

Bakalářská práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektromagnetického pole

## Konstrukce kompaktního ovládání mikrovlnného detektoru

**Jakub Junek**

Vedoucí práce: Ing. Viktor Adler, Ph.D.  
Studijní program: Elektronika a komunikace  
Květen 2024



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Junek** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **499176**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**  
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Konstrukce kompaktního ovládání mikrovlnného detektoru**

Název bakalářské práce anglicky:

**Construction of a Compact Control of a Microwave Detector**

Pokyny pro vypracování:

Provedte rešerši technik měření mikrovlnného výkonu. Dále se pokuste o reverzní inženýrství dostupného mikrovlnného detektoru Mini-Circuits ZX47-60-S+. Popište funkci jednotlivých obvodů v modulu detektoru a ověřte měřením funkčnost detektoru. Navrhněte řídicí elektroniku k detektoru tak, aby se přijímaný mikrovlnný výkon zobrazoval na displeji, napájení bylo přes USB-C konektor, aby se přes něj dal také měřený výkon vyčítat, umožněte používat uživatelskou kalibraci detektoru, detekujte zvukem či LED diodou určitou nastavitelnou měřenou hodnotu výkonu, navrhněte k elektronice s detektorem plastovou krabičku vhodnou pro 3D tisk a celé zařízení zkonstruujte a oživte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Hoffman K., Hudec P.: Vysokofrekvenční a mikrovlnná měření, 2009, České vysoké učení technické v Praze
- [2] Fundamentals of RF and Microwave Power Measurements (AN 1449) - Application Note, 2022, Keysight Technologies
- [3] Teppati V, Ferrero A., Sayed M.: Modern RF and Microwave Measurement Techniques, 2013, Cambridge University Press
- [4] Collier R.J., Skinner A.D.: Microwave Measurements, 3rd Edition, 2007, The Institution of Engineering and Technology
- [5] Hornstein R.: Broadband Reflectometer, diploma thesis, 2002, Vienna University of Technology
- [6] Hall B. D.: Notes on complex measurement uncertainty – part 1, 2010, Measurement Standards Laboratory of New Zealand

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Viktor Adler, Ph.D. katedra elektromagnetického pole FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **06.02.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**

Ing. Viktor Adler, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_ Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_ Podpis studenta



## Poděkování

Chtěl bych poděkovat Ing. Viktoru Adle-  
rovi, Ph.D. za odborný dohled, podmětné  
připomínky a cenné rady. Také bych chtěl  
poděkovat své rodině za podporu během  
mého studia.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci  
vypracoval samostatně a že jsem uvedl  
veškeré použité informační zdroje v  
souladu s Metodickým pokynem o do-  
držování etických principů při přípravě  
vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 23. května 2024

---

Jakub Junek

## Abstrakt

Tato práce se zabývá metodami měření výkonu ve vysokofrekvenční technice. Analyzuje základní metody měření výkonu zkoumající jejich vlastnosti, výhody a omezení. Práce se dále zaměřuje na popis a ověření funkčnosti mikrovlnného detektoru ZX47-60-S+ včetně jednotlivých obvodů v modulu detektoru. Následně je v práci popsán návrh řídicí elektroniky k detektoru a všech náležitostí včetně konstrukční zástavby tak, aby mohl fungovat jako kompaktní samostatný funkční měřič výkonu. V neposlední řadě se práce zabývá jeho zkonstruováním a oživením.

**Klíčová slova:** vysokofrekvenční měření, vysokofrekvenční výkonový detektor, ZX47-60-S+, AD8318, řídicí elektronika

**Vedoucí práce:** Ing. Viktor Adler, Ph.D.

## Abstract

This thesis is mainly concerned with methods of power measurement in high-frequency technology. It analyses the basic power measurement methods, examining their properties, advantages and limitations. The thesis also focuses on describing and verifying the functionality of the microwave detector ZX47-60-S+ including individual circuits in the detector module. Subsequently, the thesis describes the design of the control electronics for the detector and all the details, including the structural design, so that it can function as a compact stand-alone functional power meter. Last but not least, the thesis deals with its construction and debugging.

**Keywords:** radio frequency measurement, microwave power detector, ZX47-60-S+, AD8318, control electronics

**Title translation:** Construction of a Compact Control of a Microwave Detector

## Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>	<b>9 Mechanická zástavba</b>	<b>51</b>
<b>2 Metody měření výkonu ve vysokofrekvenční technice</b>	<b>3</b>	<b>10 Závěr</b>	<b>55</b>
2.1 Úvod do měření výkonu ve vysokofrekvenční technice	3	<b>Seznam použitých zkratk</b>	<b>57</b>
2.2 Bolometrické detektory	5	<b>Bibliografie</b>	<b>59</b>
2.2.1 Termistorové detektory	5	<b>A Finální schéma řídicí elektroniky detektoru</b>	<b>65</b>
2.2.2 Baretr	5		
2.3 Termočláňkové detektory	6		
2.4 Diodové detektory	6		
2.5 Kalorimetrické metody	8		
2.6 Další typy detektorů	8		
<b>3 Detektor ZX47-60-S+</b>	<b>9</b>		
3.1 Popis	9		
3.2 Logaritmičká detektor AD8318	10		
3.3 Vstupní atenuátor	13		
3.4 Schéma detektoru ZX47-60-S+	16		
<b>4 Ověření funkčnosti detektoru ZX47-60-S+</b>	<b>19</b>		
4.1 Měříčí pracoviště	19		
4.2 Naměřená data	20		
4.3 Porovnání s katalogovým listem	22		
<b>5 Schématický návrh řídicí elektroniky</b>	<b>23</b>		
5.1 Displej	23		
5.2 SD karta	24		
5.3 Rotační enkodér	25		
5.4 Akustická a světelná signalizace	25		
5.5 Rozhraní	26		
5.6 Mikrokontrolér	27		
5.6.1 ADC	28		
5.6.2 Programování	28		
5.7 Napájení	29		
<b>6 Návrh desky plošných spojů</b>	<b>31</b>		
<b>7 Firmware</b>	<b>35</b>		
7.1 Konfigurace	35		
7.2 Výpočet mikrovlnného výkonu	36		
7.3 Sekvence programu	37		
7.4 Ovládání zařízení	37		
<b>8 Oživení detektoru</b>	<b>41</b>		
8.1 UART/USB převodník	41		
8.2 5V stabilizátor napětí	43		
8.3 Kalibrace	44		
8.4 Ověření funkčnosti	48		

## Obrázky

2.1 Termistor pro měření vf. a mikrovlnných výkonů, převzato z [3].	5	5.5 Schéma rotačního enkodéru. ....	25
2.2 Základní konstrukce termočláňkového detektoru, převzato z [9].	6	5.6 Schéma signalizací. ....	26
2.3 VA charakteristika Schottkyho ZBS diody, převzato z [3].	7	5.7 Schéma USB-C konektoru s ESD ochranou. ....	26
2.4 Zjednodušený náhradní obvod diodového detektoru, převzato z [3].	7	5.8 Schéma mikrokontroleru. ....	27
3.1 Detektor ZX47-60-S+, převzato z [11].	9	5.9 Dolní propust. ....	28
3.2 Převodní charakteristika detektoru, převzato z [12].	10	5.10 Programovací konektor s ESD ochranou. ....	28
3.3 Vnitřek detektoru. ....	10	5.11 Ladicí LED diody. ....	29
3.4 funkční blokové schéma AD8318, převzato z [17].	11	5.12 Schéma zdroje 5V/3,3V. ....	29
3.5 Převodní charakteristika a chyba detektoru, převzato z [17].	12	6.1 Detektor s namontovanou T spojkou a pravoúhlým SMA jack konektorem do DPS. ....	31
3.6 Pouzdro LFCSP, převzato z [18].	13	6.2 Vizualizace DPS. ....	32
3.7 Schéma článků s přízpusobovacím odporem. ....	14	6.3 Vizualizace DPS s displejem. ...	33
3.8 Schéma detektoru s připojeným vstupním zařízením o impedanci 50 Ω. ....	15	7.1 Nakonfigurované piny MCU v programu STM32CubeIDE. ....	36
3.9 Pouzdro MCLP™ 3x3 mm, převzato z [24].	15	7.2 Zobrazované obrazovky 1. ....	38
3.10 Závislost útlumu na frekvenci atenuátoru GAT-3+, převzato z [24].	16	7.3 Zobrazované obrazovky 2. ....	39
3.11 Schéma pro ověření funkčnosti AD8318, převzato z [17].	17	8.1 Schéma převodníku UART/USB. ....	41
3.12 Schéma detektoru ZX47-60-S+. ....	17	8.2 Převodník UART/USB. ....	42
4.1 Měřicí pracoviště. ....	19	8.3 Frézka LPKF Protomat E44. ...	42
4.2 Změřená převodní charakteristika detektoru ZX47-60-S+. ....	20	8.4 DPS převodníku UART/USB připojená k DPS řídicí elektroniky. ....	43
4.3 Změřený vstupní koeficient odrazu detektoru ZX47-60-S+. ....	21	8.5 Napěťový regulátor S13V10F5 od firmy Pololu, převzato z [43]. ....	43
4.4 Změřený poměr stojatých vln detektoru ZX47-60-S+. ....	21	8.6 Stabilizátor napětí připojený k DPS řídicí elektroniky. ....	44
4.5 Poměr stojatých vln uvedený v katalogovém listu, převzato z [11].	22	8.7 Nejistota způsobená PSV při kalibraci. ....	45
5.1 Blokové schéma řídicí elektroniky. ....	23	8.8 Schéma simulace z programu AWR. ....	46
5.2 Porovnání displejů. ....	24	8.9 Simulace PSV pro 9dB atenuátor. ....	47
5.3 Schéma displeje. ....	24	8.10 Nejistota způsobená PSV s vloženým atenuátorem při kalibraci. ....	47
5.4 Schéma paměťové micro SD karty. ....	25	8.11 Změřená převodní charakteristika detektoru ZX47-60-S+ pomocí ADC. ....	48
		8.12 Měřicí pracoviště. ....	49
		8.13 Ověření funkčnosti 1. ....	49
		8.14 Ověření funkčnosti 2. ....	50
		8.15 Ověření funkčnosti 3. ....	50
		9.1 Vizualizace navržené krabičky. ...	51



9.2 Přidělané komponenty k dílům krabičky. ....	52
9.3 Obrázek navrženého a zkonstruovaného zařízení z jedné strany. ....	53
9.4 Obrázek navrženého a zkonstruovaného zařízení z druhé strany. ....	53
9.5 Obrázek navrženého a zkonstruovaného zařízení ze spodní strany. ....	54

## Tabulky

2.1 Porovnání jednotek W a dBm. . .	4
3.1 Popis pinů a zkratk vstupů a výstupů detektoru AD8318. ....	11





# Kapitola 1

## Úvod

Vysokofrekvenční technika je technická oblast, která formuje nejenom moderní komunikační systémy, vývoj elektroniky, ale také poskytuje základní kameny pro technologický pokrok ve spoustě navazujících odvětví.

Měření napětí a proudu je ve vysokofrekvenční technice obtížné, a proto je jednodušší měřit přímo výkon. Ten je jednou ze základních veličin používaných ve vysokofrekvenční technice jako ukazatel amplitudy signálu.

Cílem této práce je popsat nejběžněji používané metody měření výkonu, jejich vlastnosti, výhody a omezení. Dále se práce věnuje popisu a ověření funkčnosti detektoru ZX47-60-S+ a následně se zabývá návrhem, konstrukcí a oživením řídicí elektroniky k tomuto detektoru a všech náležitostí. Cílem je vytvořit kompaktní samostatný funkční měřič výkonu, který bude schopen efektivně pracovat při různých aplikacích.



## Kapitola 2

### Metody měření výkonu ve vysokofrekvenční technice

#### 2.1 Úvod do měření výkonu ve vysokofrekvenční technice

U stejnosměrných a nízkofrekvenčních průběhů je výkon definován pomocí efektivních hodnot napětí  $U$ , proudu  $I$  a odporu  $R$  dle (2.1), kde můžeme změřit napětí a proud, případně odpor a výkon vypočítat jako

$$P = U \cdot I = \frac{U^2}{R} = R \cdot I^2 \quad (\text{W}; \text{V}; \text{A}; \text{V}; \Omega; \Omega; \text{A}). \quad (2.1)$$

U vyšších frekvencí (cca nad 100 MHz) je nutné měřit přímo výkon, protože měření napětí a proudu je problematické. Ideální voltmetr by měl mít nekonečnou vstupní impedanci, reálný voltmetr má ovšem i vstupní kapacitu např. 1 pF. Při frekvenci 1 GHz, bude vstupní odpor  $R_{in} = 159 \Omega$ , což vede k zatížení měřeného obvodu. Jedná se vlastně o dělič napětí s kondenzátorem, tedy změřená hodnota je sice špatná, ale při znalosti jak voltmetr funguje a znalosti parametrů měřeného obvodu, lze měření zkorigovat. Napětí se dále mění s polohou podél vedení, což je způsobeno polohou kmiten a uzlů napětí. Tam kde je kmitna napětí bude i větší ztrátový výkon [1]. Když bude výkon měřen přizpůsobeným detektorem, bude naměřená hodnota odpovídat výkonu dodávanému. Ve vlnovodech, které se používají jako přenosové médium na vysokých kmitočtech, se napětí a proud definuje ještě obtížněji, vzhledem ke struktuře elektromagnetického pole uvnitř vlnovodu. Výpočet okamžitého výkonu elektromagnetického pole je definován rovnicí

$$P = \frac{1}{2} \oint \vec{E}_t \times \vec{H}_t \, dS \quad (\text{W}; \text{V} \cdot \text{m}^{-1}; \text{A} \cdot \text{m}^{-1}), \quad (2.2)$$

kde  $\vec{E}_t$  a  $\vec{H}_t$  je intenzita elektrického a magnetického pole v čase  $t$  a  $S$  je plocha, kde je měřen výkon.

Výkon je tak jednou ze základních veličin používaných ve vysokofrekvenční a mikrovlnné technice. Jednotkou výkonu je Watt. V mikrovlnné technice se častěji místo vyjádření absolutního výkonu používá logaritmický poměr dvou výkonů, kde jeden je referenční (2.3). Jednotkou je decibel-dB.

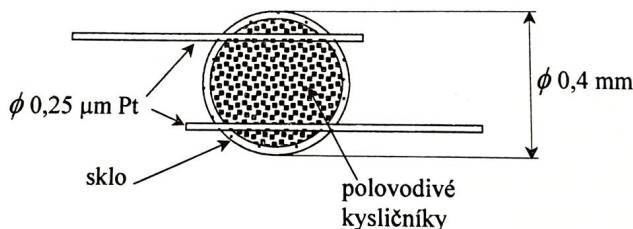


## 2.2 Bolometrické detektory

Bolometrické detektory využívají teplotně citlivý rezistor. Přiváděný mikrovlnný výkon způsobí zahřátí odporového prvku a v důsledku toho se změní jeho odpor. Měřením tohoto odporu lze určit velikost přivedeného mikrovlnného výkonu. K vyhodnocení změny odporu se používá Wheatstoneův můstek. Výhodou bolometrických detektorů je velmi dobrá časová stabilita a linearita. Nevýhodou je měření pouze průměrného výkonu s malým rozsahem a pomalou dobou odezvy - stovky ms.

### 2.2.1 Termistorové detektory

Nejběžnější typ bolometrického detektoru je termistorový detektor. Termistorové snímače mají kulovitý tvar a jejich povrch je tvořen keramickou vrstvou. Tělo detektoru je složeno z polovodičových oxidů kovů, do kterého jsou zapojeny dva malé přívodní vodiče, jak je ukázáno na obrázku 2.1 [3, 6]. Tyto snímače mají záporný teplotní koeficient odporu, to znamená, že s rostoucí teplotou klesá jejich odpor. Termistory se nejčastěji používají pro komerční řešení. Použitelné jsou až do 110 GHz a dynamický rozsah mají -10 dBm až +10 dBm [3, 7].



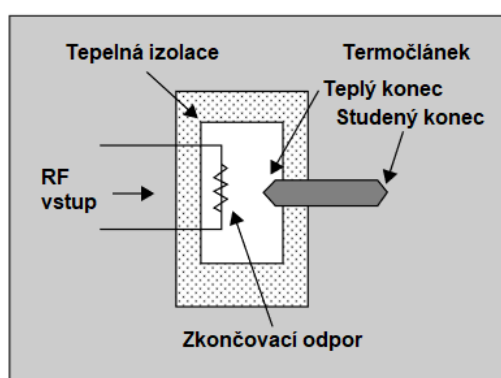
**Obrázek 2.1:** Termistor pro měření vf. a mikrovlnných výkonů, převzato z [3].

### 2.2.2 Baretr

Dalším typem je baretr, skládající se z tenkého platinového drátku, který je pokrytý vrstvou stříbra. Dopadající výkon ohřívá drátek a tím se mění odpor baretru, který má kladný teplotní koeficient odporu. Jejich mezní frekvence je 18 GHz a maximální vstupní výkon 10 dBm. Baretry jsou hojně používány v normalizačních laboratořích, kde se v některých případech používají také tenkovrstvé bolometry, které využívají tenké kovové vrstvy jako teplotně citlivé rezistory. Tyto bolometry mají maximální vstupní výkon až 30 dBm [3, 8].

## 2.3 Termočláňkové detektory

Termočláňkové nebo-li termoelektrické detektory využívají tepelných účinků výkonu, ve spojení s termočláňkem. Ten se obecně používá k měření teplotních rozdílů. Termočláňek využívá Seebeckův (nebo také Termoelektrický) jev - spojí-li se dva rozdílné kovy nebo polovodiče a jejich spoje budou mít rozdílnou teplotu, lze mezi nimi naměřit elektromotorické napětí. Mikrovlňný signál je buďto přímo přiveden na jeden konec termočláňku, nebo je nepřímo ohříván pomocí zakončovacího odporu. Rozdíl teplot a generované napětí je přímo úměrné přivedenému výkonu. Ohřívané části jsou tepelně izolovány od okolí. Konstrukce je nastíněna na obrázku 2.2.



**Obrázek 2.2:** Základní konstrukce termočláňkového detektoru, převzato z [9].

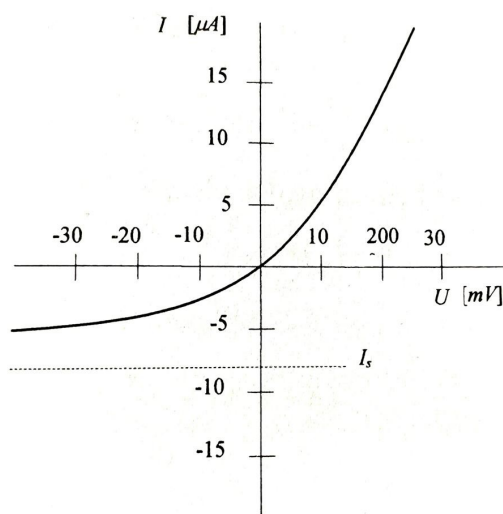
Ve většině termočláňkových detektorů je výstupní napětí malé a musí být zesíleno. Jelikož nemá detektor žádnou zpětnou vazbu, mohlo by se stát vlivem stárnutí, nebo změny okolní teploty, že výstupní napětí nebude odpovídat vstupnímu mikrovlňnému výkonu. Tento problém je vyřešen zabudováním oscilátoru pro potřeby kalibrace na frekvenci 50 MHz a výkonu 1 mW [7, 9].

Termočláňkové detektory mají dynamický rozsah přibližně -30 dBm až 20 dBm a jsou použitelné až do 110 GHz. Jejich výhodou je nezávislost na teplotě okolí, časová stabilita a poměrná linearita. Nevýhodou je schopnost měření pouze průměrného výkonu a častou potřebou referenčního zdroje. Jejich doba odezvy se pohybuje řádech ms [5, 10].

## 2.4 Diodové detektory

Diodové detektory využívají usměrňujících vlastností polovodičových diod, které jsou základní součástí těchto detektorů. Používají se Schottky diody s přechodem kov-polovodič, nejčastěji v provedení ZBS („Zero Bias Schottky“). Tyto diody mají vlastnost, že koleno voltampérové (VA) charakteristiky prochází nulou. Obrázkem 2.3 je znázorněna typická VA charakteristika.





**Obrázek 2.3:** VA charakteristika Schottkyho ZBS diody, převzato z [3].

Tuto VA charakteristiku lze matematicky vyjádřit rovnicí

$$I = I_S \cdot \left( e^{\frac{Ue}{nkT}} - 1 \right), \quad (2.5)$$

kde:

$e$  je náboj elektronu, roven  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C,

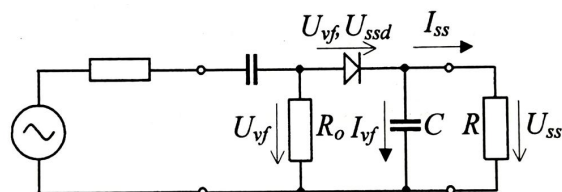
$k$  je Boltzmanova konstanta, rovna  $1,37 \cdot 10^{-23}$  J/K,

$T$  je absolutní teplota v kelvinech,

$n$  je tzv. činitel ideálnosti, pohybující se v rozmezí 1,1 - 2,

$I_S$  je zpětný saturovaný proud.

Na obrázku 2.4 je znázorněn zjednodušený náhradní obvod diodového detektoru. Odpor  $R_0$  zabezpečuje impedanční přizpůsobení s vedením a snižuje závislost vstupní impedance na frekvenci výkonu a teplotě. Na druhou stranu snižuje citlivost detektoru. Mikrovlnný signál je na diodě usměrněn na stejnosměrný. Kondenzátor  $C$  slouží jako dolní propust pro zkratování případného střídavého signálu a vyhodnocuje se jen stejnosměrná složka na odporu  $R$ .



**Obrázek 2.4:** Zjednodušený náhradní obvod diodového detektoru, převzato z [3].

Diodové detektory mají dynamický rozsah -70 dBm až 20 dBm a frekvenční rozsah 0,1 MHz až 50 GHz. Jejich největšími výhodami jsou velký dynamický rozsah, možnost měření velmi malých výkonů (blížící se -70 dBm) a velmi rychlá odezva, řádově v  $\mu$ s. Lze je tedy použít i pro měření výkonu pulzních



## Kapitola 3

### Detektor ZX47-60-S+

#### 3.1 Popis

ZX47-60-S+ je mikrovlnný výkonový detektor od firmy Mini-Circuits, který je určen pro měření výkonu na  $50\Omega$  koaxiálním vedení. Detektor je zobrazen na obrázku 3.1.



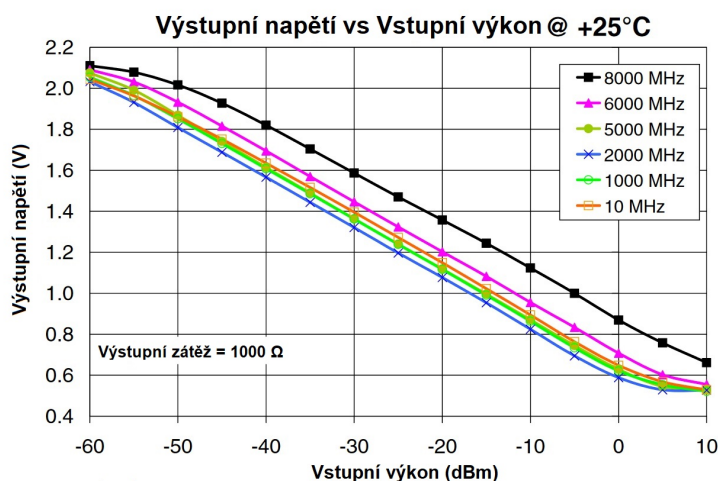
**Obrázek 3.1:** Detektor ZX47-60-S+, převzato z [11].

Frekvenční pásmo, ve kterém je detektor schopný měřit, je 10 MHz až 8 GHz a výkonové pásmo od  $-60$  dBm do  $+5$  dBm. Maximální vstupní výkon při kterém dojde ke zničení detektoru, je  $+15$  dBm. Vstupní mikrovlnný výkon se převádí na stejnosměrné napětí v rozsahu  $0,5$  V -  $2,1$  V, které je výstupem detektoru. Převodní charakteristika je zobrazena na obrázku 3.2, má sklon  $-25$  mV/dB.

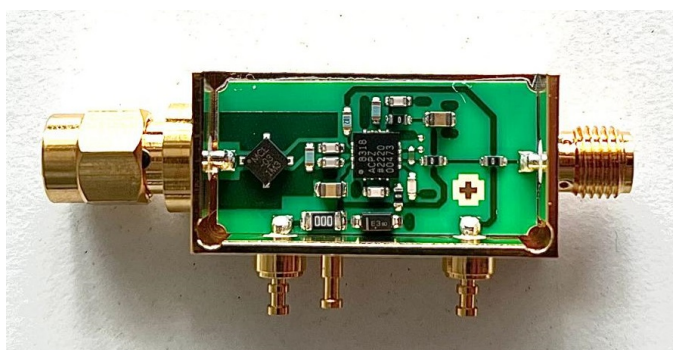
Detektor potřebuje pro svou funkci být napájen z  $5$  V zdroje (maximálně  $5,7$  V) a maximální udávaný vstupní proud je  $120$  mA. Detektor má zabudovaný teplotní senzor s rozlišením  $2$  mV/ $^{\circ}$ C, který slouží ke kompenzaci chyby měření způsobenou teplotou okolního prostředí. Doba odezvy je u náběžné hrany  $400$  ns a u sestupné hrany  $10$  ns. Konektory detektoru jsou pro vstupní mikrovlnný výkon SMA samec, pro výstupní stejnosměrné napětí SMA samice a pro napájení detektoru a výstup teplotního senzoru piny [12].

Běžně se detektor používá pro měření a monitorování mikrovlnného výkonu, nebo v rychlých zpětnovazebních smyčkách. Často se nachází v nízkonákladových zařízeních pro měření výkonu [13, 14] nebo i v přístrojích pro zdravotnictví [15, 16].

Po odšroubování čtyř šroubků lze sundat vrchní kryt a lze vidět dovnitř detektoru. Pohled do detektoru je zachycen na následujícím obrázku 3.3. Uvnitř detektoru se nachází deska plošných spojů (DPS) s dobře viditelnými



**Obrázek 3.2:** Převodní charakteristika detektoru, převzato z [12].

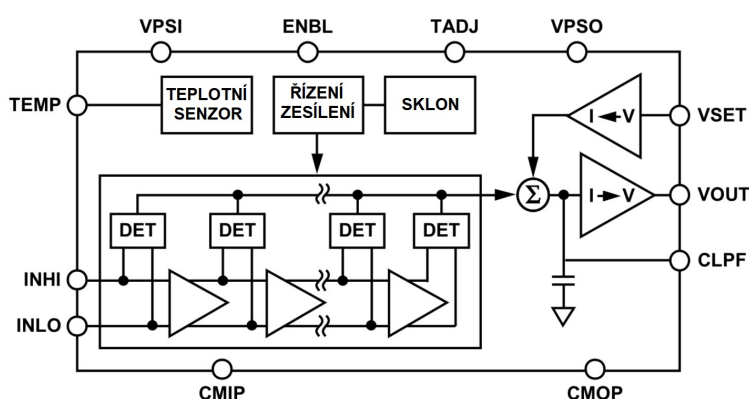


**Obrázek 3.3:** Vnitřek detektoru.

propojovacími cestami. Na středu DPS se nachází čip s označením 8318 ACPZ #2220 00473. Podle označení se jedná o logaritmický detektor AD8318 od firmy Analog devices [17]. Další série čísel je pravděpodobně výrobní číslo, nebo nějaký interní identifikátor z výroby. Blíže je tato součástka popsána v následující kapitole 3.2. V levé části DPS, hned u vstupu vysokofrekvenčního signálu, se nachází součástka s označením MCL -03 1M3, která je pootočená o 45°. S největší pravděpodobností se jedná o atenuátor. Bližší rozbor atenuátoru je popsán v kapitole 3.3. Dále se na DPS nachází pasivní součástky, jejichž rozbor a funkce jsou popsány v kapitole 3.4

## 3.2 Logaritmický detektor AD8318

Jak již bylo zmíněno, jádro detektoru ZX47-60-S+ tvoří logaritmický detektor AD8318 od firmy Analog devices. Jedná se o devítistupňový demodulační logaritmický zesilovač, který převádí vstupní vysokofrekvenční napětí na odpovídající stejnosměrné napětí s logaritmickou stupnicí. Blokové schéma je na obrázku 3.4 a popis vstupů a výstupů v tabulce 3.1.



Obrázek 3.4: funkční blokové schéma AD8318, převzato z [17].

Tabulka 3.1: Popis pinů a zkratk vstupů a výstupů detektoru AD8318.

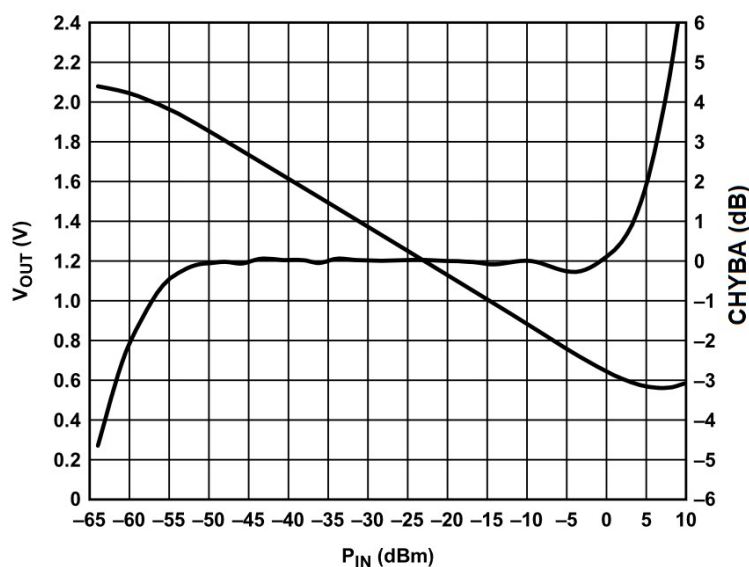
Pin	Zkratka	Popis
1, 2, 11, 12	CMIP	zem vstupní části
3, 4	VPSI	kladné napájecí napětí vstupní části
5	CLPF	filtrovací kondenzátor
6	VOUT	výstup měřícího nebo řídicího režimu
7	VSET	vstup žádané hodnoty nebo zpětné vazby
8	CMOP	zem výstupní části
9	VPSO	kladné napájecí napětí výstupní části
10	TADJ	nastavení teplotní kompenzace
13	TEMP	výstup teplotního senzoru
14	INHI	VF vstup
15	INLO	VF vstup-zem
16	ENBL	aktivace detektoru
	EPAD	vnitřně spojen s CMIP - připájet na zem

Detektor využívá progresivní kompresi pro převodní logaritmickou funkci-aproximace po částech pomocí devíti kaskádových zesilovacích stupňů. Každý má jmenovitý napěťový zisk 8,7 dB a šířku pásma 10,5 GHz. Pomocí vnitřního řízení pracovního bodu zesilovačů, je zesílení stabilní při změnách teploty a napájecího napětí. Nachází se zde i obvody kompenzace ofsetového napětí, které je kompenzováno na jednotlivých stupních. Každý stupeň je vybaven detekční buňkou, kde je signál usměrněn a převeden na diferenciální proudový výstup se střední hodnotou odpovídající úrovni přivedeného signálu. Paralelním spojením všech detektorů dojde jednoduše k sečtení výstupních proudů všech stupňů. Po sečtení a vyfiltrování je proud převeden zpátky na napětí, čímž je tvořen logaritmický výstup.

Detektor může pracovat ve dvou režimech, buďto v režimu určený pro měřící aplikace, nebo v režimu pro řídicí aplikace. V řídicím režimu se na VSET přivede požadované řídicí napětí. Zpětnovazební smyčka vede z VOUT přes regulované zařízení do VSET. Výstup regulovaného zařízení je řízen VOUT

na velikost odpovídající VSET. Pro měřící režim se externě připojí VOUT na VSET. Na pinu VOUT je výstupní napětí, které lineárně klesá s logaritmičticky rostoucím vysokofrekvenčním výkonem přivedeným na vstup. Sklon převodní charakteristiky je typicky  $-25 \text{ mV/dB}$ .

Pro šířku pásma od 1 MHz do 6 GHz má detektor přesnou převodní logaritmickou charakteristiku, ale je použitelný až do 8 GHz. Maximální vstupní výkon je  $+12 \text{ dBm}$ . Pro dosažení chyby menší než  $\pm 1 \text{ dB}$ , je maximální vstupní výkon  $0 \text{ dBm}$  (vztaženo na  $50 \Omega$ ). Spektrální hustota šumu na vstupu je  $1,15 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ , to odpovídá při šířce pásma  $10,5 \text{ GHz}$  vstupnímu napětí  $118 \mu\text{V RMS}$ , nebo vstupnímu šumovému výkonu  $-66 \text{ dBm}$  (vztaženo na  $50 \Omega$ ). Tento šum ovlivňuje spodní hranici dynamického rozsahu. Chyby způsobené tímto šumem jsou částečně kompenzovány pomocí tvarovací demodulační přenosové charakteristiky, která zvyšuje přesnost [17]. Převodní charakteristika i s chybou je zobrazena na obrázku 3.5.



**Obrázek 3.5:** Převodní charakteristika a chyba detektoru, převzato z [17].

Detektor vyžaduje napájení ze zdroje  $4,5\text{-}5,5 \text{ V}$  na piny VPSI a VPSO, kde VPSI napájí vstupní obvody uvnitř detektoru a VPSO výstupní. V blízkosti těchto pinů se doporučuje připojit blokovací kondenzátory  $100 \text{ pF}$  a  $100 \text{ nF}$ . Typický napájecí proud je  $68 \text{ mA}$ . Čtyři vývody z pouzdra zemního potenciálu CMIP zabezpečují kvalitní nízkoimpedanční připojení k zemi DPS.

Pro uvedení detektoru do funkčního stavu je potřeba připojit pin ENBL na napájecí napětí. Při připojení k zemi by byl detektor v režimu spánku, ve kterém má spotřebu  $260 \mu\text{A}$ .

Vstupní piny detektoru pro přivedení vysokofrekvenčního signálu INHI a INLO musí být připojeny pouze střídavě a jejich polaritu nelze zaměnit. Doporučená hodnota vazebních keramických kondenzátorů je  $1 \text{ nF}$  v pouzdře 0402. Kondenzátory musí být umístěny v blízkosti pinů INHI a INLO. Hodnoty těchto kondenzátorů lze zvýšit, tím se sníží mezní frekvence horní propusti

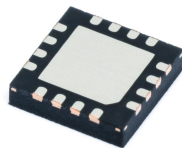
vstupního filtru. Vstupní odpor je typicky  $2\text{ k}\Omega$ , pro impedanční přizpůsobení je potřeba přidat před blokující kondenzátory odpor  $52,3\ \Omega$ , který zajistí širokopásmové přizpůsobení  $50\ \Omega$ .

Doba odezvy na náběžnou hranu je  $12\text{ ns}$  a na sestupnou hranu  $10\text{ ns}$ . V případě, že chceme měřit špičky v průběhu signálu, tak na pin CLPF nebudeme připojovat žádný kondenzátor. Jestli není potřeba měřit špičky, ale pouze harmonické průběhy, tak připojený kondenzátor na pinu CLPF slouží pro filtrování napětí VOUT.

AD8318 umožňuje externí nastavení kompenzace teplotního driftu pomocí odporu připojeného na pin TADJ vůči zemi. Tímto rezistorem lze optimalizovat provoz na různých frekvencích. Nominálně je doporučena hodnota  $499\ \Omega$ , která je optimalizována na vstupní frekvenci  $2,2\text{ GHz}$ .

Součástí detektoru je zabudovaný teplotní senzor s rozlišením  $2\text{ mV}/^\circ\text{C}$  na pinu TEMP. Výstupní napětí při  $27\ ^\circ\text{C}$  je typicky  $600\text{ mV}$ . Zátěž na pinu TEMP by neměla být menší než  $1\text{ k}\Omega$ , aby nedošlo k zatížení obvodu pro vyhodnocování teploty a tím zvýšení nepřesnosti teplotního senzoru.

Detektor se vyrábí v pouzdru LFCSP, jedná se o čtvercové pouzdro o velikosti hrany  $4\text{ mm}$  s 16 vývody určené pro SMD montáž. Pouzdro je zobrazeno na obrázku 3.6. Je doporučeno připájet spodní plošku pouzdra označeného EPAD k zemnímu potenciálu na DPS, tedy spojit s CMIP. Zajišťuje se tím snížení tepelné impedance mezi pouzdem a DPS.



**Obrázek 3.6:** Pouzdro LFCSP, převzato z [18].

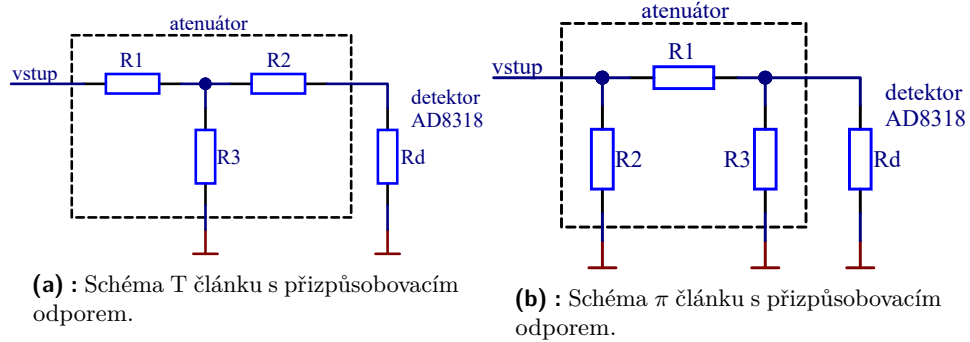
Detektor se běžně využívá pro měření mikrovlnného výkonu v nízkonákladových zařízeních. Možné použití je například pro měření výkonu v pásmu  $5\text{ G}$  [19], nebo v zařízení pro měření vyzářovacích charakteristik antény [20].

### 3.3 Vstupní atenuátor

Předřazení atenuátoru před AD8318 má za následek zvýšení maximálního měřeného výkonu za cenu posunutí i spodní hranice. Atenuátor na vstupu detektoru má označení MCL -03 1M3. Z tohoto označení nemusí být patrné o jaký atenuátor se přesně jedná. Atenuátor je pravděpodobně realizován pomocí  $\pi$  článku nebo T článku, ale nelze určit o jaký typ článku se jedná protože mají stejnou impedanci portů a stejný útlum [21]. Když se změří impedance mezi všemi vývody atenuátoru, výpočtem lze určit jeho útlum.

Na vstup detektoru nebylo nic připojeno, vstupu atenuátoru nebyl ovlivněn žádným jiným rezistorem. Výstup atenuátoru byl připojen k detektoru AD8318, měření bylo ovlivněno vstupním odporem detektoru s paralelní kombinací přizpůsobovacího odporu. Tato paralelní kombinace byla nahra-

zena jednou impedancí  $R_d$  s kterou budeme počítat. Schéma  $\pi$  a T článků s připojením k detektoru je na obrázku 3.7.



**Obrázek 3.7:** Schéma článků s přizpůsobovacím odporem.

Impedance mezi vstupem atenuátoru a zemí byla změřena  $16,4 \Omega$ , mezi výstupem atenuátoru a zemí  $37,2 \Omega$  a mezi vstupem atenuátoru a výstupem atenuátoru  $49,6 \Omega$ . Impedance byly měřeny multimetrem UNI-T UT70A [22], jelikož tento multimetr měří impedanci pomocí napětí  $550 \text{ mV}$ . Přesnější dostupný multimetr Advantest R6552 [23] měří impedanci pomocí  $2,5 \text{ V}$ . Toto napětí by mohlo být pro detektor nebezpečné a mohlo by dojít k jeho zničení.

Pro bližší zjištění typu atenuátoru je potřeba vypočítat jeho útlum. Výpočty budou uvedeny pouze pro T článek, nicméně pro  $\pi$  článek by vyšel výsledný útlum stejně. Impedance, která byla změřena mezi vstupem atenuátoru a zemí se může vyjádřit

$$R_{\text{in}} = R_1 + \frac{R_3 \cdot (R_2 + R_d)}{R_3 + (R_2 + R_d)}, \quad (3.1)$$

impedance změřená mezi vstupem atenuátoru a výstupem atenuátoru se může vyjádřit jako

$$R_{\text{in-out}} = R_1 + R_2 \quad (3.2)$$

a impedance změřená mezi výstupem atenuátoru a zemí se může vyjádřit

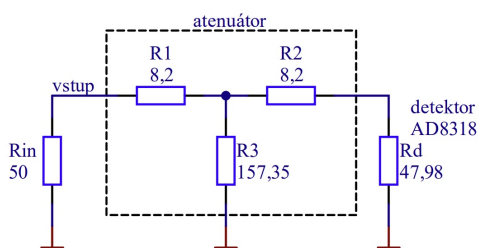
$$R_{\text{out}} = \frac{R_d \cdot (R_2 + R_3)}{R_d + (R_2 + R_3)}. \quad (3.3)$$

Dosažením a vypočítáním těchto rovnic dostaneme hodnoty rezistorů atenuátoru  $R_1 = R_2 = 8,2 \Omega$ ,  $R_3 = 157,35 \Omega$  a vstupní impedanci detektoru s paralelní kombinací přizpůsobovacího rezistoru  $R_d = 47,98 \Omega$ . Z hodnot impedancí lze spočítat útlum atenuátoru.

Na obrázku 3.8 je schéma zapojení detektoru s připojeným vstupním zařízením o impedanci  $50 \Omega$ . Abychom spočítali útlum zapojení, je potřeba znát hodnotu výkonu na vstupu- $P_{R_{in}}$  a na výstupu- $P_{R_p}$ . Uvažujme vstupní napětí  $U_{in}$  rovno jednomu voltu. Napětí na rezistoru  $R_3$  spočítáme jako

$$U_{R_3} = U_{\text{in}} \cdot \frac{\frac{R_3 \cdot (R_2 + R_p)}{R_3 + (R_2 + R_p)}}{\frac{R_3 \cdot (R_2 + R_p)}{R_3 + (R_2 + R_p)} + R_1}, \quad (3.4)$$





**Obrázek 3.8:** Schéma detektoru s připojeným vstupním zařízením o impedanci  $50 \Omega$ .

po dosazení dostaneme  $U_{R3} = 834,67 \text{ mV}$ . Napětí na rezistoru  $R_p$  spočítáme jako

$$U_{Rp} = U_{R3} \cdot \frac{R_p}{R_p + R2}, \quad (3.5)$$

po dosazení dostaneme  $U_{Rp} = 712,84 \text{ mV}$ . Výkon na výstupu je tedy

$$P_{Rp} = \frac{U_{Rp}^2}{R_p}, \quad (3.6)$$

po dosazení dostaneme  $P_{U_{Rp}} = 10,59 \text{ mW}$ . Vstupní výkon je dán

$$P_{Rin} = \frac{U_{Rin}^2}{R_{in}}, \quad (3.7)$$

po dosazení dostaneme  $P_{U_{Rp}} = 20 \text{ mW}$ . Útlum celého obvodu v decibelech se spočítá jako

$$A = -10 \cdot \log \frac{P_{Rin}}{P_{Rp}}, \quad (3.8)$$

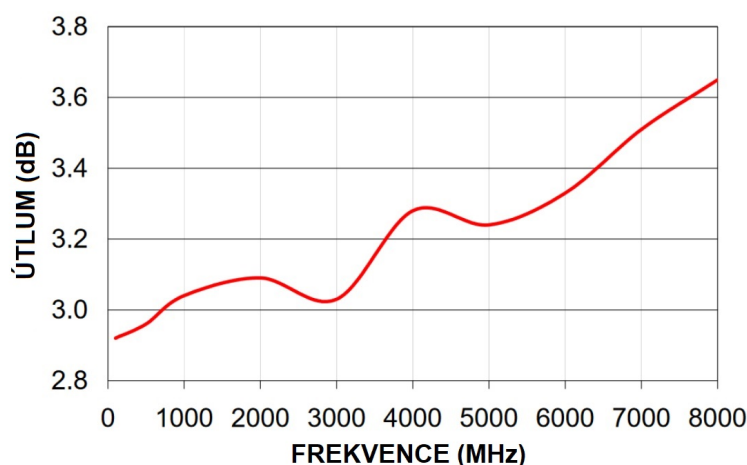
po dosazení dostaneme  $A = 2,76 \text{ dB}$ .

Když se podíváme na nabídku atenuátorů firmy Mini-Circuits v provedení SMD, zjistíme že řada GAT má velice podobné pouzdro, jaké má hledaný atenuátor. Konkrétně se jedná o pouzdro MCLP™ 3x3 mm. Pouzdro má 3 vývody určené pro SMD montáž, je zobrazeno na obrázku 3.9.



**Obrázek 3.9:** Pouzdro MCLP™ 3x3 mm, převzato z [24].

V tomto pouzdře se vyrábějí atenuátory s decibelovým krokem [25]. Naše vypočítaná hodnota je nejbližší celočíselnému útlumu 3 dB. S tímto útlumem existuje atenuátor s označením GAT-3+. Nominální útlum atenuátoru jsou 3 dB s přesností 0,3 dB. Atenuátor tlumí od stejnosměrného signálu do 8 GHz,



**Obrázek 3.10:** Závislost útlumu na frekvenci attenuátoru GAT-3+, převzato z [24].

použitelný je do 10 GHz. Závislost útlumu na frekvenci je zobrazena na obrázku 3.10. Maximální přivedený výkon je  $0,5 \text{ W} \doteq 27 \text{ dBm}$  [24]. Tomu, že se v detektoru ZX47-60-S+ nachází právě tento attenuátor napovídá i to, že maximální vstupní výkon detektoru ZX47-60-S+ je +15 dBm, ale detektoru AD8318 pouze +12 dBm. Tento rozdíl 3 dBm připadne právě attenuátoru. Další nápodědou, že je jedná o tento attenuátor, může být označení na attenuátoru MCL -03 1M3, kde -03 nejspíše značí útlum attenuátoru.

### 3.4 Schéma detektoru ZX47-60-S+

Dále se na DPS se kromě největších součástek AD8318 a GAT-3+ nacházejí pasivní součástky, a to ochranná dioda proti přepólování a rezistory a keramické kondenzátory.

Hodnoty některých rezistorů, lze zjistit pomocí viditelného kódového označení. Hodnotu rezistoru  $R3$  lze zjistit pomocí kódového označení 102, které značí rezistor o hodnotě  $1 \text{ k}\Omega$ . Tím je splněna podmínka připojení zátěže na pin TEMP minimálně  $1 \text{ k}\Omega$ . Jakákoliv další zátěž bude s tímto odporem v sérii a tedy větší než  $1 \text{ k}\Omega$ . DPS je pravděpodobně dvouvrstvá, ve vrchní vrstvě jsou signály a ve spodní je zem. Rezistory  $R2$ ,  $R5$ ,  $R6$ ,  $R8$ ,  $R9$  mají označení 0, což značí hodnotu  $0 \Omega$ . slouží tedy jako propojky. Hodnota rezistoru  $R7$  připojeného mezi piny VOUT a VSET byla změřena  $0 \Omega$ . Tím je vybrán měřicí režim detektoru AD8318. Hodnota rezistoru  $R4$  připojeného na pin TADJ detektoru, zajišťující kompenzaci teplotního driftu, byla změřena  $490 \Omega$ . Vstupní impedance detektoru AD8318 je typicky  $R_{in} = 2 \text{ k}\Omega$ . Tato vstupní impedance tvoří s přizpůsobovacím odporem  $R_p$  paralelní kombinaci, která má hodnotu  $R_d = 47,98 \Omega$  a je dána vztahem

$$R_d = \frac{R_{in} \cdot R_p}{R_{in} + R_p}. \quad (3.9)$$

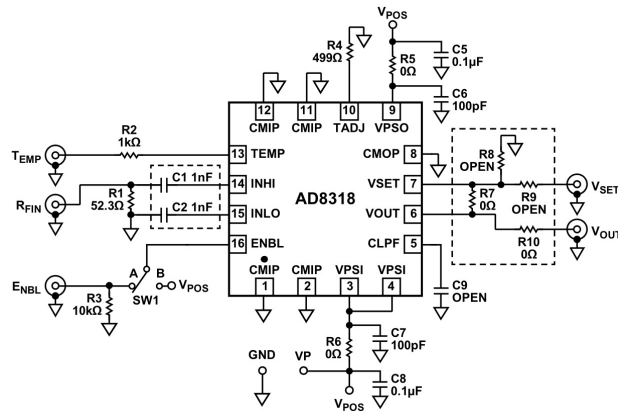
Hodnotu přizpůsobovacího odporu získáme vyjádřením  $R_p$

$$R_p = \frac{R_{in} \cdot R_d}{R_{in} - R_d}, \quad (3.10)$$

který je po dosazení roven  $R_p = 49,16 \Omega$ . Pravděpodobně je zde použit rezistor o hodnotě  $51 \Omega$  z řady E24.

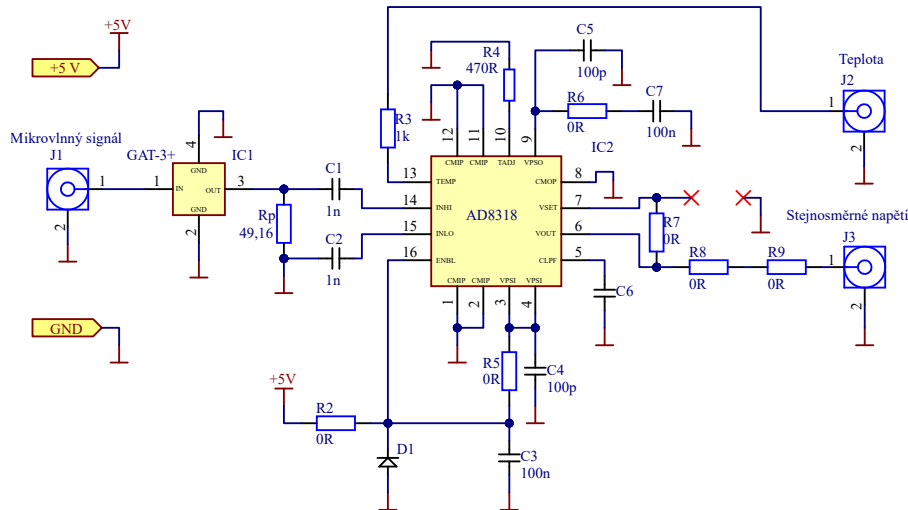
Hodnoty jednotlivých kondenzátorů nelze změřit, kvůli vlivu ostatních kapacit.

V katalogovém listu logaritmického detektoru AD8318 se nachází schéma pro ověření funkčnosti tohoto obvodu viz obrázek 3.11. Schéma detektoru,



**Obrázek 3.11:** Schéma pro ověření funkčnosti AD8318, převzato z [17].

které bylo nakresleno na základě viditelných cest na DPS je na obrázku 3.12. Porovnáním těchto dvou schémat lze říci, že se jedná o velmi podobná



**Obrázek 3.12:** Schéma detektoru ZX47-60-S+.

schémata. Hodnoty kondenzátorů ve schématu detektoru ZX47-60-S+ byly převzaty ze schématu pro ověření funkčnosti detektoru AD8318. Výjimkou je kondenzátor  $C_6$ , který sice je znázorněn ve schématu pro ověření funkce, ale jeho hodnota není uvedena.

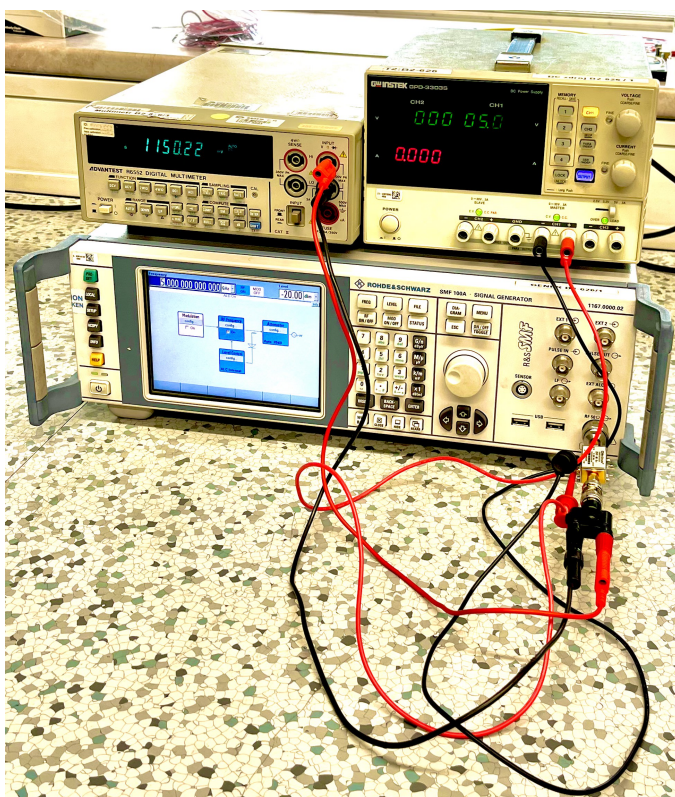


## Kapitola 4

### Ověření funkčnosti detektoru ZX47-60-S+

#### 4.1 Měřící pracoviště

K ověření funkčnosti detektoru bylo vytvořeno měřící pracoviště, obsahující všechny potřebné přístroje. Detektor byl napájen z 5V zdroje, na jeho vstup byl dodáván mikrovlnný signál a na jeho výstupu bylo měřeno napětí. Jako napájecí zdroj byl vybrán GW INSTEK GPD-3303S [26]. K dodávání vysokofrekvenčního signálu byl vybrán signálový generátor Rohde & Schwarz SMF100A [27]. Pro měření výstupního napětí byl zvolen digitální multimetr Advantest R6552 [23]. Měřící pracoviště je zobrazeno na obrázku 8.12.



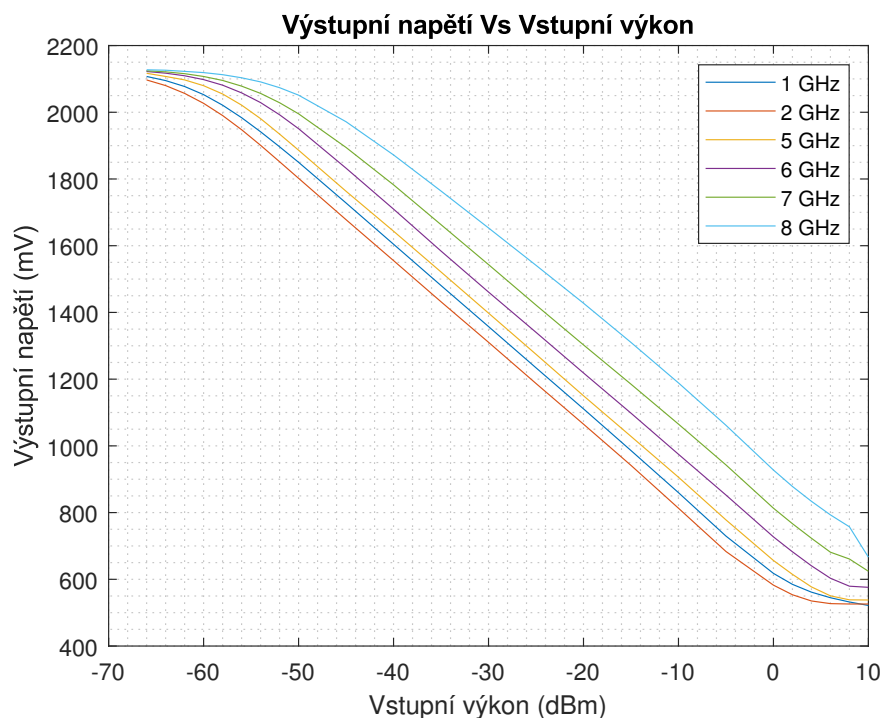
Obrázek 4.1: Měřící pracoviště.

Signálový generátor je zkalibrovaný na jeho výstupní K konektor. Detektor má na vstupu konektor SMA 3,5 mm. Tyto dva konektory jsou mechanicky kompatibilní, je mezi nimi jen malý odraz způsobený ně zcela stejnou konstrukcí, a proto byl detektor přišroubován přímo na signálový generátor a dotažen momentovým klíčem. Přířímým připojením byly vyloučeny případné negativní vlivy propojovacího kabelu. Na výstupní konektor detektoru SMA byla připojena redukce na BNC konektor a na něj byla připojena redukce na banánkové svorky. Do těchto svorek byly připojeny kabely banánek-banánek a připojeny do multimetru. Napájecí napětí bylo přivedeno ze zdroje na piny detektoru pomocí kabelu banánek-svorka.

## 4.2 Naměřená data

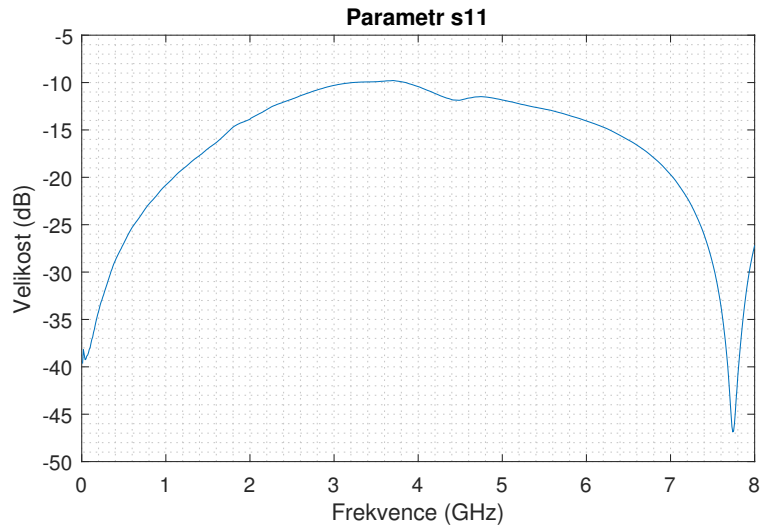
Po připojení detektoru k napájecímu zdroji byl detektorem odebrán proud 62 mA. Na výstupním pinu teplotního senzoru bylo naměřeno napětí 598,98 mV, což odpovídá podle katalogového listu detektoru [11] teplotě 26,5 °C. Teplota v místnosti byla dle teploměru 23 °C.

Detektor měří mikrovlnný výkon již od frekvence 10 MHz, nicméně použitý generátor signálu generuje minimální frekvenci 1 GHz. Z tohoto důvodu bylo měření provedeno pro frekvence 1 GHz, 2 GHz, 5 GHz, 6 GHz, 7 GHz, 8 GHz, pro úrovně signálu od -66 dBm do 10 dBm. Změřená převodní charakteristika je znázorněna na obrázku 4.2. Pro nízké výkonové úrovně výstupní napětí kolísalo, a proto byla na multimetru zapnuta funkce průměrování.



**Obrázek 4.2:** Změřená převodní charakteristika detektoru ZX47-60-S+.

Následně byl změřen vstupní koeficient odrazu  $s_{11}$  pomocí vektorového analyzátoru Rohde & Schwarz ZVA67 [28]. Měření probíhalo pomocí vzduchových konektorů 3,5 mm. Ty mají trochu jiný odraz od SMA než 2,92mm, ale to zanedbáváme. Měření se provedeno při zapnutém detektoru. Naměřené hodnoty jsou znázorněny na obrázku 4.3 v logaritmickém měřítku.

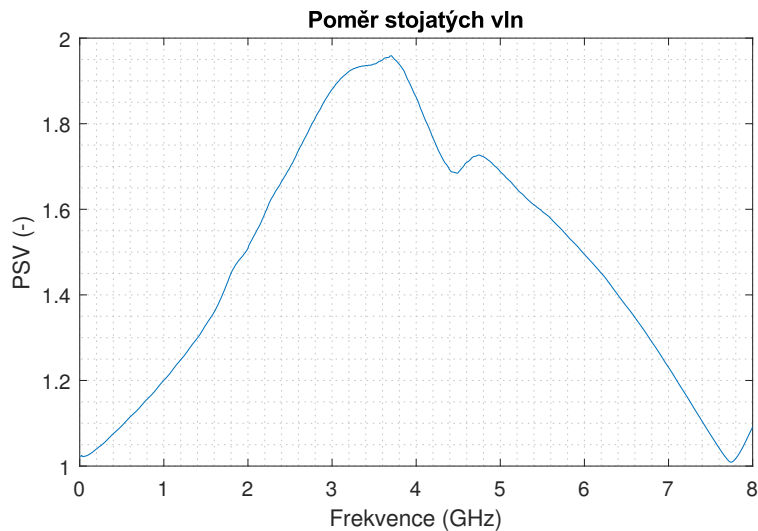


**Obrázek 4.3:** Změřený vstupní koeficient odrazu detektoru ZX47-60-S+.

Z parametru  $s_{11}$  byl poté spočítán poměr stojatých vln (PSV) dle vzorce

$$\text{PSV} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}, \quad (4.1)$$

kde  $\Gamma = s_{11}$  viz obrázek 4.4.

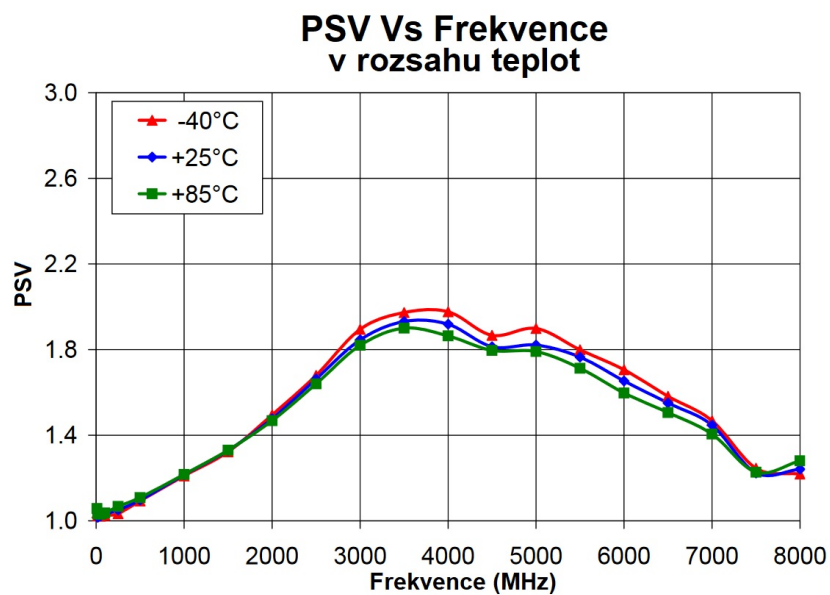


**Obrázek 4.4:** Změřený poměr stojatých vln detektoru ZX47-60-S+.

### 4.3 Porovnání s katalogovým listem

Změřená převodní charakteristika viz obrázek 4.2 odpovídá převodní charakteristice udané v katalogovém listu viz obrázek 3.2.

Změřené PSV viz obrázek 4.4 se shoduje s PSV uvedenému v katalogovém listu 4.5.



**Obrázek 4.5:** Poměr stojatých vln uvedený v katalogovém listu, převzato z [11].



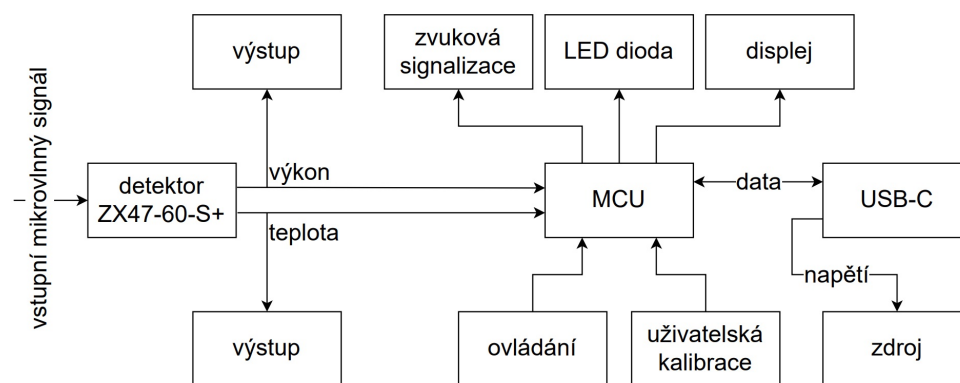
## Kapitola 5

### Schématický návrh řídicí elektroniky

V rámci této práce má být navržena elektronika k detektoru ZX47-60-S+, která bude umožňovat zobrazení přijímaného mikrovlnného výkonu na displeji. Celé zařízení má být napájeno pomocí USB-C konektoru, díky kterého se bude moci také měřený mikrovlnný výkon vyčítat. Zařízení dále bude disponovat možností uživatelské kalibrace. Kromě vizuálního zobrazení měřeného výkonu na displeji bude detekce určité nastavitelné měřené hodnoty výkonu signalizována také prostřednictvím LED diody či zvukovým signálem. Dále je důležité, aby bylo celé zařízení kompaktní.

Celý návrh elektroniky od schématu až po desku plošných spojů byl proveden v programu Altium [29].

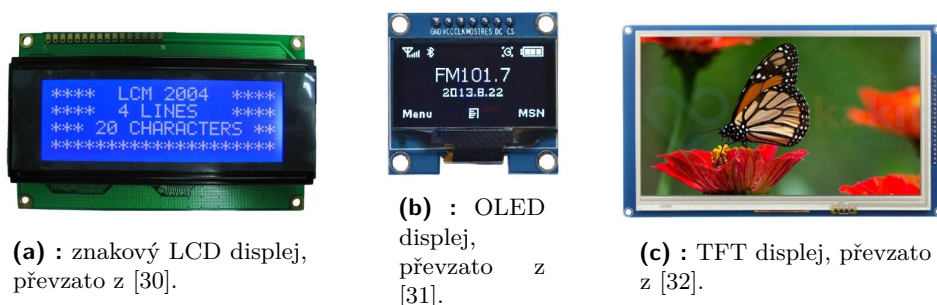
Pro provádění všech výše zmíněných funkcionalit bylo rozhodnuto využít mikrokontrolér (MCU) jako řídicí prvek. Pro lepší přehled, co má elektronika vykonávat, jsou jednotlivé funkční bloky zobrazeny na blokovém schématu, viz obrázek 5.1.



Obrázek 5.1: Blokové schéma řídicí elektroniky.

#### 5.1 Displej

Na trhu je k dispozici široká škála různých typů displejů a zobrazovacích technologií. Pro tuto aplikaci nejsou na displej kladeny příliš vysoké nároky,

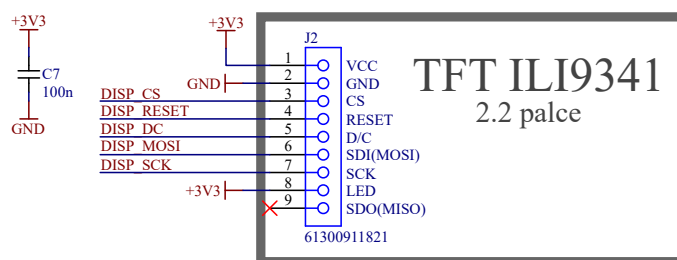


Obrázek 5.2: Porovnání displejů.

a proto postačí jednodušší a cenově dostupnější displej, který dokáže zobrazit pouze pár řádků textu. Klíčové je, aby byl displej menší úhlopříčky z důvodu kompaktnosti celého zařízení. Mezi nejběžnější typy, které splňují tyto požadavky, patří znakový LCD, nebo OLED a TFT displeje, viz obrázek 5.2.

Znakový LCD displej má nevýhodu ve své tloušťce a zobrazení relativně málo informací na jednu obrazovku. Hlavní nevýhodou OLED displeje je běžná dostupnost jen v malých úhlopříčkách. Proto byl pro tuto aplikaci vybrán TFT displej, který je relativně tenký a běžně je dostupný na trhu v různých úhlopříčkách. Konkrétně byl zvolen displej s úhlopříčkou 2,2 palce. TFT displej má výhodu v intenzivním barevném zobrazení. Rozlišení displeje je 240x320 bodů. Displej využívá driver ILI9341 a komunikace probíhá pomocí SPI sběrnice, kterou obsluhuje MCU. Pro řídicí logiku a podsvícení displeje je zapotřebí napájení 3,3 V. K napájecímu pinu řídicí logiky displeje byl přidán blokovací kondenzátor.

Vývody displeje jsou přivedeny na propojovací hřebínek s roztečí 2,54 mm. Ten se napojí do DPS, kde bude dutinková lišta 2,54 mm pro připojení propojovacího hřebíčku 2,54 mm. Schéma je zobrazeno na obrázku 5.3.



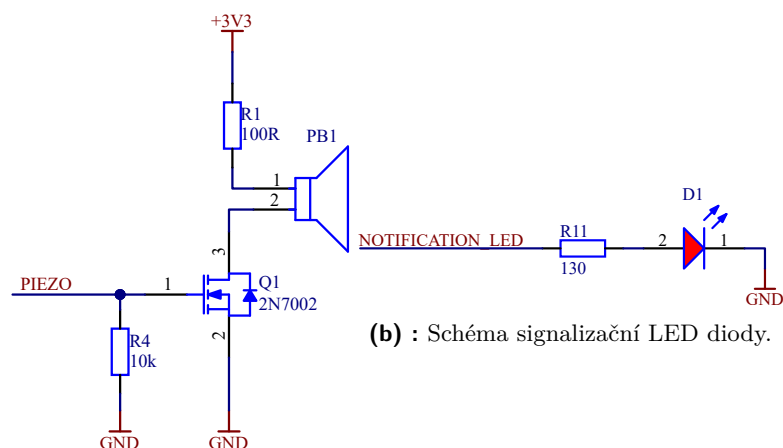
Obrázek 5.3: Schéma displeje.

## 5.2 SD karta

Pro uživatelskou kalibraci detektoru bylo rozhodnuto uložit kalibrační data na micro SD paměťovou kartu. Toto řešení má výhodu v tom, že uživatel nemusí při kalibraci zasahovat do vnitřní paměti MCU. Pro kalibraci stačí vyjmout micro SD kartu ze zařízení a vložit jí do počítače, ve kterém lze



na kraj krabičky. Piezoelektrický měnič je spínán pomocí tranzistoru, který je připojen k MCU, zatímco LED dioda je spínána přímo MCU. Schéma zapojení je na obrázku 5.6.



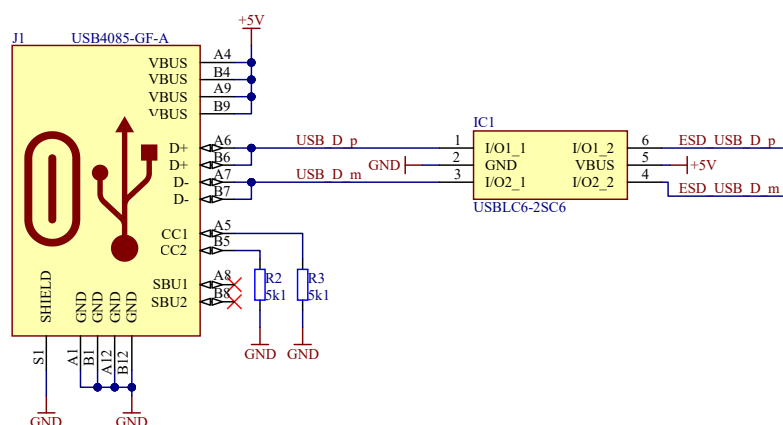
(a) : Schéma pasivního piezoelektrického měniče.

(b) : Schéma signalizační LED diody.

Obrázek 5.6: Schéma signalizací.

## 5.5 Rozhraní

Kromě zobrazování měřených dat výkonu na displeji, byl také požadavek na možnost posílání dat pomocí USB-C konektoru, který zároveň slouží k napájení celého zařízení. Datové vodiče a napájení jsou ochráněny proti ESD výbojům. USB komunikace je obsluhována přímo MCU pomocí integrované periferie, schéma je na obrázku 5.7.



Obrázek 5.7: Schéma USB-C konektoru s ESD ochranou.

Dále zařízení obsahuje dva SMA konektory, na kterých byly připojeny výstupy z detektoru, tedy stejnosměrné napětí odpovídající přivedenému mikrovlnnému výkonu a stejnosměrné napětí odpovídající teplotě detektoru.

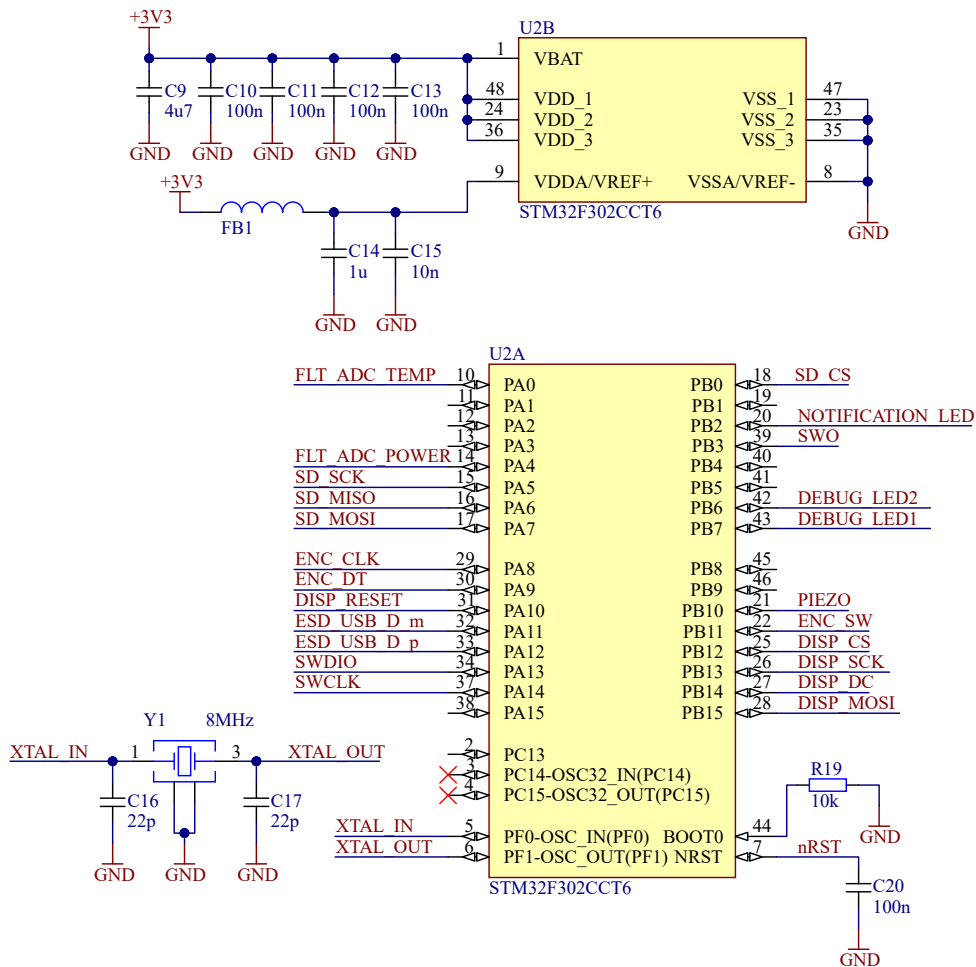
Tyto výstupy umožňují provádět kalibraci detektoru, nebo využívat detektor nezávisle na elektronice.

## 5.6 Mikrokontrolér

Při volbě řídicího obvodu bylo nezbytné zvolit MCU, který zvládne vykonávat a obsluhovat všechny požadované periferie. Požadavky na MCU nesou nějak náročné, zahrnovaly 2x ADC převodník, 2x SPI sběrnice, 7x GPIO, časovače a integrovaná periferie USB a FATFS sloužící pro jednodušší práci s SD kartou.

Z důvodu širokého rozšíření a oblíbenosti byl vybrán MCU od firmy STMicroelectronics. Pomocí programu STM32CubeIDE [33], do kterého byly vloženy požadované parametry, byl vybrán konkrétní MCU. Tímto způsobem byl vybrán MCU STM32F302CCT6.

Základní schéma MCU bylo převzato z katalogového listu [34], které obsahuje krystal 8 MHz, poskytující zdroj hodinového signálu a pasivní součástky nutné pro běh MCU, včetně blokujících kondenzátorů. Schéma včetně připojených periférií je na obrázku 5.8.

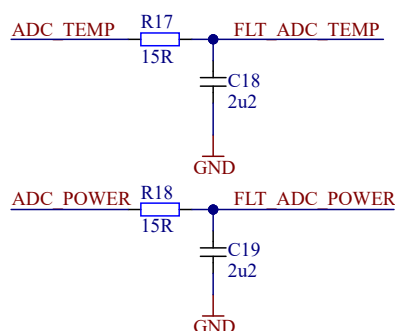


Obrázek 5.8: Schéma mikrokontroleru.

### 5.6.1 ADC

Rozlišení ADC převodníku MCU je 12 bitů, což odpovídá rozlišení 0,8 mV. Výstupní šum signálu z detektoru, který bude digitalizován je u verze ZX47-60LN-S+ se sníženým šumem 20 mVpp. Detektor ZX47-60-S+, pro který se navrhuje elektronika, není verzí s nízkým šumem a lze tedy předpokládat, že výstupní šum bude vyšší. Z toho důvodu bude rozlišení ADC MCU dostatečné a není zapotřebí externí ADC převodník.

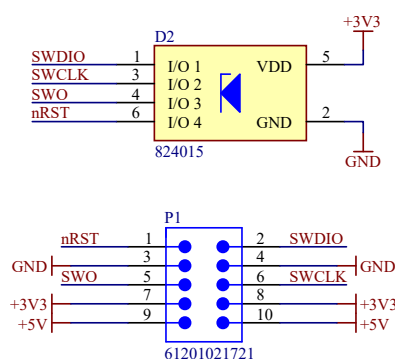
Vzorkovací frekvence byla zvolena na 10 kHz, z toho důvodu byly před ADC vloženy dolní propusti se zlomovou frekvencí 4,8 kHz viz obrázek 5.9.



Obrázek 5.9: Dolní propust.

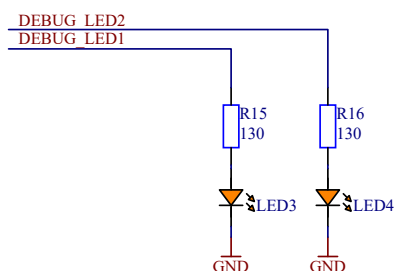
### 5.6.2 Programování

Programovací konektor má totožné rozvržení pinů jako programátor ST-LINK/V2 Clone [35], kterým bude MCU programován. Datové vodiče jsou chráněny proti ESD výbojům, jak je znázorněno na obrázku 5.10.



Obrázek 5.10: Programovací konektor s ESD ochranou.

Pro usnadnění programování a odladování programu byly na volné výstupy MCU připojeny dvě LED diody viz obrázek 5.11.

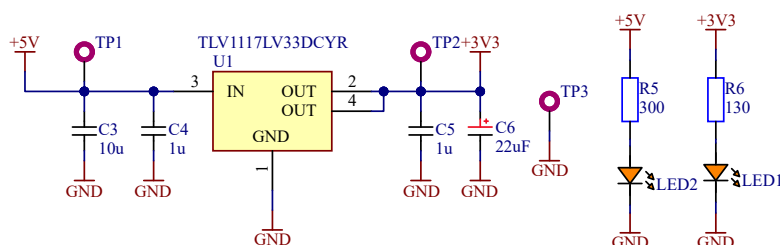


Obrázek 5.11: Ladicí LED diody.

## 5.7 Napájení

Požadavkem bylo celé zařízení napájet z USB-C konektoru. Všechny výše zmíněné periferie vyžadují napájecí napětí 3,3 V, až na samotný detektor, který potřebuje napětí 5 V. USB poskytuje napětí 5 V v toleranci 4,75 V – 5,5 V dle specifikace [36]. Toto napětí není potřeba pro detektor upravovat, zatímco pro 3,3V větev je potřeba snížit. Očekávaný odběr proudu v této větvi jsou maximálně nižší stovky miliampér. Z toho důvodu byl vybrán lineární regulátor napětí TLV1117LV, který má maximální proudové zatížení 1 A, tudíž je pro tuto aplikaci dostatečný.

Hodnoty kondenzátorů u regulátoru byly převzaty z katalogového listu a byly doplněny o dvojici kondenzátorů s vyšší kapacitou pro zlepšení přechodových vlastností [37]. Schéma je doplněno o LED diody signalizující přítomnost dané úrovně napětí a o testovací body pro případné změření napětí. Schéma je zobrazeno na obrázku 5.12.



Obrázek 5.12: Schéma zdroje 5V/3,3V.

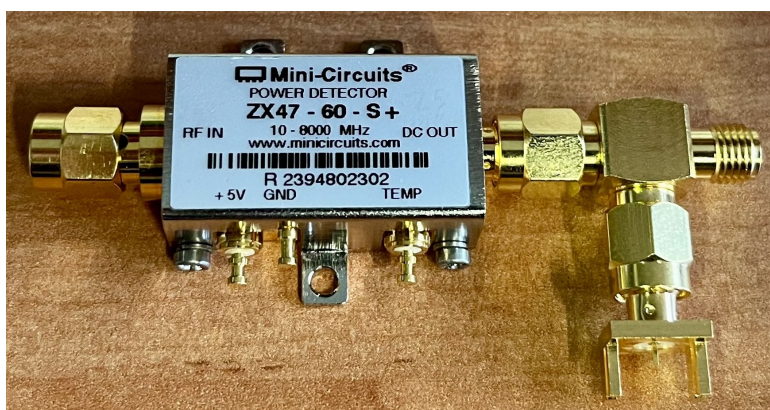




## Kapitola 6

### Návrh desky plošných spojů

Detektor má piny pro připojení na svém boku, proto byla snaha na tyto piny navázat DPS, aby bylo celé zařízení co nejmenší. Výstupní SMA konektor detektoru, na kterém se nachází stejnosměrné napětí odpovídající přivedenému mikrovlnnému výkonu, je umístěn na vedlejší straně detektoru. Aby bylo možné přenést signál z tohoto výstupu na DPS, a zároveň využívat výstup z detektoru nezávisle na elektronice, byla na konektor detektoru připojena T spojka (SMA plug - SMA plug - SMA jack). Na obrázku 6.1 je zobrazen detektor s T spojkou, do které je také připojen pravoúhlý SMA jack konektor, který bude následně připájen na DPS. Tím je dosaženo soustředění všech signálů na jedné straně, což umožní umístění DPS v tomto směru.



**Obrázek 6.1:** Detektor s namontovanou T spojkou a pravoúhlým SMA jack konektorem do DPS.

DPS byla vyráběna ve firmě PragoBoard pomocí služby POOL servis, což je typ výroby určený pro prototypovou výrobu. Tento typ výroby umožňuje kombinovat desky plošných spojů různých typů od různých zákazníků do jednoho výrobního přířezu. Z tohoto důvodu jsou specifikovány požadavky na návrh DPS. Vzdálenosti mezi spojem a mezerou musí být větší nebo rovny 150  $\mu\text{m}$ , všechny otvory musejí mít průměr větší nebo roven 0,3 mm a vnitřní radiusy obrysu desky musejí být větší nebo rovny 2,4 mm [38]. Tyto parametry byly implementovány do návrhových pravidel DPS v programu Altium.

Pro tuto aplikaci bylo rozhodnuto využít DPS o dvou vrstvách. Horní

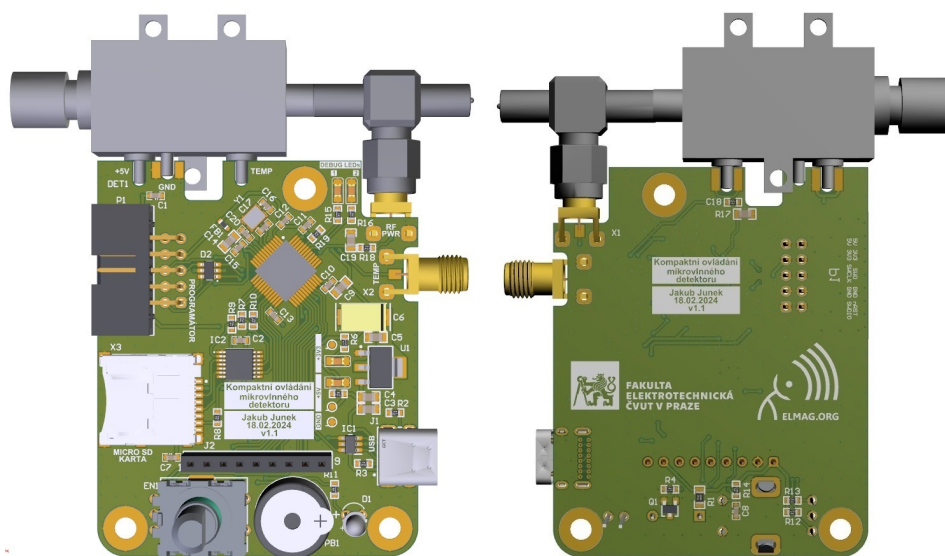
vrstva byla primárně využita pro propojovací cesty a spodní vrstva pro zem.

Signály z detektoru budou digitalizovány pomocí MCU, který byl proto umístěn na DPS poblíž detektoru. K MCU byl na okraj DPS umístěn pravoúhlý programovací konektor. Pro připojení displeje je nezbytná jednořadá devítidutinková lišta s roztečí 2,54 mm. S ohledem na maximalizaci velikosti displeje a současně zachování kompaktnosti celého zařízení, byla dutinková lišta umístěna na druhou stranu DPS než MCU. Tímto bude displej nad větší částí DPS a nad detektorem. Rotační enkodér a LED dioda byli umístěny za devítidutinkovou lištu, aby nebyli v kolizi s displejem. Tam byl umístěn také piezoelektrický měnič. Slot pro micro SD kartu byl umístěn mezi programovacím konektorem a devítidutinkovou lištou. USB-C konektor se zdrojem byl umístěn naproti slotu pro micro SD kartu.

Při rozmístování pasivních prvků, zejména blokových kondenzátorů, je důležité minimalizovat parazitní indukčnost propojovacích cest, aby velikost proudové smyčky byla co nejmenší. Je tedy důležité umístit blokové kondenzátory co nejbližší napájecím pinům a mít dobré prokovení do zemnicí vrstvy. Všechny součástky, až na výjimky, se nacházejí na vrchní vrstvě.

Tloušťka propojovacích cest byla zvolena pro signálové cesty 0,254 mm a pro napěťové cesty 0,4 mm.

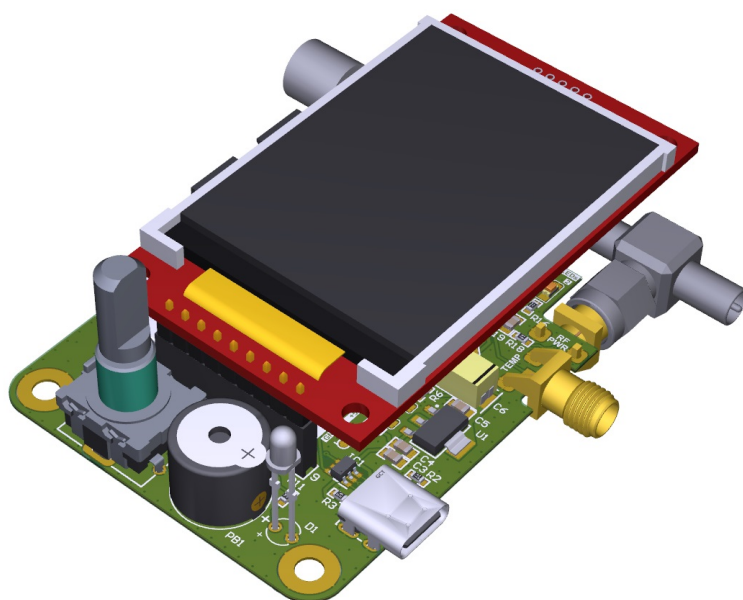
Následně byly na DPS umístěny tři montážní otvory M3, udělán obrys desky a rozmístěny popisky a loga. Vizualizace návrhu je zobrazena na obrázcích 6.2 a 6.3.



(a) : Vizualizace DPS z přední strany.

(b) : Vizualizace DPS ze zadní strany.

**Obrázek 6.2:** Vizualizace DPS.



**Obrázek 6.3:** Vizualizace DPS s displejem.



# Kapitola 7

## Firmware

Výběr konkrétního MCU proběhl v programu STM32CubeIDE, jak již bylo zmíněno v kapitole 5.6. Pomocí tohoto programu byly také nakonfigurovány jednotlivé piny MCU a poté i napsán kód v jazyce C a přeložen.

### 7.1 Konfigurace

Jako zdroj hodinového signálu byl nastaven externí krystal. Displej byl připojen k SPI2. Protože tok dat směřuje pouze z MCU do displeje, byl MCU nastaven do režimu master posílání dat. Rychlost byla nastavena na nejvyšší možnou hodnotu 18 Mbit/s. Piny PA10, PB12, PB14 byly nastaveny jako výstupy.

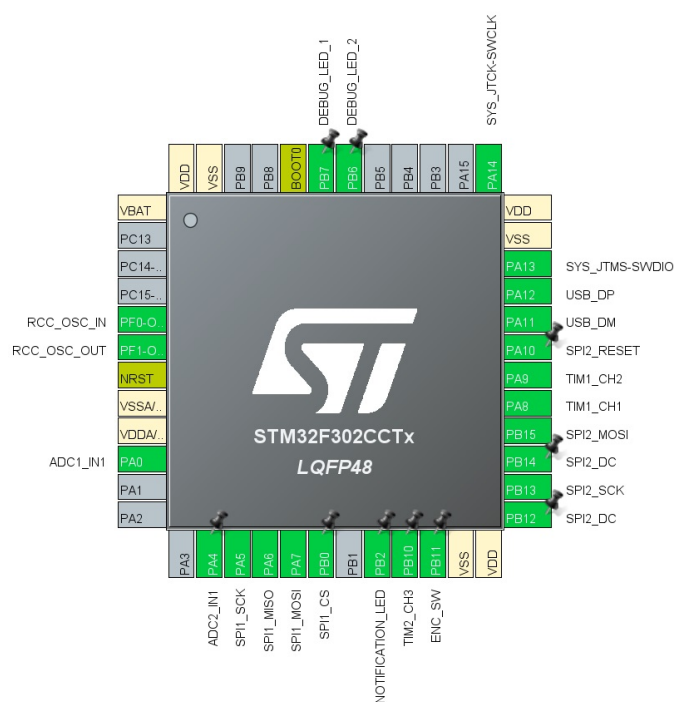
K SPI1 byla připojena SD karta, ze které budou vyčítána kalibrační data a sběrnice byla nastavena do režimu master plný duplex. Rychlost byla opět nastavena na maximální hodnotu 18 Mbit/s. Pin PB0 byl nastaven jako výstup.

Rotační enkodér byl připojen k časovači 1, který byl nastaven do režimu enkodér. Kanál 2 časovače 2 byl použit pro spínání tranzistoru, který řídí piezoelektrický měnič. Tento kanál byl nastaven do režimu generování pulzně šířkové modulace. Kanál 1 časovače 3 byl využit pro řízení vzorkování analogově-digitálního převodníku, který byl nastaven do režimu generování pulzně šířkové modulace bez externího výstupu na frekvenci 10 kHz.

Pro digitalizaci analogových signálů z detektoru byly využity číslicově-analogové převodníky ADC1 pro teplotu a ADC2 pro úroveň mikrovlnného výkonu. U obou převodníků byl nastaven externí spouštěč časovač 3. Pin PB11 byl připojen k tlačítku na rotačním enkodéru a byl nastaven jako režim externího přerušení.

USB bylo nastaveno jako virtuální komunikační port. Rychlost komunikace může dosahovat až 12 MBit/s. Piny PB6 a PB7 byly spojeny s ladicími LED diodami a byly nastaveny jako výstupy.

Pro obsluhu displeje byla použita knihovna [39], pro obsluhu SD karty byly využity knihovna [40] a k obsluze ostatních periférií byly použity HAL knihovny STMicroelectronics.



**Obrázek 7.1:** Nakonfigurované piny MCU v programu STM32CubeIDE.

## 7.2 Výpočet mikrovlnného výkonu

Cílem bylo zobrazovat mikrovlnný výkon na displeji. Detektor poskytuje stejnosměrné napětí odpovídající přivedenému mikrovlnnému výkonu. Převodní charakteristika byla změřena již v kapitole 4. Máme tedy soubor hodnot napětí odpovídajících známému mikrovlnnému výkonu při různých frekvencích. Tato tabulka hodnot bude uložena na micro SD kartě.

Aby byla nalezena hodnota mezi naměřenými body, byly naměřené body interpolovány, po částech linearizovány. To znamená, že pro každý úsek mezi dvěma změřenými body byl vypočítán směrnice tvar přímky příslušné pro danou frekvenci.

Naměřená hodnota napětí pomocí ADC převodníku je porovnána s tabulkou naměřených hodnot převodní charakteristiky. Vzhledem k tomu, že s rostoucím mikrovlnným výkonem klesá výstupní napětí, je hledáno napětí, které je menší než naměřené. Jakmile je toto napětí nalezeno, je možné určit, do které rovnice přímky se dosadí naměřené napětí, a tím získat vypočtenou hodnotu mikrovlnného výkonu.

Jelikož ADC má rozlišení 0,8 mV a převodní charakteristika detektoru má sklon 25 mV/dB, ADC má rozlišovací schopnost 0,032 dB. Bylo rozhodnuto zaokrouhlovat vypočtený výsledek a zobrazovat ho s přesností na 0,05 dB.

## 7.3 Sekvence programu

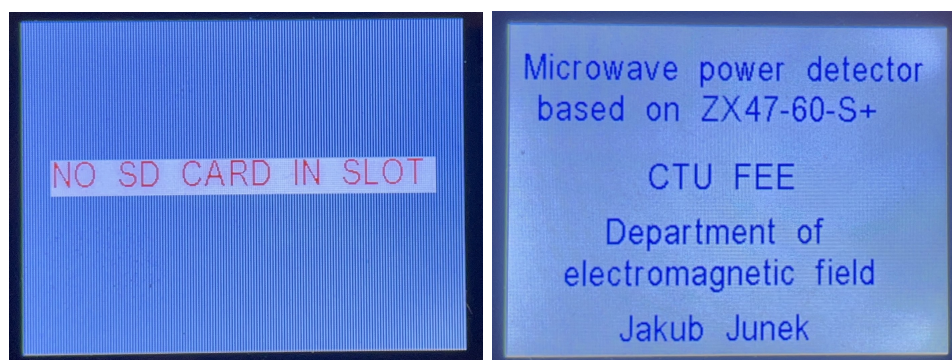
V úvodu programu dojde k inicializaci všech periférií. V případě neúspěšné inicializace zařízení způsobené nevsunutou SD kartou se na obrazovce zobrazí upozorňující nápis viz 7.2a. V opačném případě se na displeji zobrazí uvítací obrazovka, jak je vidět na obrázku 7.2b. Tato obrazovka obsahuje informace o detektoru, zkratku univerzity a fakulty, název katedry a jméno autora této práce. Poté se kalibrační data načtou z SD karty do vnitřní paměti, a z těchto dat se vypočítají rovnice pro převod mezi napětím úměrné mikrovlnnému výkonu z detektoru a mikrovlnným výkonem. Dále následuje spuštění uvítací znělky a zobrazení měřící obrazovky na displeji, která je popsána podrobněji v kapitole 7.4 a zobrazena na obrázku 7.2c. Program poté vstupuje do nekonečné smyčky.

Nejprve se odečte napětí z ADC2, což odpovídá přivedenému mikrovlnnému výkonu, a z tohoto napětí se vypočítá výkon. Poté se výkon zprůměruje z počtu prvků, které uživatel nastaví. Následuje porovnání úrovně tohoto výkonu s úrovní nastavenou uživatelem pro signalizaci LED diodou a piezoelektrickým měničem. Pokud uživatel nastaví odesílání výkonu přes USB, což lze nastavit přes sériovou komunikaci, hodnota výkonu se odešle přes USB do počítače. Poté se provede výpočet relativního výkonu. Následně se odečte napětí z ADC1, což odpovídá teplotě detektoru a z tohoto napětí se vypočítá teplota detektoru. Všechny hodnoty na displeji se pak aktualizují. Program dále detekuje, zda došlo k otočení rotačním enkodérem. Pokud ano, aktualizuje se poloha ukazatele. Dále se detekuje, zda bylo stisknuto tlačítko. Pokud ano, měření se pozastaví a v závislosti na poloze ukazatele se provede příslušná akce pro daný řádek, jak je popsáno v kapitole 7.4. Po opětovném stisknutí se změny potvrdí a program pokračuje v měření.

## 7.4 Ovládání zařízení

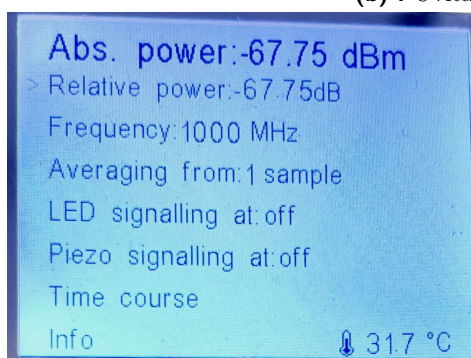
Po zapnutí a úspěšné inicializaci zařízení se zobrazí uvítací obrazovka viz 7.2b, následovaná měřící obrazovkou viz 7.2c, která slouží jako výchozí pro měření a nastavování parametrů. Ovládání zařízení probíhá prostřednictvím rotačního enkodéru, kterým lze měnit polohu ukazatele v levé části obrazovky.

Na prvním řádku měřící obrazovky je zobrazena hodnota absolutního výkonu velkým písmem, ke které nelze pomocí ukazatele přistoupit. Na druhém řádku se nachází hodnota relativního výkonu. Stisknutím tlačítka s ukazatelem na tomto řádku se relativní výkon nastaví na 0 dB. Třetí řádek zobrazuje nastavitelnou frekvenci v rozsahu od 1000 MHz do 8000 MHz s krokem 1000 MHz. Čtvrtý řádek slouží k nastavení počtu vzorků, ze kterých se provádí průměrování výkonu, a to v rozmezí od 1 do 1000 vzorků. Pátý a šestý řádek umožňují nastavení úrovně výkonu pro signalizaci LED diody a piezoelektrického měniče. Pro obě signalizace je možné nastavit libovolnou úroveň v rozsahu detektoru s krokem 1 dBm. Parametry na třetím až šestém řádku lze upravit otáčením rotačního enkodéru a potvrdit stisknutím tlačítka.



(a) : Obrazovka při nevsunuté SD kartě.

(b) : Uvítací obrazovka.



(c) : Měřící obrazovka.

**Obrázek 7.2:** Zobrazované obrazovky 1.

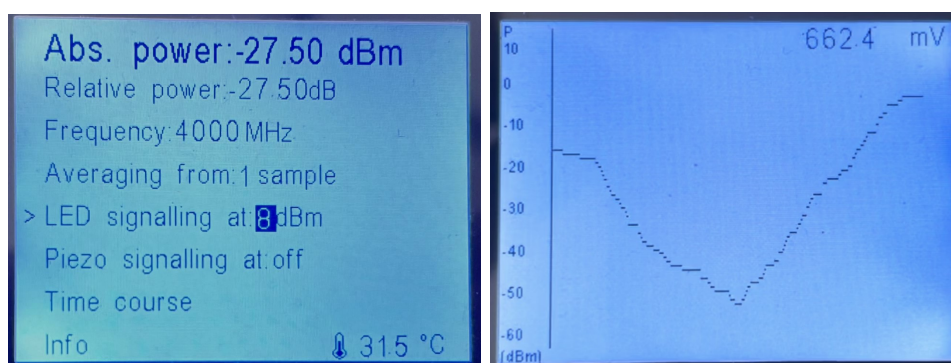
Během úpravy parametrů je upravovaný údaj zvýrazněn podsvícením viz 7.3a.

Na sedmém řádku lze po stisknutí tlačítka zobrazit časový průběh výkonu viz 7.3b a opětovným stiskem se zařízení vrátí na měřící obrazovku. Po stisknutí tlačítka s ukazatelem na osmém řádku se zobrazí informační obrazovka viz 7.3c, která obsahuje detailní informace o zařízení, jeho měřitelný rozsah výkonů a frekvencí, verzi firmwaru a datum výroby. Opětovným stiskem tlačítka se zařízení vrátí na měřící obrazovku. V pravém dolním rohu je na měřící obrazovce zobrazena teplota detektoru.

Ve výchozím stavu je relativní výkon stejný jako absolutní, frekvence je nastavena na 1000 MHz, průměrování je nastaveno na 1 vzorek a obě signalizace jsou vypnuty.

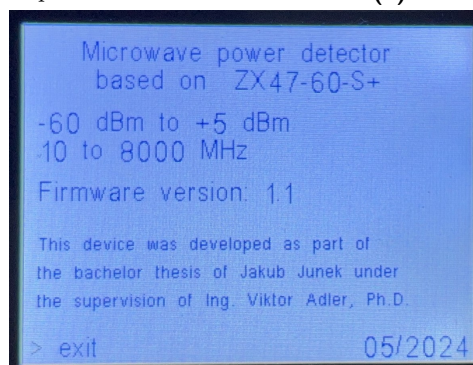
Posílání dat do počítače přes USB konektor je spuštěno pouze po aktivaci uživatelem ze strany počítače prostřednictvím sériové komunikace. Odesláním znaku "h" zařízení vypíše nápovědu k ovládání. Odesláním znaku "o" zařízení vrátí aktuální hodnotu výkonu. Při odeslání znaku "c" zařízení bude průběžně odesílat hodnoty výkonu v každém cyklu. Zastavení posílání dat ze zařízení lze provést odesláním znaku "s". Hodnoty mikrovlňného výkonu, posílané po sériové lince, jsou ve formátu datového typu char s ukončovacími znaky "\r\n" na konci každé hodnoty. Pro zobrazení těchto dat lze využít libovolný program pro sériovou komunikaci nebo například Matlab, který umožňuje vizualizaci dat.





(a) : Upravování parametru.

(b) : Časový průběh.



(c) : Info obrazovka.

**Obrázek 7.3:** Zobrazované obrazovky 2.



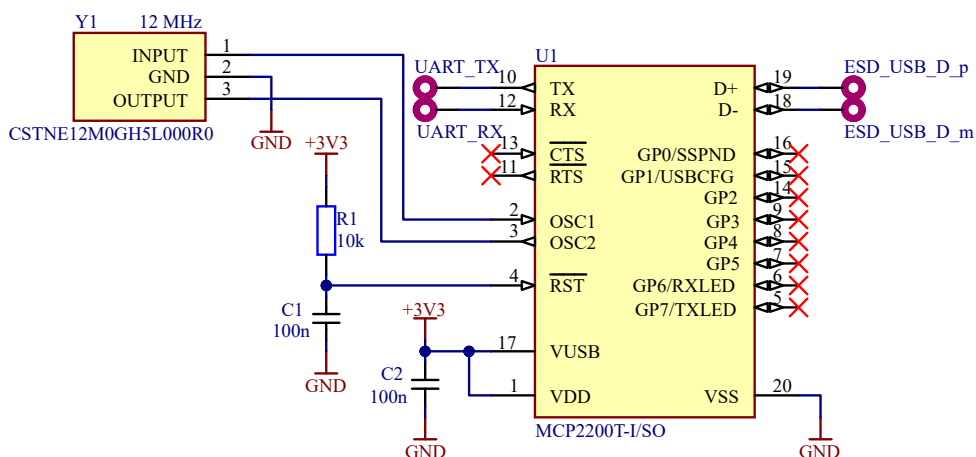
## Kapitola 8

### Oživení detektoru

Oživování zařízení proběhlo z hardwarového i softwarová hlediska v pořádku, až na komunikaci přes USB. Odesílání dat, které bylo zajišťováno softwarovou knihovnou od firmy STMicroelectronics bylo z neznámých důvodů neustále ve stavu USBD\_BUSY. Ukázalo se, že použití integrované periferie nebylo nejlepší řešení, z důvodu nemožnosti nahlédnutí do definicí funkcí, které by mohly stav USBD\_BUSY způsobovat. Dále byla zjištěna vysoká doba překreslování displeje, a tak bylo překreslování na displeji omezeno na každých 5000 změření a spočítání mikrovlnného výkonu.

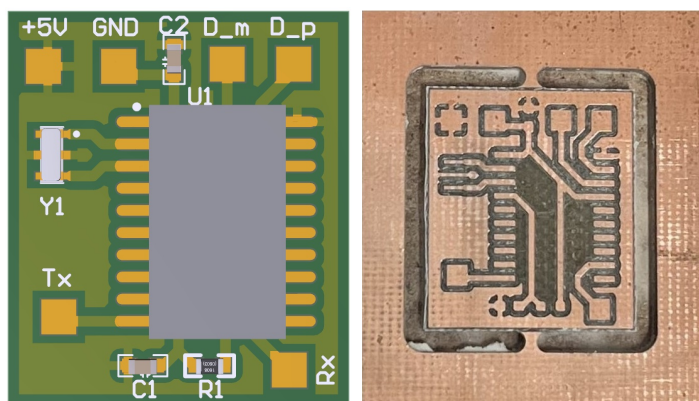
#### 8.1 UART/USB převodník

Jelikož měl MCU neobsazené piny, které mohou obsluhovat UART sběrnici, bylo rozhodnuto použít UART/USB převodník. Protože toto byla jediná nefunkční věc na celé DPS, bylo by zbytečné vyrábět znovu celou DPS. Z toho důvodu byla pouze vyrobena DPS s převodníkem UART/USB, nutnými pasivními součástkami pro funkčnost a pájecími ploškami. Schéma převodníku UART/USB je na obrázku 8.1. Byl využit rozšířený převodník MCP2200. Základní schéma bylo převzato z katalogového listu [41].



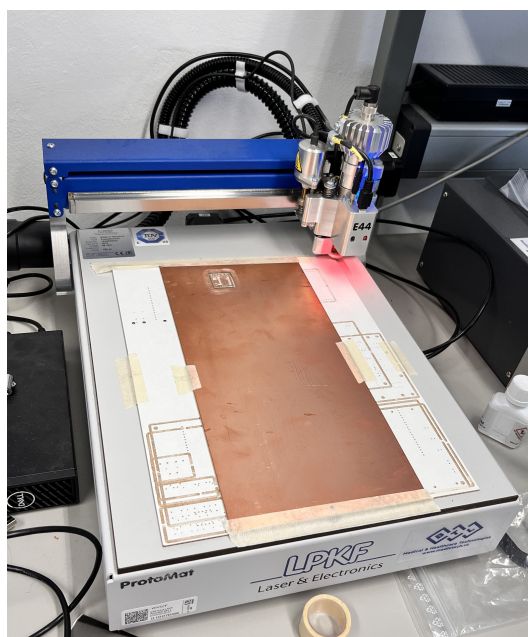
Obrázek 8.1: Schéma převodníku UART/USB.

Jelikož se jedná o zapojení s malým počtem součástek, bylo rozhodnuto toto DPS vyrobít na frézce LPKF Protomat E44 viz obrázek 8.3, která je dostupná v laboratoři ČVUT FEL v IoT Labu [42]. Z toho důvodu bylo potřeba navrhnout DPS na jednu vrstvu. Navržená DPS je na obrázku 8.2a a vyfrézovaná DPS je na obrázku 8.2b.

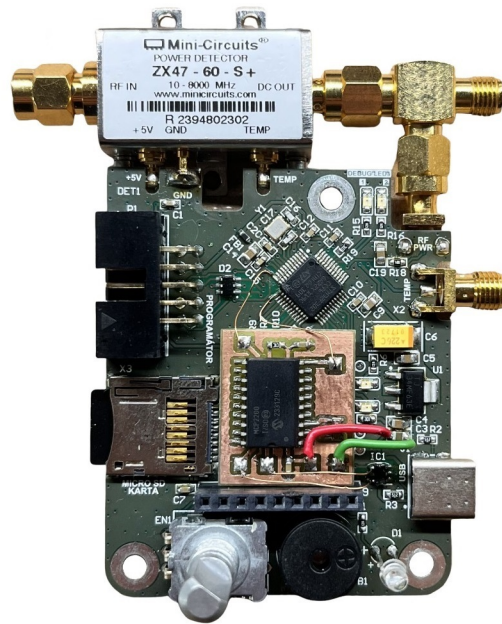


(a) : Vizualizace navržené DPS.

(b) : Vyfrézovaná DPS.

**Obrázek 8.2:** Převodník UART/USB**Obrázek 8.3:** Frézka LPKF Protomat E44.

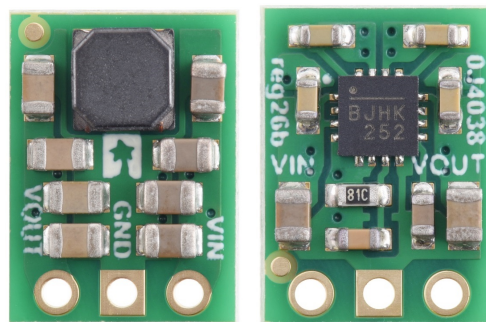
Na DPS převodníku UART/USB byly připájeny součástky a DPS byla oboustrannou lepicí páskou přilepena k DPS řídicí elektroniky a spojená vodiči viz obrázek 8.4. Rychlost přenosu byla nastavena na nejvyšší možnou 1500000 Bits/s, jedná se o maximální možnou rychlost komunikace, které ale není dosaženo.



Obrázek 8.4: DPS převodníku UART/USB připojená k DPS řídicí elektroniky.

## 8.2 5V stabilizátor napětí

Při ověřování odolnosti zařízení vůči kolísání vstupního napětí v rozmezí 4,75 V až 5,5 V, které USB poskytuje dle specifikace [36], se ukázalo, že detektor je závislý na napájecím napětí. To by znamenalo, že při připojení zařízení k různým počítačům, při přivedeném konstantním mikrovlnném výkonu, by mohly být detekovány různé úrovně výkonu a teploty, což by bylo nežádoucí. Pro úsporu času bylo rozhodnuto využít modulový napěťový regulátor S13V10F5 od firmy Pololu [43], který je zobrazen na obrázcích 8.5a a 8.5b.



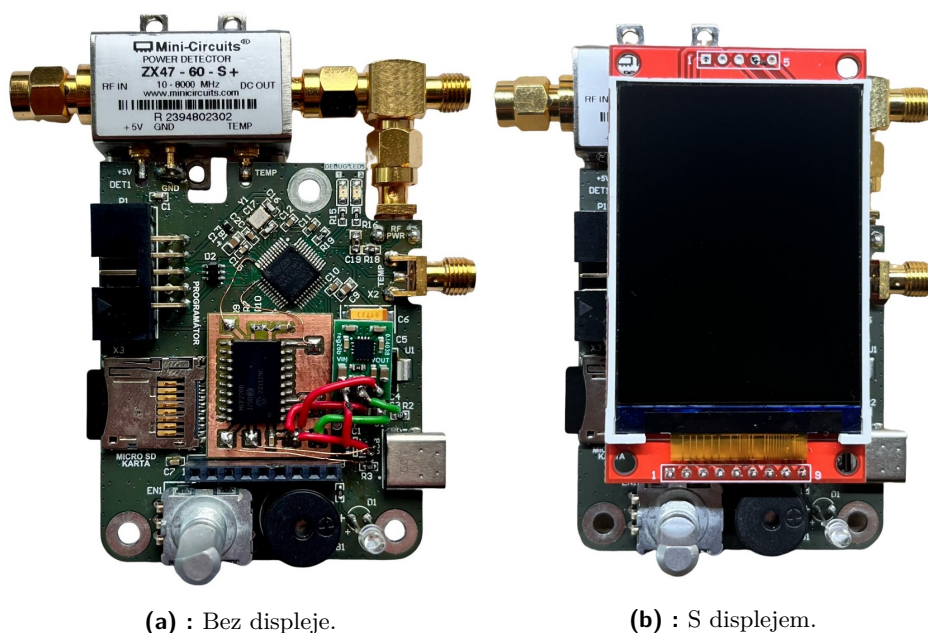
(a) : Z přední strany. (b) : Ze zadní strany.

Obrázek 8.5: Napěťový regulátor S13V10F5 od firmy Pololu, převzato z [43].

Jedná se o spínaný regulátor topologie buck-boost, který stabilizuje výstupní napětí na 5 V. Rozsah vstupního napětí je od 2,8 V do 22 V, což je pro náš účel

dostačující. Maximální proud stabilizátorem je uveden 1 A, což je postačující, neboť celkový maximální odebíraný proud před instalací stabilizátoru byl změřen 412 mA.

Regulátor napětí byl umístěn těsně za USB-C konektor, aby se eliminovalo možné rušení způsobené kolísáním napětí na USB. Regulátor byl přilepen na DPS řídicí elektroniky oboustrannou lepicí páskou. Cestička na DPS přenášející 5 V z USB-C konektoru byla přerušena a byl zde připájen pomocí propojovacích drátků regulátor, jak je znázorněno na obrázku 8.6a. Na obrázku 8.6b je zobrazena DPS s připojeným displejem.



(a) : Bez displeje.

(b) : S displejem.

**Obrázek 8.6:** Stabilizátor napětí připojený k DPS řídicí elektroniky.

Po provedené úpravě již bylo zařízení odolné vůči změně napětí na USB a plně funkční. Celkový maximální odebíraný proud se zvýšil na 457 mA.

### 8.3 Kalibrace

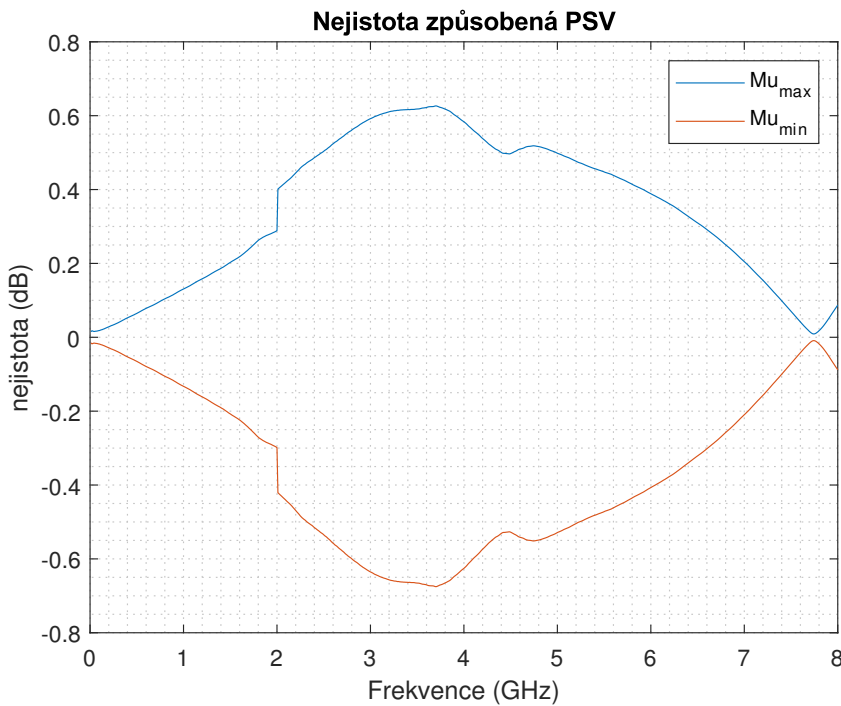
Převodní charakteristika detektoru byla sice již změřena v kapitole 4, ale pro eliminaci chyb způsobených ADC převodníkem byla kalibrační tabulka znovu změřena přímo pomocí ADC. Hodnota měřeného napětí pomocí ADC byla přidána do pravého horního rohu obrazovky zobrazující časový průběh mikrovlnného napětí.

Pro dodávání vysokofrekvenčního signálu byl použit signálový generátor Agilent Technologies E8257D [44]. Jelikož signálový generátor ani detektor nemají modul činitele odrazu rovný nule, vznikne v důsledku toho nejistota měření. Limitní hodnoty této standardní nejistoty se dle aplikační příručky od firmy Keysight Technologies [45] vypočítají jako

$$M_{u_{\max}} = 10 \log(1 + \rho_g \rho_l)^2, \quad (8.1)$$

$$M_{u_{\min}} = 10 \log(1 - \rho_g \rho_l)^2, \quad (8.2)$$

kde  $\rho_g$  je modul činitele odrazu generátoru a  $\rho_l$  je modul činitele odrazu zátěže, v našem případě detektoru. V katalogovém listu signálového generátoru je uveden PSV do frekvence menší nebo rovno 2 GHz jako menší než 1,4 a nad frekvenci 2 GHz a zároveň menší rovno než 20 GHz jako menší než 1,6 [44]. Do výpočtu raději zahrneme hraniční hodnoty. PSV detektoru již bylo změřeno v kapitole 4. Na základě PSV byl vypočítán modul činitele odrazu a následně i limitní hodnoty nejistoty, které by vznikly, kdybychom detektor připojili přímo ke generátoru. Nejistota je graficky znázorněna na obrázku 8.7 v závislosti na frekvenci.

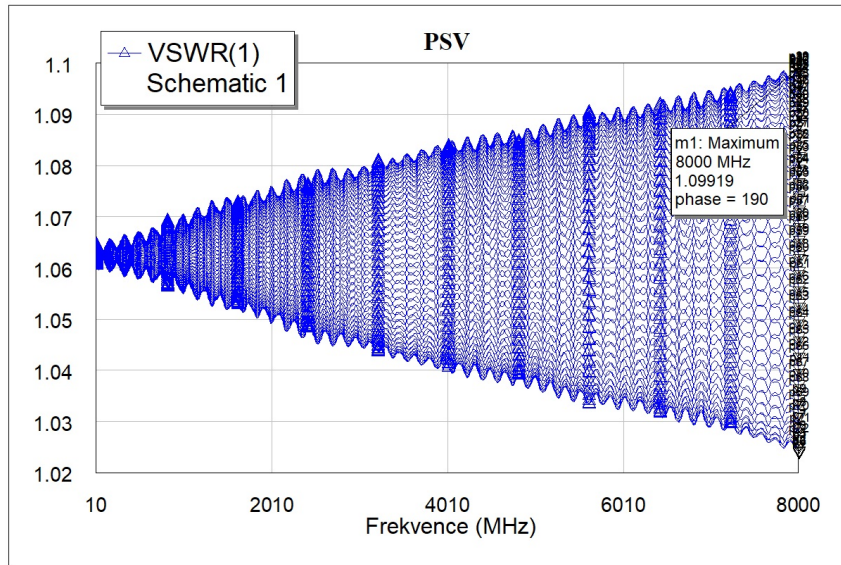


**Obrázek 8.7:** Nejistota způsobená PSV při kalibraci.

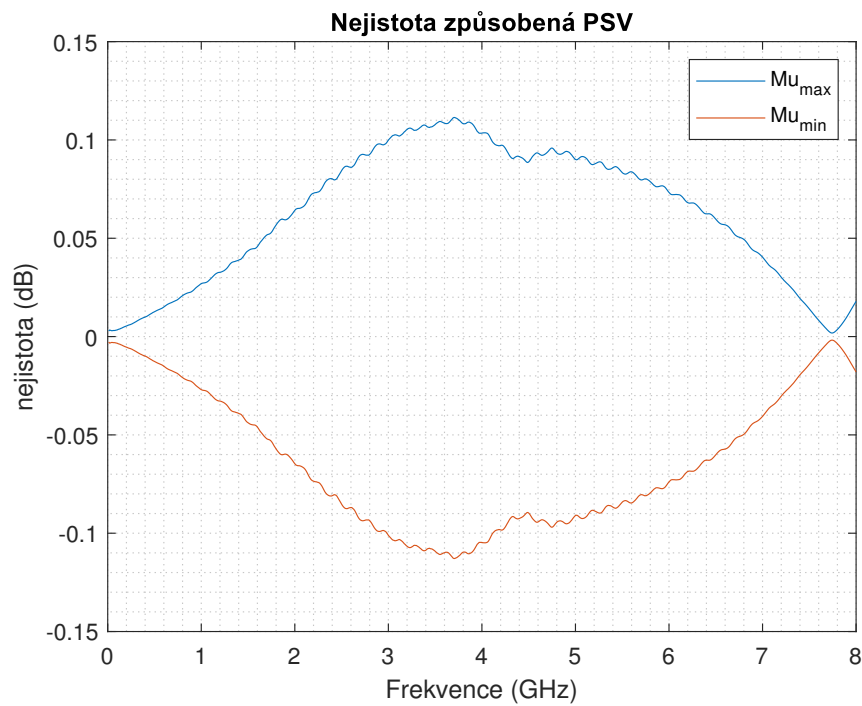
Nejvyšší hodnoty nabývá nejistota na frekvenci 3,7 GHz mezi +0,63 -0,68 dB. Tuto nejistotu při kalibraci lze snížit podle aplikační příručky od firmy Keysight Technologies [45] pomocí vložení atenuátoru, který sníží PSV generátoru a tím i nejistotu. Pro měření kalibrační tabulky bylo tedy rozhodnuto připojit atenuátor za generátor, aby bylo zařízení zkalibrováno s co nejmenší nejistotou. Na výběr byly atenuátory ze sady K2-BW3+ od firmy Mini-Circuits [46]. Aby byl znám jejich přesný útlum a s-parametry, byly tyto atenuátory v rozmezí od 5 dB do 10 dB změřeny na vektorovém analyzátoru Rohde & Schwarz ZVA 67 [28]. Jelikož atenuátory jsou zakončeny jedním konektorem





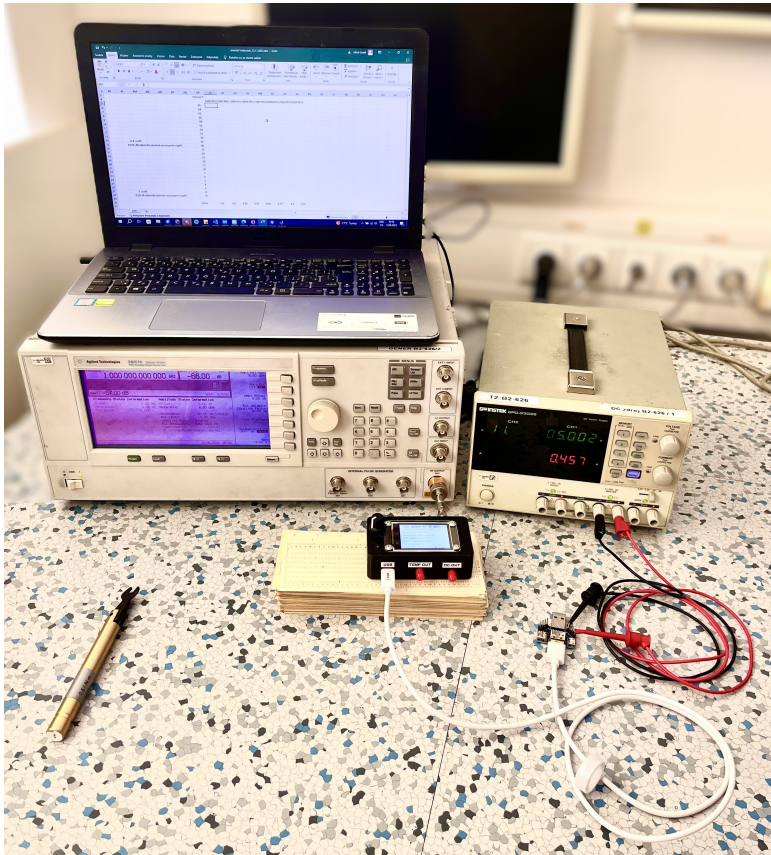


Obrázek 8.9: Simulace PSV pro 9dB atenuátor.



Obrázek 8.10: Nejistota způsobená PSV s vloženým atenuátorem při kalibraci.





Obrázek 8.12: Měřící pracoviště.



Obrázek 8.13: Ověření funkčnosti 1.

## 8. Oživení detektoru



Obrázek 8.14: Ověření funkčnosti 2.



Obrázek 8.15: Ověření funkčnosti 3.

## Kapitola 9

### Mechanická zástavba

K navržené elektronice s detektorem měla být navržena krabička, která bude následně vytištěna na 3D tiskárně. Hlavním požadavkem na krabičku byla kompaktnost a dobré uchycení detektoru a DPS. Aby byla krabička dobře rozebíratelná a zároveň pevná, bylo zvoleno krabičku rozdělit na horní a spodní díl. K propojení těchto dvou dílů slouží v horním díle čtveřice závitových vložek do plastu umístěných v horní části, distanční sloupky uvnitř krabičky a šrouby se zapuštěnou hlavičkou na spodním dílu. Tím je docílena minimalizace viditelných montážních prvků.

K hornímu dílu je připevněn displej, který je chráněn plexisklem pro zvýšení odolnosti, které bylo vyříznuto ve firmě MK Plexi [49]. Samotný detektor je upevněn šrouby ke spodnímu dílu na třech místech. DPS je uchycena v jednom místě také ke spodnímu dílu a na dvou dalších místech jsou využity distanční sloupky. Všechny šrouby byly zvoleny M3, s výjimkou uchycení detektoru, pro které jsou použity šrouby M2,5. Pro zvýšení stability a zabránění skluzu byly na dno krabičky umístěny gumové nožičky. Pro možnost programování zařízení bez nutnosti vyndávat elektroniku z krabičky, byla na programovací konektor umístěna krytka s jedním šroubem. Krabička byla navržena v programu Fusion 360. Vizualizace navržené krabičky je zobrazena na obrázku 9.1.



**Obrázek 9.1:** Vizualizace navržené krabičky.

Krabička byla vytištěna na 3D tiskárně z černého materiálu PETG. Na obrázku 9.2a je zobrazen upevněný detektor a DPS k dolnímu dílu krabičky, na obrázku 9.2b je zobrazen upevněný displej a distanční sloupky k hornímu dílu krabičky.



(a) : Přidělaný detektor a DPS k dolnímu dílu krabičky.

(b) : Přidělaný displej a distanční sloupky k hornímu dílu krabičky.

**Obrázek 9.2:** Přidělané komponenty k dílům krabičky.

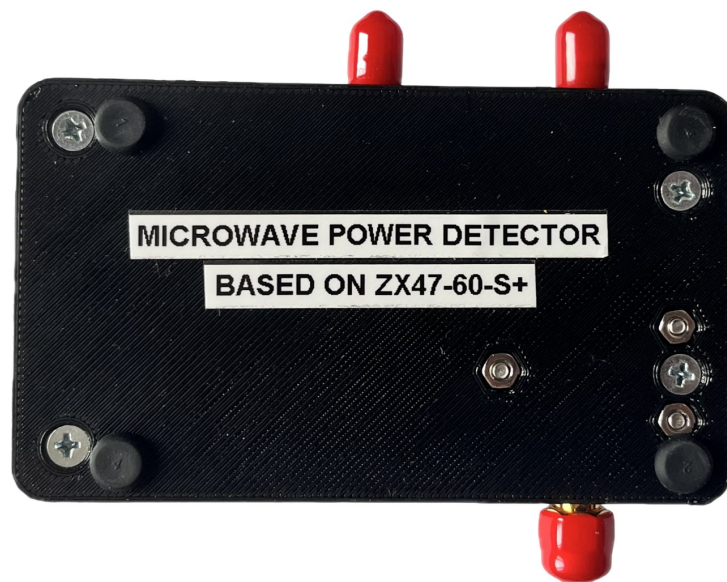
Nakonec byly na krabičku nalepeny samolepící popisky, které byly vytištěny na štítkovači viz obrázky 9.3, 9.4 a 9.5. Na osu rotačního enkodéru byl nasunut otočný knoflík a na SMA konektory byly nasazeny gumové ochranné krytky.



**Obrázek 9.3:** Obrázek navrženého a zkonstruovaného zařízení z jedné strany.



**Obrázek 9.4:** Obrázek navrženého a zkonstruovaného zařízení z druhé strany.



**Obrázek 9.5:** Obrázek navrženého a zkonstruovaného zařízení ze spodní strany.



# Kapitola 10

## Závěr

V této práci byly popsány nejčastěji používané metody měření výkonu ve vysokofrekvenční technice. Pro každou z metod byly rozebrány její výhody, nevýhody, šířky pásma, frekvenční rozsah a příklady aplikace. V druhé části této práce byl popsán detektor ZX47-60-S+, včetně jednotlivých obvodů v modulu detektoru. Následně byla ověřena jeho funkčnost měřením přenosové charakteristiky a koeficientu odrazu, s následným dopočítáním poměru stojatých vln. Ze změřených výsledků vyplývá shoda s údaji uvedenými v katalogovém listu výrobce.

V další části práce byl proveden návrh řídicí elektroniky k detektoru a všech náležitostí od schématického návrhu, přes návrh DPS, až ke konstrukční zástavbě celého zařízení. Následně bylo celé zařízení zkonstruováno, naprogramováno a nakonec úspěšně oživeno.

Přijímaný mikrovlnný výkon je s přesností 0,05 dB přehledně zobrazován spolu s dalšími relevantními údaji na 2,2 palcovém TFT displeji, který je pro zvýšení odolnosti chráněn plexisklem. Zařízení je ovládáno pomocí rotačního enkodéru s tlačítkem, pomocí něhož lze nastavit například měřenou frekvenci, počet vzorků pro průměrování, určitou hodnotu výkonu, pro kterou bude aktivována signalizace zvukem či LED diodou, nebo například zobrazit časový průběh mikrovlnného výkonu. Celé zařízení je napájeno přes USB-C konektor, přes který lze také pomocí sériového portu komunikovat s počítačem a měřený výkon vyčítat. K uložení kalibračních dat slouží micro SD karta. K řízení celého zařízení byl vybrán mikrokontrolér STM32F302CCT6.

Nejistota při kalibraci způsobená nejistotou měření a nejasností fáze, byla minimalizována na  $\pm 0,11$  dB pomocí atenuátoru vloženého mezi signálový generátor a detektor.

Povedlo se tedy zkonstruovat plně funkční kompaktní samostatný měřič výkonu, jehož funkce byla ověřena měřeními.

Do budoucna by mohlo být zařízení osazeno displejem s vyšší překreslující rychlostí, nebo vytvořit knihovnu umožňující rychlejší překreslování aktuální obrazovky. Dále by mohlo být zařízení rozšířeno o implementaci přesné volby měřené frekvence mikrovlnného výkonu, například pomocí lineární aproximace mezi změřenými frekvencemi v kalibrační tabulce.





## Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam zkratky
VA	Voltampérová
ZBS	Zero Bias Schottky
DPS	Deska plošných spojů
SMD	Surface Mount Device
SMA	SubMiniature version A
BNC	Bayonet Neill Concelman connector
PSV	Poměr stojatých vln
USB-C	USB konektor typu C
LED	Light Emitting Diode
MCU	Mikrokontrolér
LCD	Liquid Crystal Display
OLED	Organic Light-Emitting Diode
TFT	Thin Film Transistor
SD	Secure Digital
THT	Through-Hole Technology
ESD	Electro-Static Discharge
USB	Universal Serial Bus
ADC	Analog-Digital Converter
SPI	Serial Peripheral Interface
GPIO	General Purpose Input/Output
HAL	Hardware Abstraction Layer
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
IoT	Internet of Things
PETG	Polyethylene Terephthalate modified with Glycol





## Bibliografie

1. PANKRÁC, Vítězslav. *Pomocný text ke cvičením z předmětu B2B17ELD*. 2019. Dostupné také z: [https://elmag.fel.cvut.cz/sites/default/files/users/pankrac/files/Elektromagnetick%C3%A9%20vlny\\_2019.pdf](https://elmag.fel.cvut.cz/sites/default/files/users/pankrac/files/Elektromagnetick%C3%A9%20vlny_2019.pdf).
2. *Fundamentals of RF and Microwave Power Measurements (AN 1449) - Application Note, Keysight Technologies (Part 1)*. 2022. Dostupné také z: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-01150/application-notes/5988-9213.pdf>.
3. HOFFMANN, Karel; HUDEC, Přemysl. *Vysokofrekvenční a mikrovlnná měření*. Vyd. 1. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 978-80-01-03442-2. OCLC: 85544656.
4. HALL, B. D. Notes on complex measurement uncertainty—part 1. *Ind. Res. Ltd.* 2010, roč. 2012.
5. BRUSH, Andrew S. Measurement of microwave power - A review of techniques used for measurement of high-frequency RF power. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine* [online]. 2007, roč. 10, č. 2, s. 20–25 [cit. 2023-10-15]. ISSN 1094-6969, ISSN 1941-0123. Dostupné z DOI: 10.1109/MIM.2007.364984.
6. FANTOM, A. *Radio frequency & microwave power measurement*. London, U.K: P. Peregrinus on behalf of the Institution of Electrical Engineers, 1990. IEE electrical measurement series, č. 7. ISBN 978-0-86341-120-5.
7. *Fundamentals of RF and Microwave Power Measurements (AN 1449) - Application Note, Keysight Technologies (Part 2)*. 2022. Dostupné také z: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-01151/application-notes/5988-9214.pdf>.
8. RUMFELT, A.Y.; ELWELL, L.B. Radio frequency power measurements. *Proceedings of the IEEE* [online]. 1967, roč. 55, č. 6, s. 837–850 [cit. 2023-10-16]. ISSN 0018-9219. Dostupné z DOI: 10.1109/PROC.1967.5697.
9. TEPPATI, Valeria. *Modern RF and microwave measurement techniques*. New York: Cambridge University Press, 2013. ISBN 978-1-107-25048-2. OCLC: 847655475.

10. COLLIER, R. J.; SKINNER, A. D.; ENGINEERING AND TECHNOLOGY, Institution of (ed.). *Microwave measurements*. Third edition. London: Institution of Engineering a Technology, 2007. IET electrical measurement series, č. 12. ISBN 978-0-86341-735-1. Meeting Name: IET Training Course on Microwave Measurement OCLC: ocn182563125.
11. *ZX47-60-s+ Mini-Circuits* / Mouser [online]. 2023. [cit. 2023-11-20]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/139-ZX47-60-S>.
12. *POWER DETECTOR / ZX47-60-S+ / Mini-Circuits* [online]. 2017. [cit. 2023-11-20]. Dostupné z: <https://www.minicircuits.com/pdfs/ZX47-60+.pdf>.
13. RIVERA-LAVADO, Alejandro; GARCÍA-LAMPÉREZ, Alejandro; JARA-GALÁN, María-Estrella; GALLO-VALVERDE, Emilio; SANZ, Paula; SEGOVIA-VARGAS, Daniel. Low-Cost Electromagnetic Split-Ring Resonator Sensor System for the Petroleum Industry. *Sensors* [online]. 2022, roč. 22, č. 9, s. 3345 [cit. 2023-11-06]. ISSN 1424-8220. Dostupné z DOI: 10.3390/s22093345.
14. JUNFITHRANA, Anggy Pradiftha; RAHARDJO, Eko Tjipto; ZULKIFLI, Fitri Yuli; BASARI. Development of automated antenna radiation pattern measurement using rotator application model to increase accuracy. In: *2017 International Conference on Computing, Engineering, and Design (ICCED)* [online]. Kuala Lumpur: IEEE, 2017, s. 1–5 [cit. 2023-11-11]. ISBN 978-1-5386-3495-0. Dostupné z DOI: 10.1109/CED.2017.8308101.
15. CARDELLI, F.; AMPOLLINI, A.; BAZZANO, G.; NENZI, P.; PIER-SANTI, L.; RONSIVALLE, C.; PICARDI, L. Design and test of a compact beam current monitor based on a passive RF cavity for a proton therapy linear accelerator. *Review of Scientific Instruments* [online]. 2021, roč. 92, č. 11, s. 113304 [cit. 2023-11-12]. ISSN 0034-6748, ISSN 1089-7623. Dostupné z DOI: 10.1063/5.0062509.
16. HUYNH, C.-T.; DEVINE, R.; TOFIGHI, M.-R. An L-band microwave radiometer for subsurface temperature measurement. In: *2012 IEEE 16th International Symposium on Consumer Electronics* [online]. Harrisburg, PA, USA: IEEE, 2012, s. 1–2 [cit. 2023-11-11]. Dostupné z DOI: 10.1109/ISCE.2012.6241726.
17. *AD8318 Datasheet and Product Info* / Analog Devices [online]. 2022. [cit. 2023-11-20]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/products/ad8318.html>.
18. *AD8318ACPZ-REEL7 Analog Devices* / Mouser [online]. 2023. [cit. 2023-11-20]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/584-AD8318ACPZ-R7>.

19. REN, Qingying; ZUO, Wen; XU, Jie; JIN, Leisheng; LI, Wei; WANG, Debo. Design of a Microwave Power Detection System in the 5G-Communication Frequency Band. *Sensors* [online]. 2021, roč. 21, č. 8, s. 2674 [cit. 2023-10-16]. ISSN 1424-8220. Dostupné z DOI: 10.3390/s21082674.
20. EMIN, Berkay; BASBUG, Suad. A Low Cost Measurement System for Antenna Radiation Patterns with Logarithmic RF Detector. In: 2019. Dostupné také z: [https://www.researchgate.net/publication/335603473\\_A\\_Low\\_Cost\\_Measurement\\_System\\_for\\_Antenna\\_Radiation\\_Patterns\\_with\\_Logarithmic\\_RF\\_Detector](https://www.researchgate.net/publication/335603473_A_Low_Cost_Measurement_System_for_Antenna_Radiation_Patterns_with_Logarithmic_RF_Detector).
21. LIU NA; HE XIAOBING; WANG DAHUA. Study on a passive resistive fan attenuation network. In: *CPEM 2010* [online]. Daejeon, Korea (South): IEEE, 2010, s. 649–650 [cit. 2023-11-20]. ISBN 978-1-4244-6795-2. Dostupné z DOI: 10.1109/CPEM.2010.5544768.
22. UNI-TREND TECHNOLOGY, DONG GUAN. *UNI-T Model UT70A: OPERATING MANUAL* [online]. 2001. [cit. 2023-12-07]. Dostupné z: [https://www.tme.eu/Document/08ea94685541caf15218cc99511954fc/ut70a\\_en.pdf](https://www.tme.eu/Document/08ea94685541caf15218cc99511954fc/ut70a_en.pdf).
23. ADVANTEST. *R6552* [online]. 2022. [cit. 2023-12-04]. Dostupné z: [https://testequipment.center/Product\\_Documents/Advantest-R6552-Specifications-7A5FA.pdf](https://testequipment.center/Product_Documents/Advantest-R6552-Specifications-7A5FA.pdf).
24. *3 dB SMT Fixed Attenuator, DC - 8000 MHz, 50Ohm | GAT-3+ / Mini-Circuits* [online]. 2017. [cit. 2023-11-20]. Dostupné z: <https://www.minicircuits.com/WebStore/dashboard.html?model=GAT-3%2B>.
25. *RF Attenuators - Fixed Precision, High-Power, Programmable* [online]. 2023. [cit. 2023-11-20]. Dostupné z: <https://www.minicircuits.com/WebStore/Attenuators.html>.
26. GOOD WILL INSTRUMENT CO., LTD. *GPD-Series Specifications* [online]. 2021. [cit. 2023-12-04]. Dostupné z: <https://www.gwinstek.com/en-global/products/detail/GPD-Series>.
27. ROHDE & SCHWARZ GMBH & CO, KG. *R&S SMF100A Microwave Signal Generator Specifications* [online]. 2019. [cit. 2023-12-04]. Dostupné z: [https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_brochures\\_and\\_datasheets/pdf\\_1/SMF100A\\_dat-sw\\_en\\_5213-7660-22\\_v0600.pdf](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/SMF100A_dat-sw_en_5213-7660-22_v0600.pdf).
28. ROHDE & SCHWARZ GMBH & CO, KG. *R&S ZVA VECTOR NETWORK ANALYZER* [online]. 2020. [cit. 2023-12-04]. Dostupné z: [https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_brochures\\_and\\_datasheets/pdf\\_1/ZVA\\_dat-sw\\_en\\_5213-5680-22\\_v1400.pdf](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/ZVA_dat-sw_en_5213-5680-22_v1400.pdf).
29. *PCB Design Software & Tools | Altium* [online]. 2024. [cit. 2024-04-15]. Dostupné z: <https://www.altium.com/>.

30. DRATEK.CZ. *Arduino display modrý 20x4 znaků HD44780* | dratek.cz [online]. 2024. [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/122160-i2c-20x4-display-pro-jednodeskove-pocitace.html>.
31. LASKAKIT. *1.3" 128x64 OLED displej, SPI, bílý* | LaskaKit [online]. 2021. [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/oled-displej-bily-128x64-1-3--spi/>.
32. LASKAKIT. *7" 800x480 TFT displej, SSD1963, dotykový* | LaskaKit [online]. 2021. [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/7--palcovy-tft-lcd-displej-800x480-ssd1963-dotykovy/>.
33. *STM32CubeIDE - Integrated Development Environment for STM32 - STMicroelectronics* [online]. 2024. [cit. 2024-04-15]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html>.
34. STMICROELECTRONICS. *STM32F302xB STM32F302xC* [online]. 2019. [cit. 2024-04-15]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f302cc.pdf>.
35. GRAVEKAMP, Thomas. *Guide: Connecting your debugger* [online]. 2022. [cit. 2024-04-15]. Dostupné z: <https://stm32-base.org/guides/connecting-your-debugger.html>.
36. USB, Enabling Connections. *Universal Serial Bus Type-C Cable and Connector Specification*. 2019. Dostupné také z: <https://www.usb.org/sites/default/files/USB%20Type-C%20Spec%20R2.0%20-%20August%202019.pdf>.
37. INSTRUMENTS, Texas. *TLV1117LV*. 2011. Dostupné také z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlv1117lv.pdf?ts=1713210490873>.
38. *POOL servis - princip výroby* | PragoBoard s.r.o. - vícevrstvé, dvou a jednovrstvé plošné spoje [online]. 2012. [cit. 2024-04-16]. Dostupné z: <https://www.pragoboard.cz/de/node/76>.
39. LEE, JIHOON. *eziya/STM32\_HAL\_ILI9341* [online]. 2024. [cit. 2024-04-24]. Dostupné z: [https://github.com/eziya/STM32\\_HAL\\_ILI9341](https://github.com/eziya/STM32_HAL_ILI9341). original-date: 2019-07-06T07:42:26Z.
40. LEE, JIHOON. *eziya/STM32\_SPI\_SDCARD* [online]. 2024. [cit. 2024-05-15]. Dostupné z: [https://github.com/eziya/STM32\\_SPI\\_SDCARD](https://github.com/eziya/STM32_SPI_SDCARD). original-date: 2018-01-19T12:30:34Z.
41. TECHNOLOGY, Microchip. *MCP2200*. 2010. Dostupné také z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22228A.pdf>.
42. *IoT Lab ČVUT FEL* [online]. 2024. [cit. 2024-04-22]. Dostupné z: <https://iot.fel.cvut.cz/cz/>.
43. *Pololu - 5V, 1A Step-Up/Step-Down Voltage Regulator S13V10F5* [online]. 2024. [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/4083>.



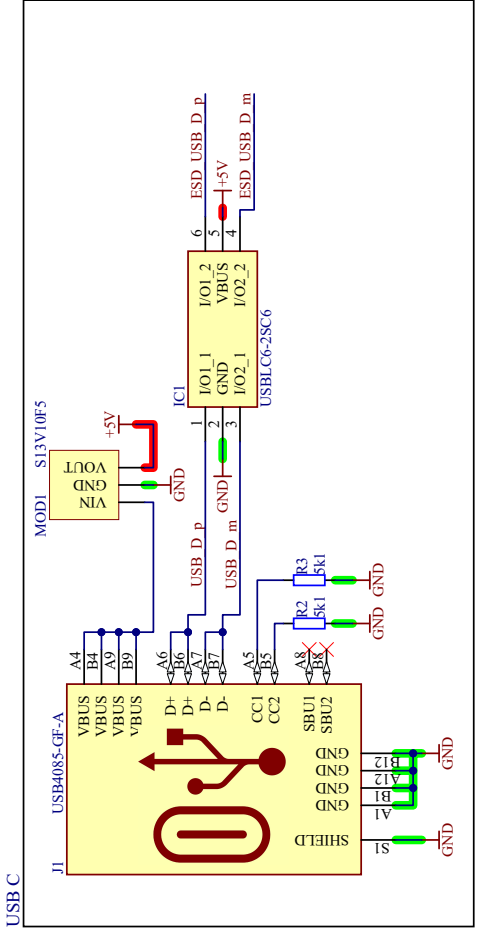
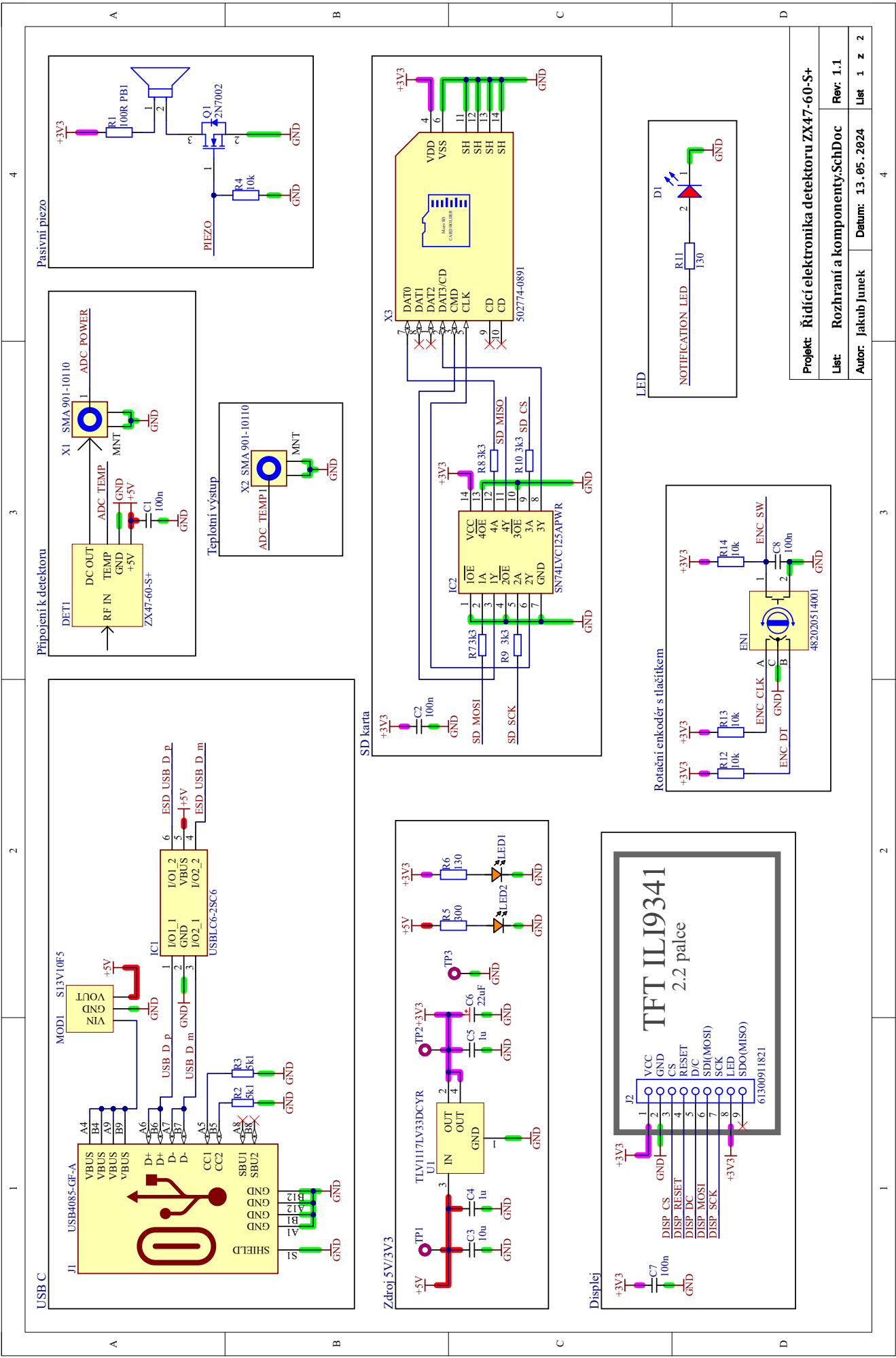
44. KEYSIGHT. *E8257D PSG Microwave Analog Signal Generator* [online]. 2024. [cit. 2024-05-13]. Dostupné z: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-01211/data-sheets/5989-0698.pdf>.
45. *Fundamentals of RF and Microwave Power Measurements (AN 1449) - Application Note, Keysight Technologies (Part 4)*. 2022. Dostupné také z: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-01152/application-notes/5988-9215.pdf>.
46. MINI-CIRCUITS. *DESIGNER'S KIT K2-BW3+* [online]. 2017. [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.minicircuits.com/pdfs/K2-BW3+.pdf>.
47. KUHLMANN, Karsten; GELLERSEN, Frauke; TSCHAUDER, Meike. Comparison of *S*-Parameter Measurement Methods for Adapters. In: *Advances in Radio Science* [online]. Copernicus GmbH, 2023, sv. 20, s. 1–8 [cit. 2024-05-12]. Dostupné z DOI: 10.5194/ars-20-1-2023. ISSN: 1684-9965 Issue: A.
48. KEYSIGHT. *85052C Precision Mechanical Calibration Kit, DC to 26.5 GHz, 3.5 mm* [online]. 2024. [cit. 2024-05-12]. Dostupné z: <https://www.keysight.com/us/en/product/85052C/precision-mechanical-calibration-kit-dc-26-5-ghz-3-5-mm.html>.
49. *plexi.cz* [online]. 2024. [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: <https://www.plexi.cz/>.

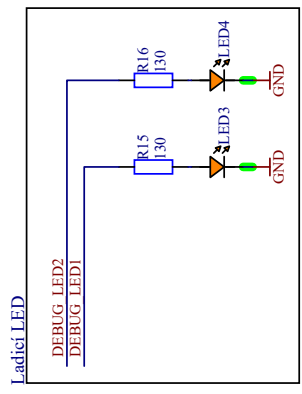
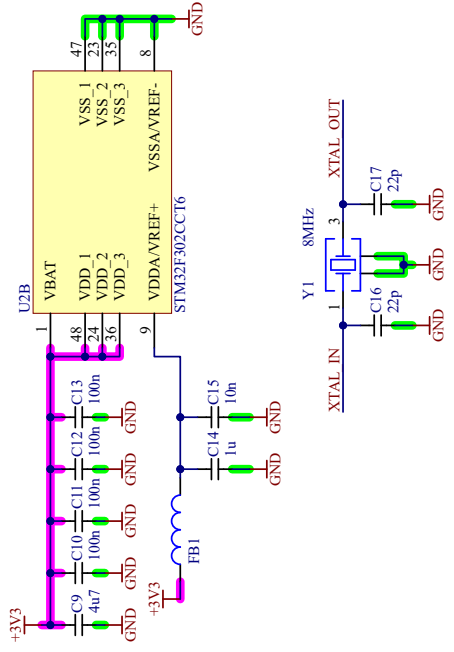
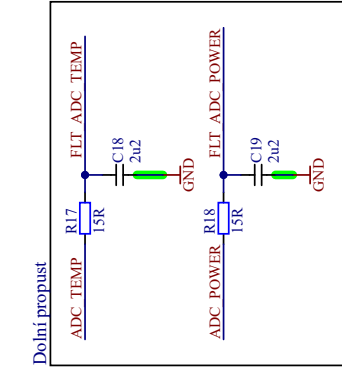




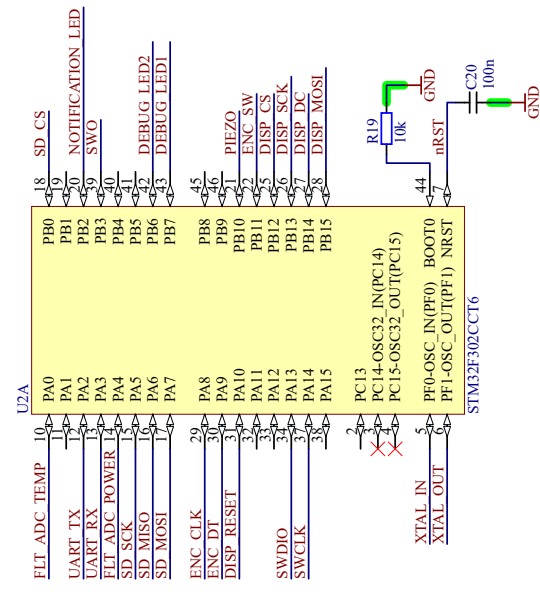
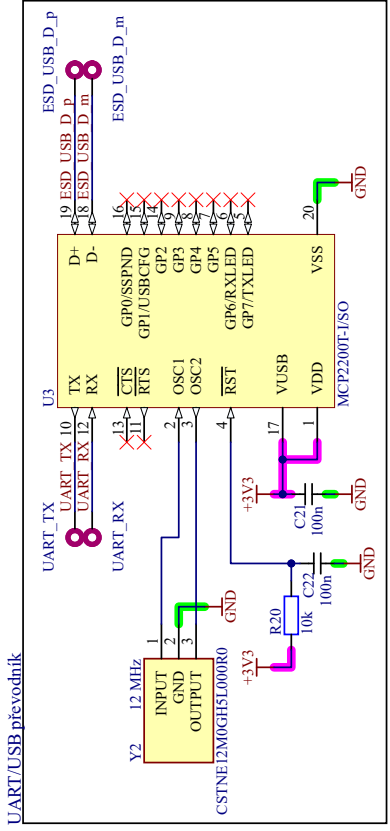
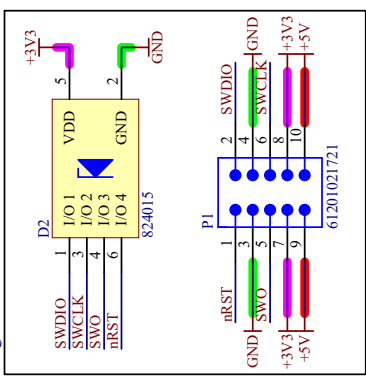
## **Příloha A**

### **Finální schéma řídicí elektroniky detektoru**





Programovací konektor



Projekt: Řídicí elektronika detektoru ZX47-60-S+

Rev: 1.1
MCU.SchDoc
Datum: 13.05.2024
Autorka: Jakub Junek
Strana: 4