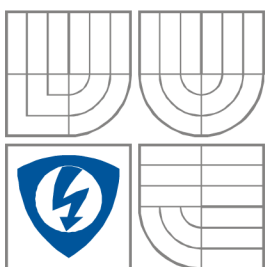


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

VYSOKOFREKVENČNÍ VÍCEKANÁLOVÝ MĚŘIČ VÝKONU

MULTICHANNEL RF POWER METER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Vladimír Hradňanský

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Šebesta, 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: Vladimír Hradiňanský
Ročník: 3

ID: 146832
Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Vysokofrekvenční vícekanálový měřič výkonu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principy měření vysokofrekvenčního výkonu pomocí logaritmických detektorů. Navrhněte obvodové řešení snímacích sond pro vícekanálový vysokofrekvenční měřič výkonu. Proveďte návrh elektronických obvodů, plošných spojů a mechanického provedení sond. Sondy realizujte a ověřte jejich funkci. Navrhněte obvodové řešení vícekanálového měřiče výkonu se zobrazením na displeji a analogovým zobrazením s možností bateriového napájení pro použití s již navrženými sondami. Proveďte návrh elektronických obvodů, plošných spojů, mechanického provedení a řídicího software včetně konfiguračního a kalibračního programu pro nastavování parametrů měřiče pomocí sériové linky RS232. Měřič realizujte a ověřte jeho funkci a parametry.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] HANUS, S., SVAČINA, J. Vysokofrekvenční a mikrovlnná technika. Skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2002.

[2] AD8307 Low Cost, DC to 600 MHz, 92 dB Logarithmic Amplifier Data Sheet (Rev. D). [online]. Nonwood: Analog Devices, Inc. [cit. 1.3.2012]. Dostupné na [www](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8307.pdf): http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8307.pdf

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 30.5.2014

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Šebesta, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
Předseda oborové rady

ABSTRAKT

V této práci je proveden rozbor metod měření vysokofrekvenčního výkonu, následně návrh a realizace procesorem řízeného vícekanálového vysokofrekvenčního měřiče výkonu. Přístroj umožňuje komunikaci přes USB či port RS232, korekci a kalibraci výpočtů uložených na SD kartě přístroje, výsledky měření zobrazovat na LCD display. Měřič je schopen s třemi různými sondami měřit výkon až do 8 GHz. Vestavěný zeslabovač 40 dB umožňuje měření do frekvence 2,5 GHz s výkonem až 100 W. Výsledkem práce je kompletní funkční měřicí přístroj včetně tří typů sond, měřicí jednotky a software.

KLÍČOVÁ SLOVA

Mikroprocesor, ATmega, logaritmický detektor, měřič výkonu, LCD displej, sériová komunikace, RS232, AD převodník, AD8307, AD8313, AD8318, napájecí zdroj.

ABSTRACT

In this work is an analysis of methods for measuring high-frequency power, then the design and implementation of multi-channel processor controlled high-frequency power meter. The device enables communication via USB or RS232 port, correction and calibration calculations stored on the SD card devices, measurement results displayed on the LCD display. The meter is able to of three different probes measure the performance of up to 8 GHz. Built-in 40 dB attenuator allows measurements up to a frequency of 2.5 GHz with power up to 100 W. A complete functional test tool including three types of probes, measuring unit, and software are the results of this work.

KEYWORDS

Microprocessor, ATmega, logarithmic detector, power measurement system, LCD display, serial communication, RS232, AD converter, AD8307, AD8313, AD8318, power supply.

HRADŇANSKÝ, V. *Vysokofrekvenční vícekanálový měřič výkonu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 56 s. a 56 s. příloh. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Šebesta, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Vícekanálový vysokofrekvenční měřič výkonu 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 30. května 2014

.....

Vladimír Hradňanský

Poděkování

Děkuji pedagogickému vedoucímu doc. Ing. Jiřímu Šebestovi, Ph.D. a Ing. Tomáši Mádrovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále děkuji firmě DCom, spol. s r.o. za možnost realizovat kalibrace, měření a konstrukci přístroje ve firmě.

V Brně dne 30. května 2014

.....

Vladimír Hradňanský

OBSAH

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Úvod	1
1 Možnosti měření VF výkonu	2
1.1 Thermoelektrické metody	2
1.2 Diodové detektory.....	3
2 Návrh logaritmických detektorů	4
2.1 Princip činnosti logaritmických detektorů.....	4
2.2 Koncepce sond s logaritmickými detektory.....	5
2.3 Detektor s AD8307	6
2.3.1 Návrh detektoru s AD8307	7
2.4 Detektor s AD8313	9
2.5 Návrh detektoru s AD8313	11
2.6 Detektor s AD8318	12
2.6.1 Návrh detektoru s AD8318.....	15
3 Realizace a měření detektorů	17
3.1 Oživení a konstrukce sond.....	17
3.2 Kalibrace sond	18
3.1 Činitel odrazu na vstupu sond (S_{11})	24
4 Pomocný software pro APLIKACI samoStnÝCH detektorů	28
5 Obvodové zapojení měřiče výkonu	29
5.1 Připojení a rozeznání sondy	30
5.2 Vstupní filtr.....	31
5.3 Řídicí jednotka s mikroprocesorem ATmega2560	33
5.3.1 Základní parametry ATmega2560	35
5.4 Znakový displej 4 x 40.....	37
5.5 Monitoring napájecích napětí	39

5.6	Měření teploty hlavní desky a připojených sond	39
5.7	Externí napěťová reference.....	41
5.8	Sériová komunikace wattmetru s PC	42
5.8.1	USB komunikace	42
5.8.2	Sériový port RS232.....	45
5.9	SD karta	47
5.10	Nabíječ akumulátoru.....	49
6	konfigurační software RF power meter	52
7	Mechanická konstrukce měřiče	56
8	Závěr	58
	Literatura	59
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	61
	Seznam příloh	62

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1: Blokové schéma sond s logaritmickými detektory.....	5
Obr. 2.2: Vnitřní zapojení AD8307 (převzato z [1]).	6
Obr. 2.3: Vnitřní zapojení AD8313 (převzato z [2]).	9
Obr. 2.4: Typická závislost výstupního napětí na vstupním výkonu (převzato z [2]). ...	10
Obr. 2.5: Typická závislost chyby měření detektoru na vstupním výkonu pro různé frekvence (převzato z [2]).	10
Obr. 2.6: Vnitřní struktura AD8318 (převzato z [3]).	12
Obr. 2.7: Typická závislost výstupního napětí na vstupním výkonu a chyby měření sondy AD8318 (převzato z [3]).	13
Obr. 2.8: Typická závislost chyby vůči lineární převodní charakteristice v závislosti na vstupním výkonu a teplotě okolí (modrá -40°C, černá +25°C, červená +85°C) pro kmitočet 900 MHz (převzato z [3]).	14
Obr. 2.9: Typická závislost chyby vůči lineární převodní charakteristice v závislosti na vstupním výkonu a teplotě okolí (modrá -40°C, černá +25°C, červená +85°C) pro kmitočet 3,6 GHz (převzato z [3]).	14
Obr. 2.10: Typická závislost chyby vůči lineární převodní charakteristice v závislosti na vstupním výkonu a teplotě okolí (modrá -40°C, černá +25°C, červená +85°C) pro kmitočet 8 GHz (převzato z [3]).	15
Obr. 3.1: Celkový pohled na krabičku	17
Obr. 3.2: Rozměry horního a spodního krytu krabiček	18
Obr. 3.3: Přenosová charakteristika sondy AD8307 v závislosti na různých frekvencích	19
Obr. 3.4: Přenosová charakteristika sondy AD8313 v závislosti na různých frekvencích	19
Obr. 3.5: Přenosová charakteristika sondy AD8318 v závislosti na různých frekvencích	20
Obr. 3.6: Závislost U_{OUT} na frekvenci pro konstantní P_{IN} u sondy AD8307.....	20
Obr. 3.7: Závislost U_{OUT} na frekvenci pro konstantní P_{IN} u sondy AD8313.....	21
Obr. 3.8: Závislost U_{OUT} na frekvenci pro konstantní P_{IN} u sondy AD8318.....	21
Obr. 3.9: Absolutní chyba měření sondy s AD8307 vztažená k přesné hodnotě generátoru	22
Obr. 3.10: Absolutní chyba měření sondy s AD8313 vztažená k přesné hodnotě generátoru	22
Obr. 3.11: Absolutní chyba měření sondy s AD8318 vztažená k přesné hodnotě generátoru	23

Obr. 3.12: Napěťový ofset dotážený na 50 MHz pro sondu s AD8307	23
Obr. 3.13: Chyba měření vztažená k 50 MHz pro sondu s AD8307	24
Obr. 3.14: S_{11} sondy s AD8307 při vypnutém napájení	25
Obr. 3.15: S_{11} sondy s AD8307 při zapnutém napájení	25
Obr. 3.16: S_{11} sondy s AD8313 při vypnutém napájení	26
Obr. 3.17: S_{11} sondy s AD8313 při zapnutém napájení	26
Obr. 3.18: S_{11} sondy s AD8318 při vypnutém napájení	27
Obr. 3.19: S_{11} sondy s AD8318 při zapnutém napájení	27
Obr. 4.1: Snímek pomocného programu „SondaControll“	28
Obr. 5.1: Blokové schéma zapojení wattmetru	29
Obr. 5.2: Schéma zapojení vstupní části napětí ze sondy	31
Obr. 5.3: Schéma zapojení vstupního filtru	31
Obr. 5.4: Schéma zapojení vstupního filtru v programu PSpice	32
Obr. 5.5: Výsledná simulace přenosu vstupního filtru v programu PSpice	32
Obr. 5.6: Reálný přenos vstupního filtru na 50 Ω do 500 MHz	33
Obr. 5.7: Reálný přenos vstupního filtru na 50 Ω do 1,5 GHz	33
Obr. 5.8: Rozložení pinů mikrokontroléru ATmega2560 včetně namapovaných pinů pro vývojovou platformu Arduino (převzato z [6]).	34
Obr. 5.9: Blokové zapojení ATmega2560 (převzato z [7]).	37
Obr. 5.10: Display RC4004A-FHW-CSX (převzato z [8]).	38
Obr. 5.11: Zapojení děliče pro měření napájecího napětí a napětí 3,3 V	39
Obr. 5.12: Zapojení termistoru pro měření teploty hlavní desky a připojených sond... ..	40
Obr. 5.13: Výpočet směrnice pro výpočet hodnoty teploty	41
Obr. 5.14: Schéma zapojení externí napěťové reference	42
Obr. 5.15: Ukázka zapojení externí napěťové reference včetně ochranného rámce (guard ring)	42
Obr. 5.16: Datové pakety USB komunikace v rámci 1ms	43
Obr. 5.17: NRZI kódování	43
Obr. 5.18: Blokové schéma FT232RL (převzato z [9]).	44
Obr. 5.19: Schéma zapojení převodníku USB/UART pro datový mód	44
Obr. 5.20: Komunikace na RS232	45
Obr. 5.21: Typické zapojení konektoru RS232 (převzato z [10]).	46
Obr. 5.22: Schéma zapojení převodníku RS232/UART pro resetovací a programovací mód	46
Obr. 5.23: Schéma zapojení převodníku RS232/UART pro datové přenosy	47

Obr. 5.24: SD karta (převzato z [11]).....	48
Obr. 5.25: Schéma zapojení převodníku pro SD kartu	49
Obr. 5.26: Schéma zapojení resetovacího generátoru nabíječe s TL074D	50
Obr. 5.27: Snímek desky nabíječe pomocí termokamery při plně nabitém akumulátoru	50
Obr. 5.28: Snímek desky nabíječe pomocí termokamery při vybitém akumulátoru .	51
Obr. 6.1: Uvítací okno programu RF Power Meter	52
Obr. 6.2: Hlavní okno programu RF Power Meter	52
Obr. 6.3: Okno nastavení COM portu.....	53
Obr. 6.4: Okno Kalibrace.....	54
Obr. 7.1: Rozmístění komponentů v přístrojové skříni	57

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1: Porovnání metod měření výkonu (převzato z [4]).....	3
Tab. 2.1: Porovnání parametrů sond	5
Tab. 2.2: Doporučené hodnoty rezistoru pro teplotní kompenzaci čipu AD8318	16
Tab. 5.1: Zapojení pinů displeje RC4004A-FHW-CSX.....	38
Tab. 5.2: Typická závislost odporu termistoru na teplotě dle katalogového listu výrobce	40
Tab. 5.3: Zapojení pinů paměťové karty v režimu SPI	48
Tab. 5.4: Alternativní funkce portu B mikropočítače ATmega2560	48
Tab. 6.1: Seznam příkazů konfiguračního software „RF Power Meter“	54
Tab. 7.1: Rozměry dodělávaných plechů.....	57

ÚVOD

Před 117 lety svět objevil elektromagnetické vlny. Postupem času se lidstvo dostalo na úroveň, že nejen umělo využívat elektromagnetické vlny, ale vznikla i potřeba nějak tyto vlny kvantifikovat a měřit je. Jedním ze základních měření vlastností vlny je určení jejího výkonu. Potřeba měřit výkon vysokofrekvenčních zařízení je v dnešní době žádanou součástí většiny zařízení pracujících na vysokých frekvencích i s ohledem na dodržení příslušných limitů norem. Umíme-li vlny změřit, umíme pak i rozhodnout o žádaném snižování výkonů či nižší energetické náročnosti přístrojů. Proto bylo rozhodnuto o konstrukci přesného měřiče výkonu vf. vln až do frekvence 8 GHz.

Výstupem této práce jsou funkční vzorky sond pro měření vf. výkonu, které převádějí vstupní vf. výkon na stejnosměrné napětí, které je dobře měřitelné a zpracovatelné. V další části práce je výsledkem kompletní funkční vzorek vícekanalového koncového měřiče výkonu, který je plně využitelný pro měření vf. výkonu v systémech s impedancí 50 Ω . Jeho vestavěný atenuátor (zeslabovač) umožňuje měření do frekvence 2,5 GHz s výkonem až 100 W, vyšší frekvence mají vstupní výkon nižší v závislosti na použitém atenuátoru.

Konfiguraci měřiče umožňuje speciální software „RF Power Meter“ využívající USB sběrnici či port RS232. Kalibrační data mohou být uložena na SD kartě a následně je umožněno tato data využít při přesných měřeních. Řídící jednotka měřiče je programovatelná po sériovém rozhraní a není nutné při přeprogramování ji rozebírat.

1 MOŽNOSTI MĚŘENÍ VF VÝKONU

S rozvojem vysokofrekvenční techniky vznikaly i potřeby přesně měřit vysokofrekvenční výkon. Z těchto potřeb bylo na základě pokusů a potřeb průmyslu navrženo mnoho různých metod a přístrojů na měření vf. výkonu. Možnosti měření vysokofrekvenčního výkonu jsou v dnešní době široké. Existují jednoduché principy měření až po sofistikovaná zařízení schopná měřit „true RMS“ výkon, např. u WiFi zařízení.

Z hlediska připojení k wattmetru ke zdroji výkonu je lze rozdělit do dvou skupin:

- průchozí (*Directional Power Meter*)
 - zátěž není součástí wattmetru a výkon se měří ve vedení spojující zdroj signálu se zátěží.
- koncové (*Terminating Power Meter*)
 - vstupní obvod wattmetru představuje zároveň i zátěž, ve které se spotřebovává vf energie.

Podle principů měření dělíme wattmetry do čtyř základních skupin

- kalorimetrické metody:
 - statické kalorimetry
 - adiabatické kalorimetry
 - průtokové kalorimetry
- termoelektrické metody
 - wattmetry s absorpčním termočlánkem
 - wattmetry s nepřímo vyhřívaným termočlánkem
- logaritmické a diodové detektory
 - využívající kvadratické VA charakteristiky

1.1 Thermoelektrické metody

Měření spočívá ve spotřebování vf. energie v umělé zátěži, která je impedančně přizpůsobena zdroji energie. Změnou teploty této zátěže můžeme určit výkon, který zátěž spotřebovala a tedy ten, který na ni dopadl. Je známo mnoho zapojení těchto zátěží, kdy lze eliminovat okolní teplotu použitím NTC termistoru.

Velkou výhodou těchto termočlánků je, že jsou téměř frekvenčně nezávislé. Nevýhodou je naopak malý dynamický rozsah, jelikož malým výkonem nezahřejme vysokovýkonné rezistory. Je proto nutné mít na měřený rozsah výkonu odpovídající výkonové zátěže. Typický dynamický rozsah amatérských zařízení je okolo 20 dB, profesionálních je okolo 40 dB. Dynamika logicky záleží na použitém měřiči teploty a jeho citlivosti. Lze zmínit další nevýhodu, kdy na zahřátí zátěže je nutná určitá doba.

1.2 Diodové detektory

Využívají kvadratické závislosti VA charakteristiky. Nutnou podmínkou pro použití diody jako detektoru je dostatečná rychlost vysokofrekvenční diody s velmi malou kapacitou a parazitní indukčností pouzdra. Je vžitý předsudek, že dioda má prahové napětí od 0,3 – 0,7 V (v závislosti na použité výrobní technologii). Byla-li by to pravda, měli bychom problém změřit výkony v řádech mW (1 mW na 50 Ω je pouze 223 mV). Jelikož je ale dioda nelineární prvek, tak i s nejmenším vstupním napětím se vyvolá změna výstupního napětí, byť i v řádech několikaset mV vstupního napětí.

V kvadratické oblasti již dioda vykazuje odlišné vlastnosti v propustném i závěrném směru. Rozdíl není tak velký, ale výsledkem je, že výstupní usměrněné napětí je úměrné úrovni signálu, respektive je úměrné druhé odmocnině z vrcholové hodnoty napětí signálu. Nad prahovým napětím platí klasická teorie diody, kdy v propustném směru propustí jen kladnou půlvlnu a zápornou izoluje. Detekce výstupního napětí se provádí například vysokoohmovým voltmetrem, který se patřičně kalibruje dle známého výkonu.

Je známo mnoho aplikací těchto diodových detektorů, které byly a značně ještě dnes jsou hojně využívány k měření výkonu. Na tuto aplikaci se velmi hodí vysokofrekvenční Shottkyho diody v různém provedení.

Následující tabulka udává porovnání jednotlivých metod měření vf. výkonu.

Tab. 1.1: Porovnání metod měření výkonu (převzato z [4])

Typ senzoru (detektoru)	Výhody	Nevýhody
termální metody	<ul style="list-style-type: none"> - může být kalibrován DC napětím - téměř frekvenčně nezávislé - do 10 GHz je snadno vyrobitelný - TRMS hodnota na výstupu - průměrná přesnost 	<ul style="list-style-type: none"> - malý dynamický rozsah - malá odezva teplotního snímače
diodové detektory	<ul style="list-style-type: none"> - dobrá přesnost - rozumný dynamický rozsah 	<ul style="list-style-type: none"> - napětí s hodně harmonickými způsobuje nepřesnosti - složitá kalibrace
logaritmické detektory	<ul style="list-style-type: none"> - vysoký dynamický rozsah - dobrá přesnost po kalibraci - velký frekvenční rozsah 	<ul style="list-style-type: none"> - nutná kmitočtová korekce - malé výkonové přetížení

Měření výkonu ovlivňuje celá řada faktorů. Nedokonalost konverze vf. výkonu v čidle vyjadřuje kalibrační činitel a efektivní účinnost. Nedokonalost přizpůsobení wattmetru v měřicím systému, při substituci, v děličích výkonu a směrových vazebních členech zanášejí do měření systematické chyby.

2 NÁVRH LOGARITMICKÝCH DETEKTORŮ

Pro konstrukci logaritmických detektorů byly využity prvky od Analog Devices. Tyto prvky jsou moderní, mají dobré elektrické vlastnosti, malou spotřebu, malé rozměry a hmotnost. Základním popisem logaritmických sond je jejich kmitočtový rozsah, ve kterém pracují, dynamický rozsah, přesnost a stálost parametrů v celém dynamickém a kmitočtovém rozsahu. Vzhledem k tomu, že měřič výkonu bude použit i při bateriovém provozu, je tedy důležitá i vlastní spotřeba sondy případně celého měřiče výkonu.

Navržené sondy jsou koncipovány jako koncové, tzn., že vf energie se v nich zároveň spotřebovává. Maximální vstupní výkon, který je schopna sonda spotřebovat je +17 dBm u AD8307 [1], +3 dBm u AD8313 [2] a AD8318 [3]. Další velkou výhodou použití těchto sond je jejich stejnosměrná složka na výstupu, jenž je parametrem udávající změřený výkon. Hodí se tedy k zapojení s externím či interním AD převodníkem uvnitř vhodného mikrokontroléru.

2.1 Princip činnosti logaritmických detektorů

Princip spočívá v myšlence převést vysokofrekvenční signál na stejnosměrné napětí, které je velmi dobře měřitelné. Základem je řetězec zesilovačů, které zesilují signál tak dlouho, dokud se nedostanou do komprese. Nejmenší signál má největší zesílení na posledním stupni zesilovačů, při slabé úrovni vf. signálu je tedy v limitaci poslední zesilovač. Výstupní proud jednotlivých zesilovačů ($2 \mu\text{A/dB}$) je přes transkonduktanci (gm) převeden na napětí. Toto napětí je dále upraveno interním rezistorem $12,5 \text{ k}\Omega$ na strmost $0,25 \text{ mV/dB}$, což odpovídá 500 mV/dekádu . Pozitivní vlastností logaritmických detektorů je, že stejnosměrné napětí na výstupu detektoru je úměrné logaritmu vstupního napětí. Úroveň stejnosměrného napětí na výstupu je úměrná vstupní hodnotě napětí v dB. Pro každý decibel vstupního napětí se vyvolá změna výstupního napětí v řádu několika milivoltů. Více informací lze nalézt v literatuře [1]. Proto můžeme měřit přes velmi široký dynamický rozsah vstupního napětí bez nutnosti velkého zesílení stejnosměrné složky výstupu. Typický rozsah bývá v řádech desítek dB (20 dB až 60 dB).

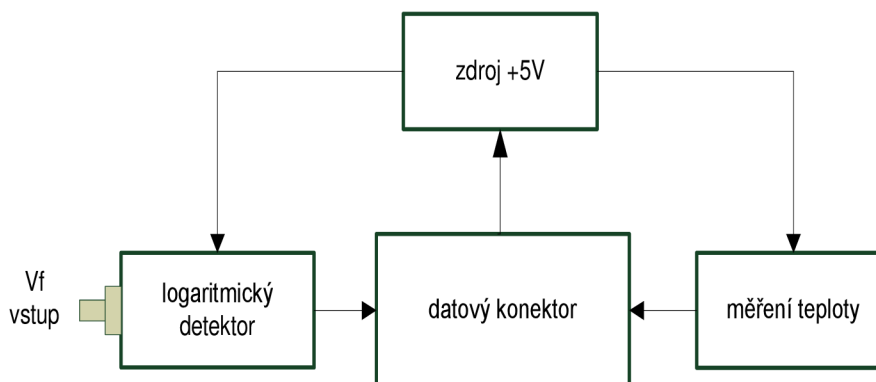
Značnou nevýhodou je nepřesnost při měření stejné amplitudy vf. výkonu při různých frekvencích. Obdobně jako každý zesilovač je i každý logaritmický detektor frekvenčně závislý. Výrobci se snaží tuto nečinnost co nejvíce eliminovat, přesto je ale nutné tuto skutečnost kompenzovat přesnými kalibracemi na několika frekvencích. Tyto nepřesnosti jsou odstraněny přesnou kalibrací. První kalibrace je kalibrace výstupního napětí na hodnotě proměnného vstupního vf. napětí a pevném kmitočtu (převodní charakteristika). Další kalibrací je změna výstupního napětí detektoru oproti změně frekvence při konstantním vstupním výkonu (frekvenční závislost detektoru).

2.2 Koncepce sond s logaritmickými detektory

Logaritmické detektory byly využity jako převodníky vf. výkonu na stejnosměrné napětí. Dle frekvenčního a dynamického rozsahu byly zvoleny tři základní sondy. Porovnání je uvedeno v tabulce 2.1. Převezené napětí je poté vždy oddělené operačním zesilovačem a přivedeno na výstup sondy. Každá sonda může být napájena stejnosměrným napětím v rozsahu 6 až 18 V. V každé sondě je využit blok měření teploty pro případné „dokalibrování“ hodnot při měření mimo pokojovou teplotu.

Tab. 2.1: Porovnání parametrů sond

detektor	frekvenční pásmo	dynamický rozsah [dB]
AD8307	DC až 500 MHz	92
AD8313	0,1 GHz až 2,5 GHz	70
AD8318	1 MHz až 8 GHz	70



Obr. 2.1: Blokové schéma sond s logaritmickými detektory

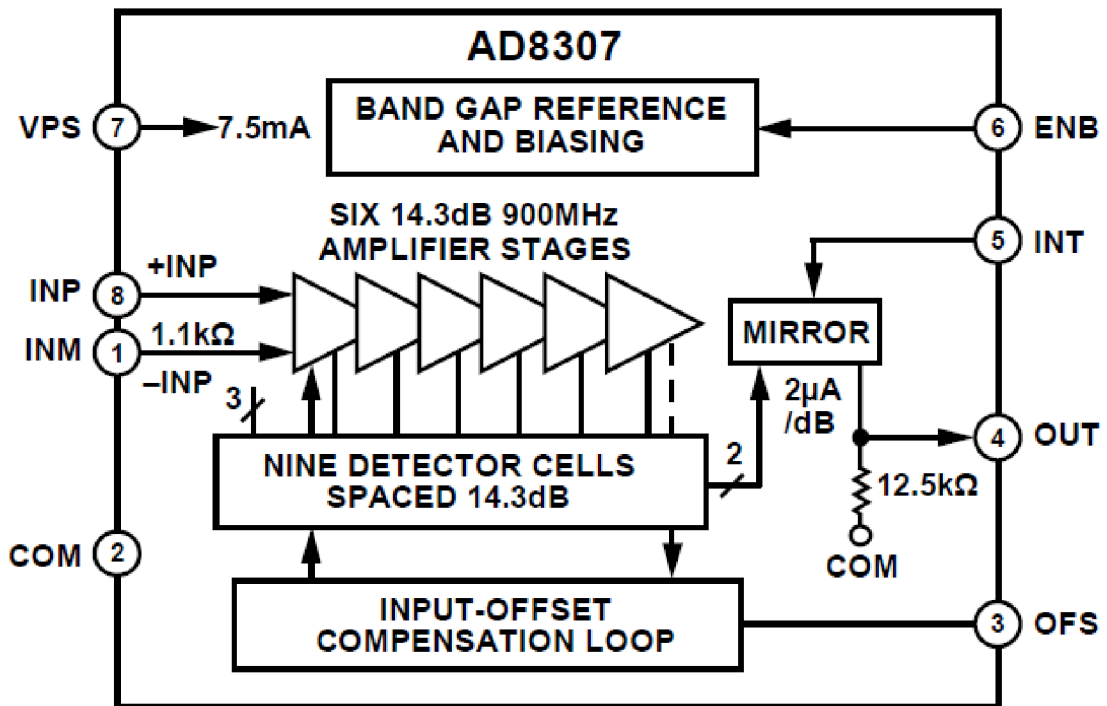
2.3 Detektor s AD8307

Základní logaritmický detektor AD8307 je logaritmický zesilovač s dynamikou od -75 dBm až po +17 dBm, což odpovídá dynamickému rozsahu 92 dBm. Je vybaven symetrickým vstupem, který je jednoduchým způsobem z hlediska vf. vstupu využit jako nesymetrický. Oba vstupy jsou kapacitně vázány, jeden k zemi, druhý k nesymetrickému vstupnímu signálu. Detektor pracuje v kmitočtovém rozsahu od stejnosměrného signálu až po 500 MHz. Minimální napájecí napětí je 2,7 V a typický pracovní proud je 8 mA. Převodní konstanta mezi vstupním vf. výkonem a výstupní ss. napětím je okolo 25 mV/dB, převod je při uvažování logaritmické škály vstupního výkonu v daném rozsahu lineární. Pracovní teplota je -40°C až +85°C. Více informací je možno najít v katalogovém listu obvodu [1].

Tento detektor má velmi široké využití, od samotného měření výkonu, které je v této práci využito, až po indikaci úrovně síly signálu (RSSI) či jako detektor v síťovém a spektrálním analyzátoru.

Interně prvek obsahuje veškeré prvky popsané v kapitole 2.1. Skládá se ze šesti zesilovačů/omezovačů, z nichž každý má zesílení 14,3 dB a šířku pásma 900 MHz. Celkové zesílení je tedy 86 dB a šířka pásma se zmenší na 500 MHz. Jeho struktura je tvořena při pokročilém, dielektricky odděleném, komplementárním bipolárním procesu. Rezistory mají malý teplotní koeficient (TCR) a vysokou linearitu. Přesnost rezistorů je $\pm 20\%$. Tolerance interních kapacitorů je $\pm 15\%$.

Pro správné zapojení detektoru jako součástky je nutné znát správný popis a funkci daného vstupu nebo výstupu obvodu, popis je uveden níže.



Obr. 2.2: Vnitřní zapojení AD8307 (převzato z [1]).

VPS – vstup kladného napájecího napětí v rozsahu +2,7 V až +5,5 V
INP - střídavý vstup + detektoru
INM – střídavý vstup – detektoru
COM – společný pin, spojuje se s GND
ENB – povolení funkce čipu, aktivní v log. H
INT – nastavení offsetu
OUT – výstup detektoru ($R = 12,5 \text{ k}\Omega$)
OFS - nastavení offsetu, externí kondenzátor (4,7 nF)

2.3.1 Návrh detektoru s AD8307

Návrh sondy s logaritmickým detektorem AD8307 a jeho funkce je zřejmá ze schématu (příloha A1). Sonda je na vstupu impedančně přizpůsobena dvěma paralelními rezistory o hodnotě 100Ω , který tak tvoří 50Ω impedanci na vstupu. Vstupní signál je dále oddělen třemi keramickými kondenzátory a vstupuje pak do pozitivního vstupu detektoru. Záporný vstup detektoru je přes kondenzátory symetricky uzemněný, jelikož ho využíváme jako nesymetrický.

Po detekci výkonu se na výstupním pinu č. 4 objeví kladná hodnota stejnosměrného napětí. Pro úpravu sklonu charakteristiky je využita soustava rezistorů ($R_4, R_{17}, R_{18}, R_{20}$) a trimr TR3 definující výstupní zátěž detektoru AD8307. Základní sklon převodní charakteristiky ($U_{ss} = f(P_{vf})$) je 20 mV/dB . Informace o vf. výkonu na vstupu reprezentovaná ss. výstupním napětím je nadále zpracována operačním zesilovačem s jednotkovým zesílením, který pracuje jako sledovač napětí, abychom dále nezatěžovali výstup detektoru. Ss. napětí je filtrováno kondenzátory a případná porucha detektoru a zvýšení napětí na výstupu je ošetřeno transilovou diodou D1.

AD8307 umožňuje nastavit i ofset výstupní ss. složky. K tomuto účelu je z pouzdra čipu vyveden pin s označení INT. Děličem je nastavena vhodná hodnota napětí tak, aby byl ofset co nejmenší.

Povolovací pin ENB je aktivní v log. 1, je tedy připojen na napájecí napětí +5 V (k pinu VPS). Kapacita kondenzátoru pro externí ofset na pinu OFS je zvolena dle katalogového zapojení 4n7.

Napájecí napětí je tvořeno lineárním stabilizátorem IC2 o výstupním napětí 5 V. Jeho vstupní napětí je opět ošetřeno transilovou diodou D5 a diodou D2 proti přepólování napájecího napětí sondy a následně filtrováno kondenzátory. Jeho výstupní napětí je též filtrováno kondenzátory a dále připraveno k použití pro napájení logaritmického detektoru a sledovače napětí. Napájení operačního zesilovače může být zvoleno jako 5 V či 12 V. Je zde určitá univerzálnost návrhu pro případné nutné zesílení výstupního napětí pro případ velkého rušení či ztrát v dlouhém propojovacím kabelu mezi sondou a vyhodnocovací jednotkou.

Detekce připojení sondy je navržena pomocí stabilizační Zenerovy diody

o patřičném katalogovém napětí. Úbytek napětí na této Zenerově diodě v je dále zpracován AD převodníkem, který změří tuto hodnotu k výběru příslušných kalibračních dat.

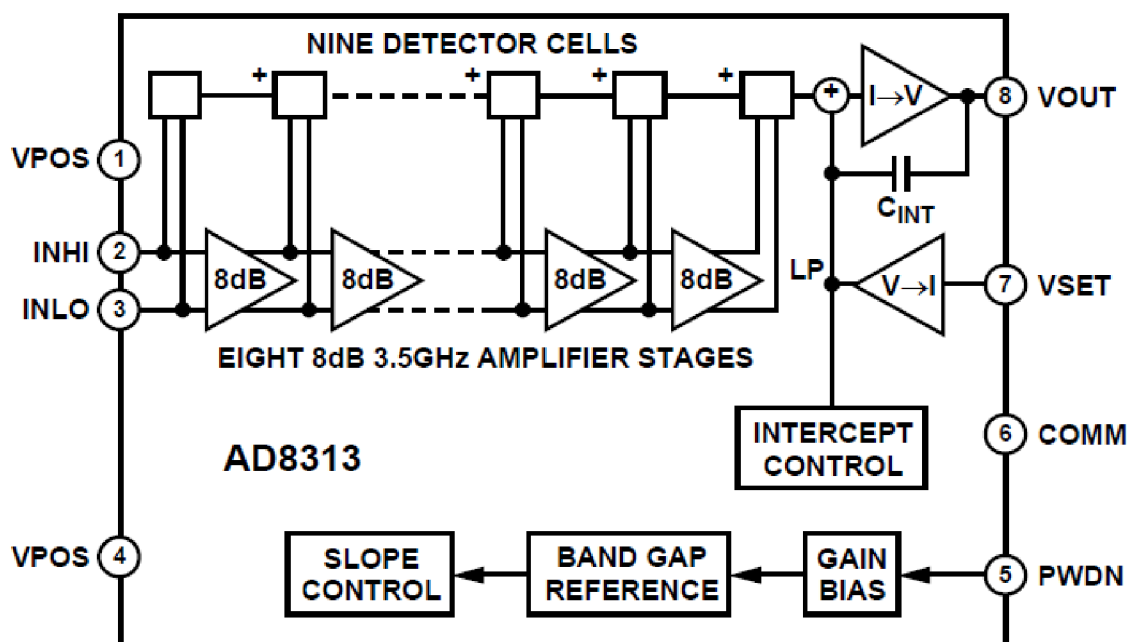
Uvnitř každé sondy je osazen termistor KTY82-220 o hodnotě 2 k Ω , který s teplotou mění svůj odpor. Je tak zapojen v děliči napětí a jednoduchým způsobem jsme schopni měřit napětí děliče, které pak mikroprocesorem přepočteme na teplotu. Výstupní napětí děliče je opět odděleno sledovačem napětí a napětí děliče je filtrováno.

Každá sonda má k dispozici dva piny na výstupním konektoru X1 pro napájení ventilátoru (pin 5 a 9). Jeho osazení není v této práci zvoleno, ale navržená DPS může být využita i tam, kde bude ventilátor k chlazení třeba (např. v případě doplnění sondy o vf. výkonové zatěžovací rezistory pro měření větších vf. výkonů nebo při instalaci v anténní věži s možným nárůstem teploty ve skříni za působení slunečního záření). Spínání je uskutečněno na řídicí desce podle aktuální teploty uvnitř dané sondy pomocí tranzistoru řízeného mikroprocesorem.

2.4 Detektor s AD8313

Oproti obvodu AD8307 se detektor AD8313 vyznačuje menším dynamickým rozsahem (70 dB) a vyšším kmitočtovým rozsahem. Jeho kmitočtový rozsah je od 0,1 do 2,5 GHz.

V tomto případě čip obsahuje celkem 9 interních zesilovačů/omezovačů, které pracují zcela analogicky jako v případě sondy s AD8307. Jejich výstup je opět transkonduktancí převáděn na napětí a následně na výstup pouzdra. Opět je zde blok napájení a blok ofsetu. Zesilovače mají nastavené zesílení 8 dB. Více informací je možno najít v katalogovém listu obvodu [2].



Obr. 2.3: Vnitřní zapojení AD8313 (převzato z [2]).

VPS – vstup kladného napájecího napětí v rozsahu +2,7 V až +5,5 V

INHI – střídavý vstup + detektoru

INLO – střídavý vstup – detektoru

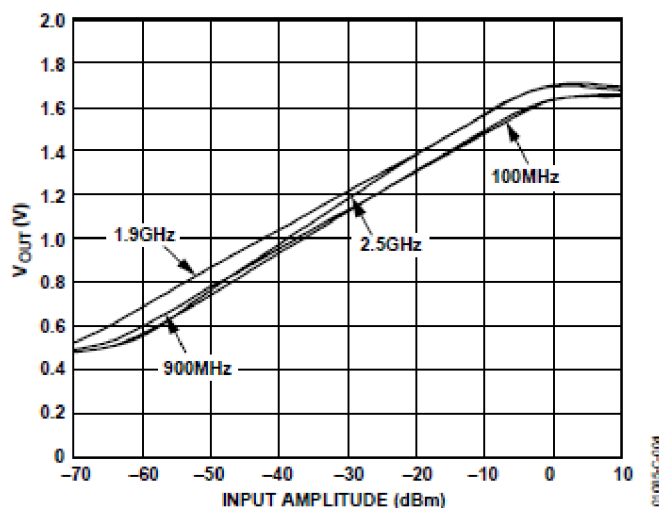
COMM – společný pin, spojuje se s GND

PWDN – povolení funkce čipu, aktivní v log. L

VSET – možnost nastavení čipu jako detektoru určité hranice, při normálním provozu je VSET a VOUT spojeno

VOUT – logaritmický výstup čipu

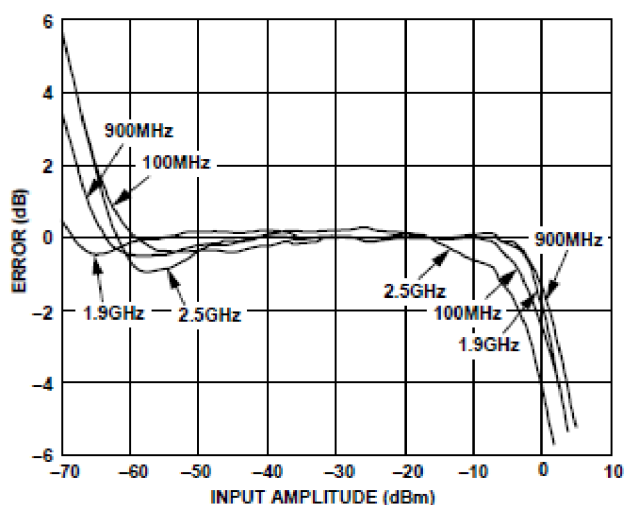
Detektor AD8313 je opět vybaven symetrickým vstupem, který je upraven pro nesymetrický vf. vstup. Minimální napájecí napětí je 2,7 V, maximální 5,5 V. Typický pracovní proud je 13,5 mA. Strmost převodu je 20 mV/dB. Rozsah pracovní teploty je opět od -40°C do +85°C.



Obr. 2.4: Typická závislost výstupního napětí na vstupním výkonu (převzato z [2]).

Z obrázku 2.4. je patrné, že výstupní napětí je závislé na vstupním výkonu a pracovním kmitočtu. Proto bude nutné provádět kalibraci sondy i v závislosti na frekvenci a nejen na vstupním výkonu. Sonda jsou nepatrně citlivé i na změnu teplot, proto bude využit interní termistor k možnému „dokalibrování“ hodnot.

Jelikož se jedná o reálné zesilovače, které jsou obsaženy uvnitř čipu, je výstupní napětí závislé i na frekvenci. Chyba měření, zobrazena na obrázku 2.5 je v lineární části do několika desetin dB, pro vf. vstupní výkon blízký se limitním hodnotám pak roste až k ± 6 dB a je výraznější pro vyšší frekvence vstupního signálu.



Obr. 2.5: Typická závislost chyby měření detektoru na vstupním výkonu pro různé frekvence (převzato z [2]).

2.5 Návrh detektoru s AD8313

Návrh sondy s logaritmickým detektorem AD8313 a jeho funkce je zřejmá ze schématu (příloha A2).

Jak je vidět, sonda je na vstupu impedančně přizpůsobena rezistorem R1 mezi vstupy INHI a INLO o hodnotě 51 Ω . Vstupní signál je hned na vstupu oddělen keramickým kondenzátorem C5 a vstupuje pak do pozitivního vstupu detektoru INHI. Záporný vstup detektoru INLO je přes kondenzátor C6 symetricky uzemněný.

Po detekci výkonu se na výstupním pinu č. 8 objeví kladná hodnota stejnosměrného napětí. Pro úpravu sklonu charakteristiky je využita soustava rezistorů jako definovaná zátěž detektoru. Základní výstupní sklon je jako u sondy s AD8307 20 mV/dB. Ss. výstupní napětí reprezentující informaci o vf. výkonu na vstupu je dále zpracována operačním zesilovačem ve funkci sledovače napětí tak, abychom dodatečně nezatěžovali výstup detektoru. Napětí je opět filtrováno kondenzátory C14 a C15 a případná porucha detektoru a zvýšení napětí na výstupu je ošetřeno transilem D1 pro ochranu měřicího přístroje za sondou.

AD8313 umožňuje nastavit děličem určitou mez napětí na výstupu (odpovídá vstupnímu výkonu), kdy se chová jako komparátor a poskytuje tak na výstupním pinu VOUT hodnotu log. 1 či log. 0. Tato funkce se může využívat pro automatické řízení výstupního výkonu v různých jiných aplikacích AD8313. Povolovací pin PWDN je aktivní v log. 0

Napájecí napětí je tvořeno lineárním stabilizátorem IC2 o výstupním napětí 5 V. Jeho vstupní napětí je opět ošetřeno transilovou diodou D5 a diodou D2 proti přepólování napájecího napětí sondy a filtrováno řadou kondenzátorů. Jeho výstupní napětí je též filtrováno kondenzátory a následně připraveno k použití pro napájení logaritmického detektoru a sledovače napětí. Napájení operačního zesilovače může být zvoleno jako 5 V či 12 V. Podobně jako v případě sondy s detektorem AD8307 je i zde určitá univerzálnost návrhu pro případné nutné zesílení výstupního napětí pro případ velkého rušení či ztrátám ve výstupním kabelu.

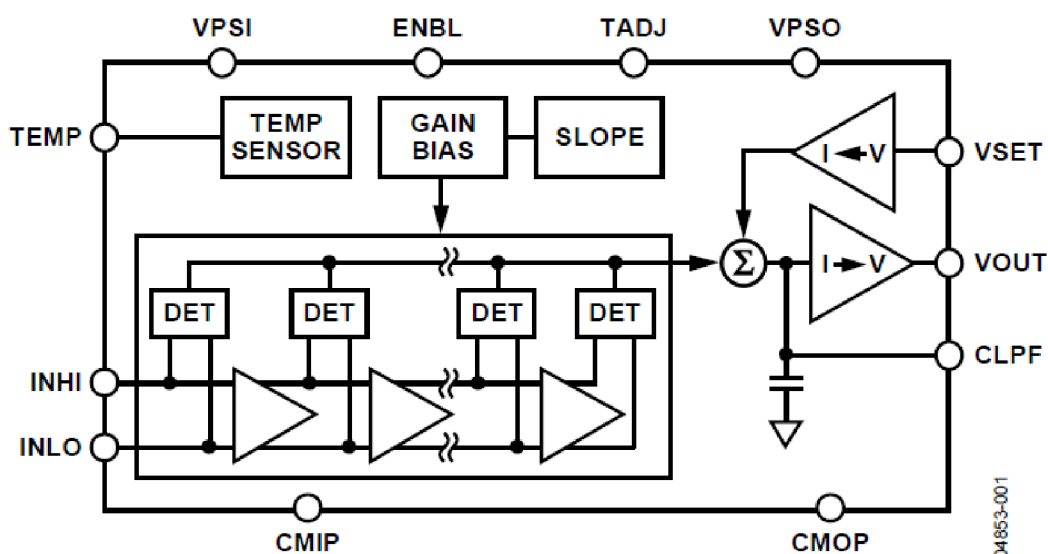
Stejně tak i detekce připojení sondy je navržena pomocí stabilizační Zenerovy diody o patřičném katalogovém napětí pro výběr daných kalibračních dat.

Uvnitř je opět osazen termistor pro možnost měření teploty uvnitř krabičky.

2.6 Detektor s AD8318

Oproti AD8307 se detektor AD8318 opět vyznačuje dynamickým rozsahem než AD8313 (70 dB) a značně vyšším kmitočtovým rozsahem. Jeho kmitočtový rozsah je od 0,1 do 8 GHz.

V tomto případě čip stejně jako u AD8313 obsahuje celkem 9 interních zesilovačů, které pracují zcela analogicky jako v případě sondy s AD8307 či AD8313. Opět je zde blok napájení, blok ofsetu a povolení funkce. Zesilovače mají nastavené zesílení 8,7 dB. Více informací je uvedeno v katalogovém listu obvodu [3].



Obr. 2.6: Vnitřní struktura AD8318 (převzato z [3]).

VPSI, VPSO – vstup kladného napájecího napětí v rozsahu +4,5 V až +5,5 V

INHI – střídavý vstup + detektoru (-60 až 0 dBm)

INLO – střídavý vstup – detektoru

CMIP, CMOP – společný pin, spojuje se s GND

ENBL – povolení funkce čipu, aktivní v log. H (připojeno přes 200 Ω)

VSET – možnost nastavení čipu jako detektoru určité hranice, při normálním provozu je VSET a VOUT spojeno

VOUT – logaritmický výstup čipu

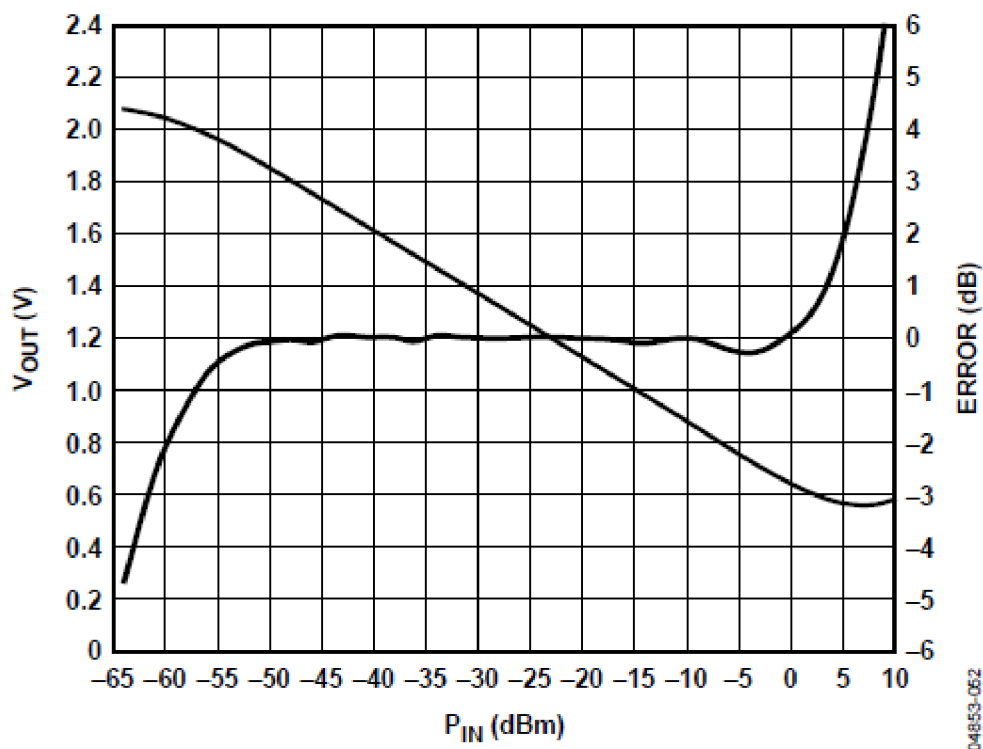
CLPF – filtr s kapacitou 100 pF

TADJ – teplotní kompenzace čipu, připojeno na rezistor o hodnotě 510 Ω

TEMP – teplotní senzor, zde nezapojeno

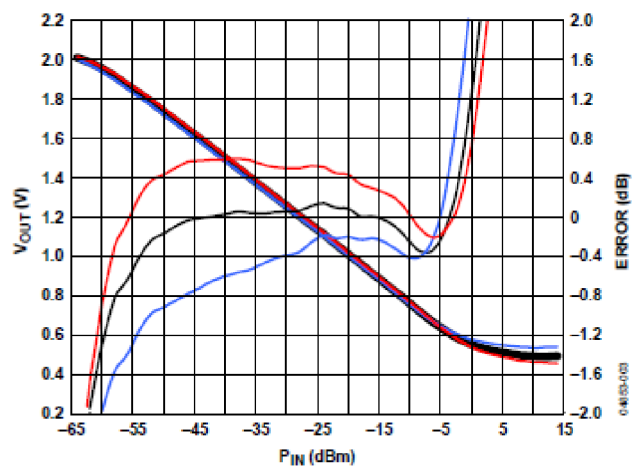
Z obrázku 2.8 je možno pozorovat inverzní závislost výstupního napětí na vstupním výkonu. S větším vstupním výkonem je menší napětí na výstupním pinu VOUT.

Detektor AD8318 je opět vybaven symetrickým vstupem, který je z hlediska vf. vstupu konfigurován jako nesymetrický. Minimální napájecí napětí je 4,5 V, maximální 5,7 V. Typický pracovní proud je podstatně vyšší než u předchozích dvou sond, dosahuje 68 mA. Strmost převodní charakteristiky je -25 mV/dB, což odpovídá 500 mV/dekádu. Rozsah teploty je opět od -40°C do +85°C.

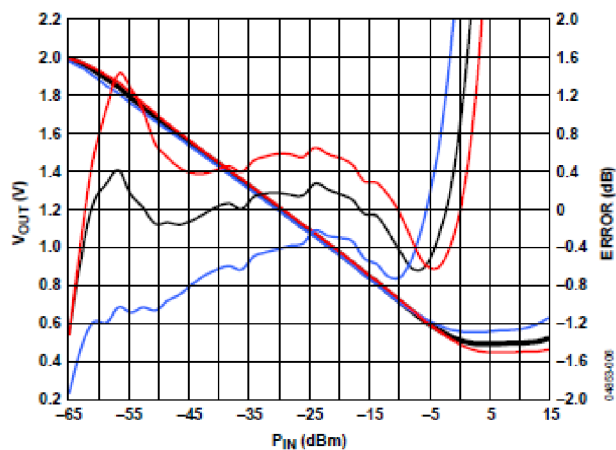


Obr. 2.7: Typická závislost výstupního napětí na vstupním výkonu a chyby měření sondy AD8318 (převzato z [3]).

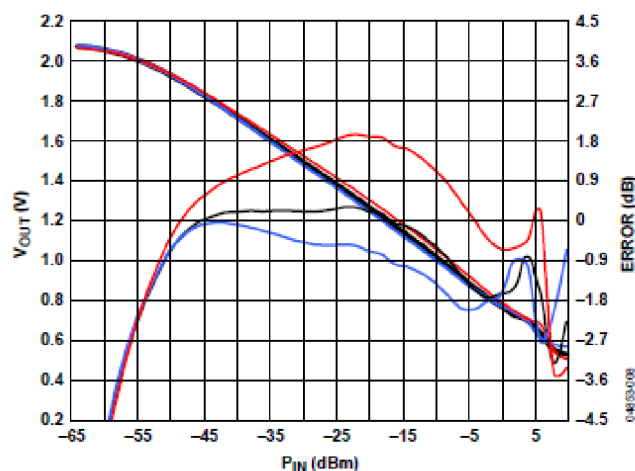
Z obrázku 2.8, 2.9 a 2.10 je zřejmé, že výstupní napětí je závislé na vstupním výkonu a opět samozřejmě na pracovním kmitočtu. Proto bude opět nutné provádět kalibraci sondy i v závislosti na frekvenci a nejen na vstupním výkonu. V grafech je vyobrazena vždy i křivka chyby měření (ERROR) převodu výkonu na napětí.



Obr. 2.8: Typická závislost chyby vůči lineární převodní charakteristice v závislosti na vstupním výkonu a teplotě okolí (modrá -40°C , černá $+25^{\circ}\text{C}$, červená $+85^{\circ}\text{C}$) pro kmitočet 900 MHz (převzato z [3]).



Obr. 2.9: Typická závislost chyby vůči lineární převodní charakteristice v závislosti na vstupním výkonu a teplotě okolí (modrá -40°C , černá $+25^{\circ}\text{C}$, červená $+85^{\circ}\text{C}$) pro kmitočet 3,6 GHz (převzato z [3]).



Obr. 2.10: Typická závislost chyby vůči lineární převodní charakteristice v závislosti na vstupním výkonu a teplotě okolí (modrá -40°C , černá $+25^{\circ}\text{C}$, červená $+85^{\circ}\text{C}$) pro kmitočet 8 GHz (převzato z [3]).

2.6.1 Návrh detektoru s AD8318

Návrh sondy s logaritmickým detektorem AD8318 a jeho funkce je zobrazena na schématu (příloha A3). Jak je vidět, sonda je na vstupu impedančně přizpůsobena rezistorem R1 o hodnotě $51\ \Omega$. Vstupní signál je poté oddělen keramickým kondenzátorem C27 a vstupuje pak do pozitivního vstupu detektoru INHI. Záporný vstup detektoru INLO je přes kondenzátor C28 symetricky uzemněný

Po detekci výkonu se na výstupním pinu VOUT objeví kladná hodnota stejnosměrného napětí. Základní sklon převodní charakteristiky je nastaven na hodnotu $-25\ \text{mV/dB}$. Pro úpravu a otočení sklonu charakteristiky je využit invertor s operačním zesilovačem IC3, jeho část A. V zásadě otočení sklonu charakteristiky není nutné, ale bylo využito, aby nemusely být v paměti CPU definovány záporné hodnoty pro kalibraci.

Výstupní napětí sondy je opět přivedeno na pin č. 3 konektoru DB9-M. Napětí je opět filtrováno kondenzátory C14 a C15 a případná porucha detektoru a zvýšení napětí na výstupu je ošetřeno transilem D1 pro ochranu měřicího přístroje za sondou.

AD8318 umožňuje nastavit děličem určitou mez napětí na výstupu (odpovídá vstupnímu výkonu), kdy se chová jako komparátor a nastavuje tak na výstupním pinu VOUT hodnotu log. 1 či log. 0. Tato funkce se může využívat pro automatické řízení výstupního výkonu v různých jiných aplikacích AD8318.

Povolovací pin PWDN je aktivní v log. 1. Napájecí napětí je tvořeno lineárním stabilizátorem IC2 o výstupním napětí 5 V. Jeho vstupní napětí je opět ošetřeno transilovou diodou D5 a diodou D2 proti přepólování napájecího napětí sondy a dále je pak filtrováno řadou kondenzátorů. Jeho výstupní napětí je též filtrováno kondenzátory a dále připraveno k použití pro napájení logaritmického detektoru a

sledovače napětí. Napájení operačního zesilovače může být zvoleno jako 5 V či 12 V. Je zde opět určitá univerzálnost návrhu pro případné nutné zesílení výstupního napětí pro případ velkého rušení či ztrátám ve výstupním kabelu.

Detekce připojení sondy je navržena pomocí stabilizační Zenerovy diody o patřičném katalogovém napětí s využitím pro výběr příslušných kalibračních dat.

Uvnitř sondy je opět osazen termistor pro možnost měření teploty uvnitř krabičky. AD8318 umožňuje i možnost teplotní kompenzace uvnitř čipu pomocí připojení externího rezistoru na pin TADJ. Dle doporučení výrobce byla zvolena hodnota 510 Ω .

Tab. 2.2: Doporučené hodnoty rezistoru pro teplotní kompenzaci čipu AD8318

Frekvence [GHz]	Doporučený R_{TADJ} [Ω] (rezistor R22 ve schématu)
0,9	500
1,9	500
2,2	500
3,6	51
5,8	1000
8,0	500

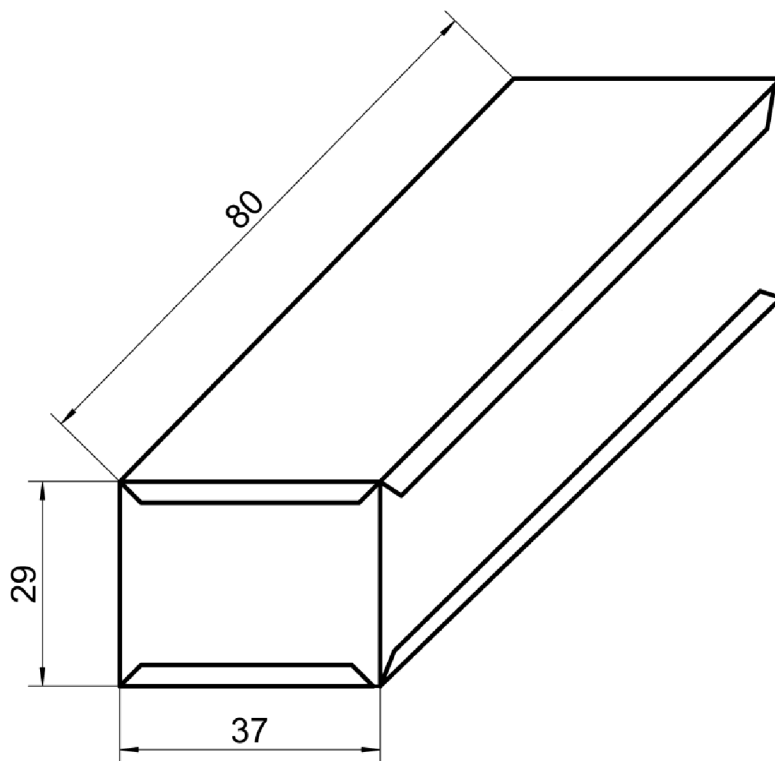
3 REALIZACE A MĚŘENÍ DETEKTORŮ

3.1 Oživení a konstrukce sond

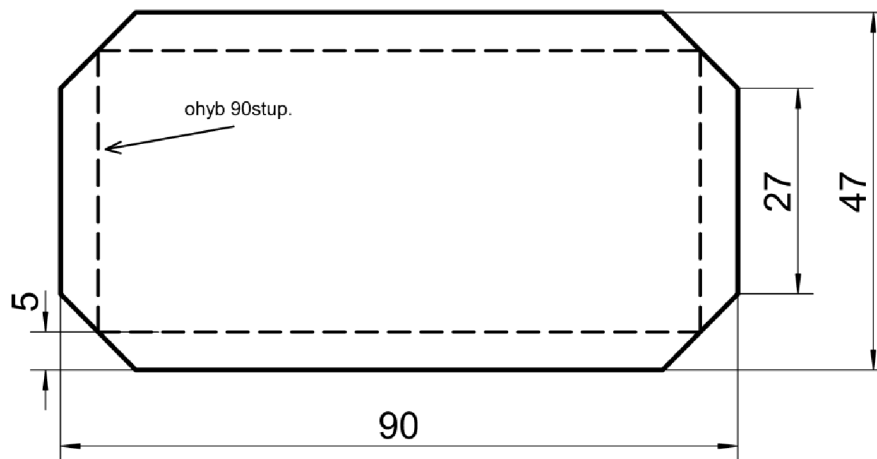
Po návrhu DPS pro jednotlivé sondy a osazení součástkami byly sondy oživeny. Oživení probíhalo po blocích, tzn., že nejprve byl oživen blok napájení, poté sledovač napětí na výstupu detektoru a až nakonec byl samotný detektor připojen do obvodu. Nastavení ofsetu, který umožňuje sonda s AD8307 a AD8318 proběhlo až po úspěšném oživení každého detektoru.

Jakmile byly všechny detektory úspěšně zprovozněny, nastala jejich montáž do krabiček z pocínovaného plechu. Jedná se o prototypové, ručně vyrobené krabičky s možností otevírání spodní i horní strany. Spodní strana detektorů je nakonec zapájena kvůli neužívání spodní strany desky, po které je rozlité plocha zemnicí mědi. Jako vysokofrekvenční konektor na vstupu sondy je zvolen typ N - FEMALE – „samice“, jako výstupní konektor pak DB9 - MALE – „samec“.

Krabičky jsou zhotoveny vždy o rozměrech 80 x 37 x 29 (délka x šířka x výška) z pocínovaného plechu o tloušťce 0,4 mm, kryty z pocínovaného plechu o tloušťce 0,3 mm. Plechy jsou zohýbány tak, aby tvořily pravý úhel a bylo možné složit obdélník (viz obr. 3.1). Ten je v každém spoji spájen cínem.



Obr. 3.1: Celkový pohled na krabičku



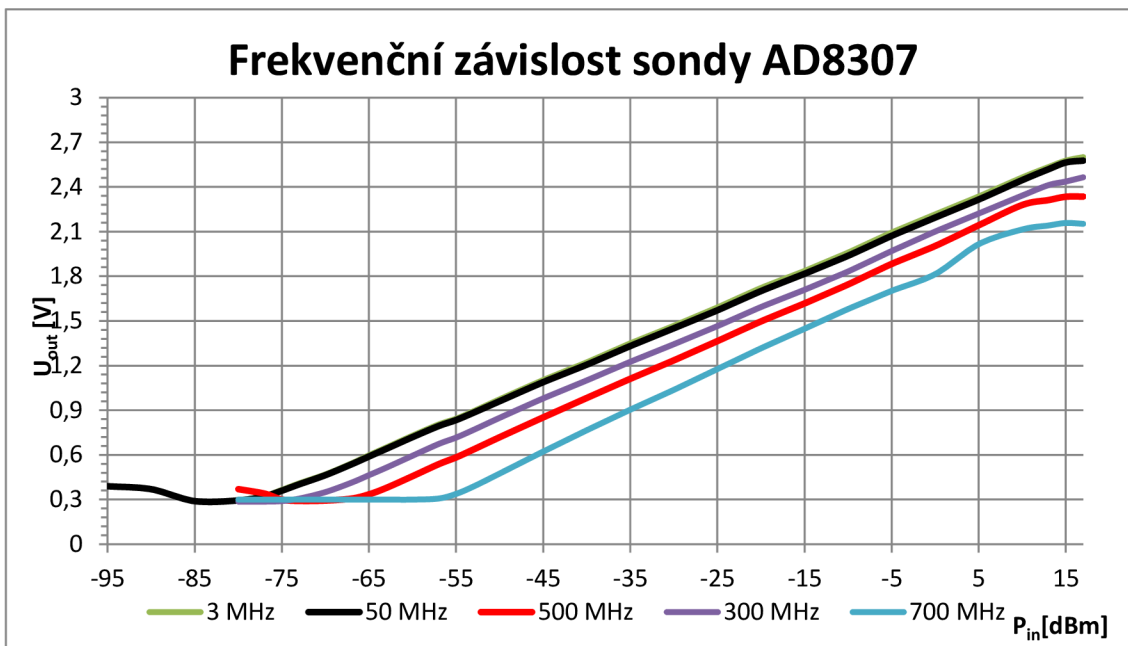
Obr. 3.2: Rozměry horního a spodního krytu krabiček

Desky plošných spojů každé sondy mají okolo svého obvodu vždy pás mědi tak, aby se dala DPS připájet k vnitřní straně krabičky a nedržela tak pouze na konektorech. Kompletní sondy jsou zapouzdřeny do teplem smrštitelné bužírky s nálepkou s parametry a označením dané sondy.

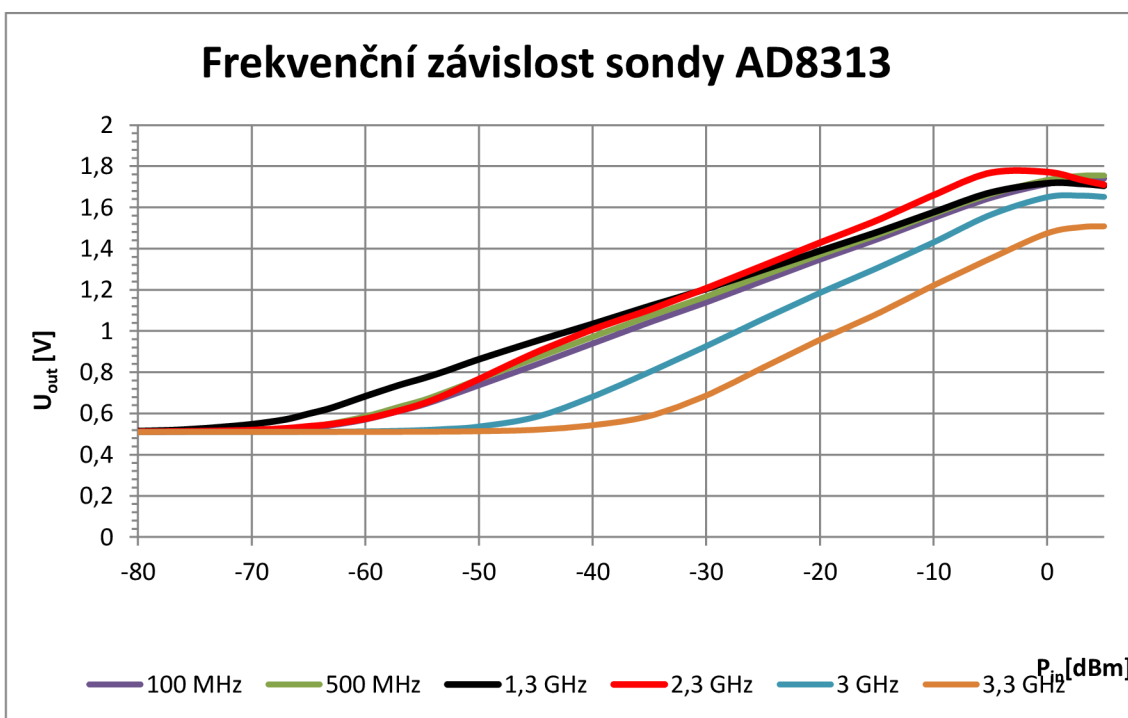
3.2 Kalibrace sond

Po správnou funkčnost sond je nutné je kalibrovat. Využívá se dvou základních kalibrací a to závislosti výstupního napětí na vstupním výkonu při konstantním kmitočtu a závislosti výstupního napětí na změně frekvence při konstantním vstupním výkonu. Kalibrace byla prováděna po oživení a zhotovení kompletních sond uzavřených v krabičkách na generátorech Rohde&Schwarz SMV 03 (9 kHz – 3 GHz) a Hewlett Packard 83640A (10 MHz - 40 GHz) a na pětimístném kalibrovaném multimetru Hewlett-Packard 3478A ve vlastnictví firmy DCom, spol. s.r.o. Kalibrační hodnoty pro každou sondu jsou uvedeny v příloze v části I.

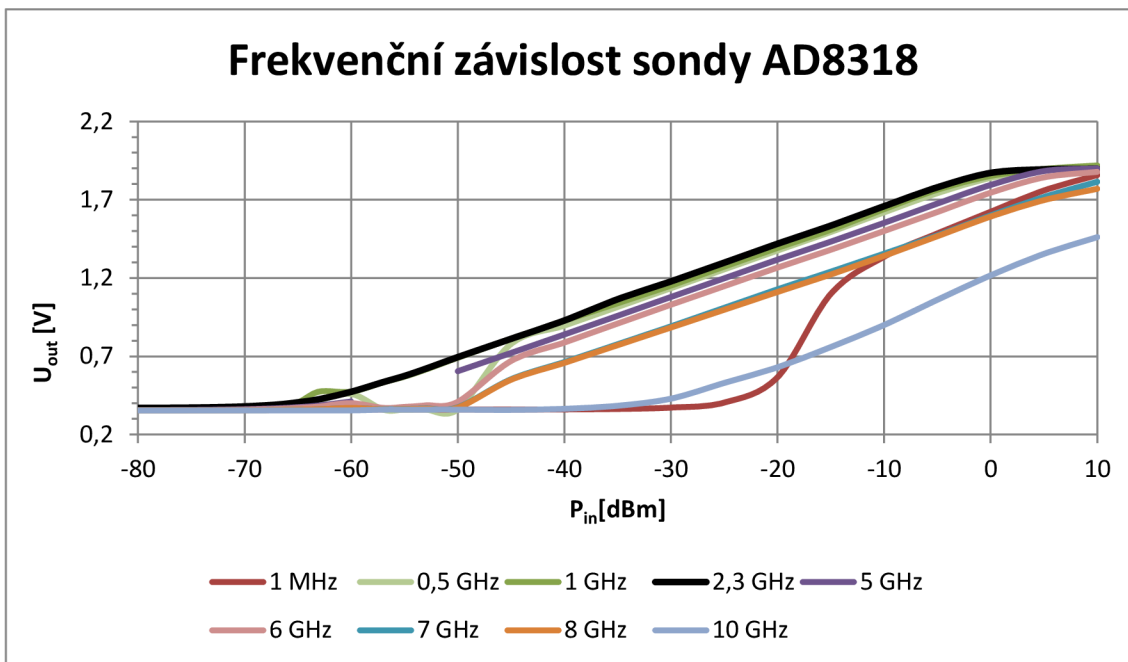
Nejprve se bylo nutné ujistit, zda jsou sondy frekvenčně závislé, jak vyplývá z katalogových grafů. Předpoklad se potvrdil (viz obr. 3.3, 3.4 a 3.5) pro každou sondu jelikož jsou uvnitř reálné a nikoliv ideální operační zesilovače a další prvky. Tuto nečinnost nelze nijakým způsobem ovlivnit, protože je to vlastnost čipu a musí se při konstrukci měřiče brát v potaz.



Obr. 3.3: Přenosová charakteristika sondy AD8307 v závislosti na různých frekvencích

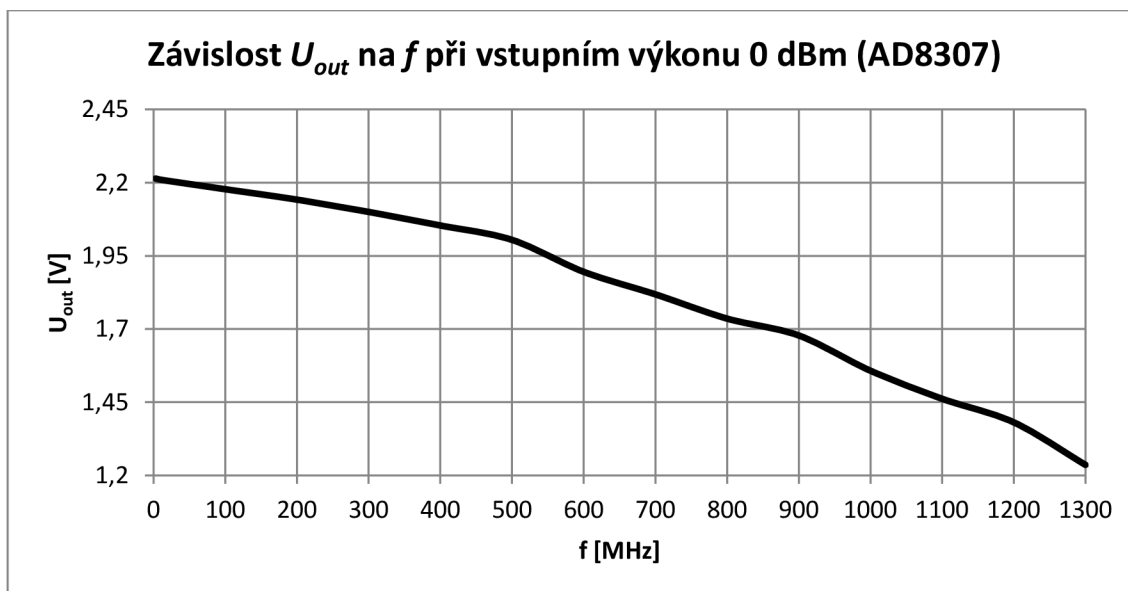


Obr. 3.4: Přenosová charakteristika sondy AD8313 v závislosti na různých frekvencích

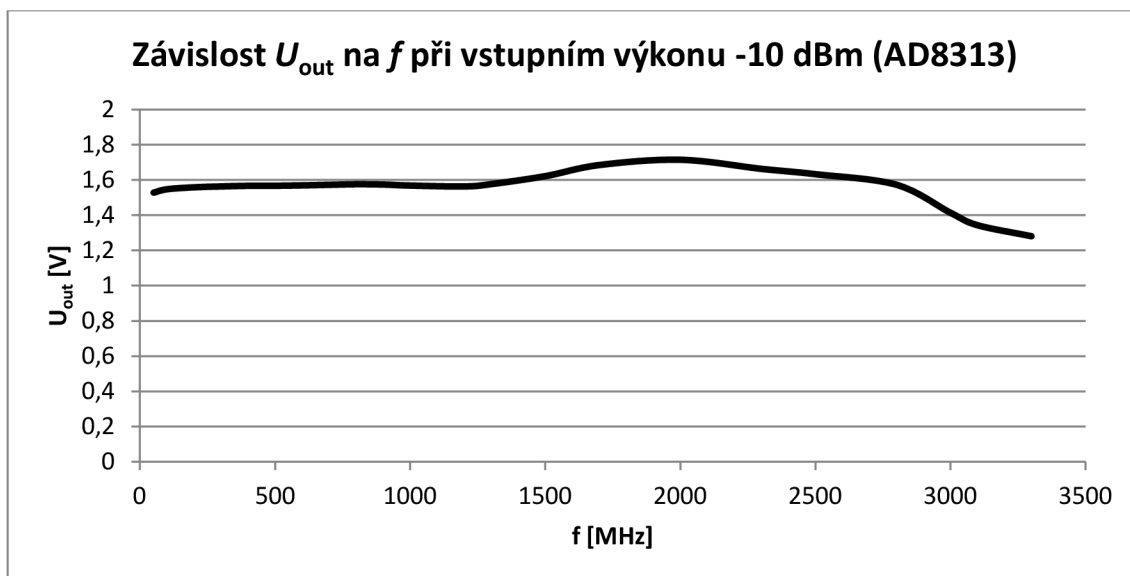


Obr. 3.5: Přenosová charakteristika sondy AD8318 v závislosti na různých frekvencích

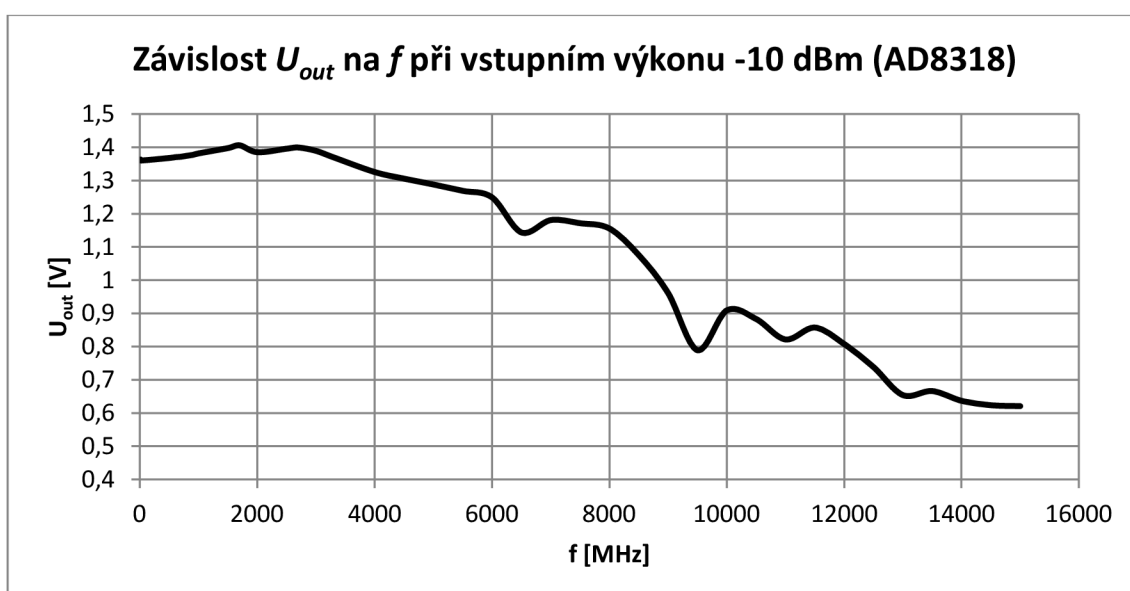
Druhou kalibrací je závislost výstupního napětí na změně frekvence při konstantním vstupním výkonu. Tuto závislost bylo nutné změřit, protože bude následně využita pro frekvenční ofset při vybrání určité pracovní frekvence měřiče.



Obr. 3.6: Závislost U_{OUT} na frekvenci pro konstantní P_{IN} u sondy AD8307

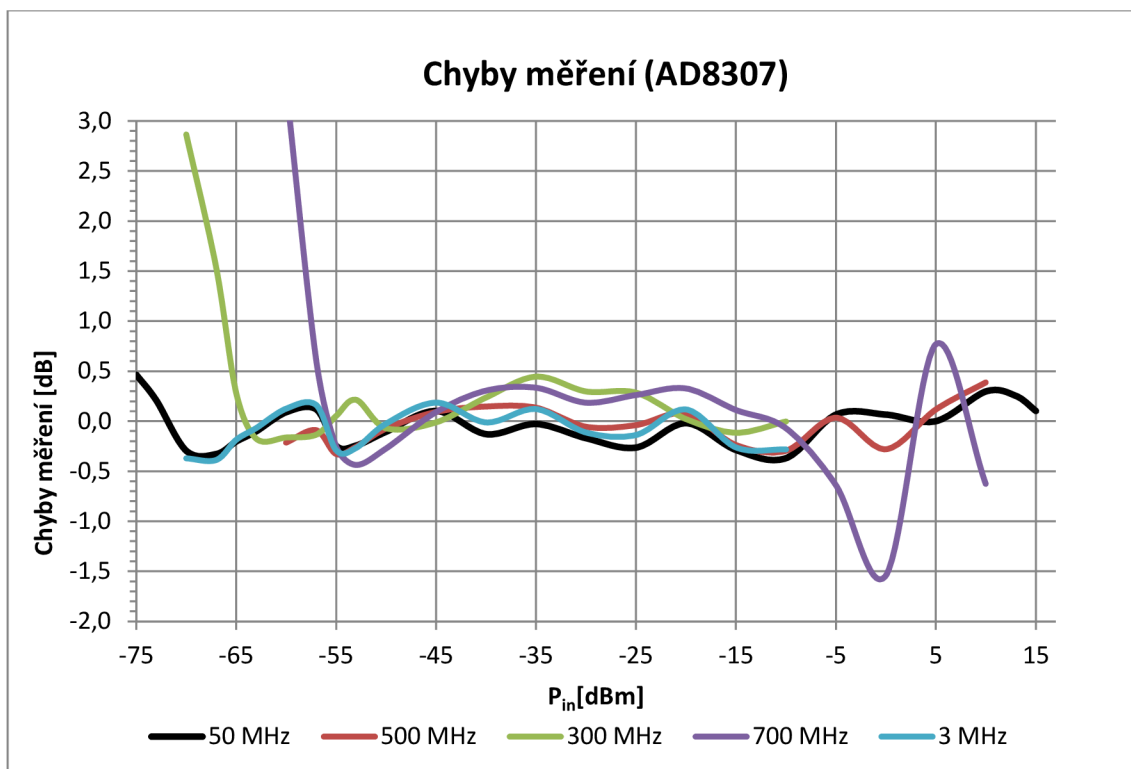


Obr. 3.7: Závislost U_{OUT} na frekvenci pro konstantní P_{IN} u sondy AD8313

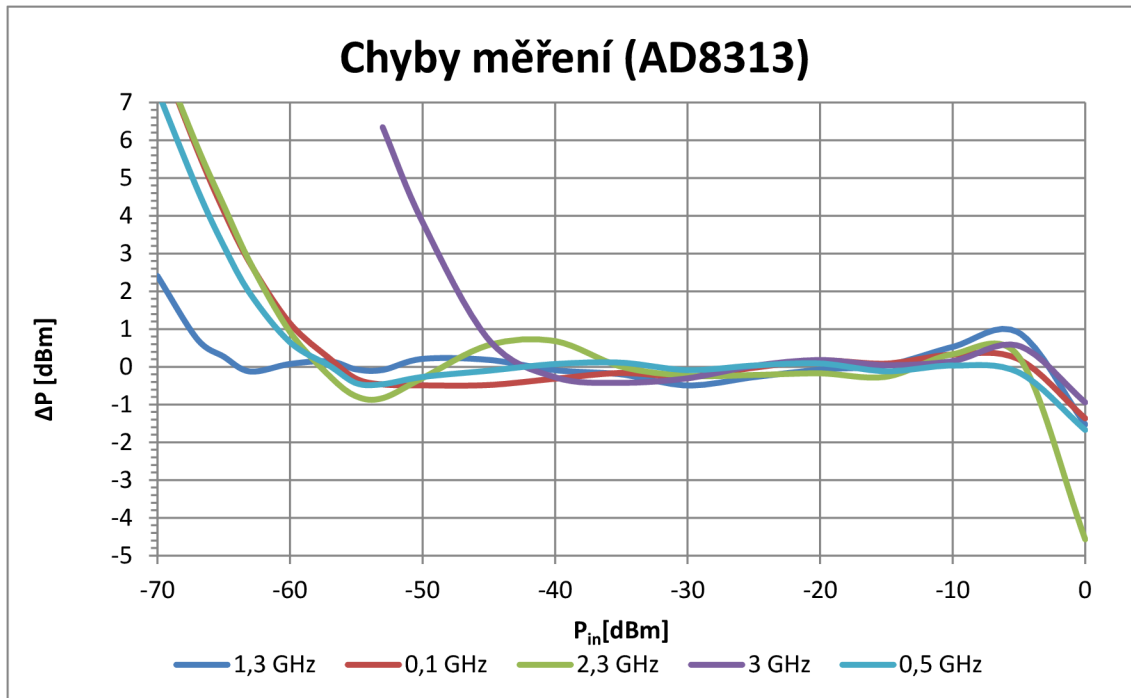


Obr. 3.8: Závislost U_{OUT} na frekvenci pro konstantní P_{IN} u sondy AD8318

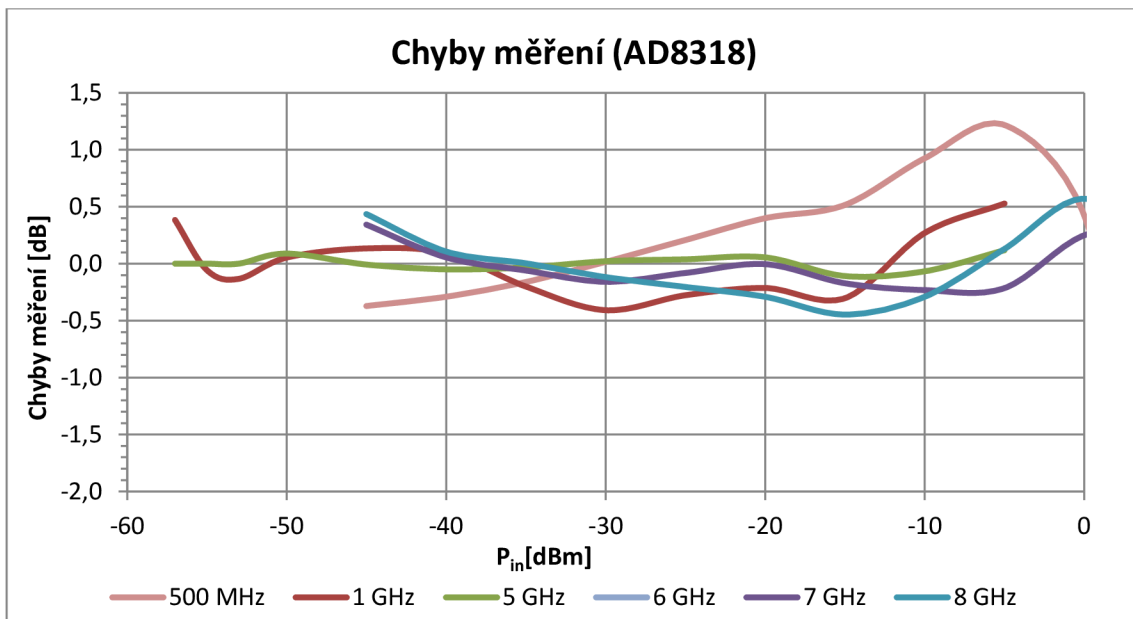
Po oživení a kalibraci sond zbývá už jen určit, jaké chyby měření výkonu se budeme dopouštět, použijeme-li celý dynamický rozsah každé sondy a poté určit jakou chybu měření budeme mít při vztažení k jedné přepočítané hodnotě výkonu. Následující grafy zobrazují chyby měření jednotlivých sond vůči přepočítání na výkon pomocí směrnice přímky frekvenčních závislostí sond (grafy 3.9, 3.10, a 3.11). Směrnice přímky byla realizována pouze z lineární části, aby měření bylo co nejpřesnější, a pouze tam bude měřicí sonda reálně měřit s malou odchylkou.



Obr. 3.9: Absolutní chyba měření sondy s AD8307 vztažená k přesné hodnotě generátoru



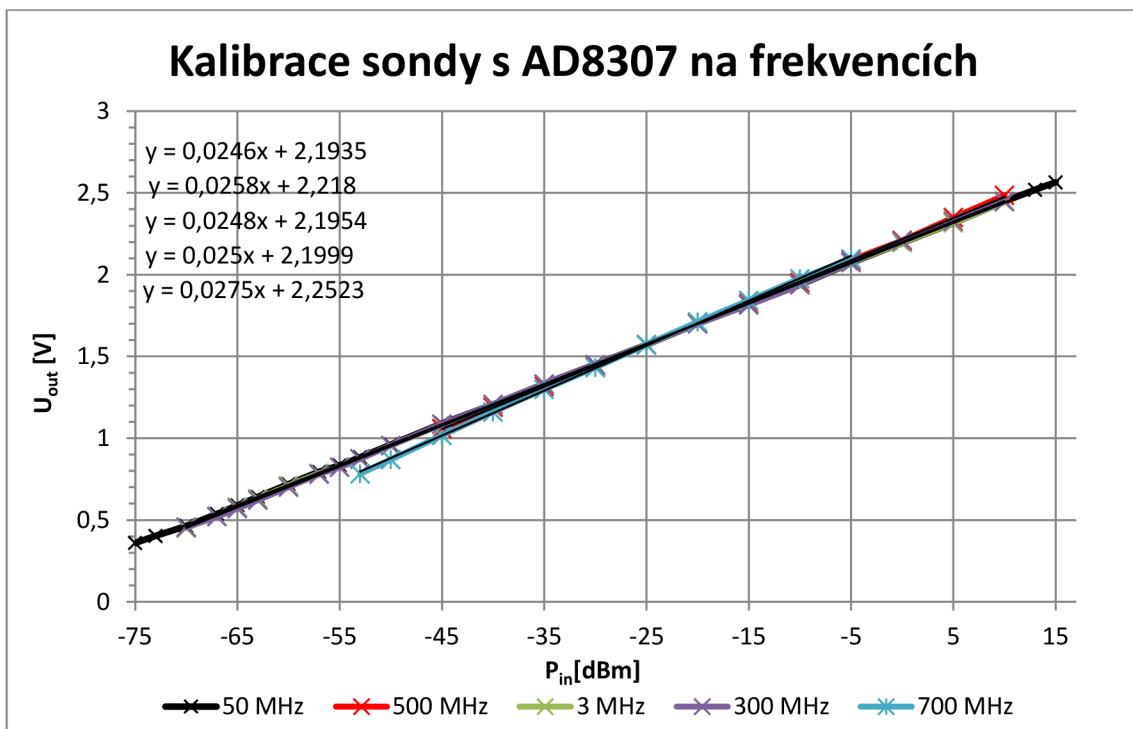
Obr. 3.10: Absolutní chyba měření sondy s AD8313 vztažená k přesné hodnotě generátoru



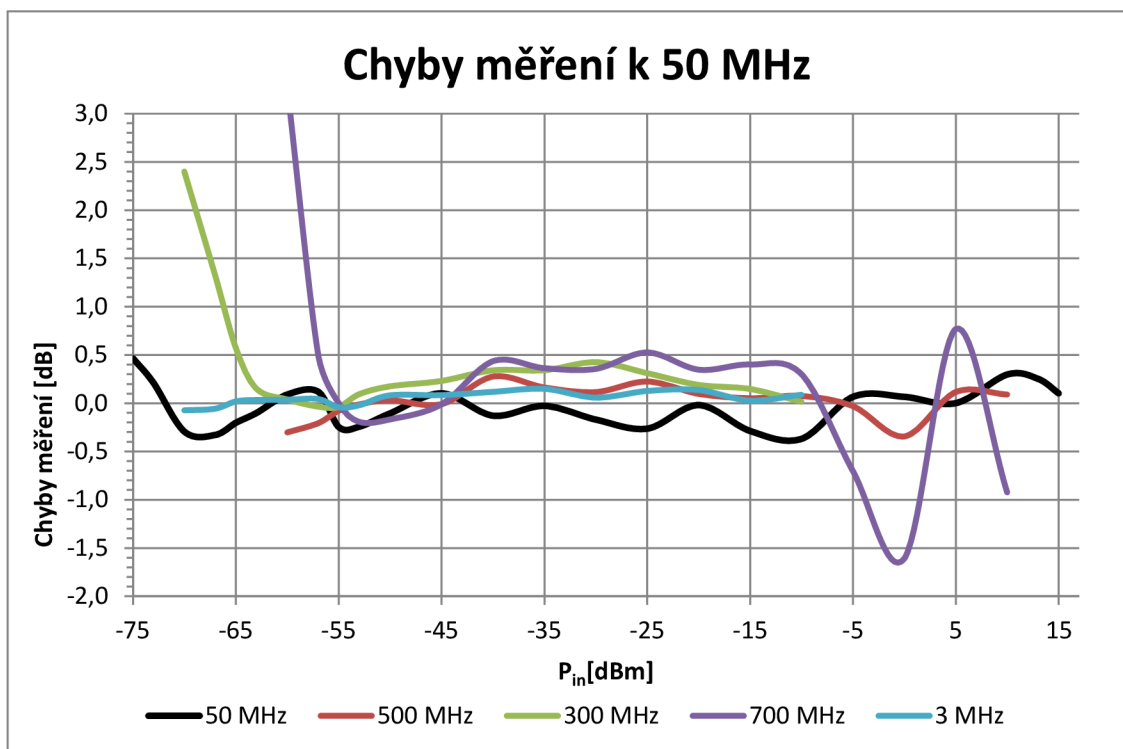
Obr. 3.11: Absolutní chyba měření sondy s AD8318 vztažená k přesné hodnotě generátoru

Následně byly všechny křivky frekvenční závislosti ofsetově „dotaženy“ při hodnotě -25 dBm a zobrazeny směrnice přímky. V dalším postupu byl opět zkonstruován graf chyby měření při vztahu k frekvenci 50 MHz.

Pro všechny případy sond je uveden výsledek pro sondu s AD8307.



Obr. 3.12: Napěťový ofset dotažený na 50 MHz pro sondu s AD8307

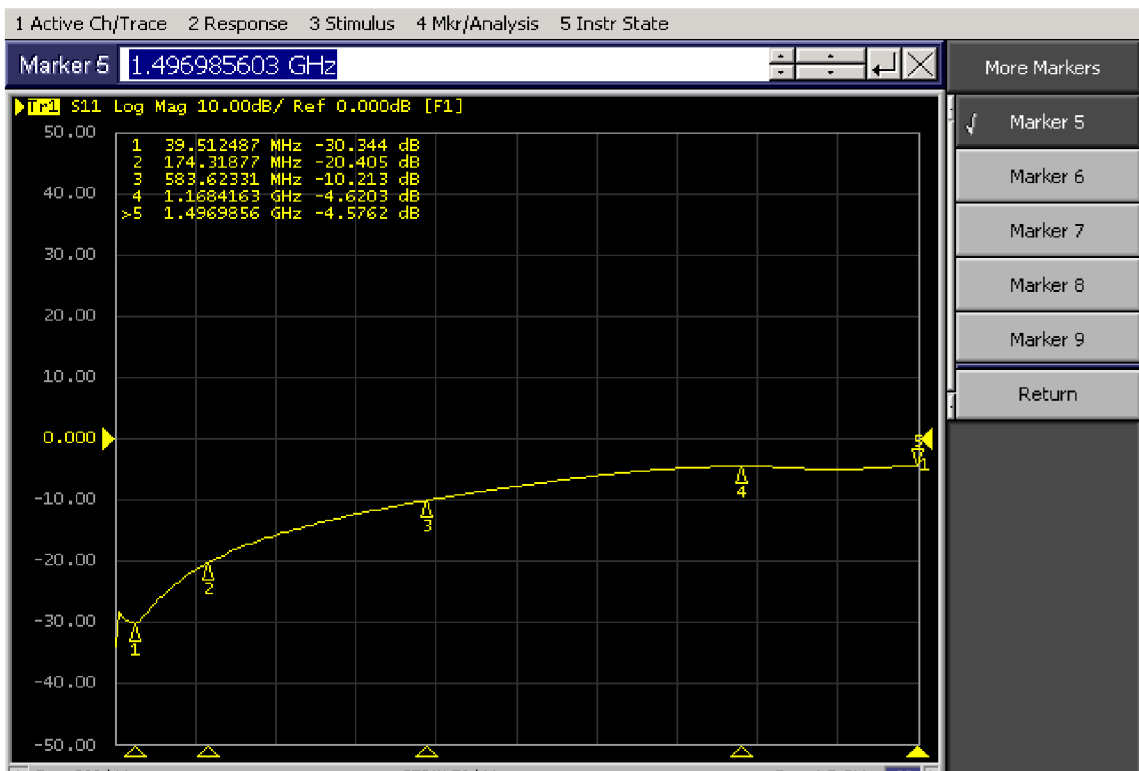


Obr. 3.13: Chyba měření vztažená k 50 MHz pro sondu s AD8307

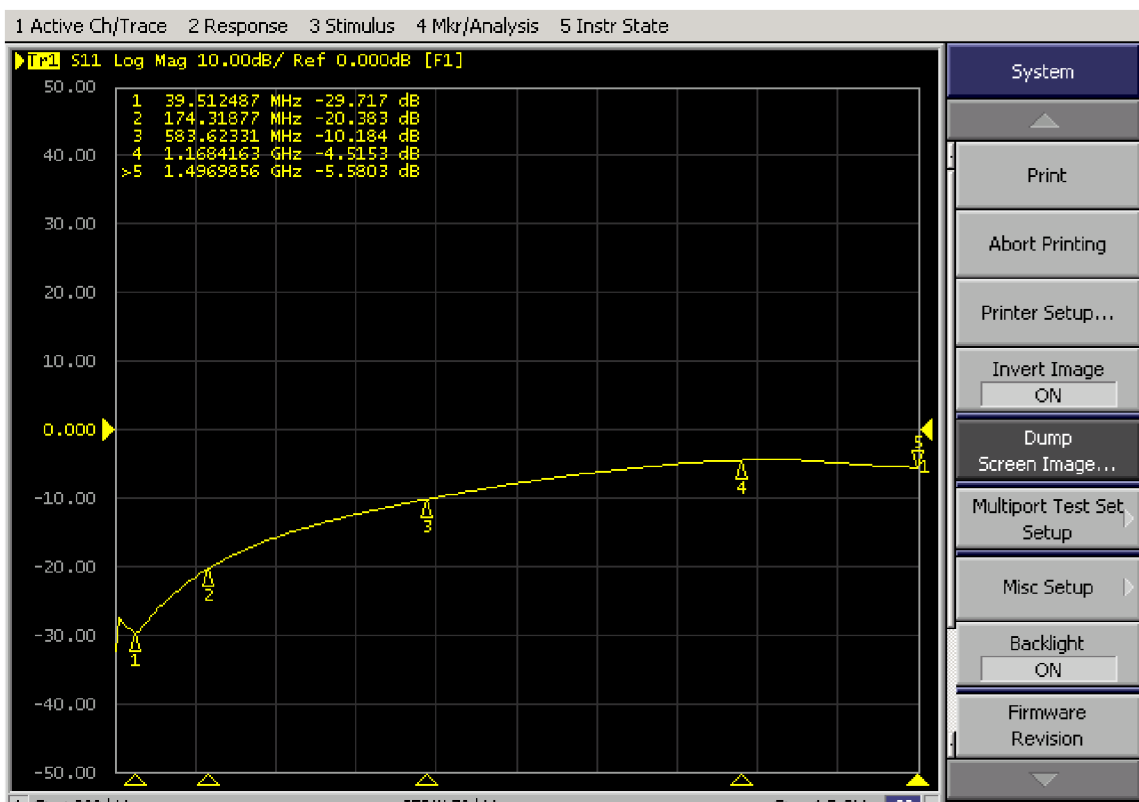
Nutno podotknout, že grafy chyb měření uvedené v této práci jsou přes celý dynamický rozsah měření. Z grafu č. 3.13 vyplývá, že chyba měření je vždy do $\pm 0,5$ dB a není nutná třetí kalibrace dle sklonu charakteristiky. Při užití lineární aproximace v programu měřiče během přepočítávání napětí na výkon bude tato chyba mnohonásobně nižší.

3.1 Činitel odrazu na vstupu sond (S_{11})

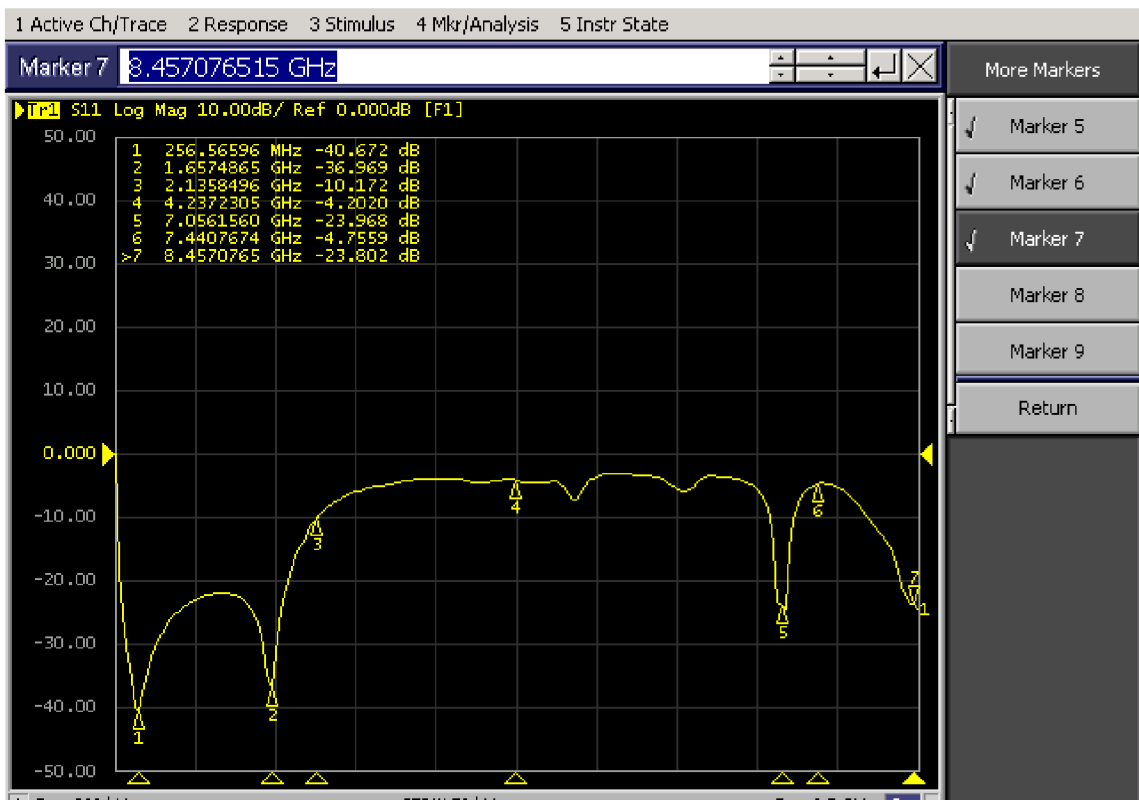
Činitel odrazu sondy je důležitý parametr, který byl proměřen na každé sondě při stavu, kdy je sonda odpojena od napájení a při stavu, kdy je přítomno napájení. Výsledky měření jsou shrnuty v obrázcích 3.14 až 3.19. Jak je zřejmé, připojení napájení ještě vždy zhorší parametry S_{11} . Přizpůsobení okolo -30 dB je kvalitní, nicméně čím více se křivka blíží nule, odrazí se více vstupujícího výkonu do sondy zpět ke zdroji signálu. Proto je nutné tento činitel korigovat a měřit ho. Přizpůsobení realizovaných sond není v celém frekvenčním pásmu dokonalé. Částečně je to způsobeno i N konektorem na vstupu, který má živý pin válcového průřezu. Práce na zlepšení parametru S_{11} je značně obtížná, využívá se praktických zkušeností či metody „pokus - omyl“.



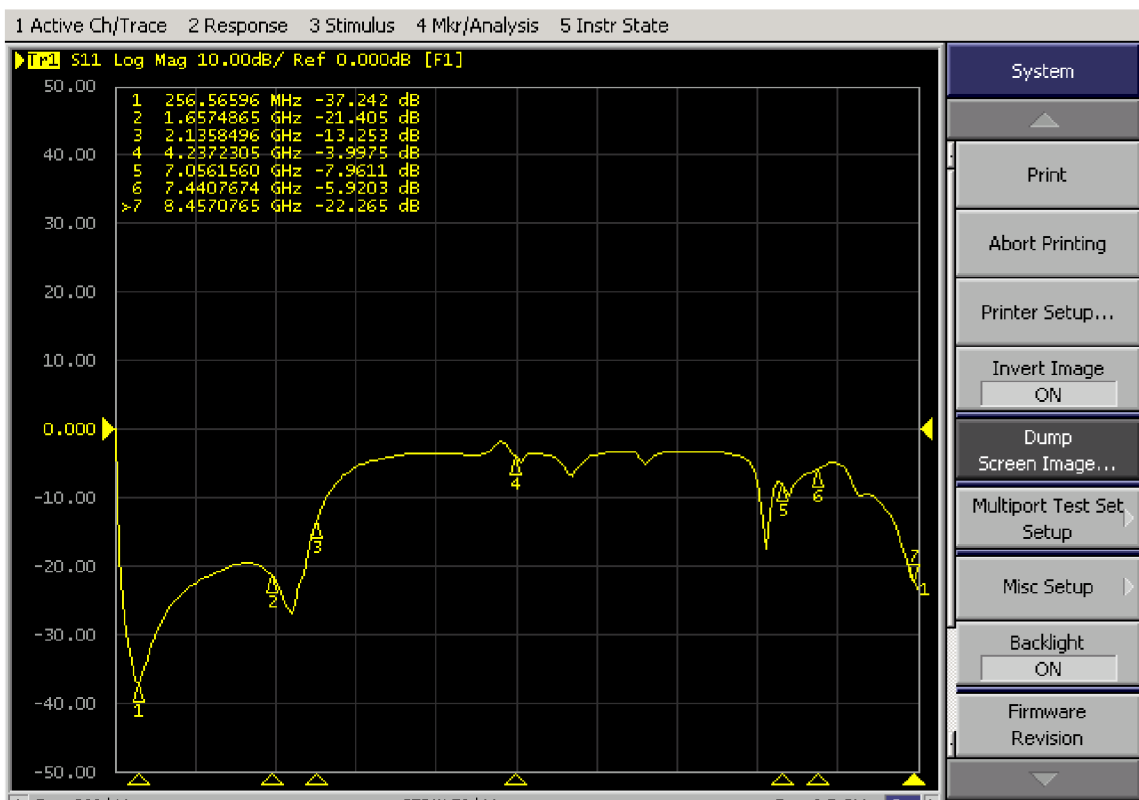
Obr. 3.14: S_{11} sondy s AD8307 při vypnutém napájení



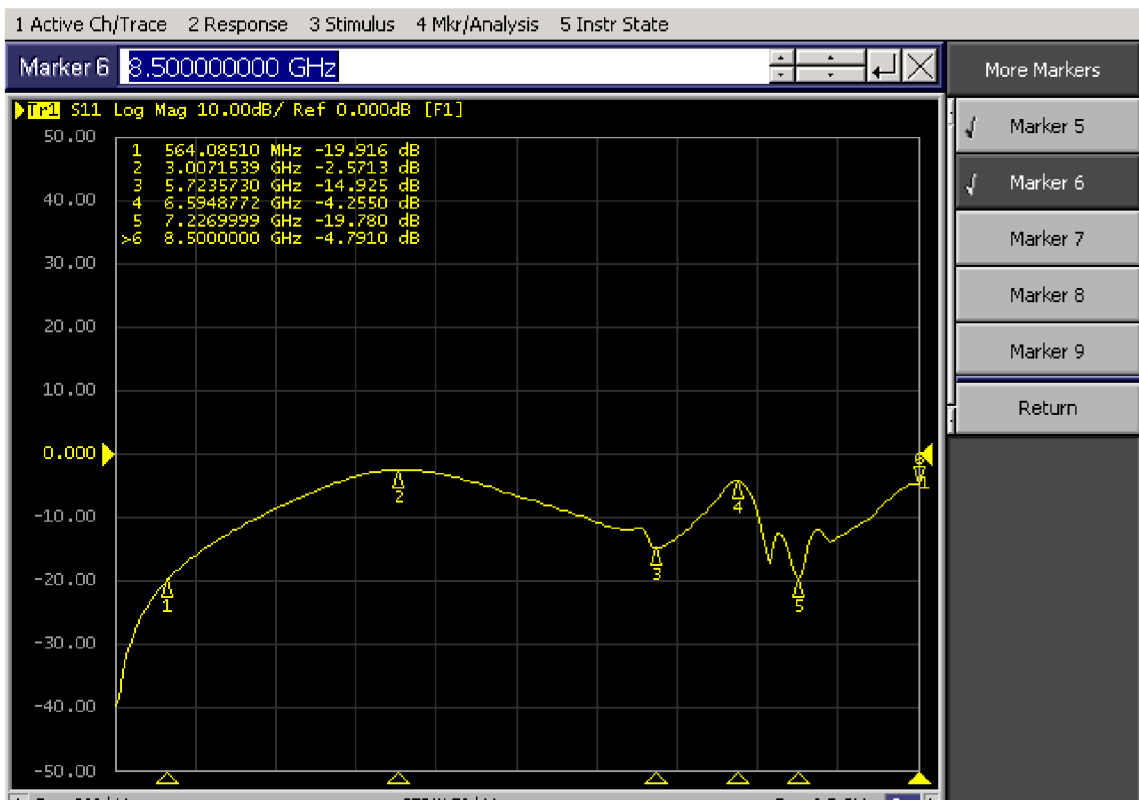
Obr. 3.15: S_{11} sondy s AD8307 při zapnutém napájení



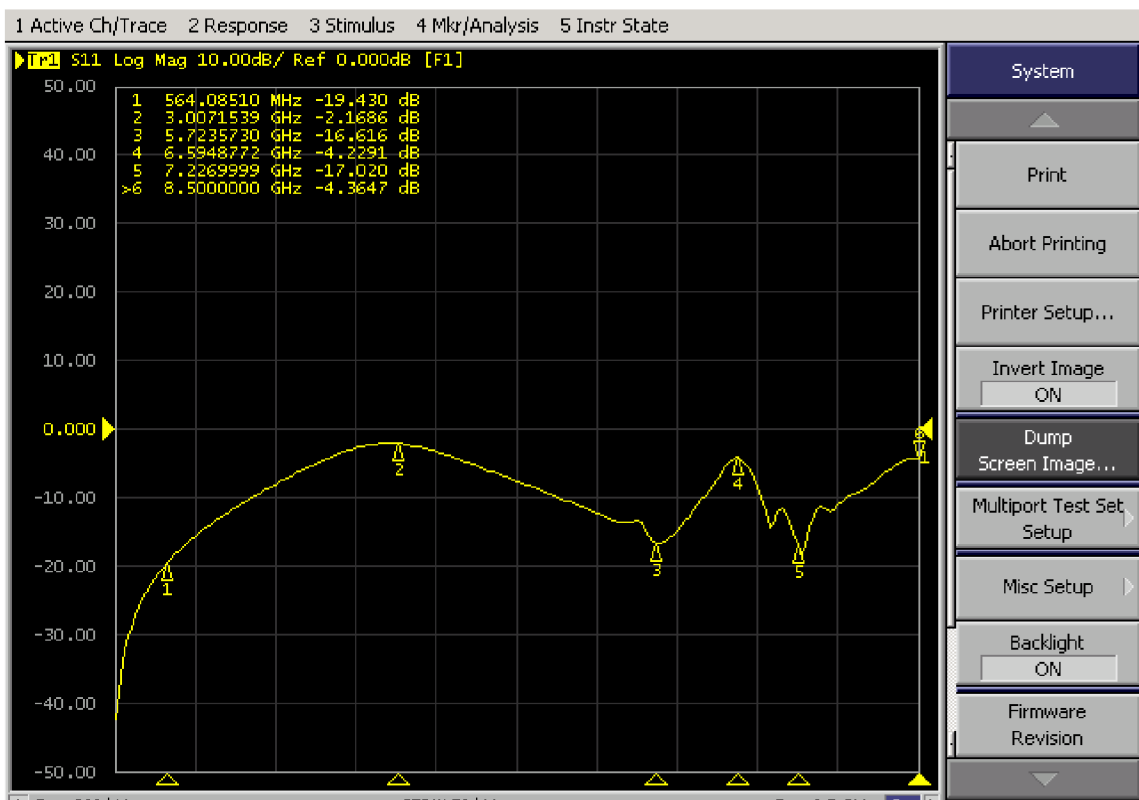
Obr. 3.16: S_{11} sondy s AD8313 při vypnutém napájení



Obr. 3.17: S_{11} sondy s AD8313 při zapnutém napájení



Obr. 3.18: S_{11} sondy s AD8318 při vypnutém napájení



Obr. 3.19: S_{11} sondy s AD8318 při zapnutém napájení

4 POMOCNÝ SOFTWARE PRO APLIKACI SAMOSTNÝCH DETEKTORŮ

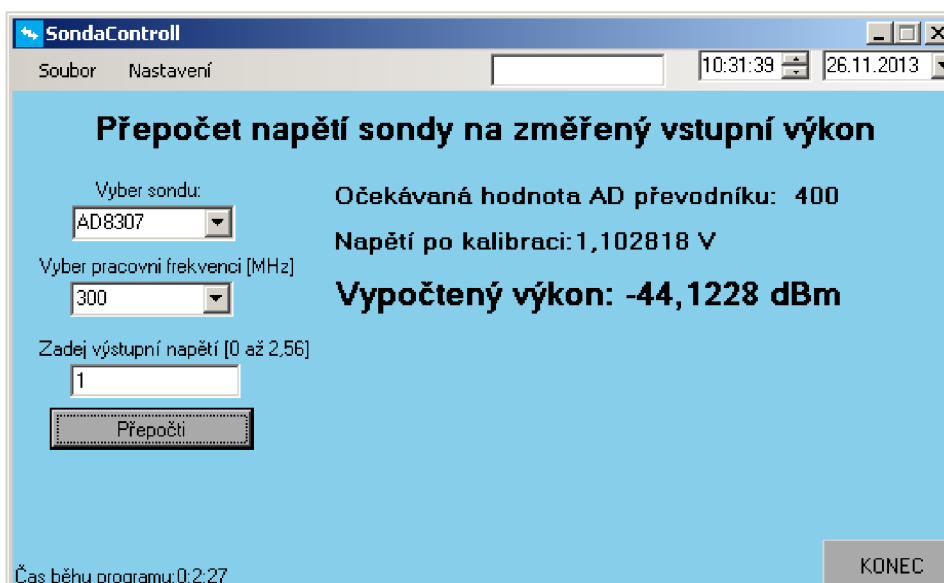
Pro jednoduchou práci s naměřenými výsledky bylo rozhodnuto navíc sestavit obslužný software, který přepočítává v závislosti na zvolené sondě a pracovní frekvenci, zadané výstupní napětí sondy na výkon v dBm. Tento software umožňuje provést nezávislou kalibraci při použití sond bez vyhodnocovací jednotky. Zároveň tak byla odzkoušena část programu, který bude následně užita v řídicí jednotce měřicího přístroje.

Ovládání programu je velmi intuitivní a nedovolí obsluze zadat nesprávné hodnoty do pole pro výstupní napětí sondy. Program též obsahuje jednoduché menu, ve kterém je možný tisk stránky, změna barvy pozadí či tlačítek a zapnutí či vypnutí www prohlížeče.

Po spuštění programu nazvaného „SondaControll“ se zobrazí uvítací okno. Po výběru sondy a vybrání přibližné měřené frekvence stačí zadat výsledné napětí sondy (pin č. 3 na konektoru DB-9 M) a kliknout na tlačítko „Přepočti“ či stisknout ENTER. Program následně bere v potaz kalibrační data uložená v paměti, přepočítá a zobrazí na obrazovku aktuální výkon na vstupu sondy v dBm. Zároveň vypočítá očekávanou hodnotu AD převodníku (je-li přítomen) připojeného za sondou pro referenční hodnotu 2,56 V a pro 5 V. Uživatel může zadávat hodnoty napětí jak s užitím desetinné tečky, tak i čárky. Zadá-li ovšem více než 10 desetinných míst zobrazí se varovné okno a program je následně ukončen z důvodu neexistence takto přesného voltmetru.

Nechtěné ukončení programu je ošetřeno dotazem, zda-li chce uživatel opravdu program ukončit.

Při připojení PC k internetu je možnost spustit webový prohlížeč a do připraveného okna lze zadávat URL adresy.

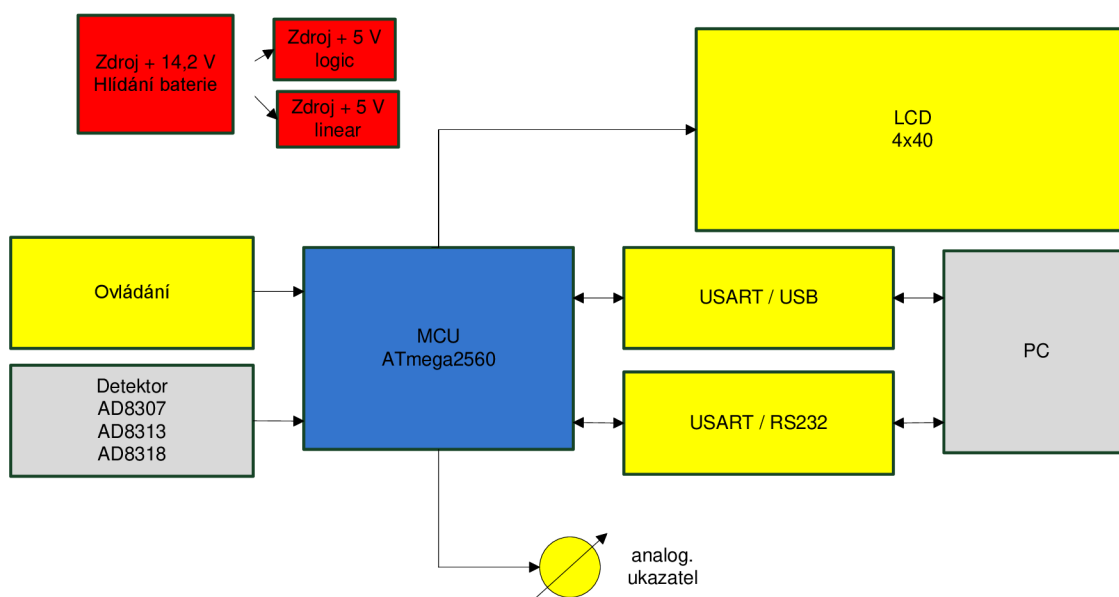


Obr. 4.1: Snímek pomocného programu „SondaControll“

5 OBVODOVÉ ZAPOJENÍ MĚŘIČE VÝKONU

Blokové zapojení měřiče znázorňuje obr. 5.1. Na vysokofrekvenční straně obsahuje logaritmické detektory, jež zpracovávají vf signál a transformují ho na stejnosměrné napětí. Jelikož je na výstupu každé sondy sledovač napětí s OZ s napájecím napětím +5 V, je možno toto napětí měřit AD převodníkem, který obsahuje mikroprocesor ATmega2560 z řady ATmega rodiny AVR od firmy ATMEL (dále jen CPU) [5]. Výstupní napětí sond je změřeno, poté zpracováno dle kalibrací a zobrazeno na 4x40 znakovém LCD displeji. Procesor dále umožňuje komunikaci s osobním počítačem jak pomocí USB tak i RS232 portu.

Nedílnou součástí navrženého wattmetru je napájecí zdroj a obvod dohledu baterie. Napájení přístroje je možné ze sítě 230 V / 50 Hz, popřípadě z vnitřní baterie. Zdroj je koncipovaný jako průmyslový, spínaný, s výstupním napětím 14,3 V a toto napětí je použito k dobíjení baterie, je-li to třeba. Obvod napájení též napájí veškeré periferie uvnitř wattmetru, např. LCD displej a jeho podsvícení, řídicí mikroprocesorovou desku, indikační LED diody, atd.



Obr. 5.1: Blokové schéma zapojení wattmetru

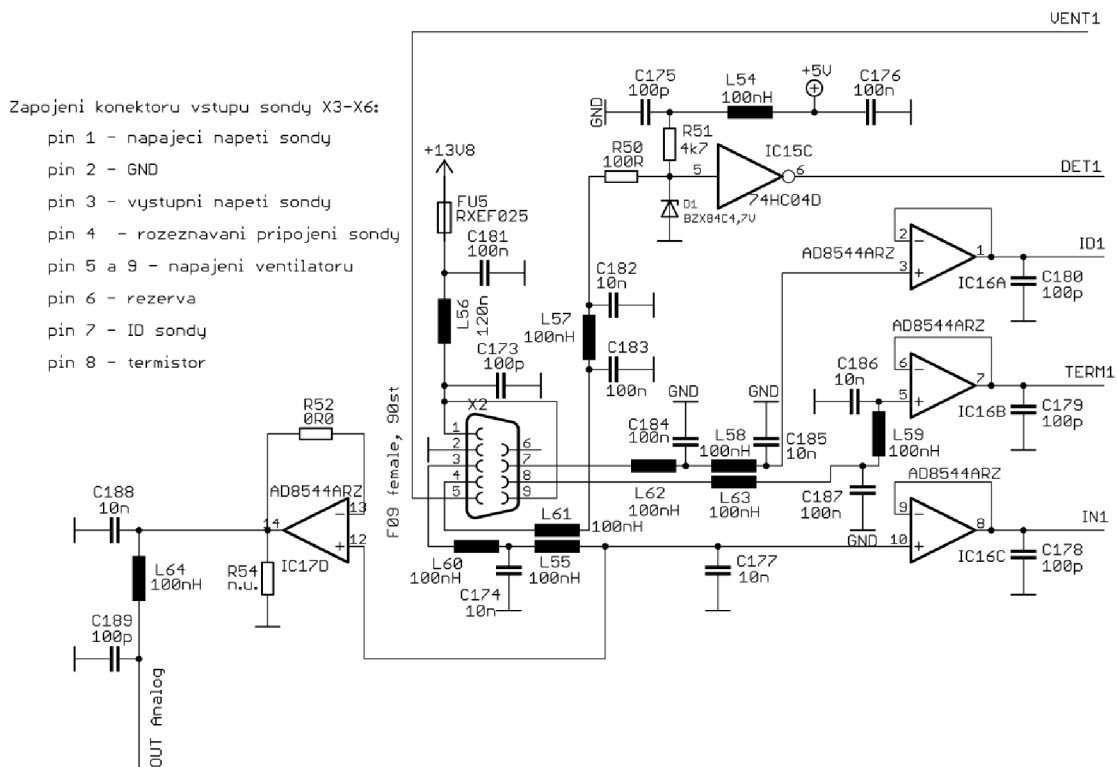
5.1 Připojení a rozeznání sondy

Připojení jednotlivých sond k měřicímu přístroji se provádí pomocí konektoru DB9. Veškeré vstupy ze sondy jsou ošetřeny dvojitým Π -článkem, popsaným v kapitole 5.2. Sondy generují na výstupních pinech určité napětí dle velikosti vstupního výkonu. Toto napětí se pohybuje do velikosti maximálně 2,5 V. Abychom toto napětí mohli měřit AD převodníkem je v cestě každého vstupu sondy zařazen sledovač napětí s „rail-to-rail“ OZ pro oddělení impedancí a nezatěžování výstupu sond. Pro měření jsou využity interní 10 bitové AD převodníky v CPU, což odpovídá přesnosti asi 0,1 %. Výstupní napětí ze sondy je přes vstupní filtr odděleno dalším sledovačem napětí pro externí použití (např. při měření na osciloskopu) na zadní stranu přístroje (OUT Analog).

Připojením sondy vznikne uvnitř sondy propoj na konektoru X2 a pin 4 bude uzemněný. Toho se využije k detekci připojení sondy. Zenerova dioda udává 4,7 V, tedy log. 1 a za invertorem je tedy log. 0 a procesorem čteme hodnotu tohoto pinu. Je-li na vstupu pinu procesoru (DET1) log. 1, nějaká sonda je připojena. K rozeznávání jednotlivých sond a poté správné kompenzaci změřených hodnot dle kalibrací jsou využity Zenerovy diody, kdy každá sonda na výstupním pinu 7 udává svou jmenovitou hodnotu (ID1). Ta je sledovačem napětí na řídicí desce oddělena a dále napětí změřeno interním A/D převodníkem v mikroprocesoru. Rozezná-li CPU napětí a přiřadí ho dané sondě, nastane kalibrace naměřených hodnot sondy dle tabulek uložených v paměti a indikace pomocí LED diody nad vstupním konektorem rozeznané sondy.

Obdobně je tomu i v případě čtení analogové hodnoty napětí z termistoru uvnitř sondy, kdy vyčítáme hodnotu napětí a podle ní dopočítáváme aktuální teplotu. Výstup je opět ze sondy vyfiltrován, oddělen sledovačem napětí a následně přiveden k A/D převodníku mikroprocesoru.

Výjimku tvoří výstupní piny č. 5 a 9 konektoru DB9 určené pro případné napájení ventilátoru uvnitř sondy. Pin č. 9 by byl v tom případě připojen přímo přes filtr napájení ke kladnému pólu ventilátoru, pin č. 5 slouží jako druhý (záporný) pól pro ventilátor a je ovládaný procesorem. Proudové zesílení z procesoru je provedeno přes výkonový MOSFET tranzistor (IRLF014) [12], který slouží jako spínač. Kompletní schéma je uvedeno v příloze A6.

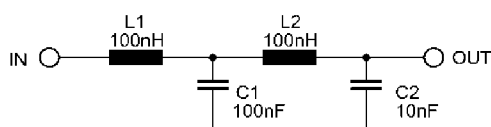


Obr. 5.2: Schéma zapojení vstupní části napětí ze sondy

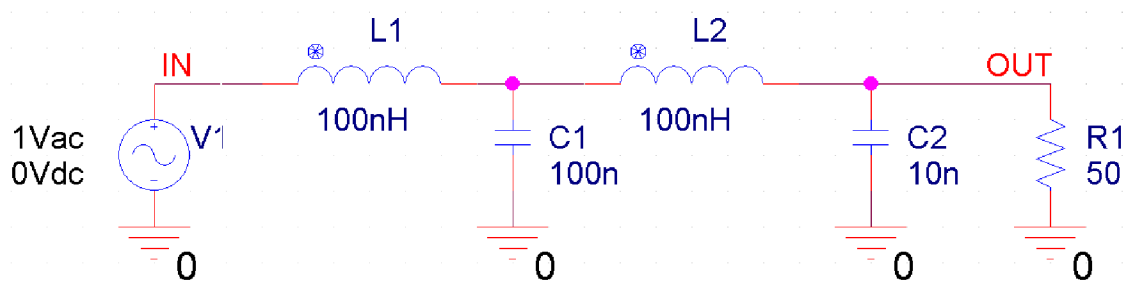
5.2 Vstupní filtr

Výstup ze sond je přes 9-žilový kabel připojen na vstupní filtr na hlavní desce. Signál dále pokračuje k AD převodníku a ostatním obvodům. Vstupní signál i přes užitý stíněný kabel může být zarušen, na kabel se mohou naindukovat nežádoucí signály, které mohou silně ovlivnit kvalitu a přesnost měřeného signálu. Proto je nutné zařadit na vstup AD převodníku dolnoproustný filtr (low-pass), který případná vf. rušení odstraní.

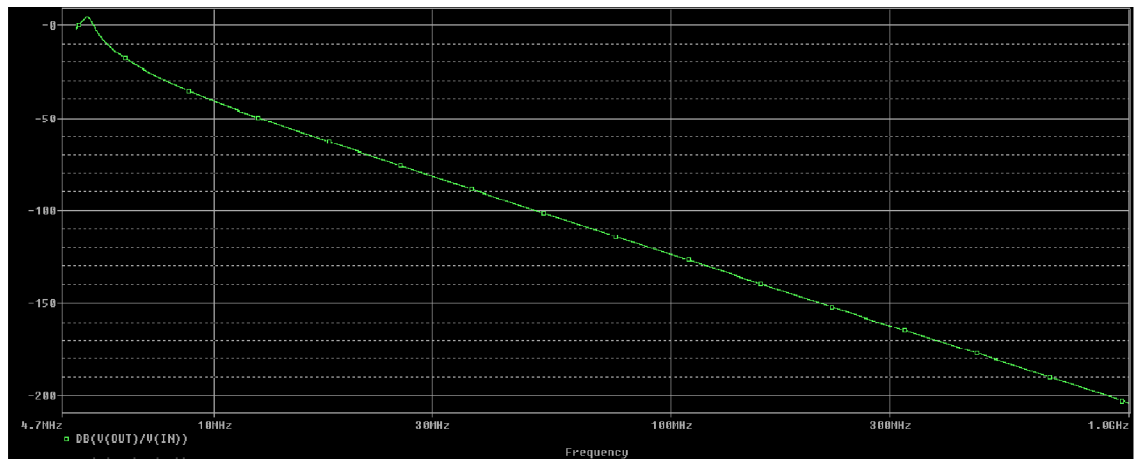
Vzhledem k neurčitosti vstupní i výstupní impedance je návrh filtru značně obtížný a nejednoznačný. Proto byla zvolena impedance 50 Ω na simulaci i měření, která se využívá ve vf. technice. Schéma zapojení filtru je na obrázku 5.3. Simulace v programu PSpice je zobrazena na obrázcích 5.4 a 5.5.



Obr. 5.3: Schéma zapojení vstupního filtru

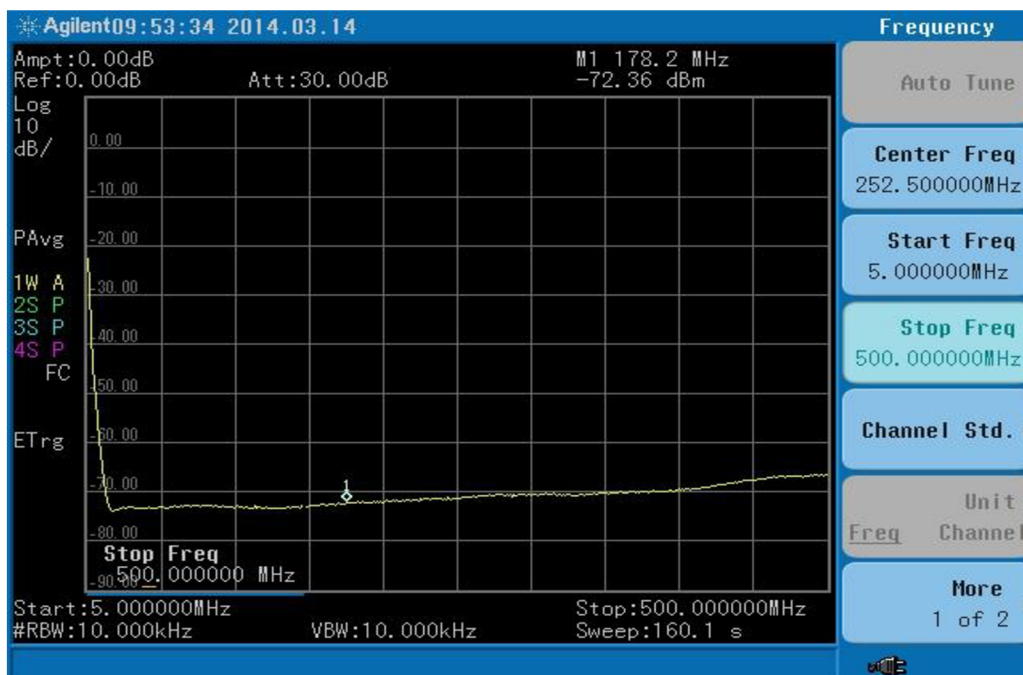


Obr. 5.4: Schéma zapojení vstupního filtru v programu PSpice

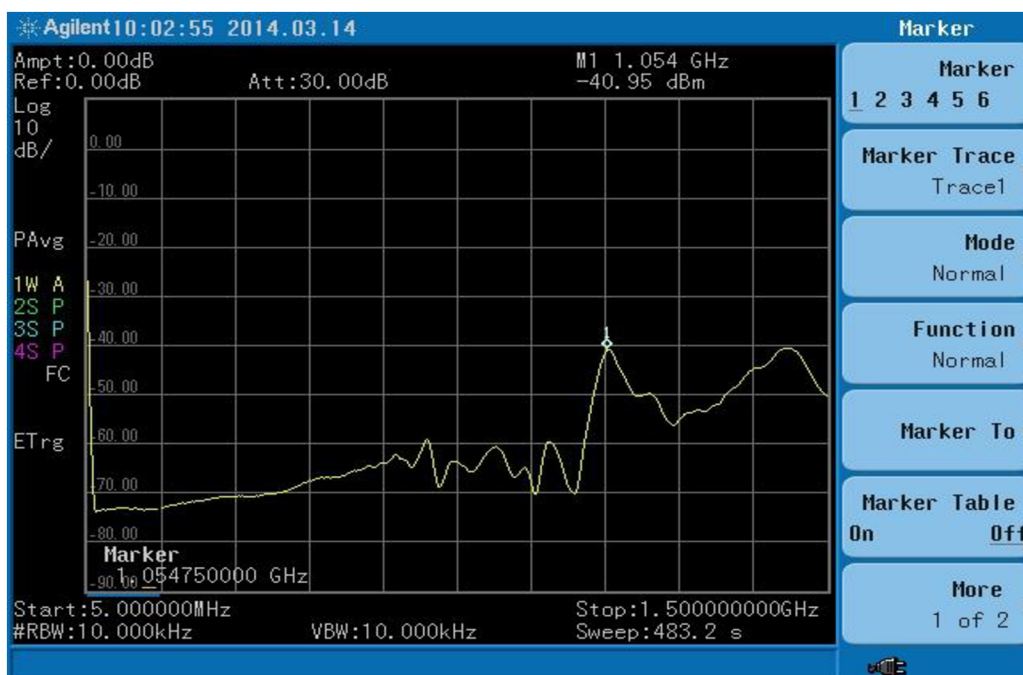


Obr. 5.5: Výsledná simulace přenosu vstupního filtru v programu PSpice

Reálné zapojení filtru na realizované desce plošného spoje vykazuje přenosovou charakteristiku pro 50 Ω impedanci podle obrázků 5.6 a 5.7.



Obr. 5.6: Reálný přenos vstupního filtru na 50 Ω do 500 MHz



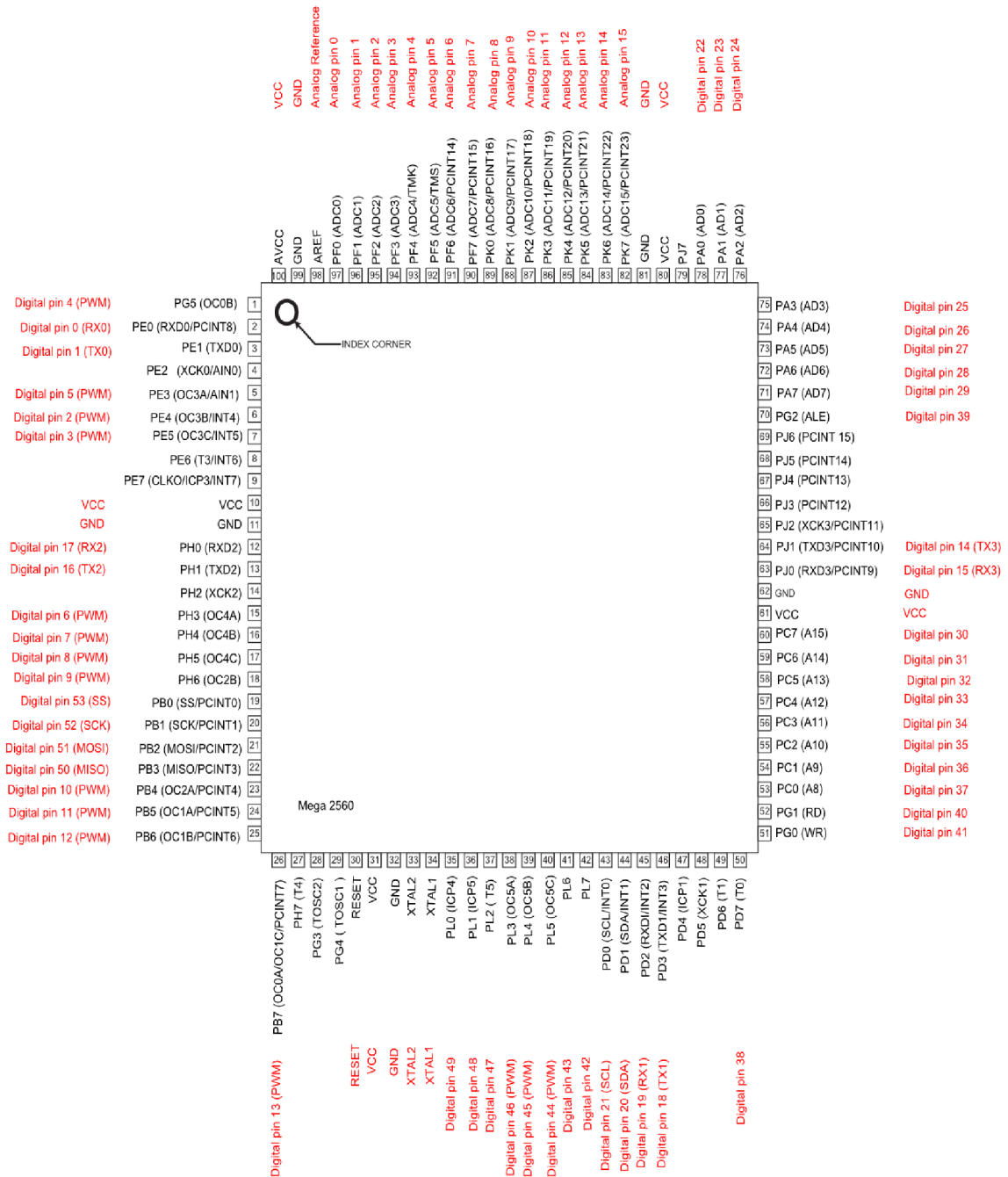
Obr. 5.7: Reálný přenos vstupního filtru na 50 Ω do 1,5 GHz

5.3 Řídicí jednotka s mikroprocesorem ATmega2560

Jako řídicí jednotka je zvolen mikroprocesor ATmega2560 od firmy Atmel [5] díky jeho velkému množství I/O portů a celkem 16 vstupovému AD převodníku a dobrým parametrům. Existuje široká podpora programování, dostupnost a oproti nižším řadám

rodiny ATmega je cenový rozdíl zanedbatelný. Pro měření je využito všech 16 vstupů AD převodníku. Tento typ má dostatečnou paměť a výpočetní výkon s uvažovaným 16 MHz krystalem pro taktování.

Hlavní požadavky na mikro počítač jsou hlavně na oblast periferií a to především AD převodník, I/O porty pro řízení LCD displeje a PWM výstup pro analogovou indikaci. Dále jsou využity dvě sériové linky UART, které jsou převodníky upraveny na sběrnice RS232 a USB. Všem těmto požadavkům úspěšně vyhověl daný mikroprocesor. Je zapouzdřený v SMD pouzdře TQFP100.



Obr. 5.8: Rozložení pinů mikrokontroléru ATmega2560 včetně namapovaných pinů pro vývojovou platformu Arduino (převzato z [6]).

Jak je vidět na obrázku 5.8. některé piny ATmega2560 nejsou v platformě Arduina namapovány. Arduino mapuje pouze piny od 1 do 53, kdežto způsob číslování není zcela přehledný. Proto bylo přistoupeno k domapování pinů potřebných v této práci. To se uskutečňuje v textovém souboru v počítači, na němž je nainstalována vývojová platforma Arduino. Ve většině osobních počítačů je tento soubor mapování pinů pro ATmega2560 ukryt v cestě C:\Program Files\Arduino\hardware\arduino\avr\variants\mega.

Soubor se jmenuje „pins_arduino.txt“.

V tomto textovém souboru byly dopsány řádky definující PORTLIST

```
PJ      , // PJ 2 ** 70 ** D50
PJ      , // PJ 3 ** 71 ** D51
PJ      , // PJ 4 ** 72 ** D52
PJ      , // PJ 5 ** 73 ** D53
PJ      , // PJ 6 ** 74 ** D54
PJ      , // PJ 7 ** 75 ** D55
PD      , // PD 4 ** 76 ** D56
PD      , // PD 5 ** 77 ** D57
PD      , // PD 6 ** 78 ** D58
PH      , // PH 2 ** 79 ** D59
PE      , // PE 6 ** 80 ** D60
PE      , // PE 7 ** 81 ** D61
PE      , // PE 2 ** 82 ** D62
```

a řádky definující PINLIST

```
_BV( 2 )      , // PJ 2 ** 70 ** D50
_BV( 3 )      , // PJ 3 ** 71 ** D51
_BV( 4 )      , // PJ 4 ** 72 ** D52
_BV( 5 )      , // PJ 5 ** 73 ** D53
_BV( 6 )      , // PJ 6 ** 74 ** D54
_BV( 7 )      , // PJ 7 ** 75 ** D55
_BV( 4 )      , // PD 4 ** 76 ** D56
_BV( 5 )      , // PD 5 ** 77 ** D57
_BV( 6 )      , // PD 6 ** 78 ** D58
_BV( 2 )      , // PH 2 ** 79 ** D59
_BV( 6 )      , // PE 6 ** 80 ** D60
_BV( 7 )      , // PE 7 ** 81 ** D61
_BV( 2 )      , // PE 2 ** 82 ** D62
```

5.3.1 Základní parametry ATmega2560

- Počet vstupně/výstupních využitelných pinů (I/O portů) celkem: 86
- Použitá architektura: RISC (135 instrukcí, 32x8 pracovních registrů)
- Počet AD převodníků / rozlišení: 16 kanálů multiplexováno / 10 bitů
- Paměti:
 - 4kB EEPROM
 - 256kB FLASH

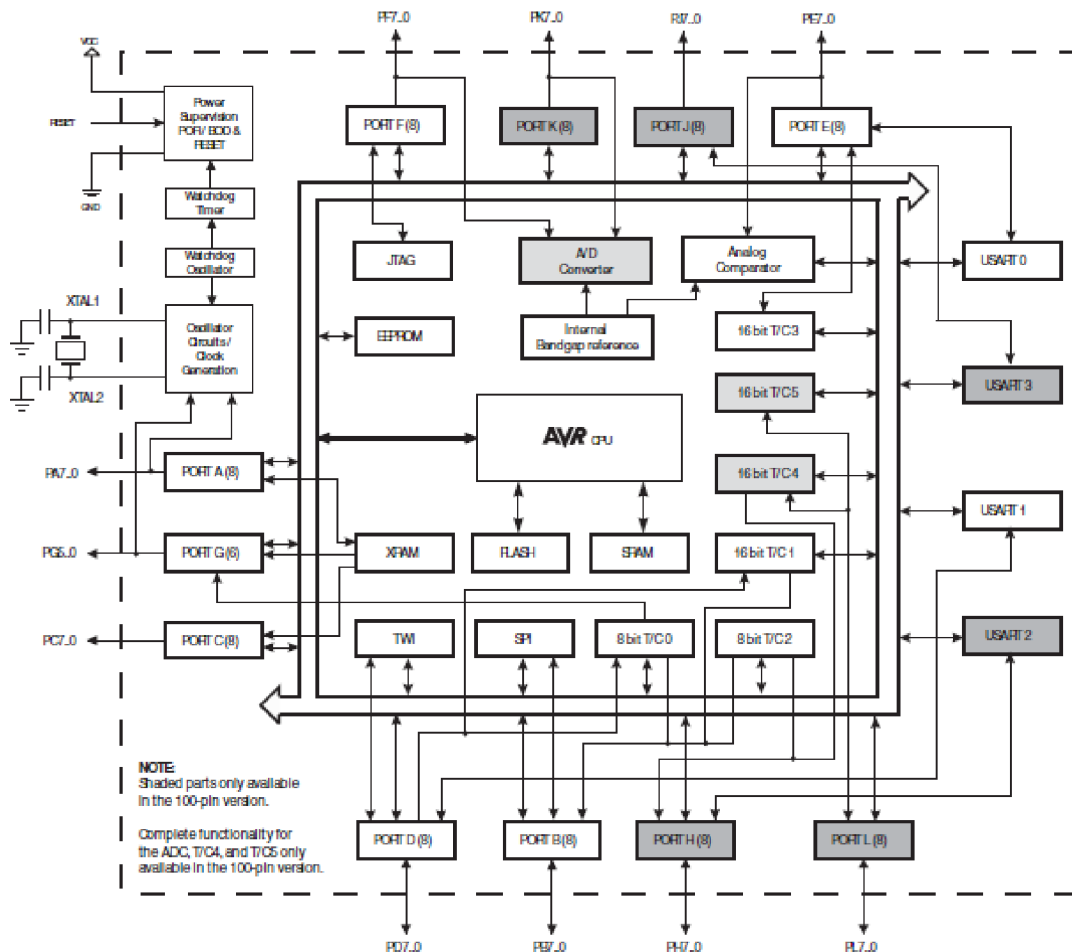
- 8kB SRAM
- Výpočetní výkon: až 16 MIPS při 16 MHz krystalu
- Speciální vlastnosti
 - Power-on-Reset, programovatelný watchdog
 - Interní oscilátor
 - Externí a interní zdroje přerušení
 - Celkem šest režimů spánku
- Sériové kanály: 4 x USART
- PWM kanály: 4 x 8 bitové, 12 kanálů o rozlišení 16 bitů
- Rozhraní JTAG (standard IEEE 1149.1) a ISP na jednoduché programování
- Rozsah teplot -40° až 80°C

Dostupný AD převodník je 10ti bitový, jenž využívá postupnou aproximaci a je tedy relativně přesný. Rozlišitelnost je 2^{10} , tedy 1024 hladin. Kvantizační úroveň je 2,5 mV a kvantizační chyba tedy $\frac{1}{2}$ této úrovně, což odpovídá nepřesnosti 1,25 mV. Kvantizační šum je 60,2 dB spočtený dle vzorce 5.3.

$$SNR_{A/D} = 20 \cdot \log(2^N) = 6,02 \cdot N, \quad (5.3)$$

kde N je počet bitů AD převodníku.

Vstupní rozsah AD převodníku je od 0 až do U_{cc} , kdežto vlastní měření probíhá do hodnot nastavené referenční hodnoty. Rychlost převodu je od 13 μ s až po 260 μ s. Samostatné lineární napájecí napětí AD převodníku je velmi vhodné pro zaručení lineárního napětí bez špiček rušení od digitálních obvodů či datových sběrnic. Ostatní obvody mohou být napájeny spínaným DC/DC měničem z důvodu vysoké účinnosti (až 94 %).



Obr. 5.9: Blokové zapojení ATmega2560 (převzato z [7]).

5.4 Znakový displej 4 x 40

Pro zobrazování naměřených hodnot u 4-kanálového měřiče výkonu byl zvolen znakový LCD displej RC4004A-FHW-CSX [8]. Ten disponuje čtyřmi řádky po 40 znacích v každém řádku. K přihlídnutí úspore pinů CPU byla pro komunikaci s displejem zvolena 4 bitová komunikace, která je však pomalejší než 8 bitová (posílá se horní polovina příkazu/dat a poté až dolní polovina příkazu/dat), ale pro potřeby zobrazování naměřených dat plně postačuje.

Základní parametry užitého LCD displeje RC4004A-FHW-CSX:

Napájecí napětí: + 5,0 V

Napájecí proud: 1,2 mA

Proud podsvitu: typicky 64 mA, maximálně 100 mA

Velikost znaků: 5x8 bodů

Zobrazovaná plocha: 147x29,5 mm²

Typ: FSTN pozitivní

Řadič: ST7066

Počet znaků: 4x40

Podsvit: užívá bílých LED diod



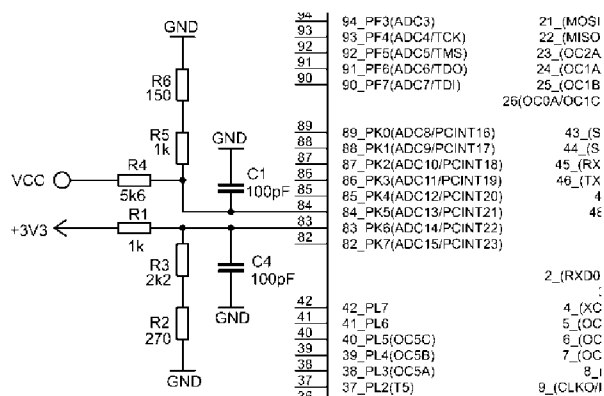
Obr. 5.10: Display RC4004A-FHW-CSX (převzato z [8]).

Tab. 5.1: Zapojení pinů displeje RC4004A-FHW-CSX

Číslo pinu	Symbol	Log. úroveň	Název pinu	Funkce pinu
1	DB7	H/L	Datový bit 7	4 nebo 8 bitové rozhraní
2	DB6	H/L	Datový bit 6	4 nebo 8 bitové rozhraní
3	DB5	H/L	Datový bit 5	4 nebo 8 bitové rozhraní
4	DB4	H/L	Datový bit 4	4 nebo 8 bitové rozhraní
5	DB3	H/L	Datový bit 3	8 bitové rozhraní
6	DB2	H/L	Datový bit 2	8 bitové rozhraní
7	DB1	H/L	Datový bit 1	8 bitové rozhraní
8	DB0	H/L	Datový bit 0	8 bitové rozhraní
9	E1	H, H→L	Povolení 1	Povolovací signál 1
10	R/W	H/L	Čtení / zápis	H: čtení, L: zápis
11	RS	H/L	Výběr registru	H: data, L: instrukce
12	V0	Volitelné	Kontrast	Nastavitelný
13	VSS	0.0 V	Zem (GND)	0.0 V
14	VDD	5.0 V	Napájení	5.0 V
15	E2	H, H→L	Povolení 2	Povolovací signál 2
16	N.C.	-	-	Nezapojený pin
17	K	-	Katoda podsvícení	Napájení podsvícení
18	A	-	Anoda podsvícení	Napájení podsvícení

5.5 Monitoring napájecích napětí

Potřeba monitorovat během práce s měřičem napájecí napětí je nezbytná v případě, máme-li pochyby o správné funkčnosti napájení měřiče. Pro měření napájecích napětí a napětí interního akumulátoru je využit interní 10-bitový A/D převodník. Jelikož referenční napětí převodníku je 2,5 V, je nutné ho jednoduchým děličem napětí upravit do rozsahu od 0 do 2,5 V. Při uvažování napájecího napětí 14,2 V ze síťového zdroje musíme tedy zvolit odporový dělič s poměrem 1:5,68. Pro omezení limitace A/D vstupu převodníku zvolíme dělicí poměr vyšší. Pro větší přesnost děliče je velmi vhodné ho osadit SMD rezistory s tolerancí 1 % a menší a dělič sestavit ze tří odporů, kde dvě jeho hodnoty jsou hrubé, a třetí se dopočítá jako jemná.

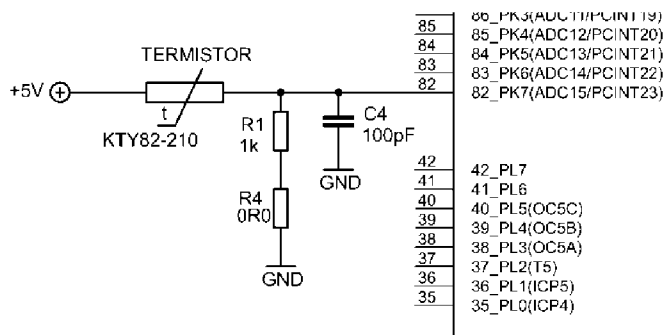


Obr. 5.11: Zapojení děliče pro měření napájecího napětí a napětí 3,3 V

5.6 Měření teploty hlavní desky a připojených sond

Teplota uvnitř desky a hlavně teplota připojených sond je parametrem, jenž ovlivňuje přesnost a výsledek měření. Proto je nutné tuto teplotu měřit a počítat s ní v kalibracích. Pro jednodušší konstrukci bude pro měření teploty uvnitř měřiče a teploty připojených sond využit stejný typ teplotního čidla. Z pohledu malé nelinearity, dobré dostupnosti a ceny se jako nejlepší jeví použití monokrystalického křemíkového čidla teploty s označením KTY82-210 [13]. Vzhledem k velkému rozsahu teplot křemíku, může zvolené číslo pracovat v rozsahu -50 °C až 150 °C.

Rezistivita čidla se mění v závislosti na teplotě a toho se využívá v zapojení jako teplotně závislého děliče napětí. Toto napětí je poté interním A/D převodníkem měřeno a dále zpracováno mikropočítačem.



Obr. 5.12: Zapojení termistoru pro měření teploty hlavní desky a připojených sond

Totožné zapojení je provedeno i uvnitř každé sondy pro měření výkonu. A/D převodníkem si poté vždy vyčteme hodnotu napětí a podle něj poté určíme, o jakou jde teplotu.

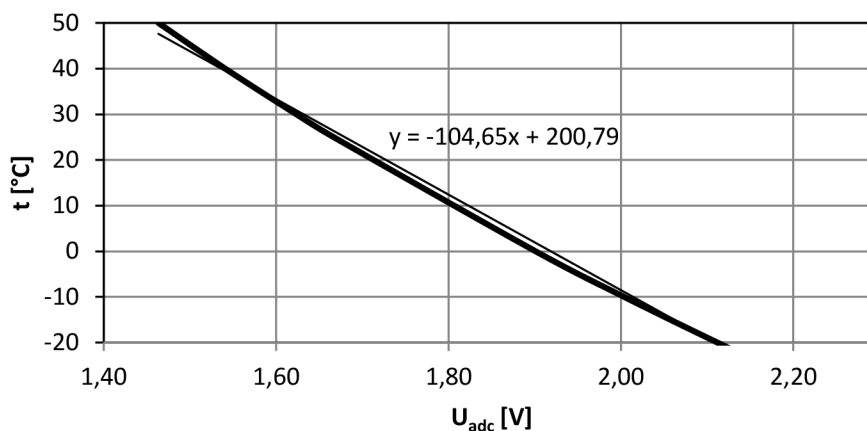
Z katalogového listu výrobce se lze dozvědět typické hodnoty měrného odporu termistoru při dané teplotě. Z těchto údajů lze sestrojit směrnici přímky závislosti odporu na teplotě.

Tab. 5.2: Typická závislost odporu termistoru na teplotě dle katalogového listu výrobce

t (°C)	typ. R [Ω]	U _{adc} [V]	ADC [-]
-30	1247	2,23	911
-20	1367	2,11	865
-10	1495	2,00	821
0	1630	1,90	779
25	2040	1,67	683
30	2080	1,62	665
40	2245	1,54	631
50	2417	1,46	599

Z těchto údajů byla sestrojena směrnice přímky závislosti odporu na teplotě a údaje z ní byly následně využity v programu mikrokontroléru.

Výpočet směrnice převodu teplotního senzoru KTY82-210



Obr. 5.13: Výpočet směrnice pro výpočet hodnoty teploty

Výsledný vztah použitý v programu mikrokontroléru pro výpočet teploty je tedy následující:

$$t [^{\circ}\text{C}] = -105 \times \text{ADC} - 201, \quad (5.6)$$

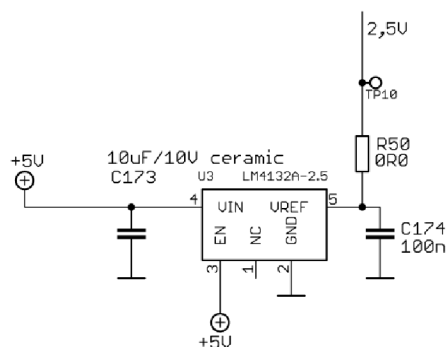
kde hodnota ADC je změřená hladina A/D převodníku.

5.7 Externí napěťová reference

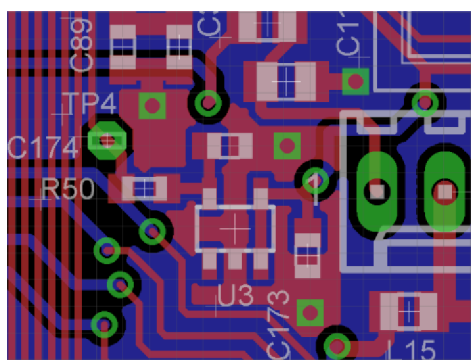
Interní reference 2,56 V, jež nabízí ATmega2560, se může dle katalogového listu pohybovat od 2,3 V do 2,8 V, což je pro měřicí přístroj zcela nepoužitelné, a proto je referenční napětí nastaveno jako externí o velikosti 2,5 V. Zajišťuje ho obvod LM4132A-2.5 od Texas Instruments [14]. Zvolené napětí 2,5 V reference je z důvodu využití celého dynamického rozsahu převodníku. Obvod je v SMD provedení, pouzdro SOT23-5.

Jedná se o katalogové zapojení obvodu dle doporučení výrobce. Celý obvod je na desce plošného spoje zalit do mědi (GND), jež také slouží jako quad-ring reference (viz obrázek 5.15.). Zapojení je zřetelné na obrázku 5.14. Vstupní kapacitou jsou vyžadovány a výstupní kapacitou jsou volitelné. Vstupní kapacita dle doporučení výrobce by měla být co možná nejvyšší (od 4,7 μF po 22 μF) z důvodu malého šumu na výstupu reference. Proto byla zvolena hodnota 10 μF / 10 V v keramickém pouzdru 0603 jež je ještě dostupná. Výstupní kapacita je zvolena 100 nF. Zároveň musí platit, že vstupní kapacita musí být větší nebo rovna výstupní kapacitě. Povolovací pin EN (ENABLE) je trvale připojen na +5V, externí napěťová reference je tedy trvale zapnuta.

Přesnost výstupního napětí 2,5 V je 0,05 %, jeho teplotní koeficient je 10 ppm/ $^{\circ}\text{C}$, což je 1,25 mV a pro účely 10 bitového AD převodníku zcela postačující.



Obr. 5.14: Schéma zapojení externí napěťové reference



Obr. 5.15: Ukázka zapojení externí napěťové reference včetně ochranného rámce (guard ring)

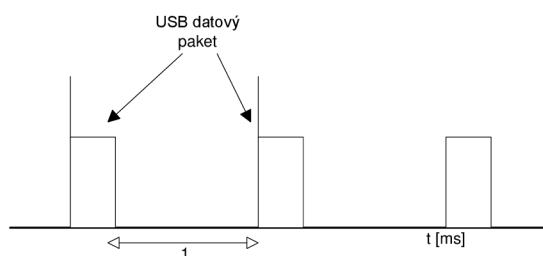
5.8 Sériová komunikace wattmetru s PC

5.8.1 USB komunikace

Univerzální sériová sběrnice (USB) je stejně jako RS232 sériová a přenáší tedy údaje bit po bitu. Přenáší se ale na rozdíl od RS232 na téže lince oběma směry. Jedná se ovšem o „jednomasterovou“ komunikaci, kdy všechny aktivity vycházejí z počítače. Data se vysílají v paketech o délce 8 až 64 bajtů. Nespornou výhodou USB sběrnice je její přenosová rychlost, kdy může dosáhnout 480 Mbit/s pro standard 2.0. Další výhodou může být bezstarostné připojení a odpojení zařízení za provozu. Tato vlastnost je spojena s pojmem „Plug&Play“. Nenastane zde jako u RS232 možnost záměny kabelu z rovného na křížený a naopak. USB má pouze jeden přímý kabel a konektory jsou konstruovány tak, aby se nedaly zaměnit.

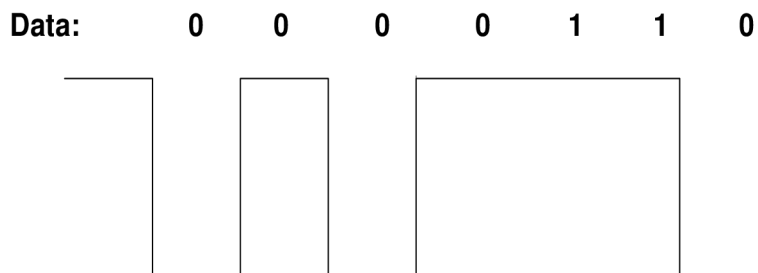
Přípojné zařízení lze napájet z vlastního zdroje (*self-powered*) anebo přímo ze sběrnice (*bus-powered*). USB sběrnice umožňuje připojit zařízení s proudovým odběrem 100 mA a 5 V napájení, po zvláštním požadavku USB může připojit až 500 mA. Signály na linkách D+ a D- jsou rozdílové signály s napěťovými úrovněmi 0 V / 3,3 V. Sběrnice je navržena tak, aby její napájecí napětí nikdy nekleslo pod 4,2 V. Nespornou výhodou USB přípojných zařízení je též možnost užití deskriptorů, které nám umožňují identifikovat například výrobce, USB verzi, výrobek, sériové číslo atd.

Nevýhodou USB zařízení je nutnost mít nainstalované ovladače v PC, velká složitost pro amatérského uživatele. V neposlední řadě je USB velmi náchylné na elektromagnetické rušení, kdy často při velkých intenzitách elektromagnetického pole v okolí sběrnice dochází k jejímu nežádoucímu odpojení. USB se následně samovolně nepřipojí a je nutný zásah uživatele, což je značně nepříjemné. Veškerý přenos dat se v USB uskutečňuje v rámci o délce přesně 1ms.



Obr. 5.16: Datové pakety USB komunikace v rámci 1ms

Hodinový signál se získává pomocí metody NRZI (*Non-Return-To-Zero*). Nuly v datech vedou ke změně úrovně, jedničky nechávají úroveň beze změny.

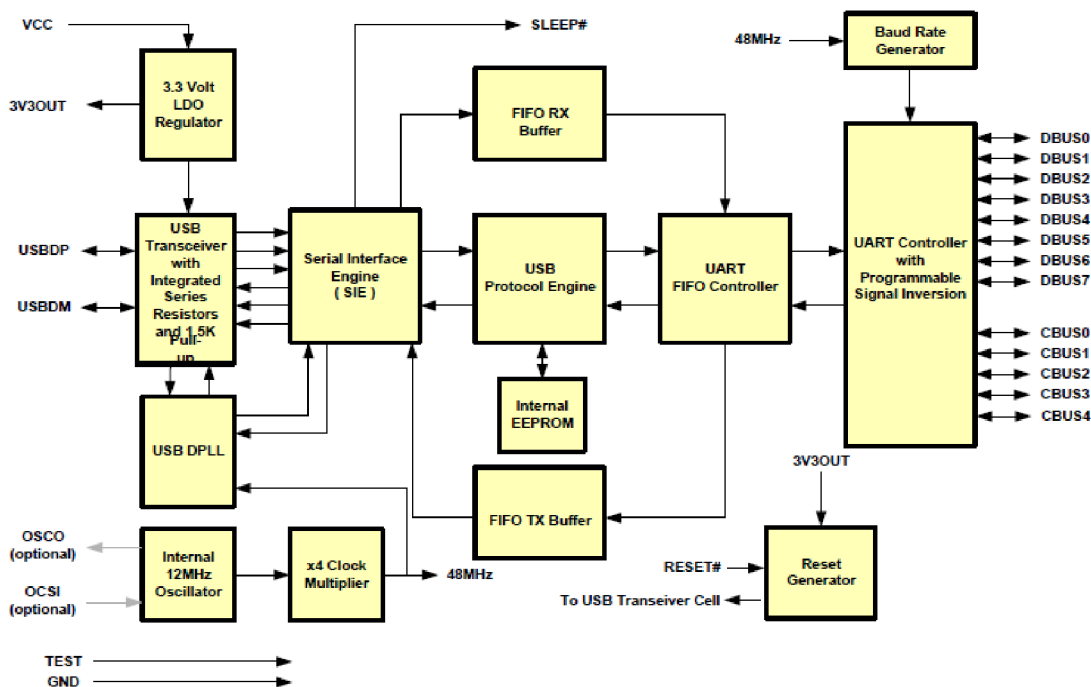


Obr. 5.17: NRZI kódování

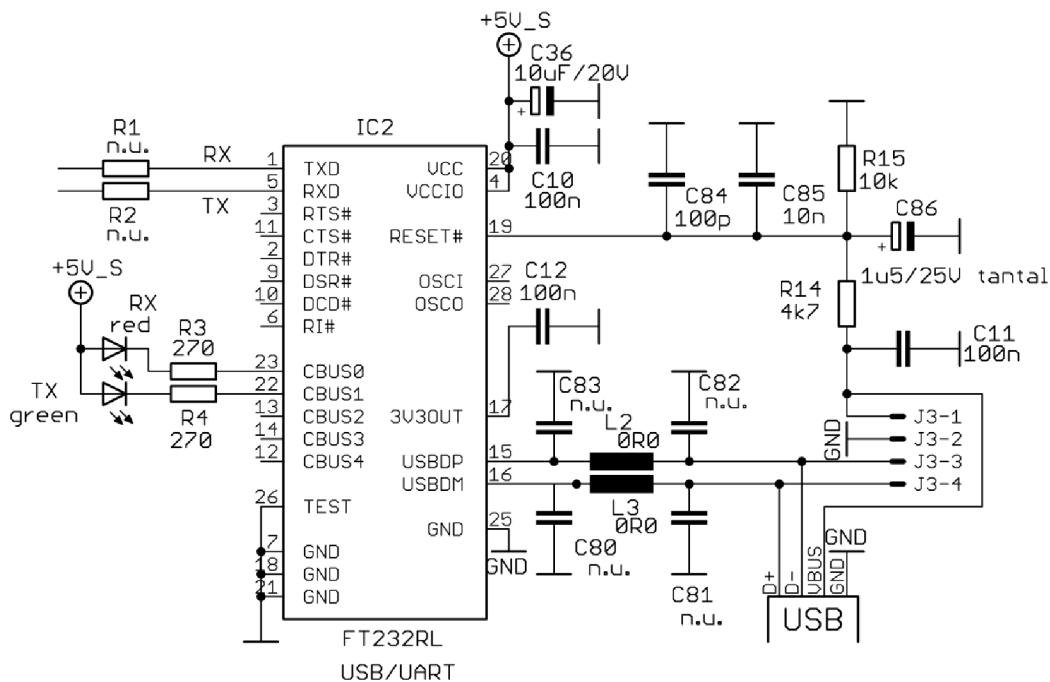
V práci byl použit integrovaný obvod FT232RL od FTDI Chip [9], který pracuje jako konvertor USB-UART. Spojuje tak možnost použití sběrnice USB s jednoduchým zařízením.

Vybrané parametry FT232RL:

- jednoduché napájení v rozsahu 4,4 V až 5,25 V
- kompatibilita se standardy USB 1.1 a USB 2.0
- E²PROM programovatelná přímo v aplikaci USB
- integrované ovladače pro Windows, Linux 2.4 a vyšší, MAC OS-8 a vyšší
- podpora 7/8 bitového přenosu, 1/2 stop-bitů, parity (všechny druhy)
- nastavitelná přenosová rychlost
- podpora pro napájení USB zařízení s vysokým odběrem



Obr. 5.18: Blokové schéma FT232RL (převzato z [9]).



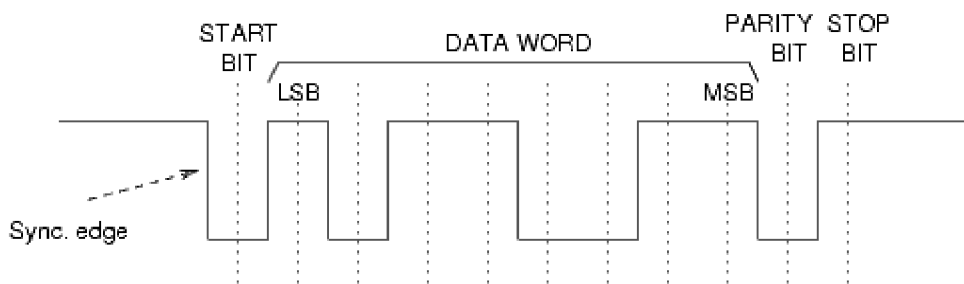
Obr. 5.19: Schéma zapojení převodníku USB/UART pro datový mód

Ze zapojení na obrázku 5.19 je zřejmé, že se jedná o zařízení napájené samotným přístrojem, tedy self-powered. Napájení USB sběrnice z případně připojeného PC slouží pouze ke spuštění interního povolení napájení, tedy zvýšení napětí na pinu #RESET, který je v době nepřipojeného počítače držen pull-downem (R15) ve stavu log. 0.

5.8.2 Sériový port RS232

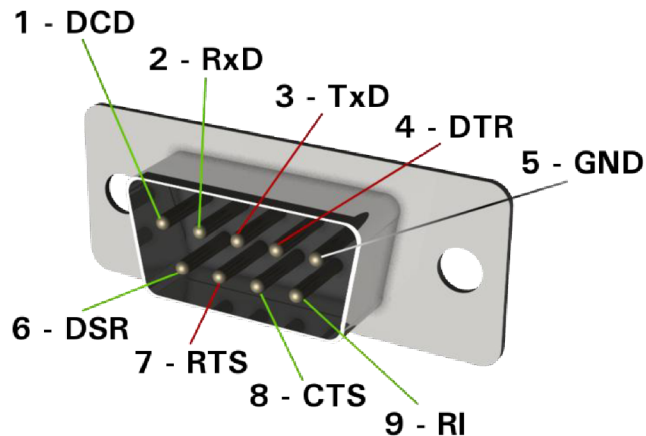
Použití sériové linky bylo zvoleno z důvodu větší odolnosti vůči rušení a z důvodu základní sériové komunikace s PC. Daný port může využívat vždy pouze jedno zařízení. Jsou využity dva převodníky úrovní RS232 na TTL: MAX3232CSE od firmy MAXIM. Jeden prvek zajišťuje USART/RS232 komunikaci pro měřená data a nastavování parametrů wattmetru a druhý MAX3232CSE je využit jako převodník rozhraní RS232/UART pro programování mikroprocesoru ATmega2560. Ačkoli sériová linka je dnes velmi potlačena masivním využíváním USB rozhraním, má své opodstatněné využití i dnes.

Sériový port RS232 je opět asynchronní sériová komunikace, obdobně jako USB. Norma RS232 určuje vlastnosti elektrických signálů použitých u přímého sériového spojení. Povoleny jsou jen dva stavy: MEZERA (SPACE), která vyjadřuje logickou 0 a kladné napětí. Druhý stav je ZNAČKA (MARK), který vyjadřuje logickou 1 a odpovídá zápornému napětí. Norma též uvádí hodnoty těchto napětí. Pro kladné hodnoty se pohybují od +3 V do +15 V, pro záporné napětí od -3 V do -15 V. Norma též pamatuje na ztráty v kabelech a na elmag. rušení. Z důvodu historického vývoje a dnes hlavně kvůli elmag. rušení jsou hodnoty okolo 0 V nespecifikovány. Norma specifikuje maximální přenosovou rychlost vzhledem k délce kabelu. Port RS232 byl navržen pro komunikaci s modemem v historických dobách. V této bakalářské práci sice je využit konektor DB9, ale jsou použity pouze piny 2 (RX data), 3 (TX data), 4 (DTR pro reset). Vlastní komunikace začíná vždy sestupnou hranou, kterou následuje „Start bit“, „Datové slovo“, „Paritní bit“ a jeden nebo více „Stop bitů“. Za povšimnutí stojí, že datové slovo se posílá vždy od nejméně významného bitu (LSB).



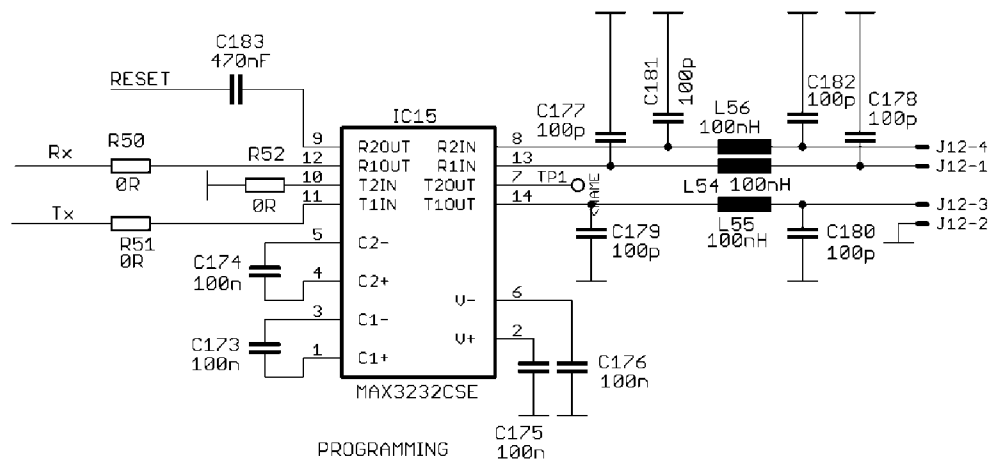
Obr. 5.20: Komunikace na RS232

Vlastní převodník MAX3232CSE je dvojitý budič a dvojitý přijímač. Napájecí napětí se pohybuje od +3 V do +5 V, kdežto výstupní napětí v logických úrovních se generuje pomocí externí nábojové pumpy, kterou tvoří čtveřice keramických kondenzátorů 100 nF. Dosahuje přenosových rychlostí až 1 Mbps a napájecí proud je pouze 1 mA. Oba převodníky jsou připojeny na 9-kolíkový konektor označovaný jako DB9 nebo CANNON. Zachovává všechny normy RS232 včetně různého počtu bitů a nastavení parit.

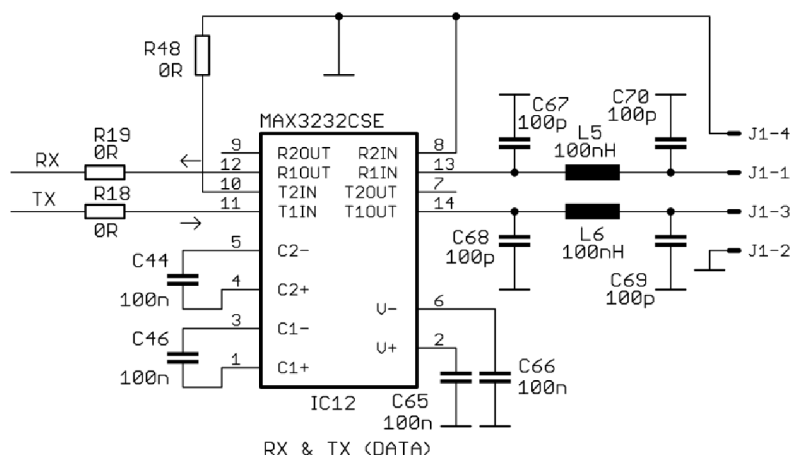


Obr. 5.21: Typické zapojení konektoru RS232 (převzato z [10]).

Zapojení je znázorněno na obrázku 5.22. Je zde využita možnost resetování mikropočítače pomocí vybití kondenzátoru C183, který „zatáhne“ za jeho resetovací pin a tím vyvolá reset stav. V přístroji je osazen ještě jeden MAX3232CSE, který se může využít pouze pro datové přenosy, nikoliv pro programování či resetování přístroje. Jeho schematické zapojení včetně ošetření nevyužitého kanálu je na obrázku 5.22.



Obr. 5.22: Schéma zapojení převodníku RS232/UART pro resetovací a programovací mód



Obr. 5.23: Schéma zapojení převodníku RS232/UART pro datové přenosy

5.9 SD karta

Slot na SD kartu (*Secure Digital Memory Card*) osazený na hlavní procesorové desce slouží k vložení SD karty. Data uložená na SD kartě slouží ke kalibraci měřiče. Po úpravě obslužného software může sloužit i jako úložiště naměřených dat. Následné zpracování těchto naměřených dat může být provedeno osobním počítačem či jiným zařízením, jenž umí číst soubory s příponou „.txt“.

Komunikace s SD kartou je sériová a zajišťuje ji z hlediska napěťových úrovní oddělovač 4050-SMD [15] jež zároveň slouží i jako napěťový převodník ze strany CPU (TTL logika) na logiku 3,3 V úrovně. Tento převod napětí se dá uskutečnit i napěťovým děličem, jinými převodníky TTL/CMOS atd. Schéma zapojení oddělovače 4050-SMD a SD karty je na obrázku 5.25.

Pro komunikaci s SD paměťovými kartami se využívá alternativní funkce portu B podporující rozhraní SPI. Je to třívodičové synchronní rozhraní. Výrobce použitého mikropočítače Atmel tyto vodiče označuje názvy MOSI, MISO, SCK a CS. Periferie mohou být nastaveny do dvou režimů: Master či Slave. Komunikace začíná posláním speciálních řetězců, příkazů (SD asociací nazývaný jako „CMDxx rámeček“), poté procesor taktuje celou práci SD karty a očekává přijetí jistého „start bajtu“. Souborový formát je FAT16 či modernější FAT32. O komunikaci s SD kartou se stará již vytvořená knihovna SD.h. od SparkFun Electronics [16].



Obr. 5.24: SD karta (převzato z [11]).

Následující tabulka uvádí typické zapojení pinů SD karty v režimu SPI.

Tab. 5.3: Zapojení pinů paměťové karty v režimu SPI

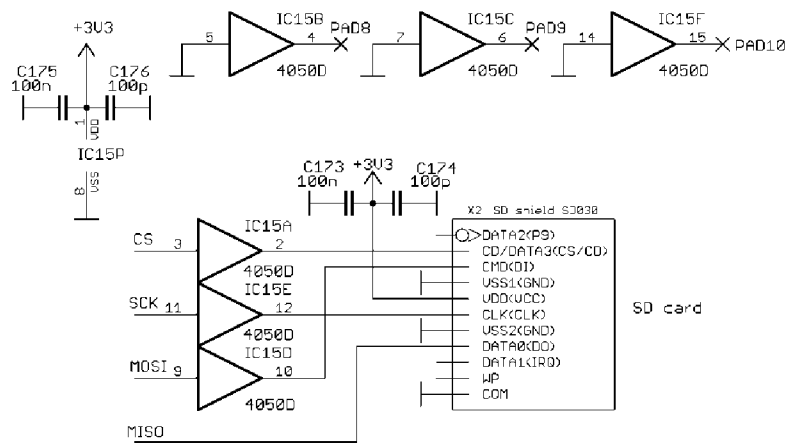
Pin	Typ	Název pinu	Popis
1	I	CS	chip select - aktivní v „low“ (výběr čipu)
2	I	DATA IN	vstup dat (MOSI)
3	PWR	VSS1	GND
4	PWR	VDD	VDD (+3,3 V)
5	I	SCK	řídící hodinové impulzy (SCK)
6	PWR	VSS2	GND
7	O	DATA OUT	výstup dat (MISO)
8	-	n.c.	nezapojeno
9	-	n.c.	nezapojeno

Pozn: I = Input – vstup, O = OUTPUT – výstup, PWR = POWER – napájení

Napájecí napětí SD karty je od 2,7 V do 3,3 V.

Tab. 5.4: Alternativní funkce portu B mikropočítače ATmega2560

Pin	Označení pinu	Alternativní funkce
19	PB0	SS (SPI bus select input)
20	PB1	SCK (SPI bus serial clock)
21	PB2	MOSI (SPI bus master output)
22	PB3	MISO (SPI bus master input)



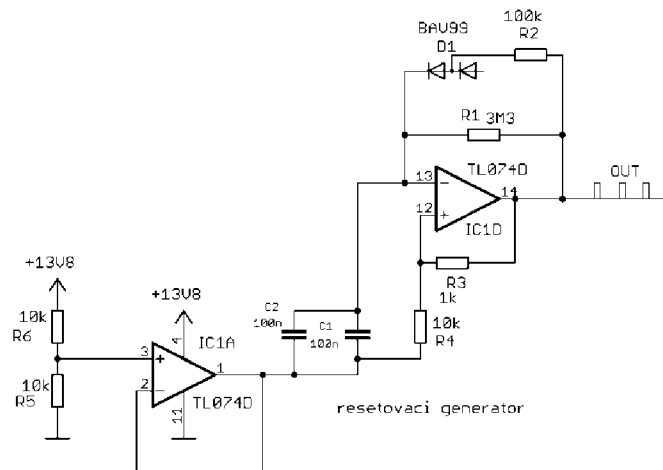
Obr. 5.25: Schéma zapojení převodníku pro SD kartu

5.10 Nabíječ akumulátoru

Ochrana napájení logických obvodů včetně hlavní procesorové desky je nezbytná z důvodu napěťových špiček a proudových nárazů při zapnutí měřiče, kdy se nabíjejí kapacity osazené na deskách plošných spojů. Případné rychlé napěťové špičky omezí transilové diody osazené jak na desce nabíječe, tak na desce procesorové a desce s LCD displejem.

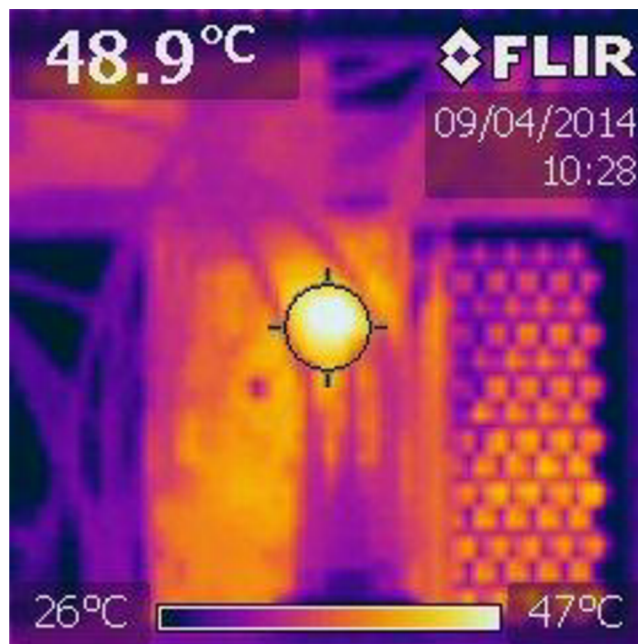
Interní akumulátor má jmenovité napětí 12 V a kapacitu 12 Ah. Jedná se o olověný akumulátor od firmy Banner [17]. Vhodné nabíjení těchto akumulátorů je zdrojem konstantního proudu. Maximální nabíjecí proud olověných akumulátorů se doporučuje desetinu jeho kapacity, v tomto případě tedy 1,2 A. K napěťové stabilizaci a omezení nabíjecího proudu je využít Super Low-Dropout stabilizátor od firmy Micrel s označením MIC5158 [18]. Výkonový prvek je zvolen MOSFET tranzistor IRFZ44 [19].

Nabíjecí napětí 13,8 V a maximální nabíjecí proud 0,85 A je přes Shottkyho diodu a pojistku (T2A) vedeno na akumulátor. Nabíjecí napětí 13,8 V bylo zvoleno jako silně konzervativní pro zachování dlouhé životnosti akumulátoru v různých teplotách a zamezení jeho přebíjení. Při nízkém napětí akumulátoru (pod 10,45 V) vyvolaném například zkratem některého z článků se nabíječ odpojí, jako ochrana před příliš velkou výkonovou ztrátou na regulačním prvku a snaží se nabíjet akumulátor krátkými pulsy, jenž signalizuje LED dioda umístěná v zadní části desky nabíječe. Krátké nabíjecí pulzy jsou v tomto případě vytvářeny oscilátorem (resetovací generátor) s operačním zesilovačem TL074D zapojeným dle obrázku 5.26.

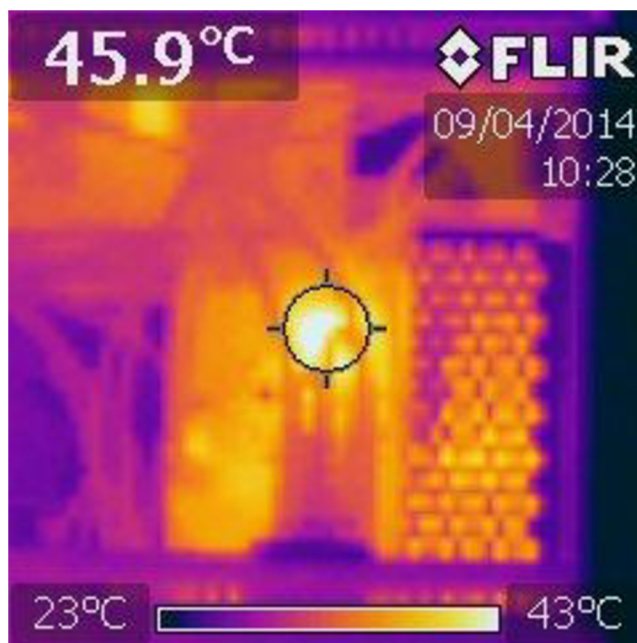


Obr. 5.26: Schéma zapojení resetovacího generátoru nabíječe s TL074D

Kompletní schéma zapojení desky nabíječe lze nalézt v příloze A4. Následující snímky zachycují teplotní rozložení na desce nabíječe a tedy oteplení výkonových prvků při plně nabitém akumulátoru a při vybitém akumulátoru na 10,5 V.



Obr. 5.27: Snímek desky nabíječe pomocí termokamery při plně nabitém akumulátoru



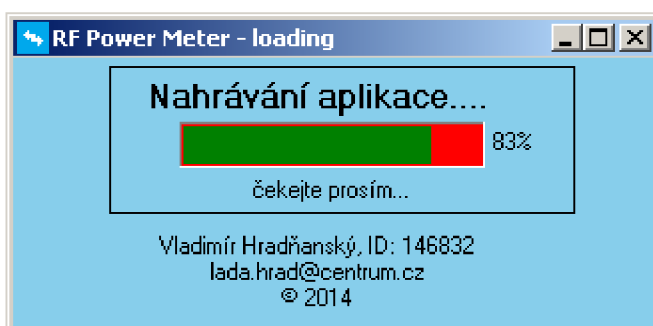
Obr. 5.28: Snímek desky nabíječe pomocí termokamery při vybitém akumulátoru

Spotřeba elektrické energie bez připojené sondy se zapnutým podsvícením LCD displeje je 120 mA, s vypnutým podsvícením pak pouze 85 mA. Výdrž plně nabitě baterie se zapnutým podsvícením je tedy okolo 4 dní. Baterie je odpojovačem odpojována při napětí pod hodnotou 10,45 V. Při napětí okolo 11 V bude podsvícení displeje automaticky vypnut. Manuálně ho lze zapnout v menu přístroje.

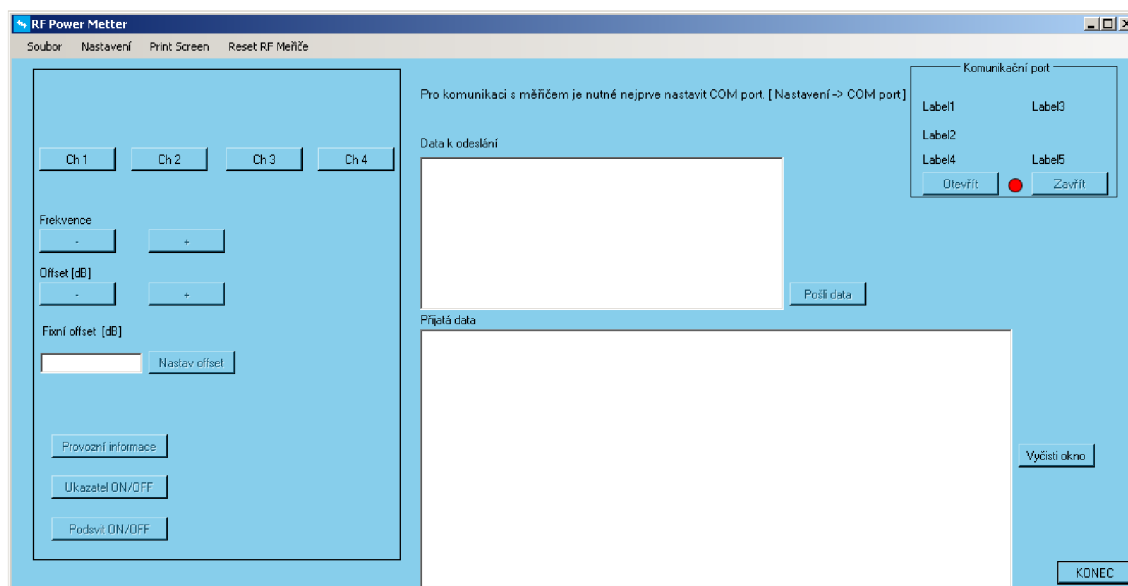
6 KONFIGURAČNÍ SOFTWARE RF POWER METER

Vzdálená obsluha měřiče je realizována přes port RS232. Software umožňuje konfiguraci základních parametrů popsaných v tabulce 6.1 pomocí tlačítek a dále umožňuje reset měřiče. Zkušenější obsluha může využít zadávání příkazů do příkazového pole softwaru či využít některý z volně dostupných programů pro ovládání sériového portu (např: RealTerm, Hyperterminal, Putty, atd.). Měřič po nastavení vždy odpovídá, zda daný příkaz vyvolal, a jaké je jeho aktuální nastavení v poli Přijata data.

Po spuštění programu „RF Power metter.exe“ se ukáže uvítací okno s informacemi (viz obr. 6.1) o verzi programu a samo se poté přepne do hlavního okna (viz obr.6.2).



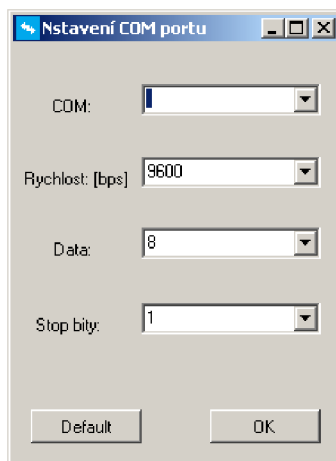
Obr. 6.1: Uvítací okno programu RF Power Meter



Obr. 6.2: Hlavní okno programu RF Power Meter

Pro komunikaci s měřičem je nutné nejprve nastavit komunikační port COM. To lze provést v menu v položce Nastavení-> COM port (viz obr. 6.3). Okno nastavení COM portu zobrazuje pouze aktivní připojené porty. Tento program lze využít i jako

částečně univerzální COM port komunikátor, jenž umožňuje nastavit různé parametry zprávy, zejména počet datových bitů, počet stop bitů a komunikační rychlost. Parita je zde nepoužita. Kliknutím na tlačítko „default“ se parametry COM portu nastaví pro potřeby komunikace s měřičem vf. výkonu. Nastavení se potvrdí tlačítkem „OK“. Po kliknutí na „OTEVŘÍT“ se zvolený COM port otevře a zahájí se tak komunikace s měřičem.



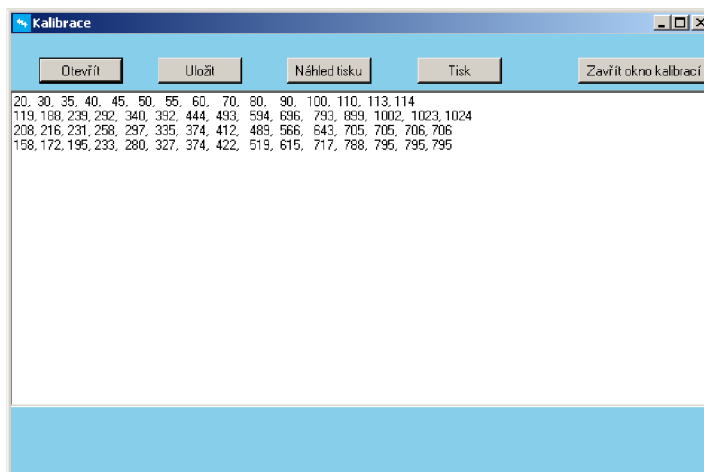
Obr. 6.3: Okno nastavení COM portu

Po otevření komunikace s připojeným měřičem je nutné pomocí tlačítek „Ch 1“ až „CH 4“ vybrat měřicí kanál, jenž chceme konfigurovat. Výběr se nám potvrdí zelenou barvou zvoleného tlačítka a měřič odpoví, který kanál má zvolený.

Pomocí tlačítek „+“ a „-“ lze zvýšit frekvenci či snížit offset vybraného kanálu. Informace o nastavení frekvence či offsetu se vždy potvrdí a měřič odpoví s aktuální nastavenou hodnotou. Offset lze i zadat celočíselně do pole „Fixní offset“ a následně ho potvrdit tlačítkem „Nastav offset“.

Tlačítko „Provozní info“ nám do pole „Přijata data“ vypíše aktuální napájecí napětí a provozní teploty. Zapnou či vypnou podsvícení displeje lze tlačítkem „Podsvit ON/OFF“. Vypnutí či zapnutí analogového ukazatele lze tlačítkem „Ukazatel ON/OFF“.

Kliknutím na „Soubor->Kalibrace“ lze otevřít okno kalibrací (viz obr. 6.4).



Obr. 6.4: Okno Kalibrace

Okno kalibrací umožňuje otevřít (otevře se dialogové okno umožňující nahrát soubor s příponou „.txt“), editovat a následně uložit kalibrační soubor pro měřicí přístroj ve formátu „.txt“. Kalibrační data mají přesný formát zápisu a editování hodnot je určeno jen zkušeným uživatelům. Data je poté vhodné uložit na SD kartu vloženou do PC a poté ji vložit do měřiče přístroje a v menu „SD card“ zvolit možnost „LOAD“. Měřič tak vyvolá proces kalibrace a uložení nových kalibračních dat do své paměti. Kalibrační data lze též vytisknout pomocí tlačítka „TISK“ či zobrazit náhled tisku pomocí tlačítka „Náhled tisku“. Do tisku je automaticky generován text autora programu:

Vytisknuto a zpracováno programem 'RF Power Meter
 © Vladimír Hradňanský, OK2LZ, 2014, lada.hrad@centrum.cz

V hlavním okně programu lze též provádět „PrintScreen“ okna, kdy se obrazovka uloží do paměti počítače a lze ji následně zpracovávat v grafických programech pomocí tlačítek „CTRL+V“, či resetovat měřič výkonu. V kontextovém menu „Soubor“ lze otevřít soubor typu „.pdf“ (pro případné procházení katalogových listů či jiných dokumentů během práce se softwarem). Lze též tisknout aktuální formulář pomocí položky „Tisk“ či otevřít program „Malování“ nebo webový prohlížeč „Internet Explorer“.

Tab. 6.1: Seznam příkazů konfiguračního software „RF Power Meter“

název příkazu	zkratka příkazu	příklad	odpověď měřiče
podsvit displeje	p	p	BackLight: ON/OFF
analogový ukazatel	m	m	PWM ON/OFF
frekvence nahoru	u	u	<i>např:</i> 5 GHz
frekvence dolů	d	d	<i>např:</i> 100 MHz
nastavení fixního offsetu	o	O25	OFFSET: 25 dB

offset nahoru +0,1	a	a	+offset: 25,1 dB
offset dolů -0,1	b	b	-offset: 24,9 dB
Výběr kanálu	c	C02	*****Vybran kanál c: 2 *****
Provozní informace	t	t	<i>Např:</i> 3V3: 3,3V Ucc: 14,2V Temp: 25°C

Pozn: Příkazy lze zadávat pomocí velkých i malých písmen.

Po zadání jednotlivých příkazů lze příkaz odeslat do měřiče pomocí tlačítka Pošli data nebo postačuje po zapsání příkazu stisknout klávesu ENTER.

Okno přijatých dat lze vyčistit pomocí tlačítka Vyčisti okno.

Software byl testován na operačním systému Windows 7 a napsán pomocí programu Microsoft Visual Studio v jazyce Visual Basic. Kompletní program je k dispozici na přiloženém CD.

7 MECHANICKÁ KONSTRUKCE MĚŘIČE

Měřič je vestaven do hliníkové skříně s původním určením pro trunkové rádio firmy BOSCH výšky 3U^{1/2}. Je určen pro uložení na stůl či jinou pracovní plochu. Jeho rozměry jsou – výška: 14 cm, šířka: 48 cm a hloubka: 28 cm včetně madel. Hmotnost je 8,3 kg s akumulátorem. Přední panel je rozdělen do dvou sekcí. V levé sekci se nachází vlastní měřič s elektronikou nutnou k jeho provozu. V pravé části se nachází atenuátor (zeslabovač) 40 dB pro měření výkonů do 100 W (10 + 40 dB). Na levém čelním panelu jsou čtyři konektory pro připojení jednotlivých měřících sond a konektor pro SD kartu, LCD displej pro zobrazování naměřených údajů, 12 ovládacích tlačítek a dva vypínače pro odpojení sítě 230 V a akumulátoru 12 V. Na pravém čelním panelu se nachází vstup a výstup z atenuátoru a přibližný indikátor výkonu v dBm. Indikátor slouží především pro sledování směru nastavování výkonů, zda se výkon zvyšuje či snižuje na testovaném zařízení. LED diody nad jednotlivými konektory signalizují správné připojení a rozeznání měřící sondy. Vypínačem „230 V~ 50 Hz“ se měřič napájí ze sítě, vypínačem „BATTERY“ se měřič napájí z interního akumulátoru a v případě je-li napájen ze sítě tak se akumulátor dobíjí. Pro dobíjení baterie ze sítě je nutné mít zapnutý vypínač „230 V~ 50 Hz“ i vypínač „BATTERY“.

Na zadní straně měřiče se nachází analogové výstupy z jednotlivých sond oddělené přes sledovače, napájecí konektor s pojistkou pro 230 V / 50 Hz, zemnicí kolík krytu, dva datové konektory DB9. Horní datový konektor DB9 „female“ je určen jako výstupní a lze z něj číst provozní a změřená data. Spodní datový konektor DB9 „female“ je určen na programování měřiče pomocí sériové linky. Do obou datových konektorů lze přímo připojit převodník RS232/USB a využívat tak virtuální COM port pro čtení či programování měřiče bez nutnosti rozdělovat horní kryt skříně. USB konektor plní stejnou funkci jako horní datový konektor, s tím rozdílem, že rozhraní je zde USB pro přímé připojení k PC, který není vybaven sériovou linkou.

Z původní skříně bylo využito jen šasi, ostatní prvky jsou upraveny jako prototypová výroba opracovaná ručně. Vnitřní uspořádání odpovídá vnějšímu rozdělení na pravou a levou část popsanou výše.

Atenuátor je tvořen čipem od firmy Diconex. Jedná se o typ 16-6796 se ztrátovým výkonem 50 W [20]. Celý atenuátor je vložen do výbrusu hliníkového kvádru se závitů na upevnění čipu, horního krytu a celé konstrukce. Celý kvádr je vložen do chladiče z černěného hliníku a ten je připevněn ke spodní hliníkové desce měřiče o tloušťce 2 mm.

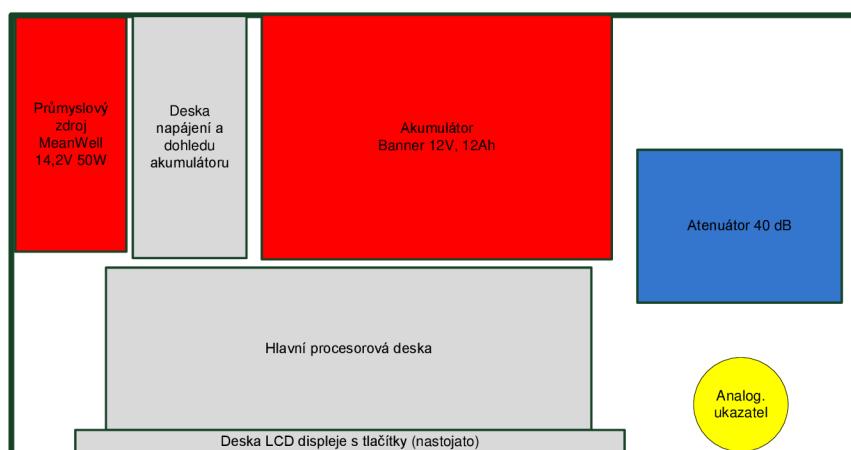
Rozměry některých prototypových plechů na dostavbu skříně byly tvořeny ručním stříháním a opracovány dle výrobní dokumentace, kterou lze nalézt v příloze J. V příloze se též nachází rozměry vrtacích otvorů na madla, rozměry plexiskla před LCD displejem a upevňovací otvory pro desku nabíječe a hlavní DPS.

Seznam plechů, jež byly nutné ručně dopracovat je v tabulce 7.1.

Tab. 7.1: Rozměry dodělávaných plechů

použití plechu	rozměry	tloušťka, materiál
horní kryt	211 x 430	1 mm, Al
vnitřní základna	230 x 425	2 mm, Al
přední levý	128,5 x 320	2 mm, Al
přední pravý	128,5 x 106	2 mm, Al
zadní levý	131 x 320	2 mm, Al
zadní pravý	131 x 111	2 mm, Al

Následující obrázek ukazuje rozmístění komponentů a desek plošných spojů v přístrojové skříni.



Obr. 7.1: Rozmístění komponentů v přístrojové skříni

8 ZÁVĚR

Navržené logaritmické detektory jsou konstruovány jako koncové s maximálním vstupním výkonem do 10 dBm (AD8307 a AD8313) a 0 dBm pro AD8318. Dle typu sondy pracují v kmitočtovém rozsahu od DC až po 8 GHz. Charakteristická vstupní impedance sond je 50 Ω. Dynamický rozsah sond, pro přesnost lepší než 0,5 dB, je vždy větší než 63 dB. Maximální chyba měření sondy je vždy pod 0,5 dBm při použití v lineární části převodní charakteristiky. Kalibrace probíhala na kalibrovaném přesném voltmetru a generátoru. Z odměřených dat vyplývá, že nebude nutné používat 3 druhy kalibrací, nýbrž jen dvě, které se provádějí v řídicí jednotce měřiče. Kalibrace dle teploty je připravena na všech deskách plošných spojů, ale není nutná pro vlastní měření. Přesnost vlivem vlastního teplotního rozsahu sond je ±0,5 dB. Navíc byl sestrojen pomocný software „SondaControll“, který přepočítává uživateli hodnoty napětí na výstupech sond na vstupní výkon v dBm. Pro každou sondu a frekvenci samozřejmě bere v potaz kalibrační data.

V další části práce byl navrhnout vlastní měřič výkonu. Jednalo se o desky plošných spojů LCD displeje, napájecího zdroje a hlavní řídicí desky s mikroprocesorem. Vlastní čtyřkanálový měřič vysokofrekvenčního výkonu využívá sestrojených a kalibrovaných vysokofrekvenčních sond. Měřič je schopen autonomně jednotlivé sondy rozeznat, změřit vstupní výkon v závislosti na zvolené frekvenci a ofsetu, komunikovat s osobním počítačem, číst kalibrační data z SD karty, změřené hodnoty zobrazit na analogové stupnici a velkém LCD displeji. Napájení měřiče je buď ze sítě 230 V nebo z interní baterie (12 V, 12 Ah).

V práci bylo navrženo celkem 6 desek plošných spojů, všechny desky jsou osazeny součástkami SMD (velikosti 0603 a 0805). Následně sestrojený software „RF Power Meter“ zajišťuje komunikaci s přístrojem přes port RS232, konfiguruje měřící módy, čte a vytváří kalibrační soubory. Pro programování mikrokontroléru byla zvolena platforma Arduino, především kvůli možnosti snadného sériového programování přes zavedený „bootloader“, dostupnosti vývojové desky, na které probíhaly předběžné testy. Platforma Arduino je též výhodná díky široké komunitě, jsou k dispozici mnohé knihovny, např. byla využita volně šiřitelná knihovna pro LCD display, či knihovny pro SD kartu nebo ovládaní SPI rozhraní.

Celé zařízení bylo vestavěno do hliníkové skříně, na které byly provedeny veškeré mechanické úpravy. Testovací provoz proběhl úspěšně, všechny části jsou funkční. Chyba měření se pohybuje do ±0,5 dB.

Zlepšení práce lze očekávat v dokonalejším přizpůsobení jednotlivých sond a zahrnutí činitele odrazu do výpočtů výkonů. Další možností vylepšení je uložení jednotlivých kalibračních polí do paměti, která již bude implementována na DPS sondy. Tímto by došlo k ušetření paměti CPU a zrychlení výpočetního výkonu. Zdokonalení může být uskutečněno i v pomocném softwaru „SondaControll“ nebo v obslužném softwaru RF Power Meter. Návrh na další práci je implementace DDS generátoru řízeného mikroprocesorem a vytvořit tak rozmítaný generátor (wobler) a měřit přenosové charakteristiky testovaných zařízení. Další možností je implementování některé z průmyslových sběrnic, např. CAN, HPIB, GPIB, ProfiBus atd. Dalším návrhem je automatické ukládání naměřených dat na SD kartu v určitém časovém intervalu.

LITERATURA

- [1] AD8307 Low Cost, DC to 500 MHz, 92 dB Logarithmic Amplifier. Data Sheet (Rev. D). [online]. Analog Devices, Inc. [cit. 1. prosince 2013]. Dostupné na <http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8307.pdf>
- [2] AD8313 Low Cost, DC 0,1 GHz to 2,5 GHz Logarithmic detector/Controller, 70 dB Data Sheet. [online]. Analog Devices, Inc. [cit. 1. prosince 2013]. Dostupné na <http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8313.pdf>
- [3] AD8318 Low Cost, 1 Mhz to 8 GHz Logarithmic detector/Controller, 70 dB Data Sheet. [online]. Analog Devices, Inc. [cit. 1. prosince 2013]. Dostupné na <http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8318.pdf>
- [4] DINGFELDER, Herbert (DL5NEG). RF power sensors [online]. [citováno 1. prosince 2013]. Dostupné na <<http://www.dl5neg.de/powermeter/theory/powersensors.html>>
- [5] ATmega2560 [online]. Atmel Corporation. [cit. 3. května 2014]. Dostupné na [www: < http://www.atmel.com/devices/atmega2560.aspx>](http://www.atmel.com/devices/atmega2560.aspx).
- [6] Arduino SA. ATmega2560 – Arduino Pin Mapping [online]. [cit. 3. května 2014]. Dostupné na [www: <http://arduino.cc/en/Hacking/PinMapping2560>](http://arduino.cc/en/Hacking/PinMapping2560).
- [7] Atmel Corporation. ATmega640/1280/1281/2560/2561 datasheet [online]. [cit. 3. května 2014]. Dostupné na [www: < http://www.atmel.com/Images/Atmel-2549-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf >](http://www.atmel.com/Images/Atmel-2549-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf)
- [8] RC4004A-FHW-CSX. [online]. TME Czech Republic s.r.o. [cit. 3.května 2014]. Dostupné na [www: <http://static2.tme.eu/katalog_pics/7/7/d/77d7ab3d2e838f9da9ead46d31387ab3/rc4004a-fhw-csx.jpg >](http://static2.tme.eu/katalog_pics/7/7/d/77d7ab3d2e838f9da9ead46d31387ab3/rc4004a-fhw-csx.jpg)
- [9] FT232RL USB UART IC (Ver.2.10). [online]. Future Technology Devices International Ltd. Dostupné na [www: < http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf>](http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf)
- [10] EGNITE GmbH. rs232male-large.png [online]. [cit. 3. května 2014]. Dostupné na [www: < http://www.ethernut.de/img/rs232male-large.png>](http://www.ethernut.de/img/rs232male-large.png).
- [11] Media Leaders s.r.o. 2g-sd-card.jpg [online]. [cit. 30. Dubna 2014]. Dostupné na [www: <http://www.cool-mania.eu/mini/w-960-720/data/product/2g-sd-card.jpg>](http://www.cool-mania.eu/mini/w-960-720/data/product/2g-sd-card.jpg)
- [12] IRFL014, Power MOSFET. [online]. Vishay Siliconix. Dostupné na <www.vishay.com/docs/91191/sihfl014.pdf>
- [13] KTY82 series. Silicon temperature sensors. [online]. NXP-Philips. [cit. 3.května 2014]. Dostupné na < http://www.nxp.com/documents/data_sheet/KTY82_SER.pdf>
- [14] LM4132 SOT-23 Precision Low Dropout Voltage Reference. [online]. Texas Instruments. [cit. 3.května 2014]. Dostupné na < <http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/lm4132.pdf>>
- [15] 4050 SMD.[online].NXP/Philips. [cit. 3.května 2014]. Dostupné na < <http://www.gme.cz/img/cache/doc/953/067/4050-smd-datasheet-1.pdf>>.
- [16] FAT 16 Library. [online]. Sparkfun Electronics [cit. 1.června 2014]. Dostupné na www.sparkfun.com/Code/FAT16.zip
- [17] GIV-S-12-12 Banner. [online]. BANNER GmbH. [cit. 20.května 2014]. Dostupné na <<http://www.bannerbatterien.com/banner/files/FolderGiV-SBllocGb.pdf>>

- [18] MIC5156\5157\5158 Super LDO Regulator Controller. [online]. Micrel, Inc. [cit. 3.června 2014]. Dostupné na < http://www.micrel.com/_PDF/mic5156.pdf >
- [19] IRFZ44 Advanced Power MOSFET.[online]. Fairchild semiconductor [cit. 3.června 2014]. Dostupné na < <http://skory.z-net.hu/alkatresz/irfz44.pdf> >
- [20] 50W AIN Atenuator. [online]. Diconex.[cit. 14.června 1014]. Dostupné na <<http://www.diconex.fr/media/16-6796.pdf>>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

dB	decibel – poměrová jednotka
dBm	decibel nad miliwatem
ss	stejnoseměrné(ý) napětí (proud)
st	střídavé(ý) napětí (proud)
n.u.	not used – nepoužito v zapojení (neosazeno na DPS)
V	volt – jednotka napětí
mA	miliampér – jednotka proudu
P _{IN}	vstupní výkon
S ₁₁	činitel odrazu na vstupu sondy
GHz	jednotka frekvence – gigahertz
MHz	jednotka frekvence – megahertz
DC	stejnoseměrné napětí
DPS	deska plošného spoje
MCU	mikroprocesorová jednotka
ppm	Parts per milion – jedna miliontina z celku
vf	vysokofrekvenční
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (pólem řízený tranzistor)
DB9	typ datového konektoru CANNON (9 pinů)

SEZNAM PŘÍLOH

Přílohy jsou v samostatném souboru, jelikož informační systém neumožňuje nahrát práci větší než 5 MB.

Brno 23.5.2014

Hradňanský Vladimír