodnoty proudu: 1%
- Měřený rozsah napětí: 0 – 100V (00,0 - 99,9V)
- Měřený rozsah proudu: 0 – 10 A (0,00 – 9,99A)
- Napájecí napětí a proud: 4 – 30V / 15 – 20 mA
- Naměřený vstupní odpor voltmetru: 289 k Ω
- Velikost bočnicku ampérmetru: 75 m Ω

8.5 Konstrukce panelového měřidla

Měřicí modul je osazen pomocí SMD technologie. Na obrázku č. 47 je vidět z kterých jednotlivých částí se LCD modul skládá. Tvoří ho mikrokontrolér se zabudovaným AD převodníkem. Ke stabilizaci napájecího napětí slouží stabilizátor o hodnotě 3,3 voltů. Při napájení větším než 30 Voltů by mohlo dojít k trvalému poškození panelu. Pokud by došlo k poklesu napájecího napětí pod hodnotu 4 Volty, celý voltmetr přestane fungovat.



Obrázek 50: Popis zadního panelu LCD měřidla

9 Seznamy zdrojů

9.1 Seznam použité literatury

TKOTZ, Klaus. *Příručka pro elektrotechnika*. Přeložil Jiří HANDLÍŘ. Praha: Europa-Sobotáles, 2002. ISBN 8086706001.

KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje I*. Praha: BEN - technická literatura, 1996. ISBN 8086056023.

KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje II*. Praha: BEN - technická literatura, 1996. ISBN 8086056031.

STABROWSKI, Marek Maksymilian. *Stabilizátory stejnosměrného napětí a proudu*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1975. Řada elektrotechnické literatury.

WILHELMS, Harald. Einstellbares Netzteil. *Elektor*. 1998, (3), 20.

9.2 Seznam použitých internetových zdrojů

Elektronická učebnice: Napájecí zdroje [online]. 2013 [cit. 2017-08-07]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/653>

Žirafoviny.cz: Teorie usměrňovače [online]. 2009 [cit. 2017-010-07]. Dostupné z: <http://www.zirafoviny.cz/modules/news/article.php?storyid=17>

MFF UK: Skripta elektronika [online]. 2009 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/elektronika/kap2/2_3_1.html

Server reálných aplikací: Bipolární tranzistory [online]. 2008 [cit. 2017-08-07]. Dostupné z: <http://352lab.vsb.cz/ServerFinalVer/Tonhauser/tr.html>

Vyvoj.hw.cz: Spínané zdroje [online]. 2010 [cit. 2017-08-07]. Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/spinane-zdroje.html>

Encyklopedie fyziky: Diody [online]. 2012 [cit. 2017-08-07]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/274-zenerova-stabilizacni-dioda>

Slaboproud.sweb.cz: Integrované stabilizátory [online]. 2010 [cit. 2017-08-07]. Dostupné z: <http://slaboproud.sweb.cz/elt2/stranky1/elt038.htm>

TZB-info: Zdroje napětí [online]. 2010 [cit. 2017-08-07]. Dostupné z: <http://elektro.tzb-info.cz/teorie-elektrotechnika/4239-zdroje-napeti-ii-teoreticka-zakladna>

Web začínajících radioamatérů: Integrované stabilizátory [online]. 2010 [cit. 2017-08-07]. Dostupné z: <http://ok1ike.c-a-v.com/soubory/stabil2.htm>

Střední škola elektrotechnická Ostrava: Transformátory [online]. 2010 [cit. 2017-08-07]. Dostupné z: http://www.sse-najizdarne.cz/dokumenty/BEDNAR/Elektro/Vypocet_TR.pdf

9.3 Seznam obrázků a jejich zdrojů

Obrázek 1: Blokové schéma síťového lineárního zdroje s regulovatelným napětím.2

HOLEC, Dominik. *Blokové schéma síťového lineárního zdroje s regulovatelným napětím*. 2017.

Obrázek 2: Blokové schéma spínacího zdroje.3

Základy elektrotechniky. *Elektronická podpora přednášek* [online]. 2009 [cit. 2017-05-04]. Dostupné z:

https://user.unob.cz/zaplatilek/Obecne/Skripta_napajeci%20zdroje/Část4.doc

Tme.eu [online]. 2015 [cit. 2017-05-06]. Dostupné z:

http://www.tme.eu/cz/katalog/toroidni-transformatory_100028/?id_producer=22

Obrázek 3: Na levé straně Toroidní transformátor, na pravé klasický EI transformátor.5

Electro24.cz [online]. 2016 [cit. 2017-08-09]. Dostupné z:

<http://www.electro24.cz/detail-466318-univerzalni-delici-transformator-230v-115v-/>

Obrázek 4: Základní princip transformátoru.	6
<i>Wikipedia.org: Transformátor</i> [online]. 2012 [cit. 2017-04-06]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Transform%C3%A1tor#/media/File:Transformer3d_col3_cs.svg	
Obrázek 5: Jednocestný usměrňovač	11
<i>Elektronická učebnice: Napájecí zdroje</i> [online]. 2013 [cit. 2017-08-07]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/653	
Obrázek 6: Časové průběhy	13
<i>Elektronická učebnice: Napájecí zdroje</i> [online]. 2013 [cit. 2017-08-07]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/653	
Obrázek 7: Jednocestný usměrňovač s kondenzátorem na výstupu.	13
<i>Elektronická učebnice: Napájecí zdroje</i> [online]. 2013 [cit. 2017-08-07]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/653	
Obrázek 8: Časové průběhy.	15
<i>Elektronická učebnice: Napájecí zdroje</i> [online]. 2013 [cit. 2017-08-07]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/653	
Obrázek 9: Dvoucestný usměrňovač se dvěma diodami.	16
<i>Žirafoviny.cz: Teorie usměrňovače</i> [online]. 2009 [cit. 2017-010-07]. Dostupné z: http://www.zirafoviny.cz/modules/news/article.php?storyid=17	
Obrázek 10: Časové průběhy obvodových veličin.	16
<i>Elektronická učebnice: Napájecí zdroje</i> [online]. 2012 [cit. 2017-010-07]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/654	
Obrázek 11: Zapojení dvoucestného usměrňovače s půleným vinutím a kondenzátorem.	17
<i>Elektronická učebnice: Napájecí zdroje</i> [online]. 2012 [cit. 2017-010-07]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/654	
Obrázek 12: Zapojení dvoucestného můstkového usměrňovače.	18
<i>Elektronická učebnice: Napájecí zdroje</i> [online]. 2012 [cit. 2017-010-07]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/654	

Obrázek 13: Časový průběh napětí můstkového usměrňovače na výstupu (bez připojeného kondenzátoru.)	18
<i>Elektronická učebnice: Napájecí zdroje</i> [online]. 2012 [cit. 2017-010-07]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/654	
Obrázek 14: Časový průběh napětí můstkového usměrňovače na výstupu s připojeným kondenzátorem. 19	
<i>Dlabos.wz.cz: Dvoucestné usměrňovače</i> [online]. 2008 [cit. 2017-012-07]. Dostupné z: http://dlabos.wz.cz/en/34-Dvoucestne__usmernovace.html	
Obrázek 15: Ideální stabilizátor	21
<i>Karel Zaplatílek: Napájecí zdroje</i> [online]. 2011 [cit. 2017-018-07]. Dostupné z: https://user.unob.cz/zaplatilek/Obecne/Skripta_napajeci%20zdroje/Část2.doc	
Obrázek 16: Stabilizátor s diodou.....	22
HOLEC, Dominik. <i>Stabilizátor s diodou</i> . 2017.	
Obrázek 17: Voltampérová charakteristika diody.	23
HOLEC, Dominik. <i>Voltampérová charakteristika diody</i> . 2017.	
Obrázek 18: Stabilizátor s dvěma diodami	26
HOLEC, Dominik. <i>Stabilizátor s dvěma diodami</i> . 2017.	
Obrázek 19: Zapojení stabilizátoru se Zenerovou diodou.	27
<i>Elektronická učebnice: Stabilizátory napětí</i> [online]. 2012 [cit. 2017-05]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/658	
Obrázek 20: Voltampérová charakteristika Zenerovi diody.....	27
<i>lektřina a magnetismus: Usměrňování</i> [online]. 2008 [cit. 2017-06]. Dostupné z: http://elektross.gjn.cz/soucastky/jeden_prechod/zener_dioda.html	
Obrázek 21: Závěrná část voltampérové charakteristiky Zenerovy diody.	29
<i>Brindl Pavel: Usměrňovače</i> [online]. 2012 [cit. 2017-06]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/658	
Obrázek 22: Zapojení stabilizátoru s tranzistorem.	29
<i>Brindl Pavel: Usměrňovače</i> [online]. 2012 [cit. 2017-06]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/658	

Obrázek 23: Pouzdra pro integrované stabilizátory řady 78xx,79xx.....	31
<i>GES electronics: Stabilizátory</i> [online]. 2015 [cit. 2017-06]. Dostupné z: https://www.ges.cz/cz/stabilizator-napeti-7812-to220-GES05002919.html	
Obrázek 24: Zapojení stabilizátoru 7815 kladného napětí a stabilizátoru záporného napětí 7915.	31
<i>Brindl Pavel: Zapojení integrovaných stabilizátorů</i> [online]. 2012 [cit. 2017-06]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/660	
Obrázek 25: Pouzdra tranzistorů typu NPN.	32
<i>Jerryho web: Katalog elektronických součástek</i> [online]. 2012 [cit. 2017-06]. Dostupné z: http://mujweb.cz/cb16/katalog.htm	
Obrázek 26: Základní rozdělení Tranzistorů.	33
<i>Myllms: Elektronika</i> [online]. 2006 [cit. 2017-05]. Dostupné z: https://www.myllms.cz/text-50-rozdil-mezi-bipolarnim-a-unipolarnim-tranzistorem/	
Obrázek 27: Konstrukce bipolárního tranzistoru.....	33
<i>Myllms: Elektronika</i> [online]. 2006 [cit. 2017-05]. Dostupné z: : https://www.myllms.cz/text-50-rozdil-mezi-bipolarnim-a-unipolarnim-tranzistorem/	
Obrázek 28: Konstrukce unipolárního tranzistoru.....	34
<i>Wikipedia: Tranzistory FET</i> [online]. 2010 [cit. 2017-05]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7c/Scheme_of_n-junction_field-effect_transistor_de.svg	
Obrázek 29: Základní zapojení bipolárních tranzistorů.....	34
<i>Elektronická učebnice: Bipolární tranzistory</i> [online]. 2012 [cit. 2017-05]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/594	
Obrázek 30: Voltampérová charakteristika bipolárního tranzistoru v zapojení se společným emitorem.....	35
<i>Jaromír Škuta: Reálné aplikace</i> [online]. 2008 [cit. 2017-05]. Dostupné z: http://352lab.vsb.cz/ServerFinalVer/Tonhauser/tr.html	
Obrázek 31: Rozdělení typů FET tranzistorů s jejich schématickými značkami.	36

<i>Elektronická učebnice: Unipolární tranzistory</i> [online]. 2008 [cit. 2017-05]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/596	
Obrázek 32: Zapojení zesilovače s tranzistorem typu MOSFET s indukovaným kanálem.....	38
<i>Elektronická učebnice: Unipolární tranzistory</i> [online]. 2008 [cit. 2017-05]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/596	
Obrázek 33: Princip zesílení tranzistoru JFET.....	38
<i>Elektronická učebnice: Unipolární tranzistory</i> [online]. 2008 [cit. 2017-05]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/596	
Obrázek 34: Zapojení zesilovače s tranzistorem typu MOSFET s indukovaným kanálem.....	39
<i>Elektronická učebnice: Unipolární tranzistory</i> [online]. 2008 [cit. 2017-05]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/596	
Obrázek 35: Princip zesílení tranzistoru MOSFET s indukovaným kanálem.....	39
<i>Elektronická učebnice: Unipolární tranzistory</i> [online]. 2008 [cit. 2017-05]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/596	
Obrázek 36: Princip zesílení tranzistoru MOSFET s vodivým kanálem.....	40
<i>Elektronická učebnice: Unipolární tranzistory</i> [online]. 2008 [cit. 2017-05]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/596	
Obrázek 37: Schéma stabilizovaného síťového zdroje.....	42
WILHELMS, Harald. Einstellbares Netzteil. <i>Elektor</i> . 1998, (3), 1.	
Obrázek 38: Zapojení při napájení z měřeného zdroje.....	45
<i>Postav robota: Zdroje a měřící přístroje</i> [online]. 2016 [cit. 2017-07]. Dostupné z: https://www.postavrobota.cz/Digitalni-voltmetr-a-ampermetr-do-panelu-cerveny-modry-10A-100V-d278.htm	
Obrázek 39: Zapojení pro měření ze samostatného zdroje (0-100V DC).....	45
<i>Postav robota: Zdroje a měřící přístroje</i> [online]. 2016 [cit. 2017-07]. Dostupné z: https://www.postavrobota.cz/Digitalni-voltmetr-a-ampermetr-do-panelu-cerveny-modry-10A-100V-d278.htm	

Obrázek 40: Rozpiska součástí	46
HOLEC, Dominik. <i>Rozpiska součástí</i> . 2017.	
Obrázek 41: Tabulka s cenami jednotlivých komponent.....	46
HOLEC, Dominik. <i>Tabulka s cenami jednotlivých komponent</i> . 2017.	
Obrázek 42: Foto osazení zdroje	48
HOLEC, Dominik. <i>osazení zdroje</i> . 2017.	
Obrázek 43: Naměřené hodnoty V-A charakteristiky zdroje	50
HOLEC, Dominik. <i>Naměřené hodnoty V-A charakteristiky zdroje</i> . 2017.	
Obrázek 44: V-A charakteristika zdroje	50
HOLEC, Dominik. <i>V-A charakteristika zdroje</i> . 2017.	
Obrázek 45: Foto měření V-A charakteristiky zdroje	51
HOLEC, Dominik. <i>měření V-A charakteristiky zdroje</i> . 2017.	
Obrázek 46: Naměřené hodnoty teploty	51
HOLEC, Dominik. <i>Naměřené hodnoty teploty</i> . 2017.	
Obrázek 47: Graf teplotní závislosti chladiče.....	51
HOLEC, Dominik. <i>Graf teplotní závislosti chladiče</i> . 2017.	
Obrázek 48: Foto měření teplotní závislosti chladiče.....	52
HOLEC, Dominik. <i>měření teplotní závislosti chladiče</i> . 2017.	
Obrázek 49: Tabulka použitých přístrojů	52
HOLEC, Dominik. <i>Tabulka použitých přístrojů</i> . 2017.	
Obrázek 50: Popis zadního panelu LCD měřidla	53
<i>Hezký den: LCD moduly</i> [online]. 2016 [cit. 2017-07]. Dostupné z: http://www.hezkyden.cz/shop/panelovy-digitalni-voltmetr-ampermetr-100v-10a-dc/	

