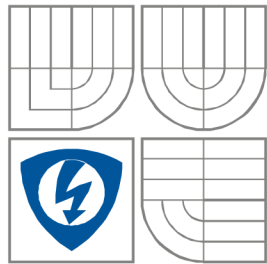


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V
BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TEORETICKÉ A EXPERIMENTÁLNÍ
ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION

INSTITUTE OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL
ELECTRONIC

Návrh měřiče VA charakteristik dvojpólů

Design of VA characteristics meter of the dipoles

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

MASTER'S PROJECT

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

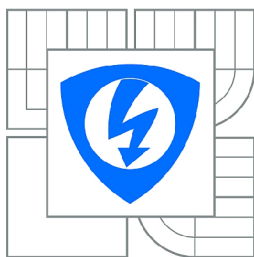
Martin Štěpnička

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Miloslav Steinbauer, Ph.D.

BRNO, 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Martin Štěpnička

ID: 139293

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Návrh měřiče VA charakteristik dvojpólů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s měřením VA charakteristik dvojpólů. Navrhněte měřicí přístroj pro měření VA charakteristik dvojpólů vhodný i pro měření stabilizačních diod s rozsahem závěrného napětí do 200 V. Měřicí rozsahy -200 až + 200 V / 10 mA. Zařízení má komunikovat s PC.

Navržený měřicí přístroj realizujte a experimentálně ověřte jeho vlastnosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] MATOUŠEK, D. Udělejte si z PC - 1. díl. Praha: BEN - technická literatura, 2001.

[2] LÁNÍČEK, R. Elektronika, obvody - součástky - děje. Praha: BEN - technická literatura, 1998.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 30.5.2014

Vedoucí práce: doc. Ing. Miloslav Steinbauer, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práce popisuje návrh měřicího přístroje volt-ampérových charakteristik PN přechodů vhodný pro měření charakteristik stabilizačních diod. Popisuje základní princip PN přechodu a s ním spojené jevy. Část textu rozebírá jak nepříznivé parazitní jevy minimalizovat. Dále se zabývá návrhem síťového zdroje vhodného pro tento přístroj. S tím rozebírá okrajově usměrňovače, stabilizátory a filtry. Následuje popis zapojení zařízení obstarávajícího měření, princip komunikace s počítačem a způsob zpracování získaných dat. V příloze jsou obsaženy schématické návrhy zapojení, desky plošných spojů a rozpis součástek.

KLÍČOVÁ SLOVA

Stabilizovaný zdroj, PN přechod, stabilizační dioda, měření charakteristik, VA charakteristika

ABSTRACT

The thesis describes the design of a measuring device volt-ampere characteristics of PN junction suitable for measuring characteristics of stabilizing diodes. Describes the basic principle of PN junction and related events. Part of the text discusses how to minimize the adverse parasitic effects. Furthermore, the proposal deals with an AC adapter suitable for this device. With that analyzes marginally rectifiers, stabilizers and filters. The following is a description of the device for measurement, principle of communication with the computer and the method of data processing. The annex contains schematic design, printed circuit boards and part list.

KEYWORDS

Stabilized power supply, PN junction, stabilizing diode, measurement characteristics, VA characteristics

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠTĚPNIČKA, M. *Návrh měřiče VA charakteristik dvojpólů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 50 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Miloslav Steinbauer, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Návrh měřiče VA charakteristik dvojpolů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Miloslav Steinbauer, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	ix
1 Úvod	10
2 Návrh zdroje	11
2.1 Usměřovače	11
2.2 Filtry.....	12
2.2.1 Pasivní.....	13
2.2.2 Aktivní	14
2.3 Výsledné řešení zdrojů.....	14
2.3.1 Zdroj měřicího napětí.....	14
2.3.2 Zdroj pro řídicí elektroniku.....	16
3 Návrh měřicího přístroje	17
3.1 Teoretický rozbor PN přechodu.....	17
3.1.1 Princip PN přechodu	17
3.1.2 Ideální dioda	17
3.1.3 Omezení při měření	18
3.2 Popis zapojení	20
4 Realizovaný přístroj	22
4.1 Zdroj.....	22
4.1.1 Funkčnost.....	22
4.2 Měřicí přístroj	23
4.2.1 Funkčnost.....	23
4.2.2 Výsledky měření	24
5 Programové řízení	29
5.1 Algoritmus pro program mikrokontroléru	29
5.2 Algoritmus pro ovládací program.....	30
5.3 Popis komunikace	30
5.4 Základní funkce pro mikrokontrolér.....	31

5.5	GUI ovládacího programu	33
6	Závěr	35
	Literatura	36
	Seznam symbolů zkratk	37
	Seznam příloh	38

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1: Schéma jednocestného usměrňovače s ukázkou průběhů napětí (převzato z [5]).....	11
Obr. 2.2: Schéma dvoucestného usměrňovače s ukázkou průběhů napětí (převzato z [5]).....	12
Obr. 2.3: Schéma můstkového usměrňovače s ukázkou průběhů napětí (převzato z [5]).	12
Obr. 2.4: Schématické zapojení filtračního RC článku.	13
Obr. 2.5: Schématické zapojení filtračního LC článku.	13
Obr. 2.6: Zapojení kapacitního násobiče.	14
Obr. 4.1: Fotografie výsledného měřicího přístroje.....	24
Obr. 4.3: Charakteristiky stabilizačních diod podle výrobce [2]	24
Obr. 4.4: Charakteristiky diod podle výrobce [2]	25
Obr. 4.5: Stabilizační dioda 4,7 V (pouze závěrný směr).....	25
Obr. 4.6: Stabilizační dioda 4,7 V	26
Obr. 4.7: Stabilizační dioda 33 V (pouze závěrný směr).....	26
Obr. 4.8: Stabilizační dioda 33 V	27
Obr. 4.9: Červená LED dioda (pouze propustný směr) podle výrobce [2].....	27
Obr. 4.10: Červená LED dioda (pouze propustný směr)	28
Obr. 4.11: Rezistor 39 k Ω na rozsahu -205 V..+205 V	28
Obr. 4.12: Rezistor 39 k Ω na rozsahu -5 V..+5 V	29
Obr. 5.1: Měření jednotlivých hodnot	33
Obr. 5.2: Výsledek měření daného rozsahu (LED dioda).....	34

SEZNAM TABULEK

Tab. 0.1: Přehled dostupných rozsahů měření a k nim detailní informace o zesílení a použitých odporech ve zpětné vazbě.	21
--	----

1 ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem měřicího přístroje pro měření volt-ampérových charakteristik dvojpólů. Primární využití přístroje je měření stabilizačních diod. Obsluha měření má být prováděna pomocí počítače. Řízení samotného přístroje obstarává mikrokontrolér, který komunikuje s počítačem pomocí USB. Pro přesné měření v řádu milivoltů je potřeba navrhnout stabilizovaný zdroj, který nevnese do výsledků žádné zkreslení a druhý stabilizovaný zdroj pro řídicí elektroniku. V následujícím textu bude každá část práce nejdříve teoreticky rozebrána. Následně budou uváženy a zvoleny jednotlivé parametry jak měřicího přístroje, tak použitých součástek. Ještě je nutné promyslet postup, kterým bude přístroj provádět měření a jak budou potřebná data získávána a zpracovávána. Vždy na konci každé kapitoly bude ukázán již samotný návrh všech nutných částí přístroje. V závěru práce je ukázáno finální řešení prototypu. Ověření jeho funkčnosti a srovnání naměřených charakteristik diod s charakteristikami z datasheetu. Příloha obsahuje navržené desky plošných spojů a ovládací program.

2 NÁVRH ZDROJE

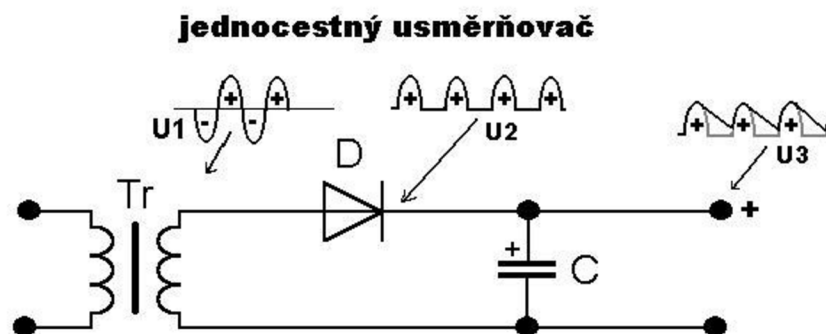
Pro měřicí rozsah -200 až 200 V / 10 mA je ideální řešení použít síťové napětí 230 V_{AC}, to usměrnit, následně vyfiltrovat a stabilizovat. Když je uvážena nutnost měření proudu diodou a jeho odečítání pomocí AD převodníku na referenčním rezistoru mikrokontrolérem, je potřeba zvolit výstupní napětí zdroje větší o maximální hodnotu na napětí právě na tomto rezistoru plus rezerva pro případné ztráty na řídicím prvku.

Druhý zdroj pro řídicí elektroniku bude dodávat 5 V a pro operační zesilovače symetrických $+6$ V a -6 V. Výstupní napětí musí být také maximálně vyfiltrované a stabilizované. Použití spínaného zdroje by bylo příliš komplikované na filtraci vysokých kmitočtů zanesených spínáním (proto zde ani tento typ zdroje není rozebrán). Navíc k tomu výstup 5 V je použit i jako zdroj referenčního napětí pro AD i DA převodníky. Lineární stabilizace z 230 V_{AC} na takto nízká napětí není možná, kvůli neúnosnému ztrátovému výkonu.

Z důvodu nutnosti galvanického oddělení měřicího přístroje budou použity dva transformátory 230 V/ 2×9 V. První z nich dodá symetrické napětí pro stabilizátory 78XX a 79XX. Druhý z nich bude připojen za první tak, že transformuje napětí zpět na 230 V_{AC}.

2.1 Usměrňovače

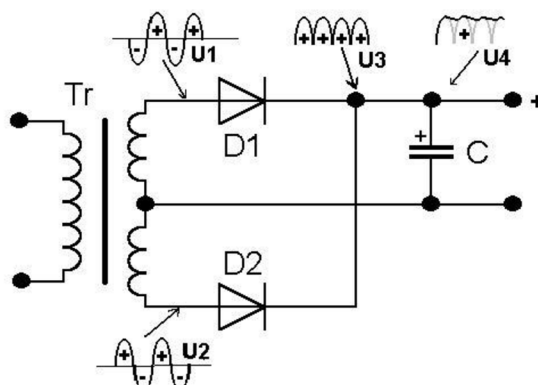
Slouží k usměrnění střídavého síťového napětí. Základním typem je jednocestný usměrňovač (viz. Obr. 2.1). Ten propouští pouze kladné půlvlny. Absence záporných půlvln způsobuje, že následná filtrace je složitější a je nutno použít velkou hodnotu kapacity respektive indukčnosti, která vykompenzuje pokles napětí respektive proudu mezi půlvlnami.



Obr. 2.1: Schéma jednocestného usměrňovače s ukázkou průběhů napětí (převzato z [5]).

Další ze zástupců je dvoucestný usměrňovač (viz. Obr. 2.2). Ten má již na výstupu půlvlny oboje, ale vyžaduje transformátor s vyvedeným středem vinutí na sekundární straně. Dříve hodně používané zapojení pro jeho jednoduchost a dobré výsledky.

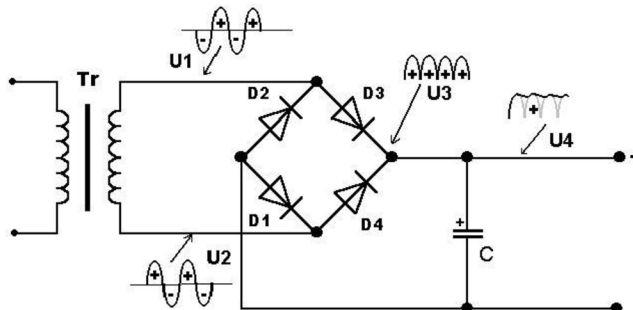
dvoucestný usměřovač



Obr. 2.2: Schéma dvoucestného usměřovače s ukázkou průběhů napětí (převzato z [5]).

Poslední ze známých zástupců je můstkový usměřovač (viz. Obr. 2.3), někdy nazývaný též jako Graetzův můstek. Díky tomuto geniálnímu zapojení není nutno zvláštních transformátorů s vyvedeným středem vinutí a zároveň má na výstupu obě půlvlny. Nevýhodou je dvojnásobek použitých diod a s tím i spojený dvojnásobný úbytek napětí na diodách. Tento usměřovač se dnes už vyrábí jako integrovaný obvod, který lze pořídit za minimální náklady.

dvoucestný, můstkový usměřovač



Obr. 2.3: Schéma můstkového usměřovače s ukázkou průběhů napětí (převzato z [5]).

2.2 Filtry

Obecně slouží ke zmenšení, v ideálním případě k úplnému odstranění střídavé složky. Využívají proudové setrvačnosti u cívky respektive napěťové setrvačnosti u kapacit a jejich kombinace. Mezi základní zástupce patří RC a LC filtry prvního řádu. Dělí se na pasivní a aktivní filtry. Kvalitu filtrace udává činitel zvlnění (1). Jedná se o procentuální vyjádření, jak velká část napětí je zvlněná.

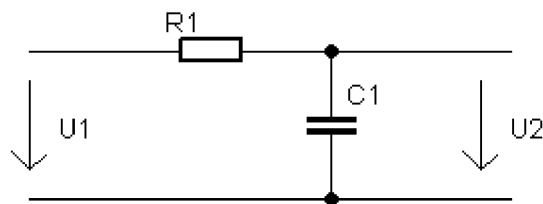
$$\varphi_{zv} = \frac{U_{zv}}{U_{ss}} \cdot 100 [\%] \tag{1}$$

kde je:

φ_{zv}	činitel zvlnění
U_{zv}	velikost střídavé složky napětí
U_{ss}	velikost stejnosměrné složky napětí

2.2.1 Pasivní

RC filtr vytváří dolní propust (viz. Obr. 2.4). Je vhodný pro malé rozměry a nízkou cenu. Problém však nastává při velkých výkonech, kdy je rezistor v sérii se zátěží neúnosný.



Obr. 2.4: Schématické zapojení filtračního RC článku.

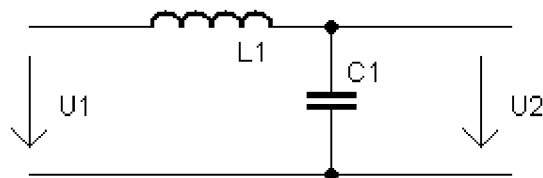
Následující rovnice (2) popisuje činitel filtrace RC prvku, který je závislý na velikosti použitého kondenzátoru, rezistoru a úhlové rychlosti.

$$\varphi_f = \omega \cdot R \cdot C + 1 \text{ [%]} \quad (2)$$

kde je:

ω	úhlová rychlost
φ_f	činitel filtrace (udává, kolikrát klesne výstupní zvlnění)

LC filtr (viz. Obr. 2.5) je čistě imaginární (je-li zanedbán parazitní odpor vodičů), takže již nezpůsobuje výkonovou ztrátu jako předchozí filtr. Zároveň použití dalšího reaktančního prvku vylepší výsledné filtrační vlastnosti. Díky rozměrům a ceně cívky se však využívá jen v nutných případech.



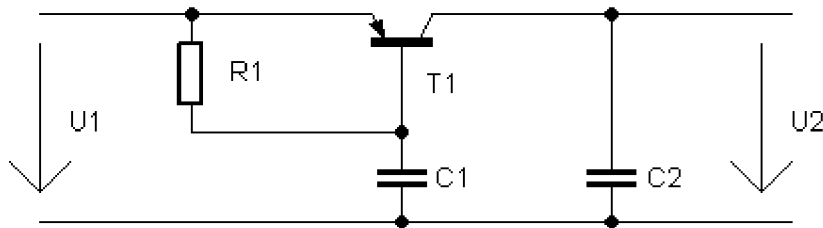
Obr. 2.5: Schématické zapojení filtračního LC článku.

Stejně tak tento obvod je popsán rovnicí (3). Činitel filtrace v tomto případě může dosahovat podstatně větších hodnot, protože počítá s kvadrátem úhlové rychlosti.

$$\varphi_f = \omega^2 \cdot L \cdot C - 1 \text{ [%]} \quad (3)$$

2.2.2 Aktivní

Aktivní filtr se stane z pasivního pomocí přidání aktivního prvku. Na obrázku Obr. 2.6 je ukázáno zapojení kapacitního násobiče. Pasivní filtr udržuje na bázi konstantní napětí, což není takový problém, když proud do báze je β krát menší než by byl normálně. Zároveň filtrační schopnosti β krát rostou. Zvlněné napětí na vstupu mění napětí mezi bázi a emitorem, tím mění v rytmu zvlnění vnitřní odpor tranzistoru. Touto změnou vnitřního odporu je zároveň měněno napětí mezi kolektorem a emitorem a tím dochází k filtraci. Výrazná nevýhoda tohoto zapojení je, že při napěťových špičkách nedokáže rychle reagovat a výstupní napětí pouze ořezává.



Obr. 2.6: Zapojení kapacitního násobiče.

2.3 Výsledné řešení zdrojů

Tato část práce shrnuje předešlé poznatky o zdrojích a popisuje postup návrhu obou zdrojů. Schéma zapojení a příslušná dokumentace k těmto zdrojům se nachází v příloze [B].

2.3.1 Zdroj měřicího napětí

Zdroj musí pokrýt úbytek napětí 200 V na měřenou součástku, 5 V na referenční odpor sloužící jako převodník I/U a 0,7 V na otevřený PN přechod řídicího tranzistoru s malou rezervou. Zdroj musí tedy dodávat stabilních vyfiltrovaných 206 V při 20 mA pro pokrytí odběru napěťových děličů. Zároveň musí být výstup zdroje galvanicky oddělený od napájení z hlediska bezpečnosti. To je realizováno dvěma transformátory HAHN TRHUI393-2X9 [2] za sebou. Jeden transformuje napětí na nižší, které je použito pro zdroj pro řídicí elektroniku a druhý napětí transformuje zpět na 230 V_{AC}. Ve zdroji je použit můstkový usměrňovač. Usměrňovač je použit kvůli výhodné ceně a jednoduché konstrukci v integrované podobě. Zvlnění zdroje může být maximálně do 1 mV, aby se změny napětí nepromítaly na měřenou součástku. Výsledné maximální zvlnění udává následující rovnice (5).

$$\varphi_z = \frac{U_{zv}}{U_{ss}} \cdot 100 = \frac{1\text{mV}}{206\text{V}} \cdot 100 = 0,0004854 \% \quad (5)$$

Kde U_{zv} je požadovaná velikost střídavé složky a U_{ss} je výstupní napětí. Potřebného snížení zvlnění dosáhne zdroj filtrem. Filtraci obstarává akumulární kondenzátor o hodnotě $C_1 = 33 \mu\text{F}$. Požadovaný proud zdroje I_{max} je zvolen na hodnotu 20 mA.

Zvlnění takového zdroje dosahuje hodnoty dle vztahu (6).

$$\varphi_z = \frac{I_{\max}}{f \cdot C \cdot U_{\max}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (6)$$

$$\frac{20 \cdot 10^{-3}}{100 \cdot 33 \cdot 10^{-6} \cdot 230} \cdot 100 = 2,6350 \%$$

Kde U_{\max} je vstupní napětí, a f je frekvence zvlnění vstupního napětí. Aby zdroj dosáhl požadované úrovně zvlnění je nutno toto zvlnění ještě zmenšit o hodnotu danou poměrem současné / požadované zvlnění, takže $2,6350 / 0,0004854 \approx 5400$ krát, pro jistotu spíše 6000 krát. Je tedy nutné zařadit další filtr s činitelem filtrace alespoň $\varphi_f = 6000$. Z tohoto důvodu je ještě zařazen RC aktivní filtr s tranzistorem, pro jeho lepší vlastnosti oproti filtru pasivnímu. Tranzistor T_2 musí vydržet U_{ce} minimálně $230 \cdot 0,7$ V, aby nedošlo k průrazu, než se kondenzátor C_2 nabije a tranzistor se otevře. Společně s požadavkem $I_c = 20$ mA je volba pro tranzistor MJE340 [2], který má proudový zesilovací činitel β roven 60, při $I_c = 20$ mA a teplotě 25°C . Zároveň dokumentace výrobce říká, že mezi bází a emitorem má napětí $U_{be} = 3$ V. Díky zesilovacímu činiteli stačí, aby pasivní částí filtru (rezistorem) tekla proud β krát menší než tranzistorem. Ze vztahu (7) vyplývá, že proud do báze I_b musí být 0,3333 mA. Úbytek napětí na tranzistoru je volen přibližně na hodnotu $U_{ce} = 325 - 206 = 119$ V (8). Je tomu tak, protože o toto napětí je potřeba srazit usměrněné napětí, pro výsledných 206 V_{DC}. Odpor $R_b = R_4$ potom vychází ze vztahu (9) na hodnotu 51 k Ω , jež bude představovat rezistor, který se nachází i v odporové řadě E24 [2]. Následně vychází filtrační kapacita ze vztahu (10) $C_2 = 3,1206 \mu\text{F}$, kde φ_f je požadovaný činitel filtrace. Zvolena je nejbližší vyšší hodnota z řady, takže 3,3 μF . Za filtr jsou ještě přidány kondenzátory s malými kapacitami 100 nF a 1 nF, které dokáží reagovat na rychlé změny a kompenzovat jemné záškuby.

$$U_{DC} = U_{AC} \cdot \sqrt{2} = 230 \cdot \sqrt{2} = 325,67 \text{ V} \quad (7)$$

$$I_b = \frac{I_c}{\beta} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{60} = 0,3333 \text{ mA} \quad (8)$$

$$R_b = \frac{U_{ce} - U_{be}}{I_b} = \frac{20 - 3}{0,3333 \cdot 10^{-3}} = 51 \text{ K}\Omega \quad (9)$$

$$C = \frac{\varphi_f}{\omega \cdot R_b \cdot \beta} = \frac{6000}{2 \cdot \pi \cdot 100 \cdot 51000 \cdot 60} = 3,1206 \mu\text{F} \quad (10)$$

Ztrátový výkon na stabilizačním tranzistoru je nutno odvádět. Napěťová ztráta U_z dosahuje hodnoty 119 V a proud může být až 20 mA. Z následujícího vztahu (12) vyplývá, že je nutno odvádět 2,38 W tepla. Požitý tranzistor je stavěn na ztrátový výkon 20 W, proto 2,38 W dokáže lehce odvézt s menším přídatným chladičem.

$$P_z = U_z \cdot I \quad [\text{W}] \quad (12)$$

$$P_z = 119 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 2,38 \text{ W}$$

Zdroj je navíc opatřen proudovou pojistkou. Pojistku tvoří tranzistor T_5 , T_4 a rezistor R_6 . Rezistor je zapojen sériově s řídicím rezistorem a tedy výstupem zdroje. Tranzistor T_5 je typu PNP je k rezistoru připojen kolektorem a bází. Pokud vzroste proud, vzroste napětí U_{cb} a tranzistor se otevře. Tím otevře tranzistor T_4 , který přivře výstupní tranzistor. Hodnota rezistoru je spočítána vztahem (13). Výsledná hodnota je volena nejbližší z rady, tedy $R_6 = 33 \Omega$.

$$R = U_{cb}/I \text{ [}\Omega\text{]} \quad (13)$$

$$R = 0,7/20 \cdot 10^{-3} = 35 \Omega$$

2.3.2 Zdroj pro řídicí elektroniku

Zdroj je určen pro symetrické napájení operačního zesilovače, mikrokontroléru, DA převodníku a zároveň tvoří pro DA a AD převodníky napěťovou referenci 5 V. Je tedy nezbytně nutné, aby se jednalo o zdroj, který je schopen dodávat napětí bez rušivých zákmitů. Napětí je transformováno transformátorem HAHN TRHUI393-2X9 [2] s vyvedeným středem. Tento transformátor dodává $2 \times 9 V_{AC}$. Napětí je usměrněno integrovaným můstkovým usměrňovačem a filtrováno akumulacími kapacitami. Následně je stabilizováno pevnými integrovanými lineárními stabilizátory na +6 V a v záporné větvi na -6 V. V kladné větvi usměrněného napětí je paralelně připojen stabilizátor dodávající 5 V a vytváří zároveň i napěťovou referenci U_{ref} . Jeho schéma se nachází v příloze [B.1].

Napětí po usměrnění je dáno vztahem (14) a odpovídá hodnotě 12,72 V_{DC}. Je důležité, aby vyfiltrované napětí nekleslo pod napětí nutné pro stabilizátor, tedy pod 8 V. Zvlnění U_{zv} filtrovaného napětí proto může dosahovat klidně amplitudy $12,72 - 8 = 4,72$ V. Proud zdroje v kladné větvi I_{max} je zvolen 500 mA. Výsledná kapacita pro akumulací kondenzátor je dána vztahem (15) a odpovídá hodnotě 1095 μ F. Z řady výrobce je zvolen kondenzátor $C_5 = 1000 \mu$ F. Pro zápornou větev postačí odebíraný proud s velkou rezervou 10 mA. Kapacita potom vychází 21 μ F a proto je opět zvolena z řady hodnota $C_9 = 22 \mu$ F.

$$U_{DC} = U_{AC} \cdot \sqrt{2} = 9 \cdot \sqrt{2} = 12,72 \text{ V} \quad (14)$$

$$C = \frac{I_{max}}{f \cdot U_{zv}} \quad (15)$$

$$C_+ = \frac{0,5}{100 \cdot 4,72} = 1059 \mu\text{F}$$

$$C_- = \frac{0,01}{100 \cdot 4,72} = 21,18 \mu\text{F}$$

Stabilizátory jsou podle výrobce opatřeny vždy na vstupu i výstupu kondenzátorem 100 nF. Také u tohoto zdroje je nutno odvádět ztrátový výkon a to ze stabilizátorů. Ten je spočítán opět ze vztahu (12) a vychází 0,0672 W pro 6ti voltové stabilizátory a 3,86 W pro 5ti voltový.

$$P_{zS6} = 6,72 \cdot 0,01 = 0,0672 \text{ W}$$

$$P_{zS5} = 7,72 \cdot 0,5 = 3,86 \text{ W}$$

Je patrné, že stabilizátor na 5 V je nutné opatřit menším chladičem, který bude odvádět ztrátový výkon.

3 NÁVRH MĚRICÍHO PŘÍSTROJE

3.1 Teoretický rozbor PN přechodu

Pro potřeby měření PN přechodu je důležité zmínit základní fyzikální podstatu jeho principu, matematicky popsat ideální diodu a upozornit na jevy které by mohly měření ovlivnit a nežádoucím způsobem pozměnit výsledek.

3.1.1 Princip PN přechodu

Vznik

Jedná se o rozhraní dvou nevládních polovodičů, které vznikají dotováním různými příměsemi. Polovodič typu P vznikne přidáním prvku s menším počtem valenčních elektronů, než má atom vlastní atom polovodiče. Díky tomu vznikne prázdné místo pro elektron (díra) a polovodič má děrovou vodivost. U polovodiče typu N je opakem. Přidáním prvku s větším počtem valenčních elektronů, než má atom vlastního polovodiče, bude v krystalové mřížce jeden elektron přebývat. Spojením těchto polovodičů vzniká PN přechod. Elektrony na určité šířce rozhraní (depletiční oblast) začnou rekombinovat a volné díry s elektrony zaniknou. Protože zbydou nepohyblivé ionty, tak mezi nimi vznikne elektrické pole, jehož směr brání zbylým iontům pronikat přes rozhraní. Velikost tohoto pole odpovídá velikosti difuzního napětí.

Chování

V propustném směru je připojen kladný pól napětí k polovodiči typu P a záporný k typu N. Jak se zvyšuje napětí, tak se oslabuje elektrické pole přechodu do doby, než přesáhne velikost difuzního napětí a přechodem protéká proud. V závěrném směru je zapojení opačné a se zvyšujícím se vstupním napětím roste elektrické pole na přechodu. Tím se rozšiřuje depletiční oblast a proto prostupnost elektronů přechodem klesá. Pokud se bude napětí dále zvětšovat, až budou překonány vazby mezi valenčními elektrony, dojde k rychlému nárůstu proudu a dochází k průrazu. V závěrném směru teče minimální proud, který způsobují minoritní nosiče náboje. Jejich množství a tedy i velikost tohoto proudu je závislá na teplotě. Tento proud se nazývá saturační proud. Minoritní nosiče náboje jsou způsobeny převážně nečistotami v polovodiči a působením tepelného pohybu.

Stabilizační diody jsou konstruovány tak, aby takovýto průraz opakovaně snášeli a byly využívány právě v závěrném směru. Jedná se o nedestruktivní průraz. Velikost napětí nutného k průrazu je přesně konstrukčně definována.

3.1.2 Ideální dioda

Ideální dioda je taková, která má nekonečný odpor v závěrném směru a nulový v propustném směru. Není ani uvažována kapacita přechodu. Dále jsou zanedbány parazitní vlastnosti přívodů, jako jejich odpor, kapacita a indukčnost. Funguje tedy pouze jako ventil vede/nevede.

Charakteristiku idealizované diody popisuje Shockleyho rovnice [3] (16). Ta zanedbává vlastní ohmický odpor respektive vodivost polovodiče a vnější vlivy záření. Nepopisuje ani oblast závěrného průrazu.

$$I = I_s \cdot (e^{\frac{U_d}{U_t}} - 1) \quad (16)$$

$$U_t = \frac{k \cdot T}{q} [\text{V}] \quad (17)$$

kde je:

I - proud diodou

I_s - závěrný saturační proud

U_d - napětí přiložené na diodu

U_t - tepelné napětí (14)

n - udává činitel kvality, jenž je v rozmezí 1 až 2 a závisí na výrobním procesu

k - Boltzmannova konstanta

T - teplota přechodu v kelvinech

q- velikost elementárního náboje ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C)

3.1.3 Omezení při měření

Při měření VA charakteristik PN přechodů je nutné zahrnout nežádoucí parazitní jevy, která mohou měření ovlivňovat a snažit se je minimalizovat.

Vlastní odpor vodičů

Odpor vodičů z mědi při délce přívodních vodičů 5cm o průměru 0,8 mm což jsou typické rozměry je patrný ze vztahu (18). Z něj jasně vyplývá, že při maximálním proudu 10 mA lze tyto ztráty zanedbat, protože úbytek napětí na vodičích dosáhne maximálně hodnoty 17,705 μV .

$$R_v = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (18)$$

$$R_v = 0,0178 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,05}{\pi \cdot 0,0004^2} = 1,7705 \text{ m}\Omega$$

kde je:

R_v - vlastní odpor vodiče

l - délka vodiče

S - obsah kolmého řezu vodičem

ρ - měrný odpor (pro $C_u = 0,0178 \mu\Omega \cdot \text{m}$ při $t = 20^\circ\text{C}$)

Parazitní reaktance vodičů

Parazitní kapacita a indukčnost vodičů může ovlivnit jejich reaktanci a tím jejich napěťové ztráty, případně vyvolat svodový proud. Tato skutečnost se však začíná uplatňovat, až při vyšších kmitočtech respektive změnách proudu vodičem což je patrné ze vztahu (19) pro indukčnost a (20) pro kapacitu.

$$U_l = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (19)$$

$$U_c = \frac{1}{C} \cdot \int i \, dt \quad (20)$$

Pokud se bude jednat jako v případě měření o skokové změny v hrubém rozsahu napětí o maximální velikosti například 50 mV při kmitočtu, který se může blížit s použitím krystalového oscilátoru například k 20 MHz, mohly by se parazitní reaktance teoreticky projevit ve výsledcích. Stabilizační dioda je charakteristická velikou strmostí závěrného proudu respektive malým dynamickým odporem. Z dokumentace výrobce [2] vyplývá, že stabilizační dioda na 7,5V má dynamický odpor v závěrném směru 7 Ω , tedy krok 50 mV může způsobit změnu proudu 7,14 mA. Vlastní indukčnost přívodních vodičů dané délky a daného průměru je vyjádřena empirickým vztahem [9] (21), kde je délka a průměr vodiče zadáván v mm, μ je permeabilita mědi, která je rovna $1,256629 \cdot 10^{-6}$ H/m a výsledek vchází v nH.

$$L = 0,2 \cdot l \left(2,303 \cdot \log \frac{4l}{d} - 1 + \frac{\mu}{4} + \frac{d}{2l} \right) [\text{nH}] \quad (21)$$

$$L = 0,2 \cdot 50 \left(2,303 \cdot \log \frac{4 \cdot 50}{0,8} - 1 + \frac{1,256629 \cdot 10^{-6}}{4} + \frac{0,8}{2 \cdot 50} \right) = 45,3045 \text{ nH}$$

Ze vztahu (21) je patrné, že pro typické rozměry přívodních vodičů vychází parazitní indukčnost 45,3045 nH. Úbytek vlivem parazitní kapacity lze zanedbat, protože se dá lehce minimalizovat způsobem konstrukce měřicích svorek, které budou vedle sebe takovým způsobem, aby vodiče měřeného PN přechodu nemohly vézt podél sebe. Úbytek napětí způsobený parazitní indukčností vychází ze vztahu (22) a může tedy dosahovat hodnoty až 6,4720 mV, jak vyplývá po dosazení předešle určených hodnot (21). To je dost závažný problém.

$$U_l = 45,3045 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{7,1428 \cdot 10^{-3}}{\frac{1}{20 \cdot 10^6}} = 6,4720 \text{ mV} \quad (22)$$

Tento problém lze řešit zkrácením vodičů. Jako druhá varianta se nabízí snížit frekvenci nastavování měřicího napětí. Velikost maximální přípustné frekvence udává vztah (23), kde L je parazitní indukčnost vodičů, U_l povolené napěťové ztráty na vodiči a ΔI je velikost skokové změny napětí. Maximální možné napěťové ztráty jsou voleny do 10 μ V.

$$f = \frac{U_l}{L \cdot \Delta I} [\text{Hz}] \quad (23)$$

$$f = \frac{10 \cdot 10^{-6}}{45,3045 \cdot 10^{-9} \cdot 7,1428 \cdot 10^{-3}} = 30,9022 \text{ KHz}$$

Parazitní kapacity PN přechodu

Další věc, kterou je nutno si uvědomit jsou vlastní kapacity PN přechodu a to jak bariérová, tak difuzní. Depletiční oblast funguje jako dielektrikum a plocha kolmého řezu jednotlivého vlastního polovodiče jako deska kondenzátoru. Na tomto rozhraní se uplatňuje bariérová kapacita. Je tedy závislá na přiloženém závěrném napětí a ploše PN přechodu. Pokud ale jde o přístroj na měření stabilizačních diod, které v závěrném směru vedou, tak se tato kapacita neuplatní. Difuzní kapacita vzniká naopak v propustném směru. Elektrony mají jistou setrvačnost a tedy dobu života. Tato kapacita je tedy závislá na velikosti proudu přechodem a době života nosičů náboje. Z bakalářské práce Michala Truhláře [7] vyplývá, že doba života nosičů náboje při proudu 10 mA se obecně pohybuje do 100 ns. Lze ji tedy také zanedbat, protože 100 ns odpovídá frekvenci 10 MHz a to je mnohem vyšší frekvence, než kterou umožňují ztráty vlivem parazitní indukčnosti na maximálně krátkém přívodním vodiči.

Vyhodnocení

Z přechozích poznatků vyplývá, že pro přesné měření je vhodné omezit délku přívodních vodičů k měřenému PN přechodu, konstrukčně uzpůsobit připojení pro omezení parazitní kapacity vodičů a omezit rychlost měření na únosnou mez.

3.2 Popis zapojení

K samotnému měření je potřeba dostatečně přesný DA převodník, který vždy nastaví požadovanou úroveň napětí na PN přechodu, jeden AD převodník, který ověří jaké skutečné napětí na přechodu je a druhý AD převodník, který zaznamená proud přechodem. Dále je potřeba převodník USART/USB, který odesílá data do počítače, kde budou následně zpracována a zároveň pomocí něj mikrokontrolér přijímá povely a nastavení pro měření. Ještě je potřeba obvod sloužící pro přepínání možných rozsahů nastavovaného měřicího napětí.

Požadavkům na počet pinů a na zabudované periferie vyhovuje mikrokontrolér PIC18f242 [2], který dokáže pracovat s krystalovým oscilátorem až a frekvencí 20 MHz. Napětí na PN přechodu je nastavováno pomocí 12bitového DA převodníku ($U_{ref} = 5 \text{ V}$). Toto rozlišení není v celém rozsahu možného měření dostatečné pro vykreslení ukázkových VA charakteristik, avšak je plně dostačující pro změření průrazného napětí stabilizačních diod. Schéma popisovaného zapojení se nachází v příloze [A.1]. Výstup DA převodníku je přes operační zesilovač U2A pracující jako neinvertující zesilovač se třemi možnými stupni zesílení, respektive ve třech možných rozsazích, přiváděn do báze tranzistoru Q1. Tyto rozsahy jsou měněny přepínáním elektronického spínače MAX333ACPP [2], který připojuje různé rezistory k invertujícímu vstupu operačního zesilovače a tím mění jeho zesílení. Zmiňovaný tranzistor je pouze pomocný a jeho otevírání či zavírání ovládá výstupní tranzistor Q2, který řídí konečné výstupní napětí na měřeném PN přechodu. Z jeho emitoru je zavedena zpětná vazba pro zesilovač. Maximální ztrátový výkon tohoto tranzistoru je dopočítán ze vztahu (24) a odpovídá hodnotě 2,05 W, proto je opatřen chladičem. Proud

odporovým děličem na invertujícím vstupu operačního zesilovače U2A je zvolen, že bude maximálně 1 mA, proto byl zvolen odpor do zpětné vazby $R_2 = 200 \text{ k}\Omega$. Pro jednotlivé úrovně zesílení jsou hodnoty druhého odporu v děliči vždy dopočítané ze vztahu (25).

$$P_z = U_z \cdot I = 205 \cdot 10^{-3} = 2,05 \text{ W} \quad (24)$$

$$R_1 = \frac{R_2}{A_u - 1} \quad (25)$$

$$R_{1Au41} = \frac{200000}{41 - 1} = 5 \text{ k}\Omega$$

$$R_{1Au20} = \frac{200000}{20 - 1} = 10,5263 \text{ k}\Omega$$

$$R_{1Au5} = \frac{200000}{4 - 1} = 50,0000 \text{ k}\Omega$$

Přesnost je rozhodující a proto jsou rezistory voleny vždy o něco menší, než jejich vypočítané hodnoty a požadovaná hodnota je doladěna trimrem zapojeným v sérii. Vybrané hodnoty rezistorů z řady E24 a k nim hodnoty vhodných trimrů ukazuje následující tabulka Tab. 0.1. Je nutné počítat s maximálním výstupním napětím 205 V, protože až 5 V může být ztráta na referenčním rezistoru, který bude obstarávat měření proudu.

Tab. 0.1: Přehled dostupných rozsahů měření a k nim detailní informace o zesílení a použitých odporech ve zpětné vazbě.

Rozsah[V]	Zesílení[-]	R_1 [K Ω]	R_{p1} [K Ω]	Krok[mV]
0-25	5	47	5	6,1
0-100	20	10	1	24,4
0-205	41	4,7	1	50

Odečítání proudu PN přechodem je obstaráváno odečítáním výstupu operačního zesilovače U2B, který sleduje napětí na referenčním rezistoru R_3 , na kterém při maximálním proudu $I = 10 \text{ mA}$ bude úbytek napětí roven referenčnímu napětí $U_{ref} = 5 \text{ V}$ AD převodníku. Rezistor je nutno použít přesný, mimo řadu. Jeho výsledná hodnota je dána následujícím vztahem (26). Použita je dostupná hodnota 499Ω .

$$R = \frac{U_{ref}}{I} = \frac{5}{0,010} = 500 \Omega \quad (26)$$

Interní AD převodník mikrokontroléru je 10bitový a zajistí měřicí krok proudu o velikosti $195,3 \text{ mA}$ (pokrývá celý rozsah 0-200V). Výstup napěťového sledovače U2B je zároveň připojen na vstup komparátoru U2C společně s referenčním napětím. Pokud bude napětí na AD převodníku přesáhnuto přes U_{ref} , tak výstup komparátoru otevře tranzistor T2. Tento mechanismus tvoří zpětnou vazbu, která zajistí proudovou limitaci na 10 mA a slouží jako ochrana před průrazem diody či zkratem na měřicích svorkách. Zároveň je výstup komparátoru U2C přiveden na vstup mikrokontroléru. To je z důvodu aby i program mikrokontroléru mohl mít informaci o sepnuté proudové limitaci.

Přeměňování aktuálního napětí na PN přechodu je řešeno podobně. AD převodník

je připojen přímo na odporový dělič R_8 - R_9 , který je pro nutnou přesnost doladován trimrem R_{27} . Hodnoty rezistorů jsou voleny tak, aby při maximálním napětí na výstupních svorkách bylo napětí na AD převodníku maximálně 5 V, což odpovídá U_{ref} .

O změnu polarity se stará relé na výstupu. Tranzistor T_1 , který ovládá výstupní relé je zvolen BC547B [2]. Proudový zesilovací činitel v saturaci odpovídá $\beta = 200$. Elektromagnet tohoto relé má odpor $R_c = 45 \Omega$ [2]. Ze vztahu (27) tedy plyne proud kolektorem I_c , kde U_{cc} odpovídá napájecímu napětí a U_{sat} je saturační napětí při otevřeném tranzistoru respektive sepnutém relé. Činitel nasycení N je volen 2. Velikost proudu do báze I_b udává vztah (28) a velikost výsledného rezistoru je spočítána vztahem (29), kde U_{out} je napětí na cívce relé a U_{be} napětí mezi bází a emitorem. Rezistor je volen nejbližší nižší z řady, tedy $R_{Bpol} = R_{21} = 4,3 \text{ k}\Omega$.

$$I_C = \frac{U_{cc} - U_{sat}}{R_c} \quad (27)$$

$$I_{Cpol} = \frac{5 - 0,2}{45} = 106 \text{ mA}$$

$$I_{Bau} = \frac{I_{Cau}}{\beta} \cdot N \quad (28)$$

$$I_{Bpol} = \frac{106 \cdot 10^{-3}}{200} \cdot 2 = 1,06 \text{ mA}$$

$$R_{Bau} = \frac{U_{out} - U_{be}}{I_{Bau}} \quad (29)$$

$$R_{Bpol} = \frac{5 - 0,6}{1,06 \cdot 10^{-3}} \cdot 2 = 4150,93 \Omega$$

Převodník USART/USB byl zvolen FT232RL [10] od společnosti FTDI [10]. Schéma zapojení a příslušná dokumentace se nachází v příloze [C]. Na jeho piny lze připojit mikrokontrolér přímo a není nutno už upravovat napěťové hladiny. Napájen je přímo z USB a zapojení je provedeno podle dokumentace od výrobce. Tento čip obsahuje i malou EEPROM paměť, ve které má uloženo jak se hlásí po připojení k PC, k čemu slouží výstupní piny (některé lze libovolně popřehazovat případně znegovat) atp.. Pro přístup do této paměti a její konfiguraci slouží program FT prog. [10]. Díky tomu bylo pozměněno hlášení po připojení k PC na „Meric VA char.“.

4 REALIZOVANÝ PŘÍSTROJ

4.1 Zdroj

4.1.1 Funkčnost

Část určená pro měřicí elektroniku funguje bezproblémově. Hlavní nedostatek se v reálné konstrukci zdroje pro měřicí napětí se objevil v proudové limitaci. Napětí na rezistoru R_7 na proudovém děliči R_7 - R_8 bylo i při neaktivní limitaci natolik vysoké, že tranzistor T_4 byl stále otevřený a napětí na bázi stabilizačního T_2 tedy bylo stažené na minimum. Proudová pojistka tedy byla stále sepnutá. Tento neduh byl způsoben minoritními nosiči náboje tranzistoru T_5 . Problém byl odstraněn jiným vyvážením

napětového děliče.

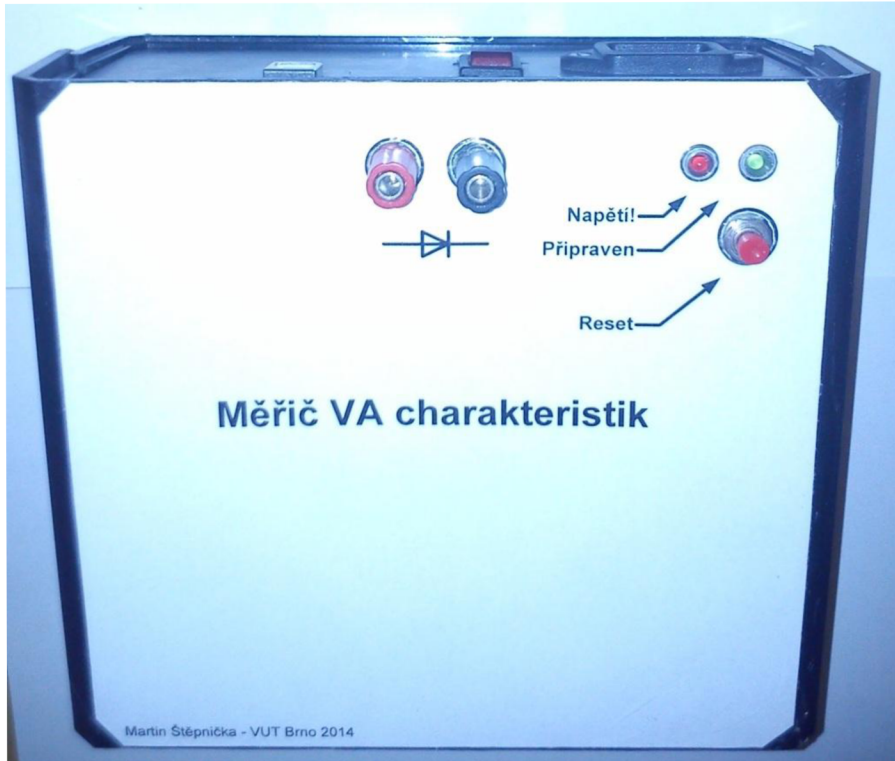
4.2 Měřicí přístroj

4.2.1 Funkčnost

Po prvním oživení nebyl ani jeden z AD převodníků schopen načíst žádnou hodnotu odpovídající aspoň přibližně předpokladu. Po následné analýze a měření osciloskopem bylo zjištěno, že celá zpětná vazba odpovědná za nastavené výstupní napětí kmitá. Napájení všech IO bylo blokováno, polygon na DPS byl spojen se zemí, ale pozitivní vliv to nemělo žádný. Experimentálně bylo ověřováno, zda kmity nevznikají parazitní kapacitou některé ochranné diody případně kapacitou přechodu tranzistoru Q_2 . Také bylo vyzkoušeno, zda nevznikají kmity ve zpětné vazbě vlivem elektronického spínače MAX333ACPP, ale ani jeho odpojením a připojením rezistoru zpětné vazby přímo na zem nemělo vliv a kmitání se nepodařilo zamezit. Bohužel nebyla zjištěna přesná příčina, avšak byl částečně odstraněn následek za cenu pomalejšího měření. Na výstup operačního zesilovače k ochranným diodám mezi rezistory R_7 a R_{15} byl přidán filtrační kondenzátor $C_6 = 22 \mu\text{F}$, jehož hodnota byla navržena experimentálně. Z přidání této kapacity na výstup operačního zesilovače tedy plyne nutnost programově zpomalit měření, než se nastavená hodnota ustálí. Pro ještě lepší výsledky je v programu procesoru dopsána funkce, která vybírá z několika naměřených hodnot nejčastěji zastoupenou a ta je dále považována jako správná (implicitně je tato funkce neaktivní a proběhne pouze jedno měření). Ani s těmito opatřeními nejsou bohužel vždy výsledné charakteristiky bez zákmitů. Kmitání nebylo tedy zcela odstraněno, ale bylo sníženo na zanedbatelnou úroveň. Dále tento problém neblaze ovlivňoval proudovou limitaci měřeným PN přechodem 10 mA proto přibyl kondenzátor C_7 o hodnotě 100 nF. Pro zamezení kmitání proudové limitace bylo ještě nutné přidat kondenzátor C_8 také o hodnotě 100 nF. Ten způsobí jisté zpoždění rozepnutí proudové limitace.

Kalibrace probíhala naprosto bez problému a je prováděna následovně:

- 1) Změřit ohmmetrem skutečnou hodnotu referenčního rezistoru R_3 kvůli možné výrobní toleranci a zadat ji v ovládacím programu v kartě „Settings“.
- 2) Nastavit hodnotu výstupního napětí na 25 V, která odpovídá maximu z prvního rozsahu, připojit na výstup voltmetr a pomocí trimru R_{18} doladit na výstupu skutečných 25 V
- 3) Stejným způsobem nejprve nastavit maximum z druhého rozsahu (100 V) a trimrem R_{17} doladit výstup
- 4) Pro třetí rozsah nastavit výstup opět na jeho maximum (205 V) a použít pro doladění trimr R_{16}
- 5) Odpojit voltmetr od výstupu a nechat výstup na prázdko, nastavit 205 V na výstup a pomocí trimru R_{27} doladit odečítanou hodnotu napětí aby odpovídala nastavené.

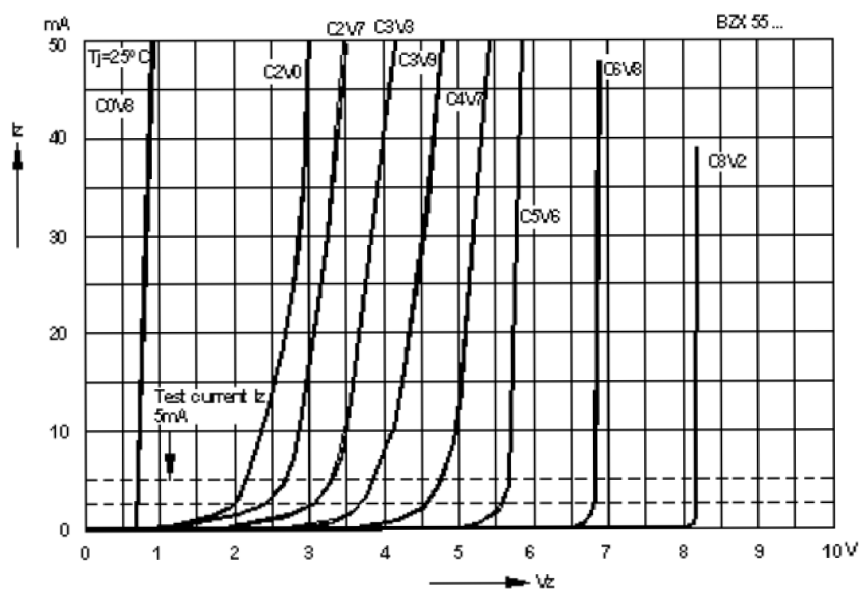


Obr. 4.1: Fotografie výsledného měřicího přístroje

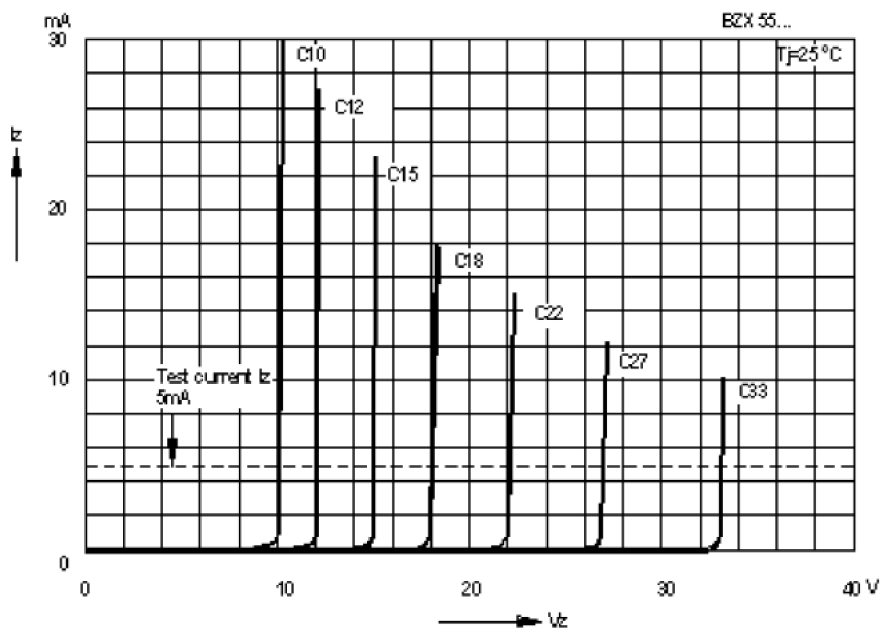
4.2.2 Výsledky měření

Tato část obsahuje srovnání naměřených charakteristik různých diod s oficiální dokumentací od výrobce. Dále jsou zde ukázány naměřené charakteristiky lineárního prvku a to rezistoru o hodnotě 39 k Ω .

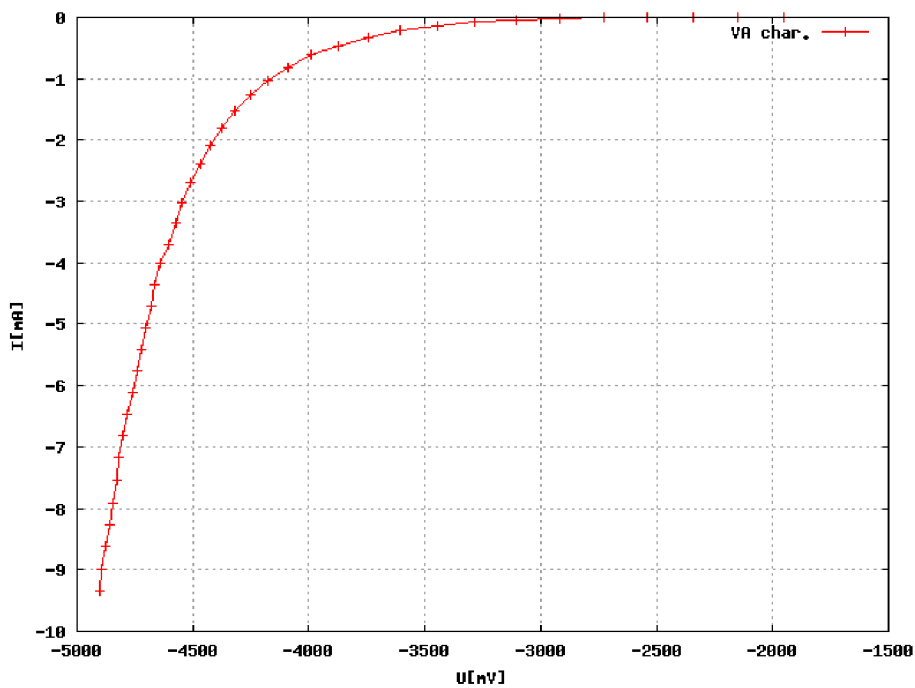
Stabilizační diody



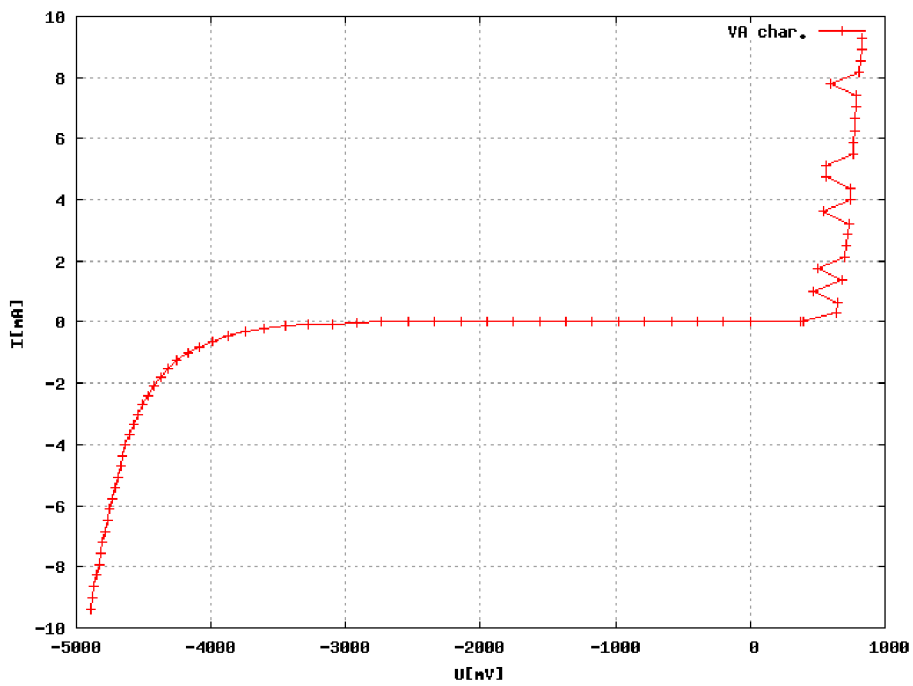
Obr. 4.2: Charakteristiky stabilizačních diod podle výrobce [2]



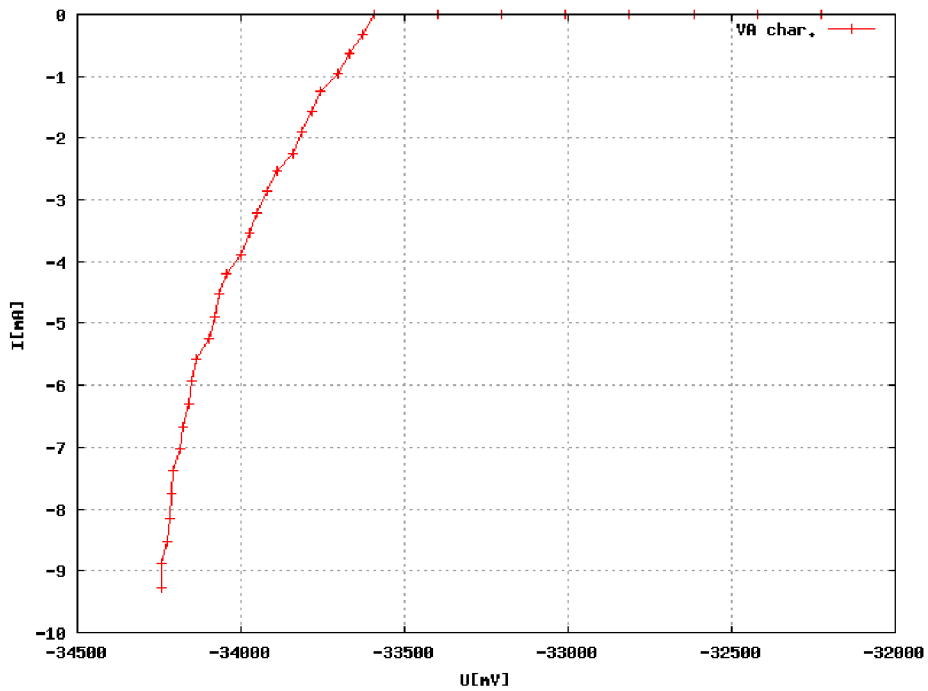
Obr. 4.3: Charakteristiky diod podle výrobce [2]



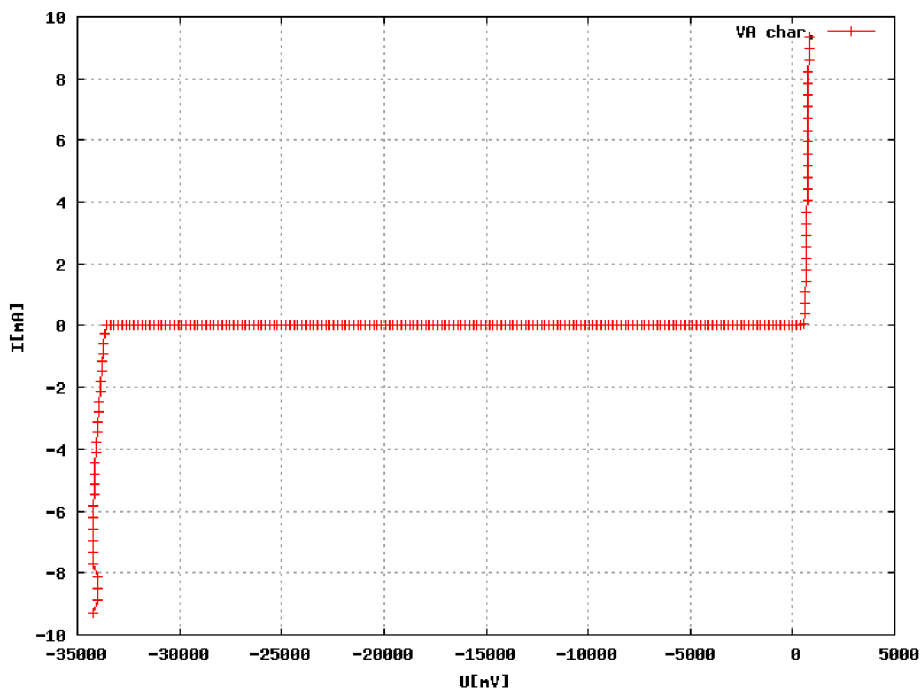
Obr. 4.4: Stabilizační dioda 4,7 V (pouze závěrný směr)



Obr. 4.5: Stabilizační dioda 4,7 V

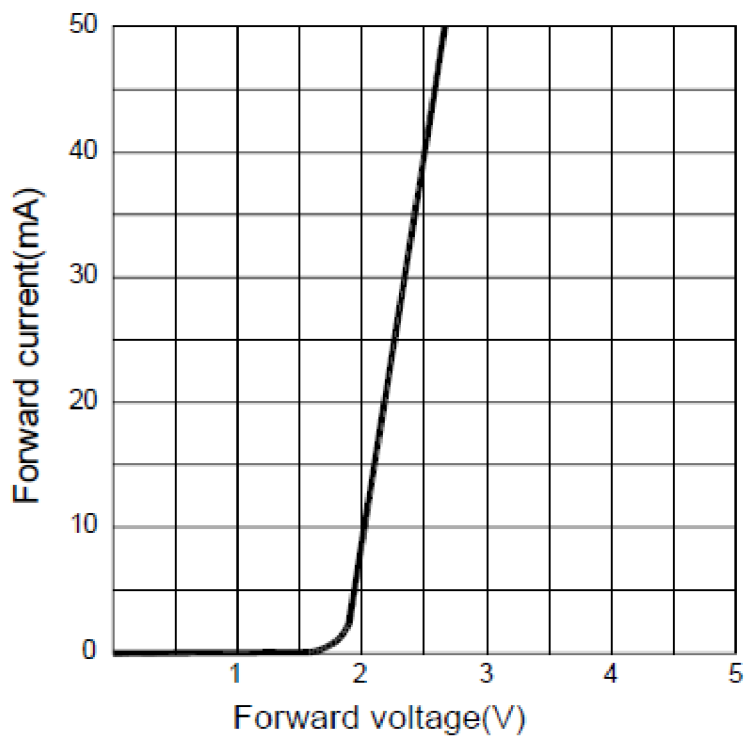


Obr. 4.6: Stabilizační dioda 33 V (pouze závěrný směr)

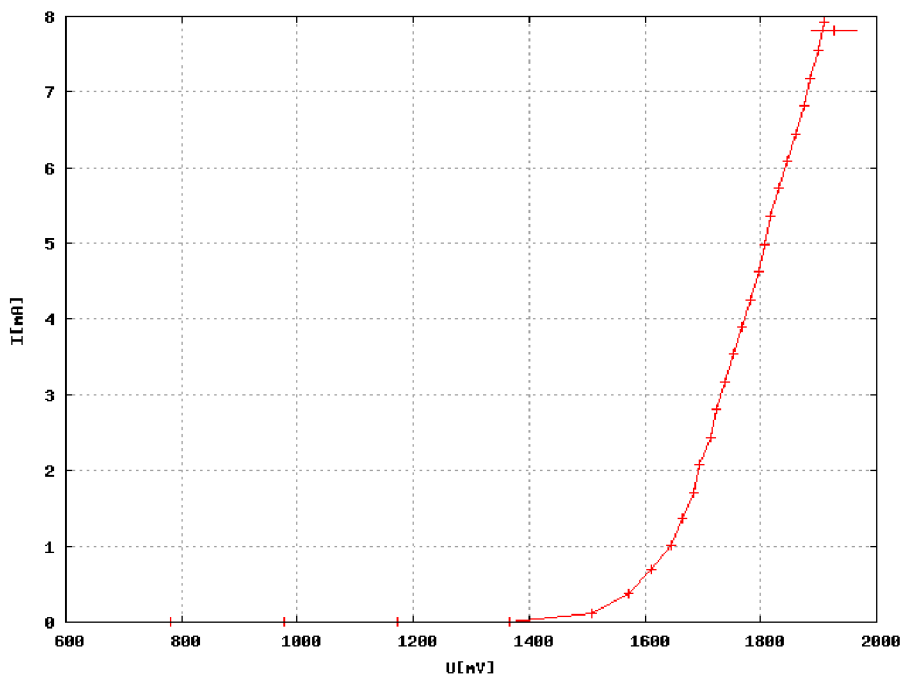


Obr. 4.7: Stabilizační dioda 33 V

LED dioda

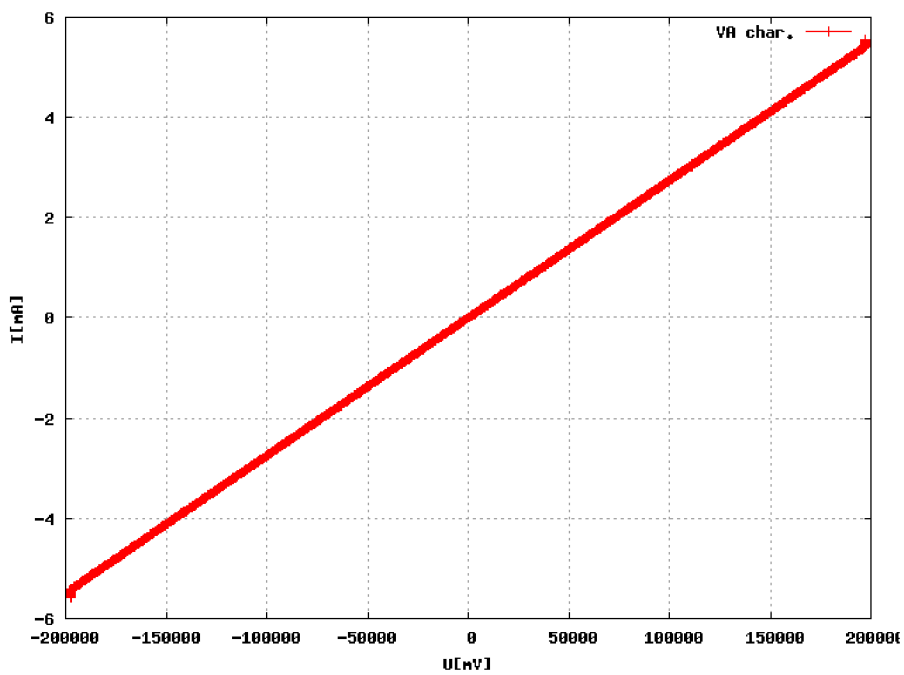


Obr. 4.8: Červená LED dioda (pouze propustný směr) podle výrobce [2]

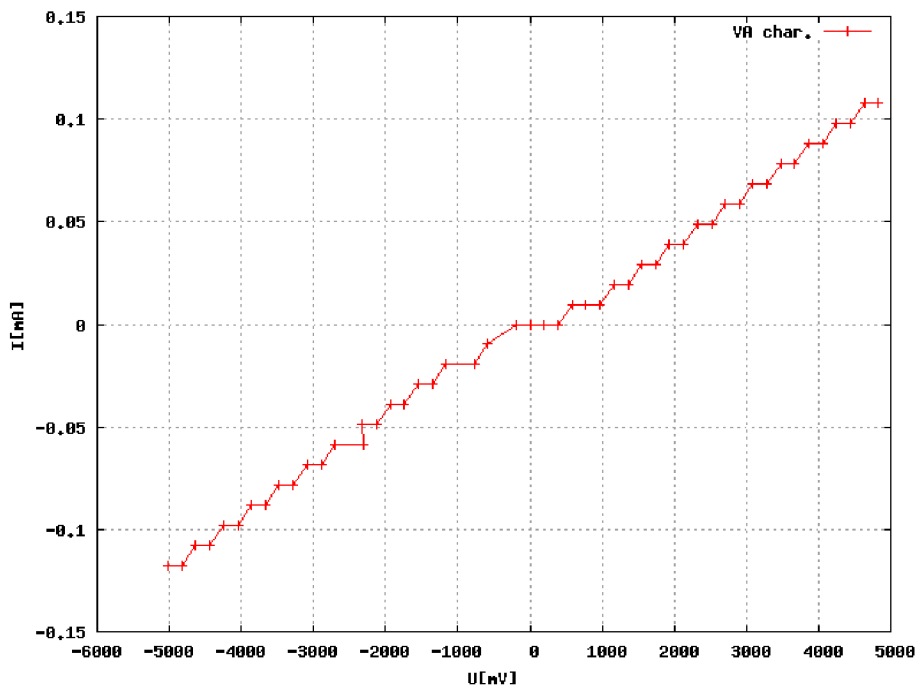


Obr. 4.9: Červená LED dioda (pouze propustný směr)

Rezistor



Obr. 4.10: Rezistor 39 kΩ na rozsahu -205 V..+205 V



Obr. 4.11: Rezistor 39 kΩ na rozsahu -5 V..+5 V

5 PROGRAMOVÉ ŘÍZENÍ

5.1 Algoritmus pro program mikrokontroléru

Po připojení napájecího napětí proběhne inicializace periférii, jako jsou vstupní a výstupní porty, sériová linka, AD převodníky a DA převodník. Následně program pro jistotu nastaví nulové výstupní napětí a čeká na příjem dat z PC. Z nich získá požadovanou velikost napětí na výstupu DA převodníku, požadované zesílení, polaritu napětí a nastavení maximálního ztrátového výkonu. Následně sepne relé, které ovládá polaritu do požadované polohy, nastaví zesílení výstupního operačního zesilovače a požadované napětí. Program zkontroluje, zda není sepnutá proudová limitace. Pokud je sepnutá, tak měřený bod je přeskočen a do PC je odeslán pouze příznak informující o přetížení. V opačném případě dojde k načtení a odeslání změřeného proudu výstupními svorkami a změřeného skutečného napětí na výstupních svorkách do PC. Následně se cyklus opakuje a mikrokontrolér čeká na další požadovanou hodnotu.

Program obsahuje smyčku, která když je aktivovaná, tak podle nastavení provede N měření a vybere nejčastěji načtenou hodnotu AD převodníkem. Je to snaha o odstranění vlivu zákmitů na výsledek měření. Implicitně je tato funkce vypnutá a probíhá pouze jedno měření.

Červená dioda (LED2) signalizuje svitem napětí na výstupu a blikáním aktivní proudovou limitaci. Zelená dioda (LED1) blikáním signalizuje probíhající komunikaci po sériové lince a svitem stav „připraveno“.

Program je psán v jazyce C v prostředí MPLAB X IDE v1.95 [11] a kompilován

pomocí XC8 v1.21 [12].

5.2 Algoritmus pro ovládací program

Nejdříve opět proběhne inicializace spojení. Program nejprve načte seznam všech COM portů v PC a na všechny se zkusí postupně připojit a odeslat řetězec „P“. Na portu, na kterém mu měřicí přístroj odpoví stejně, program zůstane připojen, protože ví, že je to ten správný.

Následuje cyklus postupného odesílání hodnot výstupního napětí, jejichž rozsah a krok je zadán uživatelem a načítání hodnot napětí a proudu na výstupu přístroje. Pokud program přijme namísto naměřených hodnot příznak o překročení proudové limitace, je hodnota přeskočena a jde na další. Po proměření celého definovaného rozsahu jsou data vykreslena pomocí programu GNUplot [4] a výstupní obrázek se samotnou charakteristikou je naimportován do programu. Neslouží jako výstup, ale jen pro přibližnou kontrolu naměřených dat. Samotná data lze uložit po měření ve formátu „*.txt“. První sloupec udává hodnotu napětí, druhý sloupec je hodnota proudu. Program rovněž vypíše napětí v místě, kde charakteristika protíná hodnotu 5mA a to jak v záporné, tak v kladné části charakteristiky. To je úroveň proudu, podle které většina výrobců stabilizační diody označuje.

Program je psán ve vývojovém prostředí Microsoft Visual Studio 2010 [6].

5.3 Popis komunikace

Komunikace probíhá pomocí řetězců. Každý řetězec je ukončen pomocným zakončovacím znakem „|“. Vždy je nejprve odeslán příznak, určující co za data je posíláno a následuje jejich číselná hodnota.

Popis jednotlivých příznaků je následující:

- „P“ – Příznak pro ping, respektive otestování spojení zařízením. Program mikrokontroléru po jeho příchodu odešle také znak „P“ a již nečeká na další data.
- „|“ – Ani ne tak příznak, jako spíš ošetření programu, aby byl na tento znak připraven a nic nedělal.
- „A“ – Příznak pro nastavení počtu načítání hodnot z AD převodníku. Po jeho příchodu čeká program na další tři číselné znaky, udávající číselný počet opakování načítání. Celý formát je tedy Axxx| kde za „xxx“ může být hodnota 001-255.
- „V“ – Příznak pro nastavení napětí na výstupu DA převodníku, zesílení zpětné vazby operačního zesilovače a měřené polaritu. Data jsou odesílána ve formátu Vdddrp|, kde „dddr“ udává číselnou hodnotu nastavení pro 12bitový DA převodník, „r“ udává výstupní polaritu (0/1) a „p“ určuje rozsah nastavovaného napětí (0/1/2).
- „O“ – Tento znak je odesílán namísto naměřených hodnot proudu a napětí na PN přechodu v případě, že je aktivovaná proudová limitace.
- „E“ – Tímto znakem odpoví zařízení na jakýkoliv jiný neznámý znak.

5.4 Základní funkce pro mikrokontrolér

Následovné funkce jsou napsány v programovacím jazyce „C“ a slouží pro základní ovládání použitých periférií mikrokontroléru PIC18f242.

- `InitDAC()` slouží k inicializaci DA převodníku komunikujícího s mikrokontrolérem přes SPI rozhraní. Ve skutečnosti se tedy jedná spíše i inicializaci SPI.

```
void InitDAC(void)
{
    TRISbits.TRISC0 = 0;
    TRISbits.TRISC3 = 0;
    TRISbits.TRISC5 = 0;
    SPI_CS = 0; //PORTCbits.RC0
    OpenSPI(SPI_FOSC_64, MODE_00, SMPMID);
    return;
}
```

- Tato funkce jak už název napovídá je využívána k ukončení práce s DA převodníkem.

```
void CloseDAC(void)
{
    CloseSPI();
    SPI_CS = 1; //PORTCbits.RC0
    return;
}
```

- Následná funkce odesílá nastavení DA převodníku, respektive nastavení jeho výstupní úrovně.

```
void LoadDAC(unsignedint d)
{
    d = d | 0x3000;
    SPI_CS = 0;
    WriteSPI(d>>8);
    WriteSPI(d);
    SPI_CS = 1;
    return;
}
```

- `InitADC()` je určena k inicializaci AD převodníku a je jí předávána hodnota ukazující na určitý převodník.

```
void InitADC(unsignedint d)
{
    OpenADC(ADC_FOSC_64 & ADC_RIGHT_JUST & ADC_0ANA_0REF, ADC_INT_OFF);
    switch (d)
    {
        case 0:
            TRISAbits.TRISA0 = 1;
            SetChanADC(ADC_CH0);
            break;
        case 1:
            TRISAbits.TRISA1 = 1;
            SetChanADC(ADC_CH1);
            break;
    }
```

```

    case 2:
        TRISAbits.TRISA2 = 1;
        SetChanADC(ADC_CH2);
        break;
    case 3:
        TRISAbits.TRISA3 = 1;
        SetChanADC(ADC_CH3);
        break;
    case 4:
        TRISAbits.TRISA5 = 1;
        SetChanADC(ADC_CH4);
        break;
    default :
        return;
}
}

```

- Funkce předává návratovou hodnotou získanou AD převodem.

```

int LoadADC(void)
{
    int in;
    ConvertADC();
    while (BusyADC());
    in = ReadADC();
    return in;
}

```

- Inicializace sériové linky pro komunikaci s PC o rychlosti 9600 baudů a zapnutí přerušení ze sériové linky.

```

void InitUSART(void)
{
    TRISCbits.TRISC6 = 0;
    TRISCbits.TRISC7 = 1;
    OpenUSART(
        USART_TX_INT_OFF &
        USART_RX_INT_ON &
        USART_ASYNC_MODE &
        USART_EIGHT_BIT &
        USART_CONT_RX &
        USART_BRGH_HIGH,
        129
    );
    RCONbits.IPEN = 1;
    IPR1bits.RCIP = 1;
    INTCONbits.GIEH = 1;
    return;
}

```

- Funkce s návratovou hodnotou odpovídající přijatým datům ze sériové linky

```

char RecvUSART(void)
{
    char r_byte;
    while( ! DataRdyUSART());
    r_byte = getcUSART();
}

```



```

    return r_byte;
}

```

- Funkce pro odeslání dat sériovou linkou, jež jsou předávána vstupním parametrem s_byte.

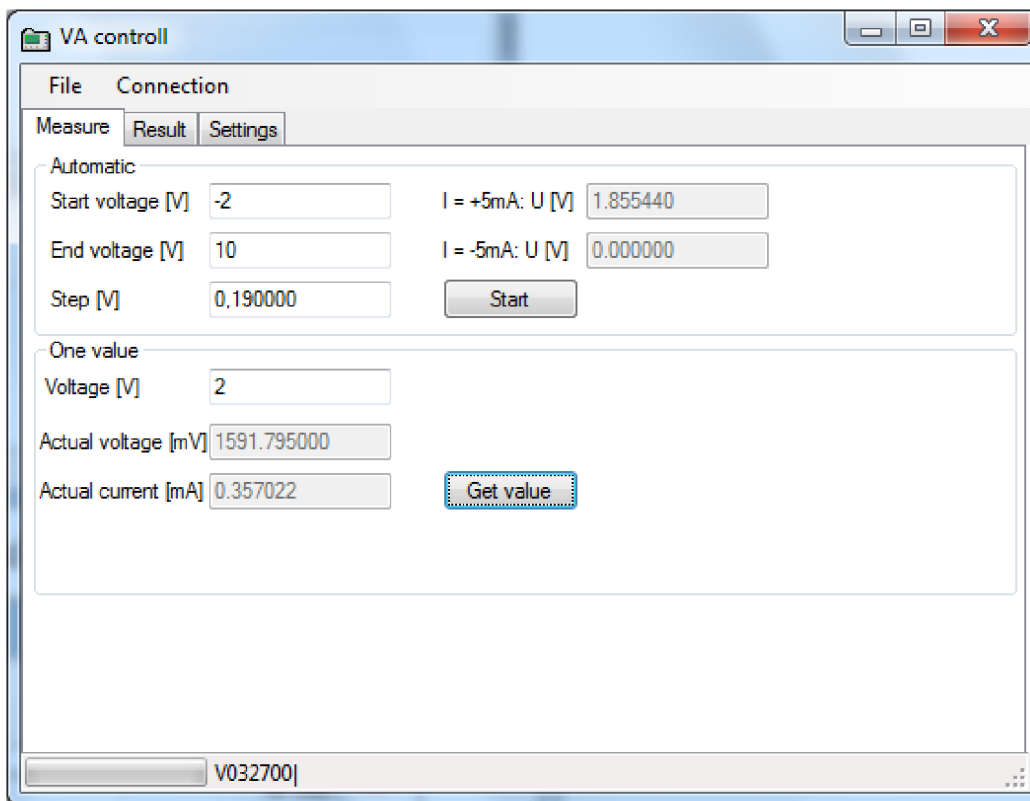
```

void SendUSART(char s_byte)
{
    while( BusyUSART() );
    putcUSART( s_byte );
    return;
}

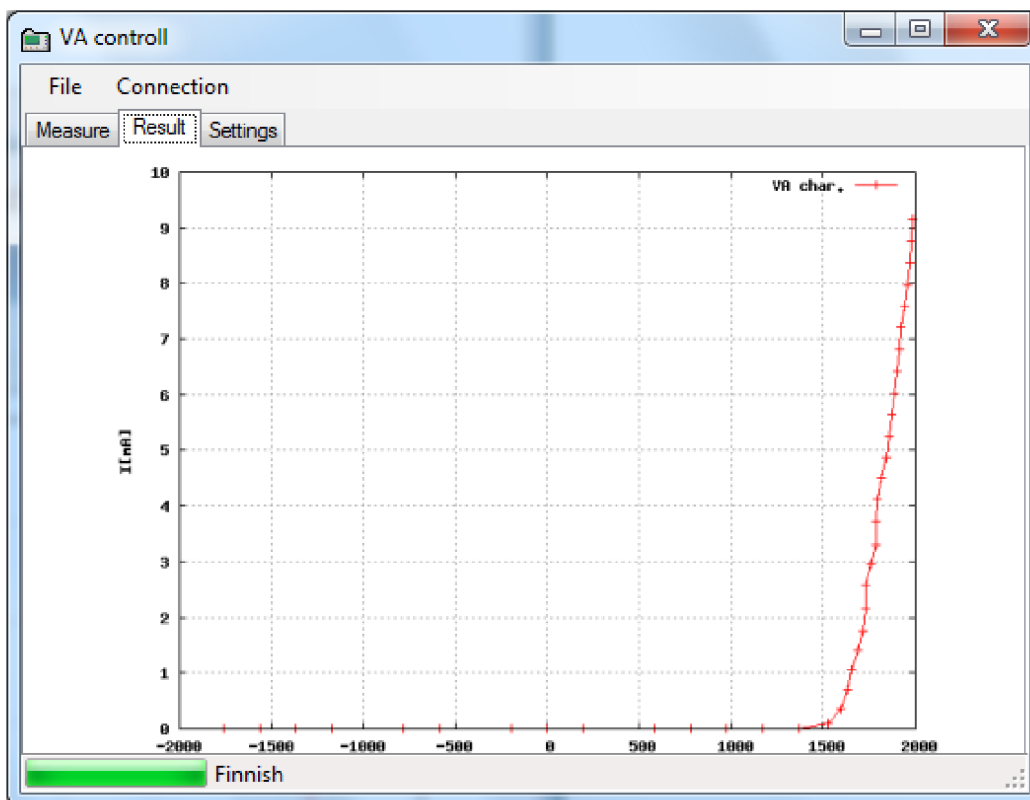
```

Celý program pro jak mikrokontrolér, tak pro PC je okomentovaný v příloze na CD.

5.5 GUI ovládacího programu



Obr. 5.1: Měření jednotlivých hodnot



Obr. 5.2: Výsledek měření daného rozsahu (LED dioda)

Na obrázku 5.1. je vidět hlavní okno ovládacího programu. Program po proměření celé charakteristiky vypíše hodnoty napětí, kde křivka prochází hodnotou proudu +5 mA a -5 mA. Zároveň program vykreslí v kartě „Result“ naměřenou charakteristiku (Obr. 5.2). Toto zobrazení slouží pouze jako informativní, aby uživatel získal ucelený přehled, co bylo vlastně změřeno. Program podporuje i měření jednotlivých bodů charakteristiky v sekci „One value“. Naměřená data lze uložit pomocí „File -> Save“ a dále je podrobněji zpracovat.

6 ZÁVĚR

V předešlém textu je popsán návrh a realizace automatického měřiče volt-ampérových charakteristik dvojpólů, např. PN přechodu. Hlavním zamýšleným užitím zařízení je měření závěrného napětí stabilizačních diod. Při návrhu byla konstrukce postupně zdokonalena a jsou zde rozebrány jednotlivé kroky.

Byly navrženy napájecí zdroje vhodné pro tento přístroj, převodník zajišťující komunikaci s PC a samozřejmě samotný přístroj, který měření obstarává. Práce obsahuje návrh konstrukce zařízení včetně ovládacího programu. V příloze lze nalézt hotové konstrukční podklady, jako jsou schémata, navrhnuté desky plošných spojů a zdrojové kódy ovládacích programů pro PC a pro mikrokontrolér.

Zařízení bylo sestaveno, je funkční a splňuje rozsah zadání. Přístroj dokáže změřit libovolnou volt-ampérovou charakteristiku na daném rozsahu, tu vykreslí a data umožňuje uložit v textovém formátu k dalšímu zpracování. Práce obsahuje změřené charakteristiky několika stabilizačních diod, LED diody a rezistoru. Výsledky měření odpovídají očekávání a korespondují s dokumentací od výrobce.

Jedná se o první prototyp přístroje, proto jsou zde i shrnuty možná vylepšení pro případnou následující práci, která by ještě vylepšila vlastnosti tohoto zařízení:

- Bylo by vhodné přepínat poměr napěťového děliče sloužícího pro odečítání napětí, tak jak je přepínán rozsah výstupního napětí. Díky tomu by byla využita celá šířka slova AD převodníku.
- Dále by bylo vhodné umístit referenční rezistor proudu ještě před řídicí tranzistor Q_2 , aby nastavené napětí odpovídalo napětí na PN přechodu, nikoliv součtu napětí na PN přechodu a referenčním rezistoru R_3 .
- Požit další obvod vytvářející referenci a použít tím pádem použít externí referenci pro AD a DA převodníky namísto napájecího napětí.
- Zdroj by bylo vhodné navrhnout spínaný, jak pro 206 V, tak pro 5 V. Z 5 V dále vytvářet +6 V a -6 V například pomocí MC34063 [2].
- Celý přístroj odfiltrovat a zabezpečit ochrannými prvky, aby splňoval EMC normy evropské unie a zároveň přidat i přepěťovou ochranu.
- Vhodné by bylo přístroj s těmito úpravami realizovat se součástkami v SMD provedení a země mezi deskami na hodně místech spojit prokovy. Tím by mělo být dosaženo kompaktnosti celého přístroje a odolnosti proti parazitním jevům a rušení.

Vzhledem k tomu, že všechny elektronické součástky mají jistou výrobní toleranci a v některých aplikacích je nutné na tento problém vzít zřetel, tak tento přístroj je schopen nabídnout detailní pohled na reálné chování součástky. Tím snadno umožní výběr té, která nejvíce vyhovuje potřebě a odpadá zdlouhavé ruční měření nelineární části charakteristiky dvojpólu, která je ve většině případů předmětem zájmu.

LITERATURA

- [1] BRZOBOHATÝ, Jaromír, Vladislav MUSIL, Arnošt BAJER a Jaroslav BOUŠEK. FEKT VUT. Elektronické součástky [Elektronické skriptum]. Brno, 2002 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~bousek/Elektronicke_soucastky_aktualni.pdf
- [2] GM ELECTRONIC. Elektronické součástky, materiál a zařízení [online]. 2014 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/elektronicke-soucastky-material-a-zarizeni/>
- [3] Polovodič. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): WikimediaFoundation, 2001-2014 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Polovodi%C4%8D>
- [4] *Gnuplot* [online]. [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.gnuplot.info/>
- [5] Usměrňovače. ANONYM. ABC dimenze [online]. 2007 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://abcdimenze.wz.cz/elektronika/usmernovace.html>
- [6] *MICROSOFT VISUAL STUDIO* [online]. [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.microsoft.com/cze/msdn/vstudio/>
- [7] TRUHLÁŘ, Michal. Doba života nadbytečných nositelů v křemíku. Brno, 2008. Dostupné z: mealtiner.net/Publikace/bakalarska_prace.pdf. Bakalářská práce. Přírodovědecká fakulta Masarykova univerzita. Vedoucí práce RNDr. Luděk Bočánek, CSc.
- [8] Elektronika II.: Napájecí zdroje. JAN LOOSE. Hellweb [online]. 2000 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: http://hellweb.loose.cz/index.php?page=school&subpage=elt_plus&id=5
- [9] FEKT VUT. Vysokofrekvenční technika - laboratorní cvičení: Rezonanční obvody z diskrétních součástek. Brno, rok vydání neznámý.
- [10] FUTURE TECHNOLOGY DEVICES INTERNATIONAL. FT232R [online]. 2014 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.ftdichip.com/>
- [11] *MPLAB® X Integrated Development Environment* [online]. [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.microchip.com/pagehandler/en-us/family/mplabx/>
- [12] *MPLAB XC8* [online]. [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: http://www.microchip.com/pagehandler/en_us/devtools/mplabxc/

SEZNAM SYMBOLŮ ZKRATEK

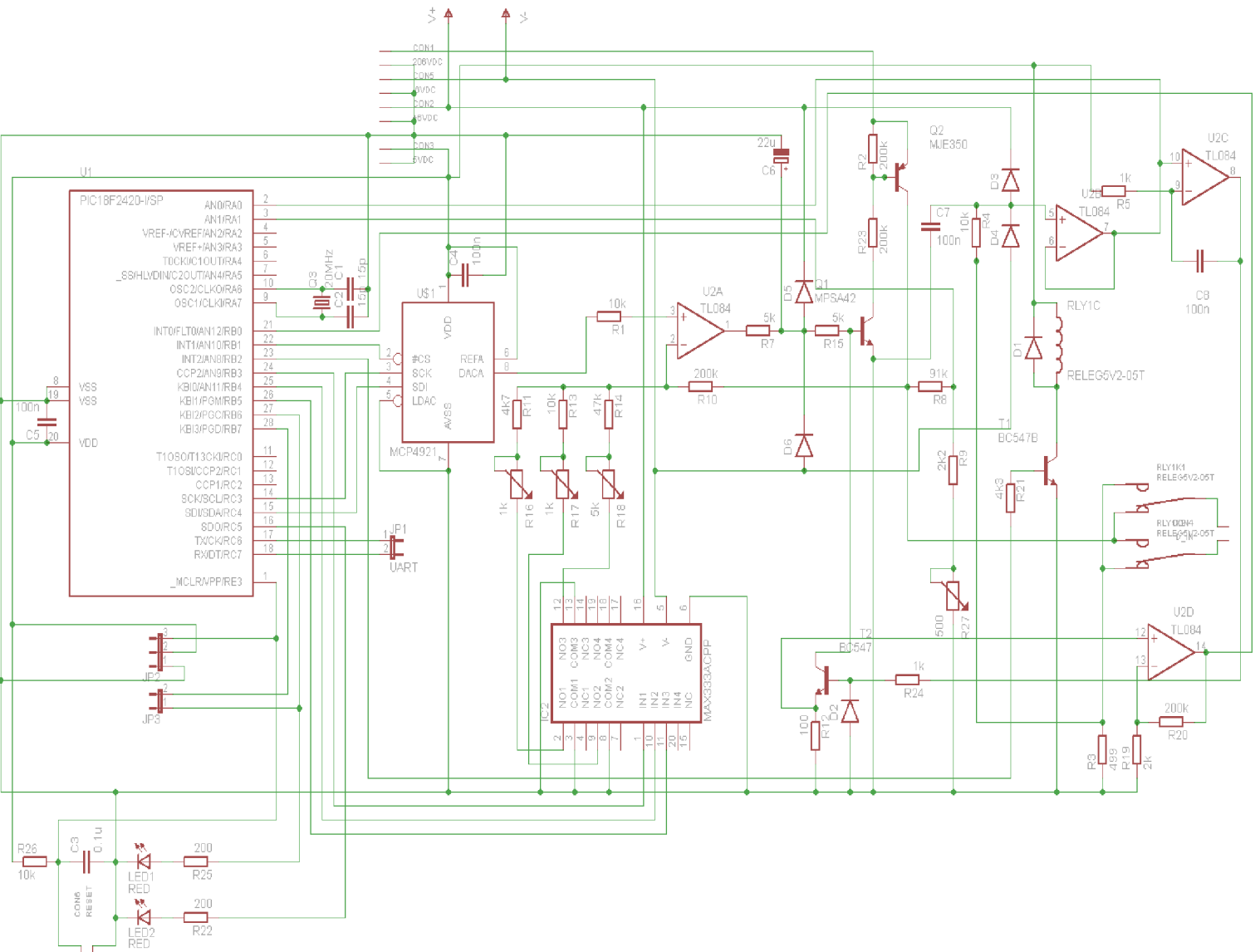
VA	Volt ampérová charakteristika
DA	Digitálně analogový převodník
AD	Analogově digitální převodník
PC	Osobní počítač
IO	Integrovaný obvod
COM	Sériový port
AC	Střídavý proud
DC	Stejnoseměrný proud
LED	Svítivá dioda
GUI	Grafické uživatelské rozhraní

SEZNAM PŘÍLOH

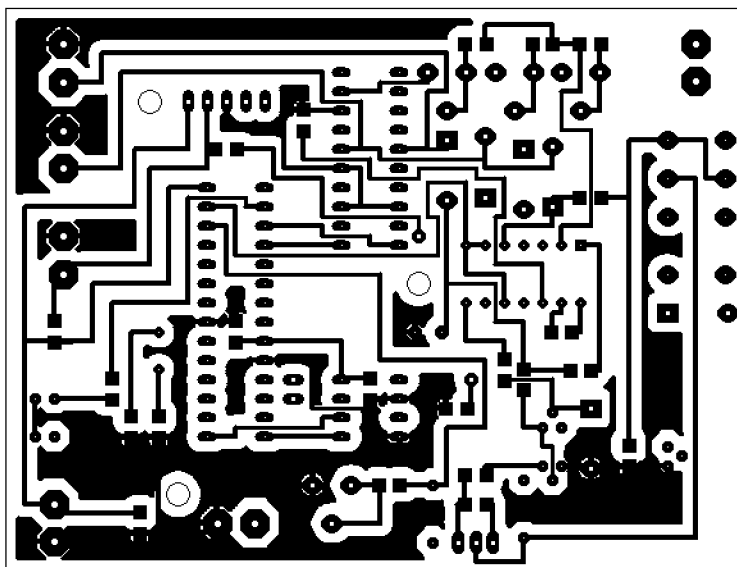
A měřič	39
A.1 Obvodové zapojení	39
A.2 Deska plošného spoje– top (strana součástek).....	40
A.3 Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)	40
A.4 Rozmístění součástek top.....	41
A.5 Rozmístění součástek - bottom	41
A.6 Seznam součástek	42
B zdroj	44
B.1 Obvodové zapojení	44
B.2 Deska plošného spoje– top (strana součástek).....	45
B.3 Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)	46
B.4 Rozmístění součástek top.....	47
B.5 Seznam součástek	47
C převodník USB/USART	49
C.1 Obvodové zapojení	49
C.2 Deska plošného spoje– top (strana součástek).....	49
C.3 Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)	49
C.4 Rozmístění součástek top.....	50
C.5 Seznam součástek	50

A MĚŘIČ

A.1 Obvodové zapojení

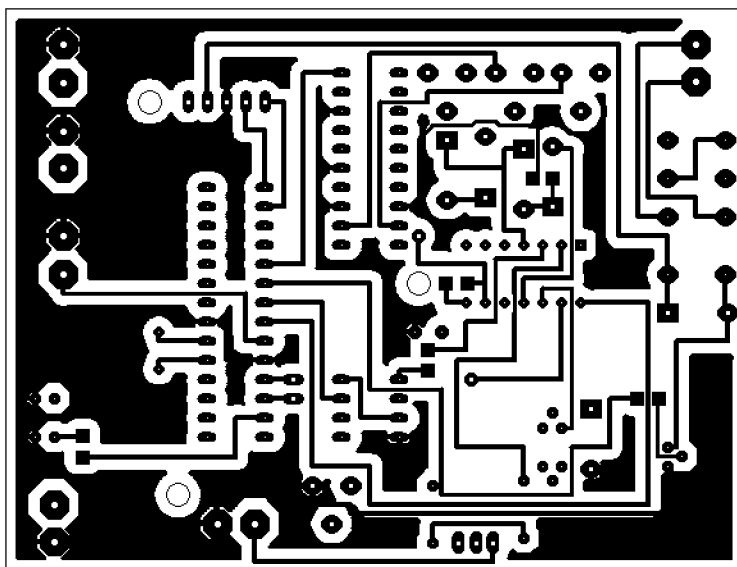


A.2 Deska plošného spoje– top (strana součástek)



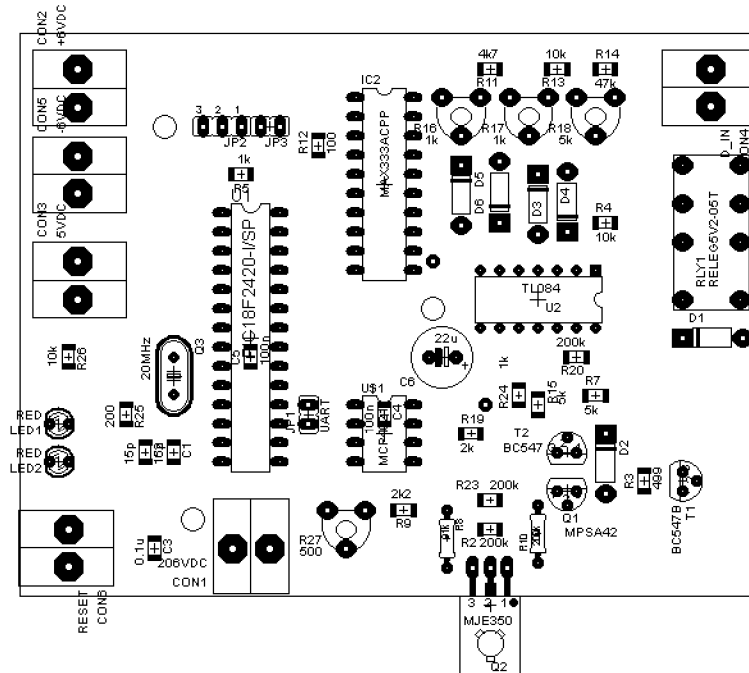
Rozměr desky 98 x 74,5 [mm], měřítko M 1:1

A.3 Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)

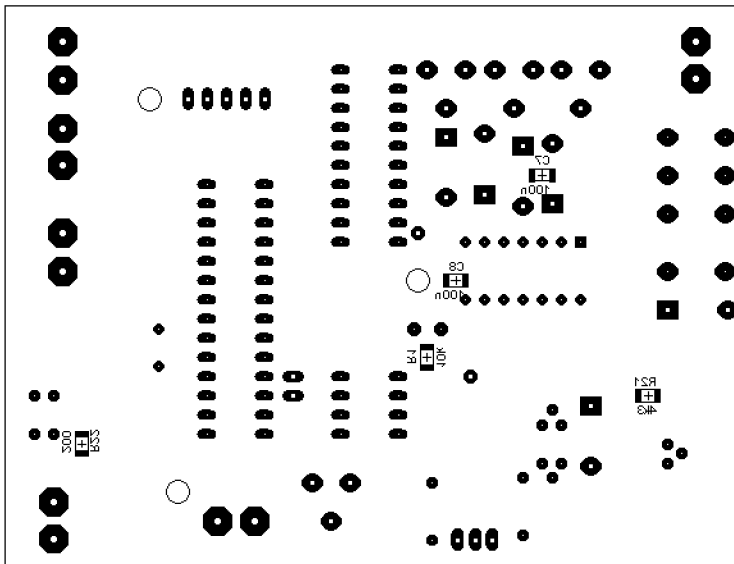


Rozměr desky 98 x 74,5 [mm], měřítko M 1:1

A.4 Rozmístění součástek top



A.5 Rozmístění součástek - bottom



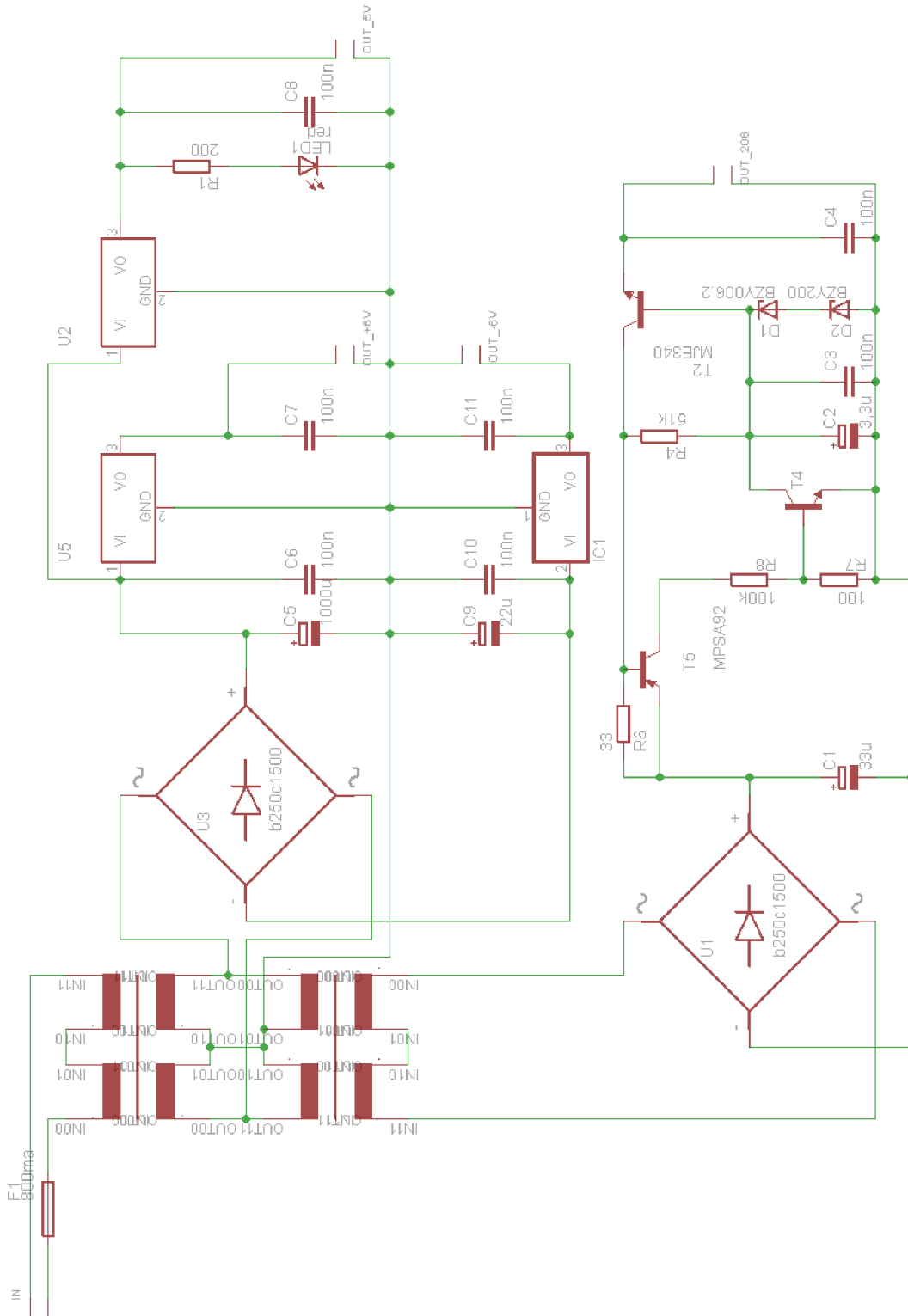
A.6 Seznam součástek

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	15p	C1206	Keramický kondenzátor
C2	15p	C1206	Keramický kondenzátor
C3	0.1u	C1206	Keramický kondenzátor
C4	100n	C1206	Keramický kondenzátor
C5	100n	C1206	Keramický kondenzátor
C6	22u	E3,5-8	Keramický kondenzátor
C7	100n	C1206	Keramický kondenzátor
C8	100n	C1206	Keramický kondenzátor
CON1	206VDC	ARK300/2	Konektor
CON2	+6VDC	ARK300/2	Konektor
CON3	5VDC	ARK300/2	Konektor
CON4	D_IN	ARK300/2	Konektor
CON5	-6VDC	ARK300/2	Konektor
CON6	RESET	ARK300/2	Konektor
D1	1N4147	DO41	Dioda
D2	1N4148	DO41	Dioda
D3	1N4149	DO41	Dioda
D4	1N4150	DO41	Dioda
D5	1N4151	DO41	Dioda
D6	1N4152	DO41	Dioda
IC2	MAX333ACPP	DIL20	Elektronický spínač
JP1	UART	JP1	Konektor
JP2	ISP	JP2	Konektor
JP3	ISP	JP1	Konektor
LED1	GREEN	LED3MM	LED dioda
LED2	RED	LED3MM	LED dioda
Q1	MPSA42	TO92	Tranzistor NPN
Q2	MJE350	TO126	Tranzistor PNP
Q3	20MHz	HC49U-V	Krystal
R1	10k	R1206	Odpor E24
R2	200k	R1206	Odpor E24
R3	499	R1206	Odpor E24
R4	10k	R1206	Odpor E24
R5	1k	R1206	Odpor E24
R7	5k	R1206	Odpor E24
R8	91k	0204/7	Odpor E24
R9	2k2	R1206	Odpor E24
R10	200k	0204/7	Odpor E24

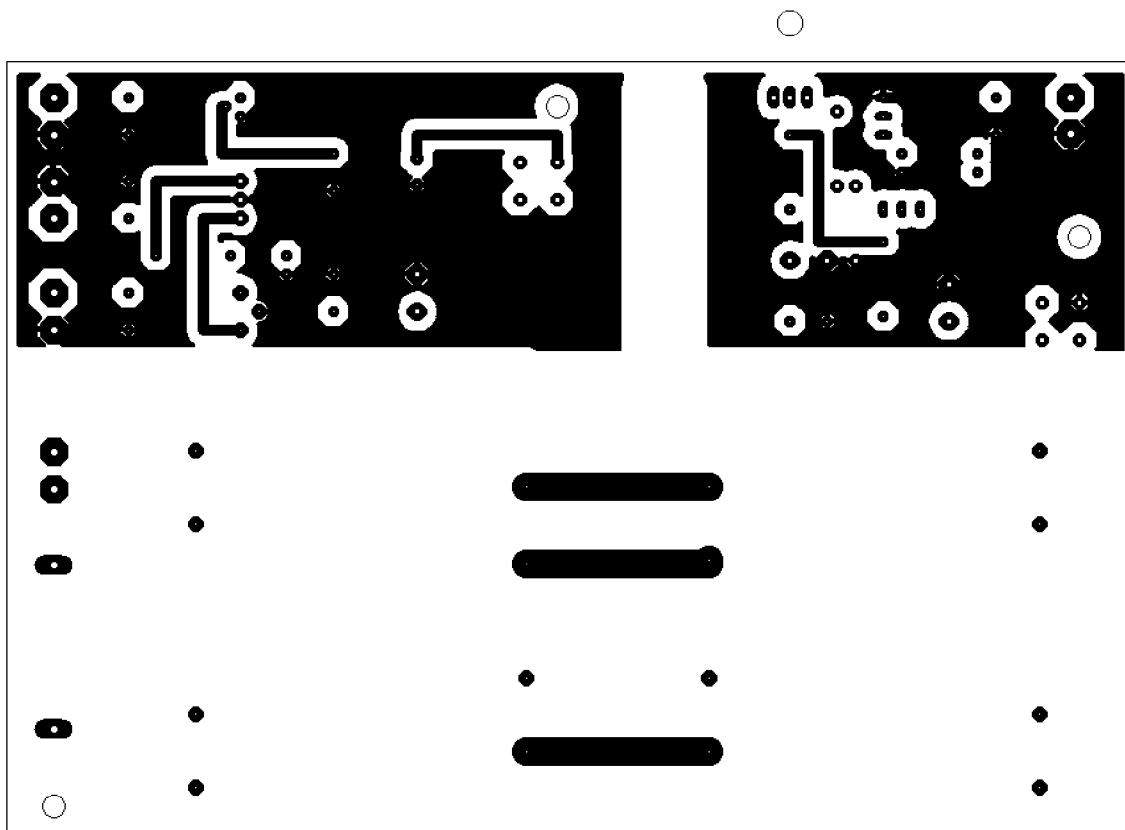
Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
R11	4k7	R1206	Odpor E24
R12	100	R1206	Odpor E24
R13	10k	R1206	Odpor E24
R14	47k	R1206	Odpor E24
R15	5k	R1206	Odpor E24
R16	1k	PT6V	Trimer
R17	1k	PT6V	Trimer
R18	5k	PT6V	Trimer
R19	2k	R1206	Odpor E24
R20	200k	R1206	Odpor E24
R21	4k3	R1206	Odpor E24
R22	200	R1206	Odpor E24
R23	200k	R1206	Odpor E24
R24	1k	R1206	Odpor E24
R25	200	R1206	Odpor E24
R26	10k	R1206	Odpor E24
R27	500	PT6V	Trimer
RLY1	RELEG5V2-05T	RG5V2	Přepínací relé
T1	BC547B	TO92	Tranzistor NPN
T2	BC547B	TO92	Tranzistor NPN
UŞ1	MCP4921	DIL08	DA převodník
U1	PIC18F2420-I/SP	DIL28-3	Mikrokontrolér
U2	TL084	DIL-14	Operační zesilovač JFET

B ZDROJ

B.1 Obvodové zapojení

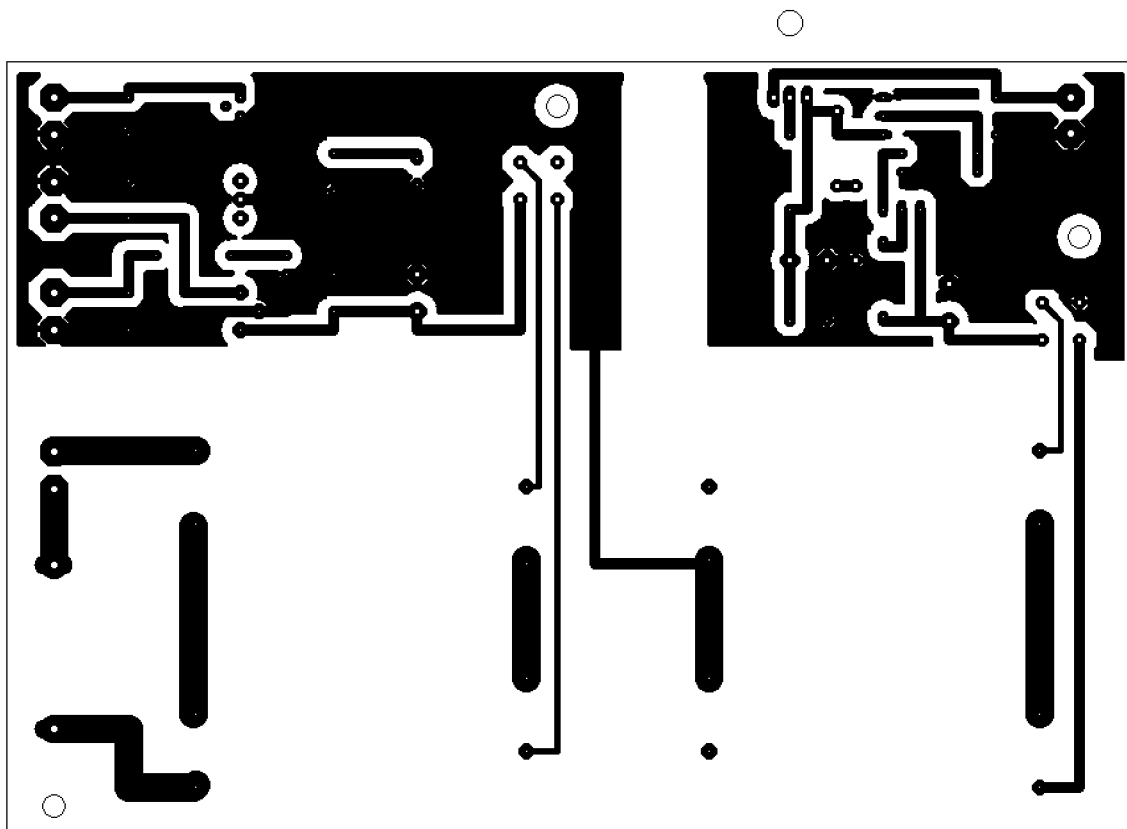


B.2 Deska plošného spoje – top (strana součástek)



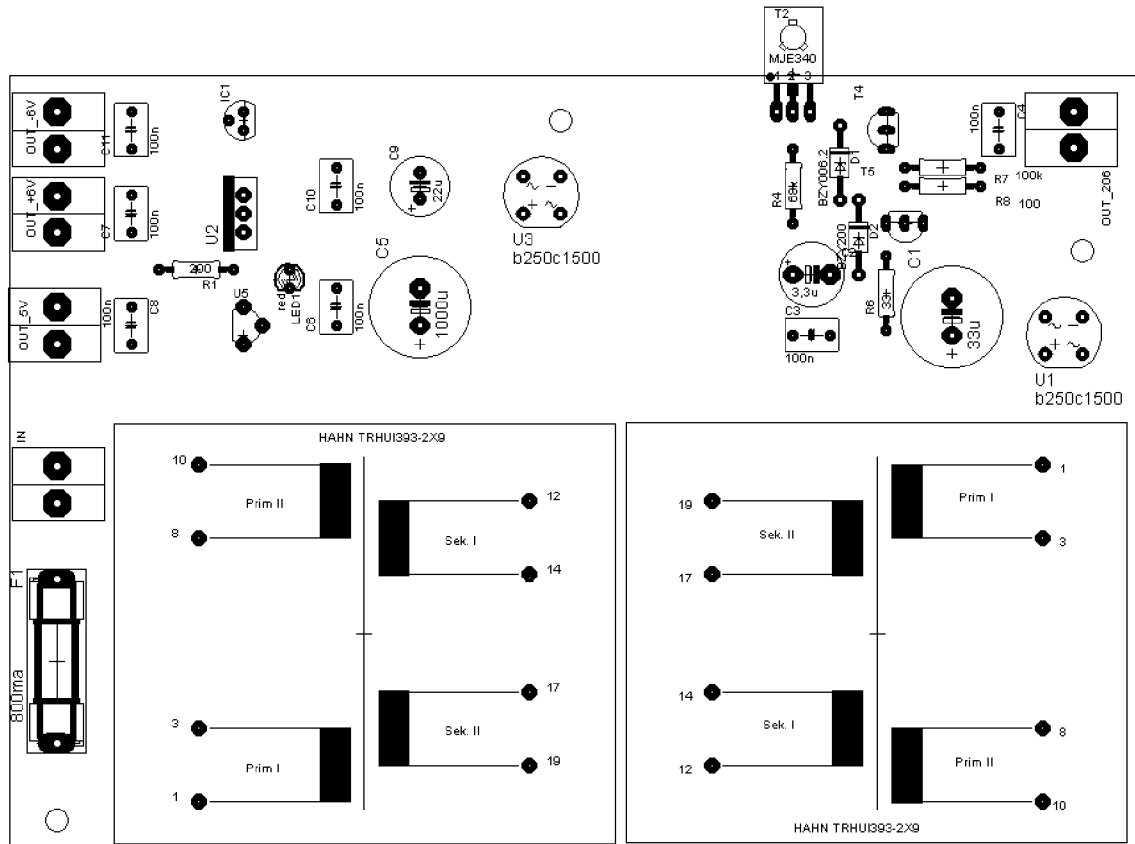
Rozměr desky 153,5 x 105,5 [mm], měřítko M 1:1

B.3 Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)



Rozměr desky 153,5 x 105,5 [mm], měřítko M 1:1

B.4 Rozmístění součástek



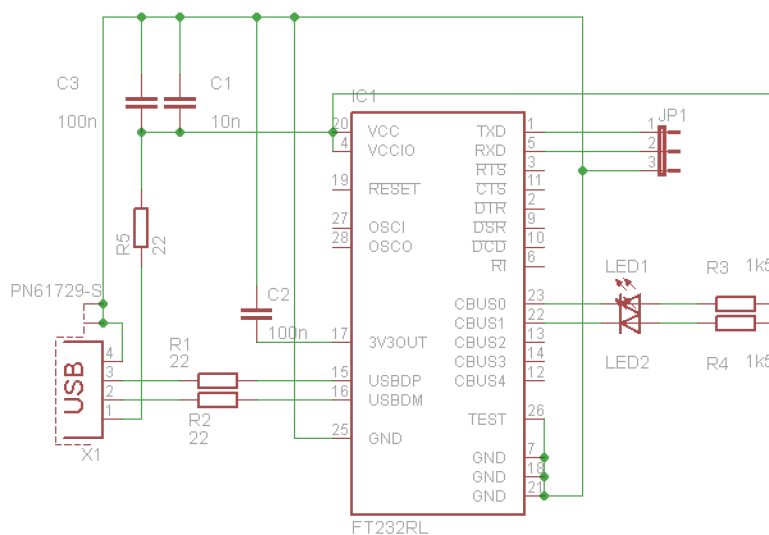
B.5 Seznam součástek

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	33u	E5-13	Elektrolytický kondenzátor 250V
C2	3,3u	E5-8,5	Elektrolytický kondenzátor 250V
C3	100n	C050-045X075	Keramický kondenzátor 250V
C4	100n	C050-045X075	Keramický kondenzátor 250V
C5	1000u	E5-13	Elektrolytický kondenzátor 25V
C6	100n	C050-045X075	Keramický kondenzátor 25V
C7	100n	C050-045X075	Keramický kondenzátor 25V
C8	100n	C050-045X075	Keramický kondenzátor 25V
C9	22u	E3,5-8	Elektrolytický kondenzátor 25V
C10	100n	C050-045X075	Keramický kondenzátor 25V
C11	100n	C050-045X075	Keramický kondenzátor 25V
D1	BZY006.2	DO41Z10	Stabilizační dioda
D2	BZY200	DO41Z10	Stabilizační dioda
F1	800mA	SH22,5	Pojistka

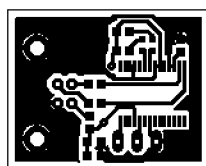
Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
IC1	79L06	TO92	Záporný stabilizátor
IN		ARK300/2	Konektor
LED1	RED	LED3MM	LED dioda
OUT_+6V		ARK300/2	Konektor
OUT_-6V		ARK300/2	Konektor
OUT_5V		ARK300/2	Konektor
OUT_206		ARK300/2	Konektor
R1	200	0207/10	Odpor E24
R4	51k	0207/10	Odpor E24
R6	33	0207/10	Odpor E24
R7	100	0207/10	Odpor E24
R8	100k	0207/10	Odpor E24
T2	MJE340	TO126	Tranzistor PNP
T4	MPSA42	TO92-CBE	Tranzistor NPN
T5	MPSA92	TO92-CBE	Tranzistor PNP
TR1	TRHUI393-2X9	TRHUI393-2X9	Transformátor
TR2	TRHUI393-2X9	TRHUI393-2X9	Transformátor
U1	b250c1500	DB1	Můstkový usměrňovač
U2	7805	TO-220S	Kladný stabilizátor
U3	b250c1500	DB1	Můstkový usměrňovač
U5	7806	TO-92C	Kladný stabilizátor

C PŘEVODNÍK USB/USART

C.1 Obvodové zapojení

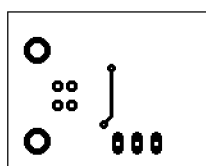


C.2 Deska plošného spoje – top (strana součástek)



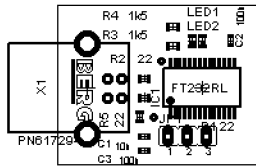
Rozměr desky 26,5 x 21,5 [mm], měřítko M 1:1

C.3 Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)



Rozměr desky 26,5 x 21,5 [mm], měřítko M 1:1

C.4 Rozmístění součástek



C.5 Seznam součástek

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	10n	C0603K	SMD kondenzátor
C2	100n	C0603K	SMD kondenzátor
C3	100n	C0603K	SMD kondenzátor
IC1	FT232RL	SSOP28	Převodník USB/UART
JP1		JP2	Konektor
LED1	RED	CHIP-LED0603	LED dioda
LED2	RED	CHIP-LED0603	LED dioda
R1	22	R0603	Odpor E24
R2	22	R0603	Odpor E24
R3	1k5	R0603	Odpor E24
R4	1k5	R0603	Odpor E24
R5	22	R0603	Odpor E24
X1	PN61729-S	PN61729-S	USB - B konektor