

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Přepínatelný kalibrační vysílač proudové smyčky

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na návrh a realizaci kalibračního vysílače proudové smyčky s manuálním nastavením vysílaného proudu v rozsahu 4 – 20 mA s krokem minimálně 1 mA.

Klíčová slova

Převodník, proudová smyčka, kalibrační vysílač, kalibrovaný proud, vysílač proudové smyčky.

Abstract

The present thesis focuses on the design and realization of the transmitter current loop calibration manually setting the transmitted current in the range of 4-20 mA and step min. 1 mA.

Key words

Converter, current loop, calibration transmitter, current loop transmitter.

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 18.8.2016

Zdeněk Pfeifer

Obsah

OBSAH.....	6
Seznam symbolů a zkratek.....	8
Úvod.....	9
Proudová smyčka.....	10
1.1 VARIANTY VYSÍLAČE PROUDOVÉ SMYČKY.....	11
1.1.1 Napájení z proudové smyčky.....	11
1.1.2 Externí napájení.....	11
1.1.3 Dvouvodičový vysílač.....	12
1.1.4 Třívodičový vysílač.....	12
1.1.5 Čtyřvodičový vysílač.....	12
1.1.6 Další varianty zapojení proudového vysílače.....	13
1.2 XTR116 – 4-20 mA VYSÍLAČ PROUDOVÉ SMYČKY.....	14
1.2.1 Popis.....	14
1.2.2 Aplikační informace.....	15
1.3 BLOKOBÉ SCHEMA ZAPOJENÍ KALIBRAČNÍHO VYSÍLAČE.....	20
1.3.1 Ochrana.....	20
1.3.2 Sledovač OZ.....	21
1.3.3 Přepínač (P1) 0 – 150 μ A.....	22
1.3.4 Přepínač (P2) 0 / 8 / 48 μ A.....	22
1.3.5 Jemná regulace (P3) 32 – 42 μ A.....	23
1.4 ROZSAH VYSÍLAČE.....	24
1.5 NASTAVENÍ ZVOLENÉ HODNOTY.....	24
1.5.1 P1.....	24
1.5.2 P2.....	24
1.5.3 P3.....	24
1.5.4 Výsledná hodnota.....	24
1.6 VÝPOČET HODNOT ODPORŮ.....	25
1.6.1 Příklady výpočtu.....	25
1.7 VARIANTA ZAPOJENÍ BEZ OZ.....	26
1.8 EAGLE.....	26
1.9 DESKA PLOŠNÉHO SPOJE.....	27

1.10 REALIZACE DPS.....	27
1.10.1 Nastavení vysílače.....	27
1.10.2 Nastavení jemné regulace P3.....	27
1.10.3 Nastavení přepínače P2.....	27
1.10.4 Nastavení přepínače P1.....	27
1.10.5 Kontrola nastavení.....	28
1.11 MĚŘENÍ.....	28
1.12 URČENÍ MAXIMÁLNÍ CHYBY PŘÍSTROJE.....	28
Závěr.....	29
Seznam literatury a informačních zdrojů.....	30
Přílohy.....	1

Seznam symbolů a zkratek

I_{in}	Vstupní proud [μA]
I_{ret}	Proudový vstup [μA]
I_0	Výstupní proud [mA]
I_Q	Proud v klidovém stavu [mA]
$V+$	Napájecí napětí [V]
V_{ref}	Přesné napětí [V]
V_{reg}	Regulované napětí [V]
DPS	Deska plošného spoje
EAGLE	Software pro návrh DPS

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na návrh kalibračního vysílače proudové smyčky s manuálním nastavením vysílaného proudu v rozsahu 4-20 mA a s krokem min. 1 mA.

Text je rozdělen do čtyř částí; první se zabývá problematikou proudové smyčky, druhá část je věnována proudovému vysílači XTR, třetí část probírá návrh schématu a poslední část popisuje vlastní realizaci daného kalibračního vysílače proudové smyčky.

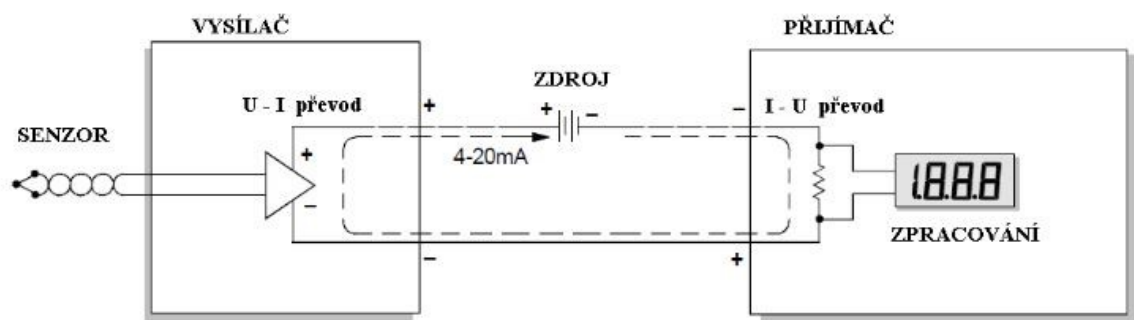
Proudová smyčka

Proudová smyčka 4 - 20 mA se již dlouhou dobu využívá v průmyslové automatizační technice. V praxi se můžeme setkat se dvěma možnými verzemi:

- analogová proudová smyčka - hodnoty jsou vyjádřené proudy v rozsahu 4 až 20 mA
- digitální proudová smyčka - hodnoty log. 0 je vyjádří proudem 4 mA a log. 1 proudem 20 mA

Ve většině případů se však využívá analogové varianty. Pro přenos digitálního signálu se častěji využívá proudové smyčky 0-20 mA.

Výhodou proudové smyčky je značná imunita proti elektromagnetickému rušení často se vyskytující v průmyslu, přenos na velké vzdálenosti a v jednoduchosti. V případě přenosového média lze využít pouze dvou vodičů, i když vyskytují se verze se třemi, případně čtyřmi vodiči pro zlepšení některých parametrů. Výhodou proudu jako signálové veličiny je i snadná detekce přerušení smyčky v případě, že detekovaný proud klesne k 0 mA. Odolnost proti rušení je dána nízkým vstupním odporem proudových vstupů připojených zařízení do smyčky. Pokud je proudová smyčka napájena z dostatečně dimenzovaného zdroje napětí, nemá nenulový odpor vodičů a tedy i úbytky napětí na nich, přímý vliv na přenášenou hodnotu. Dále je možné provádět napájení připojených komponent přímo prostřednictvím smyčky. [1]

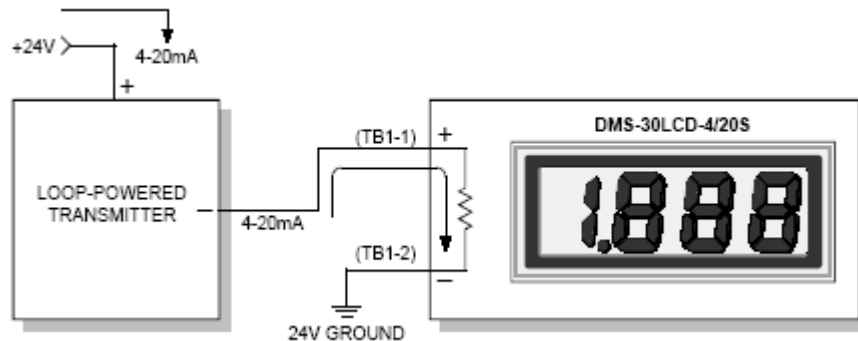


Obr. 1: Proudová smyčka [1]

1.1 Varianty vysílače proudové smyčky

1.1.1 Napájení z proudové smyčky

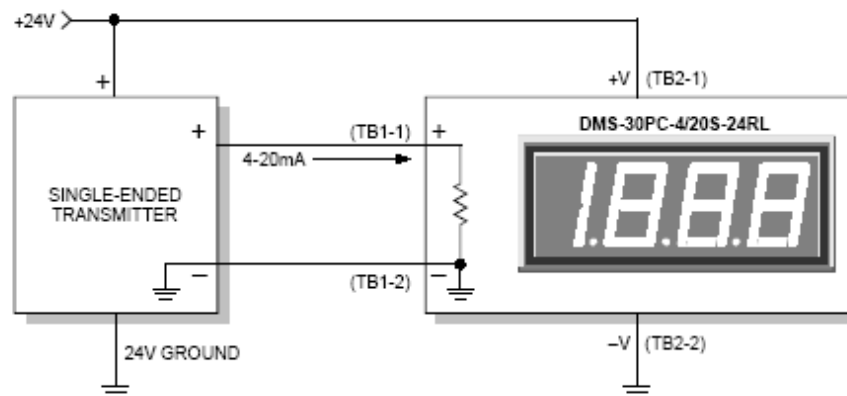
Komponenty s napájením z proudové smyčky obsahují 2 svorky (pro napájení i pro proudovou smyčku společně), jak je vidět na následujícím Obr.1.1.1. Vyhodnocovací zařízení resp. přijímač musí mít spotřebu (max. 4 mA). [1]



Obr.1.1. 1: Napájení z proudové smyčky [1]

1.1.2 Externí napájení

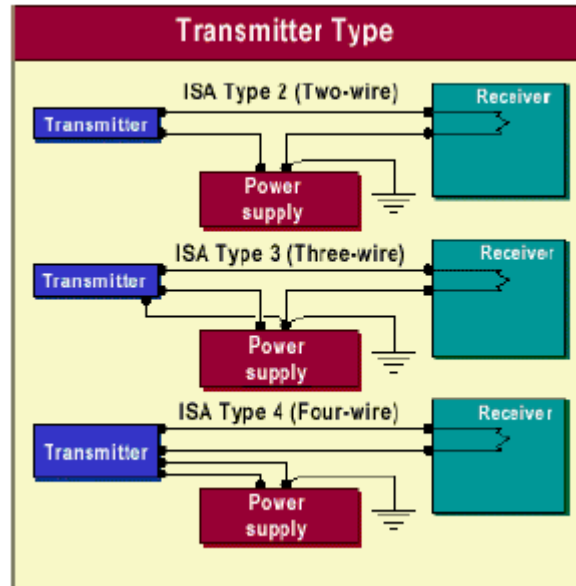
Komponenty pro tyto struktury musí obsahovat vždy 4 svorky (2 pro napájení a 2 pro proudovou smyčku), jak lze vidět na Obr.1.1.2. [1]



Obr.1.1. 2: Napájení z externího zdroje [1]

1.1.3 Dvou vodičový vysílač

Typ 2 využívá pouze jednoho páru vodičů a odpovídá popisu uvedenému výše. Využívá se pro konvenční měření zejména tlaku, teploty, výšky hladiny a polohy. [1]



Obr.1.1. 3: Typy vysílačů [1]

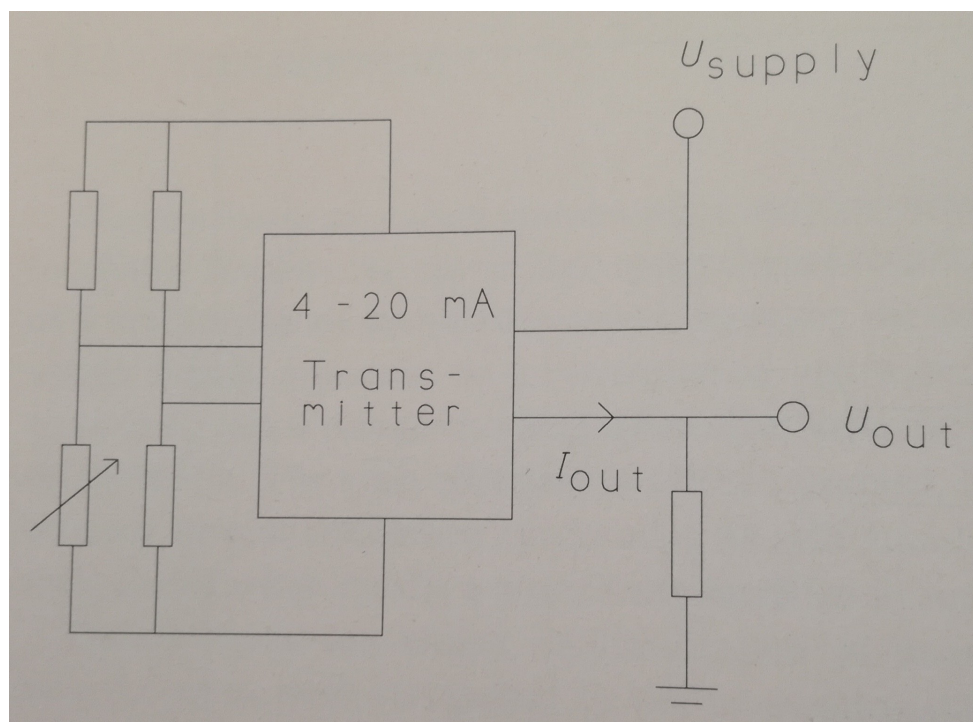
1.1.4 Třívodičový vysílač

Typ 3 využívá zvláštního vodiče pro zemnění vysílače. [1]

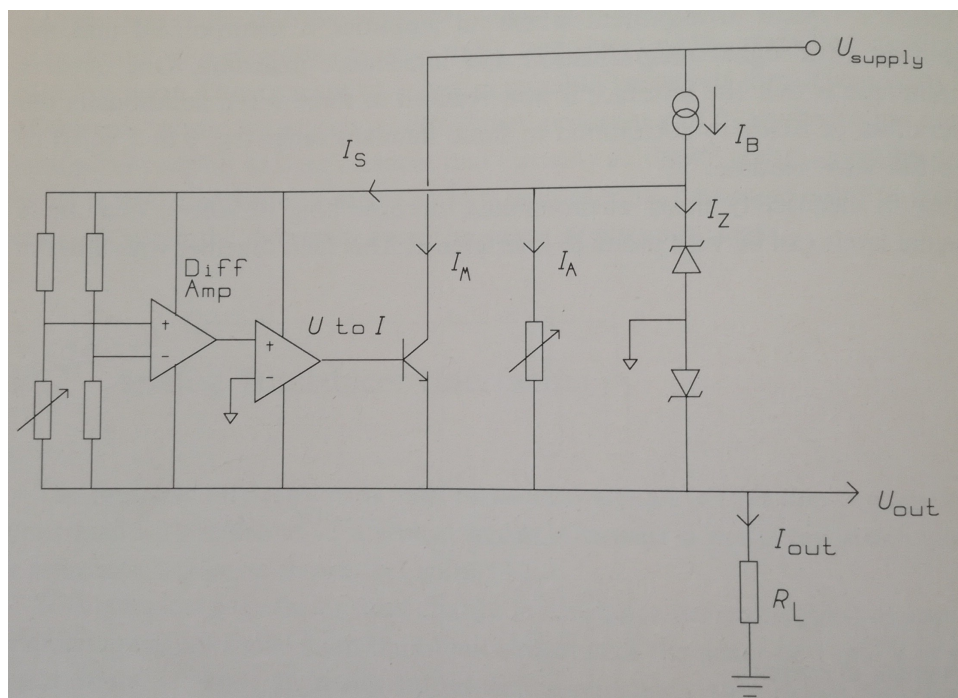
1.1.5 Čtyřvodičový vysílač

Tento typ definuje dva páry vodičů, kde jeden je určen pro přenos napájení a druhý pár pro přenos proudového signálu. Toho využívají například magnetické průtokoměry, některé senzory tlaku apod. Výhodou je možnost odlišného napájecího napětí pro vysílač a přijímač a přenosu výkonu ze zdroje do spotřebiče, který je ve smyčce limitován hranicí 4 mA. Navíc v případě značné vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem není nutné do návrhu napájecího napětí zahrnout i úbytky napětí na vodičích, protože zdroj napájení může být v blízkosti zařízení. Důležité je pak provést oddělení přenášeného signálu mezi vysílačem a přijímačem pro snížení rušení a vlivu zemních proudových smyček. Optické signálové oddělení je obvykle provedeno v zařízení přijímače, ale je možné ho provést i vně v případě, že přijímač oddělení neposkytuje. [1]

1.1.6 Další varianty zapojení proudového vysílače



Obr.1.1. 4: Obecné schéma zapojení 4-20 mA vysílače [2]



Obr.1.1. 5: Detailní zapojení 4-20 mA vysílače [2]

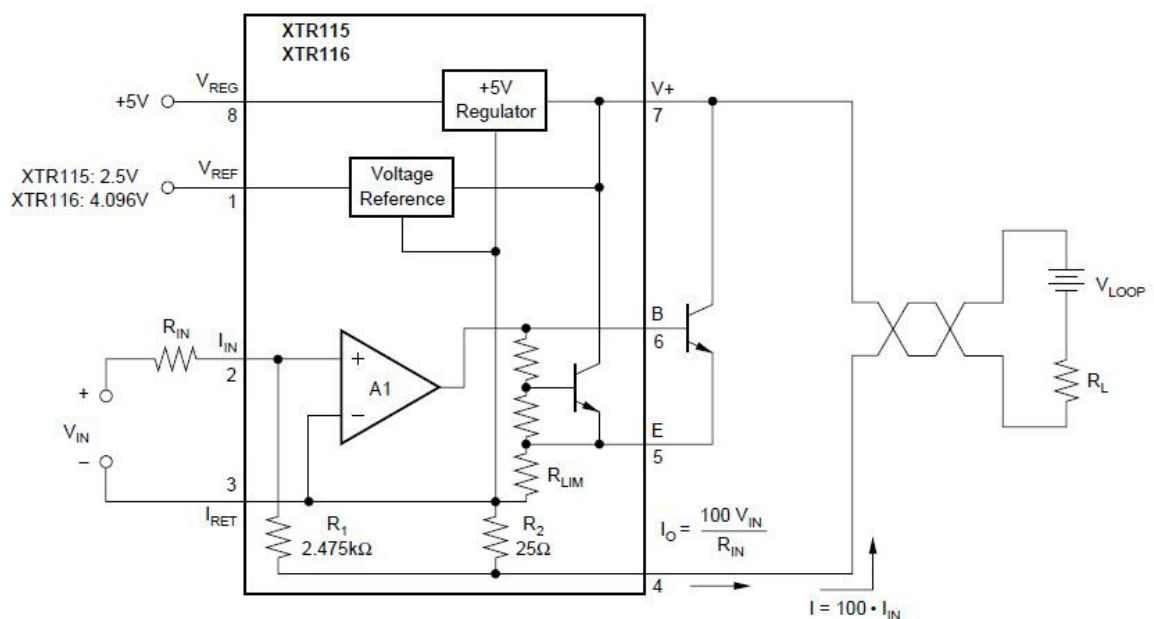
1.2 XTR116 – 4-20 mA vysílač proudové smyčky

1.2.1 Popis

XTR115 a XTR116 jsou proudové vysílače pro přenos analogového signálu 4-20 mA pomocí proudé smyčky. Poskytují přesnou hodnotu proudu v předem určených mezích. Blokové schéma proudové smyčky XTR115 a XTR116 je na Obr.1.2.1.

Regulátor napětí čipu V_{reg} (5V) může být použitý pro napájení externích obvodů. Přesné napětí V_{ref} (2.5V pro XTR115 a 4.096V pro XTR116) může být použito k napájení snímače. Pin pro návratový proud (I_{ret}) zjišťuje hodnotu proudu v externím obvodu pro zajištění přesného řízení výstupního proudu.

XTR115 je základem pro inteligentní senzory využívající proudového přenosu 4-20 mA. XTR115 a XTR116 jsou určeny rozsah teplot -40°C až $+85^{\circ}\text{C}$.



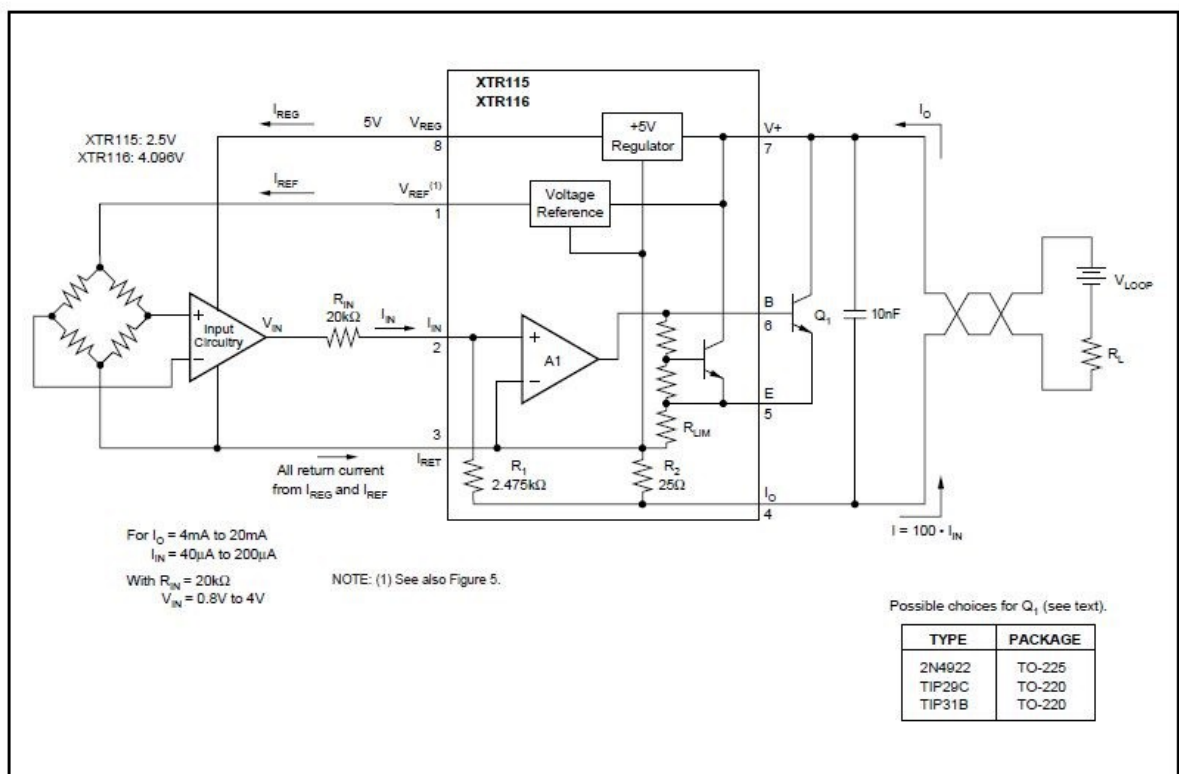
Obr.1.2. 1: XTR 115 / 116 [3]

1.2.2 Aplikační informace

XTR115 a XTR116 jsou stejné čipy s výjimkou výstupního referenčního napětí (pin1). Toto napětí je k dispozici pro externí obvody a není používáno interně. Další problematika týkající se obou čipů bude nazývána "XTR115/6."

Obr.1.2.2 ukazuje základní obvodové zapojení se zánklými vstupními obvody. XTR115/6 je dvou vodičový proudový vysílač. Jeho vstupní signál (pin2) řídí výstupní proud. Část tohoto proudu teče do V+ výkonového vstupu (pin7). Zbývající proud teče do tranzistoru Q1. Externí vstupní obvod připojený k XTR115/6 může být napájen z V_{reg} (pin8) nebo V_{ref} (pin1). Proud odebíraný z těchto pinů musí být vrácen I_{ret} (pin3). Tento I_{ret} pin je „místní zem“ pro vstupní obvody řídící XTR115/6.

XTR115/6 je proudový zesilovač se ziskem 100. Proud tekoucí do pinu 2 je zesílen na $I_0 = 100 \cdot I_{in}$.



Obr.1.2. 2: Základní zapojení [3]

1.2.2.1 Externí tranzistor

Vnější tranzistor Q1 řídí většinu rozsahu výstupního proudu. Ztrátový výkon v tomto tranzistoru se může přiblížit k 0,8 W při vyšším napětí smyčky (40V) a výstupním proudem 20 mA. XTR115/6 je určen pro použití externího tranzistoru, aby se teplo způsobené proudem projevilo na tranzistoru, ne na čipu XTR115/6. Teplo produkované tranzistorem Q1 bude i nadále ovlivňovat okolní teplotu, která může mít vliv na XTR115/6. Chceme-li minimalizovat tyto účinky, musíme Q1 umístit dostatečně daleko od citlivých analogových obvodů, včetně XTR115/6.

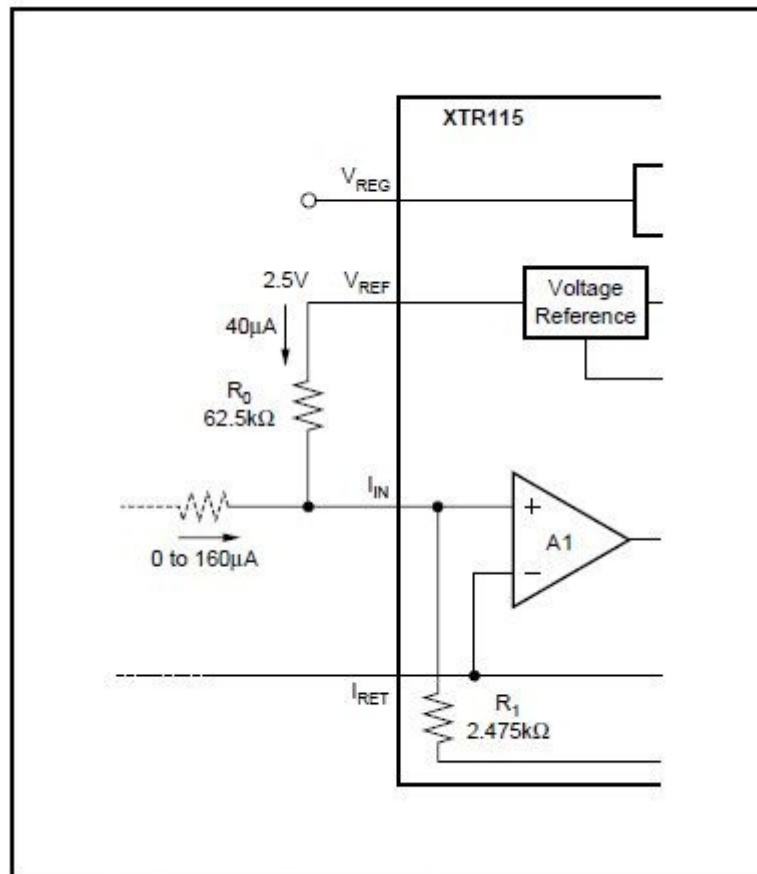
XTR115/6 je určen pro použití téměř všech NPN tranzistorů s dostatečným kolektor-emitorovým napětím, proudem a jmenovitým výkonem. Několik příkladů je uvedeno na Obr.1.2.2. Tranzistor typu MOSFET lze použít, ale nedoporučuje se z důvodu zhoršení přesnosti výstupního proudu.

1.2.2.2 Minimální hodnota proudu

Klidový proud I_Q (200 μA) je spodní hranice výstupního proudu I_0 . Nulový vstupní proud ($I_{in} = 0$), bude produkovat I_0 , který bude roven tomuto klidovému proudu. Výstupní proud se nezačne zvyšovat, dokud $I_{in} > I_Q / 100$. Proud odebíraný z V_{ref} nebo V_{reg} bude přidán k této minimální hodnotě výstupního proudu. To znamená, že více než 3,7 mA je k dispozici pro napájení externích obvodů, a přitom je ještě možné mít výstupní proud pod 4 mA.

1.2.2.3 Kompenzace vstup

Spodní hodnota rozsahu 4 mA je tvořena vstupním proudem 40 μA . Toto může být tvořeno odporem R_0 (Obr.1.2.3), nebo vytvořením správného vstupního řídicího obvodu.



Obr.1.2. 3: Spodní hodnota rozsahu [3]

1.2.2.4 Maximální výstupní proud

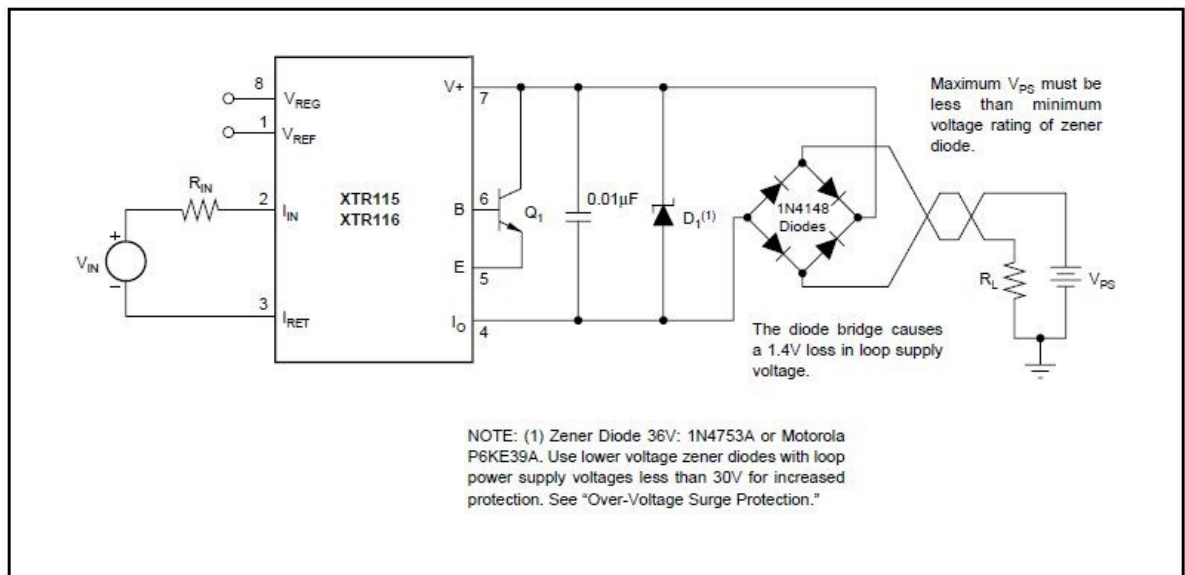
XTR115/6 poskytuje přesný, spojitý výstup až 25 mA. Vnitřní obvod omezuje výstupní proud na cca 32 mA z důvodu ochrany vysílače a smyčky napájení nebo měřících obvodů.

Je možné zvýšit výstupní proudový rozsah čipu XTR115/6 připojením externího odporu z pinu 3 k pinu 5, ke změně proudové mezní hodnoty. Vzhledem k tomu, že celkový výstupní proud musí protékat přes vnitřní obvody čipu XTR115/6, hrozí poškození nadměrným proudem. Výstupní proudy větší než 45 mA mohou způsobit trvalé poškození.

1.2.2.5 Ochrana proti přepólování

Nízká hodnota minimálního napájecího napětí (7,5 V) mezi pinem 4 (I_o) a pinem 7 ($V+$) umožňuje použití různých metod ochrany napětí, aniž by byl ohrožen provozní rozsah. Obr.1.2.4 naznačuje můstkové zapojení diod, které umožňují normální provoz, i když je přehozené napětí na přívodní lince, nebo i pro napájení střídavým napětím. Můstek způsobuje pokles napájecího napětí na dvou diodách (cca 1.4V). To má za následek minimální potřebné napájecí napětí přibližně 9V, což ještě vyhovuje pro většinu aplikací.

Další varianta je dioda zapojená do série s napájením smyčky a $V+$ pinem, aby chránila proti reverzaci přívodní linky pouze se ztrátou 0,7 V na napájecí smyčce. Při přepólování vysílač nefunguje.



Obr.1.2. 4: Ochrana proti přepólování a proti přepětí [3]

1.2.2.6 Ochrana proti přepětí

Dlouhé připojení k proudovým vysílačům může někdy být vystaveno přepětí. Je rozumné omezit maximální rázové napětí přivedené na XTR115/6 na tak nízkou hodnotu, jak je to možné, ale tato hodnota musí být o něco málo vyšší, než hodnota samotného napájení. Různé Zenerovy diody vyhovují těmto účelům. Používá se dioda s co nejnižším jmenovitým napětím, jak je to možné pro maximální ochranu. Například, ochranná dioda 36V bude zajišťovat správný provoz vysílače při normálním napětí smyčky, ale bude poskytovat přiměřenou úroveň ochrany proti přepětí. Testy na několika vzorkách nevykazovaly žádnou škodu do napětí 65V.

Většina přepětíových ochran Zenerovou diodou budou propouštět nadměrný proud, a také chránit proti obrácené polaritě přívodů. Pokud je použita Zenerova dioda jako přepětíová ochrana, sériová dioda nebo diodový můstek by měly být použity pro ochranu proti obrácení polarity přívodů.

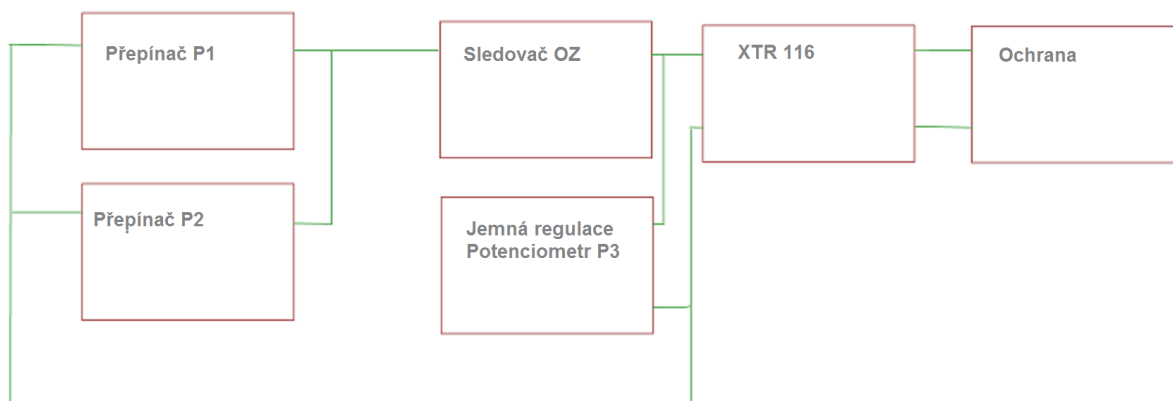
1.2.2.7 Elektromagnetické rušení

Dlouhé vodiče proudových smyček jsou náchylné na rušení. Elektromagnetické rušení může být upraveno (zmenšeno) vstupními obvody, samotným čipem XTR115/6, nebo obvody těsně před integrovaným obvodem. Případně je rušení upraveno použitím filtrů a vhodných vodičů. I přesto se jakékoli elektromagnetické rušení obecně projevuje jako nestabilní výstupní proud.

Rušení se může rovněž objevit na vstupních svorkách. Pro integrované vysílací sestavy s krátkým vedením k senzoru, rušení obvykle přichází z proudové smyčky.

1.3 Blokové schéma zapojení kalibračního vysílače

Blokové schéma (Obr.1.3.1) zjednodušeně popisuje zapojení kalibračního vysílače proudové smyčky. Jednotlivé bloky jsou dále v této práci podrobněji rozepsány.

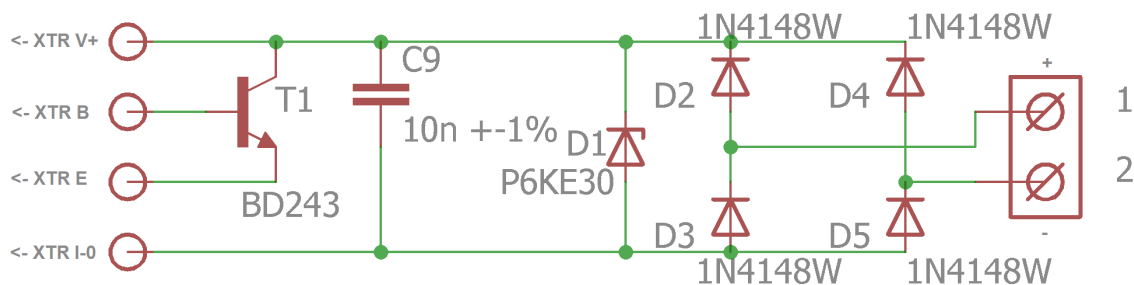


Obr.1.3. 1: Blokové schéma zapojení kalibračního vysílače

1.3.1 Ochrana

Blok Ochrana (Obr.1.3.2) se skládá z více komponentů:

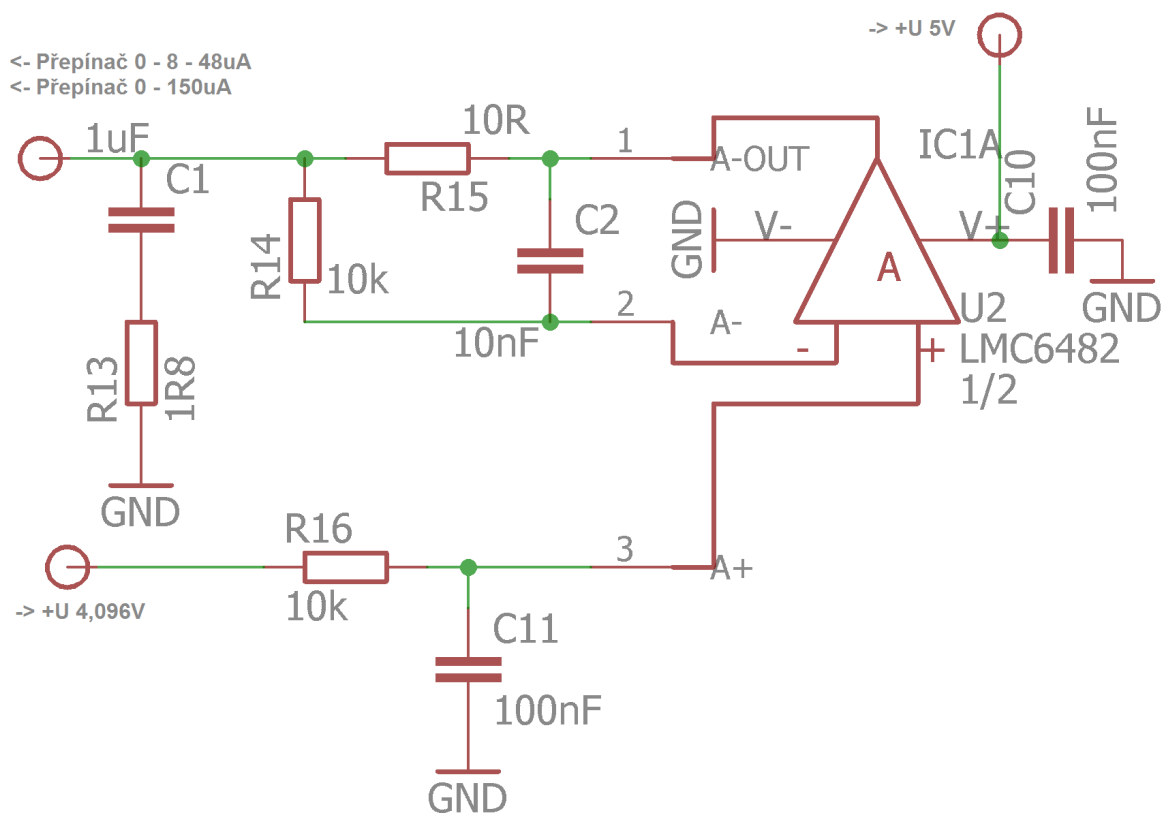
- Vstupní svorky, na které je přivedeno napájení 24V po dvou vodičové proudové smyčce.
- Diodový usměrňovač pro případ, že by bylo přivodní vedení připojeno obráceně.
- Transil pro případ přepětí. Při výkyvu nad 30V se transil otevře a vedení zkratuje, kvůli ochraně našeho vysílače.
- Filtrační kondenzátor je zde umístěn pro vykompenzování vysokofrekvenčního rušení.
- Výkonový tranzistor. Je řízen z čipu XTR116 a reguluje proud proudové smyčky na hodnotu, kterou nastavíme na ovládací straně čipu XTR116.



Obr.1.3. 2: Ochrana

1.3.2 Sledovač OZ

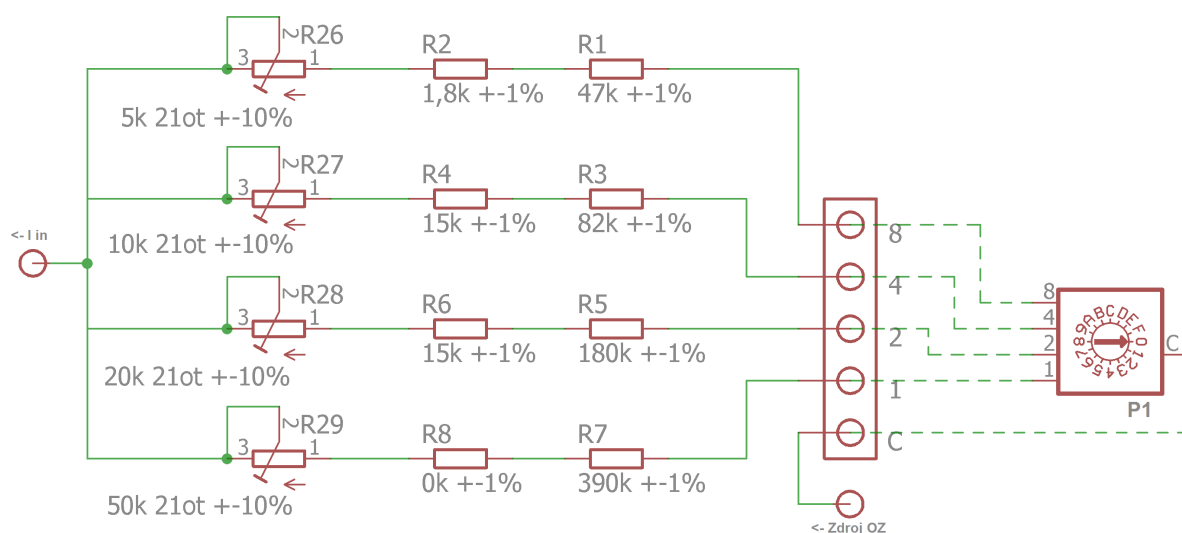
Operační zesilovače mají ve schematu funkci napěťového sledovače. Jsou napájeny z výstupu V_{reg} a na vstup je přivedeno napětí z výstupu V_{ref} . Výstup z operačního zesilovače je tedy rovný hodnotě V_{reg} (4,096V), ale nezatěžuje tuto referenční hodnotu připojenou proměnou zátěží na přepínači (P2) 0 / 8 / 48 μ A, na přepínači (P1) 0 – 150 μ A, ani na potenciometru jemné regulace (P3) 32 – 42 μ A. Operační zesilovač s označením „IC1A“ napájí oba přepínače, operační zesilovač s označením „IC1B“ pak napájí potenciometr jemné regulace (P3). Kolem obou operačních zesilovačů, které jsou umístěny v jednom pouzdře LMC6482, jsou pak identické obvody. Zapojení obvodů je pak znázorněno na Obr.1.3.3.



Obr.1.3. 3: Sledovač OZ

1.3.3 Přepínač (P1) 0 – 150 μA

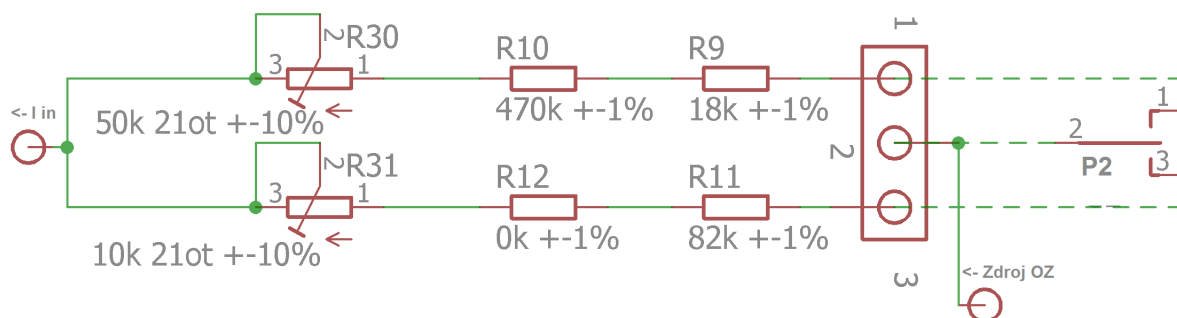
Samotný přepínač je realizován pomocí šestnáctipolohového přepínače v kódu BCD (I-0 stupnice). Přepínač má 5 pinů. 1 pin je pro přívod, další čtyři piny jsou pak výstupní. Na přepínač je přivedeno napájení a podle požadované hodnoty přepínač sepne odpovídající kombinaci odporů. Výstupy z přepínače jsou pak připojeny na čtyři odporové cesty s hodnotami odstupňovanými dle násobků 1, 2, 4 a 8. Při sepnutí všech vodivých cest dostáváme v součtu minimální odpor, tedy maximální proud o hodnotě 150 μA . Naopak při rozpojení všech cest je odpor nekonečný, hodnota proudu tedy klesne k 0 μA . Zapojení a hodnoty odporů jsou znázorněny na Obr.1.3.4. Napájení tohoto přepínače je přivedeno z výstupu „Sledovače OZ“ z operačního zesilovače IC1A. Přepínač je realizován s krokem 10 μA . Výpočty jednotlivých hodnot odporů jsou znázorněny v tabulce viz. Příloha H.



Obr.1.3. 4: Přepínač (P1) 0 – 150 μA

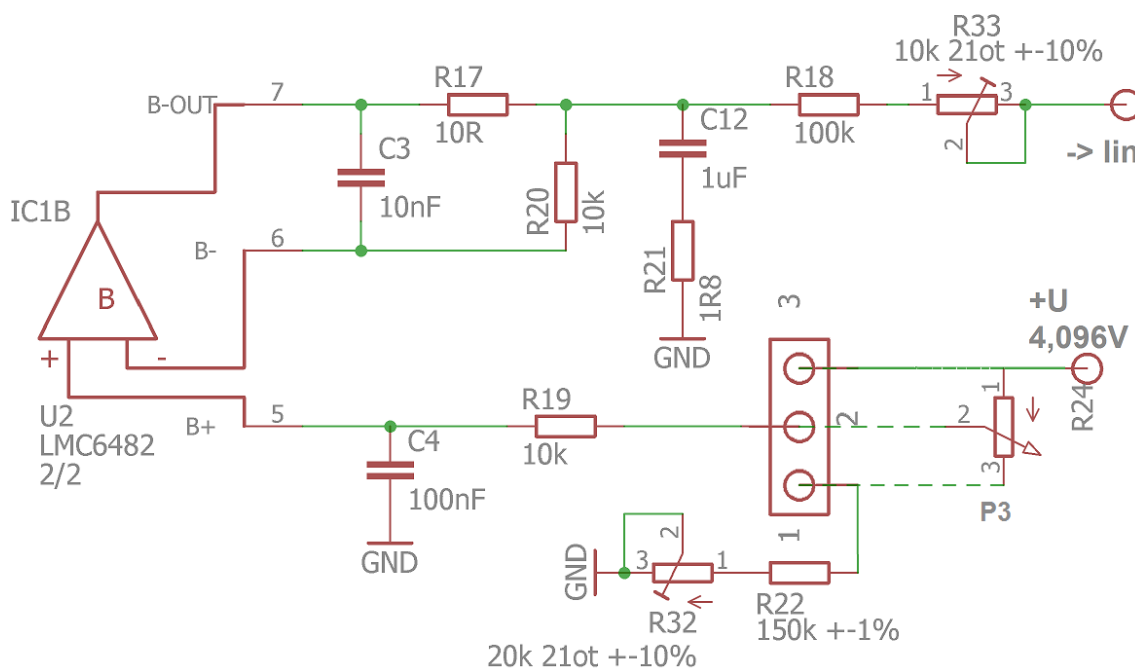
1.3.4 Přepínač (P2) 0 / 8 / 48 μA

Přepínač (P2) 0 / 8 / 48 μA má jeden pin pro vstup, 2 piny pro výstup a jednu klidovou polohu. Během klidové polohy je přepínač nastaven na hodnotu 0 μA . V poloze 1 je přepínač nastaven tak, že výsledná hodnota je 8 μA . Při nastavení poslední polohy (poloha 3) je přepínač nastaven hodnotu 48 μA . Napájení přepínače je ze „Sledovače OZ“ z operačního zesilovače IC1A.

Obr.1.3. 5: Přepínač (P2) 0 / 8 / 48 μA

1.3.5 Jemná regulace (P3) 32 – 42 μA

Jemná regulace (P3) (Obr.1.3.6) je nadstavba k přepínači (P2) 0 / 8 / 48 μA a přepínači (P1) 0 – 150 μA . Protože během přenastavování výstupních hodnot pracují přepínače s krokem minimálně 10 μA . Jemná regulace doplňuje spojitost, a to právě v rozmezí těchto 10 μA . Ve výsledku je možné v ovládacím obvodu kalibračního vysílače proudové smyčky nastavit jakoukoli hodnotu v běžném rozsahu 40 – 200 μA (na výstupu vysílače je to pak $\times 100$, tedy 4 – 20 mA). Je možné nastavovat jakoukoli hodnotu i v rozšířeném rozsahu 32 – 240 μA (3,2 – 24 mA). Napájení této regulace je z pinu V_{ref} , upravení signálu z potenciometru P3 je pak ze „Sledovače OZ“ z operačního zesilovače IC1B.

Obr.1.3. 6: Jemná regulace (P3) 32 - 42 μA

1.4 Rozsah vysílače

V bodu 1.2.2. odstavce 3 je řečeno, že proud ovládací smyčky tekoucí do pinu 2 (I_{in}) je uvnitř vysílače proudové smyčky násoben hodnotou 100. Tedy ovládací smyčku vysílače nastavujeme na hodnoty 40 – 200 μA , ale na výstupu z vysílače proudové smyčky se tento nastavený proud projeví jako hodnoty 4 – 20 mA.

Běžný rozsah proudového vysílače je 4 – 20 mA. Zobrazovací zařízení a měřicí karty, pro které je vysílač navržen, však ještě dokáží rozpoznávat i chybové stavy na hodnotách 3,2 mA, 22,8 mA a 24 mA. Proto je zde zaveden rozšířený rozsah, aby bylo možné testovat i tyto hodnoty.

1.5 Nastavení zvolené hodnoty

Pro nastavení kalibračního vysílače proudové smyčky slouží 3 ovládací prvky (P1, P2, P3).

1.5.1 P1

Přepínač v BCD kódu. Jeho nastavením se volí velikost proudu v rozmezí 0 – 15 mA s krokem 1 mA pro všechny rozsahy.

1.5.2 P2

Přepínač P2 je tří polohový páčkový přepínač.

-Poloha „-0,8“ snižuje spodní hodnotu rozsahu o 0,8 mA, tedy je možno nastavit hodnotu 3,2 – 19,2 mA pro rozšíření spodní hodnoty rozsahu.

-Poloha „0“ je pro nastavení přístroje na základní rozsah 4 – 20 mA.

-Poloha „+4“ zvyšuje horní hodnotu rozsahu o 4 mA, tedy je možno nastavit hodnotu 8 – 24 mA, v čemž je obsažena i hodnota 22,8 mA při rozšíření horní hodnoty rozsahu.

1.5.3 P3

Potenciometr P3 (víceotáčkový) nastavuje spojitou hodnotu 0 – 1 mA. Tato hodnota doplňuje hodnotu proudu mezi jednotlivými kroky přepínače P1 a touto hodnotou jsme schopni nastavit spojitost v celém rozsahu kalibračního vysílače proudové smyčky.

1.5.4 Výsledná hodnota

Výsledná hodnota proudu je pak $I_0 = 4 + P1 + P2 + P3$ mA

1.6 Výpočet hodnot odporů

Výpočet hodnot odporů se odvíjel od faktu, že na výstupu „Sledovače OZ“ je stejné napětí, jako na pinu 1 (V_{ref}), tedy 4,096V. Po rozvržení hodnot proudů, které jsou potřebné pro funkci kalibračního vysílače proudové smyčky jsem vypočítal velikost odporu na jednotlivých větvích. Následně ještě bylo třeba každou tuto hodnotu rozdělit na další tři části. První část je nejbližší nižší možná hodnota z dostupných součástek v rozumné cenové kategorii a s rozumnou přesností (tolerance do 5%). Druhá část je řešena obdobně – nejbližší nižší možná hodnota součástky. Třetí část pak tvoří trimr o takové velikosti, aby dokázal pokrýt zbylou část potřebné hodnoty a ještě toleranci předchozích dvou součástek. Viz tabulka výpočtu odporů v příloze H.

1.6.1 Příklady výpočtu

$$R-P1: \quad U/I = 4,096 / 150 \cdot 10^6 = 27\,306,67 \, \Omega$$

$$R-P1: \quad = 1 / ((1/R) + (1/2R) + (1/4R) + (1/8R)) \rightarrow R = 51\,200 \, \Omega$$

$$R1 = R; \quad R2 = 2 \times R1; \quad R4 = 2 \times R2; \quad R8 = 2 \times R4$$

$$R \text{ požadovaný} = 51\,200 \, \Omega$$

$$R1 \quad R \text{ dostupný} = \underline{\underline{47\,000 \, \Omega}}$$

$$R2 \quad R \text{ přídavný} = \underline{\underline{1\,800 \, \Omega}}$$

$$\text{Suma} = R \text{ dostupný} + R \text{ přídavný} = 47\,000 + 1\,800 = 48\,800 \, \Omega$$

$$\text{„+5%“} = \text{Suma} \times 1,05 = 51\,240 \, \Omega$$

$$\text{„-5%“} = \text{Suma} \times 0,95 = 46\,360 \, \Omega$$

$$\text{Rozdíl} = \text{„-5%“} - R \text{ požadovaný} = 4\,840 \, \Omega$$

$$R26 \quad \text{Trimr} = \underline{\underline{5\,000 \, \Omega}}$$

$$R-P2: \quad U/I = 4,096 / 48 \cdot 10^6 = 85\,333 \, \Omega$$

$$R11 \quad R \text{ dostupný} = \underline{\underline{82\,000 \, \Omega}}$$

$$R12 \quad R \text{ přídavný} = \underline{\underline{0 \, \Omega}}$$

$$\text{Suma} = R \text{ dostupný} + R \text{ přídavný} = 82\,000 + 0 = 82\,000 \, \Omega$$

$$\text{„+5%“} = \text{Suma} \times 1,05 = 86\,100 \, \Omega$$

$$\text{„-5%“} = \text{Suma} \times 0,95 = 77\,900 \, \Omega$$

$$\text{Rozdíl} = \text{„-5%“} - R \text{ požadovaný} = 7\,430 \, \Omega$$

$$R31 \quad \text{Trimr} = \underline{\underline{10\,000 \, \Omega}}$$

1.9 Deska plošného spoje

Návrh desky plošného spoje byl navržen v programu Eagle. Návrh DPS nalezneme v Příloze C.

1.10 Realizace DPS

DPS (Příloha D) jsem osadil dle schématu (Příloha A).

1.10.1 Nastavení vysílače

Osazenou desku plošného spoje (Příloha E) jsem připojil ke zdroji 20 V s ampermetrem řazeným do série a začal jsem nastavovat jednotlivé trimry podle toho, kterou hodnotu jakého přepínače jsem nastavoval. Podrobnější popis viz. níže.

1.10.2 Nastavení jemné regulace P3

Na přepínačích jsem nastavil nejnižší možnou hodnotu. Trimmer R32 jsem nastavil tak, aby ampermetr ukázal hodnotu 3,2 mA. Dále jsem jemnou regulaci nastavil na nejvyšší hodnotu a trimmer R33 jsem nastavil tak, aby ampermetr ukázal hodnotu 4,2 mA.

1.10.3 Nastavení přepínače P2

Změnil jsem nastavení přepínače P2 na hodnotu „0“ a potenciometrem P3 jsem nastavil nejnižší hodnotu „0“. Dále jsem nastavil trimmer R30 na takovou hodnotu, aby ampermetr ukázal hodnotu 4,0 mA. Dále jsem přepl přepínač na hodnotu „+4“ a nastavil jsem trimmer R31 tak, aby ampermetrem protékal proud o hodnotě 8,0 mA.

1.10.4 Nastavení přepínače P1

Následně jsem vrátil tento přepínač na hodnotu „0“ a jemnou regulaci jsem nechal nastavenou na nejnižší hodnotu, abych měl na ampermetru zobrazenou hodnotu 4 mA. Poté jsem mohl začít s nastavováním pro přepínač P1. V první poloze přepínače jsem nastavoval trimmer R29 na hodnotu odpovídající hodnotě 5,0 mA na ampermetru. V poloze 2 jsem nastavoval trimmer R28 na takovou hodnotu, kdy ampermetr ukázal 6,0 mA. Během polohy 4 jsem nastavoval trimmer R27 na hodnotu ampermetru 8 mA a v poloze 8 jsem nastavoval trimmer R26 tak, aby ampermetr ukázal hodnotu 12 mA.

1.10.5 Kontrola nastavení

Na konec jsem provedl kontrolu nastavení trimrů stejným postupem, jakým jsem provedl nastavování.

1.11 Měření

Nastavování potenciometrů i měření na hotovém výrobku probíhalo na stejném měřicím přístroji, který měl přesnost na desetiny μA . Tabulku naměřených hodnot nalezneme v příloze I. Naměřené hodnoty se od očekávaných hodnot lišili obvykle v řádech desetin μA , proto jsem od naměřených hodnot odečetl hodnoty očekávané, tento rozdíl jsem podělil očekávanou hodnotou pro získání relativní chyby a následně jsem tuto hodnotu vynásobil hodnotou 1 000 000, aby byly odchylky výraznější. Tabulka vypočítaných hodnot je v příloze J. Z takto vypočítaných hodnot jsem sestrojil gravy (příloha K), na kterých jsou dobře viditelné maximální odchylky, ze kterých je následně určena maximální chyba přístroje.

1.12 Určení maximální chyby přístroje

Během vyřazeného potenciometru P3 byla největší relativní chyba při nastavení přepínačů $P1 = 4$ a $P2 = +4$. Očekávaná hodnota byla 12 mA, naměřená hodnota je 12,0020 mA. Absolutní chyba je 2 μA , relativní chyba je 167 ppm.

Největší relativní chyba byla při měření spojitosti potenciometru. Během nastavení přepínačů $P1 = 0$ a $P2 = 0$ byla očekávaná hodnota 4,2 mA, naměřená hodnota byla ale 4,2020. Absolutní chyba je 2 μA , relativní chyba je ale 476 ppm.

Závěr

Tolerance SMD odporů je 1%. Tolerance trimrů je 10%. Tyto hodnoty se vztahují na celkovou hodnotu odporů. Trimry jsou ale 21 otáčkové. Tím lze nastavit téměř přesná hodnota, která není závislá na hodnotě tolerance odporů ani trimrů, ale je závislá na hodnotě tolerance přístroje, na kterém se přesné hodnoty nastavují.

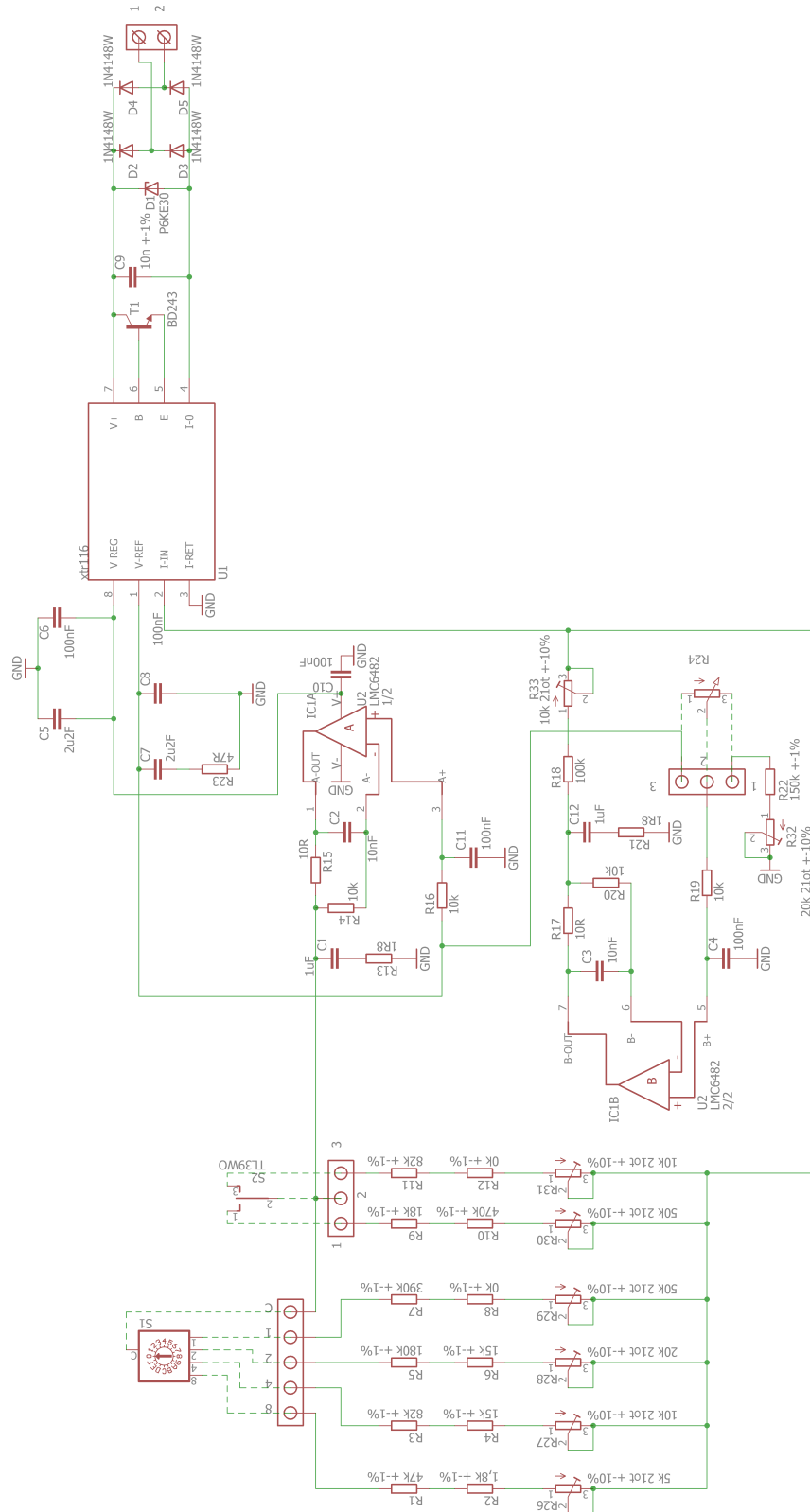
Teplotní koeficient u použitých cermetových trimrů i u SMD odporů je dle výrobce 100 ppm / °C, což odpovídá hodnotě 0,01% /°C.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] VOJÁČEK, Antonín. Proudová smyčka 4-20 mA - obecný popis: Proudová smyčka 4-20 mA. *Automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. online: online, 2014 [cit. 2016-08-10]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/proudova-smycka-4-20-ma-obecny-popis>
- [2] EDITED BY W. GÖPEL, J. HESSE, J.N. ZEMEL., edited by W. Göpel, J. Hesse, J.N. Zemel. *Sensors: a comprehensive survey*. Weinheim, F.R.G: VCH, 1989. ISBN 3527267670.
- [3] 4-20mA CURRENT LOOP TRANSMITTERS: XTR115 XTR116. *Texas Instruments* [online]. Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265: Texas Instruments, 2003 [cit. 2016-08-10]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/xtr116.pdf>
- [4] TUMAŇSKI, Sławomir. *Principles of electrical measurement*. New York: Taylor & Francis, 2006. Sensors series. ISBN 0750310383.
- [5] LMC6482 CMOS Dual Rail-to-Rail Input and Output Operational Amplifier: LMC6482. *Texas Instruments* [online]. Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265: Texas Instruments, 1997, 2015 [cit. 2016-08-10]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmc6482.pdf>
- [6] BD243C - POWER TRANSISTORS(6A,65W): Mospec Semiconductor. *Alldatasheet.com: Electronic Components Datasheet Search* [online]. online: Mospec Semiconductor [cit. 2016-08-10]. Dostupné z: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/2587/MOSPEC/BD243C.html>
- [7] P6KE30 Datasheet (PDF) - Pan Jit International Inc.: P6KE30. *Alldatasheet.com: Electronic Components Datasheet Search* [online]. online: PANJIT [Pan Jit International Inc.] [cit. 2016-08-10]. Dostupné z: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/14769/PANJIT/P6KE30.html>
- [8] 1N4148W Datasheet (PDF) - Pan Jit International Inc.: 1N4148W. *Alldatasheet.com: Electronic Components Datasheet Search* [online]. online: PANJIT [Pan Jit International Inc.] [cit. 2016-08-10]. Dostupné z: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/14620/PANJIT/1N4148W.html>

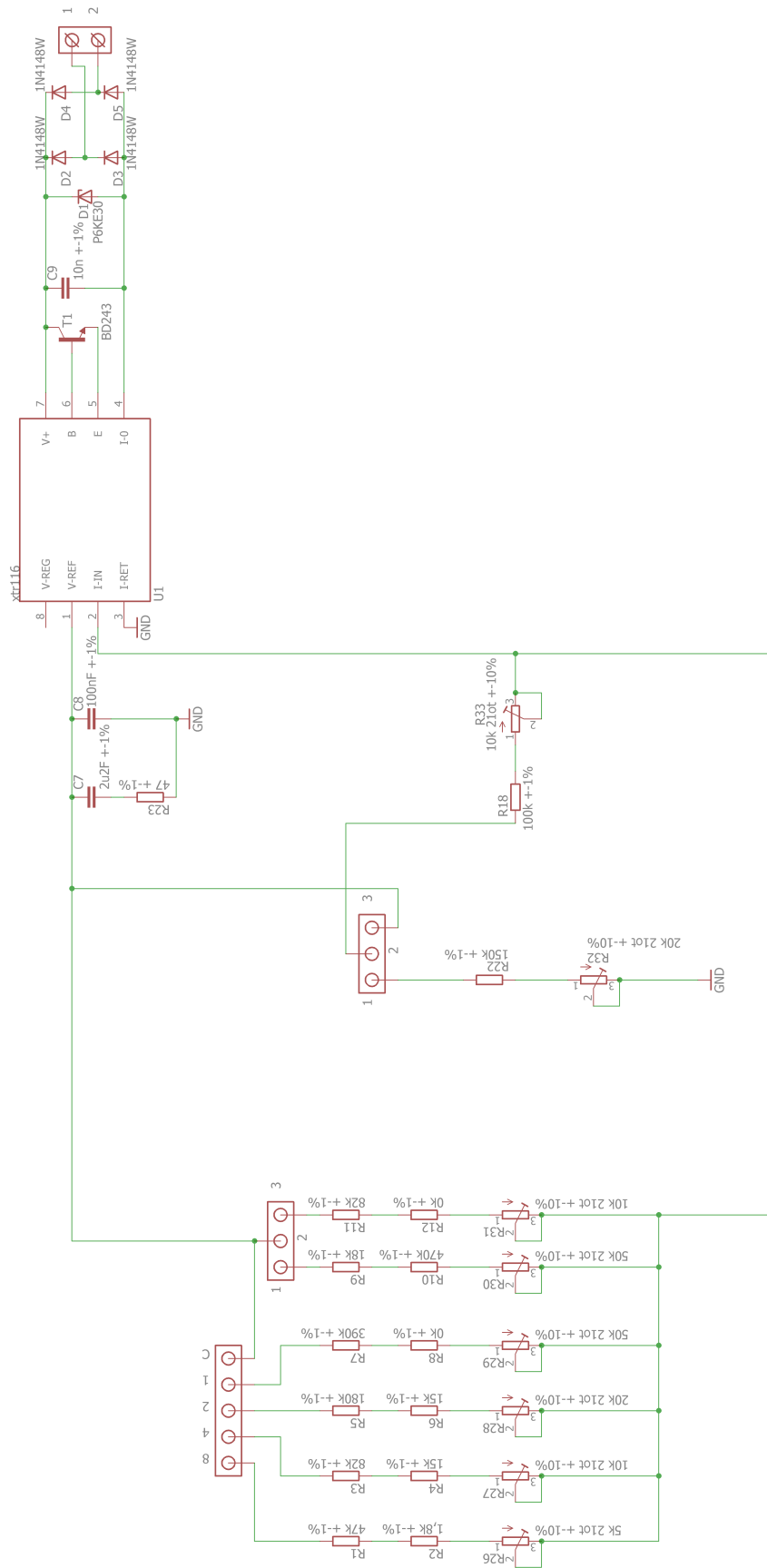
Přílohy

Příloha A – Schema zapojení



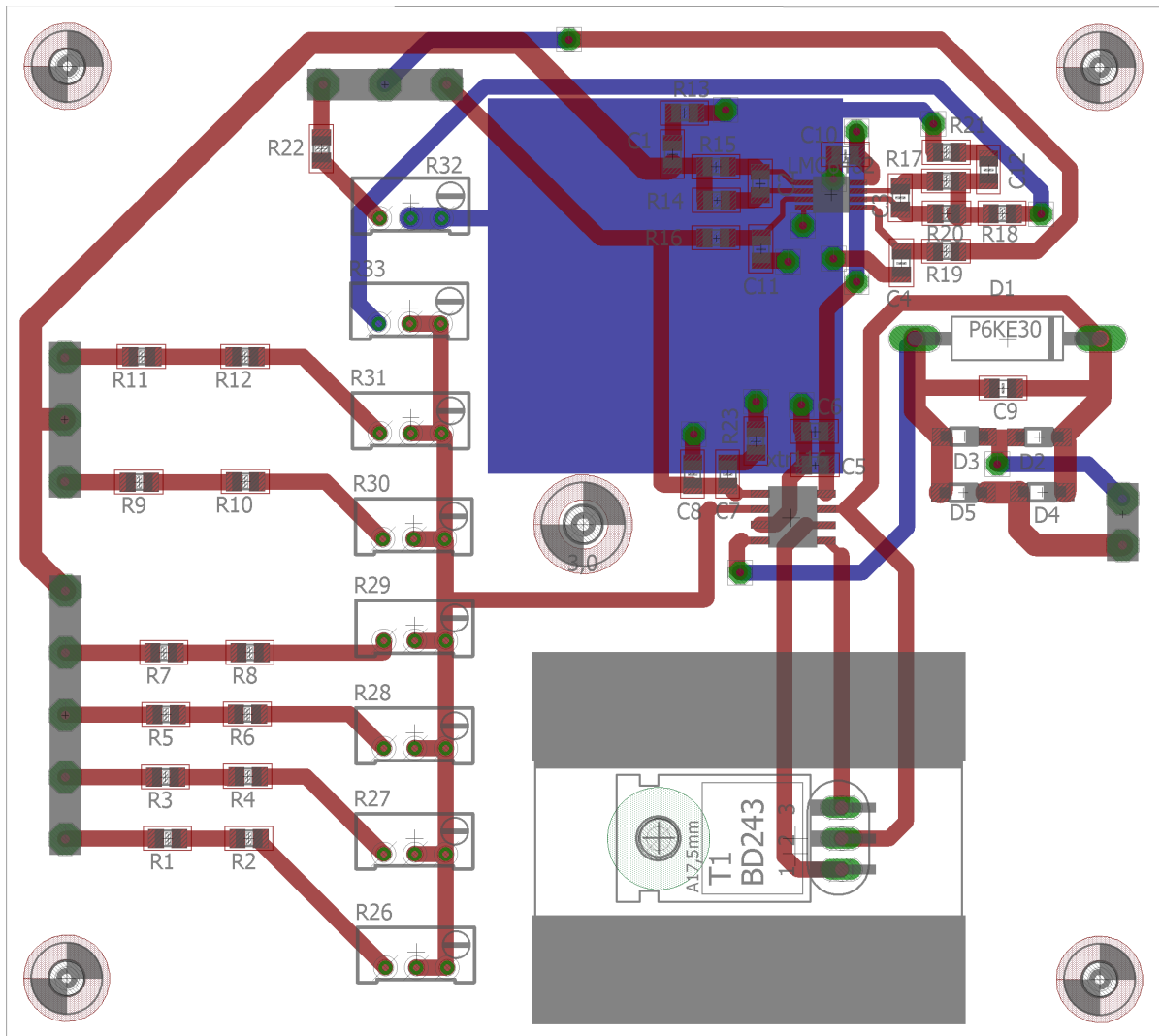
Příloha A: Schema zapojení

Příloha B – Schema varianty zapojení bez OZ

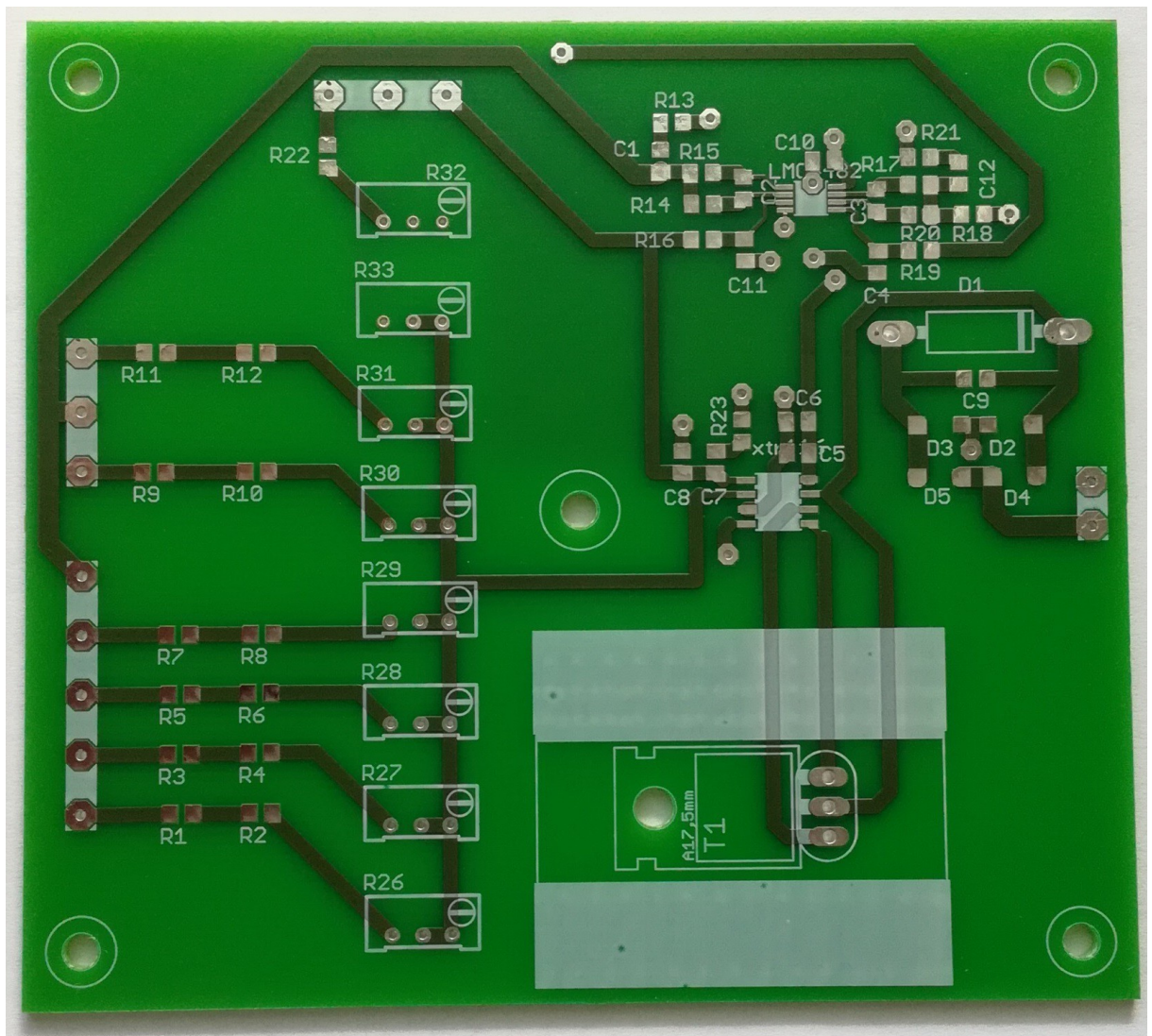


Příloha B: Schema varianty zapojení bez OZ

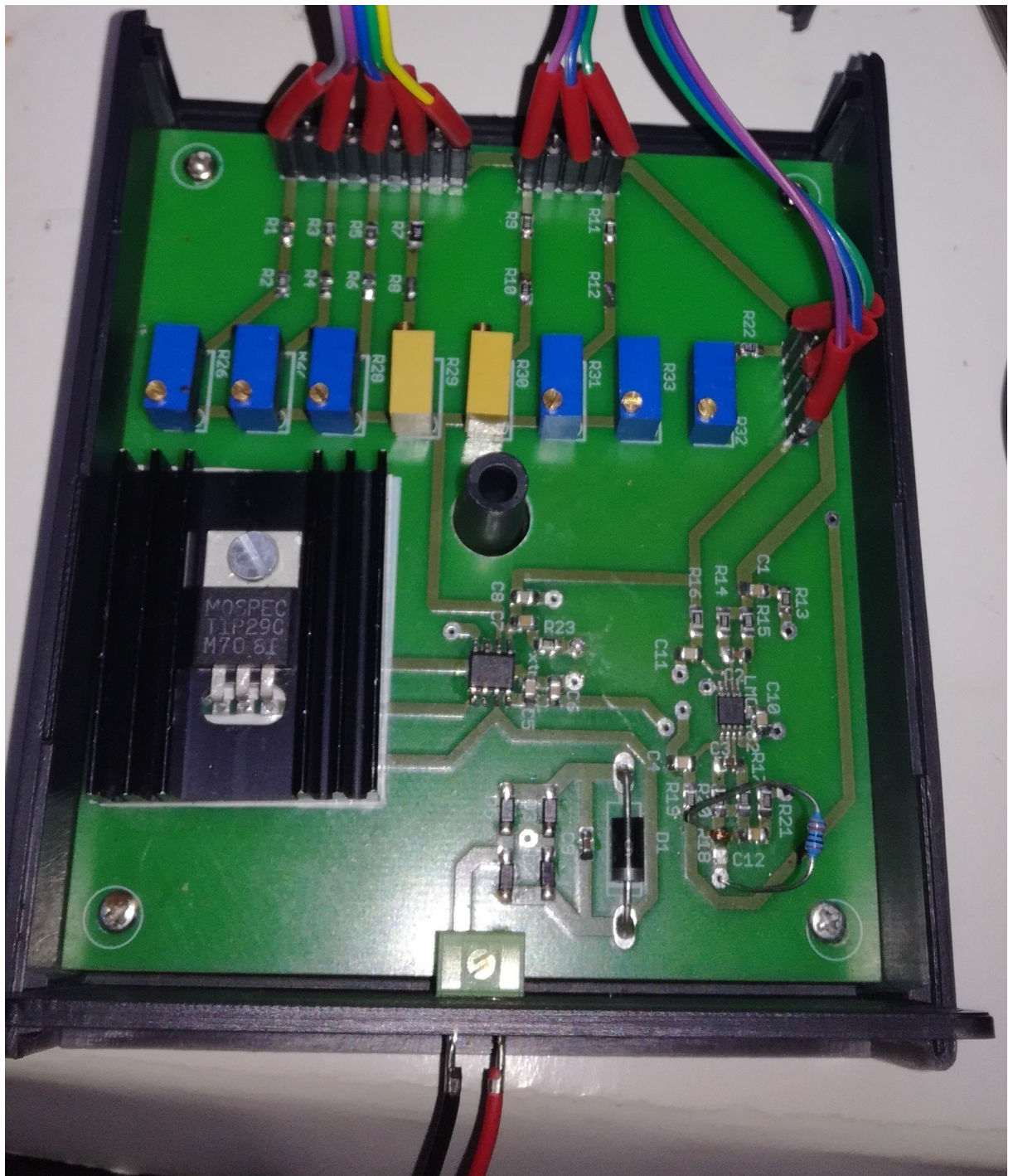
Příloha C – Deska plošného spoje – návrh



Příloha C: Návrh desky plošného spoje

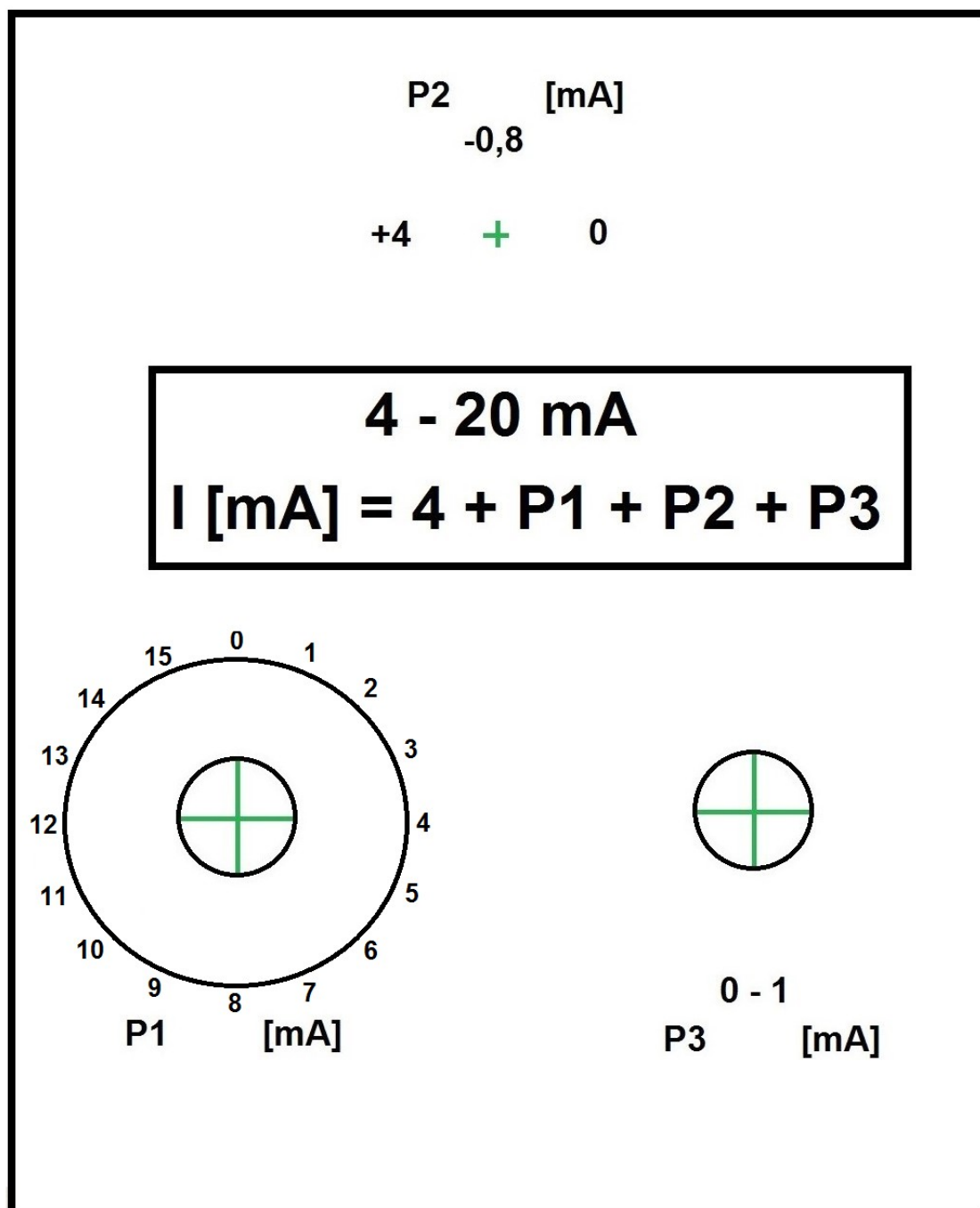
Příloha D – Deska plošného spoje – vyhotovená deska*Příloha D: Vyhotovená deska plošného spoje*

Příloha E – Deska plošného spoje – osazená



Příloha E: Osazená deska plošného spoje

Příloha F – Potisk krabičky



Příloha F: Potisk krabičky

Příloha G – Hotový výrobek – Kalibrační vysílač proudové smyčky

Příloha G: Kalibrační vysílač proudové smyčky

Příloha H – Hodnoty odporů

	R požadovaný	R dostupný	R přídavný MAX	R přídavný	Suma	„+5%“	-5,00%	rozdíl	trimr
R1	51200,63	47000	-39,38	1800	48800	51240	46360	4840,63	5k
R2	102401,25	82000	551,25	15000	97000	101850	92150	10251,25	10k
R2	102401,25	100000	-2598,75	0	100000	105000	95000	7401,25	10k
R4	204802,5	180000	52,5	15000	195000	204750	185250	19552,5	20k
R8	409605	390000	105	0	390000	409500	370500	39105	50k
Suma	27307								
8uA	512	470	-0,4	18	488	512,4	463,6	48,4	50k
48uA	85,33	82	-0,77		82	86,1	77,9	7,43	10k
R42-32	160000	150000	2500		150000	157500	142500	17500	20k

Příloha H: Tabulka hodnot odporů

Příloha I – Tabulky naměřených hodnot

P3 = 0		U = 20V	T = 22°C	
P1		P2 = -0,8	P2 = 0	P2 = +4
0		3,2000	4,0006	8,0004
1		4,2002	5,0005	9,0003
2		5,2000	6,0005	10,0002
3		6,2000	7,0003	11,0000
4		7,2000	8,0003	12,002
5		8,2000	9,0002	13,001
6		9,1998	10,0001	14,000
7		10,1995	11,0000	15,001
8		11,2002	12,001	16,001
9		12,201	13,001	17,000
10		13,201	14,001	18,000
11		14,200	15,001	19,000
12		15,200	16,001	20,000
13		16,200	17,001	21,000
14		17,200	18,000	21,999
15		18,200	19,000	22,999

P3 = 1		U = 20V	T = 22°C	
P1		P2 = -0,8	P2 = 0	P2 = +4
15		19,2000	20,0000	24,0000

P1 = 0 P2 = 0		U = 20V T = 22°C	P1 = 15 P2 = +4		U = 20V T = 22°C
P3			P3		
0,0		4,0002	0,0		22,999
0,1		4,1009	0,1		23,098
0,2		4,2020	0,2		23,199
0,3		4,3015	0,3		23,299
0,4		4,4013	0,4		23,399
0,5		4,5006	0,5		23,498
0,6		4,6005	0,6		23,598
0,7		4,7016	0,7		23,699
0,8		4,8011	0,8		23,798
0,9		4,9014	0,9		23,899
1,0		5,0016	1,0		23,999

Příloha I: Tabulky naměřených hodnot

Příloha J – Tabulky vypočítaných hodnot

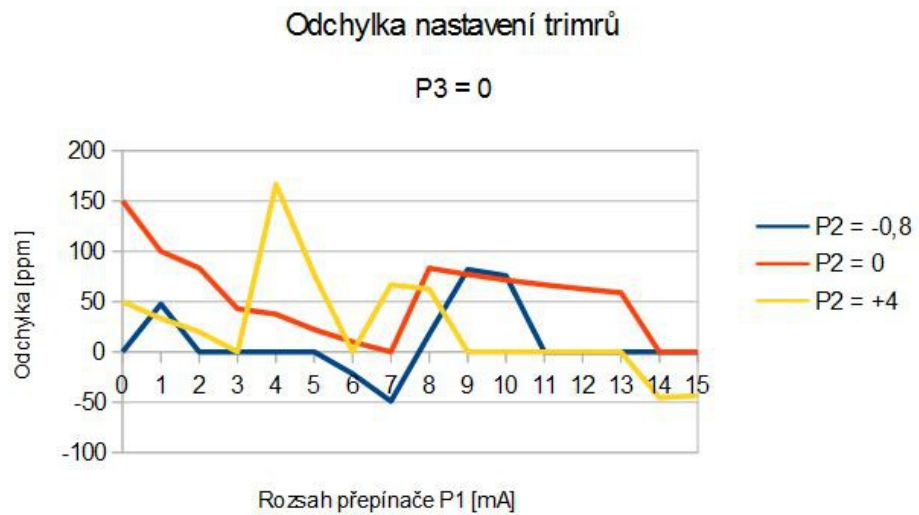
P3 = 0		U = 20V	T = 22°C	
P1	P2 = -0,8	P2 = 0	P2 = +4	
0	0	150	50	
1	48	100	33	
2	0	83	20	
3	0	43	0	
4	0	37	167	
5	0	22	77	
6	-22	10	0	
7	-49	0	67	
8	18	83	63	
9	82	77	0	
10	76	71	0	
11	0	67	0	
12	0	63	0	
13	0	59	0	
14	0	0	-45	
15	0	0	-43	

P3 = 1		U = 20V	T = 22°C	
P1	P2 = -0,8	P2 = 0	P2 = +4	
15	19,2000	20,0000	24,0000	

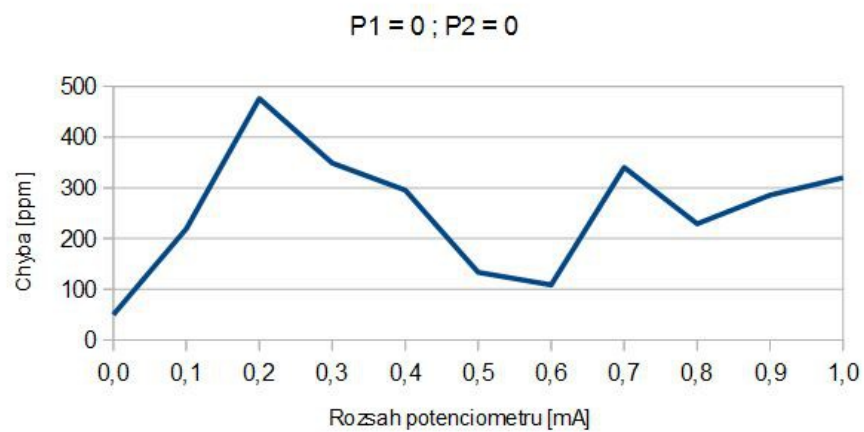
P1 = 0 P2 = 0		U = 20V T = 22°C	P1 = 15 P2 = +4		U = 20V T = 22°C
P3			P3		
0,0		50	0,0		-43
0,1		220	0,1		-87
0,2		476	0,2		-43
0,3		349	0,3		-43
0,4		295	0,4		-43
0,5		133	0,5		-85
0,6		109	0,6		-85
0,7		340	0,7		-42
0,8		229	0,8		-84
0,9		286	0,9		-42
1,0		320	1,0		-42

Příloha J: Tabulky vypočítaných hodnot

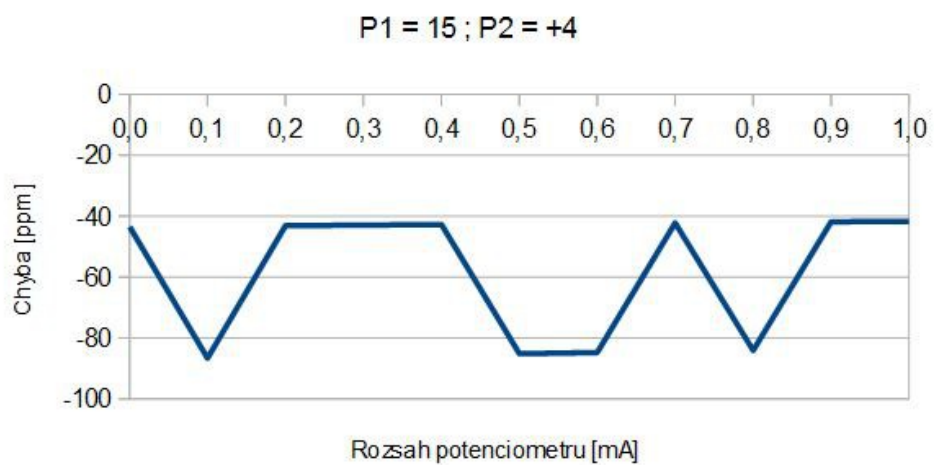
Příloha K – Grafy



Odchylka potenciometru P3 na spodní hranici rozsahu vysílače



Odchylka potenciometru P3 na horní hranici rozsahu vysílače



Příloha L – Seznam součástek

Part	Value	Device	Package	Description
C1	1uF	C-EUC0805	C0805	CAPACITOR
C2	10nF	C-EUC0805	C0805	CAPACITOR
C3	10nF	C-EUC0805	C0805	CAPACITOR
C4	100nF	C-EUC0805	C0805	CAPACITOR
C5	2u2F	C-EUC0805	C0805	CAPACITOR
C6	100nF	C-EUC0805	C0805	CAPACITOR
C7	2u2F	C-EUC0805	C0805	CAPACITOR
C8	100nF	C-EUC0805	C0805	CAPACITOR
C9	10n+-1%	C-EUC0805	C0805	CAPACITOR
C10	100nF	C-EUC0805	C0805	CAPACITOR
C11	100nF	C-EUC0805	C0805	CAPACITOR
C12	1uF	C-EUC0805	C0805	CAPACITOR
D1	P6KE30	TRANSIL	C1702-15	TRANSIL
D2	1N4148W	1N4148	SOD123	DIODE
D3	1N4148W	1N4148	SOD123	DIODE
D4	1N4148W	1N4148	SOD123	DIODE
D5	1N4148W	1N4148	SOD123	DIODE
R1	47k	R-EU_R0805	R0805	RESISTOR
R2	1k8	R-EU_R0805	R0805	RESISTOR
R3	82k	R-EU_R0805	R0805	RESISTOR
R4	15k	R-EU_R0805	R0805	RESISTOR
R5	180k	R-EU_R0805	R0805	RESISTOR
R6	15k	R-EU_R0805	R0805	RESISTOR
R7	390	R-EU_R0805	R0805	RESISTOR
R8	0	R-EU_R0805	R0805	RESISTOR
R9	18k	R-EU_R0805	R0805	RESISTOR
R10	470k	R-EU_R0805	R0805	RESISTOR
R11	82k	R-EU_R0805	R0805	RESISTOR
R12	0	R-EU_R0805	R0805	RESISTOR
R13	1R8	R-EU_R0805	R0805	RESISTOR
R14	10k	R-EU_R0805	R0805	RESISTOR
R15	10R	R-EU_R0805	R0805	RESISTOR

Part	Value	Device	Package	Description
R16	10k	R-EU_R0805	R0805	RESISTOR
R17	10R	R-EU_R0805	R0805	RESISTOR
R18	100k	R-EU_R0805	R0805	RESISTOR
R19	10k	R-EU_R0805	R0805	RESISTOR
R20	10k	R-EU_R0805	R0805	RESISTOR
R21	1R8	R-EU_R0805	R0805	RESISTOR
R22	150k	R-EU_R0805	R0805	RESISTOR
R23	47R	R-EU_R0805	R0805	RESISTOR
R26	5k 21ot	R- Trimm64W	RTRIM64W	Trimmresistor
R27	10k 21ot	R- Trimm64W	RTRIM64W	Trimmresistor
R28	20k 21ot	R- Trimm64W	RTRIM64W	Trimmresistor
R29	50k 21ot	R- Trimm64W	RTRIM64W	Trimmresistor
R30	50k 21ot	R- Trimm64W	RTRIM64W	Trimmresistor
R31	10k 21ot	R- Trimm64W	RTRIM64W	Trimmresistor
R32	20k 21ot	R- Trimm64W	RTRIM64W	Trimmresistor
R33	10k 21ot	R- Trimm64W	RTRIM64W	Trimmresistor
T1	BD243	BD243	TO220	NPN-Transistor
LMC1	AMPLIFIER	AMPLIFIER	VSSOP	O. AMPLIFIER
XTR1	XTR116	XTR116	SO-8	XTR116