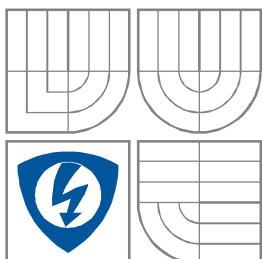


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

USB MULTIMETR S MIKROPROCESOREM USB MULTIMETER WITH MICROPROCESSOR

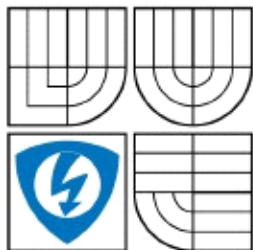
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Martin Samek

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Jan Kovář



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

BRNO, 2009

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Martin Samek
Ročník: 3

ID: 98473
Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

USB multimetr s mikroprocesorem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se se sběrnicí USB a vyberte vhodný typ mikropočítače (AVR, PIC, Freescale, 8051) s rozhraním USB., který umožní realizovat automatické přepínání rozsahů s minimem použitých externích součástek. Zařízení připojte k PC pomocí USB. Navrhněte obvody ochrany multimetru před přepětím. Vytvořte testovací program pro mikroprocesor.

Zařízení realizujte po mechanické stránce a vytvořte SW pro mikroprocesor a obslužný program pro PC. Určete přesnost multimetru na jednotlivých rozsazích. Optimalizujte multimetr s ohledem na jeho maximální přesnost.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] BURKHARD, M. C pro mikrokontroléry. Praha : BEN - technická literatura, 2003. ISBN: 80-7300-077-6

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 5.6.2009

Vedoucí práce: Ing. Jan Kovář

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Abstrakt

Tématem mé bakalářské práce je návrh multimetru a jeho propojení pomocí sběrnice USB. Při návrhu multimetru byla snaha o využití minimálního počtu součástek při zachování dobré ochrany proti přepětí. K propojení multimetru a počítače je využita dnes nejrozšířenější sběrnice USB. Ke komunikaci je využit standard HID, pro který je možno použít standardní systémový ovladač.

Abstract

Topic of my Bachelor's labour is a design of multimeter and his connection by the help of bus USB. When proposing the multimeter there was a tendency to use a minimal number of component parts to conserve a good protection against a bad usage in application. The most widespread busbar USB is used for connection of the multimeter and a computer. Standard HID is used for communication, for that it is not necessary to install any system drivers.

Klíčová slova

Univerzální sériová sběrnice, Enumerace, Transakce, Analogově digitální převodník, RMS, měření napětí, měření proudu, měření odporu

Keywords

Universal Serial Bus, Enumeration, Transaction, Analog to digital converter, RMS, Current measurement, Resistance measurement, Voltage measurement

Bibliografická citace

SAMEK, M. *USB multimetr s mikroprocesorem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 43 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Kovář.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma USB multimetr s mikroprocesorem 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 jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 5. června 2009

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Kovářovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 5. června 2009

.....
podpis autora

Obsah

1 - Úvod.....	2
2 - Universal Serial Bus (USB)	3
2.1 Fyzická vrstva	3
2.2 Transportní vrstva	4
2.3 Cyklická redundantní kontrola	6
2.4 Enumerace	6
2.5 Transakce	8
2.5.1 Vstupní transakce	8
2.5.2 Výstupní transakce	8
2.5.3 Řídící transakce	8
3 - Návrh.....	9
3.1 Mikroprocesor	9
3.2 Popis mikroprocesoru PIC18F4455	10
3.3 A/D převodník.....	11
3.4 Teorie A/D převodu	11
3.5 A/D převodník v mikroprocesoru	12
4 - Konstrukce	13
4.1 RMS	13
4.2 Měření napětí.....	14
4.2.1 Návrh děliče	16
4.3 Měření proudu	19
4.4 Měření odporu	21
5 - Program mikroprocesoru	24
5.1 Popis funkcí.....	25
6 - Řídící program	27
6.1 Zpracování paketů	27
6.2 Zobrazení hodnot.....	28
7 - Kontrolní měření	30
8 - Závěr	34
9 - Rejstříky a seznamy	35
9.1 Seznam použité literatury	35
9.2 Seznam obrázků	36
9.3 Seznam tabulek	36
9.4 Seznam rovnic	37
9.5 Přílohy	38

1 - Úvod

Digitální multimetr je v dnešní době nejpoužívanějším měřicím přístrojem pro elektrotechnická měření. Pro uživatele nástup digitálních multimetrů znamenal především spolehlivost a přístroj pro měření všech běžných elektrických parametrů. Nároky uživatelů tohoto přístroje však neustále rostou a s masivním rozšířením výpočetní techniky začíná být kladen nový požadavek na propojení multimetru s počítačem.

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem multimetru s parametry uvedenými v tabulce 1. Při návrhu byl kladen požadavek na využití minimálního počtu součástek při zachování dobré ochrany proti přepětí. Propojení multimetru a počítače je realizováno dnes nejrozšířenější sběrnici USB. Ke komunikaci je využit standard HID, pro který je možno použít standardní systémový ovladač.

Díky propojení multimetru a počítače mohlo dojít k značné miniaturizaci multimetru vlivem možnosti absence zobrazovače měřených hodnot a ovládacích prvků multimetru. Propojení dává možnost vzniku novým funkcím, jako je například možnost uložení naměřené hodnoty, zobrazení průběhu měřené veličiny nebo možnost dlouhodobého měření se zobrazením grafu vývoje měřené veličiny.

<u>Napětí</u>	<u>DC</u> => Rozsah: 500mV až 400V <u>AC</u> => Rozsah: 1V až 250V Frekvence: 1Hz až 1000Hz Způsob měření: RMS
<u>Proud</u>	<u>DC</u> => Rozsah: 1mA až 200mA <u>AC</u> => Rozsah: 1mA až 200mA Frekvence: 1Hz až 1000Hz Způsob měření: RMS
<u>Odpor</u>	Rozsah: 1Ω až 1MΩ

Tabulka 1 Parametry návrhu

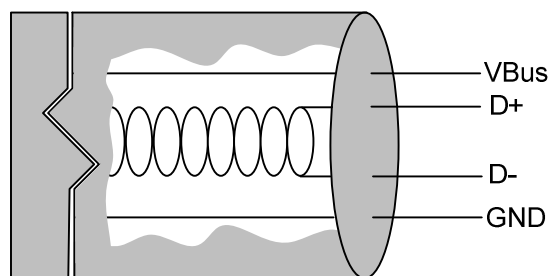
2 - Universal Serial Bus (USB)

Rozhraní USB je nejnovější standard pro sériový přenos dat. Dnes již zcela nahradilo dříve používaný sériový port RS232 či paralelní port. Jedná se o poloduplexní sériovou sběrnici. Podstatná výhoda sběrnice USB spočívá v tom, že sériový port mohlo využívat vždy jen jedno zařízení, naproti tomu USB může využívat až 127 zařízení. Další výhodou USB oproti RS232 je několikanásobně větší přenosová rychlost a to až 480Mbit/s a rozvod napájecího napětí po sběrnici. USB se dnes dělí na tři standardy USB 1.0, USB 1.1 a USB 2.0, které jsou navzájem kompatibilní. [1]

USB sběrnici podporuje Plug-And-Play. Zařízení, která jsou takto označena, je možné připojovat a odpojovat za chodu počítače. [1]

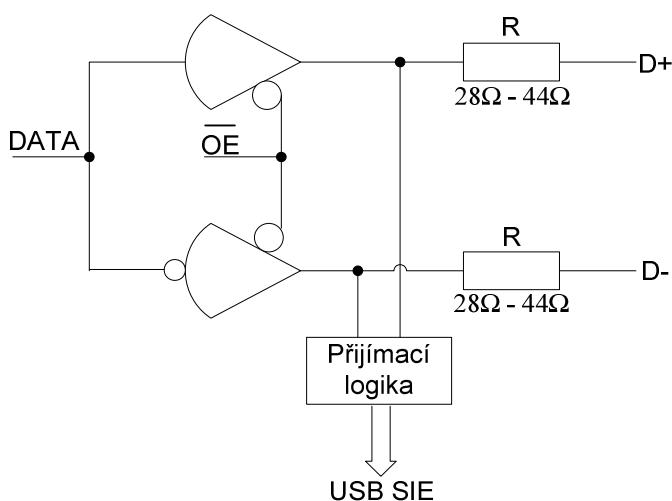
2.1 Fyzická vrstva

Rozhraní USB využívá čtyřvodičového zapojení obr.1. Dva vodiče slouží k napájení zařízení a dva ke komunikaci mezi hostitelem a zařízením.



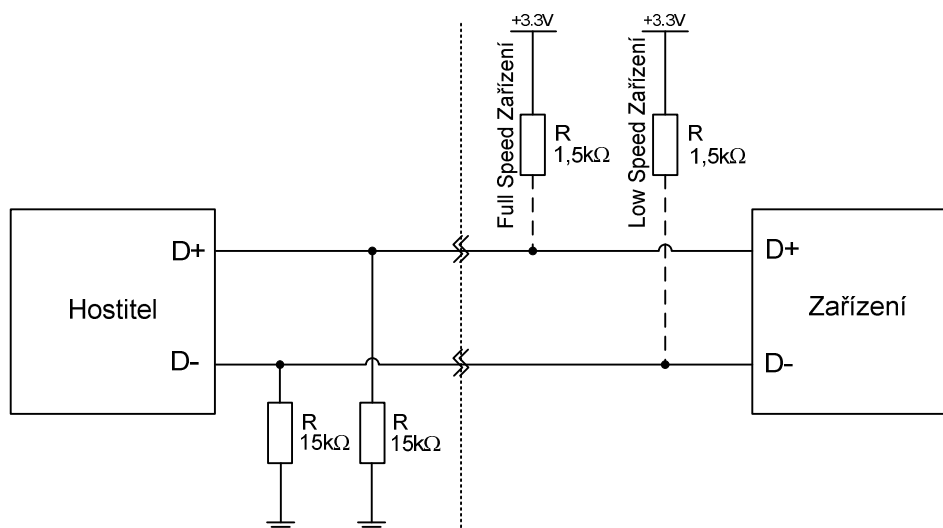
Obr. 1 Vodiče fyzické vrstvy USB [3]

Komunikační vedení je buzeno diferencially CMOS hradly se sériově zapojenými odpory v rozmezí 28Ω až 44Ω , které slouží jako impedanční přizpůsobení obvodu obr.2.



Obr. 2 Budící obvod USB

Úrovně na vedení jsou přibližně TTL – logická nula 0,3V a logická jednička 2,8V. V klidovém stavu (hostitel i zařízení odpojeno) jsou úrovně na komunikačním vedení určeny dvěma pull-down rezistory na straně hostitele a jedním pull-up rezistorem na straně zařízení obr.3. Pull-up rezistor o velikosti 1,5k Ω připojen na straně zařízení k lince D+ nebo D- určuje rychlost komunikace mezi hostitelem a zařízením. Připojením rezistoru k lince D- se zařízení identifikuje jako Low-Speed a naopak připojením rezistoru k lince D+ jako zařízení Full-Speed. Zařízení podporující High-Speed se připojuje stejně, jako zařízení Full-Speed, kde následná změna rychlosti na High Speed je řešena softwarově. [7]



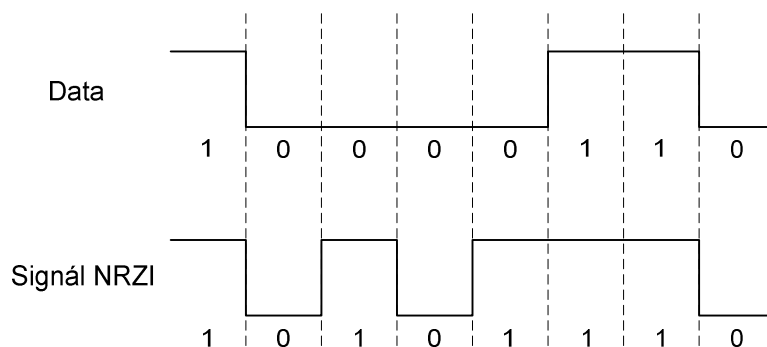
Obr. 3 Připojení zařízení

Zařízení připojená pomocí USB mohou být napájena přímo ze sběrnice, kde napájecí napětí je 5V. Odběr zařízení nesmí překročit 100mA, případně 500mA maximálně pro jedno zařízení na celé USB sběrnici. Zařízení, u kterého odběr přesahuje 100mA, musí požádat hostitele při enumeraci o vyšší proud. Hostitel po té zhodnotí, je-li k dispozici dostatek rezerv. Pokud hostitel nemá dostatek rezerv, může být žádost zařízení o přidělení vyššího proudu zamítnuta. [7]

2.2 Transportní vrstva

Sběrnice USB obsahuje pouze jedno zařízení typu Master, které řídí veškeré dění na sběrnici. Je tedy zřejmé, že zařízení typu Slave může odesílat data jen v tu chvíli, kdy jej zařízení typu Master o daná data požádá. Veškerá data se přenášejí v krátkých datových paketech. Přenos paketů se uskutečňuje v oknech, která mají délku přesně 1 milisekundy. [10]

Rychlost přenosu určuje výhradně zařízení typu Master. Protože není přenášen odděleně žádný hodinový signál, je třeba, aby se zařízení zasynchronizovalo pomocí přenášených dat. Kvůli této synchronizaci, jsou data přenášena linkovým kódem NRZI obr.4. Při využití této metody logická jednička nechává úroveň beze změny, a logická nula vede ke změně úrovně. [10]



Obr. 4 Signál NRZI

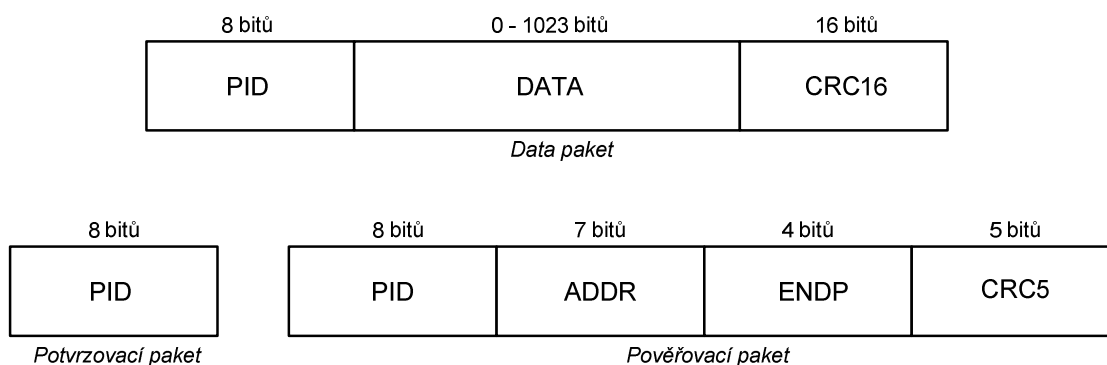
Mezi Hostitelem a zařízením dochází k výměně paketů za účelem:

- Provést Enumeraci
- Řídit stavy zařízení
- Korigovat chyby při přenosu
- Přenést užitečná data

Existuje 16 typů paketů zařazených do čtyř skupin:

- Datové
- Pověřovací
- Potvrzovací
- Speciální

Nastavení koncového zařízení a dění na sběrnici je řízeno pomocí Pověřovacích (Token) a Potvrzovacích (Handshake) paketů. Pověřovací pakety IN a OUT z pohledu hostitele řídí směr komunikace na sběrnici. Nastavení zařízení se provádí pomocí paketu SETUP, po kterém bezprostředně následuje paket DATA, jehož obsahem je úkon, který se od zařízení očekává. Zařízení poté odpovídá o stavu žádosti hostitele pakety DATA. O úspěšnosti přenosu informují Potvrzovací pakety. Pakety DATA0, DATA1, DATA2 jsou určeny pro přenos užitečných dat, která nemají vliv na dění na sběrnici. Nejčastěji jsou pro komunikaci využity pakety DATA0 a DATA1, které by se měly pravidelně střídát. Formát paketu je závislý na jeho typu. [10] Některé formáty paketů:



Obr. 5 Formáty paketů

Společné pro všechny pakety je zahájení synchronizační sekvencí SYNC - 0x08, po které následuje identifikátor (PID) a konec paketu SE0. Identifikátor paketu (PID) určuje, o jaký typ paket se jedná. Skládá se z čísla paketu v dolní polovině bytu a invertovaného čísla paketu v horní polovině bytu:

$\overline{\text{PID3}}$	$\overline{\text{PID2}}$	$\overline{\text{PID1}}$	$\overline{\text{PID0}}$	PID3	PID2	PID1	PID0
--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	------	------	------	------

Obr. 6 Identifikátor paketu PID

2.3 Cyklická redundantní kontrola

Cyklická redundantní kontrola označována jako CRC je určena pro detekci chyb během přenosu. Odesílatel vypočte nad daty, která jsou určena k odeslání CRC a přiloží je na konec paketu. Příjemce má několik možností, jak určit zda došla data byla přijata bez chyby. Jedna z možností, jak ověřit správnost přijatých dat je výpočet CRC nad přijímanými daty a následně jej srovnat s přijatou hodnotou CRC. U této metody je problém, že příjemce dopředu neví, jak dlouhá data jsou přijímána a díky tomu by mohlo dojít k výpočtu i nad přijímaným CRC. Proto příjemce může počkat na dokončení příjmu dat a poté vypočítat CRC, nebo při příjmu dat počítat s dvoubajtovým zpožděním, kdy při dokončení příjmu je jisté, že výpočet proběhl pouze nad daty a ne nad přijímaným CRC. K výpočtu CRC16 je užíván generující polynom $x^{16}+x^{15}+x^2+1$ a pro výpočet CRC5 je využit polynom x^5+x^2+1 . [10]

2.4 Enumerace

Enumerace je proces po připojení zařízení k hostiteli, kdy dochází ke komunikaci mezi hostitelem a zařízením za účelem vzájemného poznání. Během tohoto procesu hostitel přiděluje zařízení adresu a mění jeho vnitřní stavy. Zařízení naopak poskytuje hostiteli informace o svých softwarových a hardwarových možnostech formou deskriptorů. Deskriptory jsou přesně definované bloky několika bajtů dat, na které se hostitel po připojení dotazuje. Ukázka jednoho z deskriptorů je na obr.7. [1]

Název	Délka, Popis	Příklad
Délka deskriptoru	1, Velikost daného deskriptoru v bajtech	0x12
Typ deskriptoru	1, Typ deskriptoru (0x01 = deskriptor zařízení)	0x01
Verze USB	2, Verze USB v BCD (0x0200 = verze 2.0)	0x0200
Kód třídy	1, Kód třídy zařízení	0x00
Kód podtřídy	1, Kód podtřídy zařízení	0x00
Kód protokolu	1, Kód protokolu	0x00
Velikost EP0	1, Velikost paměti FIFO EP0	0x08
IdVendor	2, Identifikátor dodavatele	0xC410
IdProdukt	2, Identifikátor výrobku	0x0100
Číslo verze	2, Číslo verze v BCD	0x0002
Informace výrobce	1, Index řetězce pro výrobce (ukazuje např. na řetězec „Vyrobil Samek“)	0x01
Informace produktu	1, Index řetězce pro výrobek (ukazuje např. na řetězec „USB multimetr“)	0x02
Sériové číslo	1, Index řetězce pro sériové číslo (ukazuje např. na řetězec „123456789“)	0x00
Počet konfigurací	1, Počet možných konfigurací (0x01 = zařízení má jen jednu konfiguraci)	0x01

Obr. 7 Deskriptor zařízení

Hostitel i zařízení musí rozlišovat mezi daty užitečnými, pro které bylo zařízení zkonstruováno a daty, která jsou určena pro účel enumerace. Pro rozlišení těchto dat byli zavedeny Endpointy. Pro účel Enumerace je určen Endpoint0, který má vlastnosti pevně dány specifikací. Typický proces Enumerace je složen:

- USB Reset: Reset zařízení. Zařízení není konfigurováno a nemá žádnou adresu. Na zařízení se dá obracet přes implicitní adresu 0.
- Žádost o deskriptor zařízení: Hostitel žádá od zařízení část deskriptoru zařízení
- USB Reset: Opětovný reset zařízení
- Nastavení adresy: Hostitel přiděluje zařízení adresu
- Žádost o deskriptor zařízení: Hostitel dočítá deskriptor zařízení, ze kterého se dozvídá výrobce, typ zařízení a další informace o zařízení.
- Žádost o konfigurační deskriptor
- Žádost o ostatní deskriptory
- Nastavení konfigurace

2.5 Transakce

Komunikace na USB sběrnici je formou paketů. Problém, který téměř vždy vyvstává u komunikace dvou zařízení, je omezenost délky paketu čili počtu bytů jdoucích bezprostředně za sebou. Maximální počet bytů, které smějí být přeneseny v rámci jednoho paketu, udává MTU (maximum transfer unit). MTU zohledňuje veškerá hardwarová omezení, jako jsou například velikost vstupních a výstupních bufferů či přesnost synchronizace. Z důvodu potřeby přenesení většího objemu dat než dovoluje jeden paket, dochází k procesu fragmentace (dělení na části). Díky tomuto procesu se komunikace komplikuje a přenos paketů musí být doplněn rozšířením zvaným Transakce. Transakce je předpis stanovující posloupnost různých druhů paketů pro přenesení dat libovolné délky. Rozeznávají se tři druhy transakce vstupní, výstupní a řídicí. [10]

2.5.1 Vstupní transakce

Hostitel odešle paket IN do zařízení, ze kterého chce číst. Zařízení odpovídá první částí dat v paketu DATA0. Hostitel potvrzuje přijatá data paketem ACK nebo NAK. Nyní hostitel opakuje IN paket, na který čeká odpověď od zařízení v paketu DATA1. Hostitel přijatá data opět potvrzuje a vysílá paket IN, dokud neobdrží prázdný paket, nebo paket, jehož délka je kratší než maximální délka paketu. Tím se hostitel dozvídá, že zařízení odeslalo veškerá data a nastává okamžik pro potvrzení platnosti transakce. Potvrzení je prováděno odesláním paketu OUT do zařízení, po kterém bezprostředně následuje prázdný paket DATA0. Zařízení musí odpovědět ACK paketem jinak je transakce neplatná a přijatá data jsou zahozena. [10]

2.5.2 Výstupní transakce

Nejprve si hostitel data, která bude odesílat, rozdělí na bloky pevné délky. Poté uvědomí zařízení, do kterého chce zapisovat vysláním paketu OUT, po kterém bezprostředně následuje paket DATA0 s prvním blokem dat. Zařízení odpovídá potvrzovacím paketem ACK nebo NAK. Pokud odpověď od zařízení je kladná (ACK), hostitel odesílá paket DATA1 s dalším blokem dat. Je-li odpověď negativní (NAK), hostitel opakuje své předešlé vysílání. Ve chvíli, kdy hostitel odešle vše, co potřeboval, dochází k ukončování komunikace. Hostitel odešle příkaz IN, na který od zařízení očekává odpověď ve formě prázdného paketu DATA0. Hostitel takový paket potvrdí odesláním potvrzení ACK. V tuto chvíli byla transakce potvrzena a všechna data odeslána. Transakce se ruší v případě, kdy není dodržena posloupnost paketů popsaná výše. V tomto případě je smazán vstupní buffer. [10]

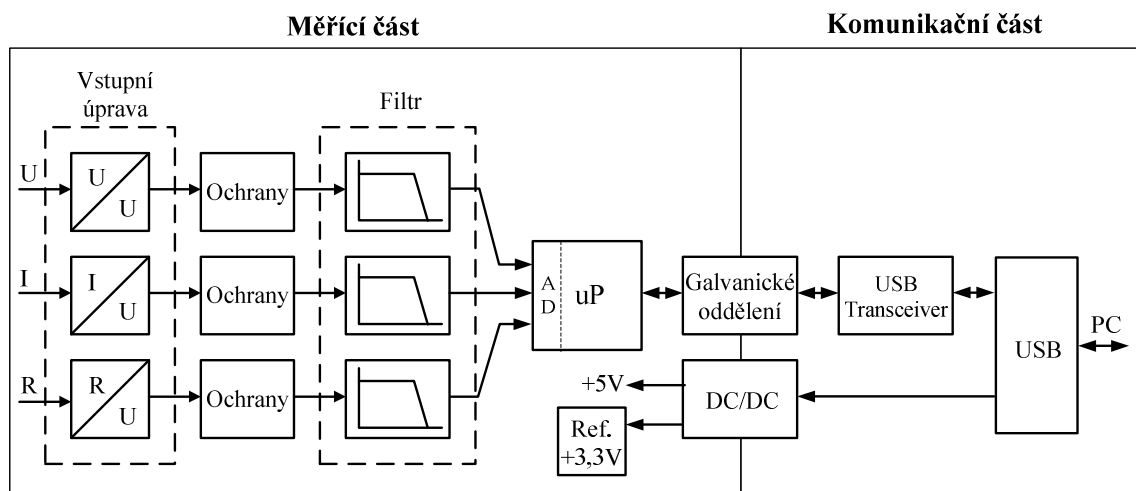
2.5.3 Řídicí transakce

Ve chvíli, kdy hostitel zašle zařízení SETUP paket, začíná řídicí transakce. Po tomto paketu následuje paket DATA0 o délce 8 bytů, jehož obsahem je informace pro zařízení, zda bude následovat vstupní nebo výstupní transakce. Na základě této informace si zařízení připraví data k odeslání, nebo vyprázdní vstupní buffer a zahájí standardní transakci tak, jak bylo popsáno dříve. Je zřejmé, že řídicí transakce je stejná jako vstupní či výstupní transakce s tím rozdílem, že užitečná data, která by byla standardně přenesena, jsou nahrazena daty, o která hostitel požádal. [10]

3 - Návrh

Blokové schéma navrženého multimetru je na obr.8. Základním blokem multimetru je mikroprocesor. Mikroprocesor na základě informace přijaté od řídicího programu měří napětí, proud nebo odpor. Jedinou přímo měřenou veličinou je napětí. Nepřímo měřený proud a odpor je lineárně převáděn na napětí. Měřené veličiny jsou nejprve přivedeny do bloku vstupní úpravy, kde dochází k úpravě jejich amplitud a k převodu nepřímo měřených veličin na napětí. Toto napětí je přes ochrany měřicí části a filtr typu dolní propust přivedeno na vstup A/D převodníku mikroprocesoru. Mikroprocesor pomocí A/D převodníku převádí spojitě napětí na číslicovou interpretaci a v blocích tyto hodnoty odesílá přes sběrnici USB řídicímu programu. Řídicí program z pole naměřených hodnot metodou RMS počítá efektivní hodnotu a zobrazuje ji na displeji.

Z hlediska ochrany počítače při měření síťových napětí bylo zapotřebí galvanicky oddělit měřicí a komunikační část. K tomuto oddělení slouží blok galvanického oddělení obsahující rychlé optočleny oddělující USB sběrnici od měřicí části. DC/DC měnič slouží jako zdroj napětí pro měřicí část, ze kterého je následně odvozeno referenční napětí pro A/D převodník mikroprocesoru.



Obr. 8 Blokové schéma multimetru

3.1 Mikroprocesor

Z velkého množství mikroprocesorů na našem trhu pocházejících od mnoha výrobců jako jsou například Microchip, Hitachi, Zilog, Intel či Atmel bylo zapotřebí vybrat vhodný mikroprocesor pro aplikaci do USB - multimetru. Po zvážení dostupnosti prostředků pro programování a ladění softwaru mikroprocesorů zůstali pouze dva výrobci a to Microchip a Atmel. Dále bylo zapotřebí zvážit hardwarovou výbavu jednotlivých mikroprocesorů. Srovnání několika typů mikroprocesorů od výrobců Microchip a Atmel je v tabulce 2. Mezi základní požadavky kladené na mikroprocesory byla možnost připojení externího transceiveru USB komunikace pro galvanické oddělení měřicí a komunikační části a dostatek vstupně/výstupních portů. Po zvážení jednotlivých kladů a záporů vyšel pro aplikaci jako nejvhodnější mikroprocesor PIC18F4455 od firmy Microchip.

Výrobce	Typ	I/O Piny	A/D Převodník	A/D Kanálů	Datová Paměť	Programová Paměť	USB	Externí USB
Microchip	PIC18F4455	35	10 Bits	13	2K	24K	USB2.0	Ano
Microchip	PIC18F2553	24	12 Bits	10	2K	32K	USB2.0	Ano
Atmel	AT89C5132	44	10 Bits	2	2K	64K	USB1.1	Ne
Atmel	AT90USB1286	48	10 Bits	8	2K	32K	USB2.0	Ne

Tabulka 2 Srovnání parametrů procesorů [8]

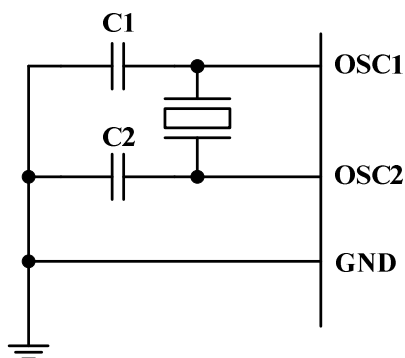
3.2 Popis mikroprocesoru PIC18F4455

Mikroprocesor PIC18F4455 dále jenom PIC je vyráběn firmou Microchip. Jedná se o mikroprocesor 8 – bitové architektury. Základní vlastnosti tohoto mikroprocesoru jsou:

- Napájecí napětí 2V – 5.5V
- 35 vstupně výstupních pinů
- 10 bitový A/D převodník
- Integrovaná EEPROM o velikost 256B
- Datová paměť o velikosti 2 kB
- Programová paměť o velikosti 24 kB
- Oddělená programová a datová paměť

Každý mikroprocesor pro svoji funkci potřebuje napájecí napětí a zdroj hodinového signálu. Napájecí napětí v rozsahu 2V – 5.5V se u mikroprocesoru PIC připojuje na dva vstupy V_{dd} . maximální proud, dle dokumentace výrobce, tekoucí do vstupů V_{dd} činí 250mA.

Přivedení hodinového signálu se provádí připojením krystalu o frekvenci v rozmezí 4MHz – 48MHz na vstupy OSC1 a OSC2. Frekvenci krystalu je zapotřebí zvolit v závislosti na rychlosti komunikace sběrnice USB, rychlosti zpracování instrukcí a spotřebě mikroprocesoru. Z hlediska spotřeby mikroprocesoru je vhodnější využití krystalu o nižší frekvenci. Požadavky kladené na frekvenci krystalu jsou protichůdné, proto frekvence krystalu byla zvolena, jako kompromis mezi jednotlivými požadavky. V závislosti na zmíněných požadavcích byl zvolen krystal o frekvenci 12MHz, který dle dokumentace výrobce má být blokován kondenzátory o velikosti 27pF viz obr.9. [8]



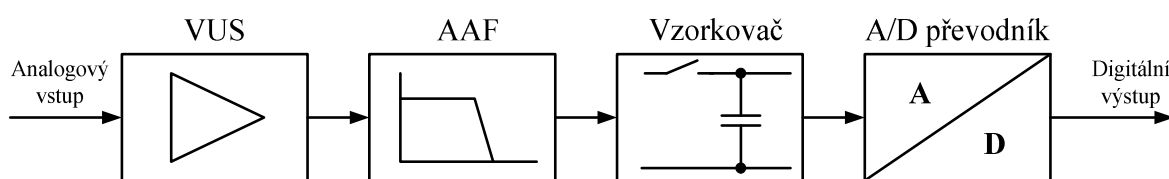
Obr. 9 Připojení oscilátoru k uP [8]

3.3 A/D převodník

A/D převodník je obvod, který v závislosti na referenci převádí analogový signál na odpovídající číselnou interpretaci. Dochází zde ke kvantování vstupního signálu. Kvantování je proces zaokrouhlování vstupního signálu k nejbližší kvantovací hladině, které jsou u většiny převodníků rovnoměrně rozloženy přes celý vstupní rozsah. Aby bylo zaokrouhlování též zvané jako kvantovací chyba co nejmenší, je třeba využít převodník s co možná největším počtem kvantovacích hladin.

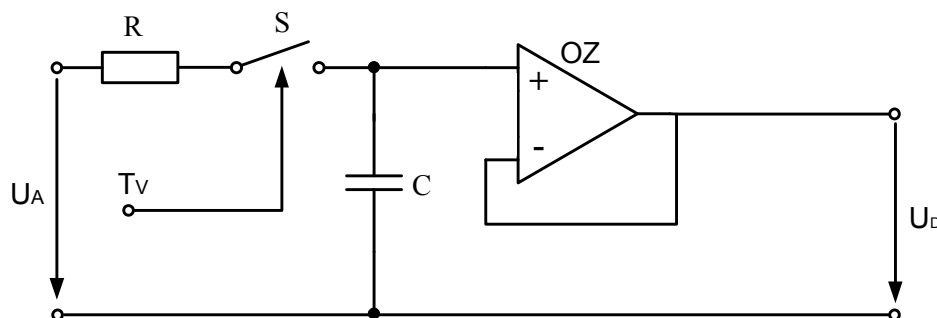
3.4 Teorie A/D převodu

Před převodem analogové veličiny na digitální interpretaci je potřeba vstupní signál upravit do určitých mezí. K této úpravě slouží blok vstupní úpravy signálu, kde se nepřímo měřené analogové veličiny proud či odpor převedou na ekvivalentní hodnotu napětí v určitých mezích. Po úpravě vstupního signálu do potřebné podoby a mezí následuje antialiasingový filtr, což je dolní propust propouštějící signál o poloviční frekvenci než je kmitočet vzorkovače. [11]



Obr. 10 Blokové schéma zpracování signálu [11]

Upravený vstupní signál procházející přes antialiasingový filtr vstupuje do bloku vzorkovače. Vzorkovač provádí diskretizaci signálu v čase. Vzorkováním se odebírají vzorky vstupního analogového signálu, dnes nejčastěji paměťovým vzorkovačem s periodou T_V . Schéma takového vzorkovače je na Obr. 11. Vstupní signál s periodou T_V se přes omezovací odpor R připojuje spínačem S na paměťový prvek v tomto případě kondenzátor C . U paměťového vzorkovače rozeznáváme dva stavy. Pokud je sepnut spínač S , vzorkovač se nachází ve stavu vzorkování, tedy výstupní napětí sleduje vstupní. Ve chvíli rozepnutí spínače S přechází vzorkovač ze stavu vzorkování do stavu pamatování. V tuto chvíli se výstupní napětí v ideálním případě nemění a dochází pomocí A/D převodníku k převodu na diskretní číselnou hodnotu. [11]

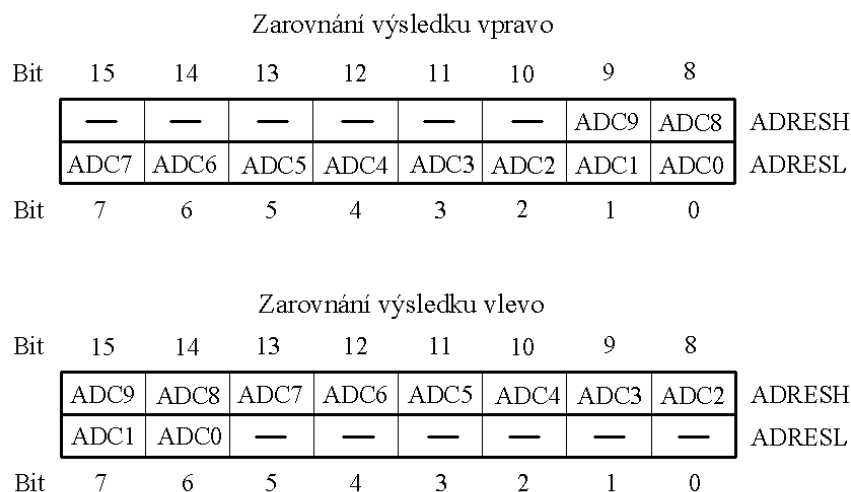


Obr. 11 Paměťový vzorkovač [11]

3.5 A/D převodník v mikroprocesoru

Mikroprocesor PIC obsahuje 10 bitový A/D převodník. Analogový signál je možné přivést na 13 pinů reprezentujících vstup A/D převodníku, kde každý pin samostatně je chráněn diodovým omezovačem. Aby bylo možno převést analogový signál na digitální ekvivalent, je třeba softwarově určit referenci. Zvolením reference se definuje rozsah vstupního napětí. Mikroprocesor PIC umožňuje vybrat interní referenci, která je pro kladnou část vztažena k napájení mikroprocesoru V_{DD} a pro zápornou část vztažena k zemi mikroprocesoru V_{SS} . Další možností je připojení externí reference, která se připojuje na piny V_{REF+} a V_{REF-} . Připojením externí reference se omezí počet pinů pro přivedení analogového signálu na 11. [8]

N-bitová reprezentace vstupního analogového signálu je ukládána do registrů ADRESH a ADRESL. Softwarově je možné vybrat zarovnání výsledku vpravo či vlevo Obr.12.



Obr. 12 Registry ADRESH a ADRESL [8]

Zarovnání výsledku je důležité z hlediska dalšího zpracování, kdy registry ADRESH a ADRESL jsou ve vyšších programovacích jazycích často spojeny do jedné proměnné. Naměřenou n-bitovou hodnotu lze převést na hodnotu vstupního napětí:

$$V_{IN} = \frac{ADRESH:L * V_{REF}}{(2^n - 1)}, \quad (1)$$

kde ADRESH:L je digitální hodnota převedeného napětí, V_{REF} představuje maximální hodnotu vstupního napětí a n je počet bytů A/D převodníku. [8]

4 - Konstrukce

Před podrobnějším pohledem na způsob měření napětí, proudu a odporu je třeba říct několik obecných informací k zapojení. V mém zapojení jsou využity operační zesilovače LM324, které jsou nesymetricky napájeny napětím +5V. Výhodou tohoto zapojení je nižší spotřeba a nutnost pouze jednoho zdroje napětí. Díky napájení operačních zesilovačů napětím +5V a hodnotě maximálního vstupního napětí +3.3V nedochází k ořezávání či zkreslení výstupního napětí operačního zesilovače při přiblížení vstupní hodnoty napájecímu napětí, nebo poklesu napájecího napětí operačního zesilovače.

4.1 RMS

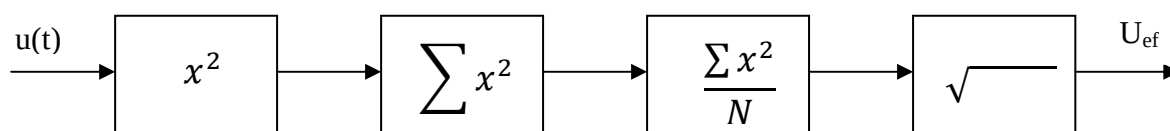
Efektivní hodnota signálu je důležitou charakteristickou hodnotou časového průběhu napětí. Měřením střídavého signálu A/D převodníkem dostaneme posloupnost diskretních číselových hodnot okamžitého průběhu střídavého signálu přivedeného na vstup A/D převodníku. Diskretní signál je možné zpracovávat v oblasti frekvenční a časové. V mém případě je pro výpočet efektivní hodnoty použito zpracování diskretního signálu v časové oblasti. V časové oblasti je výpočet efektivní hodnoty matematicky definován:

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} * \int_0^T u^2(t) dt}, \quad [9] (2)$$

kde T je perioda napětí u(t). Převedením vzorce do diskretního tvaru je integrace nahrazena sumací:

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u_k^2(kT)}, \quad [9] (3)$$

kde N je počet vzorků, u_k je hodnota k-tého vzorku a T je perioda vzorkování. Výpočet lze realizovat jako posloupnost operací druhé mocniny, sumace, dělení počtem vzorků a následné druhé odmocniny Obr. 13. [9]

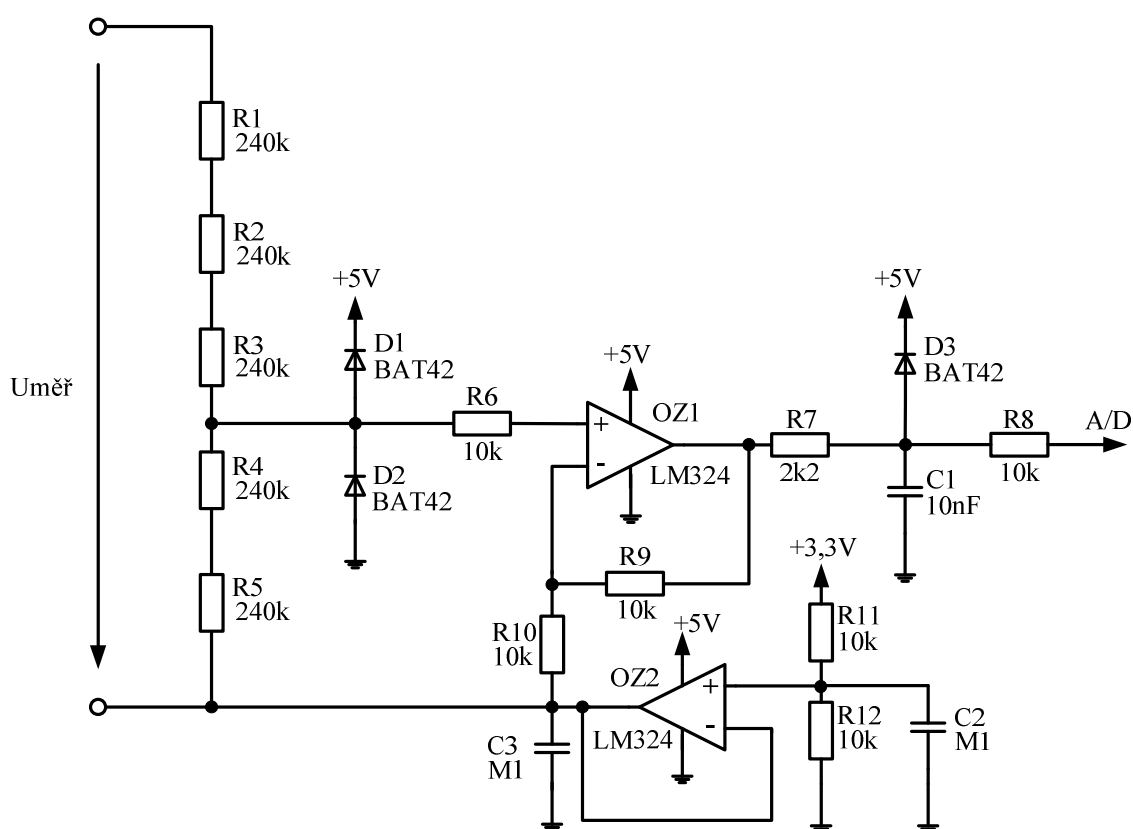


Obr. 13 Blokové schéma výpočtu RMS

4.2 Měření napětí

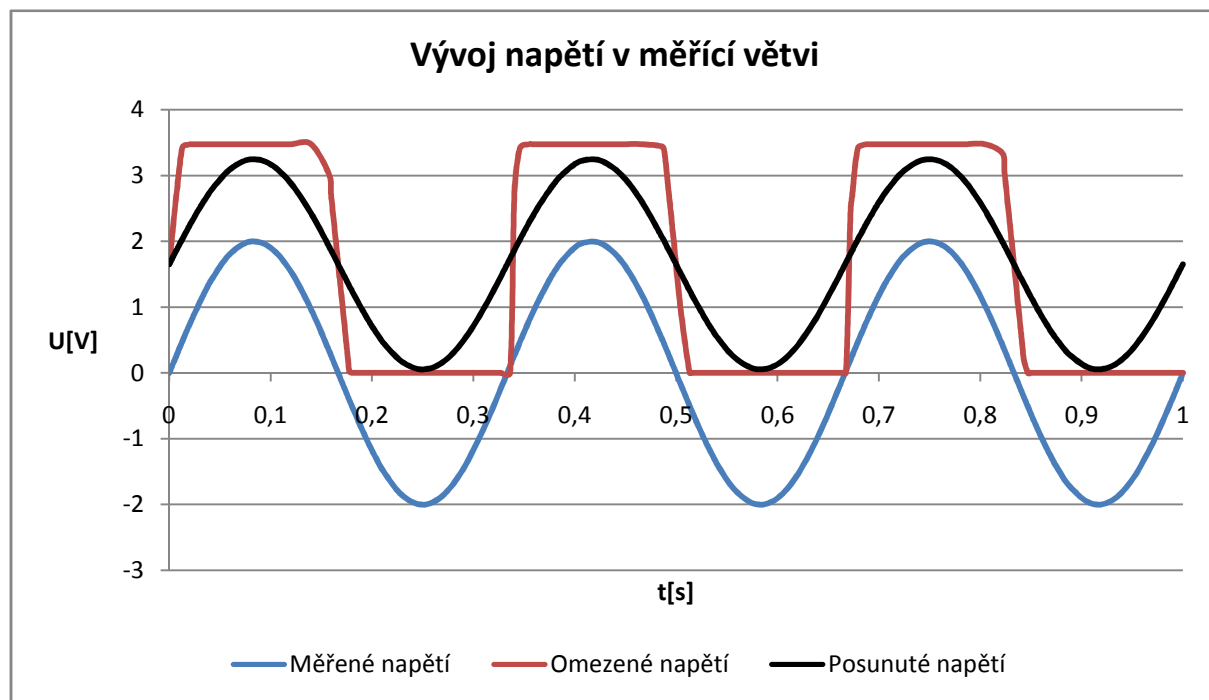
Měřené napětí je nejprve přivedeno na sérii paralelně zapojených napěťových děličů obr.16 snižujících hodnotu měřeného napětí pro rozsahy 400V, 200V a 20V na úroveň 1.65V a u nejnižšího rozsahu 2V na hodnotu 800mV. Na Obr.14 je schéma zapojení měřící větve pro rozsah 2V. Zapojení měřících větví pro rozsahy 400V, 200V a 20V jsou téměř totožná jako zapojení z obr.14 jen rezistory R9, R10 jsou nahrazeny přímou zpětnou vazbou, protože měřené napětí na těchto rozsazích má dostatečnou velikost. Pomocí zapojení z obr.14 je měřeno stejnosměrné i střídavé napětí, a protože A/D převodník měří v rozsahu 0V až +3,3V bylo nutné posunout střídavé napětí obsahující zápornou složku do kladných hodnot. K tomuto posunutí je určen operační zesilovač OZ2 zapojen jako sledovač, který přivádí na dělič napětí +1.65V vytvořené z referenčního napětí A/D převodníku odporovým děličem R11, R12. Střídavé napětí v rozsahu -1.65V až +1.65V je přičítáno k referenci +1.65V. Výsledkem této superpozice je posun střídavého napětí do rozsahu 0V až +3.3V. Toto napětí je přes diodový omezovač přivedeno na operační zesilovač OZ1, který plní funkci impedančního přizpůsobení A/D převodníku a děliče. Protože napětí na rozsahu 2V nemá dostatečnou amplitudu, bylo zde využito neinvertujícího zapojení operačního zesilovače s dvojnásobným zesílením, jehož zpětná vazba není připojena k zemi nýbrž k napětí +1,65V, aby nedocházelo k zesílení stejnosměrného předpětí připojeného na dělič.

Výstupní napětí z operačního zesilovače OZ1 je přes ochrannou diodu D3 a dolní propust tvořenou RC článkem přivedeno na vstup A/D převodníku mikroprocesoru.



Obr. 14 Zapojení části multimetru pro měření napětí

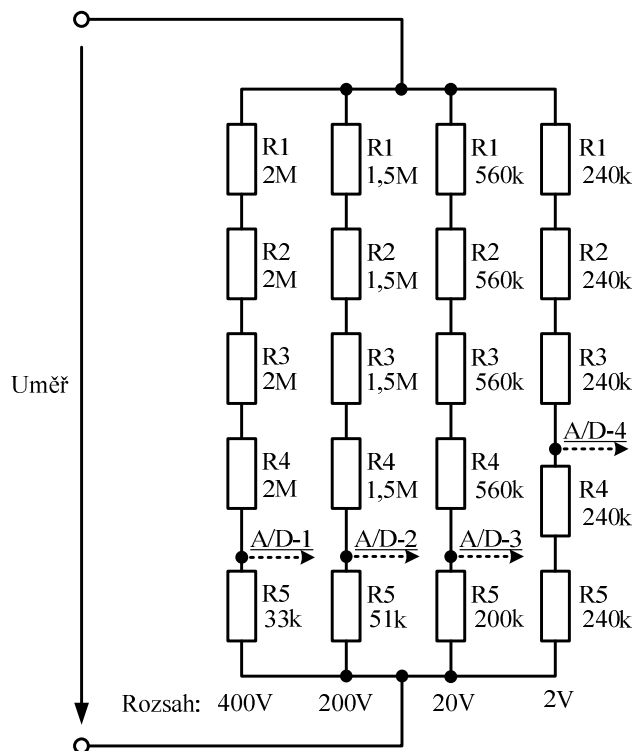
Vývoj napětí v měřicí větvi je zobrazen na Obr. 15. Červený průběh omezeného napětí se využívá ke změně rozsahu. Vždy se začíná měřit od nejnižšího rozsahu, aby mikroprocesor zjistil, zda bylo připojeno měřené napětí. Pokud je připojeno napětí a je zjištěn obdélníkový průběh s maximální hodnotou na vstupu mikroprocesoru, automaticky se přechází na další rozsah. Takto mikroprocesor postupuje dokud napětí přivedené na vstup mikroprocesoru již není ořezáváno. Z průběhů je také patrné posunutí střídavého napětí pomocí předpětí připojeného na dělič.



Obr. 15 Průběhy napětí v měřicí větvi

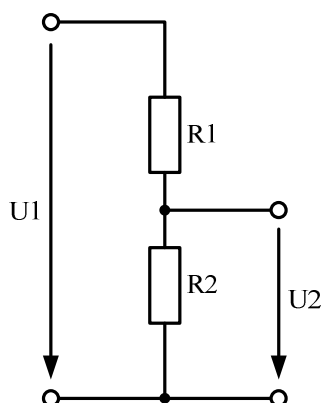
4.2.1 Návrh děliče

Jak bylo řečeno dříve, měřené napětí je nejprve přivedeno na sérii paralelně zapojených napěťových děličů obr.16 snižujících hodnotu měřeného napětí pro rozsahy 400V, 200V a 20V na úroveň 1.65V a u nejnižšího rozsahu 2V na hodnotu 800mV.



Obr. 16 Kaskáda vstupních děličů

Kaskáda děličů z obr.16 je ve své podstatě elementární dělič z obr.17, kde napětí U_2 je dáno vztahem (4).



Obr. 17 Dělič napětí

$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} * U_1 \quad [V] \quad (4)$$

Odpor R_2 je měřicí, hodnota odporu pro nejnižší rozsah 2V byla zvolena $480k\Omega$. Na rozsahu 2V je výstupní napětí děliče $U_2 = 800mV$. Úpravou rovnice (4) dostaneme velikost odporu R_1 :

$$R_1 = \frac{(U_1 - U_2) \cdot R_2}{U_2} = \frac{(2 - 0.8) \cdot 480k\Omega}{0.8} = 720k\Omega \quad (5)$$

Děliče pro rozsahy 400V, 200V a 20V jsou paralelně připojeny k počítanému děliči rozsahu 2V Obr. 16. Musíme tedy každý dělič nadimenzovat na maximální rozsah 400V. Dimenzováním je v tomto případě myšleno dodržení nejvyššího dovoleného napětí na rezistor. V zapojení jsou použity rezistory v pouzdru smd, jejichž nejvyšší dovolené napětí je 200V. Pokud bychom na vstup děliče z obr.17 připojili napětí 400V, na rezistoru R_1 by vznikl úbytek 240V a na rezistoru R_2 úbytek 160V. Z toho důvodu není dělič složen ze dvou rezistorů nýbrž z pěti, kde je zaručeno nepřekročení maximálního dovoleného napětí na rezistor.

Při měření napětí jsou výkonově nejvíce zatíženy rezistory na rozsahu 2V. Ztrátový výkon P_R na žádném z rezistoru rozsahu 2V nesmí přesáhnout maximální výkonové zatížení rezistoru. Na rezistorech v pouzdru smd použitých v zapojení je maximální dovolené výkonové zatížení rovno 250mW. Ztrátový výkon rezistoru je dán vztahem:

$$P_R = \frac{U_R^2}{R} [W], \quad [2] (6)$$

kde napětí U_R je napětí na rezistoru. Nejvyšší výkonové zatížení vznikne při měření napětí 400V. Protože jsou všechny hodnoty odporů rezistorů v děliči pro rozsah 2V stejné obr.16, můžeme napětí U_R vyjádřit vztahem:

$$U_R = \frac{U_{m\ddot{e}r}}{5} = \frac{400}{5} = 80V \quad (7)$$

Dosazením vypočtené hodnoty U_R do rovnice (6) vychází výkonové zatížení rezistoru:

$$P_R = \frac{U_R^2}{R} = \frac{80^2}{240000} = 26,67mW \quad (8)$$

Je zřejmé, že není-li překročeno maximální dovolené výkonové zatížení P_R na žádném rezistoru rozsahu 2V, kde jsou nejnižší hodnoty odporu, nemůže být maximální dovolené výkonové zatížení překročeno na žádném rezistoru vyšších rozsahů.

Jedním z důležitých parametřů voltmetrů je vstupní odpor. V mém případě se jedná o celkový odpor děliče z obr.16. Pro výpočet vstupního odporu je třeba znát odpor jednotlivých rozsahů:

$$R_{400V} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 = 2M\Omega + 2M\Omega + 2M\Omega + 2M\Omega + 33K\Omega = 8.033 M\Omega \quad (9)$$

$$R_{200V} = R_6 + R_7 + R_8 + R_9 + R_{10} = 1.5M\Omega + 1.5M\Omega + 1.5M\Omega + 1.5M\Omega + 35K\Omega = 6.051 M\Omega \quad (10)$$

$$R_{20V} = R_{11} + R_{12} + R_{13} + R_{14} + R_{15} = 560K\Omega + 560K\Omega + 560K\Omega + 560K\Omega + 560K\Omega = 2.4M\Omega \quad (11)$$

$$R_{2V} = R_{16} + R_{17} + R_{18} + R_{19} + R_{20} = 240K\Omega + 240K\Omega + 240K\Omega + 240K\Omega + 240K\Omega = 1.2M\Omega \quad (12)$$

Celkový odpor zapojení z obr.16 je možné počítat, jako součet vodivostí jednotlivých rozsahů:

$$G_{IN} = \frac{1}{R_{400V}} + \frac{1}{R_{200V}} + \frac{1}{R_{20V}} + \frac{1}{R_{2V}} = \frac{1}{8.033M\Omega} + \frac{1}{6.051M\Omega} + \frac{1}{2.4M\Omega} + \frac{1}{1.2M\Omega} = 1.53\mu S \quad (13)$$

Přepočtením vodivosti na odpor je celkový odpor zapojení z obr.16:

$$R_{IN} = \frac{1}{G_{IN}} = \frac{1}{1.539 \cdot 10^{-6}} = \underline{\underline{649.45k\Omega}} \quad (14)$$

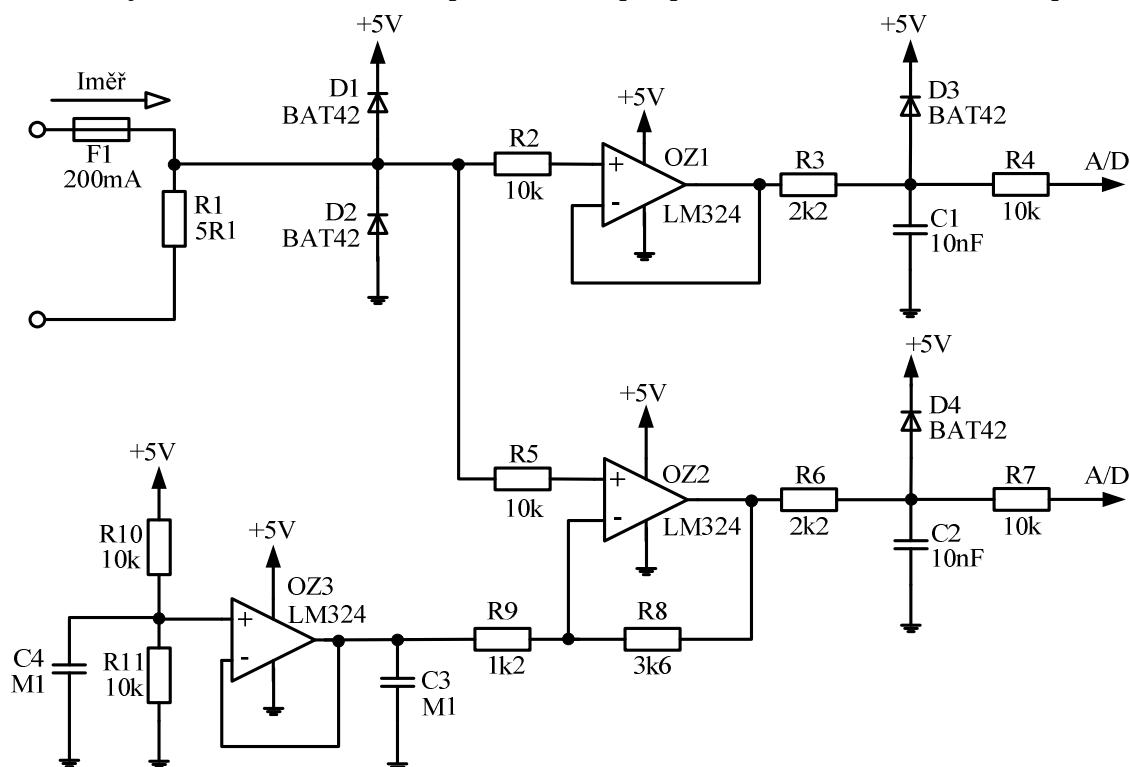
Vstupní odpor voltmetru by měl být v řádech megaohmů, v ideálním případě by se měl blížit nekonečnu. Velikost vstupního odporu 649kΩ je pro voltmetr velice špatná. Na velikosti odporu se nepříznivě projevilo paralelní zapojení vstupních děličů. Odpor by šel zvýšit navýšením hodnot odporů v jednotlivých děličích, při použití operačních zesilovačů s velice malým vstupním proudem. Velice dobré hodnoty vstupního odporu by šlo docílit připojováním jednotlivých děličů pomocí relátek. Nevýhodou tohoto provedení je vysoká spotřeba a navýšení rozměrů desky plošných spojů.

4.3 Měření proudu

Princip měření proudu vychází z Ohmova zákona. Budeme-li vycházet ze známé velikosti odporu měřicího rezistoru a napětí na tomto rezistoru měřený proud bude roven:

$$I = \frac{U_R}{R} \quad [\text{A}] \quad (15)$$

Proud je měřen nepřímou metodou. Měřený proud o maximální hodnotě 200mA je přiveden na přesný rezistor R1 obr.18, na kterém díky průchodu proudu vzniká úbytek napětí U_R . Toto napětí je následně měřeno pomocí A/D převodníku. Pomocí zapojení z obr.18 je měřen stejnosměrný i střídavý proud. Je tedy zřejmé, že při měření střídavého proudu vznikne na rezistoru R1 střídavé napětí obsahující zápornou složku. Protože A/D převodník měří v rozsahu 0V až 3,3V je třeba střídavé napětí posunout do kladných hodnot. K tomuto posunutí je určen operační zesilovač OZ3 zapojen jako sledovač, který přivádí na rezistor R1 napětí +1.65V vytvořené z referenčního napětí A/D převodníku odporovým děličem R10, R11. Střídavé napětí vzniklé na rezistoru R1 je přičítáno k referenčnímu napětí +1,65V. Výsledkem této superpozice je posunutí střídavého napětí do rozsahu 0V až +3.3V. Toto napětí je přes diodový omezovač tvořený diodami D1, D2 přivedeno na operační zesilovače OZ1 a OZ2. Operační zesilovač OZ1 zapojen jako sledovač je určen pro měření proudu v rozsahu 50mA až 200mA, kde není třeba zesílení amplitudy napětí vzniklého průchodem měřeného proudu rezistorem R1. V případě připojení nižšího proudu než je hodnota 50mA je pro měření využit operační zesilovač OZ2, na kterém je pomocí odporů R8 a R9 nastaveno dvojnásobné zesílení. Výstupní napětí z operačních zesilovačů OZ1 a OZ2 je přivedeno přes ochrannou diodu a dolní propust tvořenou RC článkem na vstup A/D převodníku mikroprocesoru. Tak jako v měření napětí, tak i v měření proudu, operační zesilovače plní funkci nejen zesílení, ale i impedančního přizpůsobení bočníku a A/D převodníku.



Obr. 18 Zapojení části multimetru pro měření proudu

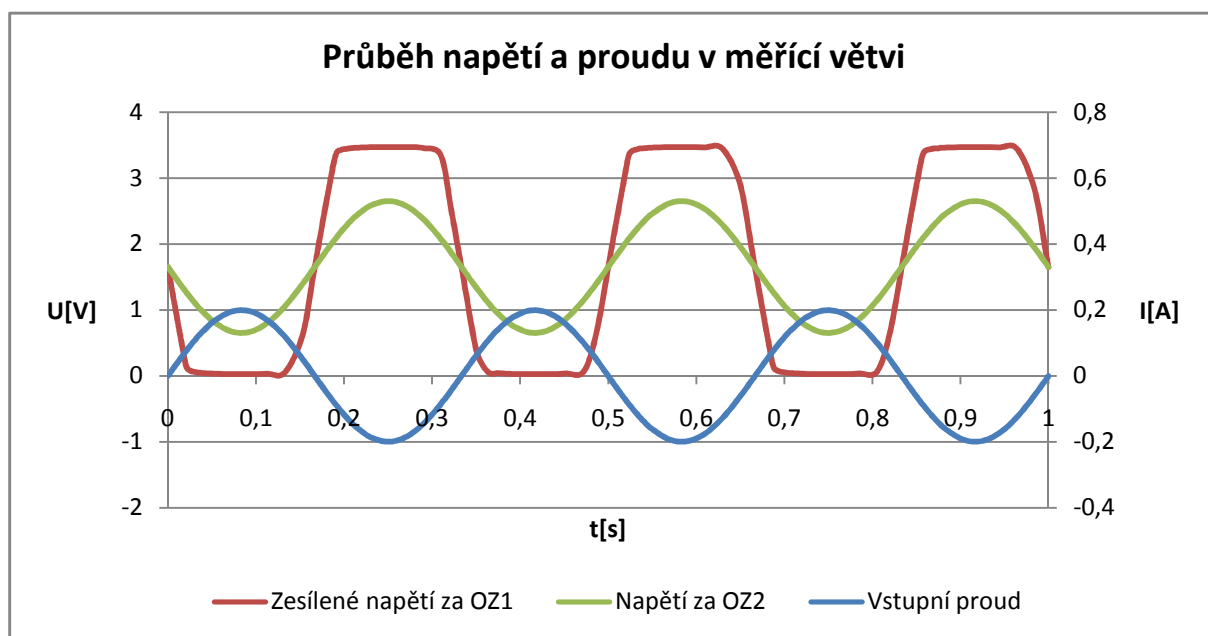
Hodnota měřicího rezistoru by měla být co nejnižší, aby měřící obvod co nejméně ovlivňoval měřenou část. Proto jsem zvolil měřící rezistor o odporu $5,1\Omega$, na kterém bude maximální úbytek napětí:

$$U_{max} = R * I = 5,1 * 0,2 = 1,02V \quad (16)$$

Dále bylo zapotřebí zvolit velikost pouzdra měřicího rezistoru. Velikost pouzdra rezistoru je závislá na výkonovém zatížení, které na rezistoru o odporu $5,1\Omega$ činí:

$$P = \frac{U_{max}^2}{R} = \frac{1,02^2}{5,1} = 204 \text{ mW} \quad (17)$$

Při výkonovém zatížení $P = 204\text{mW}$ byl zvolen rezistor smd o velikosti pouzdra R1206 jehož maximální dovolené výkonové zatížení je rovno 250mW .



Obr. 19 Průběhy proudu v měřící větvi

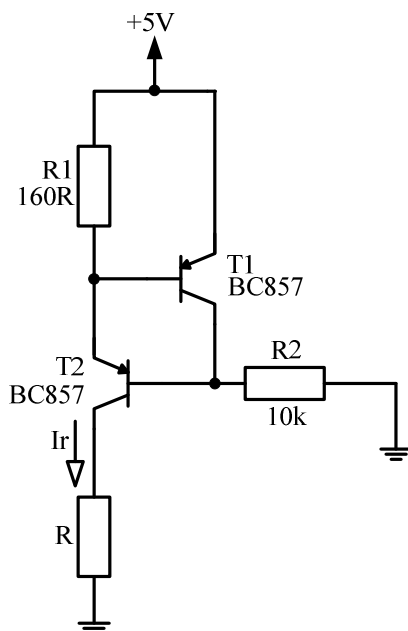
Z průběhů na Obr. 19 je patrný převod modře znázorněného měřeného proudu na napětí posunuté pomocí předpětí připojeného na rezistor R1. Měření proudu vždy začíná na rozsahu 0 až 50mA , aby mikroprocesor zjistil, zda byl připojen měřený proud. Pokud mikroprocesor zjistí obdélníkový průběh napětí na rozsahu 0 až 50mA zobrazený červeně přechází na rozsah 50mA až 200mA . Pokud je amplituda napětí na rozsahu 50mA až 200mA příliš malá, opět se přechází na nižší rozsah.

4.4 Měření odporu

Měření odporu rezistoru se provádí nepřímou metodou. Budeme-li vycházet ze znalosti proudu tekoucího rezistorem a měřit napětí na tomto rezistoru, lze pomocí vztahu (18) vypočítat velikost odporu.

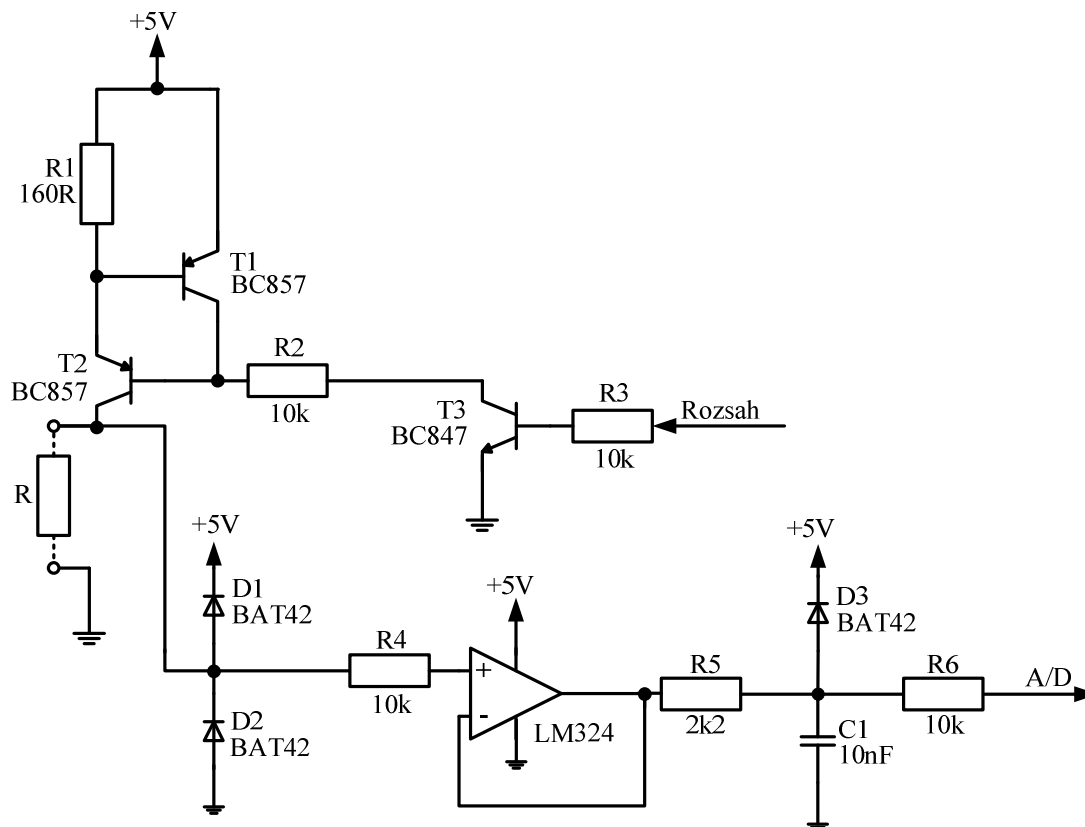
$$R = \frac{U_R}{I_R} \quad [\Omega] \quad (18)$$

Proud I_R dané velikosti získáme pomocí proudového zdroje z Obr.20. Velikost proudu I_R je regulována pomocí tranzistoru T2. V případě připojení rezistoru o malé hodnotě odporu se tranzistor T2 přivře a tím omezí velikost jím protékaného proudu I_R . Naopak je-li připojen rezistor o vyšší hodnotě odporu, tranzistor T2 je otevírán. Zda má být tranzistor T2 otevírán nebo přivírán, řídí úbytek na rezistoru R1. Odporem R1 teče přibližně stejný proud jako proud I_R tekoucí do měřeného rezistoru R. Tedy dojde-li ke zvýšení proudu I_R vlivem měření rezistoru o malé hodnotě odporu, dojde i k navýšení proudu tekoucího rezistorem R1. Díky tomu na rezistoru R1 dochází k zvýšení úbytku napětí, které více otevře tranzistor T1 čímž začne do rezistoru R2 téct větší proud. Navýšením proudu tekoucím rezistorem R2 dochází k zvýšení napětí na bázi tranzistoru T2, čímž dochází ke snížení napětí U_{BE} tranzistoru T2 a tedy i k přivření tohoto tranzistoru. Naopak dojde-li k poklesu proudu I_R vlivem měření rezistoru o velké hodnotě odporu, dojde i k poklesu proudu tekoucího rezistorem R1. Tento pokles zapříčiní snížení úbytku napětí na rezistoru R1 čímž se tranzistor T1 přivře a omezí proud tekoucí do odporu R2. Snížením proudu rezistorem R2 dojde k poklesu napětí báze tranzistoru T2, což má za následek zvýšení napětí U_{BE} tohoto tranzistoru a tedy i jeho otevření. Všechny popsané změny se dějí v řádech setin až tisícín, díky tomu je zaručena stálost proudu I_R .



Obr. 20 Proudový zdroj

Při návrhu zdroje z Obr. 20 se vychází z rozsahu měření odporu. Tento rozsah byl zvolen 1Ω až $1\text{M}\Omega$. Měření odporu s rozsahem jdoucím přes několik dekád by s jedním proudovým zdrojem nebylo možné, proto bylo nutné celkový rozsah rozdělit po dekádě na dílčí rozsahy (1Ω - 100Ω , 100Ω - $1\text{k}\Omega$, $1\text{k}\Omega$ - $10\text{k}\Omega$, $10\text{k}\Omega$ - $100\text{k}\Omega$, $100\text{k}\Omega$ - $1\text{M}\Omega$) mající vlastní proudový zdroj, který se připojuje tranzistorem T3 přivedení +5V na rezistor R3.



Obr. 21 Zapojení části multimetru pro měření odporu

Nyní když víme, jaká bude hodnota odporů na daném podrozsahu, je možné přistoupit k návrhu rezistoru R1. Pro výpočet hodnoty odporu musíme znát napětí na rezistoru a proud jím tekoucí. Jak bylo řečeno dříve proud tekoucí rezistorem R1 je téměř roven proudu tekoucím měřeným rezistorem $R_{\text{měř}}$. Proud I_R pro podrozsahu 100Ω až $1\text{k}\Omega$ je roven:

$$I_R = \frac{U_{A/D(\text{max})}}{R} = \frac{3.3}{1000} = 3.3\text{mA} , \quad (19)$$

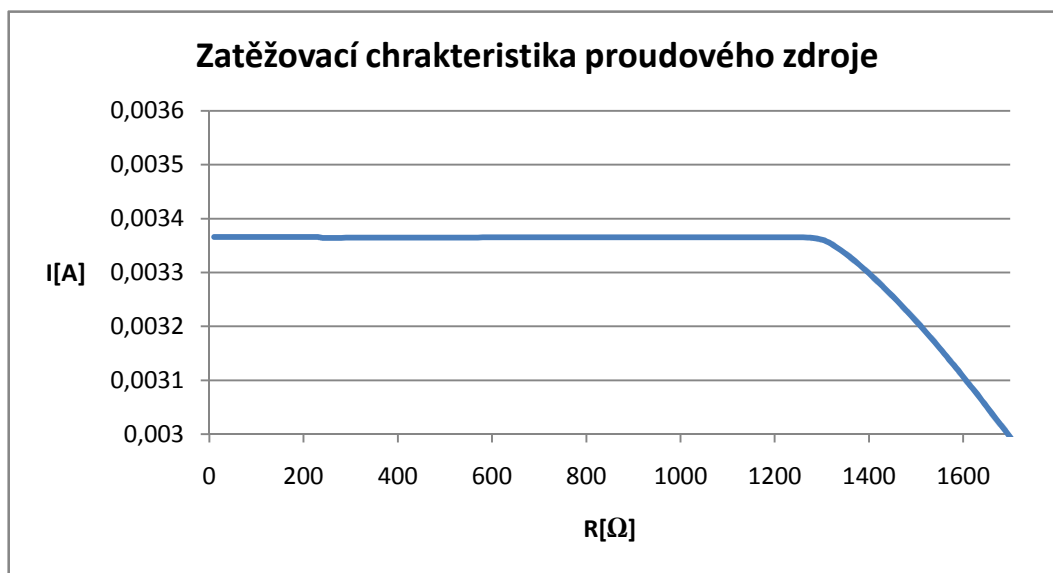
kde napětí $U_{A/D(\text{max})}$ je maximální změřitelné napětí A/D převodníkem na měřeném rezistoru $R_{\text{měř}}$ a R je maximální odpor na daném podrozsahu. Napětí U_{BE} tranzistoru T1 by mělo být 0.5V . Tento úbytek musíme docílit na rezistoru R1 při proudu I_R :

$$R1 = \frac{U_R}{I_R} = \frac{0.5}{0.0033} = 151.5\Omega \quad (20)$$

Protože proud I_R je ve skutečnosti nepatrně vyšší než proud tekoucí odporem R_1 , volíme hodnotu odporu rezistoru R_1 z řady E12 rovnu 160Ω . Výpočty hodnot rezistorů pro další podrozsahy jsou shodné jako předvedený výpočet pro podrozsah 100Ω až $1k\Omega$.

Celkové zapojení jedné měřicí větve je na Obr. 21. Napětí vzniklé průchodem proudu I_R měřeným rezistorem $R_{m\check{r}}$ je přes diodový omezovač D_1 , D_2 přivedeno na operační zesilovač zapojen jako sledovač. Operační zesilovač plní funkci impedančního přizpůsobení měřeného odporu a A/D převodníku. Výstupní napětí operačního zesilovače je přes ochrannou diodu a RC článek tvořící dolní propust přivedeno na vstup A/D převodníku. Jednotlivé proudové zdroje jsou propojeny kolektory tranzistorů T_2 a připínány tranzistorem T_3 .

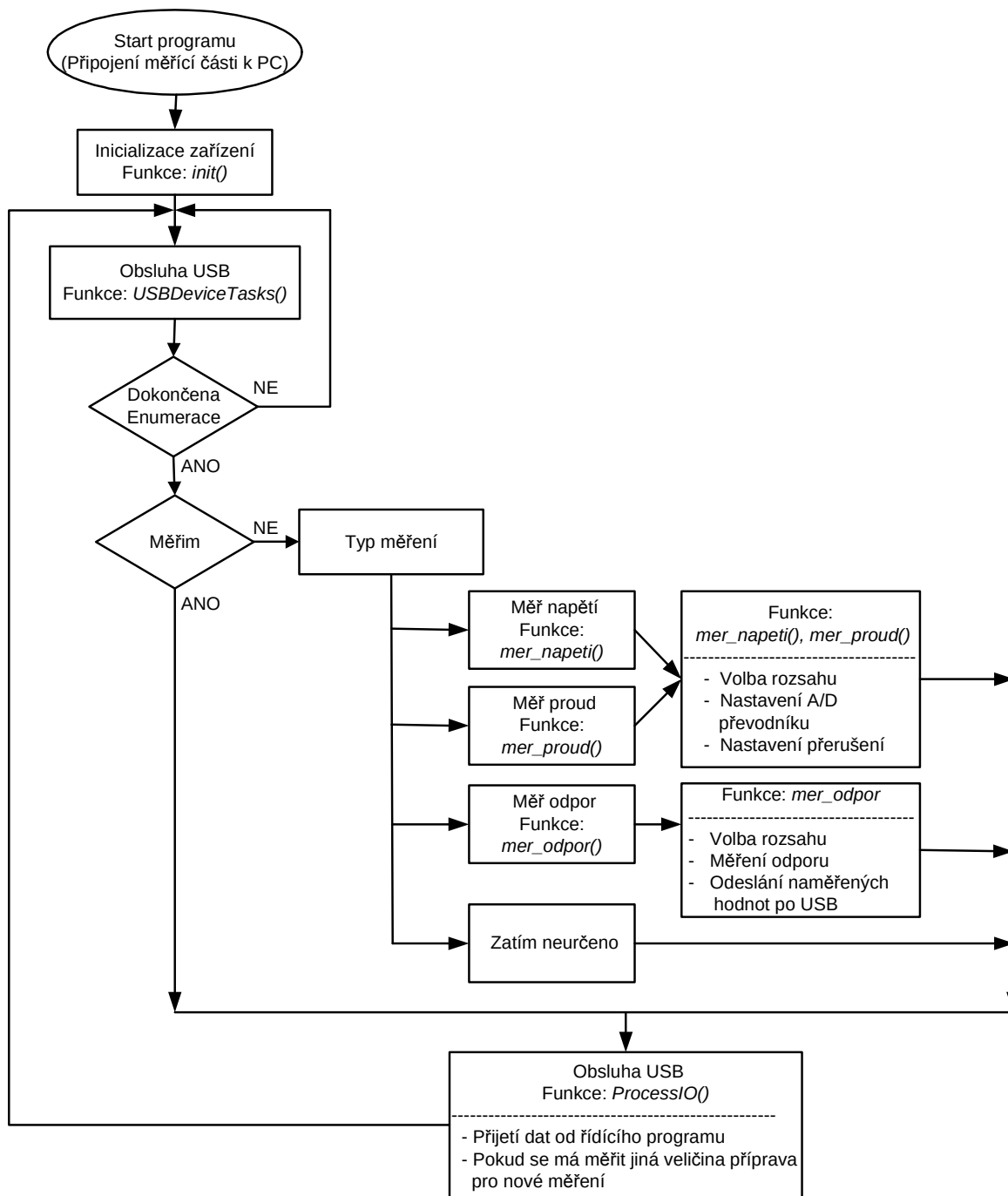
Zatěžovací charakteristika proudového zdroje pro podrozsah 100Ω až $1k\Omega$ je na Obr. 22. Z charakteristiky je patrná stálost měřicího proudu I_R pro daný podrozsah i pro hodnoty odporů ležící v blízkém okolí podrozsahu. Této skutečnosti je využito pro měření a vhodnou volbu měřicího rozsahu, pro hodnoty odporů na mezích podrozsahů.



Obr. 22 Závislost proudu na odporu měřeného rezistoru pro rozsah 100Ω až $1k\Omega$

5 - Program mikroprocesoru

Program mikroprocesoru vznikl na základě šablony USB komunikace poskytované firmou Microchip pro rychlejší implementaci USB sběrnice do zařízení využívající mikroprocesory PIC. Díky tomu jediná změna provedená v odladěné USB komunikaci, bylo nadefinování externího USB transceiveru. Vývojový diagram navrženého programu je na obr. 23. Běh programu začíná po přivedení napájecího napětí na mikroprocesor, tedy připojením měřicí části k PC.



Obr. 23 Vývojový diagram mikroprocesoru

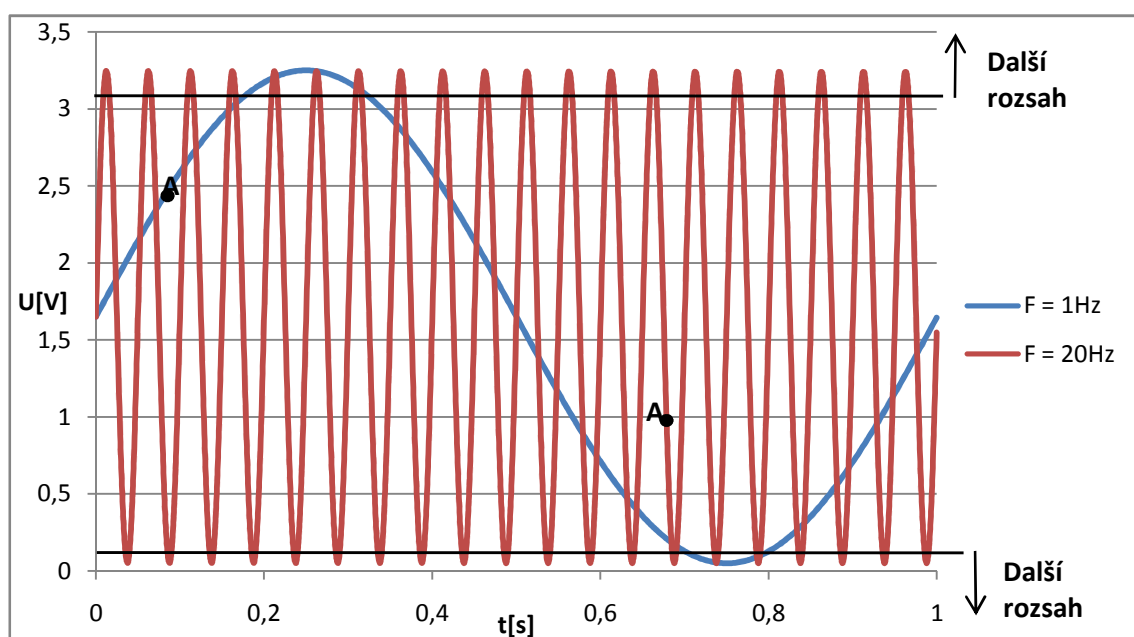
5.1 Popis funkcí

Funkce *init()*: Funkce je volána jedinkrát po spuštění programu. Úkolem této funkce je provést inicializace používaných periférií. Jedná se o nastavení Timeru1, Portů a Přerušení.

Funkce *USBDeviceTasks()*: Tato funkce je převzata z šablony programu USB komunikace poskytované firmou Microchip. Funkce je základem USB komunikace a měla by být volána v krátkých časových intervalech pro obsluhu dění na sběrnici. Funkce se také stará o enumeraci. V případě enumerace by měla být funkce volána v intervalech nepřesahujících 100uS. Z tohoto důvodu se čeká na dokončení enumerace, než je přistoupeno k samotnému měření napětí proudu či odporu.

Funkce *mer_napeti()*, *mer_proud()*: Obě funkce plní principiálně stejný úkol, proto jejich struktura bude popsána dohromady. Výběr, která z funkcí bude volána, je na základě informace přijaté od řídicího programu. Úkolem funkcí je nastavit A/D převodník, zjistit rozsah měření a zahájit samotné měření.

Nejprve je třeba určit rozsah, na kterém se bude měření provádět. Výběr je vždy prováděn od nejnižšího rozsahu. Nejprve se vezme vzorek z měřeného signálu a porovná se s konstantami, které určují přechod na další rozsah obr.24. Je-li vzorek signálu větší nebo menší než zmíněné konstanty přechází se na další rozsah. Tento proces se opakuje, dokud vzorek signálu není v rozmezí konstant, které určují přechod na další rozsah. Popsaná metoda volby rozsahu je spolehlivá pro stejnosměrný signál. Napětí a proud ale mohou mít charakter střídavého signálu, při kterém výše popsaná metoda selhává. Tyto chyby vznikají tím, že vzorek signálu může být pořízen v době, kdy část měřeného signálu vyhovuje danému rozsahu obr. 24 (body A) i když signál jako celek do daného rozsahu nepatří. Z tohoto důvodu je při vlastním měření každý z 2500 vzorků testován, zda patří do daného rozsahu. V případě zjištění že daný vzorek překračuje meze rozsahu, přechází se na další rozsah a je započato měření nových 2500 vzorků.



Obr. 24 Výběr rozsahu na základě informací o signálu

Po zvolení rozsahu je započato vlastní měření. Jak již bylo zmíněno napětí a proud mohou mít charakter stejnosměrného nebo střídavého signálu, proto jejich vzorkování musí probíhat s periodou splňující Nyquistův teorém:

$$T_m \leq 2 * T_s , \quad (21)$$

kde T_s je perioda měřeného signálu a T_m je perioda vzorkování. Obecně je doporučeno zvolit vzorkovací periodu alespoň dvaapůlkrát menší než je perioda měřeného signálu. Proto byla pro měření signálu o maximální frekvenci 1kHz zvolena vzorkovací frekvenci 2,5kHz, kde perioda vzorků je:

$$T = \frac{1}{f_m} = \frac{1}{2500} = 0,4mS \quad (22)$$

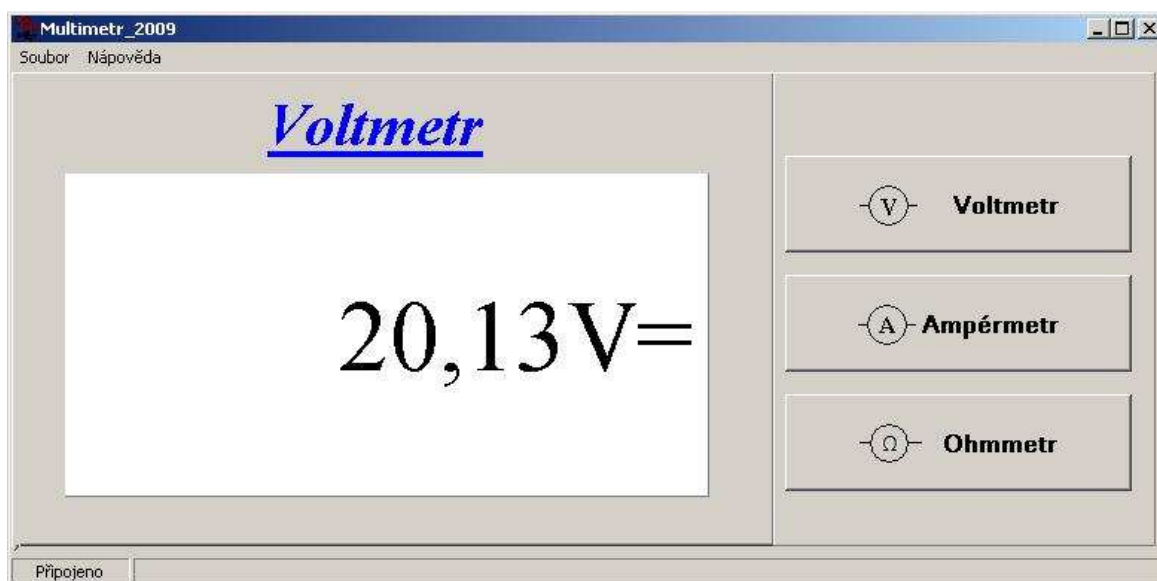
Aby byl signál vzorkován s periodou T , je měření prováděno pomocí přerušení od Timeru1, které je vyvoláno každé 0,4mS. Po vyvolání přerušení je zahájen převod pomocí A/D převodníku. Po dokončení převodu vyvolá A/D převodník přerušení, ve kterém je naměřená hodnota uložena. Naměřené hodnoty se střídavě ukládají do dvou 50 bytových polí. Po naplnění prvního pole jsou naměřené hodnoty ukládány do druhého pole zatím, co první pole hodnot, je odesíláno řídicímu programu. Tento proces se opakuje, dokud není naměřeno a odesláno všech 2500 vzorků.

Funkce *mer_odpor()*: Funkce je určena k měření odporu. Odpor je měřen od nejvyššího rozsahu, kde je nejnižší měřicí proud. Tedy při měření odporu, jehož hodnota nespadá do rozsahu, bude velikost napětí vzniklého průchodem měřicího proudu měřeným odporem malá. Velikost vzniklého napětí je porovnávána s konstantou určující rozsah. Pokud napětí nemá dostatečnou velikost, přechází se na nižší rozsah. Takto se postupuje, dokud není nalezen správný rozsah měření. Po nalezení rozsahu je naměřeno a odesláno 25 hodnot, které jsou v řídicím programu přepočteny na odpor.

Funkce *ProcessIO()*: Funkce obstarává příjem dat od řídicího programu, která obsahují informaci, zda se má měřit napětí proud či odpor. Po přijetí dat se vyhodnocuje, jestli má být měřena stejná veličina, která byla měřena doposud. Pokud nemá být měřena stejná veličina, funkce nastaví konstanty pro nové měření.

6 - Řídící program

Řídící program, který byl vytvořen v C++Builderu je součástí uživatelského rozhraní obr.25, které slouží pro ovládání měřicí části a k zobrazení naměřených hodnot. Jediným úkolem uživatele rozhraní je vybrat, která z veličin bude měřena. O volbu formátu zobrazení a následné zobrazení naměřených hodnot se stará řídící program sám. Hlavním úkolem řídícího programu je příjem paketů obsahující naměřená data a následné vypočtení a zobrazení efektivních hodnot napětí nebo proudu či velikosti odporu měřeného rezistoru. Výpočet efektivní hodnoty napětí nebo proudu je pomocí RMS.



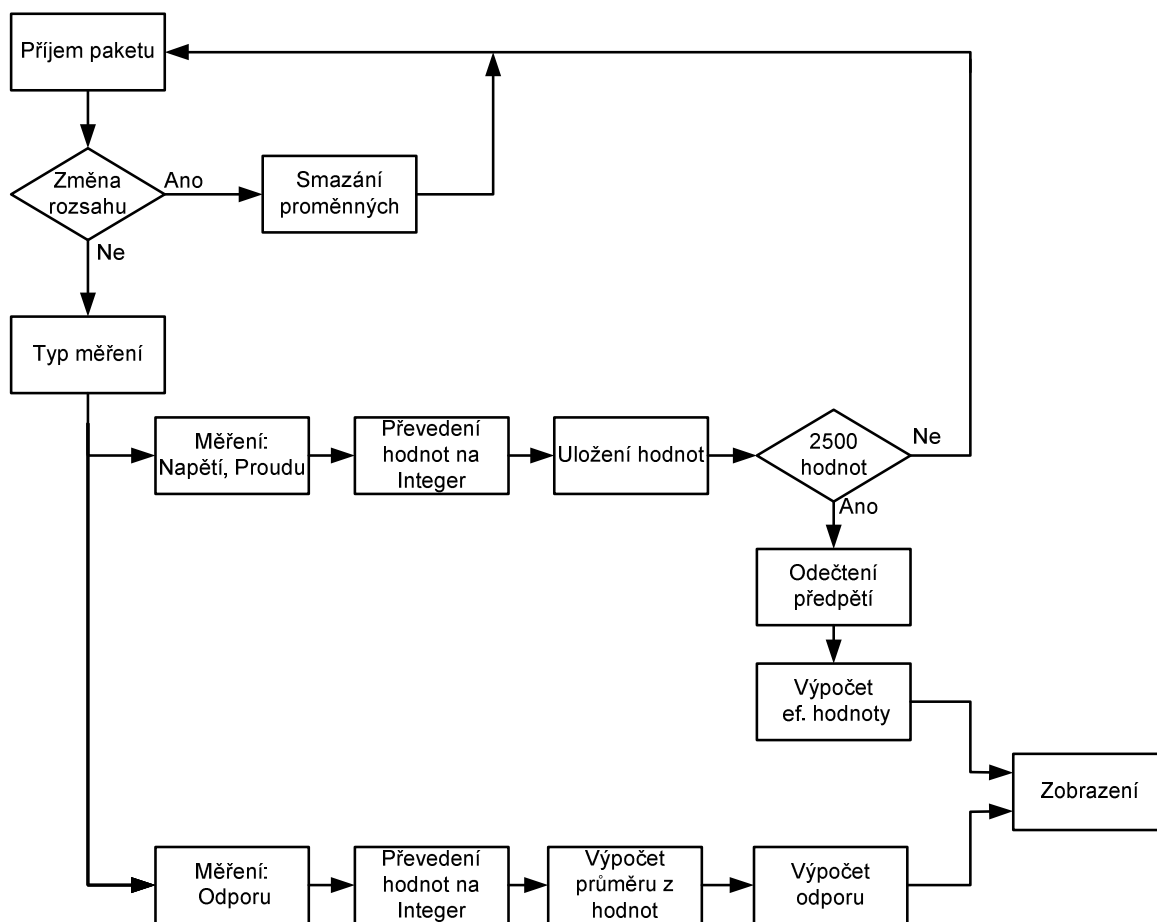
Obr. 25 Uživatelské rozhraní

6.1 Zpracování paketů

Řídící program zasílá mikroprocesoru informaci, zda má měřit napětí proud nebo odpor. Mikroprocesor po obdržení této informace, začíná danou veličinu měřit a zasílá naměřená data řídícímu programu.

Mikroprocesor při měření napětí a proudu zasílá 2500 hodnot rozdělených do paketů o velikosti 52 byte, které obsahují 50 byte dat 1 byte určující typ paketu a 1 byte určující rozsah měření. Jedna naměřená hodnota má velikost dvou bytů tedy v jednom paketu je přeneseno 25 hodnot. Jak je patrné z vývojového diagramu obr.26 po přijetí paketu je nejprve zjištěno, zda nastala změna rozsahu. Pokud nastala změna rozsahu, dojde ke smazání proměnných a započne příjem nových 2500 hodnot. Pokud změna rozsahu nenastala, jsou naměřené dvoubytové hodnoty převedeny na číslo typu integer. Tento postup se opakuje, dokud není přijato všech 2500 hodnot. Po přijetí všech hodnot je odečteno předpětí a metodou RMS je vypočtena a zobrazena efektivní hodnota napětí nebo proudu.

Při měření odporu zasílá mikroprocesor řídícímu programu 25 hodnot v jednom paketu, který má stejný formát, jako paket při měření napětí nebo proudu. Po přijetí paketu jsou naměřené dvoubytové hodnoty převedeny na číslo typu integer. Z těchto hodnot se vypočte a zobrazí naměřená hodnota odporu.

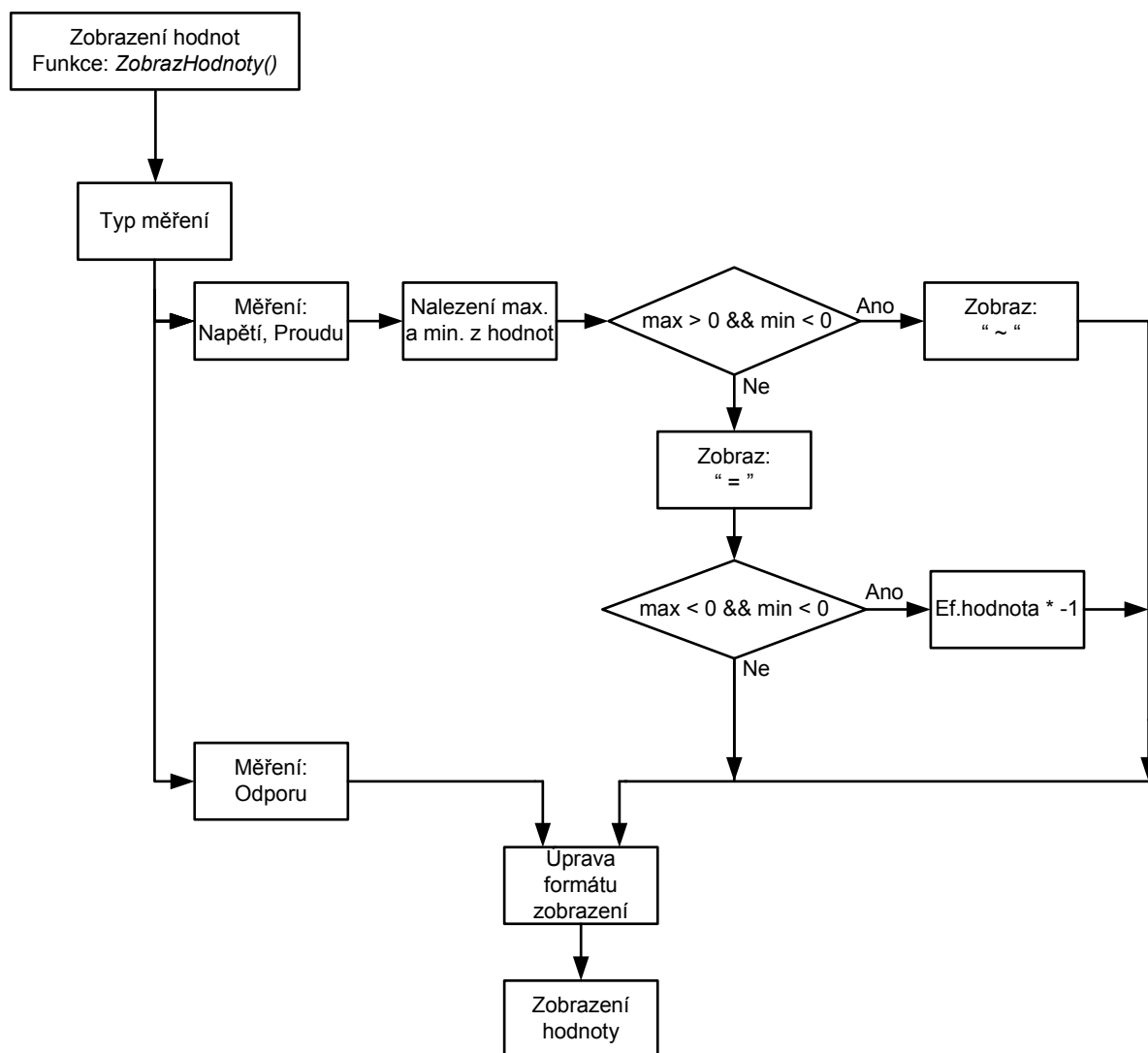


Obr. 26 Vývojový diagram řídicího programu

6.2 Zobrazení hodnot

Postup při zobrazování naměřené hodnoty je zřejmý z vývojového diagramu na obr.27. Po zavolání funkce *ZobrazHodnoty()* je při měření napětí a proudu nalezeno maximum a minimum ze vzorků signálů, od kterých bylo odečteno předpětí. Podle nalezené maximální a minimální hodnoty se určuje, zda se jedná o signál stejnosměrný nebo střídavý. Pokud je maximální hodnota větší než nula a minimální hodnota menší než nula jedná se o signál střídavý a je zobrazen symbol střídavého signálu „~“. Pokud tomu tak není jedná se o signál stejnosměrný a je zobrazen symbol stejnosměrného signálu „=“. Je-li signál stejnosměrný, musí se dále určit jeho polarita. Pokud je maximální a minimální hodnota signálu menší než nula, jedná se o záporný signál a vypočtená efektivní hodnota je vynásobena mínus jedničkou. Ještě před zobrazením hodnoty na displej dochází k úpravě formátu zobrazení. Po této úpravě je naměřená hodnota zobrazena.

Při měření odporu je proces zobrazení mnohem jednodušší. Před zobrazením hodnoty odporu na displej se pouze upraví formát dat a zobrazí se.



Obr. 27 Postup zobrazení hodnot

7 - Kontrolní měření

Kontrolní měření multimetru bylo provedeno pomocí přesného multimetru Instek GDU-8246. Bylo provedeno měření napětí a proudu jdoucí přes všechny rozsahy jak pro stejnosměrný tak pro střídavý signál. Dále byla odměřena frekvenční závislost multimetru při měření sinusového, obdélníkového a trojúhelníkového signálu. Veškerá naměřená data jsou uvedena níže v tabulkách.

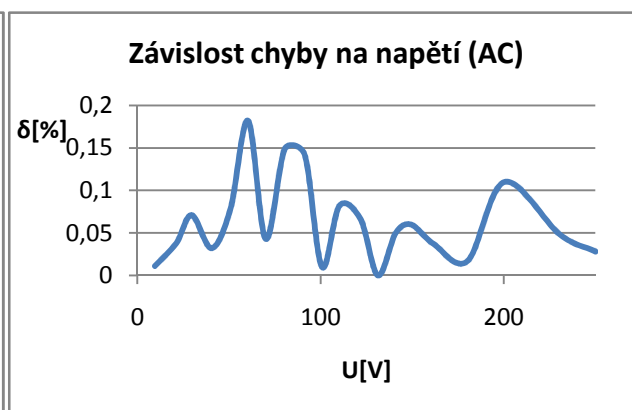
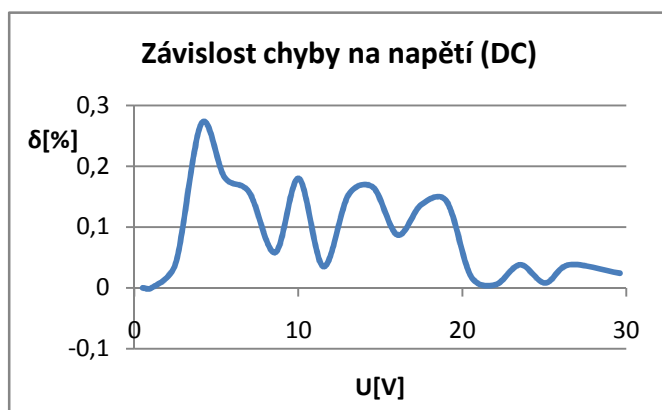
Stejnosemné napětí:

GDU [V]	Multimetr [V]	δ [%]
0,501	0,501	0
1,047	1,047	0
2,512	2,511	0,040
4,080	4,069	0,270
5,494	5,484	0,182
7,001	6,990	0,157
8,583	8,588	0,058
10,016	9,998	0,180
11,518	11,514	0,035
13,057	13,077	0,153
14,570	14,594	0,165
16,046	16,060	0,087
17,506	17,530	0,137
19,052	19,079	0,142
20,525	20,529	0,019
22,011	22,017	0,005
23,533	23,524	0,038
25,048	25,050	0,008
26,540	26,550	0,038
29,613	29,606	0,024

Střídavé napětí:

$f = 50\text{Hz}$ průběh sinus:

GDU [V]	Multimetr V	δ [%]
9,504	9,503	0,011
21,172	21,180	0,038
29,609	29,630	0,071
40,563	40,550	0,032
50,83	50,79	0,079
60,42	60,53	0,182
70,03	70,00	0,043
80,44	80,56	0,149
91,30	91,43	0,142
100,70	100,71	0,010
110,30	110,39	0,082
121,83	121,91	0,066
131,27	131,27	0
141,00	141,07	0,050
149,31	149,40	0,060
161,72	161,78	0,037
180,20	180,23	0,017
200,40	200,18	0,110
230,71	230,82	0,048
250,13	250,20	0,028



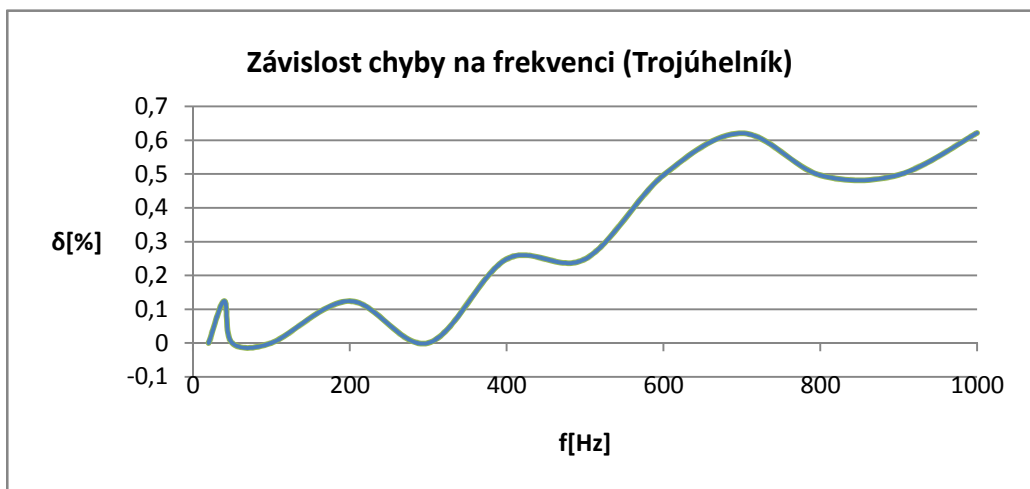
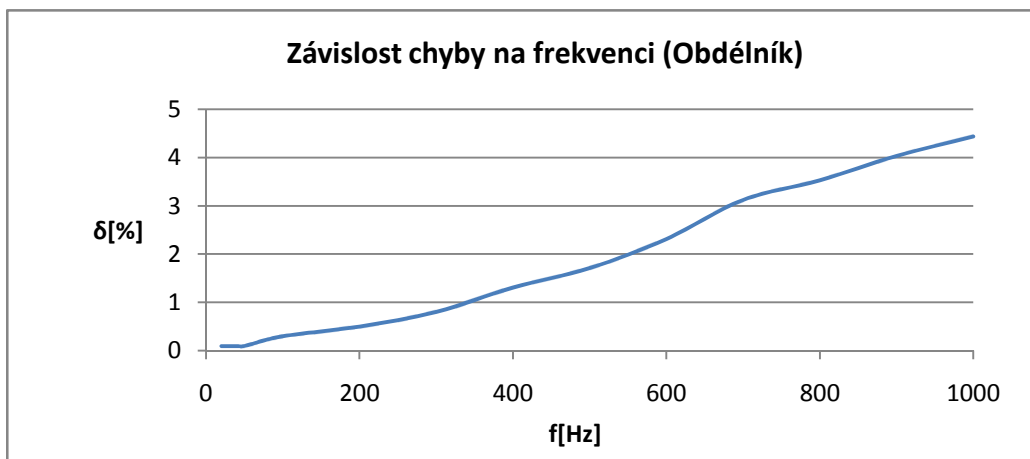
Měření frekvenční charakteristiky:

Průběh signálu: trojúhelník

f	GDU	Multimetr	δ
[Hz]	[mV]	[mV]	[%]
20	810	810	0
40	809	810	0,124
50	810	810	0
100	809	809	0
200	809	808	0,124
300	808	808	0
400	808	806	0,248
500	807	805	0,248
600	807	803	0,496
700	806	801	0,620
800	806	802	0,496
900	805	801	0,497
1000	805	800	0,621

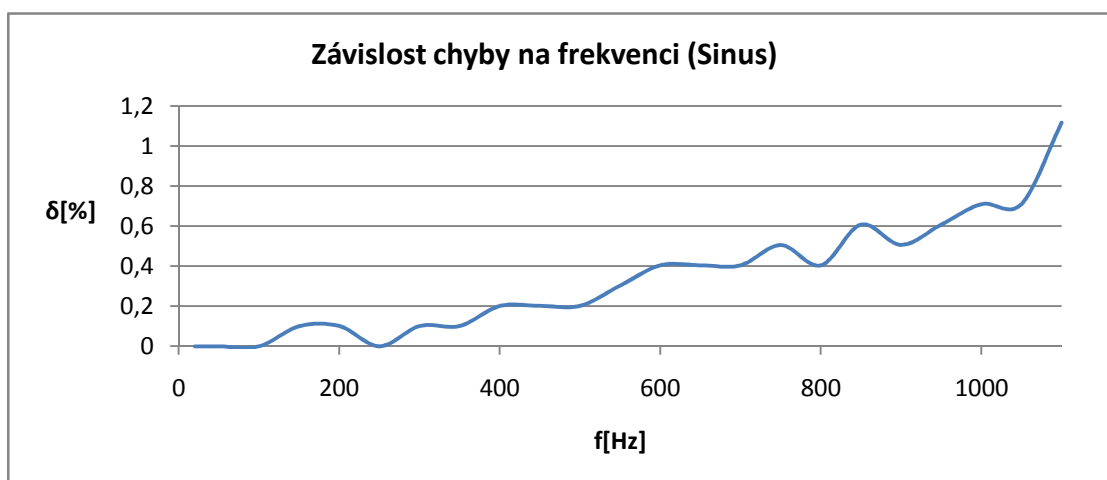
Průběh signálu: obdélník

f	GDU	Multimetr	δ
[Hz]	[mV]	[mV]	[%]
20	993	992	0,101
40	993	992	0,101
50	993	992	0,101
100	993	990	0,302
200	993	988	0,504
300	993	985	0,806
400	993	980	1,309
500	993	976	1,712
600	993	970	2,316
700	993	962	3,122
800	992	957	3,528
900	992	952	4,032
1000	992	948	4,435



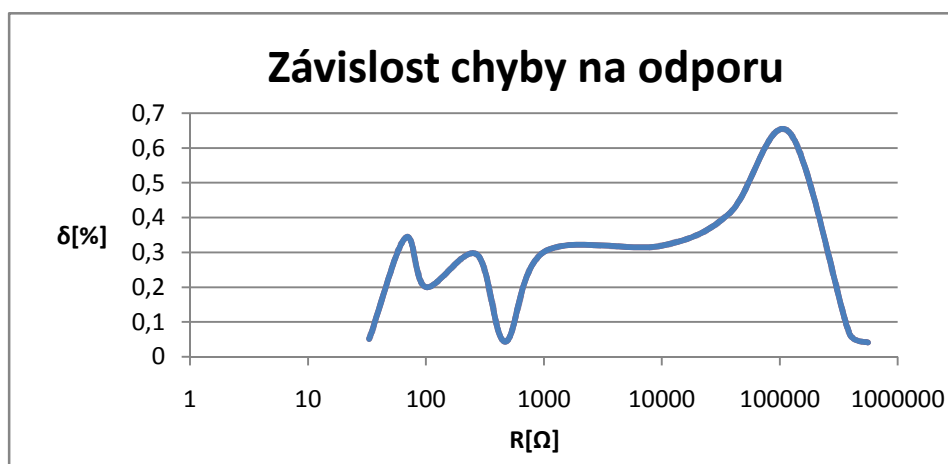
Průběh signálu: Sinus

f	GDU	Multimetr	δ
[Hz]	[mV]	[mV]	[%]
20	998	998	0
25	998	998	0
30	997	997	0
35	998	998	0
40	998	998	0
45	997	997	0
50	998	998	0
100	998	998	0
150	996	995	0,100
200	995	994	0,101
250	994	994	0
300	994	993	0,101
350	993	992	0,101
400	993	991	0,201
450	992	990	0,202
500	991	989	0,202
550	991	988	0,303
600	991	987	0,404
650	991	987	0,404
700	990	986	0,404
750	990	985	0,505
800	989	985	0,404
850	989	983	0,607
900	988	983	0,506
950	988	982	0,607
1000	987	980	0,709
1050	986	979	0,710
1100	986	975	1,116



Ověření přesnosti měření odporu:

Odor	GDU	Multimetr	δ
[Ω]	[Ω]	[Ω]	[%]
33	32.67	32	0,051
67	67.23	67	0,342
100	100.2	100	0,200
270	272.2	273	0,294
470	469.2	469	0,043
1k	997	1k	0,301
10k	10.32k	10k	0,319
38k	38.94k	38k	0,414
120k	119.23k	120k	0,646
390k	390.26k	390k	0,067
560k	560.23k	560k	0,041



Příklad výpočtu chyby:

$$\delta = \frac{|U_{GDU} - U_{multi}|}{U_{GDU}} * 100 = \frac{|2,512 - 2,511|}{2.512} * 100 = \underline{0,040\%} \quad (23)$$

8 - Závěr

Při zpracování této bakalářské práce, jsem se seznámil se sběrnicí USB a komunikačním protokolem HID. Vybral jsem vhodný mikroprocesor pro aplikaci do USB-multimetru. Navrhl jsem schéma zapojení a desku plošných spojů USB-multimetru. Po oživení navržené desky jsem zprovoznil USB komunikaci a napsal software mikroprocesoru pro měření napětí, proudu a odporu. Dále jsem vytvořil řídicí program, který je určen k řízení měřicí části a zobrazení naměřené hodnoty.

Při porovnání navrženého multimetru s přesným multimetrem Instek jsem zjistil, že při měření napětí a proudu je chyba maximálně 0,3%. Tuto skutečnost považuju za skvělý výsledek. Naopak měření odporu pomocí proudového zdroje je spíše informativní. Pro přesné měření odporu se dnes používají měřicí můstky. Porovnáním hodnot odporu naměřených USB-multimetrem s hodnotami odporu naměřených pomocí multimetru Instek se ukázalo, že při dobré kalibraci měřicí části dosahuje metoda měření odporu s použitím proudového zdroje chyby maximálně 0,6%.

Značná nevýhoda navrženého multimetru je ve velikosti vstupního odporu při měření napětí. Vstupní odpor o velikosti $650\text{k}\Omega$ je na voltmetr velice špatná hodnota. Naopak výhodou navrženého celku je možnost dalšího rozšíření řídicího programu, například o uložení či načtení naměřených dat, zobrazení naměřených dat v grafu, rozšíření o měření teploty nebo dokonce o vytvoření jednoduché verze osciloskopu.

9 - Rejstříky a seznamy

9.1 Seznam použité literatury

1. KAINKA, Burkhard. *USB : Měření, řízení a regulace pomocí sběrnice USB*. Praha : Technická literatura BEN, 2003. 248 s. ISBN 80-7300-073-3.
2. VOBECKÝ, Jan, ZÁHLAVA, Vít. *Elektronika : Součástky a obvody, principy a příklady*. 3. rozš. vyd. Praha : Grada Publishing, a. s., 2005. 220 s. ISBN 80-247-1241-5.
3. ŘEHÁK, Jan. *USB - Universal Serial Bus : USB - Universal Serial Bus* [online]. 2002, 7.5.2002[cit. 2009-02-04]. Český. Dostupný z WWW: <http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Dokumentace/ART327-USB---Universal-Serial-Bus---Popis-rozhrani.html>
4. MALÝ, Martin. *USB 2.0 : Typy a formáty přenosů* [online]. 2005 , 19.4.2005 [cit. 2009-02-04]. Český. Dostupný z WWW: <http://hw.cz/Rozhrani/ART1264-USB-2.0---Typy-a-formaty-prenosu.html>
5. MALÝ, Martin. *USB 2.0 : díl 2*. [online]. 2005 , 10.3.2005 [cit. 2009-02-04]. Dostupný z WWW: <http://hw.cz/Rozhrani/ART1244-USB-2.0---dil-2.html>
6. MALÝ, Martin. *USB 2.0 : díl 1* [online]. 2005 , 22.2.2005 [cit. 2009-02-04]. Český. Dostupný z WWW: <http://hw.cz/Rozhrani/ART1232-USB-2.0---dil-1.html>
7. OLMR, Vít. *Sériová linka RS-232* [online]. 2005 , 12.12.2005 [cit. 2009-03-20]. Český. Dostupný z WWW: <http://hw.cz/rs-232#USB>
8. *Data sheet : PIC18F4455* [online]. 2007 , 30.1.2007 [cit. 2009-03-27]. Dostupný z WWW: <http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en010293>
9. KRUPKA, Miroslav. *COMPARING COMPUTATIONAL DEMANDINGNESS OF RMS ALGORITHMS IMPLEMENTED IN ADSP2181*. [s.l.], [2003?]. 3 s. Vedoucí oborové práce Petra Beneš.
10. SMRŽ, Jan. *Rozbor USB* [online]. 2007 , 15.5.2007 [cit. 2009-04-14]. Český. Dostupný z WWW: <http://www.smrz.chrudim.cz/usb/>
11. GESCHIEDTOVÁ, Eva, REZ, Jiří, STEINBAUER, Miroslav. *Měření v elektrotechnice*. Brno : VUTIM, 2002. 185 s.

9.2 Seznam obrázků

Obr. 1 Vodiče fyzické vrstvy USB [3]	3
Obr. 2 Budící obvod USB	3
Obr. 3 Připojení zařízení	4
Obr. 4 Signál NRZI	5
Obr. 5 Formáty paketů	5
Obr. 6 Identifikátor paketu PID.....	6
Obr. 7 Deskriptor zařízení	7
Obr. 8 Blokové schéma multimetru	9
Obr. 9 Připojení oscilátoru k uP [8]	10
Obr. 10 Blokové schéma zpracování signálu [11]	11
Obr. 11 Paměťový vzorkovač [11]	11
Obr. 12 Registry ADRESH a ADRESL [8]	12
Obr. 13 Blokové schéma výpočtu RMS.....	13
Obr. 14 Zapojení části multimetru pro měření napětí	14
Obr. 15 Průběhy napětí v měřící větvi	15
Obr. 16 Kaskáda vstupních děličů.....	16
Obr. 17 Dělič napětí	16
Obr. 18 Zapojení části multimetru pro měření proudu.....	19
Obr. 19 Průběhy proudu v měřící větvi.....	20
Obr. 20 Proudový zdroj	21
Obr. 21 Zapojení části multimetru pro měření odporu.....	22
Obr. 22 Závislost proudu na odporu měřeného rezistoru pro rozsah 100Ω až 1kΩ	23
Obr. 23 Vývojový diagram mikroprocesoru	24
Obr. 24 Výběr rozsahu na základě informací o signálu	25
Obr. 25 Uživatelské rozhraní.....	27
Obr. 26 Vývojový diagram řídicího programu.....	28
Obr. 27 Postup zobrazení hodnot	29

9.3 Seznam tabulek

Tabulka 1 Parametry návrhu	2
Tabulka 2 Srovnání parametrů procesorů [8].....	10

9.4 Seznam rovnic

Rovnice 1: Vstupní napětí A/D převodníku	12
Rovnice 2: Výpočet efektivní hodnoty v časové oblasti	13
Rovnice 3: Výpočet efektivní hodnoty v diskrétním tvaru	13
Rovnice 4: Výstupní napětí děliče	16
Rovnice 5: Výpočet odporu děliče	17
Rovnice 6: Ztrátový výkon rezistoru.....	17
Rovnice 7: Napětí na odporu děliče	17
Rovnice 8: Ztrátový výkon rezistoru.....	17
Rovnice 9: Celkový odpor větve R400	17
Rovnice 10: Celkový odpor větve R200	17
Rovnice 11: Celkový odpor větve R20	18
Rovnice 12: Celkový odpor větve R2	18
Rovnice 13: Výpočet vstupní vodivosti	18
Rovnice 14: Výpočet vstupního odporu.....	18
Rovnice 15: Výpočet proudu.....	19
Rovnice 16: Maximální napětí na měřicím rezistoru	20
Rovnice 17: Ztrátový výkon rezistoru.....	20
Rovnice 18: Vzorec pro výpočet odporu.....	21
Rovnice 19: Vzorec pro výpočet proudu proudového zdroje.....	22
Rovnice 20: Výpočet odporu proudového zdroje	22
Rovnice 21: Nyquistův teorém.....	26
Rovnice 22: Perioda vzorkování	26
Rovnice 22: Výpočet chyby měření	33

9.5 Přílohy

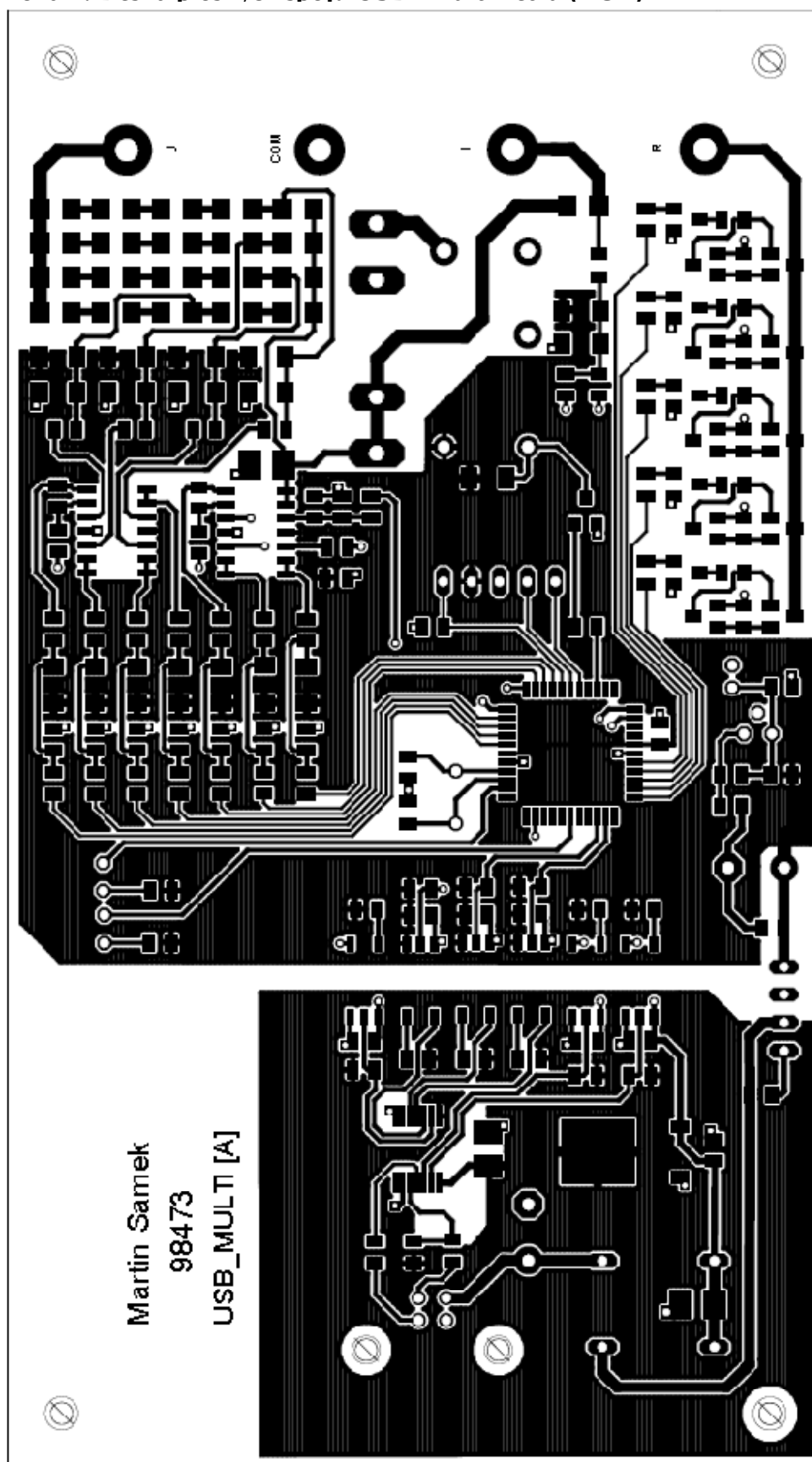
Seznam příloh:

- Příloha 1: Deska plošných spojů USB - multimetru (TOP)
- Příloha 2: Deska plošných spojů USB - multimetru (BOTTOM)
- Příloha 3: Osazovací výkres USB - multimetru
- Příloha 4: Schéma zapojení měřící části USB - multimetru
- Příloha 5: CD

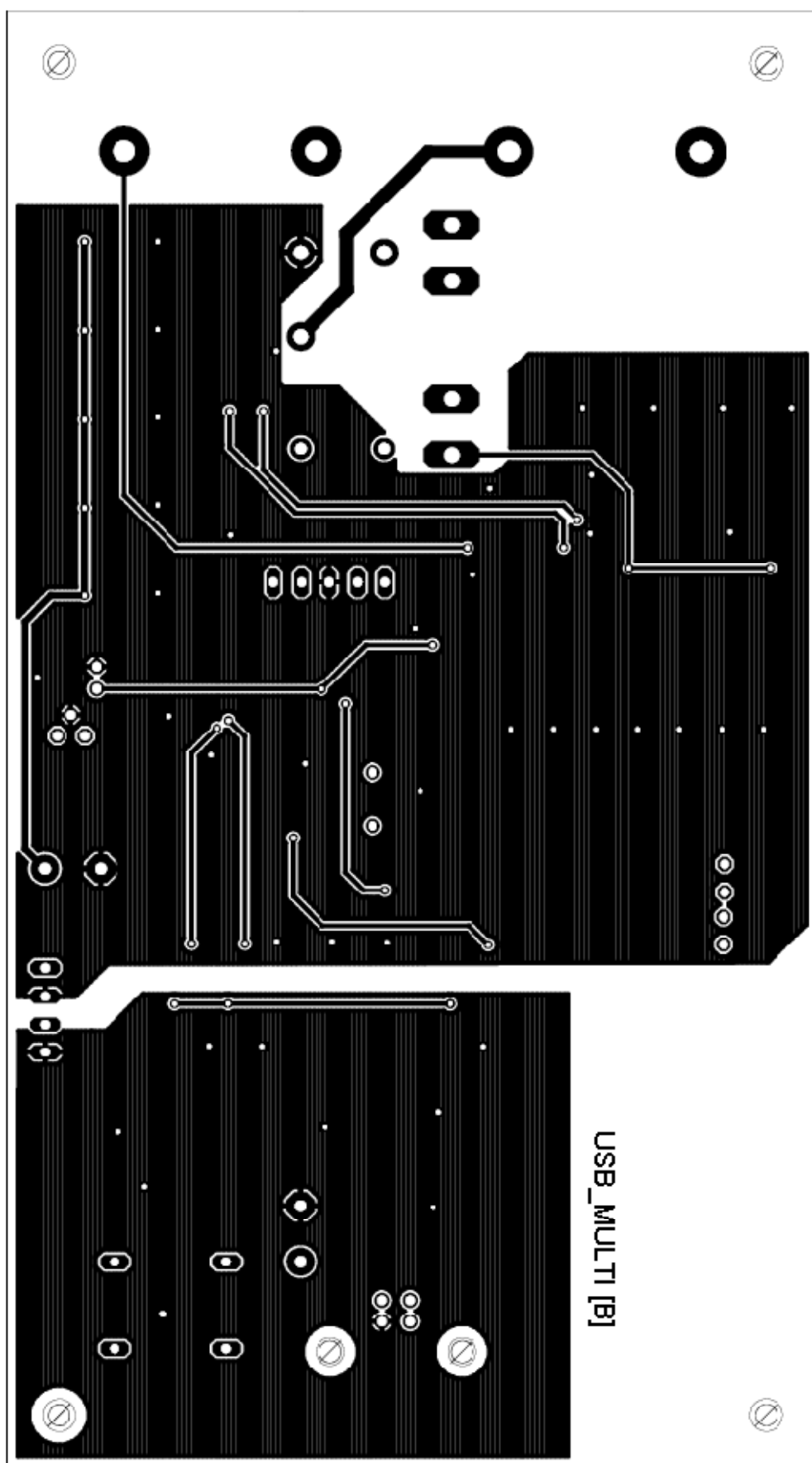
Obsah CD:

- Software pro mikroprocesor PIC18F4455
- Řídící software USB - multimetru
- Soubory k výrobě desky plošných spojů
- Elektronická verze bakalářské práce

Příloha 1: Deska plošných spojů USB - multimetru (TOP)



Příloha 2: Deska plošných spojů USB - multimetru (BOTTOM)



Příloha 3: Osazovací výkres USB - multimetru

