

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Zdroj kompenzačního napětí

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena nejen na návrh zdroje kompenzačního napětí, ale zadáním byl návrh a konstrukce celého kompenzátoru. Navržené zařízení má sloužit jako demonstrační pomůcka studentům při výuce. Obsahem práce je objasnění principu měření kompenzační metodou a dle zjištěných vlastností je navrženo elektronické zařízení. Popisuje návrh zdrojů napětí, měření odchylky a zobrazování zjištěné odchylky měřeného napětí oproti kompenzačnímu. Obvod je prakticky realizován a v závěru práce je navržené zařízení ověřeno měřením.

Klíčová slova

Kompenzační metoda, kompenzátor, operační zesilovač, sledovač, přístrojový operační zesilovač, rozdílový zesilovač, odporová dekáda, dělič napětí, Westonův článek, zdroj referenčního napětí, etalon, potenciometr, kalibrovaný potenciometr, pomocný zdroj napětí, A/D převodník, digitální voltmetr, komparátor, zobrazovač, multiplexer, teplotně kompenzovaná Zenerova dioda, LED BAR graf, DC/DC měnič, přepínač, návrh DPS, EAGLE, ProfiCAD

Abstract

Presented master thesis is not only focused to design the power supply, but the task was to design and build the whole compensator. Designed device is meant to be used for demonstrating of compensation method to students during lectures. Content of this work is to clarify the principle of measurement via compensation method and according to those characteristics, design the electronic device. Describes design of voltage sources, measurement of voltage deviation and displaying this measured deviation versus compensation voltage. The circuit is practically implemented and verified by measurement.

Key words

Compensation method, compensator, operational amplifier, Op-Amp buffer, instrumentation amplifier, differential amplifier, resistor decade, voltage divider, Weston's cell, reference voltage source, etalon, potentiometer, calibrated potentiometer, auxiliary power source, A/D converter, digital voltmeter, comparator, visual display unit, multiplexer, temperature compensated Zener diode, LED BAR graph, DC/DC converter, switch, PCB design, EAGLE, ProfiCAD

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 23.5.2016

Bc. Jiří Smolík

Poděkování

Touto cestou bych velmi rád poděkoval svému vedoucímu práce, p. Ing. Alešovi Voborníkovi Ph.D., za neocenitelnou a nezanedbatelnou pomoc při zpracování práce a návrhu zařízení, za věcnou a velmi přínosnou kritiku a také za vstřícnost. Rovněž bych rád poděkoval své manželce za trpělivost a psychickou podporu během studia.

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1 STEJNOSMĚRNÉ KOMPENZAČNÍ METODY MĚŘENÍ	10
1.1 RUČNÍ KOMPENZAČNÍ METODY MĚŘENÍ NAPĚTÍ	10
1.1.1 Princip kompenzační metody.....	10
1.1.2 Zapojení s etalonovým článkem jako zdrojem	11
1.1.3 Zapojení s pomocným zdrojem napětí	12
1.1.4 Základní analogový kompenzátor.....	14
1.1.5 Citlivost kompenzátoru.....	15
1.1.6 Přesnost měření	19
1.1.7 Výběr indikátoru vyvážení	21
1.2 AUTOMATIZOVANÉ KOMPENZAČNÍ METODY MĚŘENÍ	21
1.2.1 Kompenzační digitální voltmetry.....	21
1.2.2 A/D převodník s postupnou aproximací.....	23
1.3 NORMÁLY A REFERENČNÍ ZDROJE NAPĚTÍ	24
1.3.1 Westonův článek	25
1.3.2 Teplotně kompenzované Zenerovy diody	26
2 NÁVRH ZAPOJENÍ KOMPENZAČNÍHO ZDROJE	27
2.1 POŽADOVANÉ VLASTNOSTI NAVRHOVANÉHO ZAPOJENÍ	27
2.2 POUŽITÉ OBVODY	28
2.2.1 Zobrazování odchylky – indikátor vyváženého stavu.....	28
2.2.2 Porovnávání vstupního a kompenzačního napětí, zesílení odchylky	34
2.2.3 Spínač vstupu měřeného napětí	38
2.2.4 Zdroj kompenzačního napětí.....	39
2.2.5 Zdroj výstupního referenčního napětí.....	43
2.2.6 Galvanické oddělení	44
2.3 TEORIE FUNKOVÁNÍ NAVRŽENÉHO OBVODU.....	45
2.4 SESTAVENÍ SCHÉMA ZAPOJENÍ.....	46
2.5 NÁVRH DPS	50
2.6 OSAZENÍ DPS.....	55
2.7 MONTÁŽ KOMPENZAČNÍHO ZDROJE.....	56
3 OŽIVENÍ A OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI	58
3.1 OBJEVENÉ KOMPLIKACE A ZÁVADY	58
3.1.1 Nevhodný DC/DC měnič	58
3.1.2 Zapojení MAC01.....	59
3.1.3 Zapojení potenciometrů.....	60
3.2 ÚPRAVA PARAMETRŮ	60
3.2.1 Úprava nastavení zesílení.....	60
3.2.2 Úprava hodnot odporové dekadý.....	60
3.3 MĚŘENÍ KOMPENZAČNÍHO ZDROJE	61
3.3.1 Zdroj referenčního napětí.....	61
3.3.2 Ověření měření kompenzátozem.....	61
3.3.3 Postup měření kompenzátozem.....	61
4 ZÁVĚR	63
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	64

Úvod

Předkládaná práce se zaměřuje na popsání vlastností měření stejnosměrného napětí kompenzační metodou. Práce je zaměřena pouze na měření stejnosměrného napětí, ačkoli se této metody užívá i k měření napětí střídavého a také k měření stejnosměrného a střídavého proudu. Shrnuje vlastnosti této metody měření a uvažuje chyby, které během měření touto metodou vznikají. Zabývá se návrhem kompenzátoru, který bude použit v laboratoři pro demonstraci této metody měření studentům.

Celá práce je rozčleněna do třech hlavních částí. První část se zabývá vlastnostmi a popisem stejnosměrné kompenzační metody měření napětí. Představuje různá zapojení kompenzátorů a způsobů měření, uvádí postup měření a posuzuje chyby měření.

Druhá část popisuje návrh kompenzátoru. Popisuje jednotlivé použité bloky obvodů v návrhu zapojení a zabývá se praktickým návrhem a kompletací zapojení. Rovněž je zde krátký popis použitého software.

Třetí, poslední část, se zabývá ověřením funkčnosti navrženého zapojení a shrnuje zjištěné vlastnosti.

Seznam symbolů a zkratek

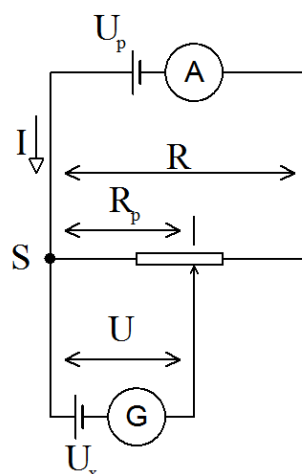
<i>R</i>	Elektrický odpor [Ω]
<i>U</i>	Elektrické napětí [<i>V</i>]
<i>I</i>	Elektrický proud [<i>A</i>]
<i>A</i>	Zesílení
<i>C</i>	Kapacita [<i>F</i>]
<i>OZ</i>	Operační zesilovač
<i>DPS</i>	Deska plošných spojů
<i>CAD</i>	Computer Aided Design
<i>EAGLE</i>	Easy Applicable Graphical Layout Editor
<i>GND</i>	Zemní Svorka
<i>G</i>	Galvanometr
α	Výchylka stupnice [<i>d</i>]
<i>P</i>	Potenciometr
<i>S</i>	Spínač
<i>Př</i>	Přepínač
C_{kU}	Napěťová citlivost
C_{kI}	Proudová citlivost
δ	Poměrná chyba měření
<i>A/D</i>	Analogově-digitální (převodník)
<i>IV</i>	Indikátor výchylky
<i>MSB</i>	Most significant bit – bit s největší důležitostí
<i>LSB</i>	Least significant bit – bit s nejmenší důležitostí
<i>LCD</i>	Liquid crystal display – zobrazovač z tekutých krystalů
<i>LED</i>	Light emitting diode – luminiscenční dioda
<i>BAR</i>	Sloupec
<i>SMD</i>	Surface mount device – technologie osazování ze strany spojů

1 Stejnoseměrné kompenzační metody měření

Kompenzační metoda měření patří, společně s můstkovou metodou, k nepřesnějším metodám měření. Chyba měření je při vhodném zapojení řádově nižší, než u ostatních metod měření. V laboratorních podmínkách je možné dosáhnout přesnosti setin, až tisícín procenta. Důvodem nepřesností ostatních přímých výchylkových metod (s důrazem na používání elektromechanických přístrojů) je, že je proudově zatěžován měřený zdroj. U něj potom vlivem proudového zatížení a velikosti vnitřního odporu klesá napětí (vzniká úbytek napětí uvnitř zdroje). Měřený zdroj napětí tedy během měření není zapojen zcela naprázdno. Toto u kompenzační metody ve vykompenzovaném stavu, pokud použijeme metody dvojí kompenzace, odpadá. Měřený zdroj není proudově zatěžován a neuplatňuje se tedy úbytek napětí, který by vlivem vnitřního odporu vznikal. Zdroj je tedy měřen naprázdno. V běžné praxi se již tato metoda měření jako taková příliš nepoužívá, protože dnes jsou již dostupné velmi přesné elektronické digitální měřicí přístroje, které netrpí nedostatky ručkových měřicích přístrojů (velká vlastní spotřeba – zatěžují měřený zdroj). Ačkoli se oproti tomu dá říci, že dnešní přesné měřicí přístroje vybavené A/D převodníky kompenzační metodu v principu mohou stále používat.

1.1 Ruční kompenzační metody měření napětí

1.1.1 Princip kompenzační metody



Obr. 1.1 - Princip kompenzační metody [1]

Smysl fungování metody spočívá ve vyrovnávání měřeného neznámého napětí napětím, které je známé a proměnné. Na *Obr. 1.1 - Princip kompenzační metody [1]* je principiální zapojení. Známé proměnné napětí je získáváno pomocí potenciometru R , který je připojen na zdroj napětí U_p . Měřené napětí U_x je sériově propojeno s galvanometrem G . U představuje velikost kompenzačního napětí mezi jezdcem potenciometru R a společným uzlem S . Pokud nastavíme potenciometr tak, aby galvanometr vykazoval nulovou výchylku, potom se $U_x = U$. Hodnota U_x se určuje pomocí velikosti proudu I protékajícího ampérmetrem a hodnoty výchylky R_p potenciometru R . Platí tedy:

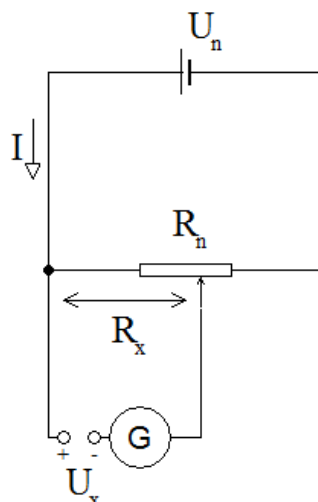
$$U = R_p \cdot I \quad (1.1)$$

Uvedený princip stanovování velikosti napětí U využívají technické kompenzátory, jejichž přesnost je z největší části dána přesností použitého ampérmetru. Většinou je tedy značně nízká. Přibližně pouze 0,2 %. U laboratorních kompenzátorů se využívá stejného principu, avšak k nastavení zdroje napětí U_p se používá kompenzační metoda ve spojení s přesným článkem, etalonem (např. Westonův článek). Přesnost takových měření bývá 0,05 %.

[1], [7]

1.1.2 Zapojení s etalonovým článkem jako zdrojem

V minulosti se používalo zapojení, kde se jako zdroje napětí připojeného k potenciometru používal přímo etalonový článek. Viz. *Obr. 1.2 - Zapojení s etalonovým zdrojem napětí [1]*.



Obr. 1.2 - Zapojení s etalonovým zdrojem napětí [1]

Jelikož je u etalonu známé napětí, je i přesně stanoven proud, který potenciometrem protéká. Toto zapojení se v praxi nepoužívá, jelikož je zatěžován etalonový článek a vzniklý pokles napětí vlivem vnitřního odporu se zanedbává. Při napěťově vykompenzovaném obvodu platí:

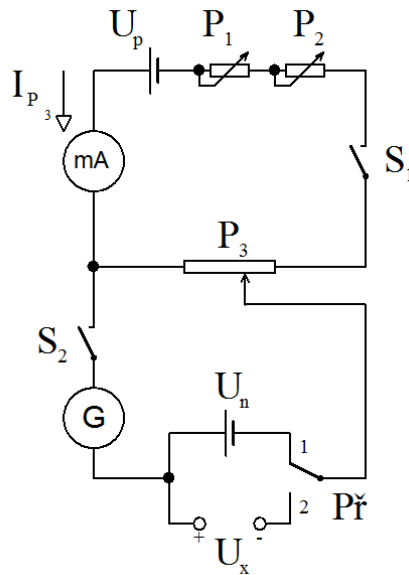
$$U_x = U_n \cdot \frac{R_x}{R_n} \quad (1.2)$$

Kde: U_x je neznámé měřené napětí, U_n je normálové napětí (pro Westonův článek jde o $U_n = 1,01865 \text{ V}$), R_x je velikost odporu potenciometru mezi bodem S a jezdcem a R_n je celková velikost odporu potenciometru. Je nutné však poznamenat, že toto zapojení není možné používat pro měření velkých napětí. Pro měření velkých napětí je třeba mezi sebou zaměnit zdroj U_n a měřené napětí U_x . Proudově se potom zatěžuje měřený zdroj U_x . Tím nám ovšem vzniká chyba měření.

[1]

1.1.3 Zapojení s pomocným zdrojem napětí

Aby došlo k eliminování nedostatků předchozích zapojení, používá se metody na Obr. 1.3 - Zapojení s pomocným zdrojem napětí [3]. U tohoto zapojení se používá pomocný zdroj, který slouží k nastavení procházejícího proudu I_{P_3} přes kalibrovaný potenciometr P_3 .



Obr. 1.3 - Zapojení s pomocným zdrojem napětí [3]

Při měření se postupuje následujícím způsobem:

- 1) Spínač S_1 sepneme a potenciometry P_1 a P_2 nastavíme hodnotu protékajícího proudu I_{P_3} na 1mA , popř. $0,1\text{mA}$ (je výhodné používat dekadické násobky, protože se zjednodušuje výpočet U_x – přímo se odečítá z velikosti kalibrovaného potenciometru, jehož velikosti je potom daným násobkem). Hodnotu kontrolujeme miliampérmetrem. Nejde ovšem o zcela přesné nastavení vzhledem k třídě přesnosti přístroje.
- 2) Sepneme spínač S_2 a nastavíme přepínač $P\check{r}$ do polohy 1. Jezdcem kalibrovaného potenciometru nastavíme hodnotu, jež odpovídá hodnotě napětí normálového zdroje (etalonu). Potenciometry P_1 a P_2 nastavíme tak, aby na galvanometru byla nulová výchylka. V tuto chvíli je proud I_{P_3} nastavený přesně.
- 3) Přepneme přepínač $P\check{r}$ do polohy 2 a jezdcem kalibrovaného potenciometru P_3 pojezdíme tak, aby na galvanometru byla nulová výchylka. Odečteme hodnotu na potenciometru - R_x .

Nyní platí:

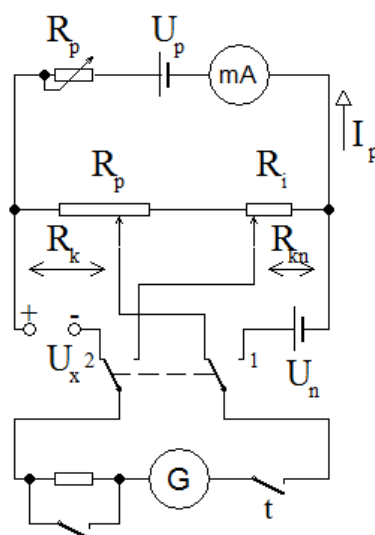
$$U_x = I_{P_3} \cdot R_x \quad (1.3)$$

Z uvedeného je patrná výhoda volby I_{p_3} jako dekadického násobku. Předností zapojení je, že normálový zdroj napětí není proudově zatěžován.

[3]

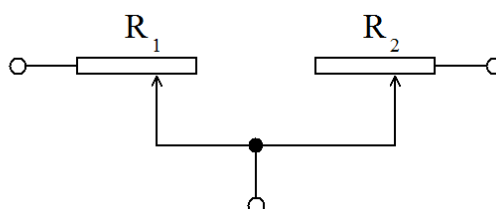
1.1.4 Základní analogový kompenzátor

Vnitřní schéma používaného základního analogového kompenzátoru je na *Obr. 1.4 - Základní analogový kompenzátor [1]*. Postup měření se v zásadě příliš neliší od již uvedených. Do zapojení je pouze přidán potenciometr R_i , kterým se před vlastním měřením nastavuje hodnota dekadického násobku etalonového článku.



Obr. 1.4 - Základní analogový kompenzátor [1]

V zapojení se jako kalibrovaný potenciometr používají přesné laboratorní odporové dekády zapojené dle *Obr. 1.5 - Zapojení odporových dekád [1]*. Změna hodnoty odporu se provádí způsobem, že součet $R_1 + R_2 = konst.$ U laboratorních přístrojů tovární výroby se obvykle používaly dvě odporové dekády, které byly vzájemně mechanicky propojené.

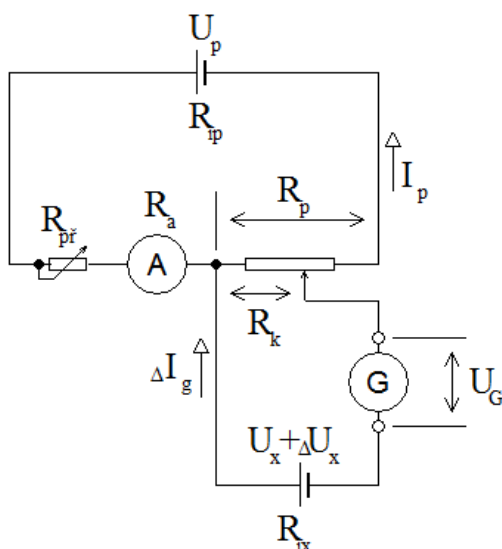


Obr. 1.5 - Zapojení odporových dekád [1]

[1]

1.1.5 Citlivost kompenzátoru

Citlivost kompenzátoru se určuje z poměru hodnot výstupní veličiny na svorkách měřicího přístroje (galvanometru) při vyváženém kompenzátoru a hodnoty měřené veličiny, při které již dojde k vykázání výchylky na měřicím přístroji (galvanometru). Citlivost se dá určovat napěťová a proudová. Napěťová citlivost závisí výlučně na zapojení kompenzátoru. Proudová citlivost závisí na použitém galvanometru. Schéma zapojení pro demonstraci určení citlivosti je na: *Obr. 1.6 - Kompenzátor - určení citlivosti – princip [1]*.



Obr. 1.6 - Kompenzátor - určení citlivosti – princip [1]

Napěťová citlivost zapojení obvodu kompenzátoru se určuje vztahem:

$$C_{kU} = \frac{\Delta U_g}{\Delta U_x} \quad (1.4)$$

Popřípadě:

$$C'_{kU} = \frac{\Delta U_g}{\delta' U_x} \quad (1.5)$$

Kde:

$$\delta' U_x = \frac{\Delta U_x}{U_x} \quad (1.6)$$

Proudová citlivost se určuje:

$$C_{kl} = \frac{\Delta I_g}{\Delta U_x} \quad (1.7)$$

Popřípadě:

$$C'_{kl} = \frac{\Delta I_g}{\delta U_x} \quad (1.8)$$

A proudová citlivost pro zapojení s galvanometrem:

$$C_{kgl} = \frac{\Delta \alpha_g}{\Delta U_x} \quad (1.9)$$

Případně:

$$C'_{kgl} = \frac{\Delta \alpha_g}{\delta U_x} \quad (1.10)$$

Odvození výpočtu citlivosti provedeme dle schématu na: *Obr. 1.6 - Kompenzátor - určení citlivosti – princip [1]*. Předpokládáme vykompenzovaný stav. Nejprve je třeba vyjádřit celkový odpor obvodu strany s protékajícím proudem I_P :

$$R_C = R_P + R_A + R_{P\check{r}} + R_{Ip} \quad (1.11)$$

Kde: R_C je celkový odpor obvodu, R_P je odpor potenciometru, R_A je vnitřní odpor ampérmetru, $R_{P\check{r}}$ je odpor předřadného potenciometru a R_{Ip} je vnitřní odpor zdroje pomocného proudu. Při vykompenzovaném stavu by se dal pomocný proud I_P vyjádřit vztahem:

$$I_P = \frac{U_P}{R_C} \quad (1.12)$$

Při porušení vykompenzovaného stavu změnou velikosti napětí U_x o hodnotu ΔU_x bude velikost napětí na svorkách galvanometru:

$$\Delta U_g = U_x + \Delta U_x - R_k \cdot I_P \quad (1.13)$$

Při vykompenzovaném stavu platí:

$$U_x = R_k \cdot I_P \quad (1.14)$$

Po dosazení do rovnice:

$$U_g = \Delta U_x \quad (1.15)$$

Při vyjádření napětěové citlivosti, jež je vztažena k absolutní změně ΔU_x , citlivost C_{kU} bude:

$$C_{kU} = \frac{U_g}{\Delta U_x} = \frac{\Delta U_x}{\Delta U_x} = 1 \quad (1.16)$$

Ze vztahu je patrné, že napětěová citlivost kompenzátoru vychází konstantní při libovolné změně U_x , libovolném I_P a libovolném R_C . Odvozený vztah se tedy uplatní pouze při stanovování absolutní chyby výsledku měření a pokud bychom použili indikátor vyvážený s velkým vnitřním odporem. Vnitřní odpor musí být mnohem větší, než je celkový odpor kompenzátoru.

Určení napětěové citlivosti C'_{kU} vztažené k poměrné změně $\delta' U_x$ má význam v případě určování poměrné chyby výsledku měření a opět musí být použit indikátor s velkým vnitřním odporem, než je celkový odpor kompenzátoru. To splňují elektronické indikátory nebo některé galvanometry se zabudovaným zesilovačem.

$$C'_{kU} = \frac{U_g}{\delta' U_x} = U_x \quad (1.17)$$

Při odvozování proudové citlivosti budeme postupovat rovněž dle schématu na: *Obr. 1.6 - Kompenzátor - určení citlivosti – princip [1]*. V nevykompenzovaném stavu prochází galvanometrem o vnitřním odporu R_g v obvodu proud ΔI_g , jehož hodnotu určíme pomocí pravidla superpozice. Při vykompenzovaném stavu platí, že:

$$\Delta I_g = 0 \quad (1.18)$$

Při změně napětí U_x o hodnotu ΔU_x připojujeme do obvodu další zdroj napětí, který má velikost právě ΔU_x . Potom pro změnu proudu galvanometrem ΔI_g platí:

$$\Delta I_g = \frac{\Delta U_x}{R_{ix} + R_g + R_k \cdot \left(1 - \frac{R_k}{R_c}\right)} \quad (1.19)$$

Při proudové konstantě galvanometru K_i bude výchylka na stupnici:

$$\Delta \alpha_g = \frac{1}{K_i} \cdot \frac{\Delta U_x}{R_{ix} + R_g + R_k \cdot \left(1 - \frac{R_k}{R_c}\right)} \quad (1.20)$$

Proudová citlivost v zapojení s galvanometrem tedy bude:

$$C_{kgI} = \frac{\Delta \alpha_g}{\Delta U_x} = \frac{1}{K_i} \cdot \frac{1}{R_{ix} + R_g + R_k \cdot \left(1 - \frac{R_k}{R_c}\right)} \quad (1.21)$$

Rovnice platí při určování absolutní chyby měření a pro obvod s galvanometrem, jenž má řádově stejný, případně menší, vnitřní odpor, než je celkový odpor kompenzátoru.

Při určování poměrné chyby měření se proudová citlivost zapojení s galvanometrem vztahovaná k poměrné změně $\delta' U_x$ určuje vztahem:

$$C'_{kgI} = \frac{\Delta \alpha_g}{\delta' U_x} = \frac{\Delta \alpha_g}{\delta' U_x} \cdot \frac{1}{R_{ix} + R_g + R_k \cdot \left(1 - \frac{R_k}{R_c}\right)} \quad (1.22)$$

Uvedený vztah se k vyjádření proudové citlivosti používá nejčastěji. Citlivost kompenzátoru narůstá s velikostí citlivosti galvanometru (snižuje se konstanta K_i) a nárůstem velikosti měřeného napětí. Citlivost rovněž závisí na vnitřním odporu galvanometru R_g , celkovém odporu kompenzátoru R_c a vnitřním odporu zdroje měřeného napětí R_{ix} .

[1]

1.1.6 Přesnost měření

Přesnost během měření je dána citlivostí kompenzátoru, stability nulové výchylky u galvanometru a dále závisí na přechodových odporech a termoelektrickém napětí.

Největší možná poměrná chyba měřeného napětí je dána součtem největších možných poměrných chyb odporu R_k a proudu I_p , přičemž neuvažujeme rušivé vlivy:

$$|\delta_{T(U_x)}| = |\delta_{T(R_k)}| + |\delta_{T(I_p)}| \quad (1.23)$$

Z Obr. 1.4 - Základní analogový kompenzátor [1] je patrné, že největší poměrná chyba pomocného proudu I_p , $|\delta_{T(I_p)}|$, při uvažování největších poměrných chyb složek, podle kterých se tento proud kompenzační metodou určuje, tedy napětí etalonového článku U_N a odpor R_{kn} , je dána rovnicí:

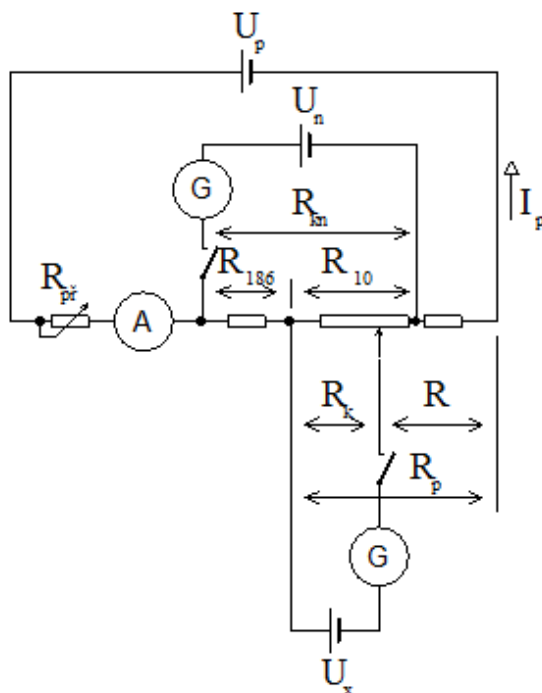
$$|\delta_{T(I_p)}| = |\delta_{T(U_N)}| + |\delta_{T(R_{kn})}| \quad (1.24)$$

Celkově se největší možná poměrná chyba vypočte:

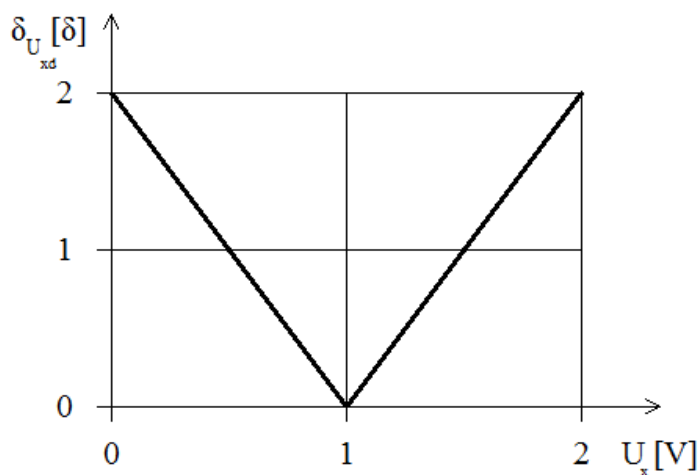
$$|\delta_{T(U_x)}| = |\delta_{T(R_k)}| + |\delta_{T(R_{kn})}| + |\delta_{T(U_N)}| \quad (1.25)$$

Pokud bychom uvažovali použití běžně dostupných přístrojů, nebude měření dostatečně přesné. Běžné odporové dekády mají největší chybu 0,02 % a etalon 0,01 %. Pokud provedeme součet největších poměrných chyb, vychází hodnota 0,05 %. Aby se chyba omezila na přijatelnou hodnotu, použije se zapojení dle Obr. 1.7 - Zapojení pro zvýšení

přesnosti měření [1]. Zde je značná část funkce normálového odporu R_{kn} převzata dekádovým odporem R_p . U tohoto zapojení je nejpřesnější měření okolo $U_x = 1$, jak je patrné na Obr. 1.8 - Graf závislosti poměrné chyby měření na měřeném napětí [1]. Graf zobrazuje chybu měření, kterou způsobuje nepřesná výroba kalibrovaného potenciometru R_p . Totožná chyba se uvažuje také pro odpor R_{186} .



Obr. 1.7 - Zapojení pro zvýšení přesnosti měření [1]



Obr. 1.8 - Graf závislosti poměrné chyby měření na měřeném napětí [1]

[1]

1.1.7 Výběr indikátoru vyvážení

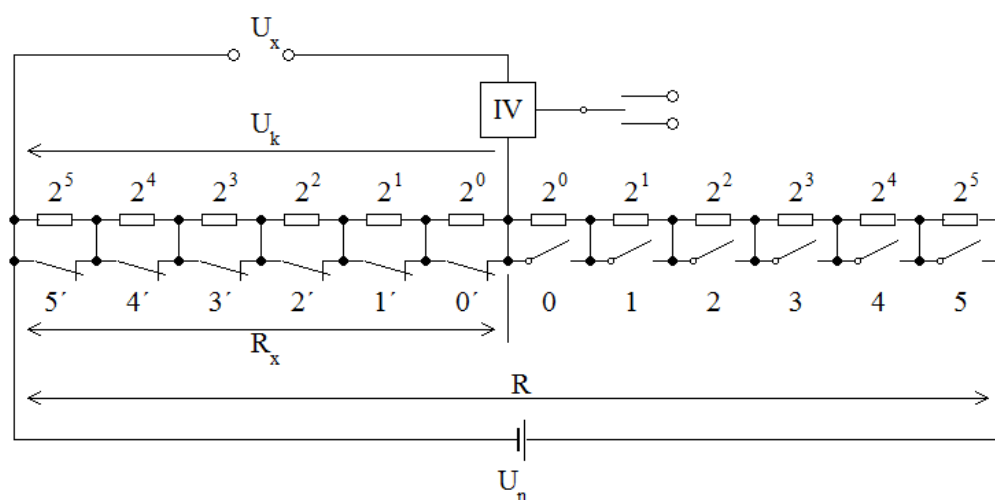
Výběr indikátoru vyvážení je závislý na vnitřním odporu indikátoru a také na žádané citlivosti. Při výběru z možných ručkových přístrojů se nejčastěji používá galvanometr s citlivým magnetoelektrickým systémem. Pro galvanometr představuje obvod kompenzátoru zdroj napětí, který má vnitřní odpor. Vnitřní odpor galvanometru představuje pro tento obvod zátěž. Aby byl přenos výkonu na galvanometr co nejefektivnější, musí se odpor zátěže rovnat vnitřnímu odporu galvanometru. Z uvedeného tedy vyplývá, že z hlediska výkonu bude nejvhodnější vnitřní odpor galvanometru záviset na velikosti měřeného napětí a také na velikosti odporu kompenzátoru. Odvození pro výpočet je na základě schématu na *Obr. 1.6 - Kompenzátor - určení citlivosti – princip [1]*.

$$R_g = R_{ix} + R_k \cdot \left(1 - \frac{R_k}{R_c}\right) \quad (1.26)$$

[1]

1.2 Automatizované kompenzační metody měření

1.2.1 Kompenzační digitální voltmetry



Obr. 1.9 - Princip digitálního kompenzátoru [2]

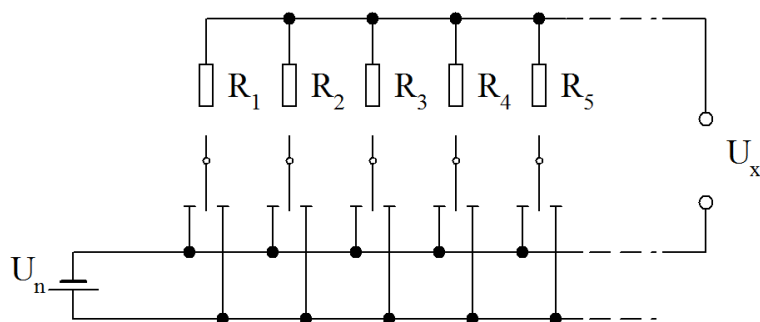
U těchto přístrojů je ruční vyvažování nahrazeno vyvažováním automatickým, ale princip fungování je v zásadě stejný, jako u ručních kompenzátorů. Jako zdroje napětí se zde používá etalonu, se kterým se přes připojované a odpojované odporové dekády porovnává měřené napětí U_x . Zde použité odporové dekády jsou v podstatě dělič napětí s vhodným připojováním a zkratováním jednotlivých stupňů. Jednotlivé části pravé a levé strany jsou spřaženy (může jít např. o relé s jedním spínacím a jedním rozpínacím kontaktem) na totožný ovládací signál a v případě, že dojde ke zkratování stupně na levé straně, na pravé straně se stupeň připojí. Vždy se jedná o stejné hodnoty odporů. Celkový odpor děliče tedy zůstává stejný. Mění se poměr části R_x ku R a tím napětí na svorkách, kde je připojen indikátor vyvážení IV a měřené napětí U_x . Tato funkce je patrná z *Obr. 1.9 - Princip digitálního kompenzátoru [2]*. Tento proces se děje automaticky, dokud nedojde k vyvážení mezi kompenzačním napětím U_k a měřeným napětím U_x a je vyjádřeno vztahem:

$$U_x = U_k = U_n \cdot \frac{R_x}{R} = kR_x \quad (1.27)$$

Jak je patrné, měřené napětí je ve vyváženém stavu dáno velikostí odporu R_x . Tato hodnota je určena stavy jednotlivých kontaktů. Stavy jednotlivých přepínacích prvků jsou signalizovány a v určitém tvaru kódu reprezentují změřenou hodnotu. Na *Obr. 1.9 - Princip digitálního kompenzátoru [2]* je uvedeno odstupňování hodnot odporů na základě dvojkové soustavy (mocniny č.2 s celými exponenty). Při tomto odstupňování je oproti odstupňování na základě desítkové soustavy třeba méně odporových stupňů a tím pádem i méně kontaktů. Je třeba ale údaj převést a vhodným způsobem zobrazovat.

Skutečné digitální kompenzační voltmetry jsou vybaveny obvody pro automatickou změnu polaritu kompenzačního napětí, aby měřené napětí šlo měřit. Jsou rovněž vybaveny automatikou na změnu měřících rozsahů na základě velikosti měřeného napětí.

Nejstarší typy těchto voltmetrů byly vybaveny relé s kontakty. Dnes se toto přepínání děje elektronickými součástkami. Jelikož ale v případě použití tranzistorů nejde o ideální kontakty (uplatňují se zbytkové úbytky napětí na přechodech), a nelze vytvářet dlouhé řetězce sériově zapojených rezistorů, řadí se odpory v děliči také paralelně: *Obr. 1.10 - Princip paralelního řazení rezistorů [2]*.



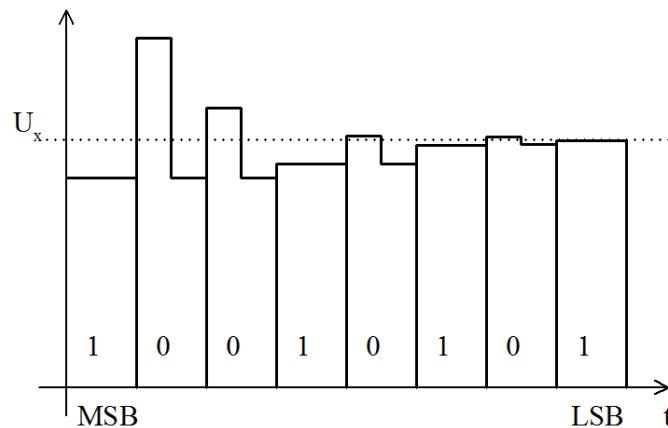
Obr. 1.10 - Princip paralelního řazení rezistorů [2]

Přesnost digitálních kompenzátorů určuje převážně přesnost použitého odporového děliče a přesnost zdroje normálového napětí (etalonu). Také je potřebná dobrá rozlišovací schopnost indikátoru vyvážení a jeho stabilita nuly. Přesnost bývá v řádech setin až tisícín procenta.

[2]

1.2.2 A/D převodník s postupnou aproximací

Princip fungování tohoto typu převodníku je postaven také na kompenzační metodě měření napětí. Měřené vstupní analogové napětí U_x se uvnitř převodníku srovnává se zpětnovazebním kompenzačním napětím $U_{D/A}$ z výstupu D/A převodníku. Toto srovnávání probíhá tak dlouho, dokud měřené napětí a kompenzační napětí nedosáhne mezi svými hodnotami rozdílu menšího, než je rozlišovací schopnost převodníku. V tu chvíli je na výstupu D/A převodníku shodná hodnota, jako je na vstupu A/D převodníku. Princip vyrovnávání napětí u převodníku je na *Obr. 1.11 - Princip vyrovnávání napětí [4]*.



Obr. 1.11 - Princip vyrovnávání napětí [4]

Převod napětí je řízen hodinovým signálem a probíhá v n taktech. Během prvního hodinového impulzu je nastavena hodnota MSB , což je Most Significant Bit (Bit s Největší Důležitostí), logická 1 je nastavena s aproximačního registru. Zbylé hodnoty bitů jsou nastaveny na logickou 0. Hodnota MSB je převedena převodníkem D/A na hodnotu napětí, která odpovídá polovině napětíového rozsahu převodníku ($U_{D/A} = \frac{U_r}{2}$). Velikost tohoto napětí je porovnávána v komparátoru s měřeným napětím U_x . Pokud je měřené napětí U_x větší, než $U_{D/A}$, nastaví se hodnota MSB na logickou 0. Pokud je hodnota U_x větší, ponechá se logická 1. Během dalšího hodinového impulzu se testuje $MSB - 1$, u kterého se nastavuje velikost napětí $\frac{U_r}{4}$, která se přičítá k velikosti předtím testovaného napětí. Napětí se rovněž porovnává s velikostí U_x . Stejný postup následuje dále. Počet porovnávacích cyklů je roven počtu bitů převodníku. V principiálním grafu je doba převodu označena jako T_p . Ta bývá přibližně $10 \mu s$. K dispozici jsou v obchodní síti převodníky 8 – 16 bit. Rozlišení se pohybuje od 0,4 % - 0,0018 %.

[4]

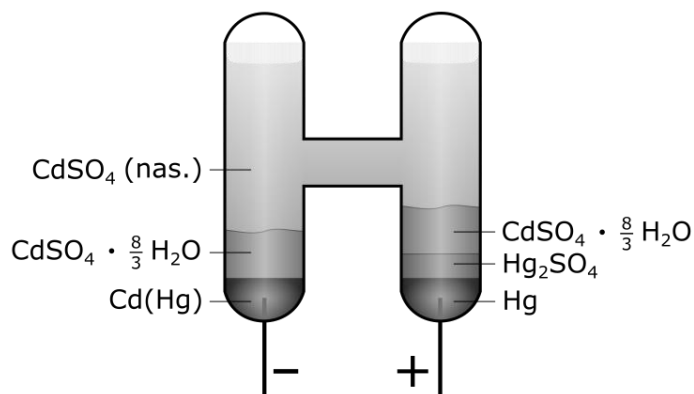
1.3 Normály a referenční zdroje napětí

Jde o zdroje, které mají konstantní hodnotu výstupního napětí. U normál elektrického napětí jde o elektrochemické články, které poskytují stabilní napětí, což je již vlastnost konstrukce. Zdrojem napětí je chemický proces uvnitř článku.

Naproti tomu referenční zdroje napájeny jsou. Jejich principem je poskytnout na výstupu stabilní a teplotně neovlivněnou hodnotu, zatímco jsou napájeny z běžných zdrojů, které sami o sobě potřebnou stabilitu výstupního napětí nenabízejí.

1.3.1 Westonův článek

Jedná se o elektrochemický článek. Nádoba je tvaru písmene H, jehož elektrolytem je nasycený roztok síranu kadmnatého ($CdSO_4$). Uvnitř je tato látka také v krystalické formě, aby se zaručila nasycenost roztoku. Kladnou elektrodu tvoří čistá rtuť (Hg) a záporná elektroda je tvořena amalgamem kadmia ($Cd + Hg$). Přívody k elektrodám jsou vyrobeny z platiny. Jako depolarizátor je použit síran rtuťný (Hg_2SO_4), který je pouze u kladné elektrody. Ten slouží k tomu, aby nedocházelo k polarizaci článku vlivem odebíraného proudu. Při polarizaci by docházelo ke snížení výstupního elektromotorického napětí.



Obr. 1.12 - Westonův článek [21]

Westonův článek má napětí okolo 1,01865 V. Tato hodnota platí při teplotě 20 °C. Při jejím zvýšení se napětí snižuje. Snížení odpovídá cca 0,004 % při zvýšení o 1 °C. Jinými slovy, teplotní stabilita článku je $-40 \mu V / 1 ^\circ C$. Rovněž dochází ke snižování napětí vlivem stárnutí článku. K největšímu snižování dochází během prvních let od výroby a postupem času dochází ke stabilizování článku a snížení není tak velké. Celkově by snížení napětí nemělo být větší, než 0,01 % za rok. Nevýhodou tohoto článku je velký výstupní odpor, který bývá v řádech stovek Ohmů, až 1 kΩ. Smí se zatěžovat pouze malým proudem (1 μA - krátkodobě). Dále je to velká choulostivost na mechanické zacházení. Článek se nesmí převracet, vystavovat otřesům a velkým teplotním změnám. Z těchto důvodů není vhodný pro běžné užívání, ale v laboratořích stále své uplatnění nachází.

[3], [24]

1.3.2 Teplotně kompenzované Zenerovy diody

Teplotně kompenzované Zenerovy diody patří k moderním elektronickým zdrojům referenčního napětí. Jejich zapojení nabízí vysokou stabilitu výstupního napětí, nejsou nákladné a dají se používat prakticky v každém přístroji, kde je třeba.

Obvykle jde o integrovaný obvod, kde je integrován i obvod teplotní kompenzace (např. obvod *LM199*, *LM399*). Teplotně kompenzované Zenerovy diody můžeme rovněž nalézt jako součásti integrovaných obvodů v přesných měřicích přístrojích. Referenční zdroj je možné osadit tepelným štítem, který ještě více zvyšuje teplotní stabilitu.



Obr. 1.13 - LM399 s tepelným štítem [22]

Výhodou těchto zapojení je to, že ve spojení s operačním zesilovačem lze nastavit libovolné výstupní a to s přijatelnou přesností. V případě použití referenčního zdroje s uměle stařenými diodami je dosažitelná stabilita srovnatelná s Westonovým článkem. Další nespornou výhodou je, že obvod lze mnohem více proudově zatížit, než zmíněný Westonův článek.

[3]

2 Návrh zapojení kompenzátoru

2.1 Požadované vlastnosti navrhovaného zapojení

Navrhované zapojení musí splňovat následující podmínky, aby byly v průběhu měření zjištěny co možná nejpresnější údaje. Je nutné, aby konstrukce zapojení nevnášela do měření trvalou chybu a aby poskytovala celkově požadovanou přesnost. Konstrukce bude ve svém pojetí vycházet z uvedených kompenzátorů. Je totiž nezbytně nutné, aby používání navrženého přístroje kompenzační metodu měření věrně demonstrovalo.

- ***Zapojení nesmí ve vykompenzovaném stavu proudově zatěžovat měřený obvod***

Tato podmínka je vlastností kompenzační metody a její největší přednost. Obvod musí být konstruovaný tak, aby do něj netekl ve vykompenzovaném stavu žádný proud. Jeho vstupní impedance musí být značná a v ideálním případě nekonečná. Pokud by byl měřený obvod zatěžován, pokleslo by výstupní napětí měřeného zdroje vlivem vnitřního odporu a výsledky měření by následně byly velmi zkreslené.

- ***Přesnost***

Konstrukce musí být provedena tak, aby výsledná přesnost byla 0,01 %. Tato hodnota je na základě požadavku vedoucího práce. Bylo by ovšem možné zkonstruovat přesnější zařízení, kde by byla omezením úroveň šumu produkovaná použitými obvody (tuto vlastnost nelze ovlivnit, jelikož je dána vnitřním zapojením) a rozlišovací schopnost použitého indikátoru. Z hlediska demonstrace metody studentům to ale není potřebné.

- ***Citlivost***

Obvod musí mít dostatečnou citlivost na změny kompenzačního napětí – indikátor vyrovnání musí být schopen zaznamenat i drobnou změnu ve velikosti napětí U_x .

2.2 Použité obvody

Možností konstrukcí je celá řada. Dal by se např. využít zmíněný převodník s postupnou aproximací a jím měřenou analogovou hodnotu napětí převádět do dvojkové soustavy. Hodnota měřeného napětí by po převodu do dekadické soustavy byla zobrazována na zobrazovači přímo v celém čísle. Tímto by se nám konstrukce stávala složitější, ale s dnešními převodníky by při vhodné konstrukci bylo zapojení velmi přesné. Jelikož jde ale o zapojení, které má dle vyjádření vedoucího práce studentům přiblížit kompenzační metodu měření, bude provedena elektronická analogová konstrukce, kde bude měřené napětí kompenzováno ručně pomocí přepínače rozsahu a potenciometru. Analogová konstrukce je rovněž nejjednodušší. Ze známých možných obvodových řešení se v tomto případě dá nejlépe využít operačních zesilovačů a komparátorů.

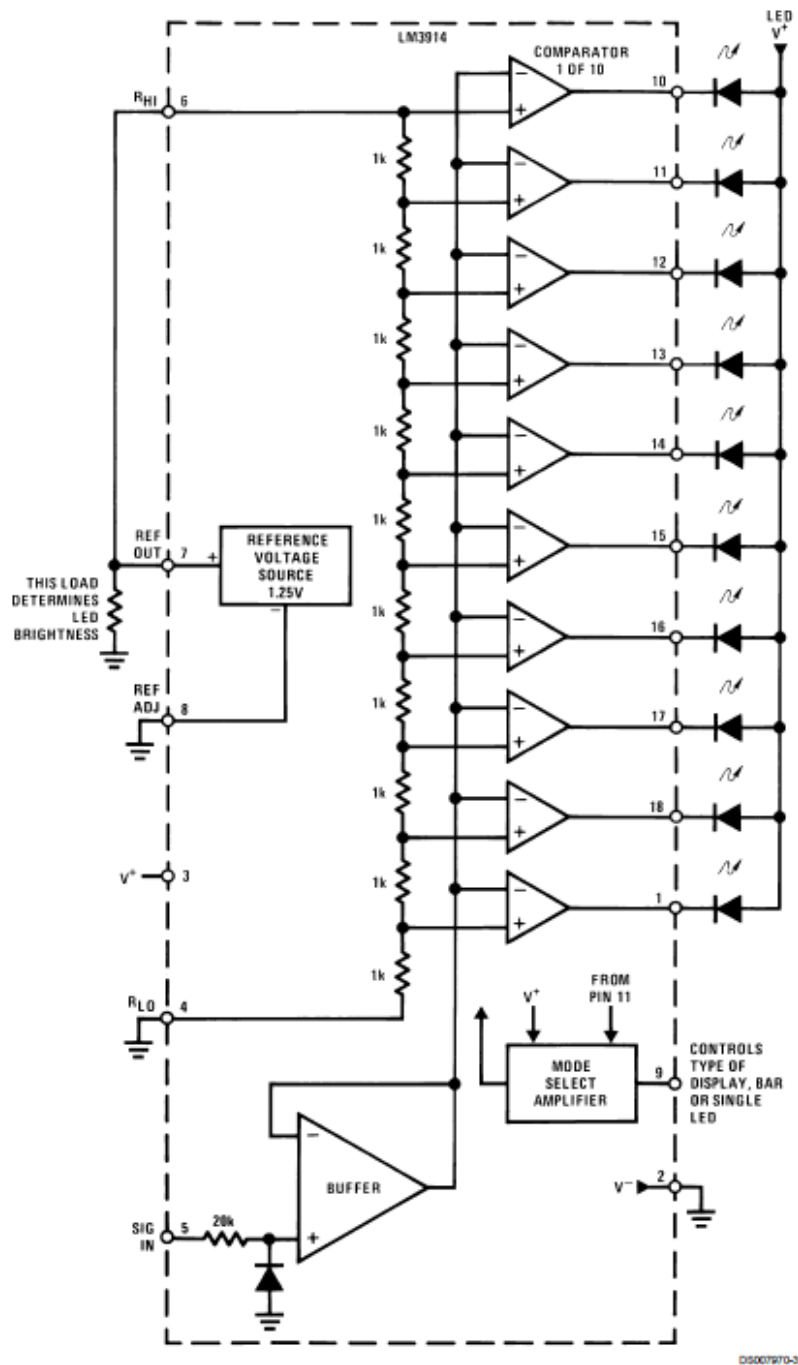
Celý návrh zapojení je popsán do jednotlivých funkčních bloků, které byly použity při návrhu celkového zapojení.

2.2.1 Zobrazování odchylky – indikátor vyváženého stavu

Při uvažování, jaký typ elektronického indikátoru použít, bylo uvažováno o možnosti použití LCD zobrazovače, kde by byl použit převodník a správné odezvy zobrazovače LCD na jednotlivá napětí by se naprogramovaly do dalšího obvodu. V podstatě by se použilo jiného typu převodníku. Od této varianty řešení bylo nakonec upuštěno. Plně by mělo postačovat zobrazení pomocí řady LED, kterých ale musí být dostatečný počet, aby se nula, tedy vyvážení, dalo řádně a spolehlivě indikovat a také aby stupnice neměla mezi jednotlivými body příliš velké napětěvé rozestupy. Snižovala by se přesnost měření – zaváděla trvalá chyba.

Jako vhodného se v tomto případě ukázalo použití integrovaného obvodu *LM3914* od společnosti National Semiconductor. Jedná se o budič LED, což je ve své podstatě komparační převodník, u kterého je možnost kaskádového řazení a tím zvýšení rozlišovací funkce. Vnitřní zapojení obvodu je koncipováno tak, že se jedná o deset komparátorů, kde je každý neinvertujícím vstupem připojen na stupeň odporové dekády. Jednotlivé stupně dekády mají vždy totožnou hodnotu odporu a odstupňování je tudíž lineární (Je dostupný rovněž model *LM3915*, u kterého je odstupňování logaritmické, ale pro potřeby zapojení je

ovšem nevhodný). Jde o referenční hodnoty napětí pro komparátory, se kterými se porovnává úroveň měřeného napětí, a principiálně to je odporový dělič napětí, jehož vstupní vodiče jsou připojeny na vývody integrovaného obvodu. Toto vnitřní zapojení dané výrobcem obvodu umožňuje vytvořit zapojení s plovoucími obvody a kaskádovat je za sebou. Tím se zvyšuje přesnost, pokud ponecháme totožné napětí, a příp. rozsah, pokud připojíme na sériově řazené kaskády napětí dvojnásobné, či vícenásobné. Nesmí se však překročit maximální povolené napětí dané výrobcem obvodu. Invertující vstupy komparátorů jsou vzájemně propojeny a tento společný vodič je připojen na výstup vestavěného sledovače. Sledovač v obvodu slouží pro oddělení vstupu, aby předchozí obvody nebyly proudově zatěžovány, což je popsáno níže. Obvod rovněž umožňuje zapojení, aby LED fungovaly ve sloupcovém režimu nebo jako bod. Pro funkci indikátoru vyvážení je vhodná pouze funkce zobrazení v režimu bod, tedy DOT. Funkce BAR by byla vhodná například u indikátoru vybuzení nebo případně u jednoduchého voltmetru a také u nabíječe bateriových článků, kde by se dala tímto způsobem signalizovat úroveň dobití. Pro potřeby kompenzátoru je BAR mód nevhodný z hlediska přehlednosti a odečtení odchylky.

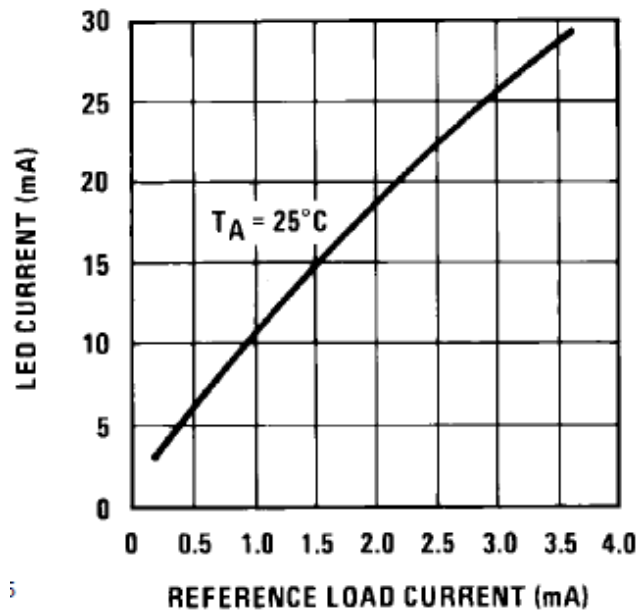


Obr. 2.1 - Vnitřní zapojení obvodu LM3914 [16]

V tomto zapojení bylo použito dvou těchto integrovaných obvodů, je tedy použito 20 ks LED. Však místo 20 ks samostatných LED bylo použito LED BAR grafu s 20 segmenty. Toto řešení usnadňuje následnou montáž a působí esteticky lépe. Navržený je typ DC – 20/20EWA s LED červené barvy od společnosti Kingbright.

Zapojení indikátoru vychází z doporučených zapojení výrobcem, které bylo modifikováno pro potřeby kompenzátoru. Jelikož je nutné zobrazovat nulu, a nepoužije se symetrický zdroj napájení (což nebylo v zadání práce), je nutné nulu nastavit jako danou kladnou hodnotu referenčního napětí, od které se bude odečítat, popřípadě přičítat. V obvodu se pracuje s hodnotou $+10\text{ V}$, tak je výhodné nastavit jako referenční nulu hodnotu $+5\text{ V}$. Tato úroveň napětí musí být na prostředním komparátoru jakožto hodnota, se kterou se bude napětí srovnávat. Pro srovnávání je nezbytně nutné, aby tato hodnota napětí byla stabilní a přesná. Z toho důvodu musí být tato hodnota zajištěna velmi přesným zdrojem. Způsob fungování by se nejlépe dal vystihnout: V případě, že bude měřená hodnota nižší, bude aktivní některá LED směrem doprava a v případě, že bude hodnota větší, bude aktivní některá z LED směrem vlevo. Dá se říci, že jedna LED bude symbolizovat změnu o $\pm 0,5\text{ V}$ oproti referenci.

S ohledem na datový list, který poskytuje výrobce obvodu, je třeba navrhnout rezistory, které slouží k nastavení tekoucího proudu do LED. Tento rezistor je připojený k vestavěnému referenčnímu zdroji napětí a dle tohoto proudu se nastavuje proud tekoucí jednotlivými LED (rezistory označeny $R11$ a $R13$). Dle datového listu k použitému LED zobrazovači je maximální povolený dlouhodobý proud pro každou LED 20 mA . Špičkově až 160 mA . Tato hodnota je stanovena pro maximální svítivost, která je 9 mcd . Dle tabulky závislosti svítivosti na tekoucím proudu z datového listu je vhodnější vybrat svítivost nižší, tudíž zvolit nižší protékající proud - 12 mA . Povolené provozní napětí je $2,0\text{ V}$, max. $2,5\text{ V}$. Pro výpočet rezistorů byla použita tabulka poskytnutá výrobcem $LM3914$. Je zde vidět závislost proudu tekoucího do LED na proudu tekoucího z referenčního zdroje napětí. Je tedy třeba hodnotu odečíst a provést správný výpočet proudu tekoucího z referenčního zdroje. Referenční zdroj má napětí $1,25\text{ V}$.

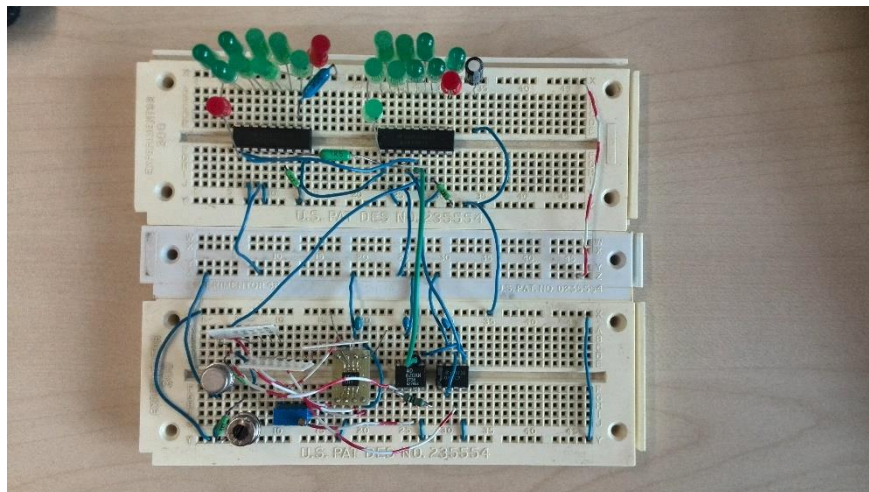


Obr. 2.2 - LM3914 - závislost proudu LED na referenčním proudu [16]

$$R_{11}, R_{13} = \frac{U_{REF}}{I_{REF}} = \frac{1,25}{0,0012} \doteq 1041,67 \Omega \quad (2.1)$$

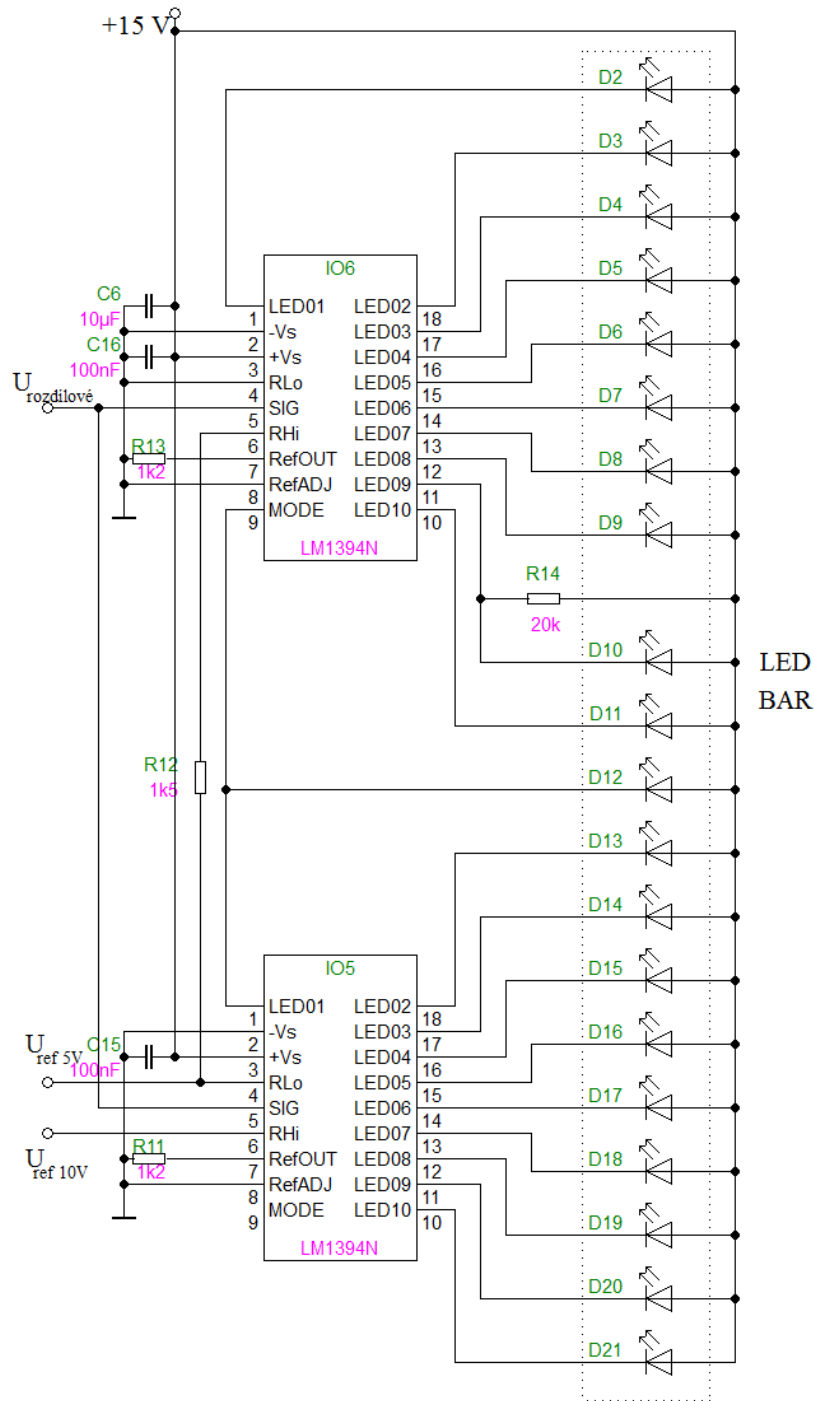
Zvolíme tedy nejbližší rezistory, což je $1,2 \text{ k}\Omega$. Rezistor R_{14} je dán zapojením dle výrobce obvodu, pokud se řadí více než jeden obvod za sebou.

Rezistor R_{12} byl doplněn během testování obvodu v nepájivém poli. Je doplněn z důvodu odstranění chyby (offsetu) nuly, který vznikl při kaskádování obvodů. Jeho hodnota byla určena testováním a také na základě vnitřního zapojení obvodu.



Obr. 2.3 - Testovací zapojení v nepájivém poli

Kondenzátor $C6$ je skupinový blokovací a je navržen výrobcem obvodu na hodnotu $2,2 \mu F$ pro tantalové provedení nebo $10 \mu F$ pro elektrolytický s hliníkovým pouzdrům. $C15$ a $C16$ jsou lokální keramické blokovací kondenzátory o hodnotách $100 nF$. Jsou umístěné u každého integrovaného obvodu v zapojení. Slouží k vyrovnání napětí během reakční doby napájecího zdroje, jehož regulace je pomalejší.

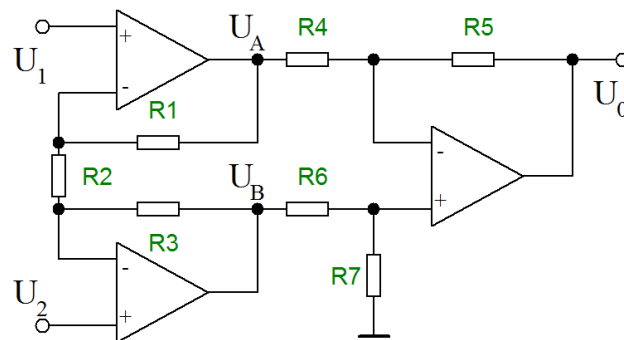


Obr. 2.4 - Schéma zapojení bloku zobrazovače

[12], [16]

2.2.2 Porovnávání vstupního a kompenzačního napětí, zesílení odchylky

K porovnávání odchylky mezi kompenzačním napětím a měřeným napětím svými vlastnostmi nejlépe vyhovuje použití operačního zesilovače. Zde je využito zapojení přístrojového zesilovače pro své vlastnosti. Ve vnitřní struktuře jde o zapojení dvou neinvertujících OZ, z nichž je každý připojen na jeden ze vstupů. Tyto jsou svými výstupy připojeny k diferenčnímu zesilovači.



Obr. 2.5 - Vnitřní zapojení přístrojového OZ [6]

U kompenzátoru je třeba přesně stanovit nulovou odchylku napětí mezi invertujícím a neinvertujícím vstupem, proto byl použit právě přístrojový OZ (instrumentation amplifier). Přístrojové OZ se, v porovnání s ostatními OZ, vyznačují velkým vstupním odporem, nízkým šumem, velkým zesílením a, což je v tomto případě důležité, vysokým činitelem potlačení souhlasného signálu 70 – 150 dB. Tato hodnota je důležitá z důvodu správného vyhodnocení vykompenzovaného stavu. Pokud by potlačení souhlasného napětí nebylo dostatečné, byla by na výstupu i při souhlasném napětí na vstupech napěťová úroveň, která by způsobovala výchylku na BAR grafu. Vztah pro výpočet *CMR*:

$$CMR = 20 \cdot \log \frac{\Delta U_s}{\Delta U_o} \quad (2.2)$$

$$\Delta U_s = \frac{U_+ + U_-}{2} \quad (2.3)$$

Kde: ΔU_s je rozdíl napětí mezi invertujícím a neinvertujícím vstupem, U_+ je úroveň napětí na neinvertujícím vstupu, U_- je úroveň napětí na invertujícím vstupu a ΔU_o je změna výstupní úrovně napětí.

Důležitý je rovněž parametr maximální velikosti souhlasného napětí. Obvykle bývá u těchto OZ stanovena na velikost napájecího napětí.

Zvolený obvod, což je obvod AD620 od společnosti Analog Devices, obsahuje zmíněné zapojení. Svými parametry plně odpovídá požadavkům a byl poskytnut vedoucím práce. Jedná se o nízkopříkonový přístrojový OZ, který umožňuje fungování pouze s jednostranným napájením. Možné napájecí napětí je v rozsahu $\pm 3 - \pm 18 V$, maximální zesílení 10 000, maximální velikost souhlasného napětí je dána napájecím napětím, maximální velikost rozdílového napětí je 25 V a umožňuje nastavení referenční hodnoty napětí.

Zapojení je provedeno tak, že je určena napěťová reference pro obvod a od této hodnoty se bude počítat odchylka. Možné úrovně výstupu jsou tedy +5 V, což je definováno jako střed stupnice na zobrazovači. Pokud bude rozdíl na napětí na vstupech OZ 0 V, mělo by na výstupu OZ být 5 V. Pokud bude kladnější neinvertující vstup oproti invertujícímu, bude rozdíl zesílen a přičten k hodnotě referenční. Pokud bude kladnější napětí na invertujícím vstupu, bude rozdíl zesílen a od referenční hodnoty odečten.

Zesílení u obvodu je konfigurovatelné za použití jediného rezistoru. Vzorec pro výpočet je dle výrobce:

$$A = \frac{49400}{R_G} + 1 \quad (2.4)$$

A z tohoto po úpravě:

$$R_G = \frac{49400}{A - 1} \quad (2.5)$$

Kde R_G je hodnota rezistoru připojená mezi svorky RG a A je zesílení. Pro zesílení $A = 1$ stačí rezistor neosadit – ponechá se nekonečný odpor. Tento princip je také patrný z uvedeného Obr. 2.5 - *Vnitřní zapojení přístrojového OZ [6]*. Při neosazení rezistoru R_2 se rezistory R_1 a R_3 neuplatňují, neboť jimi neteče žádný proud (chovají se jako vodič) a díky tomu se oba vstupní neinvertující OZ chovají jako sledovače. Sledovač má zesílení $A = 1$ a v podstatě kopíruje hodnotu napětí na neinvertujícím vstupu.

U voliče velikosti napěťového zesílení bylo uvažováno o použití $50\text{ k}\Omega$ logaritmického potenciometru. Jelikož je nutné, aby pro zesílení byla jedna z voleb $A = 1$, byl by nutný potenciometr s vypínačem. Je zde totiž nutnost volby nekonečného odporu R_G . Během výpočtu bylo prověřeno, že v případě použití potenciometru by minimální zesílení odpovídalo $A = 1,988$. Toto není dostatečné řešení. Proto byl k volbě zesílení vybrán otočný přepínač s deseti polohami, kde se stanoví jednotlivá zesílení rezistory, které připojíme na jednotlivé póly. Přepínač byl vybrán s ohledem na kvalitu provedení, aby póly nedisponovaly velkými přechodovými odpory. Byl vybrán typ od společnosti Grayhill, konkrétně typ 56SDP36 – 01 – 1 – *AJN*. Přepínač je v provedení do plošného spoje. Během volby odpojuje předchozí stupně – nezkratující provedení. Navržené stupně zesílení jsou stanoveny na základě vhodného odstupňování. Hodnoty rezistorů $R_{23} - R_{31}$ výpočtem dle rovnice (2.5). Hodnoty jsou v Tab. 2.1 - *Hodnoty rezistorů a zesílení*.

Tab. 2.1 - Hodnoty rezistorů a zesílení

A_u	R_G	A_u	R_G
1	∞	330,33	150 Ω
3,25	22 $\text{k}\Omega$	495	100 Ω
9,82	5,6 $\text{k}\Omega$	969,63	51 Ω
33,93	1,5 $\text{k}\Omega$	1647,67	30 Ω
97,86	510 Ω	3294,33	15 Ω

Výstup ze zesilovače je nutné na výstupu osadit filtrem typu dolnoproúst. Je to z důvodu omezení šumu, který je na výstupu zesilovače přítomen. Šum je vlastnost obvodu a nelze ji nikdy úplně eliminovat, jelikož je dána vnitřním uspořádáním obvodu. Zde hraje roli kvalita přechodů (jejich čistota) a samozřejmě správné navržení obvodu (omezení rozkmitávání zesilovače vlivem špatné vnitřní konstrukce regulace zesílení). Dle datového listu obvodu je maximální úroveň šumu při úrovni zesílení $A = 1$. Výrobce udává $3 \mu V p - p$. $p - p$ znamená peak to peak, což je rozdíl minimální a maximální úrovně amplitudy signálu. Aby došlo k omezení šumu na výstupu, je třeba použít filtr typu dolní propust. V tomto případě jde o typ RC . Velikost rezistoru je dána maximálním možným zatížením výstupu operačního zesilovače. V tomto případě je to cca $1 mA$. Hodnota rezistoru bude tedy $10 k\Omega$ a to z toho důvodu, aby nedošlo k omezení výstupu vlivem nadproudové ochrany. Kondenzátor bude pro velké frekvence fungovat jako zkrat a mohlo by dojít k přetížení. Velikost kondenzátoru je dána mezní frekvencí. Tato se musí stanovit tak, aby nedocházelo k ovlivňování výstupní hodnoty napětí. Stanovena je přibližně $1,5 kHz$. Pokud potřebujeme zpracovávat stejnosměrný signál, jako v tomto případě, omezení přenosového pásma nemá žádný dopad. Hodnota kondenzátoru se tedy vypočte:

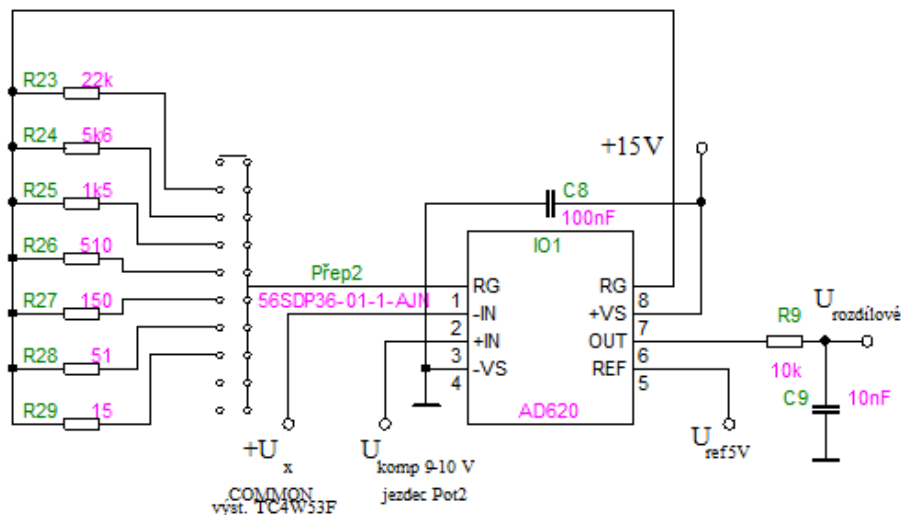
$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \quad (2.6)$$

Po úpravě vztahu:

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot f_0} \quad (2.7)$$

Po dosazení:

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10000 \cdot 1500} \doteq 1,06 \cdot 10^{-8} = 10 nF \quad (2.8)$$



Obr. 2.6 - Zapojení rozdílového zesilovače

[5], [6], [8], [9], [10], [13]

2.2.3 Spínač vstupu měřeného napětí

U zapojení je nutné, aby vstup k OZ, kam se zapojuje měřené napětí, nebyl trvale připojen. Obvod nebude namáhán a během připojování měřeného napětí nebudou vlivem manipulace s kabely a konektory do obvodu připojovány napěťové pulzy.

V tomto případě bylo uvažováno o použití pouze tlačítka, ale to vzhledem k přechodovým odporům kontaktů není vhodné řešení. Jako lepší alternativa se jeví použití multiplexeru, který je schopen zpracovávat analogový signál na vstupu. Vybrán byl dvouvstupový multiplexer od společnosti Toshiba, konkrétně obvod *TC4W53F*. Bude sloužit k připojení měřeného napětí k invertujícímu vstupu obvodu *AD620*. Dal by se vybrat i jiný obvod, ale tento byl k dispozici a byl poskytnut vedoucím práce.

Integrovaný obvod multiplexeru umožňuje rovněž mixování analogového i digitálního signálu. V tomto případě je využito pouze možnosti připojovat analogový signál.

Dle datového listu k obvodu je stavěn na napájecí napětí v rozmezí $-0,5 - 20\text{ V}$. Dle pravdivostní tabulky k obvodu je princip takový, že v případě logické 1 na vstupu *INH* jsou odpojeny všechny vstupy. V případě logické 0 je připojen jeden ze vstupů. Zde již záleží na úrovni vstupu *A*. V případě logické 0 je připojen vstup *CH0*, v případě logické 1 je připojen vstup *CH1*. řešením tedy je použít tlačítko, které bude připojovat vstup *INH* k logické 0

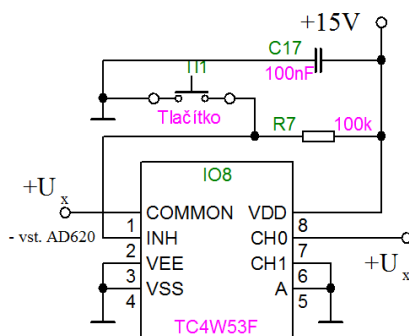
(ukostření). V případě, že tlačítko sepnuté nebude, bude na vstupu napětí, které přivedeme přes rezistor. Velikost rezistoru je v tomto případě stanovena proudem, který přes něj teče. Byl zvolen takový, aby se proudově příliš nezatěžoval zdroj a zároveň došlo k spolehlivému nastavení na logickou 0. Rezistor $R7$ byl vybrán o hodnotě $100\text{ k}\Omega$, jelikož:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{15}{100000} = 1,5 \cdot 10^{-4} = 150\ \mu\text{A} \quad (2.9)$$

Pro tyto účely bude dostatečně vyhovovat. V případě stisknutí tlačítka bude tedy propojen vstup $CH0$, což je jeden z pólů, kam bude připojen pól (+) zdroje měřeného napětí U_x , s výstupem $COMMON$, který je připojen k neinvertujícímu vstupu operačního zesilovače, kde bude probíhat měření odchylky.

Je rovněž nutné zmínit, jak uvádí datový list, potencionální změnu napětí vstup – výstup. Dle výrobce by změna měla být v rozmezí $-0,5 - 0,5\text{ V}$. Není to však garantované. Změna by měla být 0 V , což je zde potřeba. Je nutné prokázat měřením. Jelikož by neměl do invertujícího vstupu OZ téci téměř žádný proud, můžeme uvažovat, že nebude vznikat úbytek napětí a tudíž by výstupní napětí mělo korespondovat s hodnotou vstupní.

U obvodu je nutné všechny ostatní nevyužité vstupy připojit na ukostření. V případě vstupu označeného A to je nutné, aby obvod pracoval, jak je požadováno.



Obr. 2.7 - Zapojení multiplexeru

[18]

2.2.4 Zdroj kompenzačního napětí

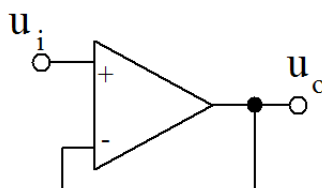
Zdrojem kompenzačního napětí je rezistorová dekáda, která je tvořena teplotně stabilními přesnými rezistory o hodnotách $10\text{ k}\Omega$. Rezistory jsou zapouzdřeny vždy po 4 ks

v jednom pouzdře. Celkově jsou použity tři rezistorové dekády ($R1 - R3$), u kterých je deset stupňů použito pro odstupňování kompenzačního napětí $0 - 10\text{ V}$ vždy po 1 V a poslední dva stupně jsou samostatně zapojeny na zdroj 10 V a využity jako zdroj referenčního napětí 5 V pro nastavení reference u zesilovače odchylky a také pro LED BAR graf. Dekáda je připojena na přesný zdroj napětí o hodnotě 10 V . Jednotlivé stupně by tedy měly být velmi přesné a se změnou teploty by nemělo docházet ke změnám napětí, popř. jen k minimálním změnám. Aby bylo možné vyrovnat výrobní rozdíly mezi stupni, byly ke každému stupni navrženy ještě rezistory zapojené paralelně ke každému ze stupňů dekády. Nemají danou hodnotu a jsou pouze z toho důvodu, aby na DPS byly přítomny plošky pro případné nastavení umístěním rezistoru. V případě, že bude hodnota v pořádku, rezistory se neosadí. Tato úprava hodnot rezistorů se musí provést pomocí měření a následného výpočtu a je zohledněna ve třetí kapitole a ve schématu zapojení.

Jednotlivé napěťové rozsahy z dekády se přepínají pomocí otočného přepínače 56SDP36 – 01 – 1 – AJN (jde o stejný typ, jako v případě volby zesílení). Volbou vhodného napětí na dekádě se toto připojí na svorku U_x , kam se připojuje svorka (–), a je sériově připojeno k měřenému napětí. Proveďte se tím základní kompenzace.

Napětí 5 V ze stupňů pro určení referenčního napětí pro zesilovač odchylky a indikátor vyvážení (LED BAR graf) je připojeno na sledovač.

Napěťový sledovač je neinvertující zapojení operačního zesilovače se zesílením, které je v tomto případě $A = 1$. Základní zapojení sledovače je uvedeno na: *Obr. 2.8 - Zapojení sledovače [5]*. Ze zapojení je patrné, že veškeré zesílení je vlivem zpětné vazby opět tlumeno.



Obr. 2.8 - Zapojení sledovače [5]

Je vhodné u aplikací, kde jsou nutné velmi velké vstupní odpory. Díky tomu není proudově zatěžován předešlý obvod. Poskytuje také velký výstupní výkon v řádech mW . Nevýhodou může být, že obvod může vnášet chybu, která je způsobena zesílením souhlasného signálu. Proto je nutné dbát na to, aby OZ měl v tomto směru dobré vlastnosti. Tento obvod byl použit pro oddělení vstupů, aby nebyl zatěžován rezistorový dělič odběrem proudu. Zajistí se přesnost a stabilita referenčního napětí.

V případě zajištění napětí $9 V$ a $10 V$ byl použit jeden integrovaný obvod, který obsahuje dva precizní nízkošumové operační zesilovače v jednom pouzdru. Jde o obvod *LT1013* od společnosti Linear Technology. Pro každé z uvedených napětí je použit jeden operační zesilovač v již zmíněném zapojení sledovače se zesíleními $A = 1$. U tohoto integrovaného obvodu je $CMR = 117 dB$. Napětově vyhovuje, jelikož umožňuje napájení až $\pm 22 V$, max. rozdílové napětí na vstupech $\pm 30 V$. Rovněž umožňuje pouze jednostranné napájení a výrobce garantuje nízké hodnoty šumu a offsetu. Výstupy každého OZ jsou zde vyvedeny na potenciometr $10 k\Omega$, čili na potenciometru je rozdíl napětí $1 V$. Na jedné straně je připojeno napětí $9 V$ a na straně druhé je připojeno napětí $10 V$. Jezdec je připojen na neinvertující vstup OZ *AD620*. Zde se provádí jemná přesná kompenzace měřeného napětí.

Pro získání referenčního napětí $5 V$ je použito dvou rezistorů z odporové dekády. Napětí je ale získáváno nezávisle na části pro získávání napětí $1 - 10 V$. Pro $5 V$ je použito pouze dvou rezistorů s hodnotou $10 k\Omega$, které jsou připojeny na napětí $10 V$. Z dekády je napětí přivedeno opět na sledovač, ale na samostatný obvod *OP07CN*. Výrobce je společnost Texas Instruments. Jde o integrovaný obvod, který obsahuje pouze jeden precizní operační zesilovač. Výrobce garantuje nízkou hodnotu offsetu a velké $CMR = 120 dB$. Prakticky je svými specifikacemi podobný *LT1013*, který ale obsahuje dva OZ. Rovněž se tímto eliminuje zatěžování děliče napětí a zvýší se stabilita napětí. Z výstupu OZ je toto napětí vedeno do obvodu *AD620* a *LM3914*.

Jako zdroj $10 V$ pro napájení odporové dekády k nastavení kompenzace a odporové dekády s komparátory v zobrazovači je použit zdroj referenčního napětí *MAC01* výrobce Tesla národní podnik. Jde sice o již výrobně starší obvod, ale byl k dispozici a byl poskytnut vedoucím práce. Jde o přesný zdroj, který pracuje bez problémů. Není důvod jej nevyužít. Pokud by se ale mělo jednat o sériovou výrobu, bylo by nutné vybrat obvod jiný z důvodu

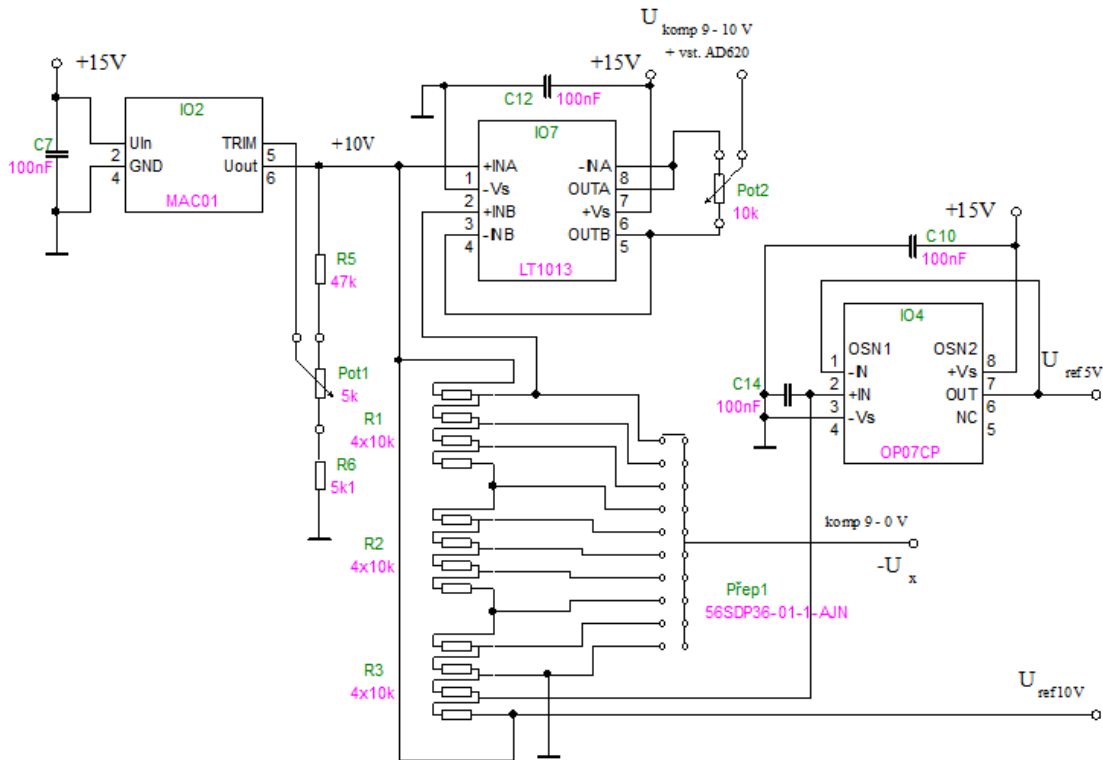
snadné dostupnosti. Např. obvod *REF01CP* od společnosti Analog Devices. Ten má ale již pouzdro DIP8, oproti kovovému pouzdru IO-6/1. Obvod umožňuje nastavení napětí pomocí externího potenciometru, popř. trimru. Výrobce popisuje obvod jako nízkošumový a velkou teplotní stabilitou. Byl určen zejména pro A/D převodníky. Maximální povolený výstupní proud obvodu je 21 mA a maximální přípustné napájecí napětí dosahuje hodnoty až 40 V. Proudová dimenzace by měla být naprosto dostačující. Součet proudů, kterými bude obvod zatížen:

$$I = I_{D10} + I_{D5} + I_Z + I_{REG} = \frac{U_{10}}{R_{D10}} + \frac{U_{10}}{R_{D5}} + \frac{U_{10}}{R_Z} + \frac{U_{10}}{R_{REG}} = \quad (2.10)$$

$$= \frac{10}{100000} + \frac{10}{20000} + \frac{10}{21200} + \frac{10}{57100} \doteq 1,25 \cdot 10^{-3} = 1,25 \text{ mA} \quad (2.11)$$

Kde U_{10} je napětí referenčního zdroje 10 V, I_{D10} je proud tekoucí dekádou R_{D10} složenou z 10 x 10 kΩ, I_{D5} je proud tekoucí rezistorovým děličem napětí R_{D5} složeným z 2 x 10 kΩ, I_Z je odporová dekáda R_Z uvnitř integrovaných obvodů zobrazovače s rezistorem, který byl sériově zapojen mezi obvody z důvodu korekce offsetu a I_{REG} je proud tekoucí děličem napětí s potenciometrem R_{REG} sloužícím k nastavení správné hodnoty výstupního napětí. Z výpočtu je patrné, že obvod bude s rezervou vyhovovat.

K přesnému nastavení výstupního napětí slouží dělič napětí s potenciometrem. Výrobce udává, že by měl být použit potenciometr 100 kΩ a bez děliče napětí. Toto je ale pouze doporučené zapojení. Je možné použít pouze 10 kΩ. Jelikož v datovém listu není uvedeno, jak dělič napětí vypočítat (nejsou dostupné hodnoty napětí a proudy), byl dělič napětí stanoven metodou testování jednotlivých rezistorů s důrazem na to, aby zdroj napětí nebyl proudově přetížen. Dle zkoušek byly stanoveny hodnoty rezistorů $R5$ na 47 kΩ, což je rezistor připojený na stranu výstupní, desetiotáčkový potenciometr *Pot2* 5 kΩ je zapojen uprostřed s tím, že jezdec je vyveden na nožičku *TRIM* sloužící k nastavení, a rezistor $R6$ 5,1 kΩ je připojen na stranu *GND*. Toto nastavení nám umožňuje nastavit výstupní napětí v rozsahu 9,95 V – 10,05 V. To je tedy o ±0,5 %.

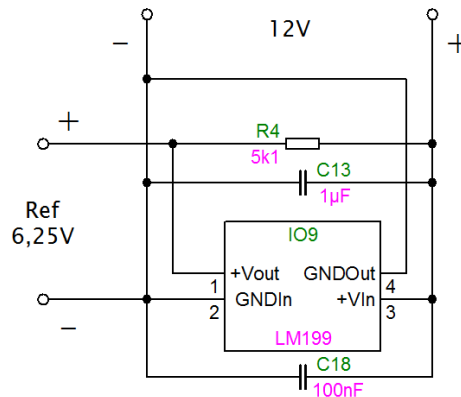


Obr. 2.9 - Zdroj kompenzačního napětí

[6], [9], [11], [17], [19]

2.2.5 Zdroj výstupního referenčního napětí

Zdrojem referenčního napětí je obvod *LM199* od společnosti Linear Technology, což je precizní zdroj referenčního napětí. Obvod je teplotně kompenzovaná Zenerova dioda. Zaručuje stabilní výstupní napětí, které se s teplotou nemění. Obvod má vestavěnou kompenzaci – ohřev součástky. Ten zajišťuje za každých okolností stabilní teplotu. Rovněž je možné jej vybavit teplotním štítem, aby se stabilita ještě více navýšila. Obvod je zapojen tak, jak je uvedeno v datovém listě. Výstupní napětí je nastaveno na hodnotu 6,25 V.

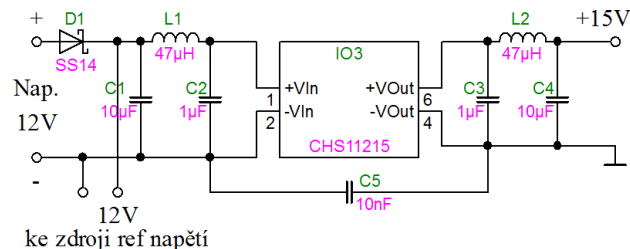


Obr. 2.10 - Zdroj výst. referenčního napětí

[15]

2.2.6 Galvanické oddělení

K tomu, aby bylo možné měřit napětí s použitím pouze jednoho zdroje napájecího napětí je nutné zajistit, aby obvodem netekly nežádoucí proudy. Také je potřeba zajistit, aby obvod v dané konfiguraci fungoval spolehlivě a korektně se za sebou řadil do série zdroj měřeného napětí a zdroj kompenzačního napětí. Z tohoto důvodu je nutné obvod kompenzátoru galvanicky oddělit od zdroje napájecího napětí a od zdroje referenčního napětí. Pro tuto funkci byl vybrán DC/DC měnič od společnosti Hypel, obvod *CHS11215*.



Obr. 2.11 - Zapojení DC/DC měniče

Obvod byl rovněž doplněn filtry na vstupu i výstupu, ačkoli je již filtry vybaven ve vnitřním zapojení. Na vstup se filtr umísťuje z důvodu omezení vlivu měniče na ostatní připojené obvody a napájecí zdroj. Matematické určení tohoto filtru nebylo možné. Výrobce měniče neudává frekvenci, se kterou měnič pracuje v datovém listu. Hodnoty součástek byly určeny pouze na základě zkušenosti, což mi poradil můj vedoucí práce, kdy pro tento měnič, který pracuje na frekvenci 52 kHz , je výše uvedená konfigurace filtrů běžně používaná a dostačující. Obecně je ale nutné filtr vypočítat s ohledem na protékající proud obvodem a na pracovní frekvenci měniče. Protékající proud se určí součtem proudů protékajících připojenými obvody a vždy se uvažuje maximální odběr. Kondenzátory se napěťově

dimenzují minimálně na pracovní napětí v součtu s maximálním zvlněním. Jinak by mohlo dojít k průrazu kondenzátoru. Indukčnost tlumivky a kapacita kondenzátoru se určí dle protékajícího proudu a pracovní frekvence. Je nutné brát v úvahu skutečnost, že měnič produkuje zkreslení hlavně v oblasti proudu. Jeho odběr je pulzní. Kondenzátor s menší kapacitou má přednostně za úkol filtrovat vysokofrekvenční složky rušení. Měnič je koncipován jako zvyšující, jelikož výstupní napětí je 15 V a vstupní je v rozmezí 9 – 12 V. Max. zvlnění výstupního napětí výrobce udává 0,25 V. Zvlnění na výstupu se eliminuje výstupním filtrem, přednostně cívku a kapacitou kondenzátoru 10 μF . VF složky filtruje kondenzátor 1 μF . Vždy je výhodnější používat více kondenzátorů menších kapacit zapojených paralelně. Výhoda je v rychlosti, jelikož jeden kondenzátor vykazuje jistý vnitřní odpor. Pokud kondenzátorů zapojíme paralelně více, vnitřní odpory se budou zmenšovat stejně, jako při paralelním řazení rezistorů. Obecně se také dá říci, že čím vyšší je pracovní frekvence měniče, tím důležitější je používání kvalitních kondenzátorů s nízkým vnitřním odporem.

[14]

2.3 Teorie fungování navrženého obvodu

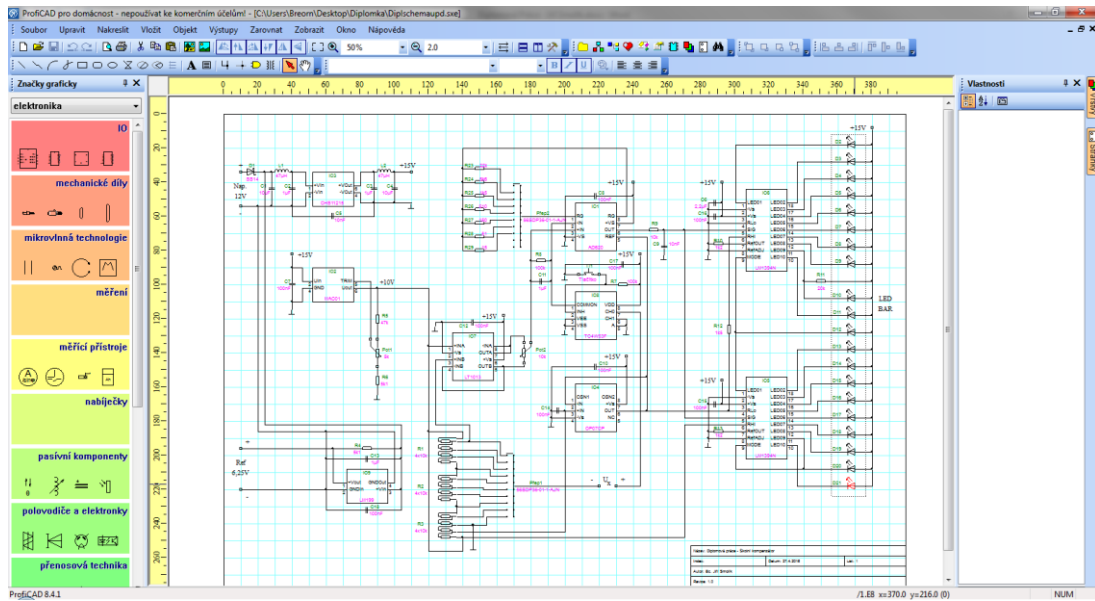
Obvod je připojen na zdroj napájení přes galvanické oddělení, které zajišťuje DC/DC měnič s doplněnými filtry. Pro zajištění správných referenčních napětí je použit zdroj referenčního napětí MAC01, ze kterého je napájen kaskádový dělič napětí tvořený teplotně stabilními 10 k Ω rezistory. Dělič zajišťuje jednotlivé kroky pro přepínač rozsahu a dále zajišťuje 5 V referenční zdroj napětí pro LED zobrazovač a pro OZ AD620, kde je měřen rozdíl kompenzačního napětí a napětí měřeného. Výstup z kaskády je nejprve přiveden do sledovače, aby nedocházelo k ovlivňování napětí vlivem tekoucího proudu a z toho plynoucího úbytku napětí. Změna rozsahu funguje na jednoduchém principu, kdy pokud je měřené napětí nižší, než 9 V, připojuje se k němu do série příslušné napětí z děliče. Oba zdroje, tedy měřené napětí U_x a napětí z přepínače rozsahu, se sčítají. Vždy se tedy dosáhne dorovnávání napětí, které přesáhne hodnotu 9 V. Tlačítko *TL1* slouží k nastavení log 0 na multiplexeru a tím dojde k propojení invertujícího vstupu rozdílového zesilovače a svorky $+U_x$. Kompenzační napětí 9 V a 10 V, mezi kterými se pohybuje jezdec potenciometru, jsou získávány ze zdroje referenčního napětí 10 V a z prvního stupně odporové dekády. Aby nedocházelo k ovlivňování úbytků napětí na dekádě a zdroji referenčního napětí, jsou tyto

stupně připojeny přes sledovače. U kompenzačního napětí, které se reguluje potenciometrem, se vždy reguluje mezi hodnotou 9 V a 10 V. Rozdíl je 1 V. Jezdec potenciometru je připojený na neinvertující vstup rozdílového zesilovače. Výsledná odchylka se zesílí a je přivedena na zobrazovač. Obvody LM3914 provádějí komparaci tohoto napětí s napětím referenčním a dle úrovně se rozsvítí příslušný stupeň na LED BAR grafu.

2.4 Sestavení schéma zapojení

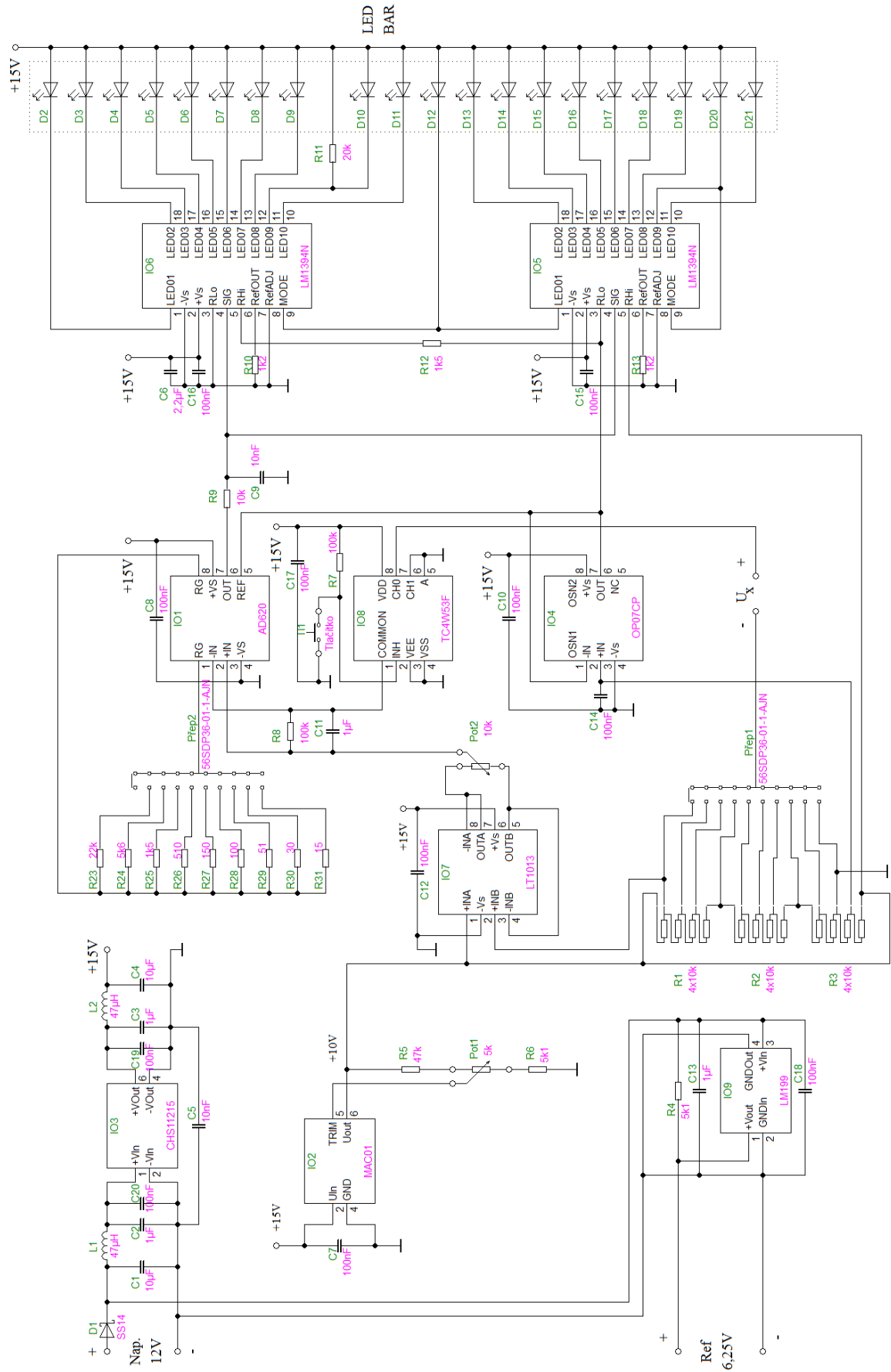
Schéma zapojení je sestaveno z jednotlivých bloků, které byly popsány v předešlých kapitolách. Byly doplněny keramické blokovací kondenzátory ke všem integrovaným obvodům o hodnotách 100 nF. Ty slouží k zajištění stability napájecího napětí i v době, než reaguje regulátor napájecího napětí. Vlivem aktivity obvodů může napájecí napětí krátkodobě poklesnout. Toto není žádoucí jev a je to nejvíce patrné u logických obvodů. Samozřejmě se ale vyskytuje i u obvodů analogových. Dále byla doplněna Shottkyho dioda na vstup napájení. Ta je umístěna jako ochrana proti přepólování.

Ke kreslení schématu byl použit program *ProfiCAD*, který umožňuje i ve své volně šiřitelné verzi velmi rychle a jednoduše, na rozdíl od programu *EAGLE*, zpracovat přehledná schémata a to nejen pro elektroniku, ale i pro ostatní odvětví. V softwaru se velmi jednoduše kreslí jednotlivé značky elektronických prvků. Základní sadu značek program již obsahuje. Ale jde opravdu jen o ty nejzákladnější. Tyto ale umožňují provádět modifikace a na jejich základě kreslit vlastní značky. Z mého pohledu jde o relativně zdařilý program, který ve své plné verzi umožňuje také export seznamů součástek a dalších použitých zařízení. Ovládání je velmi intuitivní a rychlé.



Obrázek 2.1 - Rozhraní programu ProfiCAD

Zpracované schéma zapojení je dostupné v příloze této práce a rovněž ve větší podobě jako volně přiložená příloha formátu A3 z důvodu větší přehlednosti. Seznam použitých součástek je uveden v *Tab. 2.2 - Seznam použitých součástek*.



Obr. 2.12 - Schéma zapojení kompenzátoru

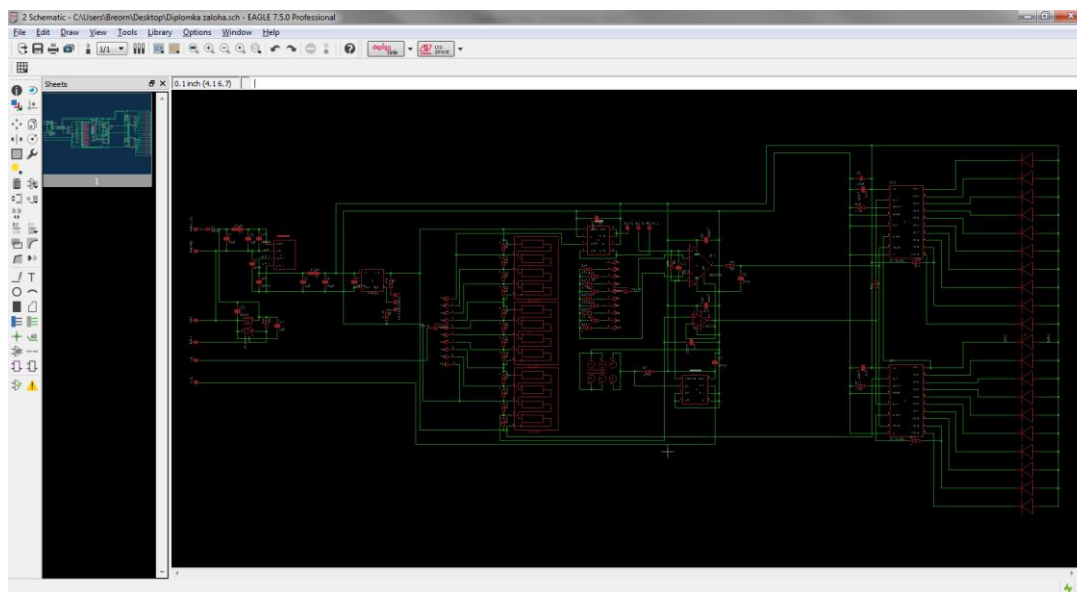
Tab. 2.2 - Seznam použitých součástek

Označení	Pouzdro	Hodnota	Pozn.	Označení	Pouzdro	Hodnota	Pozn.
R1		4x10k		L1	3225	47μH	
R2		4x10k		L2	3225	47μH	
R3		4x10k		C1	3225	10μF	
R4	0805	5k1		C2	3216	1μF	
R5	0805	47k		C3	3216	1μF	
R6	0805	5k1		C4	3225	10μF	
R7	0805	100k		C5	3216	10nF	
R8	0805	100k		C6	3225	10μF	
R9	0805	10k		C7	3216	100nF	
R10	0805	1k2		C8	3216	100nF	
R11	0805	20k		C9	3216	10nF	
R12	0805	1k5		C10	3216	100nF	
R13	0805	1k2		C11	3216	1μF	
R14	0805		ploška	C12	3216	100nF	
R15	0805		ploška	C13	3216	1μF	
R16	0805		ploška	C14	3216	100nF	
R17	0805		ploška	C15	3216	100nF	
R18	0805		ploška	C16	3216	100nF	
R19	0805		ploška	C17	3216	100nF	
R20	0805		ploška	C18	3216	100nF	
R21	0805		ploška	C19	3216	100nF	
R22	0805		ploška	C20	3216	100nF	
R23	0805	22k		IO1	DIL08	AD620	
R24	0805	5k6		IO2	IO-6/1	MAC01	
R25	0805	1k5		IO3		CHS11215	
R26	0805	510		IO4	DIL08	OP07CP	
R27	0805	150		IO5	DIL18	LM3914	
R28	0805	100		IO6	DIL18	LM3914	
R29	0805	51		IO7	SOP8	LT1013	
R30	0805	30		IO8	SOP8	TC4W53F	
R31	0805	15		IO9	TO39/4	LM199	
Přep1		56SDP36	10 poloh	T11		tlačítko	
Přep2		56SDP36	10 poloh	Pot1		5k	10-ti otáčkový
D1	DO214AC	SS14		Pot2		10k	10-ti otáčkový
				LED	DC20		LED BAR 20 SEG

2.5 Návrh DPS

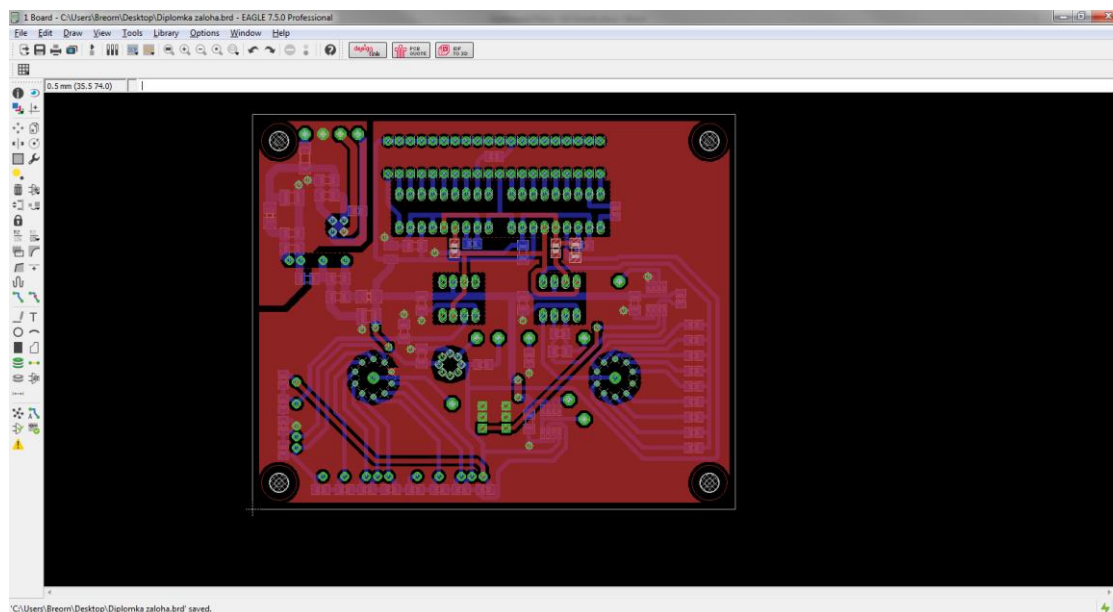
Při návrhu desky byl zvolen způsob kombinované montáže, tzn. použití klasických součástek a SMD součástek.

K návrhu desky plošných spojů byl použit software EAGLE od společnosti CADSoft USA. Software je zaměřen na kresbu schémat a vytváření plošných spojů. Z toho je umožněn export pro výrobce desky a případný tisk ve správném měřítku. Software sám o sobě obsahuje od výrobce bohatou databázi vyráběných elektronických součástek, avšak zdaleka ne všechny. Pokud bychom měli brát v úvahu i polovodiče bývalé Tesly, tak tyto součástky nejsou zastoupeny vůbec. V dnešní době jde ale už spíše o historické obvody. Velkou část součástek je třeba stáhnout z internetu, popř. vytvořit vlastní knihovny a součástky ručně doplnit dle datových listů od výrobce. Způsob definic součástek je ale jednoduchý. Je třeba založit součástku a k ní přiřadit schematickou značku s vývody. V dalším modulu se nakreslí pouzdro, kde je třeba také přidat jednotlivé vývody a to tak, jak jsou fyzicky na součástce umístěné. Každá součástka může mít více variant pouzder (např. kovová, DIL, SOP atd.). Pouzdra se kreslí vždy pohledem na součástku ze shora. Je také důležité nakreslit obrys součástky, aby bylo při návrhu DPS jasné, kam bude fyzicky zasahovat. Aby nedošlo k případu, kdy se jednotlivé součástky vedle sebe nevejdou. Neméně důležitá je definice otvoru a typu padu, což je otvor pro nožičku a vodivá cesta kolem nožičky na DPS. Obvykle se udává rozměr nožičky součástky, ke kterému se přičítá 0,2 mm. V případě konstruovaného obvodu bylo nutné nakreslit prakticky všechny integrované obvody a u pasivních součástek bylo nutné upravit velikosti SMD plošek. Plošky v software jsou připraveny pro strojní osazování s vysokou přesností a ručně by osazení nebylo prakticky možné. Musím uvést, že na tuto skutečnost jsem byl upozorněn svým vedoucím práce, za což bych rád poděkoval. Osobně jsem to nevěděl, protože až do této doby jsem se SMD vyhýbal a používal pouze součástky s drátovými vývody a to z důvodu velikosti. Dále nebyly správně umístěné blokové kondenzátory (daleko od integrovaných obvodů) a vodivé cesty byly příliš úzké. V prvním návrhu nebyla dodržena pravidla pro správný návrh. První návrh desky byl tedy absolutně nepoužitelný. Druhá verze již byla v pořádku a realizována.



Obrázek 2.2 - EAGLE - rozhraní pro tvorbu schémat

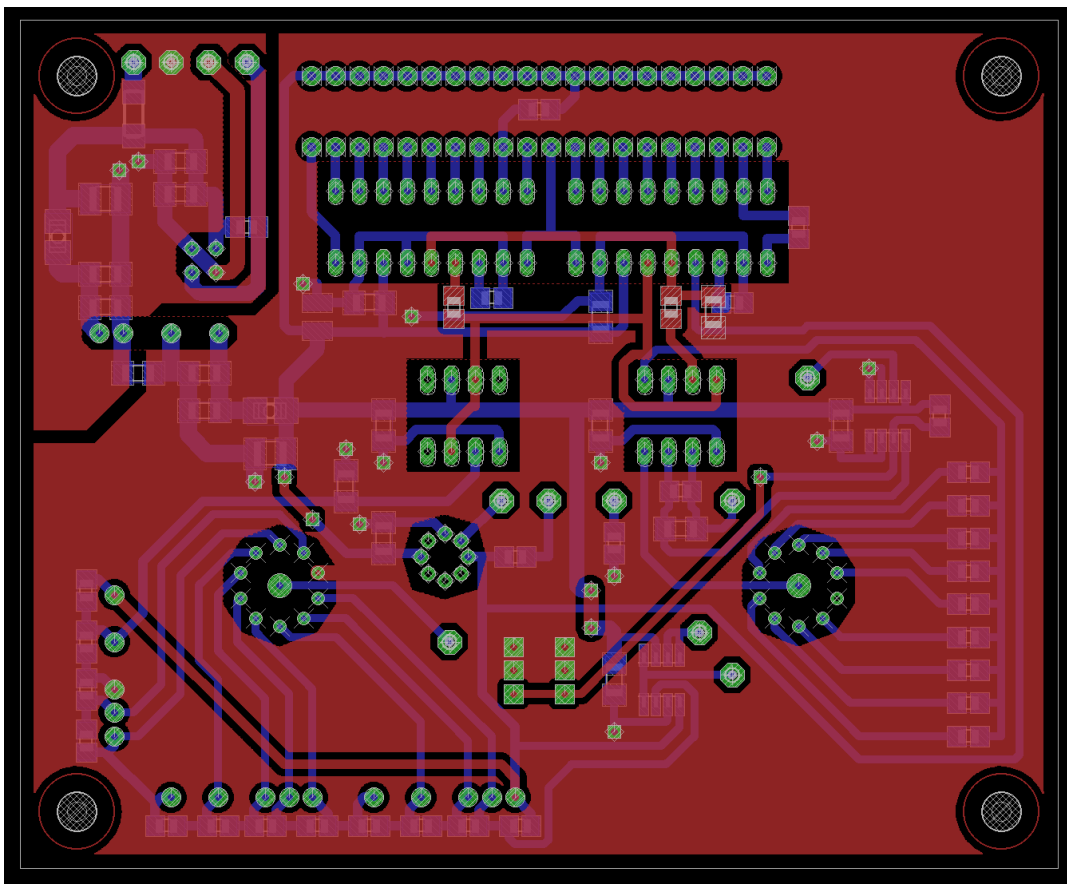
Kreslení schémat zapojení se provádí v samostatném modulu. Schéma by mělo být nakresleno přehledně kvůli snazší orientaci. Software není nikterak složitý, avšak práce s ním je často neintuitivní a spousta ovládacích prvků je, dle mého názoru, nelogická. Otázkou zůstává, zda-li by se daly některé kroky naprogramovat lépe. Jde v celku o komplexní software. Dalším problémem je občas špatné značení některých pouzder. Je nevýhodné, že každá knihovna má svá pouzdra. Ideálním řešením by bylo spíše pouzdra oddělit, jelikož jde o normalizované rozměry. Součástky se vybírají z knihovny a vždy je potřeba vybrat z knihovny typ, o který se skutečně jedná. Jedna součástka může mít, jak již bylo zmíněno, několik typů pouzder. Rezistory a kondenzátory je také nutné vybrat ve správné velikosti, jinak by jiné zakoupené typy nešly na desku osadit. Po skončení propojení veškerých vývodů dle návrhu je důležité provést řádně kontrolu. Program obsahuje modul na kontrolu „elektrických pravidel“, který by měl provést základní kontrolu. Např., zda-li není nějaký vývod součástky zapojen do zkratu atd. Není ale dobré na to zcela spoléhat. Lepší je provést dobrou vizuální kontrolu ručně. Pokud je schéma správně nakreslené, přejde se stisknutím switch to board na obrazovku, kde je návrhové prostředí desky.



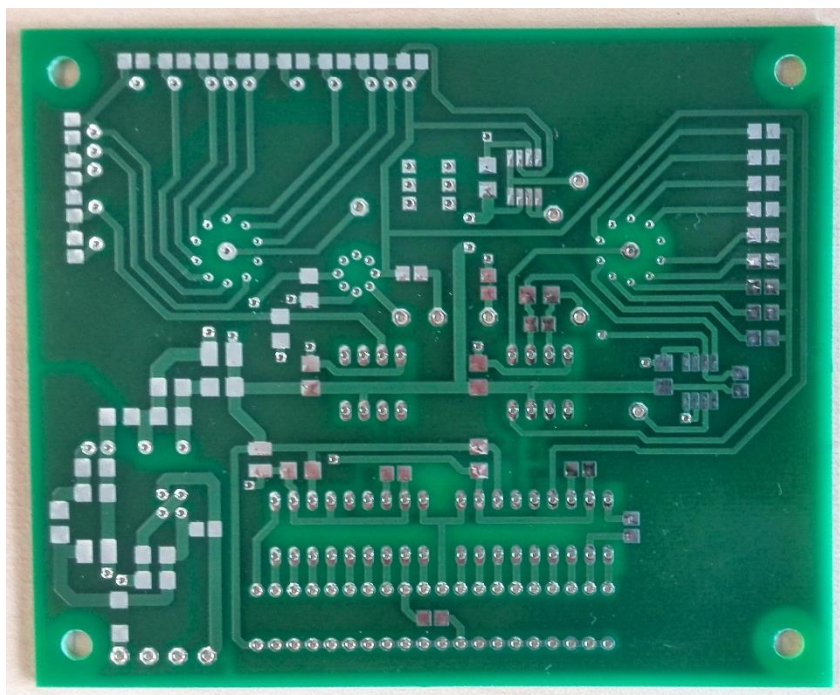
Obrázek 2.3 - EAGLE - rozhraní pro návrh DPS

V prostředí návrhu desky se zobrazí ohraničená plocha, která představuje desku, a „vrabčí hnízdo“ se součástkami propojenými spoji tak, jak je ve schématu. Tyto spoje jsou pouze pro orientaci. Prvním krokem je správně upravit hranice desky, tj. nastavit velikost, jak bude ve skutečnosti. Potom se přistupuje k rozmisťování jednotlivých součástek. Je samozřejmě důležité rozmístit součástky správně s ohledem na vlastnosti krabičky a dalších prvků. Dále je nutné správně používat vrstvy. Základní jsou dvě. TOP, což je vrchní strana, a BOTTOM, což je spodní strana desky. V tomto případě bylo použito dvoustranné desky, kdy se klasické součástky umísťovaly na vrchní stranu a veškeré SMD součástky na spodní stranu. Při propojování součástek je dobré nejprve propojit obvody s napájením, aby se dalo zachovat pravidlo krátké proudové smyčky a správného umístění blokovacích kondenzátorů poblíž integrovaných obvodů. Tyto spoje je také nutné provádět dostatečně dimenzované, tedy vybrat správnou tloušťku vodivé cesty. Při prvním mém návrhu toto nebylo dodrženo, musel jsem tedy návrh přepracovat. Na tyto hrubé nedostatky jsem byl upozorněn vedoucím práce. Spoj *GND* je vhodné vést na horní straně desky a využít celou plochu, zatímco ostatní cesty se umístí na spodní vrstvu desky společně s SMD součástkami. U integrovaných obvodů se nejprve provede připojení blokovacího kondenzátoru a až potom se umístí propojovací cesta na společnou *GND*. Během propojování jednotlivých komponent je dobré dobře promýšlet dopředu, kudy bude cesta nejvýhodnější. Prakticky se dá říci, že deska se přepracovává opakovaně. Nakonec se provede umístění společné *GND* pomocí polygonu a umístí se správný izolační příkop, který prochází pod DC/DC měničem a kondenzátorem C5. To se provádí kvůli omezení přeslechů. Jakmile jsme s propojováním spokojeni, provede

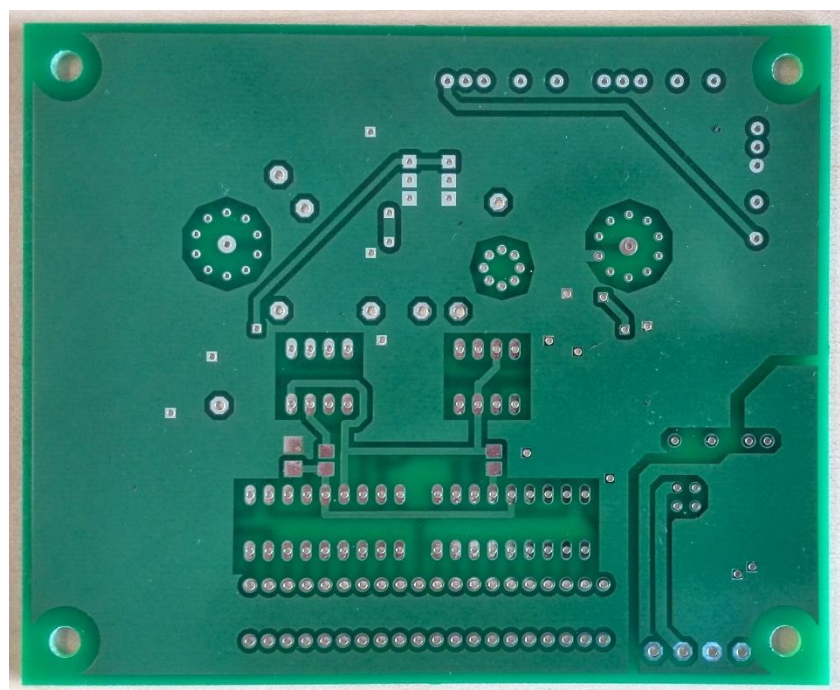
se kontrola izolačních mezer a kontrola umístění vodivých cest. Na to je v software modul, který je ale nutné správně nakonfigurovat. Nakonec se provede export návrhu v souladu s pravidly výrobce. Obvykle je dostupný *JOB*, který provede export všeho potřebného vč. velikostí otvorů pro součástky a pomocných otvorů. Dle tohoto exportu společnost desku vyrobí. Výroba nebyla prováděna v amatérských podmínkách fotocestou, ale byla zadána společnosti PragoBoard s.r.o.. Pro správné vyrobení je třeba exportovat soubory se všemi vrstvami, které návrh obsahuje. Dále se exportují soubory s nepájivou maskou, vrtáním otvorů, ořezem a případným potiskem (u tohoto návrhu nebyl prováděn).



Obrázek 2.4 - Navržená oboustranná DPS



Obr. 2.13 - Vyrobená DPS - zadní strana



Obr. 2.14 - Vyrobená DPS - přední strana

[21]

2.6 Osazení DPS

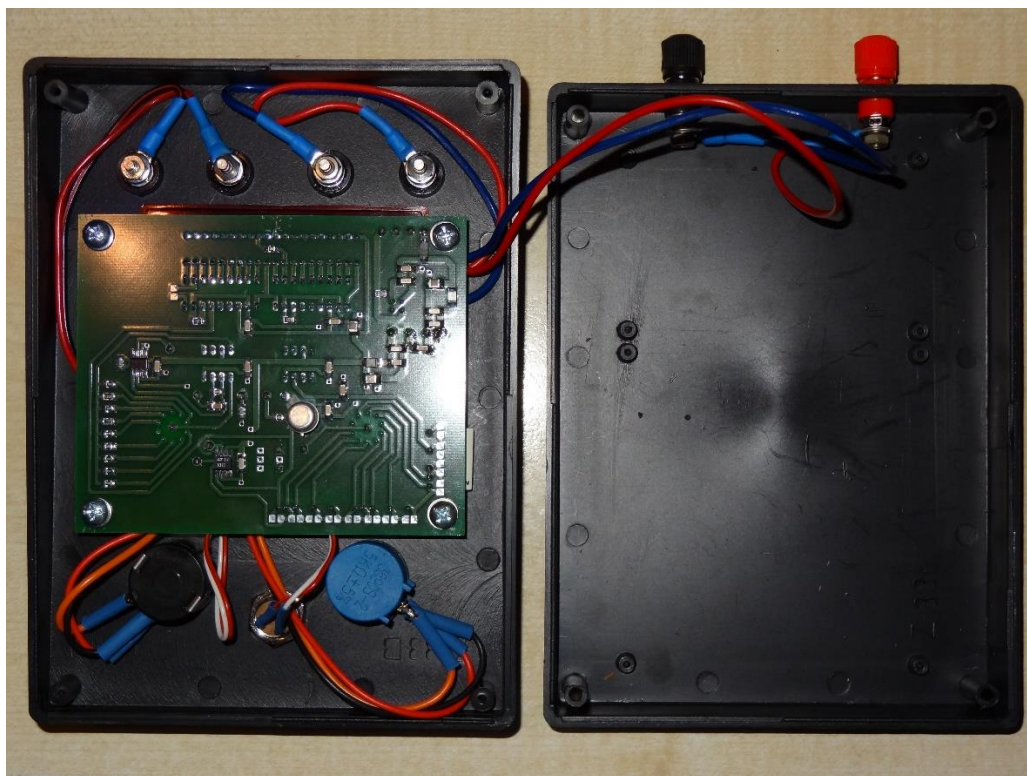
Deska plošných spojů byla osazována za použití mikropájky, kterou mám ve vlastnictví. Nejprve bylo přistoupeno k osazování SMD součástek. První se osazují rezistory a kondenzátory, tedy pasivní součástky. Je dobré dbát na to, aby označení všech součástek bylo čitelné jedním směrem. U těchto součástek se postupuje tak, že se na plošku nanese malé množství pájky (cínu), do které se následně jedna strana součástky pomocí pinzety zasune. Následně se připájí druhá strana pouzdra součástky.

Následuje osazení SMD integrovaných obvodů. To se provádí tak, že se nanese malé množství pájky na rohovou plošku. Následně se přiloží obvod a ploška se znovu zahřeje. Obvod se vyrovná a dousadí na DPS. Nechá se ztuhnout. Dále se zapájí vývod uhlopříčně. Tím máme součástku usazenou a zapájíme zbytek nožiček.

Obvody s klasickou montáží se pájí až nakonec. Je to z toho důvodu, aby nepřekážely při pájení SMD kvůli svým rozměrům. Opět platí pravidlo, že první se osazují pasivní součástky a nakonec polovodiče a integrované obvody.

Nakonec se provede usazení přepínačů a vstupních a výstupních vodičů.

Po ukončení pájení se deska musí očistit od kalafuny. To se provádí pomocí technického lihu a štětce. Očištění je třeba provést důkladně. Rezidua kalafuny na sebe mohou vázat vlhkost a to by způsobovalo oxidaci spojů.



Obr. 2.15 - Osazená DPS zamontovaná do krabičky

2.7 Montáž kompenzátoru

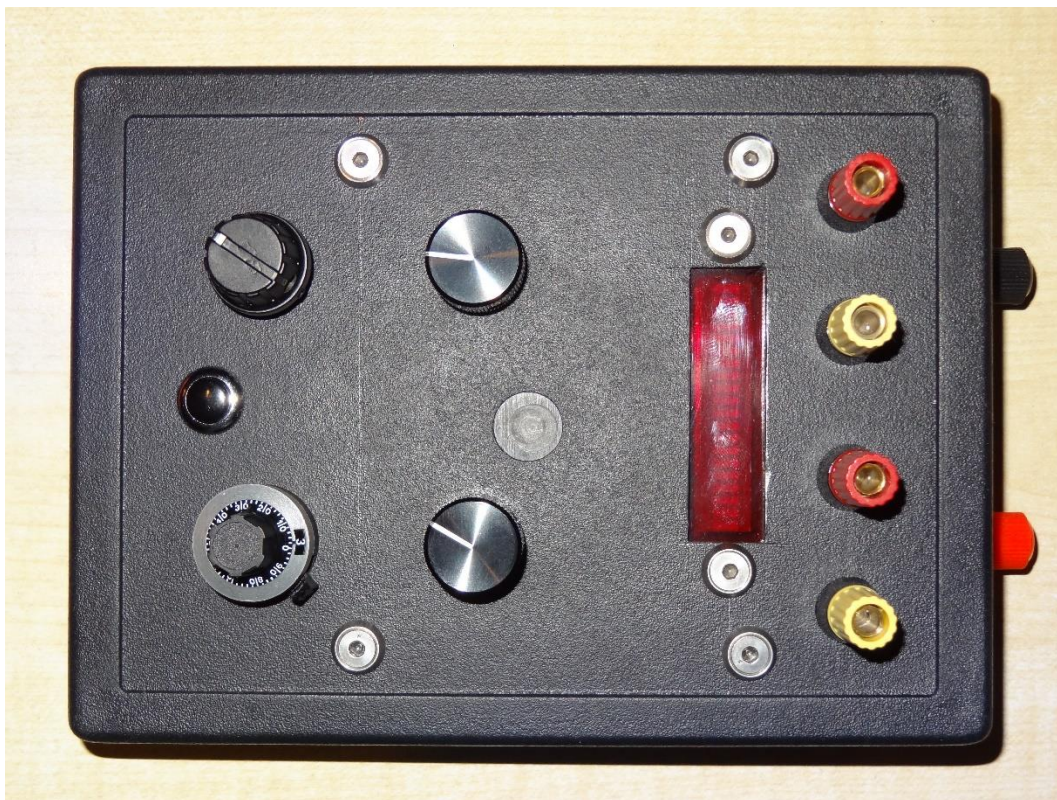
Pro uložení DPS kompenzátoru byla vybrána rozměrově odpovídající standardní plastová krabička *KP26*, kterou je možno zakoupit v maloobchodní síti obchodníků s elektronickými součástkami.

Na přední stranu byly umístěny svorky pro připojení měřeného napětí a výstupní svorky zdroje referenčního napětí. Rovněž zde byly umístěny veškeré ovládací prvky a okénko pro zobrazovač, které bylo vybaveno červeným filtrem. Červená barva totiž tak značně nepohlcuje červené světlo a LED BAR graf je snadno čitelný. Svorky pro připojení napájecího zdroje byly umístěny na zadní straně krabičky. Není totiž potřeba s nimi tak často manipulovat.

Jako svorky byly vybrány šroubovací zdířky, jinak také označované jako „banánky“, které umožňují používání standardní kabeláže, která se obvykle v laboratořích vyskytuje. Veškeré vnitřní vodiče ke svorkám byly osazeny kabelovými oky o průměru 4 mm, které jsou k vodičům připájeny. Toto řešení zajistí kvalitní spojení mezi vodičem a banánkovou

zdírkou. Konce kabelových ok byly opatřeny smršťovací bužírkou, aby bylo zamezeno nechtěnému zkratu. Stejné opatření k zamezení nechtěnému zkratu je provedeno u všech pájených spojů spínače a potenciometrů.

Rozmístění jednotlivých komponent na krabičce bylo řešeno s ohledem na vnitřní umístění DPS a také na umístění zobrazovače. Veškeré otvory byly vyvrtány ruční elektrickou vrtačkou a následně zbaveny otřepů ručními frézami. Otvor pro zobrazovač byl vyříznut ruční vibrační pilkou a následně upraven do patřičného rozměru ručními pilníky různých typů. Plast na krabičce se velmi obtížně opracovává, jelikož je měkký a velmi špatně vede vrták. Řezání je rovněž obtížné. Plast měl velkou tendenci k roztékání a tvoření velkých otřepů, a to i přes to, že bylo řezáno na nejnižší rychlost. I přes tyto obtíže bylo dosaženo relativně vysoké přesnosti a symetričnosti v umístění potenciometrů a dalších komponent.



Obr. 2.16 - Smontovaný kompenzátor

3 Oživení a ověření funkčnosti

Po osazení desky plošných spojů bylo přistoupeno k oživení kompenzátoru a ověření správné funkčnosti. Nejprve je třeba uvést, že zařízení je po odstranění všech pochybení a nedostatků plně funkční a splňuje nároky na požadovanou přesnost, která činí 0,01 %. Veškeré nedostatky a nalezené komplikace jsou popsány níže.

3.1 Objevené komplikace a závady

3.1.1 Nevhodný DC/DC měnič

Během oživování kompenzátoru bylo zjištěno, že navržený typ DC/DC měniče nevyhovuje. Během zapojení zařízení k napájení bylo zjištěno, že do zařízení vtéká na vstupu příliš velký proud, který činil 230 mA. Rovněž bylo měřením digitálním multimetrem zjištěno, že napětí za DC/DC měničem je příliš nízké. Činilo pouze 2,5 V, ačkoli by mělo být 15 V. To vyúsťovalo v nepředvídatelné chování celého obvodu, kdy indikátor vyvážení svítil z poloviny celý.

Vylučovací metodou a měřením bylo zjišťováno, zda-li nedošlo během osazování ke zkratu v nějakém z míst na DPS. Provádělo se připojením napájení a omezením maximálního protékajícího proudu na napájecím zdroji, aby nedošlo k zničení spojů, popř. nějaké ze součástek. Bylo voltmetrem prověřováno, zda-li není v nějakém z míst na napájecí cestě napětí o hodnotě 0 V. Hodnota 0 V by totiž potvrzovala zkrat v blízkosti místa měření. To nebylo potvrzeno. Proto se přistoupeno k ověření měniče jako takového. Byla vyjmuta cívka L2 za DC/DC měničem. Tím se měnič odpojil od zátěže. Znovu se provedlo připojení napájecího napětí k DC/DC měniči. Nyní ale již byl proud nízký a výstupní napětí z měniče odpovídalo 15 V. Vyzkoušel se tedy jiný měnič stejného modelu a od stejného výrobce, ale stav byl po připojení zátěže stále stejný. Vyhodnocením tedy je, že měnič nesnese tak velký zátěžný proud po připojení k napájení, ačkoli by dle datového listu měl tento proud snést. Je stavěn na trvalé zatížení o hodnotě 60 mA, přičemž proud protékající obvodem je pouze 40 mA.

Provedla se tedy výměna za jiný typ od jiného výrobce, ale s kompatibilním zapojením vývodů. Vnější rozměry pouzdra jsou dokonce nižší, než u původně použitého měniče. Výměna byla provedena za model *TMH1215S* od společnosti Traco Power. Tento typ je

stavěn na trvalou proudovou zátěž o hodnotě 200 mA. S tímto měničem byl obvod již plně funkční a stabilní.

[25]

3.1.2 Zapojení MAC01

Během oživování byla rovněž zjištěna komplikace v nesprávném zapojení vývodů obvodu MAC01. Byl zapojen (osazen) zrcadlově, což způsobilo, že napětí za zdrojem referenčního napětí bylo příliš vysoké. Změřena byla hodnota blížíící se 14,8 V. Tuto vadu nezpůsobil špatný návrh, jelikož bylo postupováno dle katalogu, který je dostupný na internetu. Chyba byla v nesprávném popsání pohledu v katalogu, přičemž byl pro přiřazení vývodů v software *EAGLE* použit právě a pouze tento jeden informační zdroj. Katalogové listy jsou z roku 1986. Starší katalog z roku 1983 měl vývody popsány správně, ale tento nebyl během návrhu DPS a konfigurování knihovny v *EAGLE* momentálně k dispozici. Tato vada byla odstraněna zapojením obvodu z druhé strany desky plošných spojů, kde bylo tímto zajištěno správné pořadí zapojení vývodů. Po opravě již bylo napětí v pořádku a hodnota odpovídala 10 V.

70 1 IO PRO VŠEOBECNÉ POUŽITÍ • STABILIZÁTORY A REGULÁTORY NAPĚTÍ

MAC 01, MAB 01H, MAB 01D ZDROJ REFERENČNÍHO NAPĚTÍ 10 V

MAC 01, MAB 01H, MAB 01D ИСТОЧНИКИ ОПОРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ 10 В • MAC 01, MAB 01H, MAB 01D REFERENCE VOLTAGE SOURCES 10 V • MAC 01, MAB 01H, MAB 01D REFERENZSPANNUNGSQUELLEN 10 V

Integrovaný obvod pro zdroje přesného referenčního napětí +10 V s nízkým příkonem, malým šumem a vysokou teplotní stabilitou, vhodný především pro A/D a D/A převodníky.

Zapojení vývodů (pohled shora)

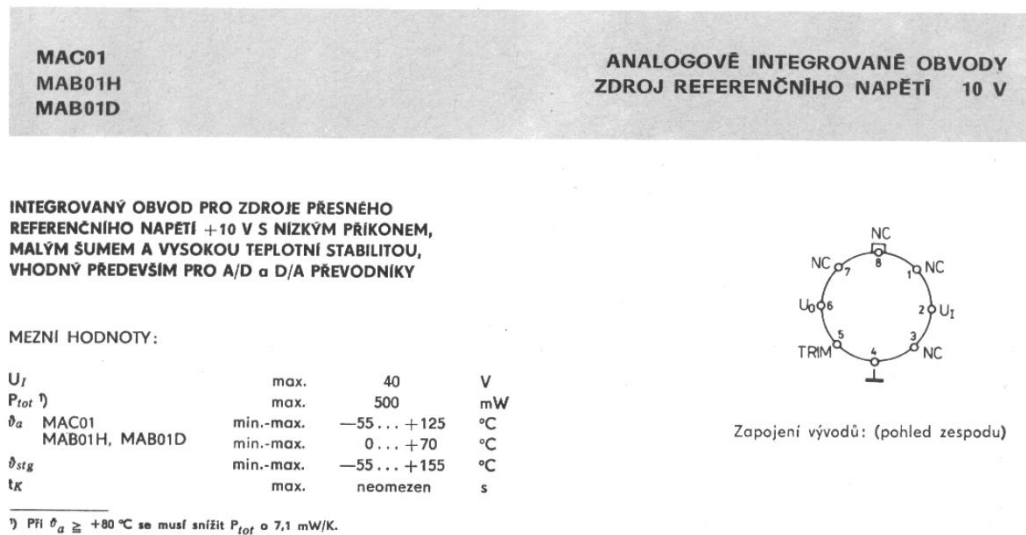
Mezní hodnoty:

U_I	max.	40	V
$P_{tot}^{1)}$	max.	500	mW
ϑ_a	min.–max.	-55 ... +125	°C
MAC 01	min.–max.	0 ... +70	°C
MAB 01H, MAB 01D	min.–max.	-55 ... +155	°C
ϑ_{sig}	max.	neomezen	s
t_K			

¹⁾ Při $\vartheta_a \geq +80$ °C se musí snížit P_{tot} o 7,1 mW/K.

Pouzdro IO-6/1

Obr. 3.1 - Katalogový list MAC01 – chybný [20]



Obr. 3.2 - Katalogový list MAC01 – správný [24]

3.1.3 Zapojení potenciometrů

Během zapojování došlo rovněž k záměně zapojení potenciometrů. To způsobovalo špatné nastavení hodnot napětí na zdroji 10 V. Toto vzniklo náhodnou záměnou součástky během sestavování. Tato závada byla odstraněna správným zapojením.

3.2 Úprava parametrů

3.2.1 Úprava nastavení zesílení

Během zkoušky měření kompenzátozem bylo zjištěno, že nejvyšší dvě hodnoty zesílení jsou příliš vysoké. Na indikátoru byl již spíše patrný šum operačního zesilovače a hodnotu nebylo rovněž možné vykompenzovat. Hodnoty zesílení, jímž odpovídají hodnoty rezistorů 15 Ω a 30 Ω byly odpojeny, respektive přepínač byl nastaven pomocí kolíčků tak, aby tyto hodnoty nešly zvolit. Nyní je k dispozici 8 stupňů zesílení. Kompenzátozem i přes toto nastavení umožňuje pracovat s již zmíněnou přesností.

3.2.2 Úprava hodnot odporové dekády

Úprava hodnot dekády složené z 10 k Ω rezistorů nebyla nutná. Rezistory poskytují velmi přesné odstupňování po 1 V i bez doplňkové úpravy. Toto bylo ověřeno velmi přesným voltmetrem v laboratoři. Připravené plošky pro doplnění rezistorů nebyly využity.

3.3 Měření kompenzátoru

3.3.1 Zdroj referenčního napětí

Zdroj referenčního napětí poskytuje velmi stabilní a přesné napětí o hodnotě 7,2198 V. Je však nutné před měřením počkat několik minut na ustálení výstupního napětí. Zdroj referenčního napětí obsahuje vyhřívání kvůli stabilitě napětí. Je třeba vyčkat, až se hodnota výstupního napětí stabilizuje.

3.3.2 Ověření měření kompenzátořem

Ověření funkčnosti kompenzátoru bylo provedeno pomocí zdroje referenčního napětí. Bylo prokázáno, že po dokompenzování do nulové výchylky při použití maximálního dostupného zesílení je hodnota velice přesná. Prakticky došlo k odchylce pouze o 200 μV . Toto se ale dá spíše přisoudit nepřesnosti odečtení. Pro účely demonstrace metody ale plně vyhovuje a splňuje požadavky na zadanou přesnost. Měření bylo prováděno pomocí přesného laboratorního multimetru *Hewlett – Packard*.

3.3.3 Postup měření kompenzátořem

- 1) Kompenzátoř připojíme ke zdroji napájecího napětí 12 V a vyčkáme
- 2) Provedeme kalibraci zdroje napětí 10 V. To se provede za pomoci přesného voltmetru. Pravý potenciometr s počítadlem vytočíme na maximální hodnotu, přepínač rozsahu nastavíme také na nejvyšší hodnotu. Tím bude nastavováno referenční napětí 10 V. Voltmetr připojíme na svorky U_x .
- 3) Zmáčkneř tlačítko a levým potenciometřem nastavíme hodnotu tak, aby na voltmetru byla hodnota 10 V. Nyní je přístroj zkalibrován a můžeme měřit.
- 4) Zesílení nastavíme na 1. Odpojíme voltmetř a připojíme měřené napětí.
- 5) Zmáčkneř tlačítko a provádíme pravým potenciometřem kompenzaci tak, dokud nebude svítit LED označená šipkou. Pokud nebude stačit potenciometr, provedeme změnu rozsahu.

- 6) Jakmile se povede napětí vykompenzovat, budeme postupně zvyšovat zesílení a opětovně dokompenzovávat potenciometrem.
- 7) Při dosažení nejvyšší úrovně zesílení a vykompenzování hodnoty potenciometrem je měření ukončeno.
- 8) Odečteme hodnotu z rozsahu a z počítadla potenciometru. Celá hodnota je dána rozsahem a oblast za desetinnou čárkou je dána počítadlem na potenciometru. Hodnotu zapíšeme.

4 Závěr

I přes veškeré komplikace je zařízení plně funkční a po odstranění již netrpí nedostatky. Jakožto pomůcka určená k výuce je plně dostačující. Obvod splňuje veškeré požadavky, které vyplývají z kompenzační metody měření. Nedochází k zatěžování měřeného zdroje a indikátor výchyly má vyhovující citlivost a přesnost. Při nastavení zesílení na maximální hodnotu je téměř 969, z čehož vyplývá, že k posunu LED o jednu hodnotu stačí pouze přibližně $500 \mu V$. Zařízení je tedy plně připraveno k používání a výuce.

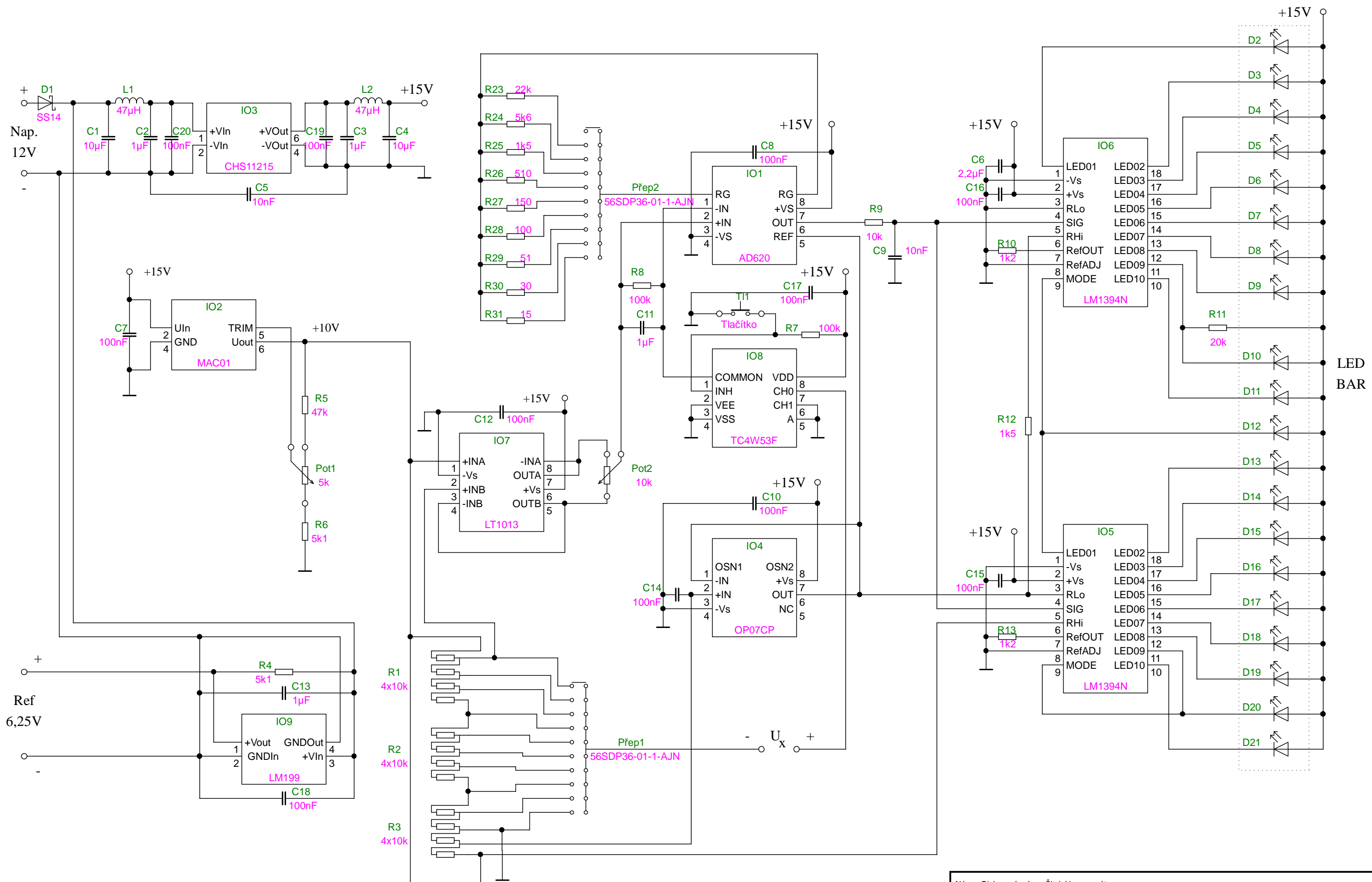
Ačkoli musím říci, že jsem měl z počátku velké problémy s ovládáním programu EAGLE, jelikož v něm běžně nepracuji, díky pomoci vedoucího práce se mi podařilo návrh desky plošných spojů vypracovat správně.

V příloze na CD přikládám veškeré soubory, které jsou nutné k další výrobě DPS. Je přiložena i knihovna ze software EAGLE, kde jsou dostupné použité součástky a samozřejmě také hotový projekt. Ten může být využit k vyrobení dalších DPS a sestavení totožných výrobků, pokud bude třeba.

Seznam použité literatury a informačních zdrojů

- [1] DUFEK, Milan, Václav FAJT, Milan JAKL a Jindřich VÍTOVEC. *Elektrická měření II*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1972, 439 s. ISBN Není. SM1561/2N.
- [2] FAJT, Václav a KOLEKTIV. *Elektrická Měření*. Praha: SNTL, 1987, 376 s. ISBN 04-529-87.
- [3] *Elektrotechnická měření*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-730-0022-9.
- [4] HAASZ, Vladimír a Miloš SEDLÁČEK. *Elektrická měření: přístroje a metody*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 8001027317.
- [5] PUNČOCHÁŘ, Josef. *Operační zesilovače v elektronice*. 5. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 8073000598.
- [6] PINKER, Jiří a Václav KOUCKÝ. *Analogové elektronické systémy*. 4. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2010. ISBN 9788070439173.
- [7] TUMOVÁ, Olga. *Elektrická měření: měřicí metody*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. ISBN 8070434120.
- [8] DIETMEIER, Ulrich. *Vzorce pro elektroniku*. Praha: BEN - technická literatura, 1999. ISBN 8086056538.
- [9] BRTNÍK, Bohumil. *Základní elektronické obvody*. Praha: BEN - technická literatura, 2011, 156 s. ISBN 9788073004088.
- [10] ANALOG DEVICES. *AD620: Low Cost Low Power Instrumentation Amplifier* [online]. H. One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.: Analog Devices, 2011 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD620.pdf>
- [11] LINEAR TECHNOLOGY. *LT1013/LT1014: Quad Precision Op Amp (LT1014) Dual Precision Op Amp (LT1013)* [online]. D. 1630 McCarthy Blvd., Milpitas, CA 95035-7417, U.S.A.: Linear Technology, 1990 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/10134fd.pdf>
- [12] KINGBRIGHT. *DC20/20EWA: 20 SEGMENTS BAR GRAPH ARRAY* [online]. 8. 225 Brea Canyon Road City of Industry, CA 91789, USA: Kingbright, 2009 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <https://www.kingbrightusa.com/images/catalog/spec/DC20-20EWA.pdf>
- [13] GRAYHILL. *Single Deck Rotary Switches: SERIES 56* [online]. 561 Hillgrove Avenue, LaGrange, Illinois 60525-5997, USA: Grayhill, neznámé [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: http://www.grayhill.com/assets/1/7/rotary_56.pdf
- [14] HYPEL. *DC/DC Convertors: CHS1 Series* [online]. Kladno: Hypel, 2009 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.hypel.cz/konvertory/index.php?doc=chs>
- [15] LINEAR TECHNOLOGY. *LM199/LM399 LM199A/LM399A: Precision Reference* [online]. C. 1630 McCarthy Blvd., Milpitas, CA 95035-7417, U.S.A.: Linear Technology, 1987 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/199399fc.pdf>
- [16] TEXAS INSTRUMENTS. *LM3914 Dot/Bar Display Driver* [online]. Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265: Texas Instruments, 2016 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm3914.pdf>
- [17] TEXAS INSTRUMENTS. *OP07x Precision Operational Amplifiers* [online]. Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265: Texas Instruments, 2015 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/op07c.pdf>

- [18] TOSHIBA. *TC4W53F, TC4W53FU* [online]. neznámo: Toshiba, 1997 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.maoye-smd.com/canshu/pdf/2012-8-15/TC4W53F.pdf>
- [19] TESLA. *MAC01, MAC01H, MAC01D: Zdroj referenčního napětí 10V* [online]. neznámo: Tesla, 1986 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.teslakatalog.cz/MAC01.html>
- [20] ZÁHLAVA, Vít. *Metodika návrhu plošných spojů* [online]. Praha: ČVUT, neznámo [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.semach.cz/pdf/metodika.pdf>
- [21] GRZYWOCZ, Paweł. Weston Cell. In: *Wikimedia Commons: File:Weston cell.svg* [online]. neznámé: Creative Commons, 2007 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Weston_cell.svg
- [22] *LM199 / LM399* [online]. U.S.A.: Elcodis, 2016 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: http://elcodis.com/photos/7/52/75274/to-46-4_05-08-1341_sml.jpg
- [23] *Tesla MAC01* [online]. Praha: Tesla n.p., 1983 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: http://www.amapro.cz/datove_zdroje/katalogy/katalog_tesla/katalog_tesla_65.php
- [24] TRNKA, Zdeněk. *Elektrické měřicí přístroje*. Praha: Vědecko-technické nakladatelství, 1951. Elektrotechnická knihovna.
- [25] *Traco Power: TMH Series* [online]. Jenatschstrasse 1, CH-8002 Zurich, Switzerland: Traco Power, 2012 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://assets.tracopower.com/20160519160144/TMH/documents/tmh-datasheet.pdf>



Název: Diplomová práce - Školní kompenzátor		
Index:	Datum: 27.4.2016	List: 1
Autor: Bc. Jiří Smolík		
Revize: 1.0		