

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Analyzátor vybraných vlastností dvojbranu

Bc. Petr Kopecký

Diplomová práce

2023

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr Kopecký**  
Osobní číslo: **I21290**  
Studijní program: **N0714A060018 Komunikační a radarové systémy**  
Téma práce: **Analyzátor vybraných vlastností dvojbranu**  
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

## Zásady pro vypracování

Cílem diplomové práce je návrh a výroba zařízení pro  $|S_{12}|$  a  $|S_{21}|$  parametrů dvojbranu v závislosti na frekvenci. Student ve své práci nejprve provede rozbor vlastností dvojbranů a možností jejich měření. Na základě poznatků získaných v teoretické části práce student vybere vhodný postup, jak změřit  $|S_{21}|$  a  $|S_{12}|$  parametry dvojbranu a navrhne zařízení pro jejich měření. Ověření navrženého řešení bude provedeno sadou měření realizovaných na funkčním vzorku navrženého analyzátoru, který student za tímto účelem vyrobí.

Rozsah pracovní zprávy: **50**  
Rozsah grafických prací: **10**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

BRTNÍK, Bohumil. Teoretická elektrotechnika. Praha: BEN – technická literatura, 2017. ISBN 978-80-7300-547-4.

Fantom, A., Radio Frequency and Microwave Power Measurement, 1990. ISBN 9780863411205.

Nash, E. Measurement and Control of RF Power (Part I). Online: 2022 <https://www.analog.com/en/technical-articles/measurement-control-rf-power-parti.html>

Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG. R&S®ZNA Vector Network Analyzers User Manual, 2022, Version 24. [https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl\\_downloads/pdm/cl\\_manuals/user\\_manual/1178\\_6462\\_01/ZNA\\_UserManual\\_en\\_24.pdf](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/pdm/cl_manuals/user_manual/1178_6462_01/ZNA_UserManual_en_24.pdf)

ANALOG DEVICES. AD8317-1 MHz to 10 GHz, 55 dB Log Detector/Controller, 2019, Rev. D. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad8317.pdf>

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Luboš Rejček, Ph.D.**  
Katedra elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce:  
Termín odevzdání diplomové práce:

L.S.

**Ing. Zdeněk Němec, Ph.D. v.r.**  
děkan

**Ing. Jan Pidanič, Ph.D. v.r.**  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 18. listopadu 2022

## **Prohlášení autora**

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 24. 08. 2023

Bc. Petr Kopecký

## **Poděkování**

Na památku mého otce Václava Kopeckého, nadšeného amatérského elektrotechnika.

Dále bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Luboši Rejfkovi Ph.D. za jeho pomoc při tvorbě této práce a kolegovi Aleši Samkovi za odborné konzultace a cenné rady v oblasti mikrovlnné techniky.

Také bych rád poděkoval své matce Iloně Kopecké a celé rodině a přátelům za podporu během studia a při tvorbě diplomové práce.

A v neposlední řadě bych rád poděkoval své přítelkyni Anně Dvořáčkové za její podporu a také své dobré kamarádce Ing. Monice Kopřivové za pomoc s jazykovou korekturou diplomové práce.

## **Anotace**

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a konstrukcí analyzátoru vybraných vlastností dvojbranu. Teoretická část se věnuje teorii dvojbranů a n-branů obecně a jak je měřit. V praktické části je popsán návrh a postup konstrukce analyzátoru pro měření absolutních hodnot přenosu dvojbranu v závislosti na frekvenci. Pro analyzování a měření absolutních hodnot přenosu dvojbranu jsou využívány S-parametry ( $|S_{21}|$  a  $|S_{12}|$ ). Funkčnost zařízení je ověřena sadou měření, které jsou součástí této práce.

## **Klíčová slova**

Analyzátor, syntetizér signálu, dvojbrany, S-parametry, STM32, Raspberry Pi, Python

## **Title**

Analyzer of the selected characteristics of the dual-gate circuits.

## **Annotation**

This thesis is aimed on a design and construction of a double-gates circuits analyzer. Theory and measurements of the double-gates circuits are described in a theoretical part. A description of the analyzer's design and construction of this analyzer are described in the practical part. The analyzer measures absolute values of the transient characteristics in the frequency dependence. S-parameters ( $|S_{21}|$  and  $|S_{12}|$ ) are used for the double-gates circuit analysis. The designed analyzer was tested by the set of the measurements, the results of these measurements are part of this thesis and shows, that the analyzer works correctly.

## **Keywords**

Analyzer, signal synthesizer, double-gates, S-parametr, STM32, Raspberry Pi, Python

## Obsah

<b>Seznam zkratk</b> .....	<b>8</b>
<b>Seznam obrázků</b> .....	<b>9</b>
<b>Seznam tabulek</b> .....	<b>18</b>
<b>Úvod</b> .....	<b>19</b>
<b>1 Teoretický rozbor dvojbranu</b> .....	<b>20</b>
1.1 Popis a charakteristické vlastnosti dvojbranu.....	20
1.2 Dvojbrany s aktivními prvky .....	20
1.3 Dvojbrany s pasivními prvky .....	21
1.4 Základní charakteristiky dvojbranu .....	23
1.4.1 Impedanční parametry dvojbranu .....	24
1.4.2 Admitanční parametry dvojbranu .....	24
1.4.3 Hybridní parametry dvojbranu .....	25
1.4.4 Inverzně hybridní parametry dvojbranu .....	26
1.4.5 Kaskádní parametry dvojbranu.....	27
1.4.6 Inverzně Kaskádní parametry dvojbranu.....	27
1.4.7 Rozptylové parametry dvojbranu .....	28
<b>2 Metody pro měření amplitudových Rozptylových parametrů</b> .....	<b>30</b>
2.1 Měření Vektorovým analyzátozem.....	30
2.2 Automatizované měření VF generátorem a osciloskopem.....	31
2.3 Automatizované měření VF generátorem a spektrálním analyzátozem .....	32
2.4 Automatizované měření VF generátorem a měřičem výkonu.....	32
<b>3 Výběr metody pro vlastní řešení</b> .....	<b>34</b>
3.1 Koncept navrženého zařízení .....	34
3.2 Navržený blok napájení .....	35
3.3 Přijímací blok pro analyzátozem .....	36
3.4 Vysílací blok pro analyzátozem.....	37
3.5 Koncept řízení analyzátozem.....	38
<b>4 Popis komerčních modulů využitých v analyzátozem</b> .....	<b>39</b>
4.1 Ověření zakončovacích impedancí .....	39
4.2 Výběr použitých spojek propojovacích kabelů .....	40
4.3 Ověření parametrů propojovacích kabelů.....	40

4.4	Ověření parametrů vybraných atenuátorů .....	43
4.5	Ověření parametrů vysokofrekvenčního detektoru výkonu .....	44
4.6	Ověření parametrů vysokofrekvenčního zesilovače signálu .....	46
4.7	Ověření parametrů programovatelného atenuátoru .....	50
4.8	Ověření parametrů zvolené směrové odbočnice.....	51
4.9	Ověření parametrů syntetizéru signálu .....	53
4.10	Ověření funkce modulů pro napájecí část .....	57
<b>5</b>	<b>Popis modulů navržených pro zařízení a modulů i z jiných projektů využitých v analyzátoru.....</b>	<b>58</b>
5.1	Ověření parametru přepínačů signálové cesty.....	58
5.2	Ověření parametrů modulu filtrace signálu .....	59
5.3	Návrh modulu pro programování syntetizátoru.....	61
5.4	Návrh modulu s MCU pro řízení přijímací části .....	62
<b>6</b>	<b>Návrh a konstrukce bloku napájecí části .....</b>	<b>63</b>
6.1	Konstrukční část napájecí části.....	63
6.2	Popis řídicího FW napájecí části .....	66
<b>7</b>	<b>Návrh a konstrukce bloku přijímací části.....</b>	<b>67</b>
7.1	Konstrukční část přijímací části .....	67
7.2	Popis řídicího FW přijímací části .....	70
7.3	Popis měření přijímací části .....	71
7.4	Měření vlastností přijímače použitého v analyzátoru.....	72
7.5	Popis kalibrace přijímací části.....	74
<b>8</b>	<b>Návrh a konstrukce bloku vysílací části.....</b>	<b>75</b>
8.1	Konstrukční část vysílací části .....	75
8.2	Popis řídicího FW vysílací části .....	79
8.3	Popis měření vysílací části .....	81
8.4	Popis kalibrace vysílací části.....	85
<b>9</b>	<b>Vývoj bloku řídicí části a software.....</b>	<b>87</b>
9.1	Software pro vypínání Raspberry Pi.....	87
9.2	Grafická podoba ovládacího programu .....	88
9.3	Software ke grafické části.....	91
<b>10</b>	<b>Měření pro ověření funkce sestaveného zařízení.....</b>	<b>92</b>
10.1	Ověření funkce při měření spojení kabelu.....	92



10.2	Ověření funkce při měření atenuátoru 3 dB .....	94
10.3	Ověření funkce při měření atenuátoru 6 dB .....	97
10.4	Ověření funkce při měření atenuátoru 9 dB .....	99
10.5	Ověření funkce při měření atenuátoru 12 dB .....	103
10.6	Ověření funkce při měření parametru $ S_{21} $ u vzorku filtru LFCV-45+ .....	106
10.7	Ověření funkce při měření parametru $ S_{12} $ u vzorku filtru LFCV-45+ .....	109
10.8	Ověření funkce při měření parametru $ S_{21} $ u vzorku filtru LFCV-52+ .....	112
10.9	Ověření funkce při měření parametru $ S_{12} $ u vzorku filtru LFCV-52+ .....	115
10.10	Ověření funkce při měření parametru $ S_{21} $ u vzorku LFCN-320+.....	118
10.11	Ověření funkce při měření parametru $ S_{12} $ u vzorku filtru LFCN-320+.....	121
10.12	Ověření funkce při opakovaném měření zvoleného filtru.....	124
10.13	Ověření funkce při měření izolace portu.....	125
<b>Závěr .....</b>		<b>129</b>
<b>Literatura .....</b>		<b>128</b>
<b>Seznam Tištěných příloh.....</b>		<b>132</b>
<b>Seznam Elektronických příloh .....</b>		<b>133</b>

## Seznam zkratek

AD	Analog to Digital	– Analogově digitální
ADC	Analog to Digital Converter	– Analogově digitální převodník
AVG	Average	– Průměr
CW	Continuous wave	– Kontinuální vlna
DET	Detector	– Detektor
DPS	Printed circuit board	– Deska plošného spoje
DUT	Device under test	– Testované zařízení
EMC	Electromagnetic compatibility	– Elektromagnetická kompatibilita
FW	Firmware	
GND	Ground	– Zemní pól
GUI	Graphical User Interface	– Grafické uživatelské prostředí
HAL	High Abstraction Layer	– Vrstva s velkou Abstrakcí
HW	Hardware	
INHI	Input High Contact	– Vstup vysoké úrovně
INLO	Input Low Contact	– Vstup nízké úrovně
LAN	Local Area Network	– Lokální síť
LED	Light Emitting Diode	– Světlo vyzařující dioda
MCU	Micro Controller Unit	– Mikrokontroler
SCPI	Standard Commands for Programmable Instruments	– Standardní knihovna příkazů pro měřicí zařízení
SD	Secure Digital	
SDR	Software Defined Radio	– Softwarově definované rádio
SMA	SubMiniature version A	
SPI	Serial Peripheral Interface	– Sériové periferní rozhraní
STOP	Turn off the process	– Ukončení procesu
SW	Software	
RUN	Turn on the process	– Spuštění procesu
UCC	Positive voltage	– Pozitivní napájecí pól
UDD	Positive voltage	– Pozitivní napájecí pól
UI	User Interface	– Uživatelské rozhraní
USART	Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter	– Univerzální synchronní přijímač-vysílač
USB	Universal Serial Bus	– Univerzální sériová sběrnice
USS	Negative voltage	– Negativní napájecí pól
VF	High Frequency	– Vysokofrekvenční
VCC	Positive voltage	– Pozitivní napájecí pól
VDD	Positive voltage	– Pozitivní napájecí pól
VSS	Negative voltage	– Negativní napájecí pól

## Seznam obrázků

Obrázek 1.1: Schématická podoba obecného dvojbranu, překresleno z (Černík, 2019).....	20
Obrázek 1.2: Schématická podoba aktivního dvojbranu jako vysokofrekvenčního zesilovacího prvku. (Zdroj: Vlastní.).....	20
Obrázek 1.3: Reálná podoba dvojbranu jako zesilovacího prvku. (Zdroj: Vlastní.).....	21
Obrázek 1.4: Schématická realizace vysokofrekvenčního vodiče, překresleno z (Brtník, 2017).....	21
Obrázek 1.5: Reálná podoba vysokofrekvenční kabeláže pro přenos vysokofrekvenčního signálu. (Zdroj: Vlastní.) .....	21
Obrázek 1.6: Schématická podoba atenuátoru realizovaného PI článkem, překresleno z (Belza, 2002). .....	22
Obrázek 1.7: Reálná podoba zakoupeného atenuátoru s SMA-SMA bránami. (Zdroj: Vlastní.) .....	22
Obrázek 1.8: Schématická realizace filtru dolní propusti disktrétním PI článkem. (Zdroj: Vlastní.) .....	22
Obrázek 1.9: Podoba osazeného filtru dolní propusti s PI článkem, horní strana. (Zdroj: Vlastní.) .....	22
Obrázek 1.10: Podoba osazeného filtru dolní propusti s PI článkem, spodní strana. (Zdroj: Vlastní.) .....	22
Obrázek 1.11: Schématická podoba dvojbranu s keramickým filtrem. (Zdroj: Vlastní.) ...	23
Obrázek 1.12: Reálná podoba dvojbranu s keramickým filtrem vlastní výroby. (Zdroj: Vlastní.) .....	23
Obrázek 1.13: Schématická a principiální podoba dvojbranu s impedančními parametry překresleno z (Brtník, 2014).....	24
Obrázek 1.14: Principiální vnitřní zapojení dvojbranu s impedančními parametry, převzato z (Černík, 2019).....	24
Obrázek 1.15: Schématická a principiální podoba dvojbranu s admitančními parametry překresleno z (Brtník, 2014).....	25
Obrázek 1.16: Principiální vnitřní zapojení dvojbranu s admitančními parametry, převzato z (Černík, 2019).....	25
Obrázek 1.17: Schématická a principiální podoba dvojbranu s hybridními parametry překresleno z (Brtník, 2014).....	25
Obrázek 1.18: Principiální vnitřní zapojení dvojbranu s hybridními parametry, převzato z (Černík, 2019).....	26
Obrázek 1.19: Schématická a principiální podoba dvojbranu s inverzně hybridními parametry překresleno z (Černík, 2019).....	26
Obrázek 1.20: Principiální vnitřní zapojení dvojbranu s inverzně hybridními parametry, překresleno z (Černík, 2019). .....	26
Obrázek 1.21: Schématická a principiální podoba dvojbranu s kaskádními parametry překresleno z (Brtník, 2014).....	27
Obrázek 1.22: Schématická a principiální podoba dvojbranu s inverzně kaskádními parametry překresleno z (Brtník, 2014).....	27

Obrázek 1.23: Příklad dvojbranu pro odvození S-parametrů $S_{11}$ až $S_{22}$ , převzato z (Rejček, 2020).....	28
Obrázek 1.24: Náhled na reálnou podobu vektorového analyzátoru od R&S, převzato z (Obvodove-analyzatory, 2023).....	29
Obrázek 2.1: Příklad měřicího pracoviště pro měření S-parametrů vektorovým analyzátozem, převzato z (Baby, 2022).....	30
Obrázek 2.2: Principiální schématické zapojení vektorového analyzátoru, převzato ze (Baby, 2022).....	31
Obrázek 2.3: Grafické zobrazení měřicího pracoviště použitého pro tento druh měření. (Zdroj: Vlastní.).....	31
Obrázek 2.4: Grafické zobrazení měřicího pracoviště použitého pro tento druh měření. (Zdroj: Vlastní.).....	32
Obrázek 2.5: Grafické zobrazení měřicího pracoviště použitého pro tento druh měření. (Zdroj: Vlastní.).....	33
Obrázek 2.6: Příklad požitého měřiče výkonu, převzato ze (Power Measurements, 2000).	33
Obrázek 3.1: Náhled na blokové schéma kompletního zařízení. (Zdroj: Vlastní.).....	35
Obrázek 3.2: Náhled na blokové schéma zapojení bloku napájení. (Zdroj: Vlastní.).....	36
Obrázek 3.3: Náhled na blokové schéma bloku přijímací části zařízení. (Zdroj: Vlastní.).....	37
Obrázek 3.4: Náhled na blokové schéma bloku vysílací části zařízení. (Zdroj: Vlastní.).....	37
Obrázek 3.5: Náhled na blokové schéma bloku řídicí části zařízení. (Zdroj: Vlastní.).....	38
Obrázek 4.1: Náhled na použité zakončovací impedance $50 \Omega$ v provedení SMA. (Zdroj: Vlastní.).....	39
Obrázek 4.2: Měření zakončovacích impedancí, převzato z (Kopecký, 2021).....	39
Obrázek 4.3: Náhled na vybrané vysokofrekvenční spojovací prvky, A) vybraný přechod typu N-SMA, přední strana; B) vybraný přechod typu N-SMA, zadní strana; C) vybraný přechod typu N-SMA, horní pohled; D) vysokofrekvenční spojky pro realizaci zařízení. (Zdroj: Vlastní.).....	40
Obrázek 4.4: Náhled na použité vysokofrekvenční kabely: A) semi-rigid kabel SMA-SMA RG402 – dlouhý; B) semi-rigid kabel SMA-SMA RG402 – střední.; C) semi-flexibilni měřicí kabel SMA-SMA RG402.; D) semi-rigid kabel SMA-SMA RG402 – krátký.; E) flexibilní kabel SMA-SMA RG316. (Zdroj: Vlastní.).....	41
Obrázek 4.5: Náhled na změřený přenos pro flexibilní kabel SMA-SMA RG316. (Zdroj: Vlastní.).....	41
Obrázek 4.6: Náhled na změřený přenos pro semi-rigid kabel SMA-SMA RG402. (Zdroj: Vlastní.).....	42
Obrázek 4.7: Náhled na změřený přenos pro semi-flexibilni měřicí kabel SMA-SMA RG402. (Zdroj: Vlastní.).....	42
Obrázek 4.8: Náhled na použité pevné atenuátory s přechody SMA. (Zdroj: Vlastní.).....	43
Obrázek 4.9: Náhled na měření zvoleného atenuátoru s pevnou hodnotou 3 dB. (Zdroj: Vlastní.).....	43
Obrázek 4.10: Náhled na měření zvoleného atenuátoru s pevnou hodnotou 6 dB. (Zdroj: Vlastní.).....	44
Obrázek 4.11: Náhled na použitý modul s AD8317. (Zdroj: Vlastní.).....	44

Obrázek 4.12: Náhled na vnitřní blokové schéma obvodu AD8317, převzato z (AD8317, ©2005–2019).....	45
Obrázek 4.13: Náhled na grafický popis detekce úrovní výkonu ku výstupnímu napětí, převzato z (AD8317, ©2005–2019). .....	45
Obrázek 4.14: Pohled na provedené měření výstupního napětí při nastavené úrovni amplitudy signálu vystupujícího z generátoru pro -60 dBm. (Zdroj: Vlastní.) .....	46
Obrázek 4.15: Náhled na použitý modul zesilovače se SBB5089Z. (Zdroj: Vlastní.).....	47
Obrázek 4.16: Náhled na doporučené vnitřní zapojení zesilovače, převzato z (SBB5089Z, 2021). .....	47
Obrázek 4.17: Náhled na grafické zobrazení S-parametru S21 pro vybraný zesilovač, převzato z (SBB5089Z, 2021). .....	48
Obrázek 4.18: Náhled na grafické zobrazení S-parametru S11 pro vybraný zesilovač, převzato z (SBB5089Z, 2021). .....	48
Obrázek 4.19: Náhled na grafické zobrazení S-parametru S22 pro vybraný zesilovač, převzato z (SBB5089Z, 2021). .....	49
Obrázek 4.20: Náhled na grafické zobrazení S-parametru S12 pro vybraný zesilovač, převzato z (SBB5089Z, 2021). .....	49
Obrázek 4.21: Náhled na vybraný modul elektronicky nastavitelného atenuátoru. (Zdroj: Vlastní.) .....	50
Obrázek 4.22: Principiální popis funkce atenuátoru, dostupné z (PE4302, 2005). .....	50
Obrázek 4.23: Grafický popis atenuací dosažitelných obvodem, dostupné z (PE4302, 2005). .....	51
Obrázek 4.24: Náhled na funkční principiální blokové schéma, dostupné z (Directional Coupler ADC-10-4+, 2020). .....	51
Obrázek 4.25: Náhled na použitý zakoupený modul, dostupné z (Odbočnice-Aliexpress, 2010-2022) .....	52
Obrázek 4.26: Náhled na grafické zobrazení vlastností Směrovosti a vazby použité odbočnice, dostupné z (Directional Coupler ADC-10-4+, 2020). .....	52
Obrázek 4.27: Náhled na grafické zobrazení vlastností průchozích ztrát v závislosti na frekvenci u použité odbočnice, dostupné z (Directional Coupler ADC-10-4+, 2020). .....	52
Obrázek 4.28: Náhled na vnitřní blokové schéma syntetizéru signálu, dostupné z (ADF4351, ©2012–2017). .....	53
Obrázek 4.29: Náhled na modul syntetizéru signálu. (Zdroj: Vlastní.).....	53
Obrázek 4.30: Náhled na testovací zapojení, detail na funkci modulu. (Zdroj: Vlastní.) ..	54
Obrázek 4.31: Náhled na syntetizér signálu, s indikací modrou led, zavěšení fázového závěsu. (Zdroj: Vlastní.) .....	54
Obrázek 4.32: Náhled na ověřovací měření, nastavena frekvence minima 36 MHz. (Zdroj: Vlastní.) .....	55
Obrázek 4.33: Náhled na ověřovací měření, nastavena frekvence 1500 MHz. (Zdroj: Vlastní.) .....	55
Obrázek 4.34: Náhled na ověřovací měření, nastavena frekvence 2500 MHz. (Zdroj: Vlastní.) .....	56

Obrázek 4.35: Náhled na ověřovací měření, nastavena frekvence Maxima 4400 MHz. (Zdroj: Vlastní.)	56
Obrázek 4.36: Náhled na modul s Relé pro spínání zdrojů. (Zdroj: Vlastní.)	57
Obrázek 4.37: Náhled na modul zdrojů, použitý v diplomové práci. (Zdroj: Vlastní.)	57
Obrázek 5.1: Náhled na osazenou destičku přepínače s ADG918. (Zdroj: Vlastní.)	58
Obrázek 5.2: Náhled na měření přízpusobení DPS s obvodem ADG918, převzato ze (Kopecký, 2021).	58
Obrázek 5.3: Náhled na schéma navržené filtrační části na filtrační DPS. (Zdroj: Vlastní.)	59
Obrázek 5.4: Náhled na model navržené filtrační DPS. (Zdroj: Vlastní.)	60
Obrázek 5.5: Náhled na osazenou filtrační DPS, přední strana – TOP. (Zdroj: Vlastní.)	60
Obrázek 5.6: Náhled na osazenou filtrační DPS, zadní strana – BOTTOM. (Zdroj: Vlastní.)	61
Obrázek 5.7: Náhled na model modulu programátoru, strana TOP. (Zdroj: Vlastní.)	61
Obrázek 5.8: Náhled na model modulu programátoru, strana BOTTOM. (Zdroj: Vlastní.)	61
Obrázek 5.9: Náhled na osazený modul pro programování syntetizéru. (Zdroj: Vlastní.)	62
Obrázek 5.10: Náhled na DPS použitou v bloku přijímače, převzato z (Kopecký, 2021)	62
Obrázek 6.1: Náhled na sestavování zdrojové části do spodní části bedny. (Zdroj: Vlastní.)	63
Obrázek 6.2: Náhled na osazenou pomocnou DPS spínačů pro spínání relé. (Zdroj: Vlastní.)	63
Obrázek 6.3: Náhled na osazení celého bloku zdrojové části zařízení. (Zdroj: Vlastní.)	64
Obrázek 6.4: Náhled na osazení celého bloku zdrojové části zařízení – připojení síťového napětí. (Zdroj: Vlastní.)	64
Obrázek 6.5: Náhled na osazení celého bloku zdrojové části zařízení – režim Stand-by. (Zdroj: Vlastní.)	65
Obrázek 6.6: Náhled na osazení celého bloku zdrojové části zařízení – režim normální. (Zdroj: Vlastní.)	65
Obrázek 6.7: Stručný vývojový diagram k FW pro zapínání a vypínání zařízení. (Zdroj: Vlastní.)	66
Obrázek 7.1: Náhled na osazování modulu bloku přijímací části – rozřazení. (Zdroj: Vlastní.)	67
Obrázek 7.2: Náhled na osazování modulu bloku přijímací části – rozřazení a montáž. (Zdroj: Vlastní.)	67
Obrázek 7.3: Náhled na osazený blok přijímací části do krabice. (Zdroj: Vlastní.)	68
Obrázek 7.4: Náhled na kompletní montáž zdroje a přijímací části do krabice – detail na rozložení. (Zdroj: Vlastní.)	68
Obrázek 7.5: Náhled na smontovanou část krabice obsahující zdroj a přijímací část – zadní pohled. (Zdroj: Vlastní.)	69
Obrázek 7.6: Náhled na smontovanou část krabice obsahující zdroj a přijímací část – přední pohled. (Zdroj: Vlastní.)	69

Obrázek 7.7: Stručný vývojový diagram k FW pro ovládání funkce přijímací části zařízení. (Zdroj: Vlastní.)	70
Obrázek 7.8: Náhled na měřicí pracoviště – celkový pohled. (Zdroj: Vlastní.)	71
Obrázek 7.9: Náhled na nastavený generátor ovládaný přes SCPI. (Zdroj: Vlastní.)	71
Obrázek 7.10: Náhled na přijímací část zařízení s probíhajícím měřením. (Zdroj: Vlastní.)	72
Obrázek 7.11: Náhled naměřená data přenosu $ S_{41} ( S_{21} )$ pro měření kontrolního kanálu. (Zdroj: Vlastní.)	72
Obrázek 7.12: Náhled naměřená data přenosu $ S_{41} ( S_{21} )$ pro měření odbočeného kanálu. (Zdroj: Vlastní.)	73
Obrázek 7.13: Náhled naměřená data přenosu $ S_{41} ( S_{21} )$ pro měření hlavního kanálu se zesilovačem. (Zdroj: Vlastní.)	73
Obrázek 7.14: Náhled naměřená data přenosu $ S_{41} ( S_{21} )$ pro měření hlavního kanálu bez zesilovače. (Zdroj: Vlastní.)	74
Obrázek 7.15: Náhled na naměřené kalibrační křivky bloku přijímací části. (Zdroj: Vlastní.)	74
Obrázek 8.1: Náhled na sestavování bloku vysílací části – detail na syntetizér a filtrační část. (Zdroj: Vlastní.)	75
Obrázek 8.2: Náhled na kompletně sestavený blok vysílací části zařízení. (Zdroj: Vlastní.)	76
Obrázek 8.3: Náhled na montáž do bedny k ostatním blokům. (Zdroj: Vlastní.)	77
Obrázek 8.4: Náhled na smontovanou bednu se všemi bloky. (Zdroj: Vlastní.)	77
Obrázek 8.5: Náhled na bednu s detailem na přední panel zařízení. (Zdroj: Vlastní.)	78
Obrázek 8.6: Náhled na oživené zařízení. (Zdroj: Vlastní.)	78
Obrázek 8.7: Stručný vývojový diagram k FW v MCU pro programování syntetizéru. (Zdroj: Vlastní.)	79
Obrázek 8.8: Stručný vývojový diagram k FW filtrační části. (Zdroj: Vlastní.)	80
Obrázek 8.9: Náhled na měřicí pracoviště při měření vysílací části. (Zdroj: Vlastní.)	81
Obrázek 8.10: Náhled na měřicí pracoviště při měření vysílací části – detail na zařízení. (Zdroj: Vlastní.)	81
Obrázek 8.11: Náhled na měřicí pracoviště při měření vysílací části – detail na spektrální analyzátor. (Zdroj: Vlastní.)	82
Obrázek 8.12: Náhled na maximální dosahovaný výkon z výstupního portu 1 – pro nízké frekvence. (Zdroj: Vlastní.)	82
Obrázek 8.13: Ukázka naměřených hodnot pro kanál bez filtrace pro frekvenci 100 MHz. (Zdroj: Vlastní.)	83
Obrázek 8.14: Ukázka naměřených hodnot pro kanál bez filtrace pro frekvenci 400 MHz. (Zdroj: Vlastní.)	83
Obrázek 8.15: Ukázka naměřených hodnot pro kanál bez filtrace pro frekvenci 1000 MHz. (Zdroj: Vlastní.)	84
Obrázek 8.16: Ukázka naměřených hodnot pro kanál bez filtrace pro frekvenci 1500 MHz. (Zdroj: Vlastní.)	84

Obrázek 8.17: Ukázka naměřených hodnot pro kanál bez filtrace pro frekvenci 2000 MHz. (Zdroj: Vlastní.)	85
Obrázek 8.18: Náhled na změřenou kalibrační křivku maximální amplitudy signálu z filtrovaných kanálů. (Zdroj: Vlastní.)	86
Obrázek 8.19: Náhled na kalibrační křivky vysílacích referenčních úrovní pro vysílací část. (Zdroj: Vlastní.)	86
Obrázek 9.1: Stručný vývojový diagram k SW, zapínání a vypínání zařízení, převzato z (Kopecký, 2021).	87
Obrázek 9.2: Ukázka z grafického vývojového prostředí pyQT5. (Zdroj: Vlastní.)	88
Obrázek 9.3: Ukázka navržené podoby GUI pro ovládání analyzátoru. (Zdroj: Vlastní.)	89
Obrázek 9.4: Ukázka navržené podoby GUI pro ovládání analyzátoru– detail na vstupy. (Zdroj: Vlastní.)	90
Obrázek 9.5: Ukázka navržené podoby GUI pro ovládání analyzátoru– detail na tlačítka. (Zdroj: Vlastní.)	90
Obrázek 9.6: Stručný vývojový diagram pro popis funkce řídicího SW grafického GUI pro ovládání analyzátoru. (Zdroj: Vlastní.)	91
Obrázek 10.1: Ukázka měřícího pracoviště při měření spojky. (Zdroj: Vlastní.)	92
Obrázek 10.2: Ukázka detailu měřícího zobrazovače při měření spojky. (Zdroj: Vlastní.)	92
Obrázek 10.3: Ukázka vykreslených naměřených výsledku s použitím exportní funkce dat GUI. (Zdroj: Vlastní.)	93
Obrázek 10.4: Ukázka měřícího pracoviště při měření spojky s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.)	93
Obrázek 10.5: Ukázka naměřených hodnot z analyzátoru NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.)	94
Obrázek 10.6: Ukázka měřícího pracoviště při měření atenuátoru 3 dB. (Zdroj: Vlastní.)	94
Obrázek 10.7: Ukázka detailu měřícího zobrazovače při měření atenuátoru 3 dB. (Zdroj: Vlastní.)	95
Obrázek 10.8: Ukázka vykreslených naměřených výsledku s použitím exportní funkce dat GUI. (Zdroj: Vlastní.)	95
Obrázek 10.9: Naměřená data při měření atenuátoru 3 dB pomocí Rhode & Schwarz ZNB 20. (Zdroj: Vlastní.)	96
Obrázek 10.10: Ukázka měřícího pracoviště při měření atenuátoru 6 dB. (Zdroj: Vlastní.)	97
Obrázek 10.11: Ukázka detailu měřícího zobrazovače při měření atenuátoru 6 dB. (Zdroj: Vlastní.)	97
Obrázek 10.12: Ukázka vykreslených naměřených výsledků s použitím exportní funkce dat GUI. (Zdroj: Vlastní.)	98
Obrázek 10.13: Naměřená data při měření atenuátoru 6 dB pomocí Rhode & Schwarz ZNB 20. (Zdroj: Vlastní.)	98
Obrázek 10.14: Ukázka měřícího pracoviště při měření atenuátoru 9 dB. (Zdroj: Vlastní.)	100
Obrázek 10.15: Ukázka detailu měřícího zobrazovače při měření atenuátoru 9 dB. (Zdroj: Vlastní.)	100



Obrázek 10.16: Ukázka vykreslených naměřených výsledků s použitím exportní funkce dat GUI. (Zdroj: Vlastní.).....	101
Obrázek 10.17: Ukázka měřicího pracoviště při měření atenuátoru 9 dB s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.).....	101
Obrázek 10.18: Náhled na naměřená data s analyzátořem NanoVNA při měření atenuátoru 9 dB. (Zdroj: Vlastní.) .....	102
Obrázek 10.19: Ukázka měřicího pracoviště při měření atenuátoru 12 dB. (Zdroj: Vlastní.) .....	103
Obrázek 10.20: Ukázka detailu měřicího zobrazovače při měření atenuátoru 12 dB. (Zdroj: Vlastní.) .....	103
Obrázek 10.21: Ukázka vykreslených naměřených výsledků s použitím exportní funkce dat GUI. (Zdroj: Vlastní.).....	104
Obrázek 10.22: Ukázka měřicího pracoviště při měření atenuátoru 12 dB s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.).....	104
Obrázek 10.23: Náhled na naměřená data s analyzátořem NanoVNA při měření atenuátoru 12 dB. (Zdroj: Vlastní.) .....	105
Obrázek 10.24: Ukázka měřicího pracoviště pro měření s-parametru $ S_{21} $ u filtru LFCV-45+. (Zdroj: Vlastní.).....	106
Obrázek 10.25: Ukázka detailu měřicího zobrazovače při měření s-parametru $ S_{21} $ u filtru LFCV-45+. (Zdroj: Vlastní.) .....	106
Obrázek 10.26: Ukázka vykreslených naměřených výsledků s použitím exportní funkce dat GUI. (Zdroj: Vlastní.).....	107
Obrázek 10.27: Ukázka měřicího pracoviště při měření s-parametru $ S_{21} $ filtru LFCV-45+ s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.) .....	107
Obrázek 10.28: Ukázka naměřených dat při měření s-parametru $ S_{21} $ filtru LFCV-45+ s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.) .....	108
Obrázek 10.29: Ukázka měřicího pracoviště pro měření s-parametru $ S_{12} $ u filtru LFCV-45+. (Zdroj: Vlastní.).....	109
Obrázek 10.30: Ukázka detailu měřicího zobrazovače při měření s-parametru $ S_{12} $ u filtru LFCV-45+. (Zdroj: Vlastní.) .....	109
Obrázek 10.31: Ukázka vykreslených naměřených výsledků s použitím exportní funkce dat GUI. (Zdroj: Vlastní.).....	110
Obrázek 10.32: Ukázka měřicího pracoviště při měření s-parametru $ S_{12} $ filtru LFCV-45+ s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.) .....	110
Obrázek 10.33: Ukázka naměřených dat při měření s-parametru $S_{12}$ filtru LFCV-45+ s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.) .....	111
Obrázek 10.34: Ukázka měřicího pracoviště pro měření s-parametru $ S_{21} $ u filtru LFCV-52+. (Zdroj: Vlastní.).....	112
Obrázek 10.35: Ukázka detailu měřicího GUI při měření s-parametru $ S_{21} $ u filtru LFCV-52+. (Zdroj: Vlastní.).....	112
Obrázek 10.36: Ukázka vykreslených naměřených výsledků s použitím exportní funkce dat GUI. (Zdroj: Vlastní.).....	113

Obrázek 10.37: Ukázka měřicího pracoviště při měření s-parametru  S21  filtru LFCV-52+ s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.)	113
Obrázek 10.38: Ukázka naměřených dat při měření s-parametru  S21  filtru LFCV-52+ s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.)	114
Obrázek 10.39: Ukázka měřicího pracoviště pro měření s-parametru  S12  u filtru LFCV-52+. (Zdroj: Vlastní.)	115
Obrázek 10.40: Ukázka detailu měřicího zobrazovače při měření s-parametru  S12  u filtru LFCV-52+. (Zdroj: Vlastní.)	115
Obrázek 10.41: Ukázka vykreslených naměřených výsledků s použitím exportní funkce dat GUI. (Zdroj: Vlastní.)	116
Obrázek 10.42: Ukázka měřicího pracoviště při měření s-parametru  S12  filtru LFCV-52+ s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.)	116
Obrázek 10.43: Ukázka naměřených dat při měření s-parametru  S12  filtru LFCV-52+ s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.)	117
Obrázek 10.44: Ukázka měřicího pracoviště pro měření s-parametru  S21  u filtru LFCN-320+. (Zdroj: Vlastní.)	118
Obrázek 10.45: Ukázka detailu měřicího zobrazovače při měření s-parametru  S21  u filtru LFCN-320+. (Zdroj: Vlastní.)	118
Obrázek 10.46: Ukázka vykreslených naměřených výsledků s použitím exportní funkce dat GUI. (Zdroj: Vlastní.)	119
Obrázek 10.47: Ukázka měřicího pracoviště při měření s-parametru  S21  filtru LFCN-320+ s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.)	119
Obrázek 10.48: Ukázka naměřených dat při měření s-parametru  S21  filtru LFCN-320+ s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.)	120
Obrázek 10.49: Ukázka měřicího pracoviště pro měření s-parametru  S12  u filtru LFCN-320+. (Zdroj: Vlastní.)	121
Obrázek 10.50: Ukázka detailu měřicího zobrazovače při měření s-parametru  S12  u filtru LFCN-320+. (Zdroj: Vlastní.)	121
Obrázek 10.51: Ukázka vykreslených naměřených výsledků s použitím exportní funkce dat GUI. (Zdroj: Vlastní.)	122
Obrázek 10.52: Ukázka měřicího pracoviště při měření s-parametru  S12  filtru LFCN-320+ s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.)	122
Obrázek 10.53: Ukázka naměřených dat při měření s-parametru  S12  filtru LFCN-320+ s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.)	123
Obrázek 10.54: Ukázka vykreslených naměřených výsledků 5 měření filtru LFCV-45+. (Zdroj: Vlastní.)	124
Obrázek 10.55: Ukázka měřicího pracoviště pro měření izolace portu. (Zdroj: Vlastní.)	125
Obrázek 10.56: Ukázka detailu měřicího zobrazovače při měření izolace portu. (Zdroj: Vlastní.)	126
Obrázek 10.57: Ukázka vykreslených naměřených výsledku s použitím exportní funkce dat GUI. (Zdroj: Vlastní.)	126
Obrázek 10.58: Ukázka měřicího pracoviště při měření izolace Portu1 a Portu2 s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.)	127

Obrázek 10.59: Ukázka naměřených dat při měření izolace s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.)  
..... 127

## Seznam tabulek

Tabulka 4.1: Naměřené hodnoty nastavených amplitud a výstupního napětí generovaného obvodem. ....	46
Tabulka 10.2: Porovnání naměřených hodnot při měření atenuátoru 3 dB.....	96
Tabulka 10.3: Porovnání naměřených hodnot při měření atenuátoru 6 dB.....	99
Tabulka 10.4: Porovnání naměřených hodnot při měření atenuátoru 9 dB.....	102
Tabulka 10.5: Porovnání naměřených hodnot při měření atenuátoru 12 dB.....	105
Tabulka 10.6: Porovnání naměřených hodnot při měření s-parametru $ S_{21} $ filtru LFCV-45+.....	108
Tabulka 10.7: Porovnání naměřených hodnot při měření s-parametru $ S_{12} $ filtru LFCV-45+.....	111
Tabulka 10.8: Porovnání naměřených hodnot při měření s-parametru $ S_{21} $ filtru LFCV-52+.....	114
Tabulka 10.9: Porovnání naměřených hodnot při měření s-parametru $ S_{12} $ filtru LFCV-52+.....	117
Tabulka 10.10: Porovnání naměřených hodnot při měření s-parametru $ S_{21} $ filtru LFCN-320+.....	120
Tabulka 10.11: Porovnání naměřených hodnot při měření s-parametru $ S_{12} $ filtru LFCN-320+.....	123
Tabulka 10.12: Porovnání naměřených hodnot při 5 měřeních filtru LFCV-45+.....	125
Tabulka 10.13: Porovnání naměřených hodnot při měřeních izolace portů.....	128

## Úvod

Dvojbrany a obecně n-brany jsou důležité prvky využívané v elektronice, jejich účelem je úprava elektrických signálů (například zesílení či zeslabení signálu). Pro použití n-branu je nutné znát jeho vlastnosti, ty lze odvodit z teorie pomocí parametrických metod, ale vždy je vhodné provést měření, které vlastnosti n-branu potvrdí (Bezděk 2008). Ať už se jedná o aplikace v automatizaci nebo komunikační technice či jiných, jsou klíčovými parametry n-branů amplitudový a fázový přenos v závislosti na frekvenci. Toto měření lze realizovat pomocí osciloskopu a generátoru, ale vhodnější je přístroj, který provede změření n-branu automaticky, a tím je vektorový síťový analyzátor nebo síťový analyzátor. Jelikož se zabývám návrhy a měřeními obvodů jako koníček a v laboratoři mi tento užitečný přístroj zatím chybí, rozhodl jsem se si síťový analyzátor pro měření absolutní hodnoty přenesené amplitudy v závislosti na frekvenci postavit. Dalším motivačním impulsem bylo rozšířit své znalosti a dovednosti v oblasti VF techniky, jíž jsem se začal zabývat v průběhu mého magisterského studia. Od práce jsem očekával, že získám cenného pomocníka, který mi bude nápomocen při ověřování vlastností filtrů, atenuátorů a zesilovačů. Jak bude ukázáno na následujících stránkách, myslím, že jsem s tímto úkolem uspěl.

Cílem této práce bylo navrhnout Analyzátor vybraných vlastností dvojbranu, sestavit navržený analyzátor a provést testovací měření na zvolených vzorcích pro ověření funkce zařízení, zda vyhovuje požadavkům zadání. Navržený analyzátor měří  $|S_{21}|$  parametry a také  $|S_{12}|$  s otočením měřeného prvku. Má nastavitelnou referenci výstupního signálu z vysílací části a nastavitelné atenuátory u přijímací části. Výsledný sestavený analyzátor je ovládán pomocí grafického rozhraní zobrazené na displeji a přídavné externí klávesnici. V návrhu celého zařízení je u každého bloku kladen důraz na modulárnost, aby bylo možné jednodušeji opravit část analyzátoru v případě poruchy, nebo provést výměnu části za novou v případě renovace a zlepšení parametru. Inspirací pro tuto práci byl vektorový analyzátor NanoVNA.

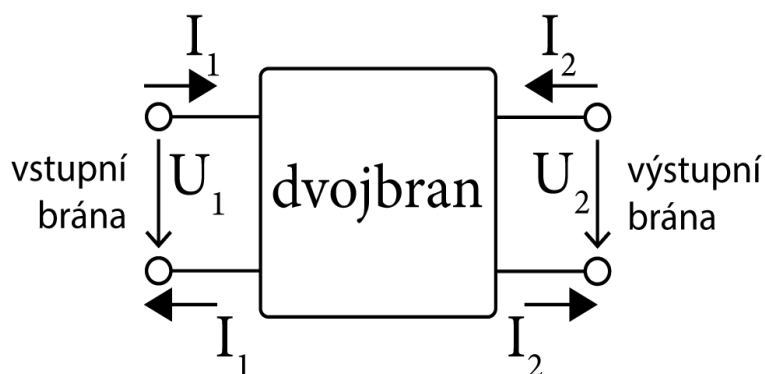
Koncept byl diskutován se školitelem a odborníky z praxe z firmy URC Systems. Získané poznatky z diskusí a odborné literatury jsou sepsány v úvodní teoretické části práce. Nejdříve byla vybraná metoda pro měření S-parametru a následně byl kladen důraz na výběr vhodných obvodových modulů pro tvorbu měřících bloků. Následně bylo navrženo řízení všech bloků pomocí Raspberry Pi, kde byl dopsán vhodný měřící program pro ovládání všech připojených bloků po USB. Návrh a oživení analyzátoru je popsáno v druhé polovině práce. V závěrečné části jsou popsány ověřovací měření a výsledky z měření zkušebních vzorků, kde bylo ověřeno, zda splňuje požadované vlastnosti na analyzátor vybraných vlastností dvojbranu.

# 1 Teoretický rozbor dvojbranu

Hlavním cílem bylo sestavit analyzátor pro měření dvojbranu, jako nejčastější případ navrhovaných modulů. V této kapitole je rozepsán krátký popis vlastností dvojbranu, jejich maticová forma a příklady některých běžně v praxi užívaných. Z vlastností popsaných v této kapitole je nadále čerpáno pro vývoj práce a je užívána jako opora při vývoji a měřeních v této práci.

## 1.1 Popis a charakteristické vlastnosti dvojbranu

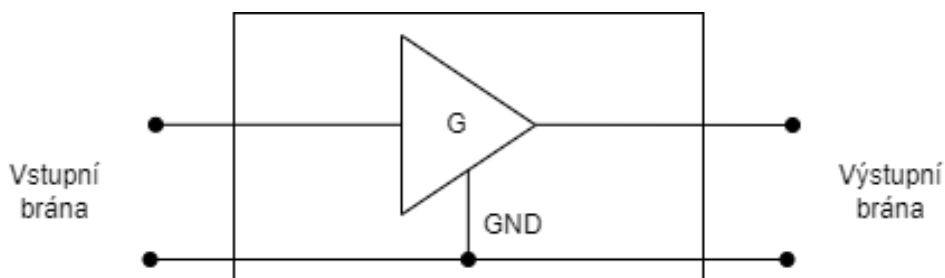
Jak se lze dočíst například v (Punčochář, 2011), dvojbran je z teorie signálů a soustav označován jako soustava. Dvojbran má vyvedeny 2x2 kusy svorek, které nazýváme bránami, bránou vstupní a bránou výstupní. Chování dvojbranu jako soustavy v elektrickém obvodu je závislé na vnitřní skladbě a zapojení. Dvojbran je tedy aktivní nebo pasivní v závislosti na skladbě prvku. Na následujícím obrázku 1.1 je vykreslena schématická podoba dvojbranu. (Brtník, 2017).



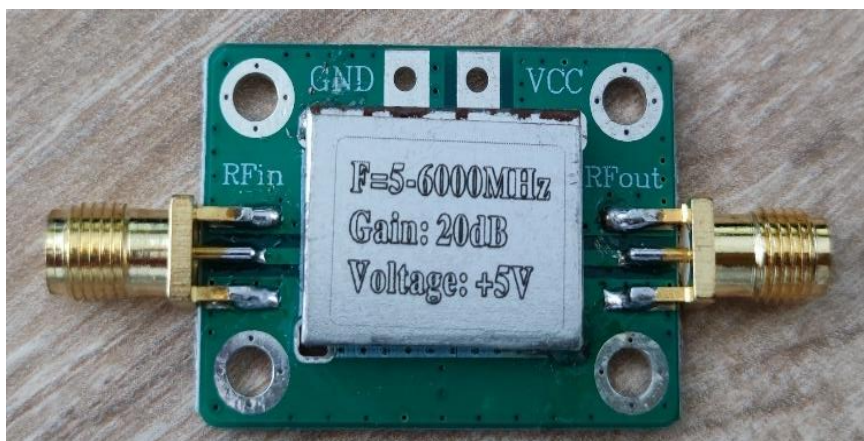
Obrázek 1.1: Schématická podoba obecného dvojbranu, překresleno z (Černík, 2019).

## 1.2 Dvojbrany s aktivními prvky

Mezi dvojbrany s aktivními prvky jsou řazeny dvojbrany s vnitřní stavbou odpovídající zdrojům nebo zesilovačům signálů. Průchod signálu přes tento dvojbran může na signál působit ztrátově, konstantě či bude signál zesílený. (Bezděk, 2008) Příklad takového dvojbranu je na obrázku 1.2. Dalším obrázkem je poté vyobrazen vybraný modul dvojbranu zesilovače signálu použitého v diplomové práci.



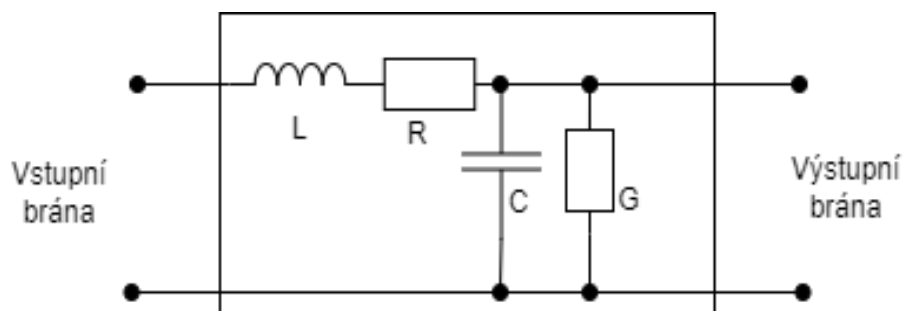
Obrázek 1.2: Schématická podoba aktivního dvojbranu jako vysokofrekvenčního zesilovacího prvku. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 1.3: Reálná podoba dvojbranu jako zesilovacího prvku. (Zdroj: Vlastní.)

### 1.3 Dvojbrany s pasivními prvky

Dvojbrany s pasivními prvky jsou dvojbrany, které mají vnitřní strukturu složenou pouze z pasivních prvků, tedy neobsahují žádný zdroj ani zesilovač. Průchod signálu přes tento druh neideálního dvojbranu je vždy ztrátový (Bezděk, 2008). Příkladem takových prvků jsou například VF kabely a vedení o zvolené impedanci na obrázku 1.4. Pro ilustraci reálné podoby z praxe slouží obrázek 1.5, použitý VF kabel v diplomové práci.

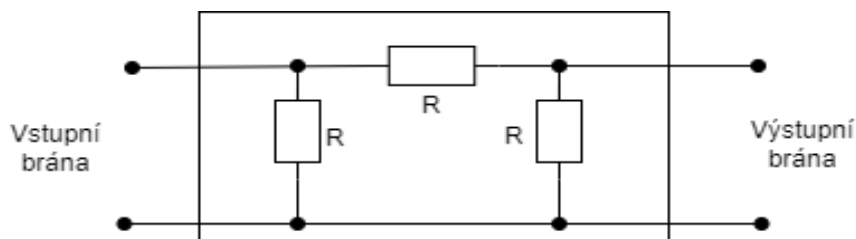


Obrázek 1.4: Schématická realizace vysokofrekvenčního vodiče, překresleno z (Brtník, 2017).



Obrázek 1.5: Reálná podoba vysokofrekvenční kabeláže pro přenos vysokofrekvenčního signálu. (Zdroj: Vlastní.)

Dalším vhodným příkladem jsou vysokofrekvenční atenuátory, které slouží k utlumení amplitudy signálu na požadovanou úroveň. Jejich provedení může být jak v obvodovém provedení z disktrétních součástí, tak elektronické či pro montáž s SMA či N přechody. Na následujícím obrázku 1.6 je vyobrazeno principiální obvodové zapojení, na obrázku 1.7 pak reálná podoba atenuátoru.

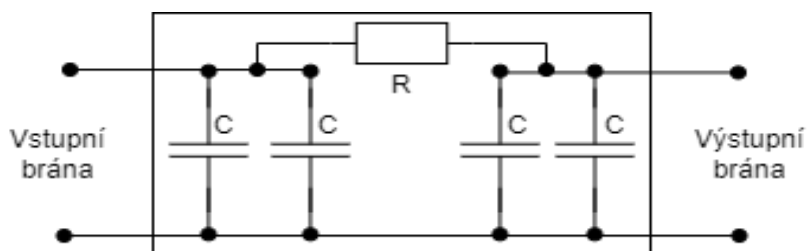


Obrázek 1.6: Schématická podoba atenuátoru realizovaného PI článkem, překresleno z (Belza, 2002).



Obrázek 1.7: Reálná podoba zakoupeného atenuátoru s SMA-SMA bránami. (Zdroj: Vlastní.)

Naposledním prvkem pasivních dvojbranů jsou filtry a vysokofrekvenční filtry složené z diskretních součástek, například v podobě složeného PI článku dle obrázku 1.8 a jeho realizovaná podoba s zapojením do obvodu přes SMA na obrázku 1.9 a 1.10.



Obrázek 1.8: Schématická realizace filtru dolní propusti diskretním PI článkem. (Zdroj: Vlastní.)



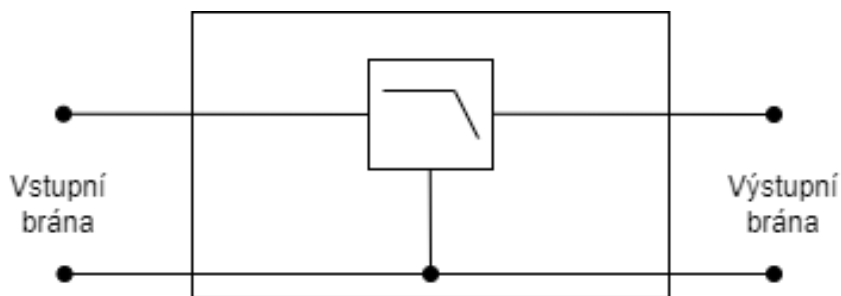
Obrázek 1.9: Podoba osazeného filtru dolní propusti s PI článkem, horní strana. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 1.10: Podoba osazeného filtru dolní propusti s PI článkem, spodní strana. (Zdroj: Vlastní.)



Posledním zde zmíněným pasivním dvojbranem je prvek s keramickým filtrem. Tento prvek má již od výroby popsané své vlastnosti v datasheetu. Vyrábí se v provedení horní propusti, dolní propusti a propusti pásmové (RF filter by Mini-Circuits, 2017). Na obrázku 1.11 je vykresleno blokové schéma při použití filtru ve dvojbranu. Na obrázku 1.12 poté reálná realizace dvojbranu s keramickým filtrem vlastní výroby. K vybraným zvoleným filtrům, které jsou měřeny v kapitole 10, jsou také dostupné podrobnosti v tištěných přílohách I, J, K.



Obrázek 1.11: Schématická podoba dvojbranu s keramickým filtrem. (Zdroj: Vlastní.)



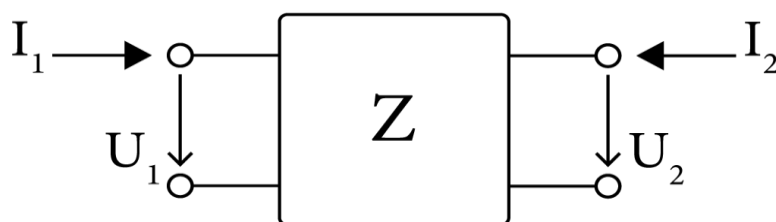
Obrázek 1.12: Reálná podoba dvojbranu s keramickým filtrem vlastní výroby. (Zdroj: Vlastní.)

## 1.4 Základní charakteristiky dvojbranu

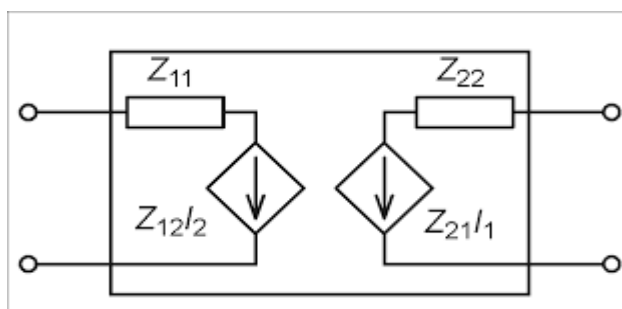
Základní charakteristika dvojbranu je popsána pomocí maticových parametru dvojbranu. Mezi charakteristiky patří Impedanční parametry (Z-parametry) popsány v kapitole 1.4.1, Admitanční parametry (Y-parametry) v kapitole 1.4.2, hybridní parametry (H-parametry) v kapitole 1.4.3, inverzně hybridní parametry (G-parametry) v kapitole 1.4.4, kaskádní parametry (A-parametry) v kapitole 1.4.5, inverzně kaskádní parametry (A-parametry) v kapitole 1.4.6 a rozptylové parametry (S-parametry) v kapitole 1.4.7 (Punčochář, 2011)

### 1.4.1 Impedanční parametry dvojbranu

Impedanční parametry dvojbranu jsou parametry pro popis impedančních vlastností dvojbranu. Hodnoty kalkulovaných parametrů jsou v ohmech. Praktické využití nachází při kalkulaci  $\pi$ -článku v zapojení jako atenuátor (Punčochář, 2011). Na obrázku 1.13 je vyobrazen náčrt dvojbranu, dále je na obrázku 1.14 vykreslena vnitřní struktura dvojbranu pro odvození rovnice 1.1 v maticovém formátu, kde parametr  $Z_{11}$  je definován jako vstupní impedance naprázdno. Pro parametr  $Z_{12}$  je definice stanovena jako přenosová impedance naprázdno. Dalším parametrem je  $Z_{21}$ , jež je definován jako přenosová impedance naprázdno a posledním parametrem  $Z_{22}$  je výstupní impedance při výstupu naprázdno (Černík, 2019).



Obrázek 1.13: Schématická a principiální podoba dvojbranu s impedančními parametry překresleno z (Brtník, 2014).

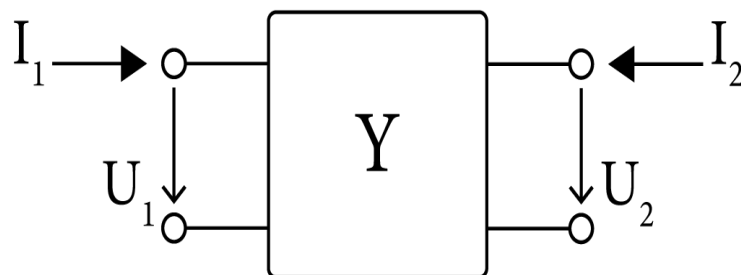


Obrázek 1.14: Principiální vnitřní zapojení dvojbranu s impedančními parametry, převzato z (Černík, 2019).

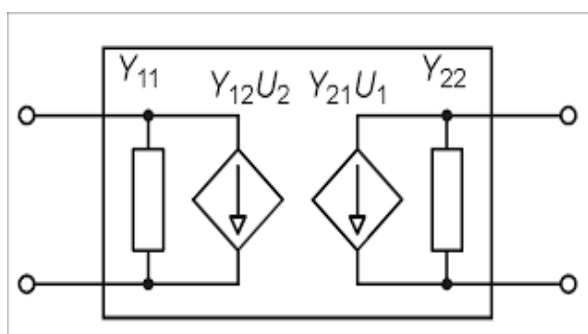
$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

### 1.4.2 Admitanční parametry dvojbranu

Admitanční parametry dvojbranu jsou parametry pro popis vodivostních vlastností dvojbranu. Hodnoty kalkulovaných parametrů jsou v siemensích. Praktické využití nachází při kalkulaci elektronických obvodů pomocí metody uzlových napětí (Brtník, 2014). Na obrázku 1.15 je vyobrazen náčrt dvojbranu, dále je na obrázku 1.16 vykreslena vnitřní struktura dvojbranu pro odvození rovnice 1.2 v maticovém formátu, kde parametr  $Y_{11}$  je definován jako vstupní admitance nakrátko. Pro parametr  $Y_{12}$  je definice stanovena jako zpětně přenosová admitance nakrátko. Dalším parametrem je  $Y_{21}$ , jež je definován jako přenosová admitance na krátko a posledním parametrem  $Y_{22}$  je výstupní admitance nakrátko (Černík, 2019).



Obrázek 1.15: Schématická a principiální podoba dvojbranu s admitančními parametry překresleno z (Brtník, 2014).

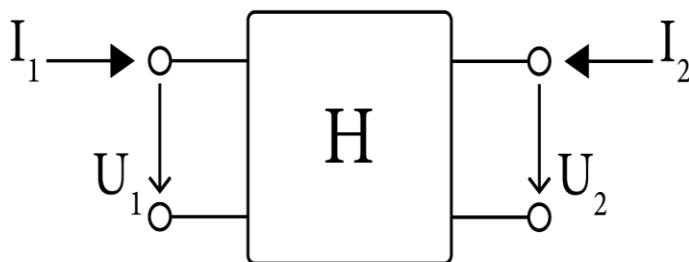


Obrázek 1.16: Principiální vnitřní zapojení dvojbranu s admitančními parametry, převzato z (Černík, 2019).

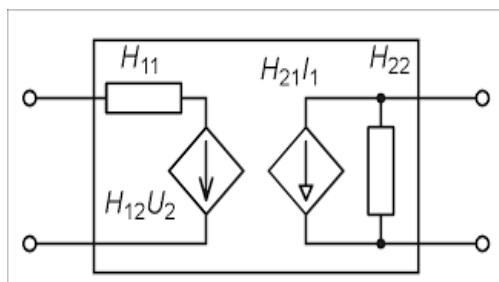
$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

### 1.4.3 Hybridní parametry dvojbranu

Hybridní parametry dvojbranu jsou parametry pro popis serio-paralelní vlastností dvojbranu. Hodnoty kalkulovaných parametrů jsou odlišné pro každý parametr. Praktické využití nachází při stanovení parametrů u bipolárního tranzistoru (Bezděk, 2008). Na obrázku 1.17 je vyobrazen náčrt dvojbranu, dále je na obrázku 1.18 vykreslena vnitřní struktura dvojbranu pro odvození rovnice 1.3 v maticovém formátu, kde parametr  $H_{11}$  je definován jako vstupní impedance nakrátko. Pro parametr  $H_{12}$  je definice stanovena jako zpětný napěťový přenos naprázdno. Dalším parametrem je  $H_{21}$ , jež je definován jako proudový přenos nakrátko a posledním parametrem  $H_{22}$  je výstupní admitance naprázdno (Černík, 2019).



Obrázek 1.17: Schématická a principiální podoba dvojbranu s hybridními parametry překresleno z (Brtník, 2014).

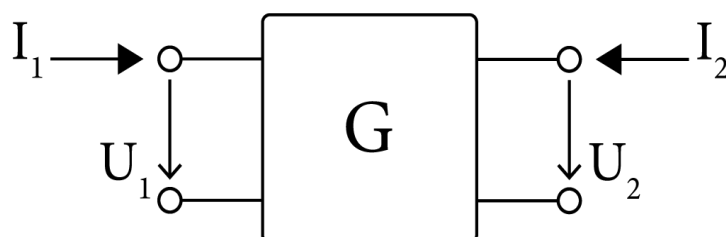


Obrázek 1.18: Principiální vnitřní zapojení dvojbranu s hybridními parametry, převzato z (Černík, 2019).

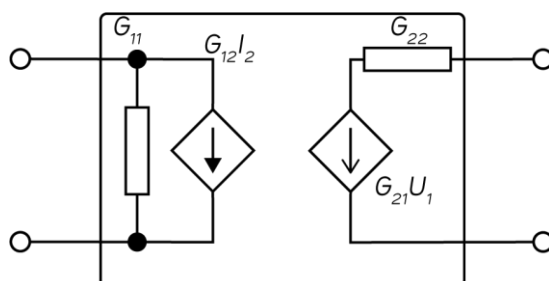
$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ U_2 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

#### 1.4.4 Inverzně hybridní parametry dvojbranu

Inverzně Hybridní parametry dvojbranu jsou parametry pro popis paralelně-sériových vlastností dvojbranu inverzních k hybridním parametrům. Hodnoty kalkulovaných parametrů jsou odlišné pro každý parametr. Praktické využití nachází například pro výpočty s napěťovým zesilovačem na výstupu, například u obvodu s tranzistorem se společnouází (Bezděk, 2008). Na obrázku 1.19 je vyobrazen náčrt dvojbranu, dále je na obrázku 1.20 vykreslena vnitřní struktura dvojbranu pro odvození rovnice 1.4 v maticovém formátu, kde parametr  $G_{11}$  je definován jako vstupní admitance při výstupu naprázdno. Pro parametr  $G_{12}$  je definice stanovena jako zpětné proudové zesílení při vstupu nakrátko. Dalším parametrem je  $G_{21}$ , jež je definován jako napěťové zesílení s výstupem naprázdno a posledním parametrem  $G_{22}$  je zpětné proudové zesílení se vstupem nakrátko (Černík, 2019).



Obrázek 1.19: Schématická a principiální podoba dvojbranu s inverzně hybridními parametry překresleno z (Černík, 2019).

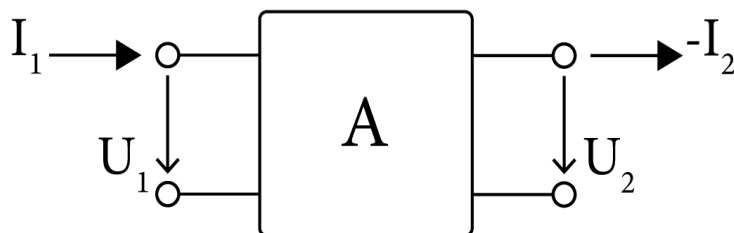


Obrázek 1.20: Principiální vnitřní zapojení dvojbranu s inverzně hybridními parametry, překresleno z (Černík, 2019).

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

### 1.4.5 Kaskádní parametry dvojbranu

Kaskádní parametry dvojbranu jsou parametry pro popis přenosových vlastností dvojbranu. Hodnoty kalkulovaných parametrů jsou pro každý parametr odlišné. Praktické využití nachází při kalkulaci kaskádního spojování dvojbranu a výpočtech přenosu elektrických filtrů (Brtník, 2014). Na obrázku 1.21 je vyobrazen náčrt dvojbranu, pro odvození rovnice 1.5 v maticovém formátu, kde parametr  $A_{11}$  je definován jako napěťový přenos při výstupu naprázdno. Pro parametr  $A_{12}$  je definice stanovena jako přenosová impedance při výstupu nakrátko. Dalším parametrem je  $A_{21}$ , jež je definován jako přenosová Admitance při vstupu naprázdno a posledním parametrem  $A_{22}$  je proudový přenos impedance při vstupu nakrátko (Černík, 2019).

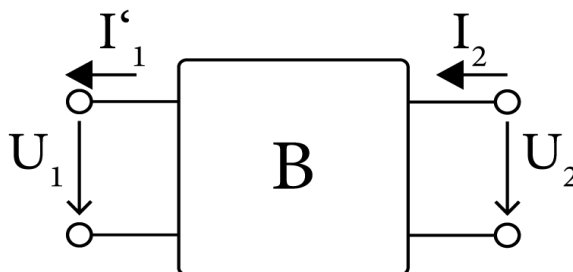


Obrázek 1.21: Schématická a principiální podoba dvojbranu s kaskádními parametry překresleno z (Brtník, 2014).

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_2 \\ -I_2 \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

### 1.4.6 Inverzně Kaskádní parametry dvojbranu

Inverzně Kaskádní parametry dvojbranu jsou parametry pro popis inverzních přenosových vlastností dvojbranu. Hodnoty kalkulovaných parametrů jsou pro každý parametr odlišné. Praktické využití nachází při kalkulaci přenosových vlastností dvojbranu z pohledu od druhé brány k první bráně (Punčochář, 2011). Na obrázku 1.22 je vyobrazen náčrt dvojbranu pro odvození rovnice 1.6 v maticovém formátu, kde parametr  $B_{11}$  je definován jako napěťové zesílení při vstupu naprázdno. Pro parametr  $B_{12}$  je definice stanovena jako proudové zesílení při vstupu nakrátko. Dalším parametrem je  $B_{21}$  jež je definován jako přenosová Admitance při vstupu naprázdno a posledním parametrem  $B_{22}$  je přenosová impedance při vstupu nakrátko (Černík, 2019).



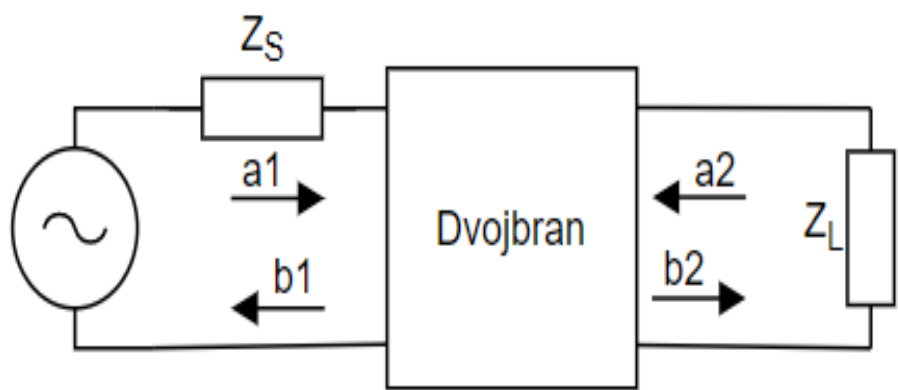
Obrázek 1.22: Schématická a principiální podoba dvojbranu s inverzně kaskádními parametry překresleno z (Brtník, 2014).

$$\begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ -I_1 \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

### 1.4.7 Rozptylové parametry dvojbranu

Rozptylové parametry, o kterých se lze dočíst například v (Procházka, 2002), jsou známé pod pojmem S-parametry. Úlohou S-parametrů je rozbor vlastností vysokofrekvenčních dvojbranu a N-branových obvodů, které již pro vysoké frekvence není možné řešit jinými předchozími kalkulačními parametry, neboť vysokofrekvenční obvody vykazují jiné chování pro různé části zkoumaného obvodu a výstupní signál z N-branu je závislý na frekvenci. Pro řešení takovýchto dvojbranu a N-branu jsou používány měření s S-parametry, kde jsou zkoumány vyslané, odražené a průchozí vlny. Pro měření S-parametrů se užívají měřicí přístroje jako jsou vektorové a síťové analyzátoři s nastavitelným impedančním přizpůsobením v závislosti na měření obvodu, pro Mikrovlnou techniku nejčastěji  $50\Omega$  a televizní pak  $75\Omega$  (Šimáček, 2015). Na obrázku 1.23 je vyobrazena obecná matice pro odvození S-parametrů libovolného N-branu. Pro využití vlastností v této práci se tato část specificky zaměřuje na S-parametry pro dvojbrany, které jsou odvozeny z následujícího obrázku 1.24. Na základě tohoto obrázku jsou pak sepsány rovnice 1.7 a 1.8 pro zobrazení S-parametrů v rovnicové a maticové podobě, z níž jsou následně odvozeny rovnice 1.9 až 1.12. Základní popis S-parametrů pro dvojbrany je následující,  $S_{11}$  odvozen jako vstupní odrazový parametr při výstupu zakončeném přizpůsobenou zátěží,  $S_{12}$  odvozen jako zpětně přenosový parametr při vstupu zakončeném přizpůsobenou zátěží,  $S_{21}$  odvozen jako přenosový parametr při výstupu zakončeném přizpůsobenou zátěží a  $S_{22}$  odvozen jako výstupní parametr při zakončení výstupu přizpůsobenou zátěží (Rejček, 2020).

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \quad (1.7)$$



Obrázek 1.23: Příklad dvojbranu pro odvození S-parametrů  $S_{11}$  až  $S_{22}$ , převzato z (Rejček, 2020).

$$\begin{aligned} b_1 &= S_{11} \cdot a_1 + S_{12} \cdot a_2 \\ b_2 &= S_{21} \cdot a_1 + S_{22} \cdot a_2 \end{aligned} \quad (1.8)$$

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad (1.10)$$

$$S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad (1.11)$$

$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad (1.12)$$

$$S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad (1.13)$$



Obrázek 1.24: Náhled na reálnou podobu vektorového analyzátoru od R&S, převzato z (Obvodove-analyzatory, 2023).

## 2 Metody pro měření amplitudových Rozptylových parametrů

V této části práce jsou rozebrány dostupné měřicí metody pro měření amplitudových rozptylových parametrů. Jsou zde zhodnoceny jednotlivé metody měření a jejich kladné i záporné stránky. S ohledem na požadavky zadání a studentské výrobní možnosti je poté provedeno krátké zhodnocení vhodnosti metody pro uplatnění metody v návrhu dané práce. Následně se v dalších kapitolách bude práce zabírat již jen vybraným způsobem měřicí metody uplatněným při konstrukci a funkčním měření.

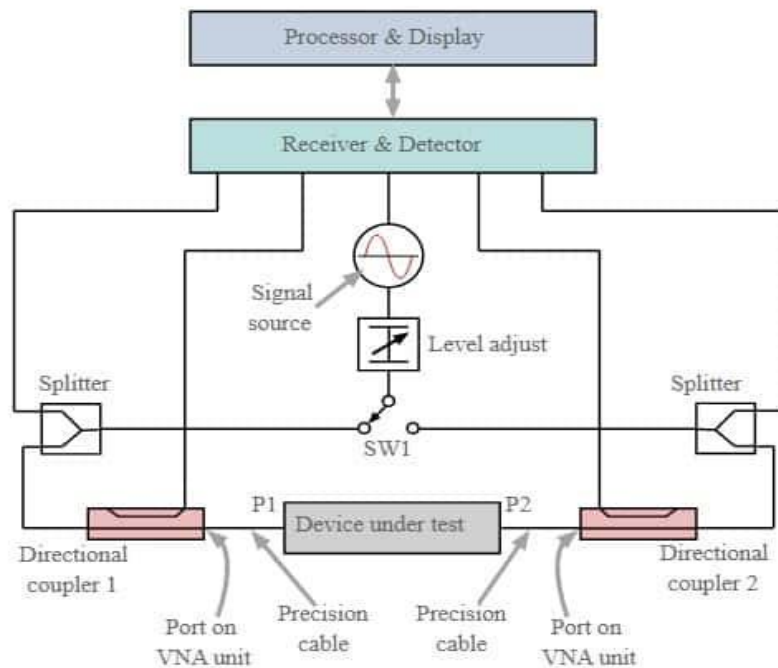
### 2.1 Měření Vektorovým analyzátozem

První měřicí metoda pro měření rozptylových parametrů je pomocí přístrojů vektorového analyzátoru. Na obrázku 2.1 je zachycena podoba vektorového analyzátoru a princip měřicího pracoviště. (Procházka, 2002) Princip funkce je vyobrazen obrázkem 2.2. kde port č.1 slouží jako vysílací port a port č.2 slouží jako port přijímací. Profesionální zařízení jsou schopná pomocí vysokofrekvenčních přepínačů funkce portu prohodit. Vysílač vysílá CW vlnu signálu, častěji ale krátký impulz skrz měřicí odbočnici do výstupního konektoru portu č.1 z kterého jde vysokofrekvenčním kalibrovaným měřicím kabelem signál do dvojbranu či jiného DUT prvku, kde DUT značí Device Under Test neboli testovaný prvek. Vyslaná vlna se rozdělí na 2 části, na vlnu průchozí, která je označovaná jako S21 a na vlnu odraženou, která je označována jako S11. Odražená vlna je měřena na vstupní měřicí odbočnici u vysílače. Průchozí vlna přichází DUT prvkem a pokračuje k měřicímu portu č.2, kde je vlna změřena a zpracována přijímačem. (Procházka, 2002) Výhodou této metody měření je fakt, že tyto přístroje jsou přímo určeny k měření rozptylových parametrů. Dále pak že umožňují měřit kromě amplitudových vlastností také fázové vlastnosti zkoumaných prvků. Značnou nevýhodou je cena zařízení, která bývá velmi vysoká v závislosti na provedení, maximální dosažené frekvence přijímače a vysílače, počtem kanálů. Případná stavba vektorového analyzátoru by vyžadovala kvalitně frekvenčně a amplitudově stabilní vysílač a vícekanálový přijímač pro příjem a analýzu měřicích odbočnic, dále ochranné atenuační prvky. Tato metoda je tedy vyloučena z finančních a časových důvodů. (Baby, 2022)



Obrázek 2.1: Příklad měřicího pracoviště pro měření S-parametrů vektorovým analyzátozem, převzato z (Baby, 2022).

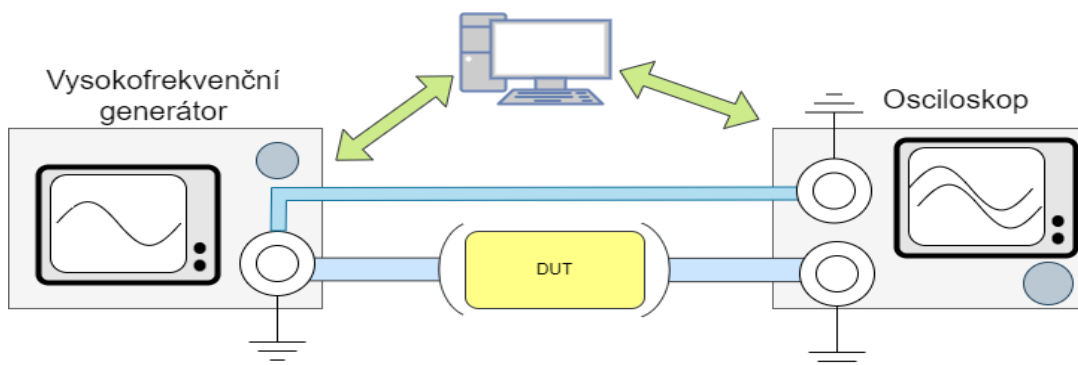




Obrázek 2.2: Principiální schématické zapojení vektorového analyzátoru, převzato ze (Baby, 2022).

## 2.2 Automatizované měření VF generátorem a osciloskopem

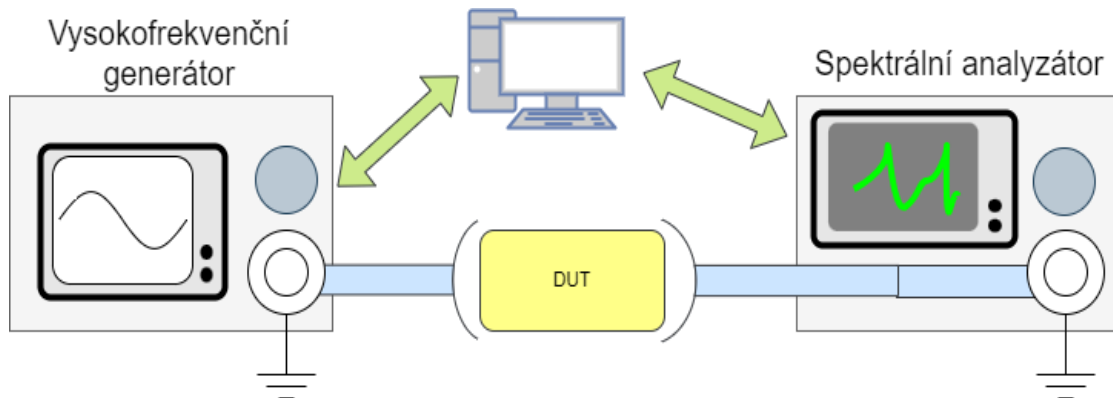
Měření s VF Generátorem a osciloskopem je laboratorní metoda užívaná v nízkofrekvenční technice, kterou je ale možné aplikovat i pro techniku vysokofrekvenční s použitím vysokofrekvenčního generátoru a osciloskopu s dostatečně rychlým vzorkováním. Měřící pracoviště, které se nabízí pro realizaci, je na následujícím obrázku 2.3. Generátor vysílá referenční signál o nastavené úrovni a přes rozbočení jej snímá osciloskop na kanálu 1. Druhým vývodem rozbočení je referenční signál vysílán skrz DUT, kterým prochází a je veden až k osciloskopu do kanálu 2. Matematickým porovnáním obou signálů je možné srovnat rozdíl amplitudy signálů a zároveň porovnat fázové přenosové vlastnosti. Velkou nevýhodou této metody je však nutnost vlastnit vhodný osciloskop, případně velmi rychlý AD převodník, kterým by bylo možné vzorkovat signál i pro GHz průběhy. Tato metoda je pro její nevýhody tedy vyloučena. (Rejfeč, 2020)



Obrázek 2.3: Grafické zobrazení měřicího pracoviště použitého pro tento druh měření. (Zdroj: Vlastní.)

### 2.3 Automatizované měření VF generátorem a spektrálním analyzátozem

Další nabízená metoda pro měření rozptylových parametrů je vyobrazena na obrázku 2.4 s použitím automatizovaného měření s více měřicími přístroji, zde konkrétně s kalibračním generátorem vysokofrekvenčních signálů a spektrálním analyzátozem. Přístroje jsou propojeny po síti s počítačem a k ovládní využívají komunikaci přes SCPI povely. (Baby, 2023b) Princip metody je založen na sekvenčním měření, kde generátor nastaví požadovanou frekvenci a amplitudu signálu, následně povolí výstup z generátoru do polohy vysílání. Signál prochází přes známé kalibrované vysokofrekvenční kabely do DUT, následně poté prochází do spektrálního analyzátozu, který odečte na nastavné frekvenci přijatou amplitudu signálu. Následně je možné pouhým SW výpočtem dle rovnice 2.1 dopočítat rozdíl amplitudy signálu mezi amplitudou nastavenou na generátoru a přijatou na spektrálním analyzátozu se započtením parametrů kalibrovaných kabelů pro nastavenou frekvenci. Výhodou této metody je použití dostupných přístrojů, pokud není dostupný vektorový analyzátoz. Další možnou výhodou je možná záměna spektrálního analyzátozu za programovatelné SDR za cenu menší citlivosti, ale větší dostupnosti levných SDR. Mezi nevýhody řadíme vysoké pořizovací náklady spektrálního analyzátozu a přesného kalibračního vysokofrekvenčního generátoru, který nedokáže zaručit počáteční fázi, proto není možné měřit fázové S-parametry. Tato metoda je tedy vyloučena z finančních a časových důvodu. (Baby, 2023a)



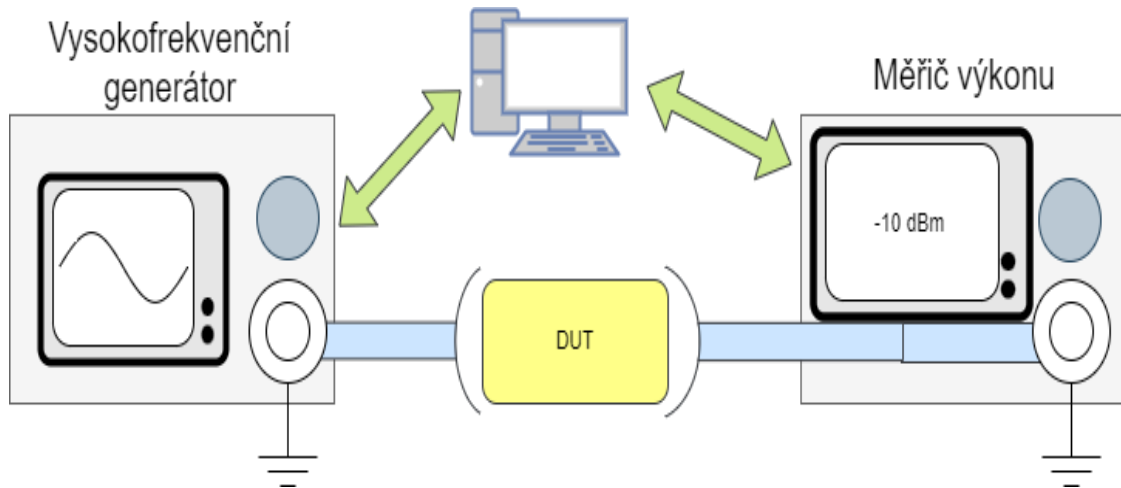
Obrázek 2.4: Grafické zobrazení měřicího pracoviště použitého pro tento druh měření. (Zdroj: Vlastní.)

$$P_{lossDUT}(f) = P_{gen}(f) - P_{spect}(f) \quad (2.1)$$

### 2.4 Automatizované měření VF generátorem a měřičem výkonu

Poslední nabízená metoda pro měření rozptylových parametru je vyobrazena na obrázku 2.5 s použitím automatizovaného měření s více měřicími přístroji, zde konkrétně s kalibrovaným generátorem vysokofrekvenčních signálů a měřičem výkonu (Power-Meter), dostupným z obrázku 2.6. Přístroje jsou propojeny po síti s počítačem a k ovládní využívají komunikaci přes SCPI povely. (Power Measurements, 2000) Princip metody je založen na sekvenčním měření, kde generátor nastaví požadovanou frekvenci

a amplitudu signálu, následně povolí výstup z generátoru do polohy vysílání. Signál prochází skrze známé kalibrované vysokofrekvenční kabely do DUT, následně pak prochází do měřiče výkonu, který odečte na nastavné frekvenci přijatou amplitudu signálu. Následně je možné pouhým SW výpočtem dle rovnice 2.2 dopočítat rozdíl amplitudy signálu mezi amplitudou nastavenou na generátoru a přijatou měřičem výkonu se započtením parametru kalibrovaných kabelů pro nastavenou frekvenci. Výhodou této metody je použití dostupných přístrojů, pokud není dostupný vektorový analyzátor ani spektrální analyzátor či SDR. (Baby, 2023b). Další možnou výhodou je možná záměna měřiče výkonu za detektor výkonu, který je cenově dostupnější než laboratorní měřicí přístroje i SDR. Jeho výhodou spočívá ve velkém rozsahu citlivosti pro vysoké i pro nízké úrovně signálu. Mezi nevýhody řadíme vysoké pořizovací náklady měřiče výkonu. Další nevýhodou je nemožnost měřit fázové S-parametry prvku DUT. Tato metoda byla vybrána s ohledem na cenovou dostupnost vysokofrekvenčního detektoru výkonu i pro možnost použití kalibrovaného syntetizátoru signálu jako cenově dostupného vysílacího generátoru. (Baby, 2023a)



Obrázek 2.5: Grafické zobrazení měřicího pracoviště použitého pro tento druh měření. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 2.6: Příklad použitého měřiče výkonu, převzato ze (Power Measurements, 2000).

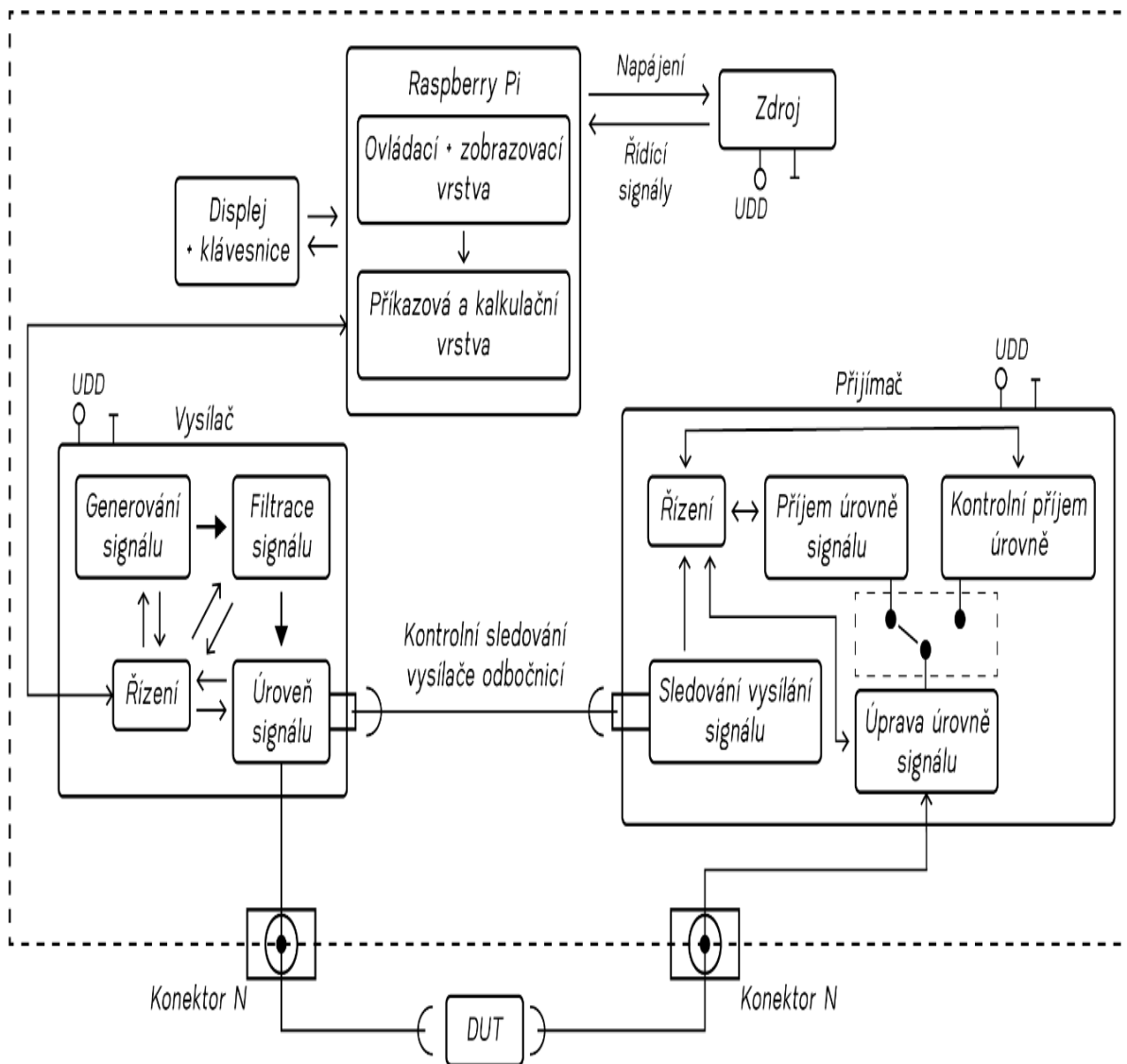
$$P_{lossDUT}(f) = P_{gen}(f) - P_{P-meter}(f) \quad (2.2)$$

### 3 Výběr metody pro vlastní řešení

V této kapitole je rozebrán návrh vlastního řešení diplomové práce. V následujících kapitolách budou rozebrány jednotlivé části, ze kterých se prototyp zařízení skládá. Základní principy, které posloužily jako koncept pro tvorbu diplomové práce, jsou rozebrány v této kapitole. Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, práce se nadále bude ubírat řešením měřicí metody s použitím vysokofrekvenčního signálového detektoru a vysokofrekvenčního syntetizátoru signálu.

#### 3.1 Koncept navrženého zařízení

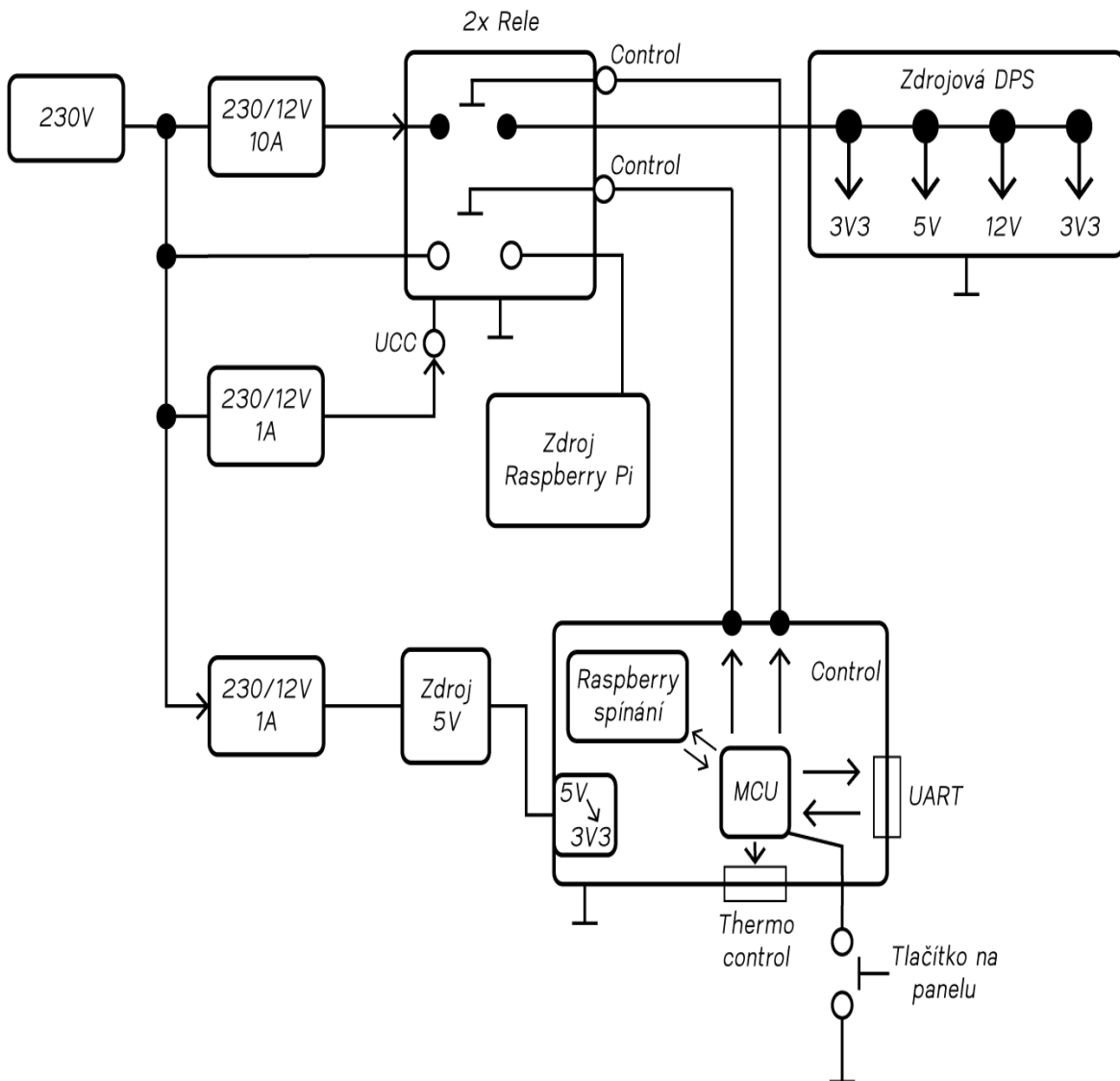
Navrhované vlastní řešení diplomové práce bylo konzultováno s odborníky z praxe. Na základě jejich odborných doporučení bylo zvoleno modulární řešení práce i s ohledem na současnou probíhající krizi nedostatku polovodičů. Z tohoto důvodu bylo nutné zvážit cenu a dostupnost daných součástek a zvolit cenově dostupné součástky, případně celé moduly. Práce byla rozdělena do 4 velkých funkčních celků. Jednotlivé funkční celky jsou rozděleny do samostatných funkčních modulů, s ohledem na budoucí plánované vylepšení zařízení, nebo případnou opravu zařízení formou výměny modulu. Princip užití funkčních výměnných modulů je běžným řešením i pro zařízení v technické v praxi. Na následujícím obrázku 3.1 je vyobrazena podoba konceptu navrhovaného zařízení ve finální podobě. V případě, že dojde k budoucímu vylepšení parametrů zařízení, bude požadovaná změna vyžadovat pouze výměnu některých modulů, případně nákup kvalitnějších vysokofrekvenčních signálových vodičů. Blok napájecího zdroje bude sloužit k napájení všech požadovaných částí, bude mít režim stand-by pro zapínání a vypínání zařízení a Raspberry Pi. Dále je zařízení složeno ze 2 samostatných funkčních bloků, blok přijímače a blok vysílače. Blok vysílače je složen z modulů zajišťujících generování, filtraci a zesílení/zeslabení signálu. Blok přijímače je složen z modulu zajišťujících zeslabení/zesílení přijatého signálu, ochranným měřením vstupu síly signálu na vstupu, kontrolním měřením, zda vysílač vysílá signál a měřením úrovně přijatého signálu. Oba bloky jsou řízeny přes USB komunikaci s řídicí částí Raspberry Pi. Řídicí část s Raspberry Pi slouží jako hlavní řídicí prvek a zobrazovač naměřených výsledků. Zařízení je řízeno ze SW v Raspberry Pi přes GUI uživatelem. Jednotlivé funkční celky zde budou principiálně rozebrány v následujících samostatných kapitolách. Sestavené zařízení je k nahlédnutí v tištěné příloze diplomové práce označené N.



Obrázek 3.1: Náhled na blokové schéma kompletního zařízení. (Zdroj: Vlastní.)

### 3.2 Navržený blok napájení

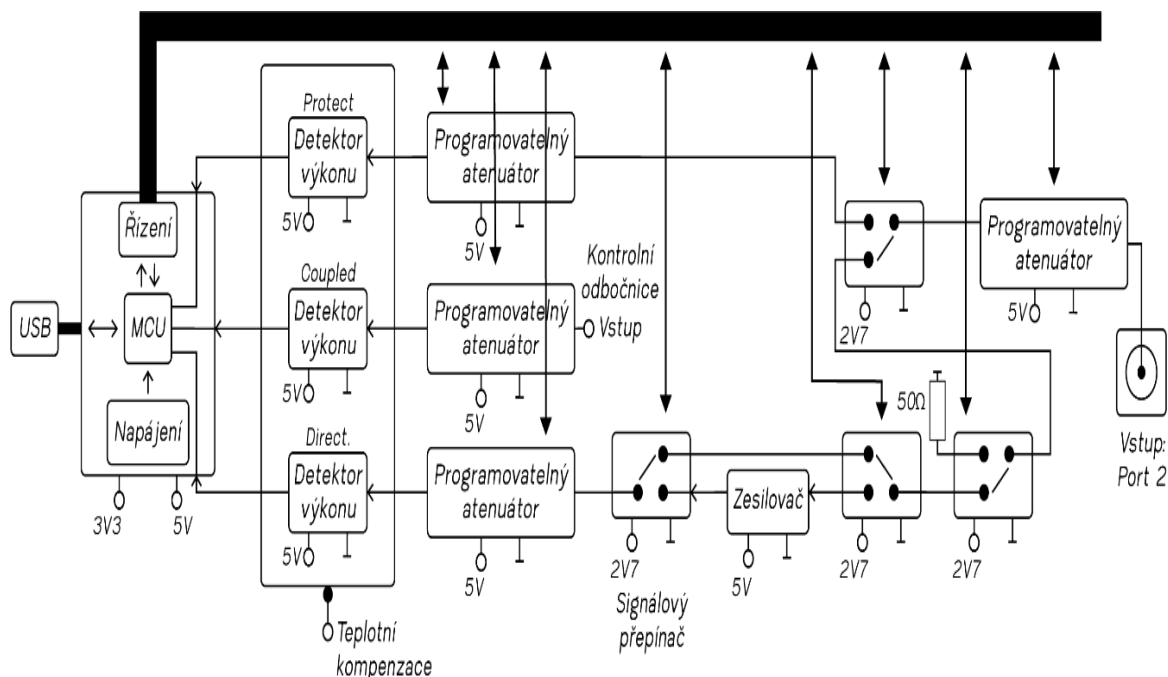
Napájecí část byla konstruovaná s ohledem na modulárnost a bezpečné zapínání a vypínání Raspberry Pi, aby nedocházelo k poškození jeho dat, která byla však z důvodu bezpečnosti zabezpečena uzamčením SD karty. V poslední řadě bylo nutné konstrukci zaměřit na dostupné materiální a finanční zdroje. Navržené blokové schéma napájecí části je na obrázku 3.2. Základní částí jsou 3 průmyslové napájecí zdroje, kde nejsilnější slouží k napájení všech modulů ve funkčních blocích zařízení. Dva podpůrné zdroje, kde jeden je navržený pro zajištění napájení spínací části spouštějící napájení do zařízení po přechodu ze Stand-by do funkčního měřicího stavu, druhým je zajištěno napájení malého procesoru zajišťujícího řízení Stand-by, které je řízeno spínáním tlačítka na panelu. Dále pak MCU zajišťuje komunikaci pro vypínání a zapínání s Raspberry Pi a řízení teplotní kompenzace pro přijímací část. Hlavní zdroj je po sepnutí spínacího relé při přechodu ze Stand-by do měřicího režimu rozveden do DPS zajišťující napájecí úroveň pro všechny moduly.



Obrázek 3.2: Náhled na blokové schéma zapojení bloku napájení. (Zdroj: Vlastní.)

### 3.3 Příjímá blok pro analyzátor

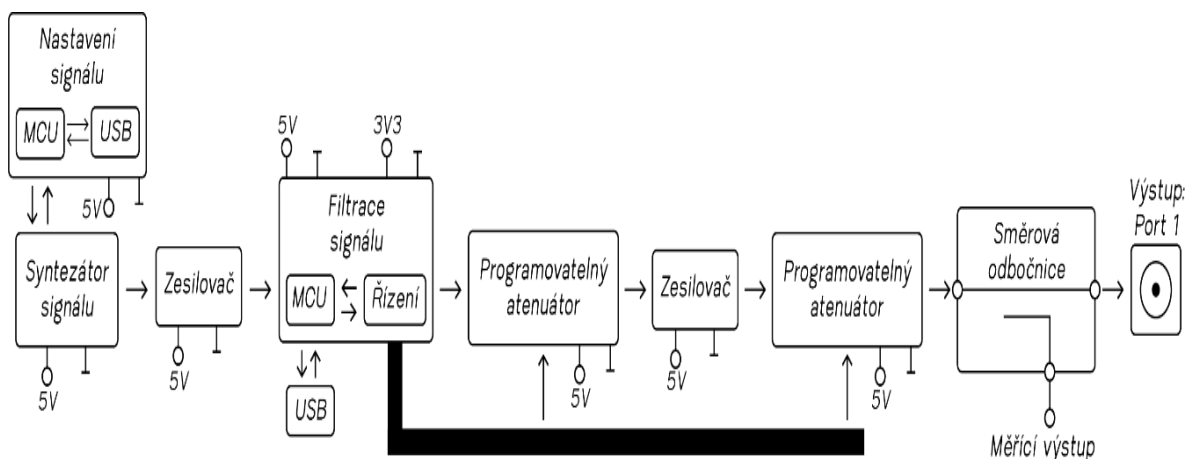
Příjímá část je samostatným funkčním blokem. Hlavní částí je řídicí DPS s MCU, která ovládá všechny signály pro řízení vysokofrekvenční signálové cesty. Dále komunikuje s řídicí částí, kde dle jejich povelu nastavuje své chování a odesílá výsledek měření pro vykreslení na zobrazovač. Princip funkce tohoto bloku je následující. Vstupní signál je přiveden skrz N konektor do vstupního atenuátoru, kde je zeslaben, dále je změřen ochranným měřením vstupu. Dále je provedeno kontrolní měření, zda vysílač opravdu vysílá signál odečtením úrovně signálu na měřící odbočnici. Pokud úroveň vyhovuje a signál není silný natolik, že by zařízení zničil, je vstupní atenuátor přenastaven na požadovanou úroveň a signál prochází dle nastavení hlavní měřící cesty přes další spínače, kde je buď zesílen nebo zeslaben až do měřícího detektoru výkonu, kde je úroveň signálu změřena a odeslána přes USB na zobrazovač. Na následujícím obrázku 3.3, je vyobrazeno blokové schéma desky zesilovače signálu.



Obrázek 3.3: Náhled na blokové schéma bloku přijímací části zařízení. (Zdroj: Vlastní.)

### 3.4 Vysílací blok pro analyzátor

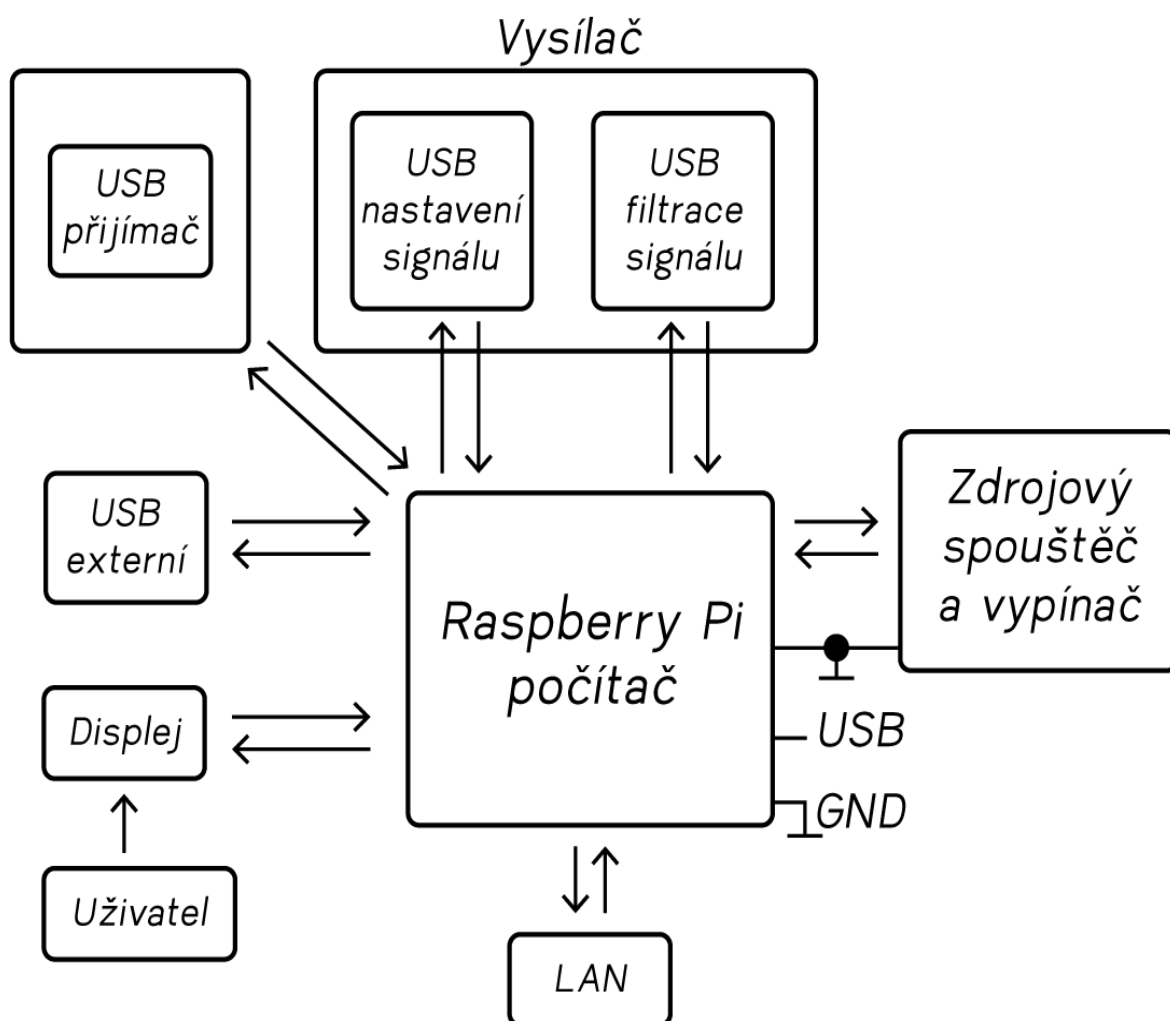
Vysílací část je samostatným funkčním blokem, který je složen z několika modulárních částí. První část generuje signál pomocí syntezátoru signálu, kde je řídicím programovacím prvkem nastavena frekvence a dostupná úroveň signálu syntezátoru. Tato část je řízena elektronicky přes USB. Následně je signál, pokud je to vhodné, zesílen přes vysokofrekvenční zesilovač a prochází do modulu filtrace, kde signál prochází soustavou dolních propustí pro filtraci harmonických složek, následně filtrovaný signál prochází skrze programovatelný atenuátor, vysokofrekvenční zesilovač a programovatelný atenuátor, kde je nastavena výsledná úroveň výstupního signálu. Následně signál prochází měřicí odbočnicí až na konektor N. Tato část je řízena elektronicky přes USB. Blokové schéma navrhované části je vykresleno na obrázku 3.4.



Obrázek 3.4: Náhled na blokové schéma bloku vysílací části zařízení. (Zdroj: Vlastní.)

### 3.5 Koncept řízení analyzátoru

Jako ovládací prvek celého zařízení bylo zvoleno Raspberry Pi 4B pro vhodné využití jeho vlastností. Pro realizaci byla využita schopnost fungování jako uživatelsky přívětivého počítače s možností připojení k Ethernetu a jednoduchému připojení všech modulů přes USB. Další jeho nespornou výhodou byla možnost připojení externí klávesnice a monitoru či dotykového displeje pro ovládání zařízení. Díky použití operačního systému je možné provést jednoduchou instalaci jazyka Python a využití jeho knihoven pro ovládání připojených částí přes USB. Následně je možné pro ovládání celého zařízení zvolit užití grafického uživatelského rozhraní (GUI). Na následujícím obrázku 3.5 je vyobrazena podoba blokového schéma konceptu řídicí ovládací části. Řídicí SW bude napsán v jazyku Python pro využití knihovny PyVisa, která umožňuje jednoduše ovládat přístroje a libovolné DPS s upraveným rozhraním k této knihovně pomocí SCPI Příkazu. K Raspberry Pi tak budou bloky propojeny pomocí USB s komunikací využívající této knihovny. Dalším využitím Pythonu je použití knihovny Matplotlib a pyQT5 pro vykreslení grafických výsledků na displej a pro tvorbu GUI. Posledním prvkem je propojení řídicích signálů mezi Raspberry Pi a zdrojem, které budou zajišťovat bezpečné zapínání a vypínání zařízení.



Obrázek 3.5: Náhled na blokové schéma bloku řídicí části zařízení. (Zdroj: Vlastní.)



## 4 Popis komerčních modulů využitých v analyzátoru

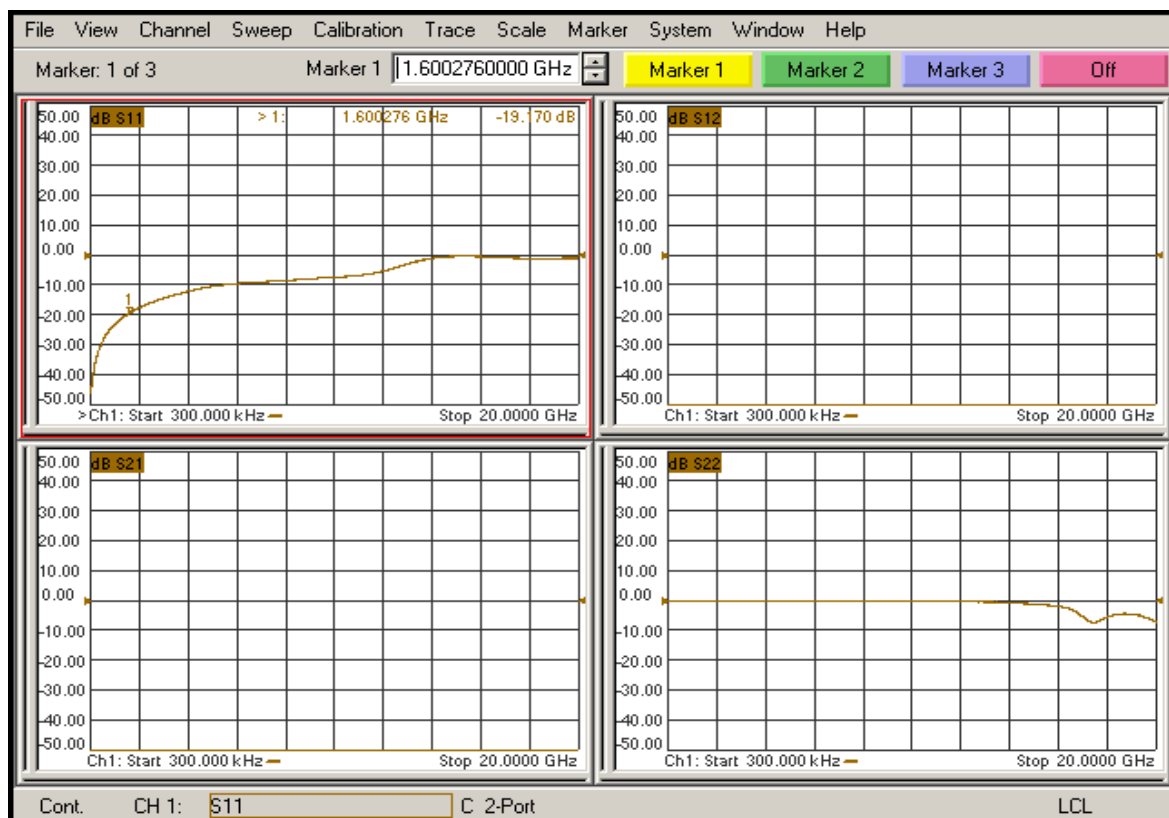
Jelikož při výrobě analyzátoru byly použity i některé komerční moduly, bylo třeba provést ověření jejich vlastností. V kapitole jsou popsány využití komerční moduly a vedení a ověření jejich vlastností, aby bylo zřejmé, jaké vlastnosti do signálové cesty vnesou.

### 4.1 Ověření zakončovací impedancí

Pro zakončení několika částí signálové trasy byly nakoupeny a zvoleny  $50\ \Omega$  zakončovací impedance ve šroubovacím provedení na SMA. Na následujícím obrázku 4.1 je vykreslena podoba nakoupených zakončovací impedancí, dále je zde na obrázku 4.2 vykresleno provedené měření přizpůsobení.



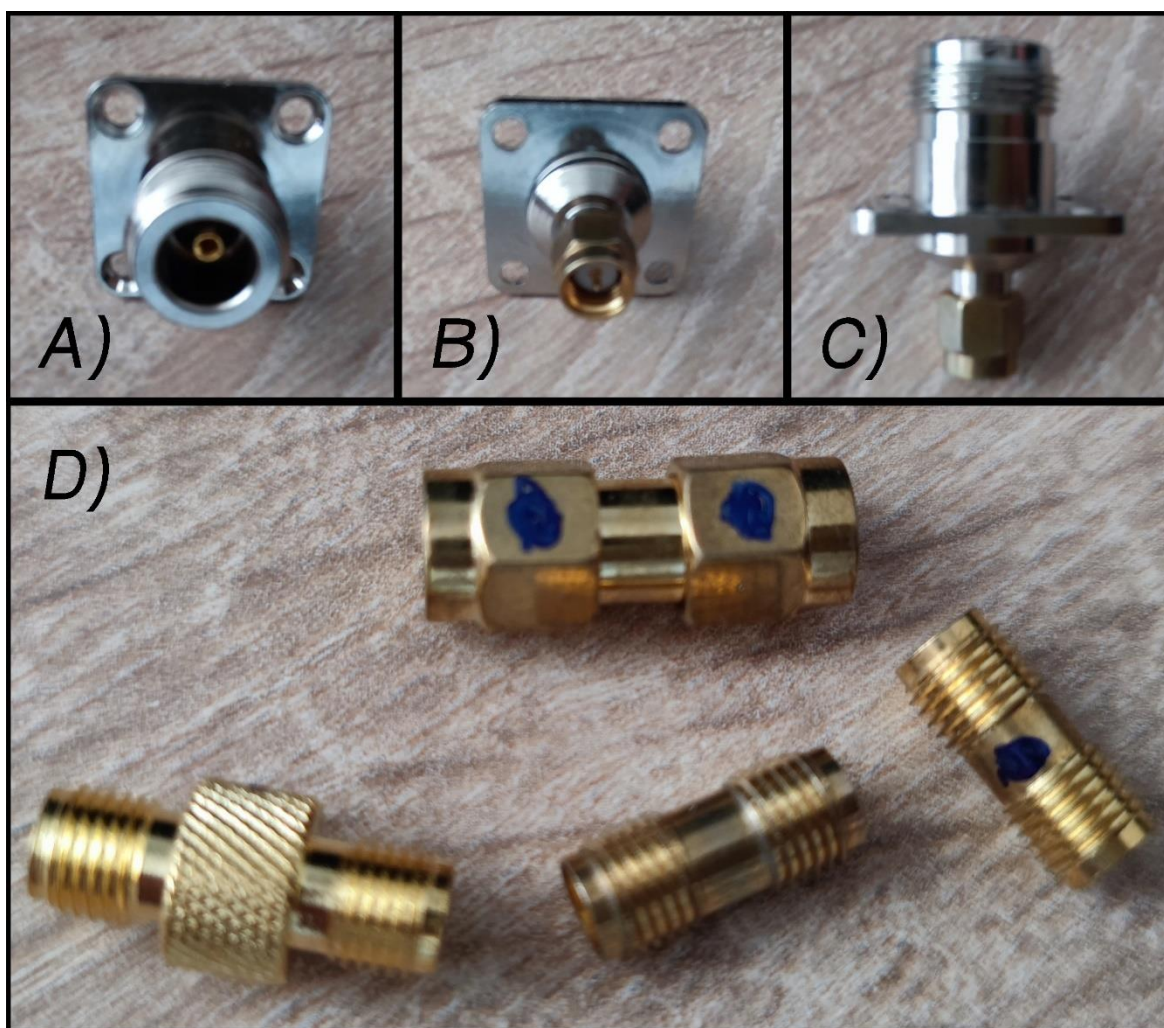
Obrázek 4.1: Náhled na použité zakončovací impedance  $50\ \Omega$  v provedení SMA. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 4.2: Měření zakončovací impedancí, převzato z (Kopecký, 2021).

## 4.2 Výběr použitých spojek propojovacích kabelů

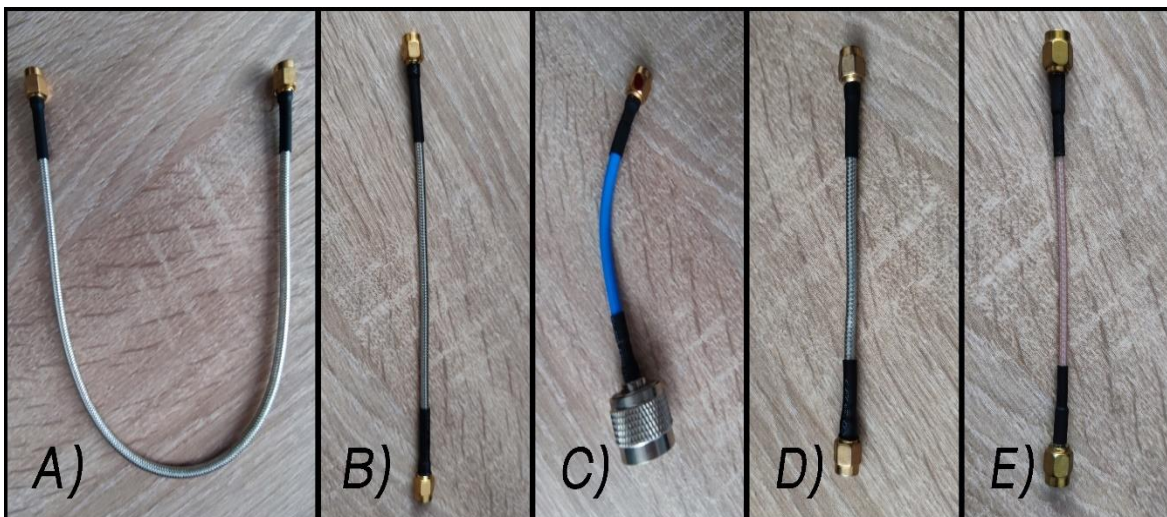
V rámci řešení signálové cesty bylo nutné zvolit vhodné propojovací spojky pro řešení přechodu mezi kabely i pro přechody mezi deskami a na výstup ze zařízení. Z důvodu finanční výhodnosti byly zvoleny spojky na obrázku 4.3-D), pro výstup ze zařízení byl zvolen přechod SMA-N, vykreslen na obrázcích 4.3-A až 4.3-C, který umožňuje na výstupní konektor připojit větší portfolio měřících kabelů.



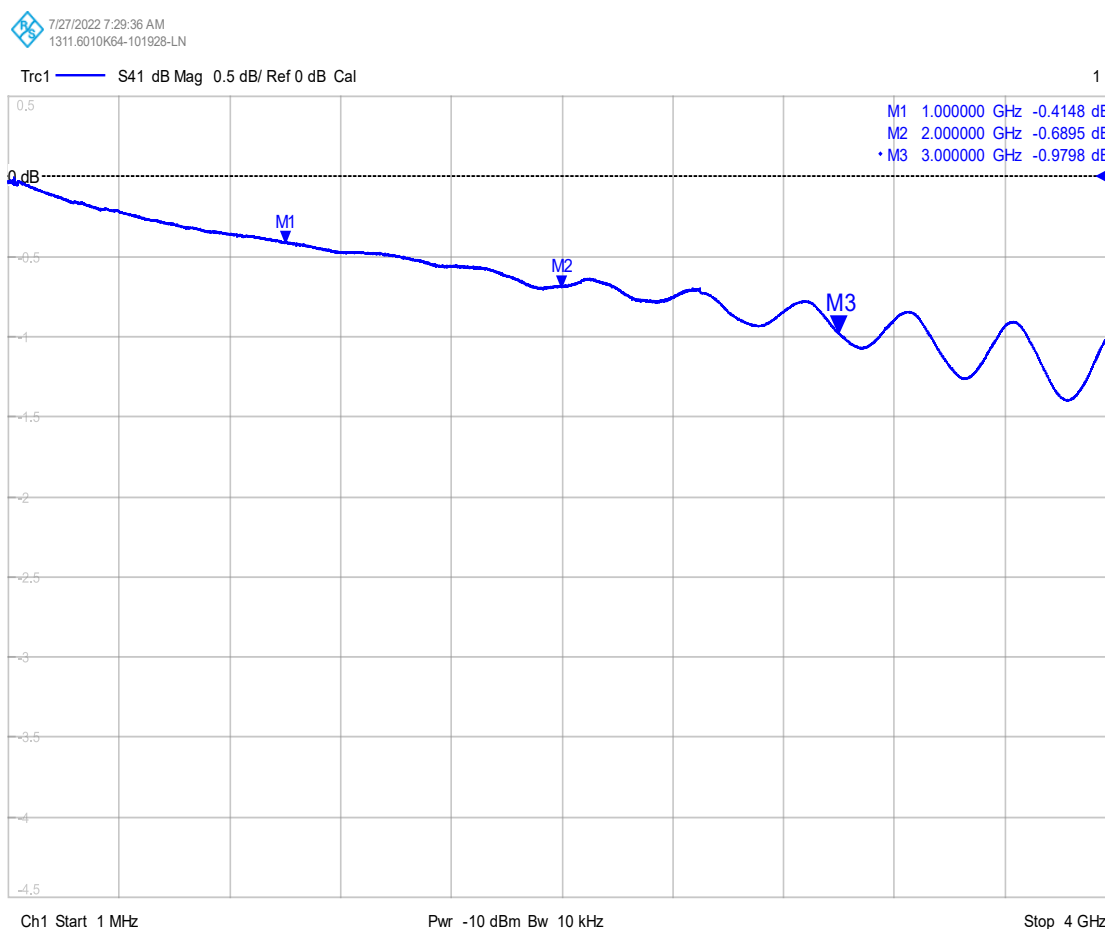
Obrázek 4.3: Náhled na vybrané vysokofrekvenční spojovací prvky, A) vybraný přechod typu N-SMA, přední strana; B) vybraný přechod typu N-SMA, zadní strana; C) vybraný přechod typu N-SMA, horní pohled; D) vysokofrekvenční spojky pro realizaci zařízení. (Zdroj: Vlastní.)

## 4.3 Ověření parametrů propojovacích kabelů

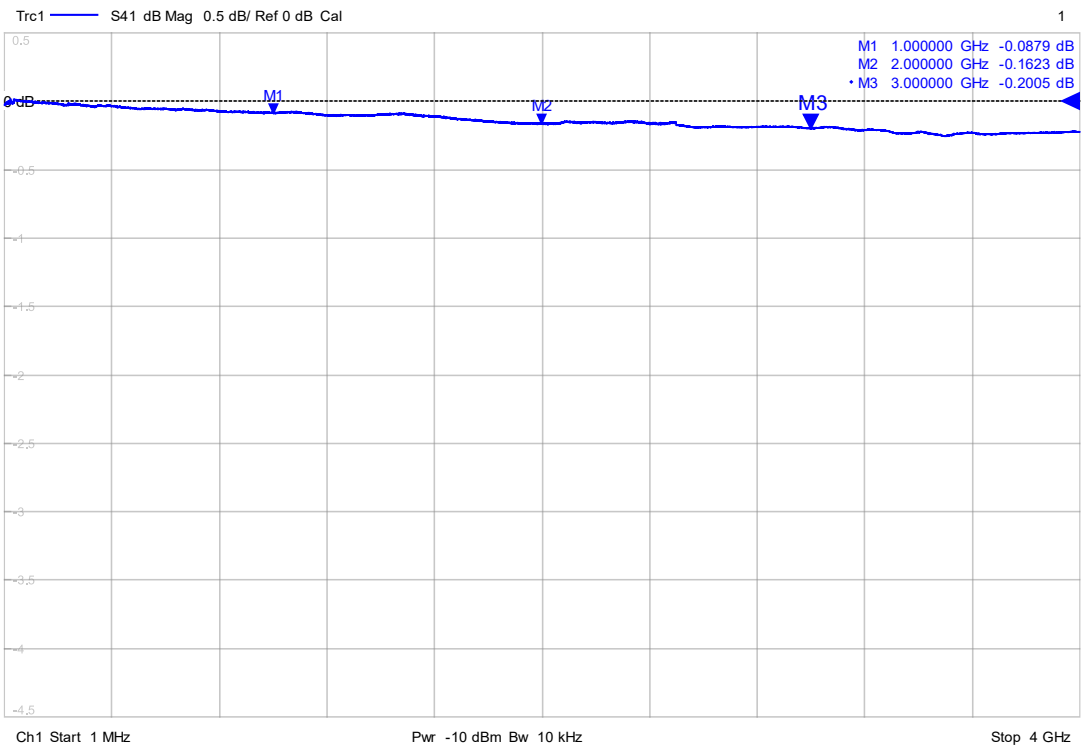
Při řešení signálové cesty bylo nutné zvolit propojovací kabely, které propojují všechny signálové cesty mezi všemi moduly a vedou do vstupního či výstupního konektoru. Z důvodu finanční výhodnosti byly vybrány signálové kabely SMA-SMA RG316 z obrázku 4.4-E) a semi-rigid SMA-SMA RG402 vyobrazeny na obrázcích 4.4-A), 4.4-B), 4.4-D). Pro napojení kabelu na konektor byl zvolen semi-flexibilní N-SMA RG402 vyobrazen na obrázku 4.4-C). Měření těchto kabelů je dostupné z obrázku 4.5 až 4.7.



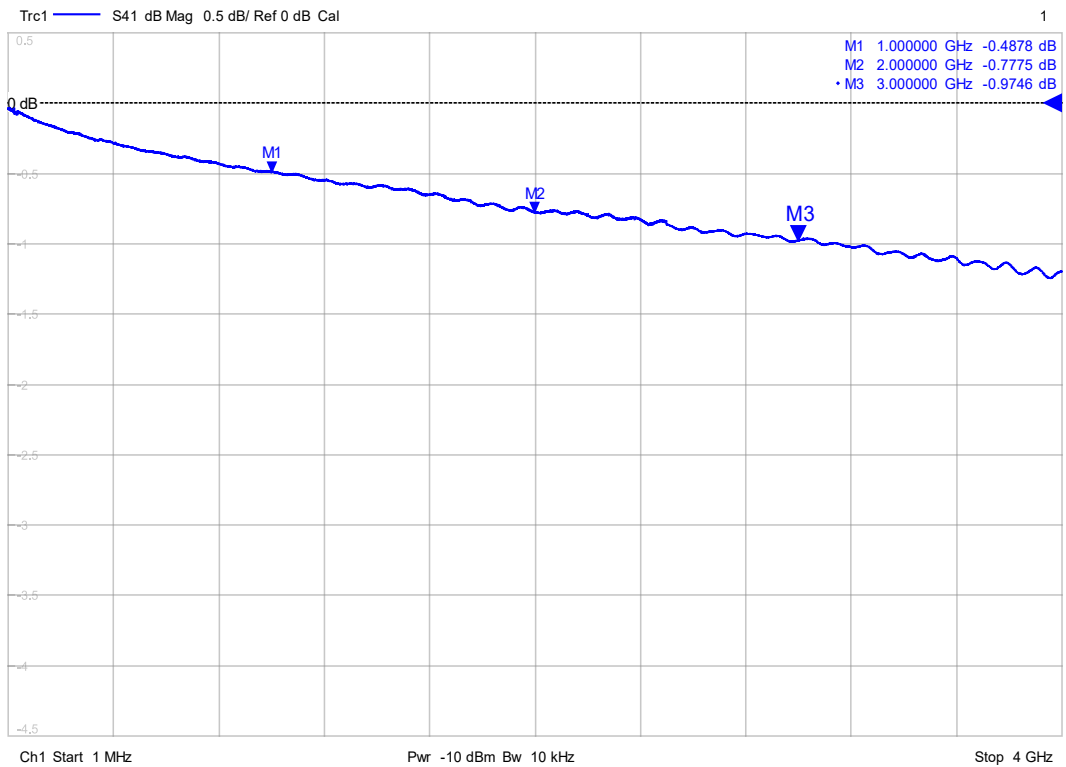
**Obrázek 4.4:** Náhled na použité vysokofrekvenční kabely: A) semi-rigid kabel SMA-SMA RG402 – dlouhý; B) semi-rigid kabel SMA-SMA RG402 – střední; C) semi-flexibilní měřicí kabel SMA-SMA RG402.; D) semi-rigid kabel SMA-SMA RG402 – krátký; E) flexibilní kabel SMA-SMA RG316. (Zdroj: Vlastní.)



**Obrázek 4.5:** Náhled na změřený přenos pro flexibilní kabel SMA-SMA RG316. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 4.6: Náhled na změřený přenos pro semi-rigid kabel SMA-SMA RG402. (Zdroj: Vlastní.)



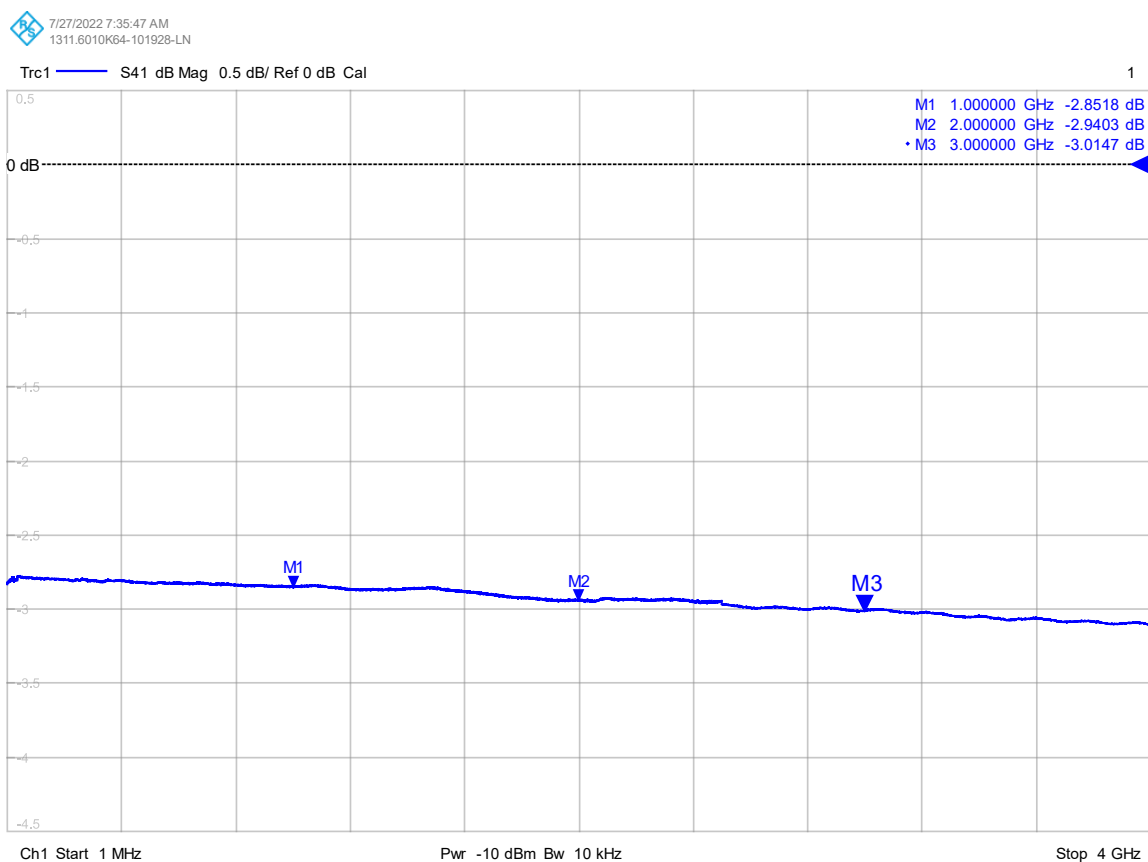
Obrázek 4.7: Náhled na změřený přenos pro semi-flexibilní měřicí kabel SMA-SMA RG402. (Zdroj: Vlastní.)

#### 4.4 Ověření parametrů vybraných atenuátorů

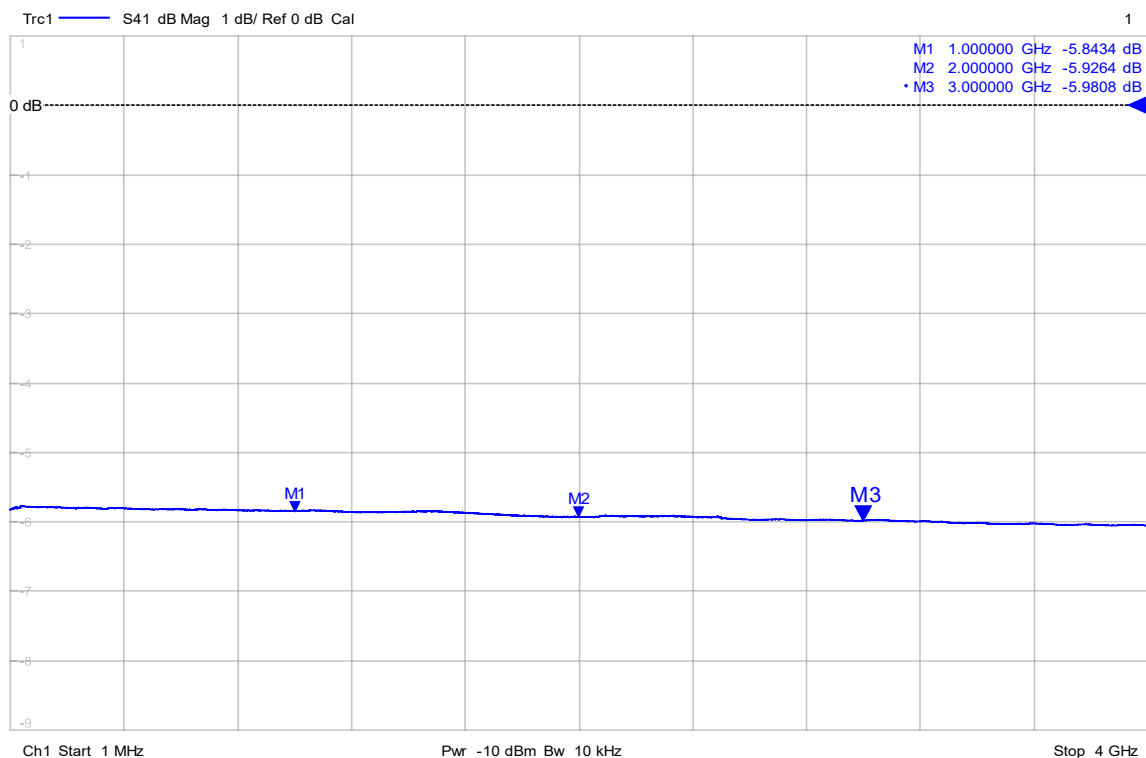
Při řešení úrovně amplitudy signálu v místech signálové cesty, kde by mohlo dojít k poškození modulu v důsledku vysoké amplitudy, bylo nutné zvolit vhodné pevné atenuátory, které zaručují, že úroveň signálu vstupní část modulu nepoškodí. Zvolené nakoupené atenuátory jsou na následujícím obrázku 4.8 Naměřené parametry atenuátoru jsou vykresleny obrázky 4.9 a 4.10.



Obrázek 4.8: Náhled na použité pevné atenuátory s přechody SMA. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 4.9: Náhled na měření zvoleného atenuátoru s pevnou hodnotou 3 dB. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 4.10: Náhled na měření zvoleného atenuátoru s pevnou hodnotou 6 dB. (Zdroj: Vlastní.)

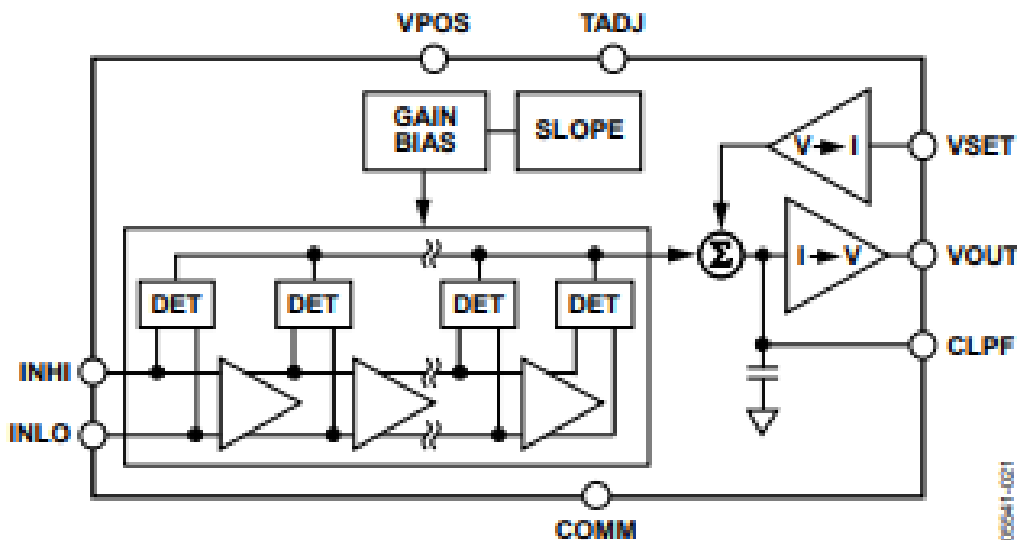
#### 4.5 Ověření parametrů vysokofrekvenčního detektoru výkonu

Pro určení úrovně amplitudy výkonu vysokofrekvenčního signálu byl zvolen jako detektor obvod od Analog Devices AD8317, detailní informace o tomto obvodu jsou dostupné v tištěné příloze k diplomové práci A, zde je krátké shrnutí vlastností. Tento obvod vyhovuje díky velkému dynamickému rozsahu až 55 dB a velké odolnosti na výkonovou úroveň vstupního signálu, až 12 dBm při přizpůsobení vstupu na 50 Ω. Při vhodné volbě substrátu DPS, například Rogers4350B, na které je osazen, je možné dosáhnout měření od 1 MHz do 10 GHz. Z finančních důvodů byla zvolena forma modulu nákupem s již osazeným obvodem na substrátu FR4. Podoba modulu je vyobrazena na obrázku 4.11 (AD8317, ©2005–2019)



Obrázek 4.11: Náhled na použitý modul s AD8317. (Zdroj: Vlastní.)

Princip detekce úrovně je vykreslen schématickým obrázkem 4.12, jehož popis je následující. Vstupní signál přichází do INHI vstupu, kde prochází řadou detektorů. Detektory dle detekované úrovně dodávají proud do sčítačky. Následně je celkový proud převeden na napětí, které obvod použít do Vout výstupu. Detekované napětí je dále zpracováváno například AD převodníkem. (AD8317, ©2005–2019)



Obrázek 4.12: Náhled na vnitřní blokové schéma obvodu AD8317, převzato z (AD8317, ©2005–2019)

Náhled na dynamický rozsah obvodu je vykreslen obrázkem 4.13, pro ověření byla provedena sada měření s generátorem, kde jejich výsledek vykresluje obrázek 4.14 a tabulka 1, kde jsou shrnuty hodnoty získané měřením.

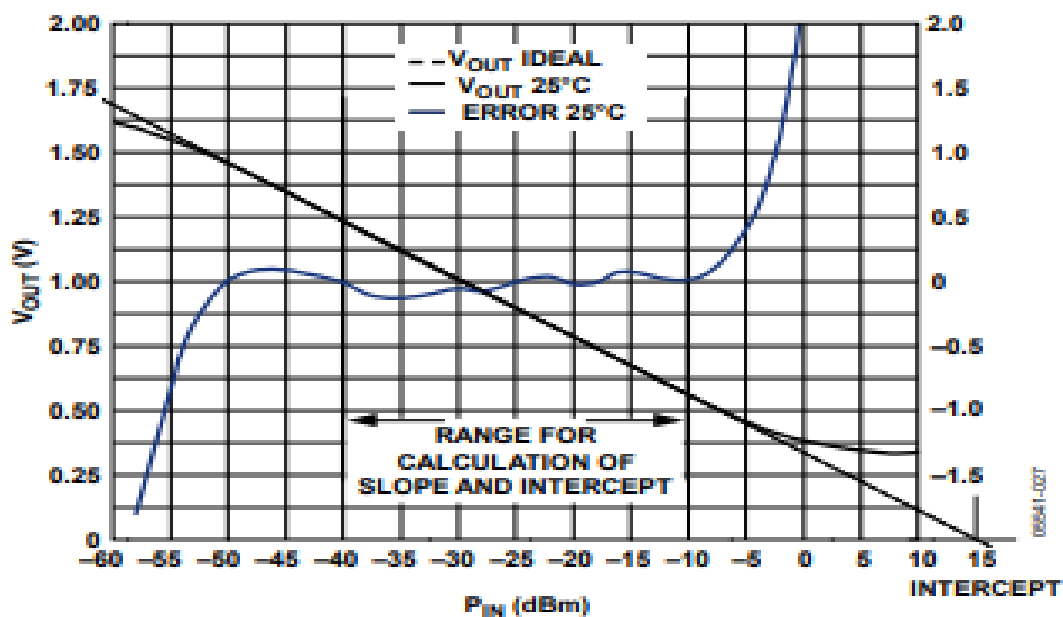
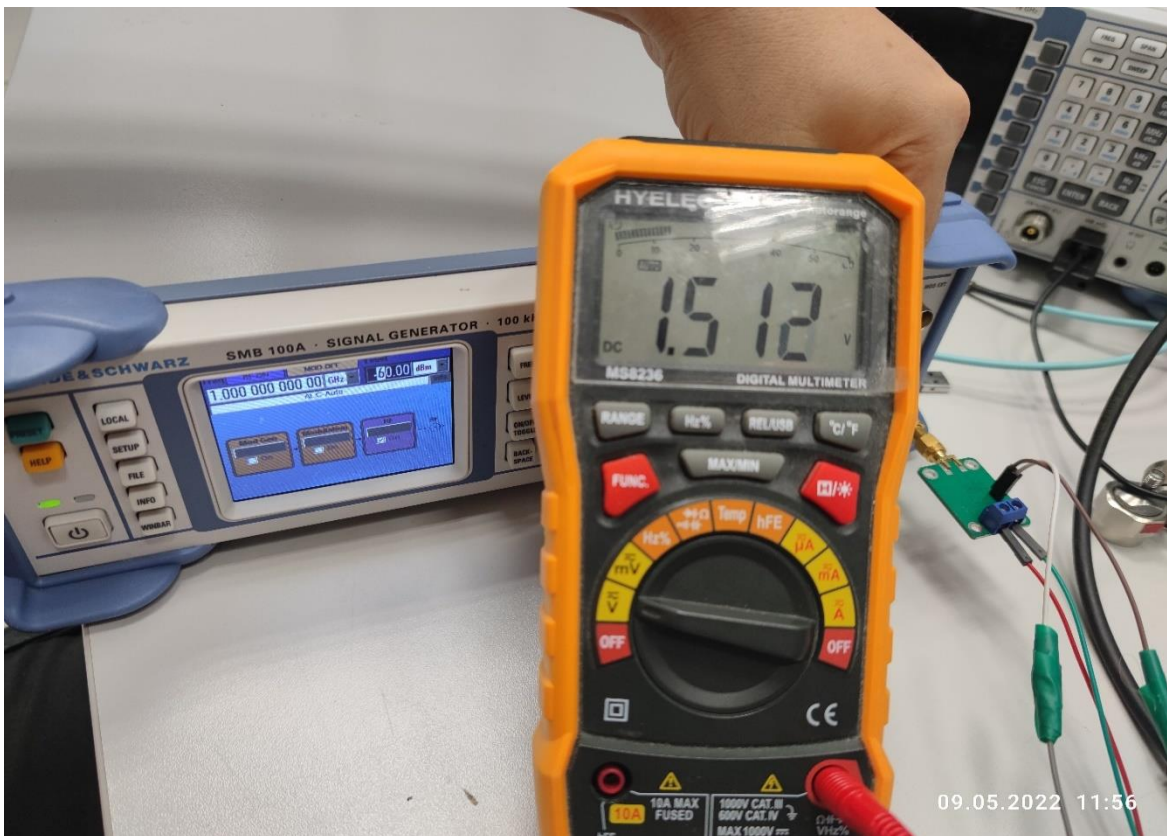


Figure 27. Typical Output Voltage vs. Input Signal

Obrázek 4.13: Náhled na grafický popis detekce úrovně výkonu ku výstupnímu napětí, převzato z (AD8317, ©2005–2019).



**Obrázek 4.14:** Pohled na provedené měření výstupního napětí při nastavené úrovni amplitudy signálu vystupujícího z generátoru pro -60 dBm. (Zdroj: Vlastní.)

**Tabulka 4.1:** Naměřené hodnoty nastavených amplitud a výstupního napětí generovaného obvodem.

Nastavený výstupní výkon [dBm]	Frekvence [GHz]	Generované napětí [V].
-10	1,0	0,848
-20	1,0	1,072
-30	1,0	1,284
-40	1,0	1,461
-50	1,0	1,508
-60	1,0	1,512

#### 4.6 Ověření parametrů vysokofrekvenčního zesilovače signálu

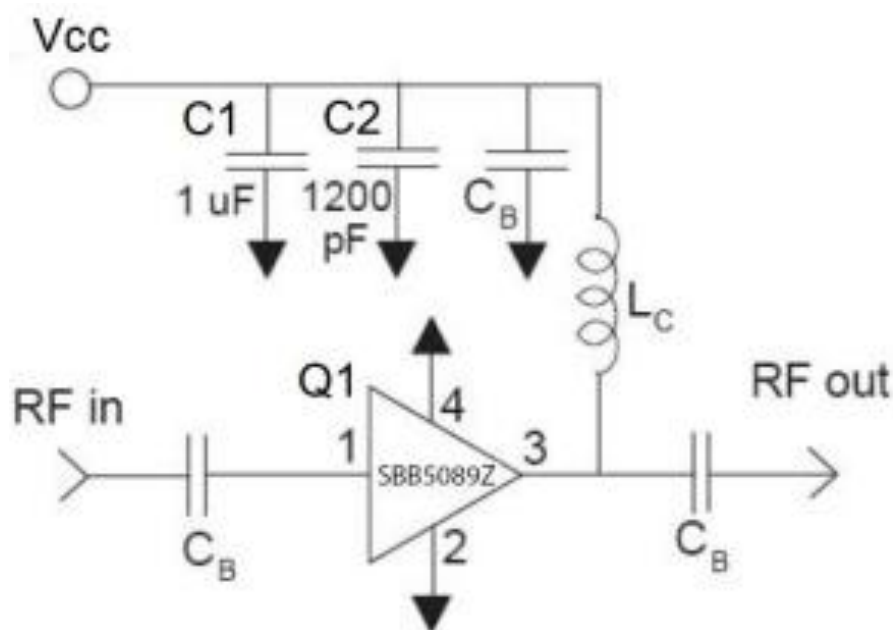
V rámci řešení signálové cesty bylo nutné zvolit vhodný zesilovací prvek pro zvýšení úrovně amplitudy signálu. Pro tyto účely byl zvolen zakoupený zesilovací modul s osazeným



zesilovačem Qorvo SBB5089Z. Tento zesilovač má vhodný frekvenční rozsah od 50 MHz do 6 GHz a je možné jej řadit do kaskády. Zisk, kterého v tomto rozsahu dosahuje, je okolo 15 dB. Na následujícím obrázku 4.15 je vykreslena podoba jeho modulu a na obrázku 4.16 je doporučené zapojení, které je realizováno pod plechovým krytem. (SBB5089Z, 2021)

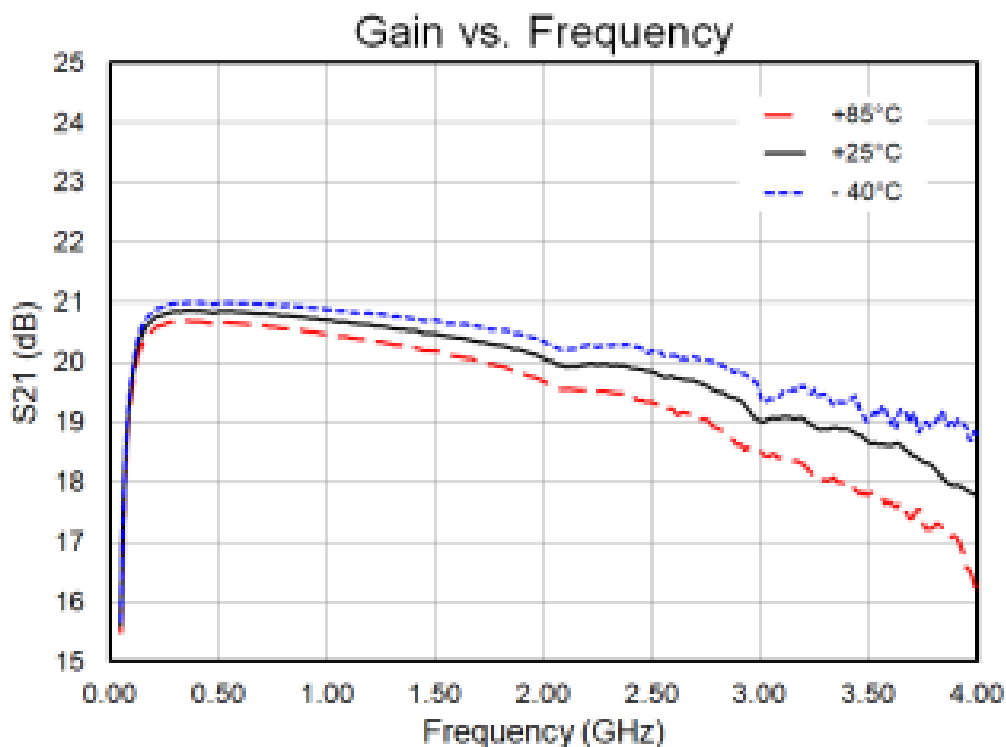


Obrázek 4.15: Náhled na použitý modul zesilovače se SBB5089Z. (Zdroj: Vlastní.)

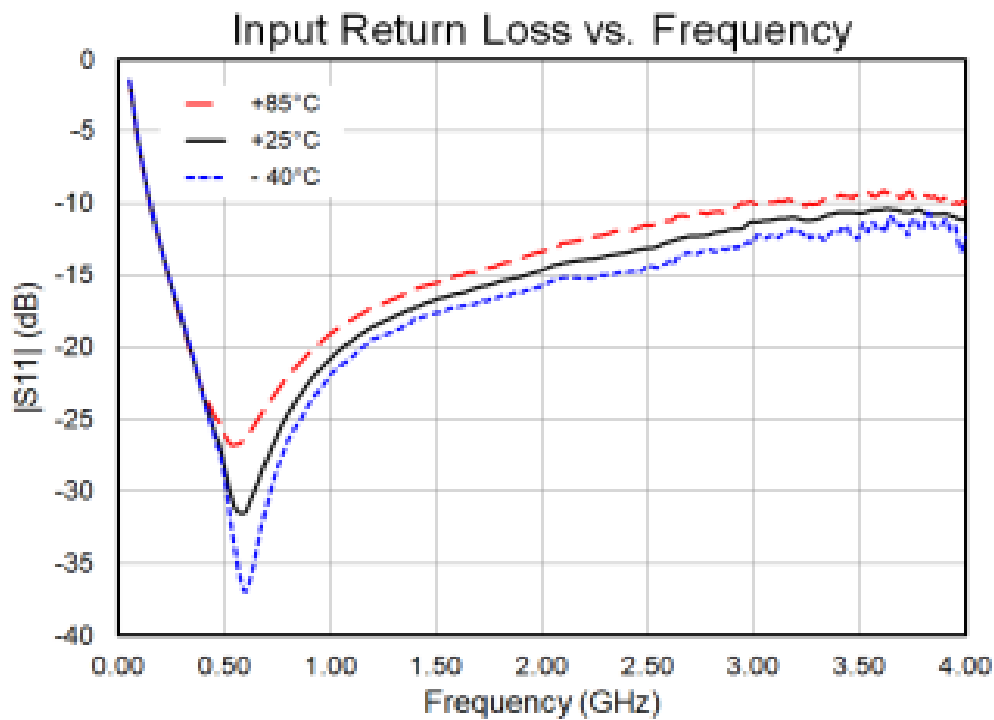


Obrázek 4.16: Náhled na doporučené vnitřní zapojení zesilovače, převzato z (SBB5089Z, 2021).

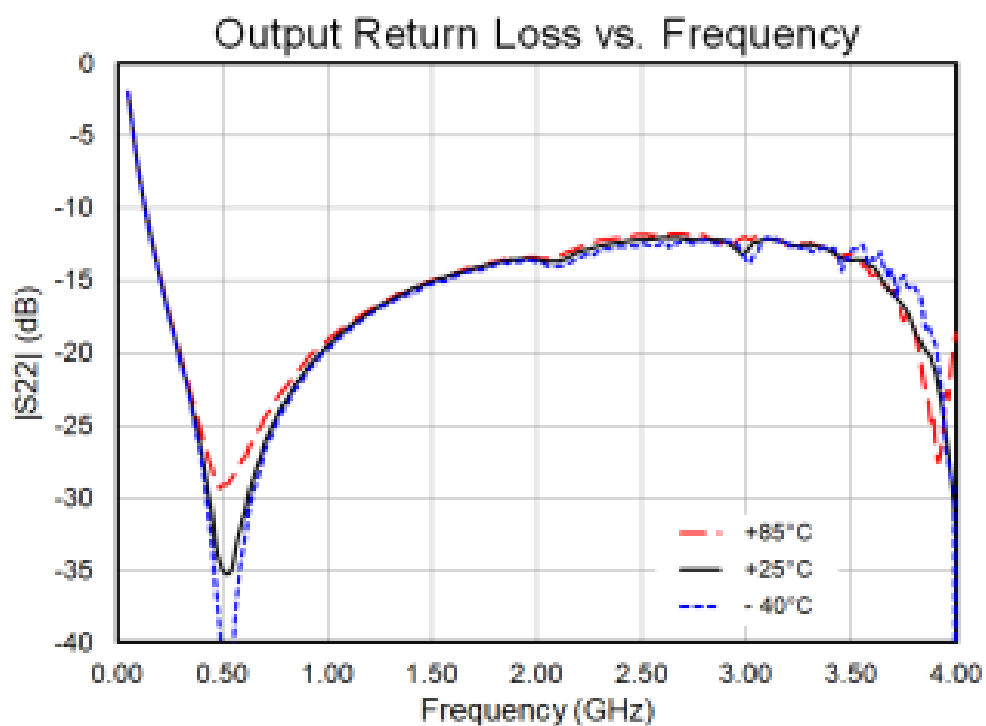
Na následujících obrázcích jsou dostupné datasheet informace k chování zesilovače pro jednotlivé S-parametry. Úryvek z datasheet je dostupný v tištěné příloze F. Na obrázku 4.17 pro parametr S21, dále na 4.18 pro parametr S11, předposledním je pak 4.19 s S22 a posledním je parametr S12 z obrázku 4.20. Z dostupných dat lze usoudit, že zesilovač vyhovuje rozsahem aplikaci. (SBB5089Z, 2021)



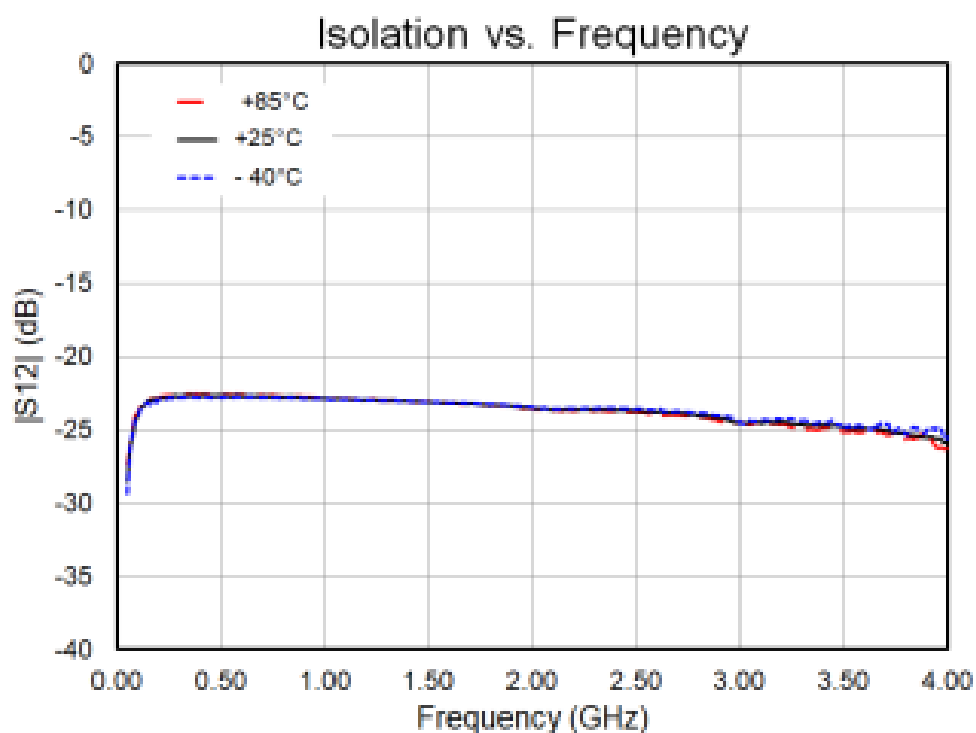
Obrázek 4.17: Náhled na grafické zobrazení S-parametru S21 pro vybraný zesilovač, převzato z (SBB5089Z, 2021).



Obrázek 4.18: Náhled na grafické zobrazení S-parametru S11 pro vybraný zesilovač, převzato z (SBB5089Z, 2021).



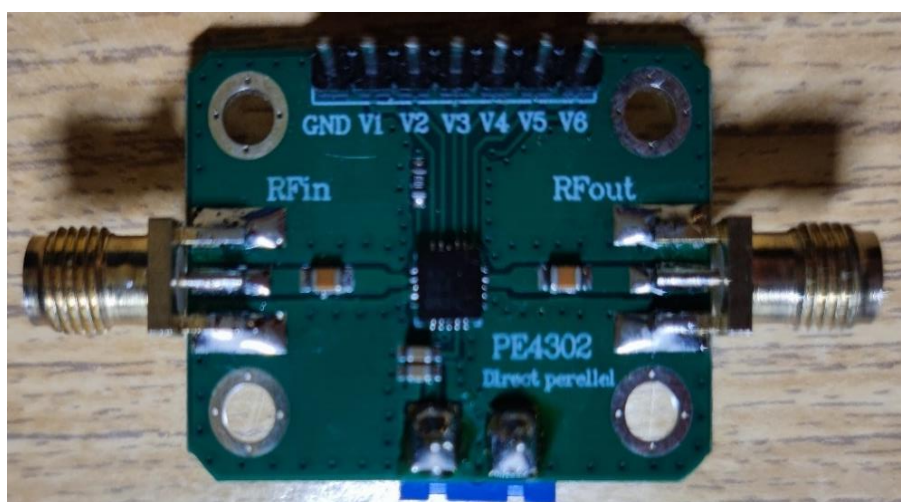
Obrázek 4.19: Náhled na grafické zobrazení S-parametru S22 pro vybraný zesilovač, převzato z (SBB5089Z, 2021).



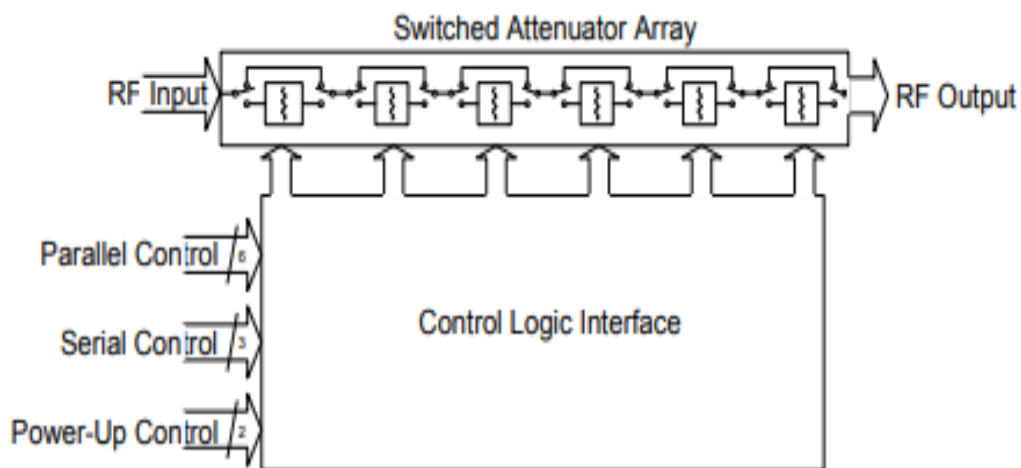
Obrázek 4.20: Náhled na grafické zobrazení S-parametru S12 pro vybraný zesilovač, převzato z (SBB5089Z, 2021).

## 4.7 Ověření parametrů programovatelného atenuátoru

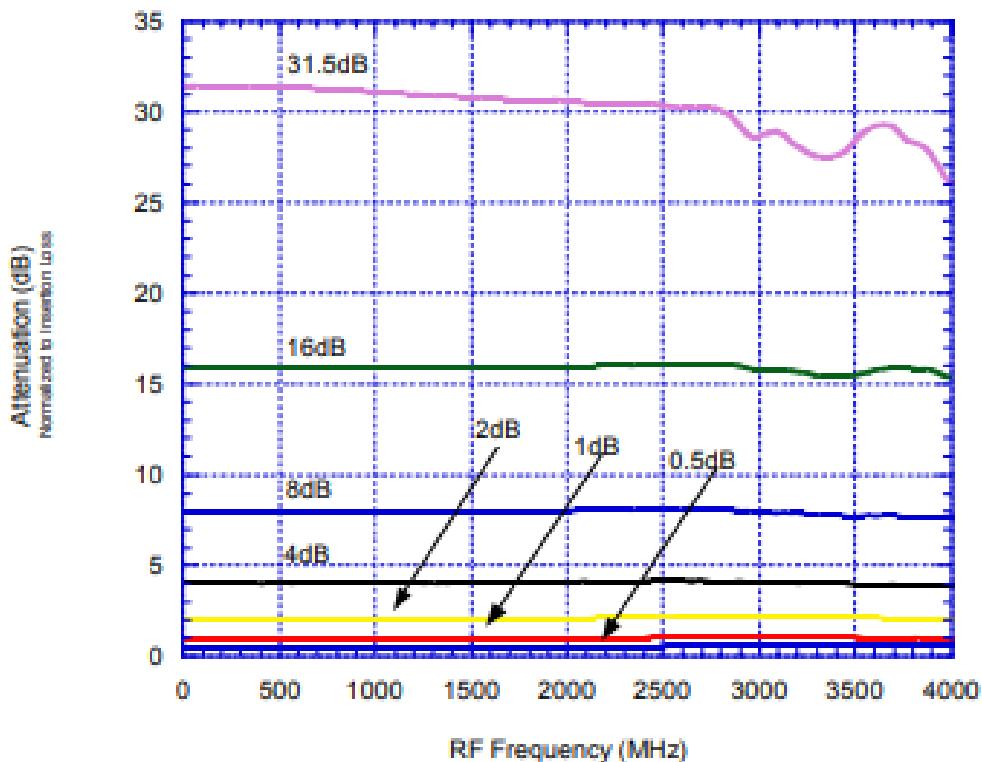
Pro aktivní regulaci amplitudy vstupního a výstupního signálu bylo nutné zvolit vhodné programovatelné atenuátory, vybraný modul je na obrázku 4.21. Pro atenuaci byl zvolen zakoupený modul s obvodem PE4302, který splňuje dostatečný atenuační krok po 0,5 dB s maximální atenuací 31.5 dB, jehož grafické zobrazení je na obrázku 4.23. Také je vhodný pro velký frekvenční rozsah a cenovou dostupnost. Krok atenuace je řízen aktivním prvkem nebo MCU přes 6bitový paralelní převodník, jehož princip je popsán obrázkem 4.22. (PE4302, 2005) Úryvek z datasheet k tomuto obvodu je v tištěné příloze E.



Obrázek 4.21: Náhled na vybraný modul elektronicky nastavitelného atenuátoru. (Zdroj: Vlastní.)



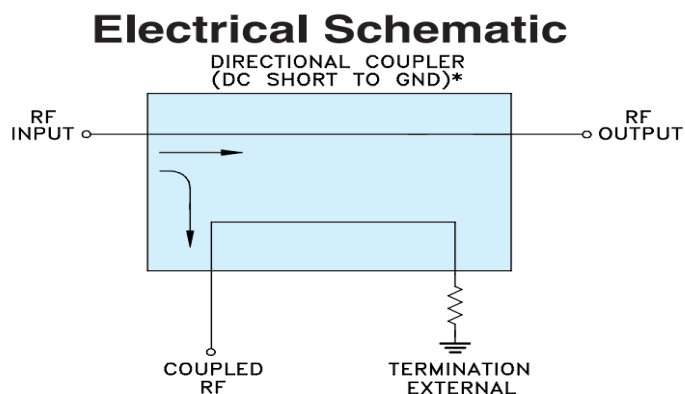
Obrázek 4.22: Principiální popis funkce atenuátoru, dostupné z (PE4302, 2005).



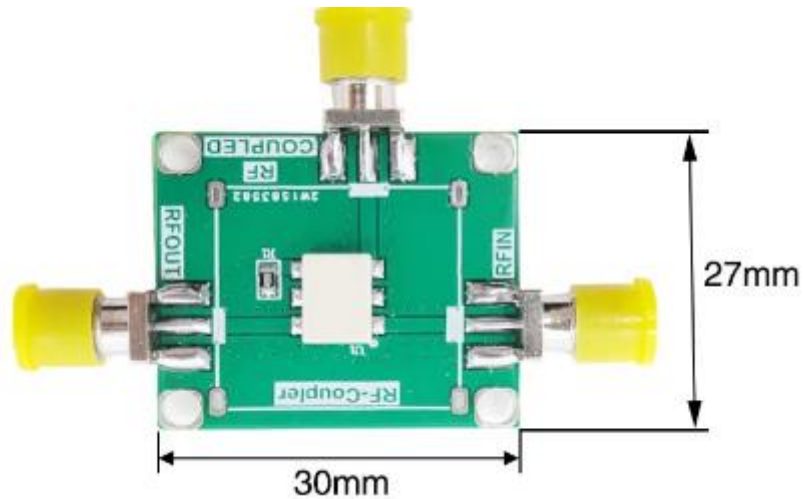
Obrázek 4.23: Grafický popis atenuací dosažitelných obvodem, dostupné z (PE4302, 2005).

#### 4.8 Ověření parametrů zvolené směrové odbočnice

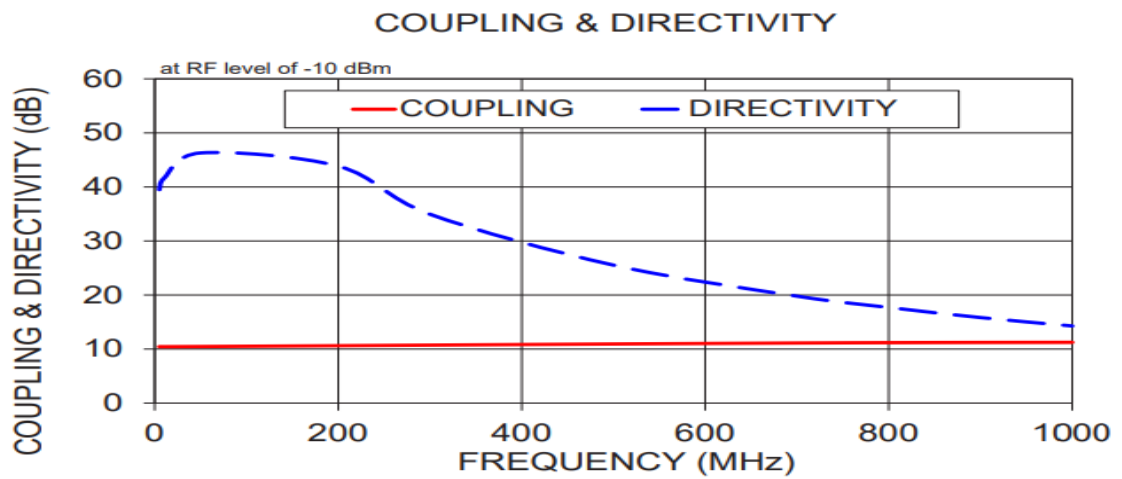
Směrová odbočnice se nabízí jako řešení kontroly vysílání signálu pro vysílací část. Její princip je popsán obrázkem 4.24, kde průchozí signál, který je vyveden na N konektor, je odbočen a může tak být sledován kontrolní částí přijímače. Hlavním požadavkem bylo použít odbočnici s co největší směrovostí, ale zároveň, aby byla odbočnice velmi malá, proto nebylo vhodné odbočnici vyrábět návrhem v CST, ale bylo vhodnější koupit modul vykreslen na obrázku 4.25 s obvodem ADC-10-4 od firmy Mini-circuit. Úryvek z datasheet je dostupný v příloze D. Vybrané vlastnosti obvodové odbočnice jsou na obrázcích 4.26 a 4.27. (Directional Coupler ADC-10-4+, 2020)



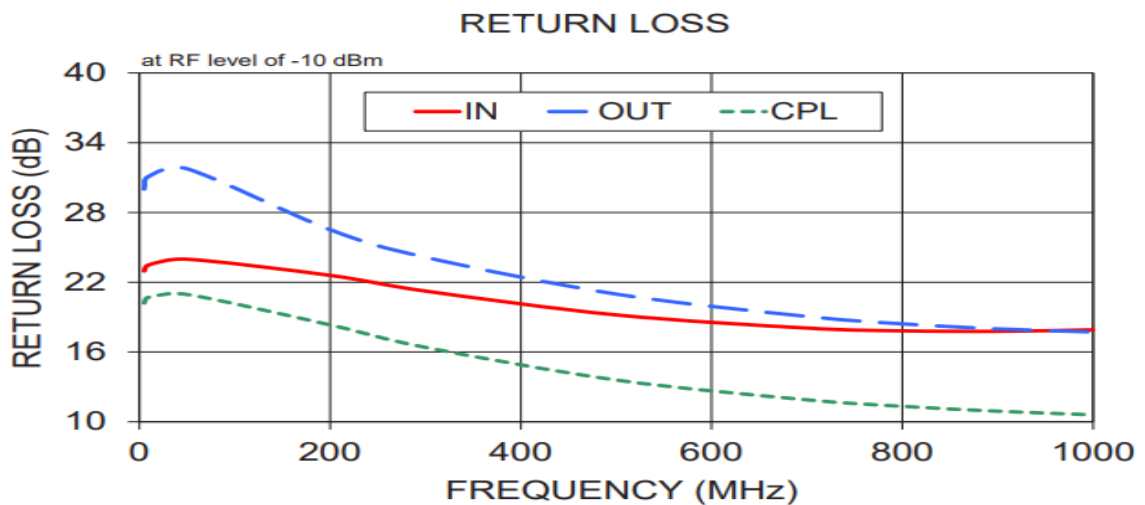
Obrázek 4.24: Náhled na funkční principiální blokové schéma, dostupné z (Directional Coupler ADC-10-4+, 2020).



Obrázek 4.25: Náhled na použitý zakoupený modul, dostupné z (Odbočnice-Aliexpress, 2010-2022)



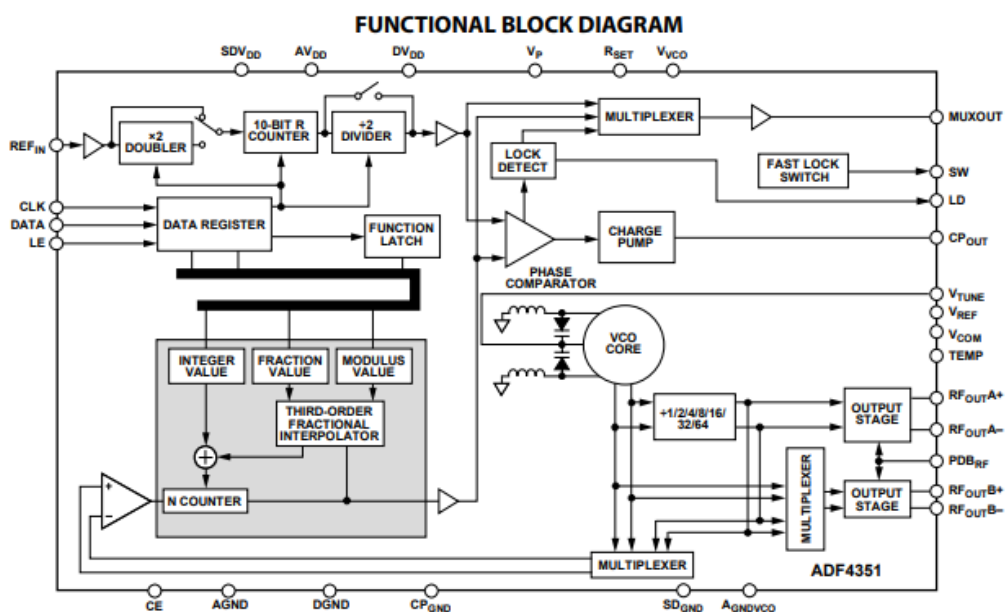
Obrázek 4.26: Náhled na grafické zobrazení vlastností Směrovosti a vazby použité odbočnice, dostupné z (Directional Coupler ADC-10-4+, 2020)



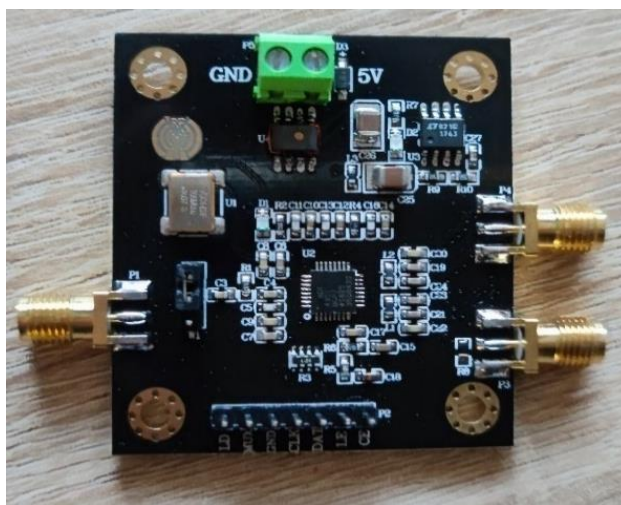
Obrázek 4.27: Náhled na grafické zobrazení vlastností průchozích ztrát v závislosti na frekvenci u použité odbočnice, dostupné z (Directional Coupler ADC-10-4+, 2020).

## 4.9 Ověření parametrů syntetizéru signálu

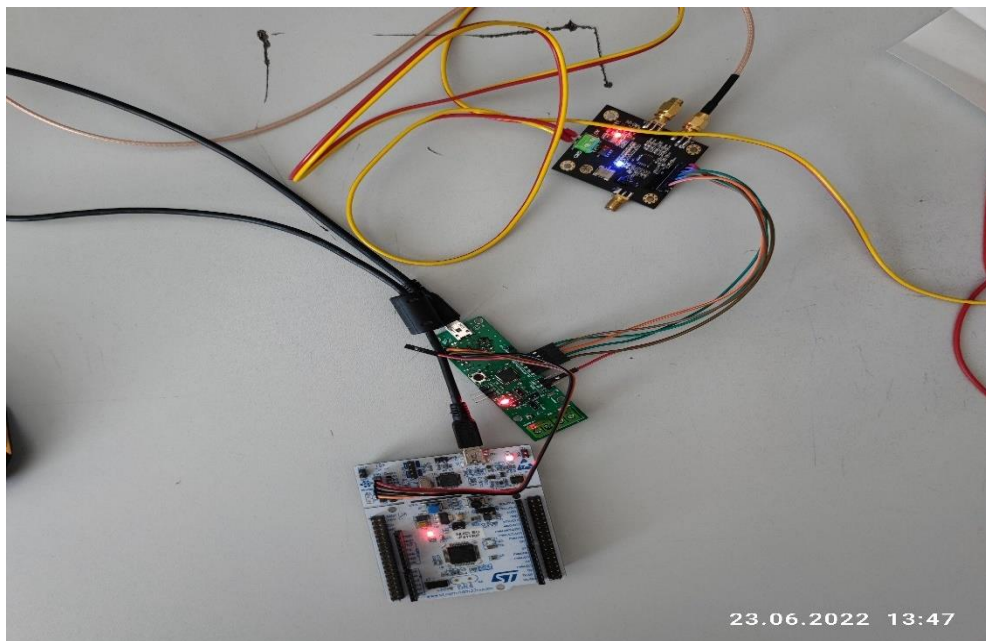
Generování vysokofrekvenčního signálu je v zařízení zajišťováno zvoleným syntetizérem vysokofrekvenčního signálu. Pro tyto účely byl zvolen vhodný obvod od Analog Devices ADF4351 s frekvenčním rozsahem generování CW signálu od 36 MHz do 4400 MHz. Na následujícím obrázku 4.28 je vykresleno blokové schéma obvodu, který funguje na principu fázově frekvenčního závěsu. K obvodu je připojený oscilátor, který slouží jako vstupní reference, dle naprogramování registru v obvodu jsou pak všechny části viditelné z blokového schéma nastaveny a obvod generuje na požadovaném výstupu požadovanou frekvenci. Na obrázcích 4.29 až 4.31 je vyobrazena podoba modulu i měřícího zapojení. (ADF4351, ©2012–2017) Úryvek z datasheet k tomuto obvodu je přiložen v tištěné příloze B.



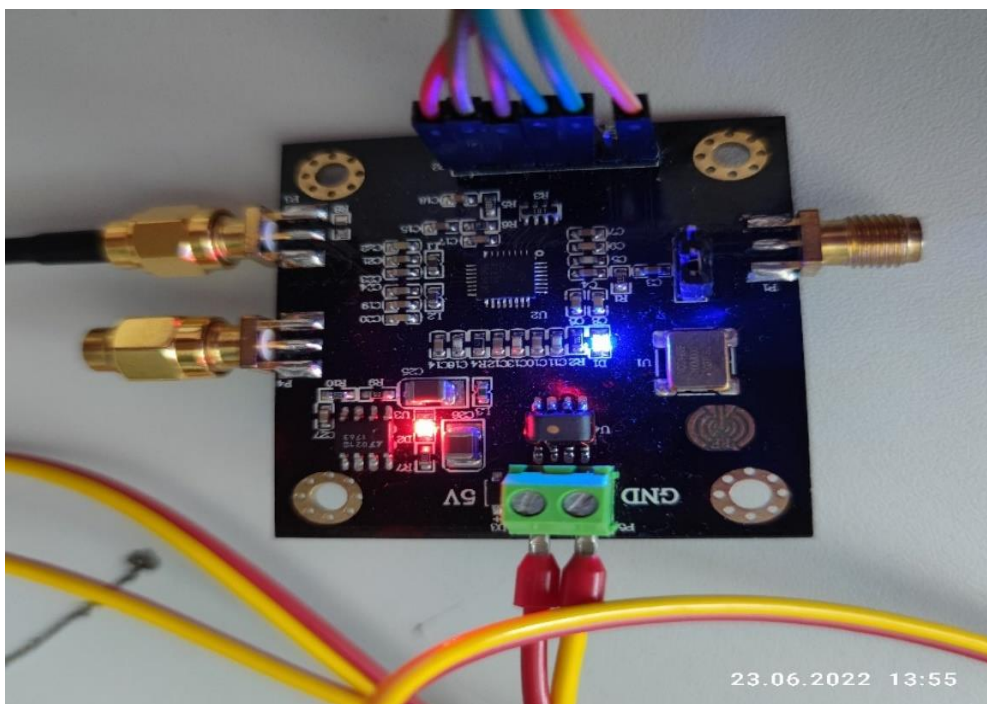
Obrázek 4.28: Náhled na vnitřní blokové schéma syntetizéru signálu, dostupné z (ADF4351, ©2012–2017).



Obrázek 4.29: Náhled na modul syntetizéru signálu. (Zdroj: Vlastní.)



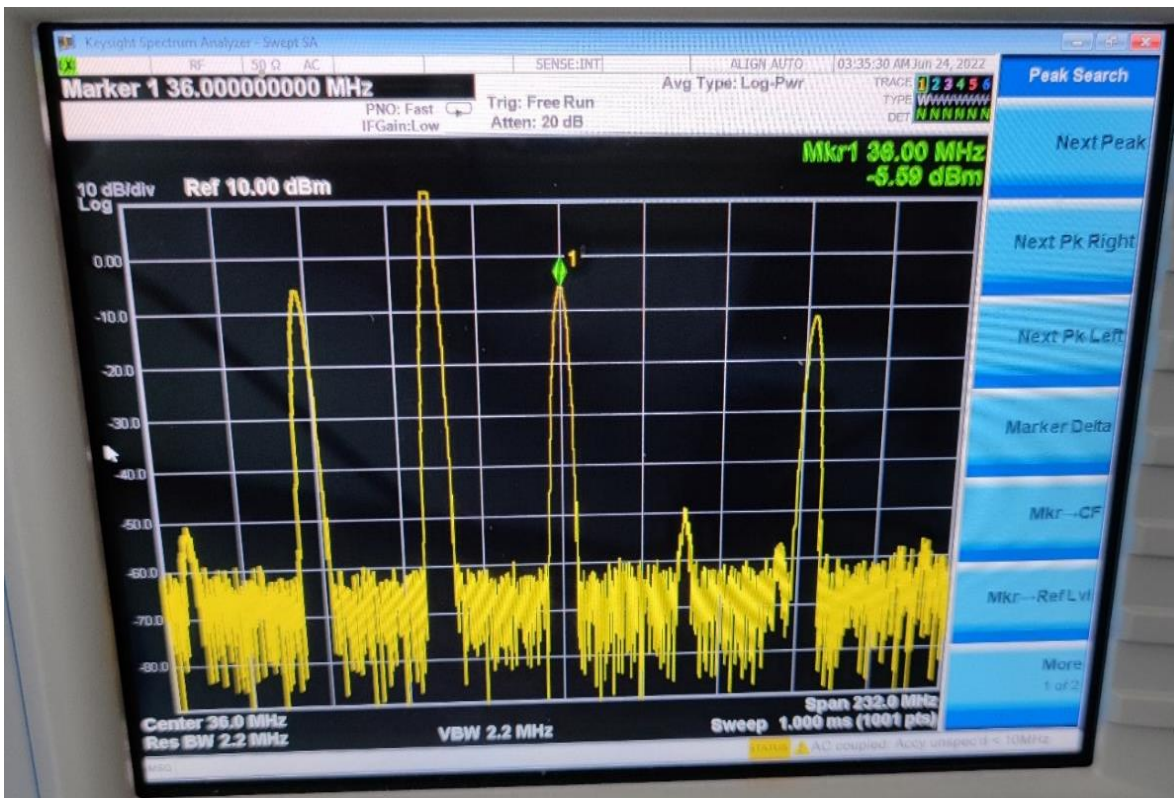
Obrázek 4.30: Náhled na testovací zapojení, detail na funkci modulu. (Zdroj: Vlastní.)



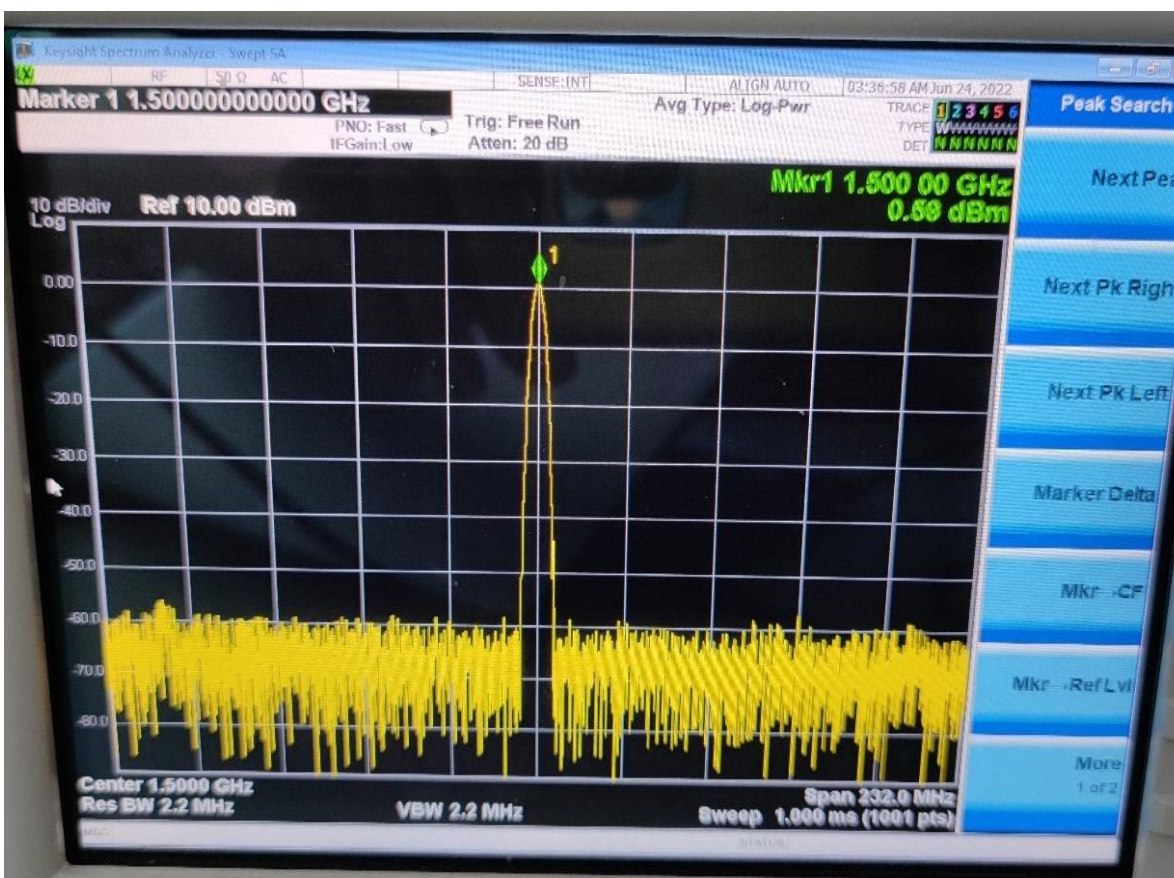
Obrázek 4.31: Náhled na syntetizér signálu, s indikací modrou led, zavěšení fázového závěsu. (Zdroj: Vlastní.)

Pro syntetizér signálu byla provedena sada testovacích měření při různých nastaveních generovaného signálu pro určené frekvence. Na následujících obrázcích 4.32 až 4.35 jsou vykreslena měření ve spektrální oblasti.

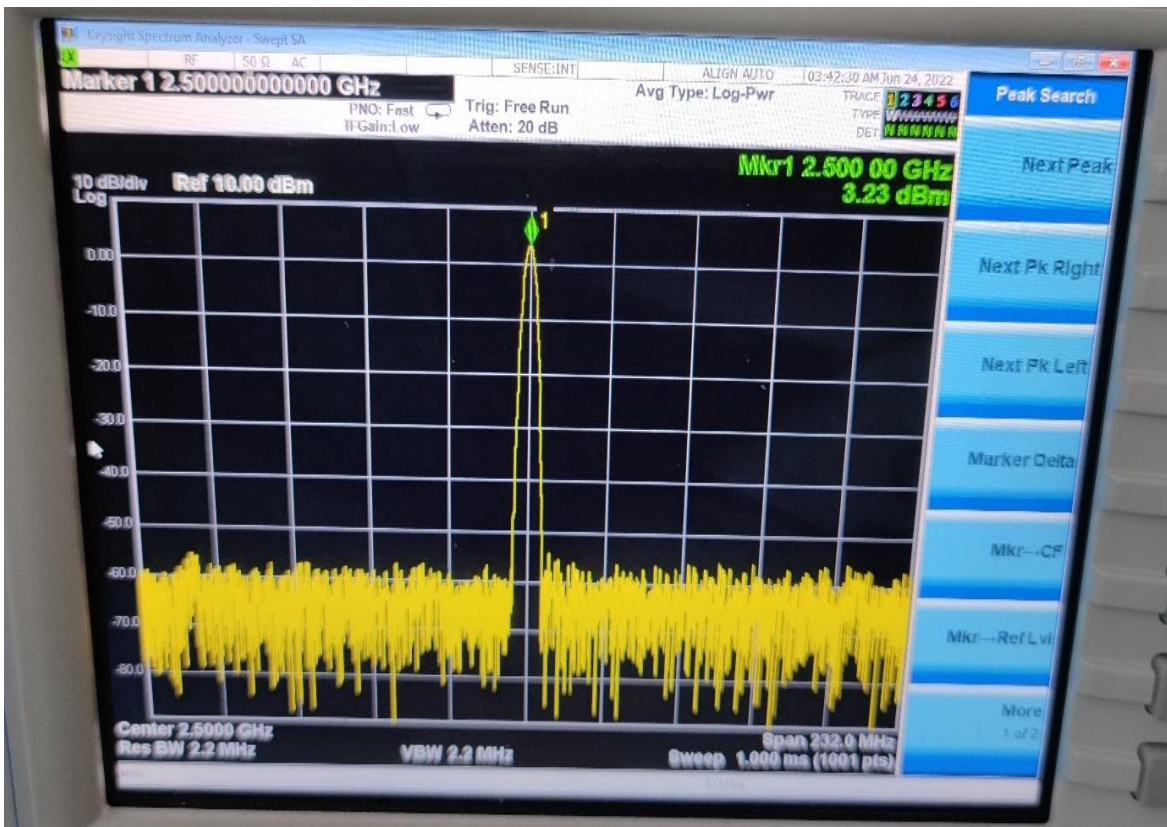




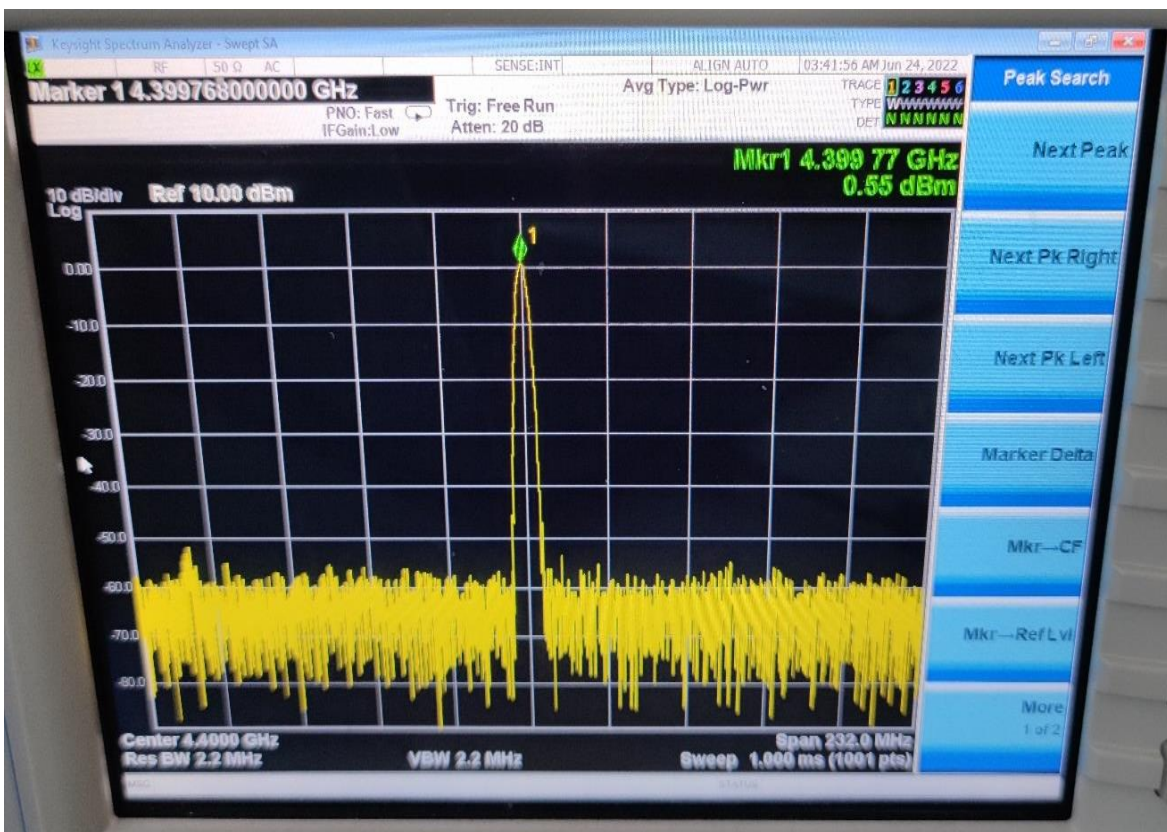
Obrázek 4.32: Náhled na ověřovací měření, nastavena frekvence minima 36 MHz. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 4.33: Náhled na ověřovací měření, nastavena frekvence 1500 MHz. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 4.34: Náhled na ověřovací měření, nastavena frekvence 2500 MHz. (Zdroj: Vlastní.)



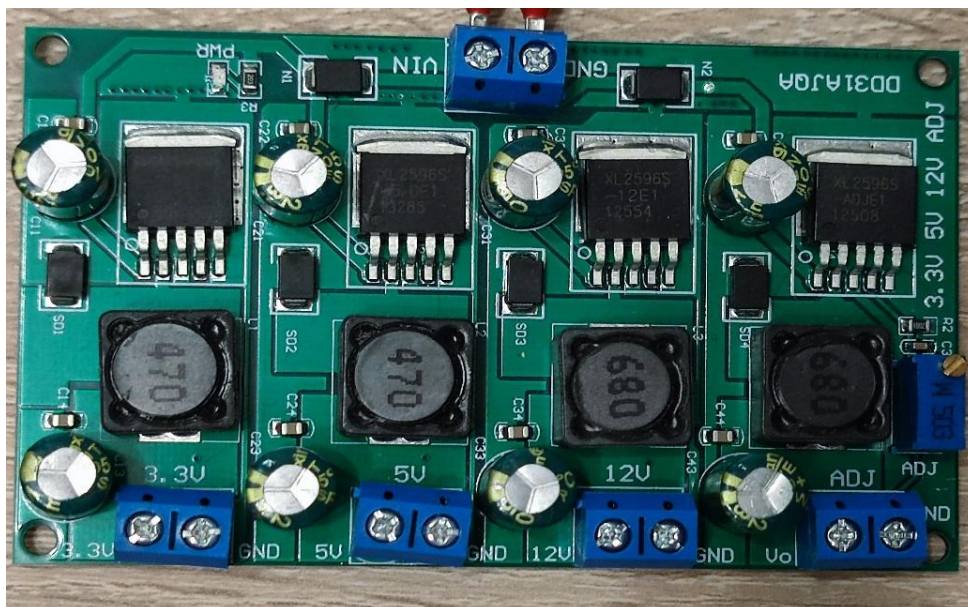
Obrázek 4.35: Náhled na ověřovací měření, nastavena frekvence Maxima 4400 MHz. (Zdroj: Vlastní.)

#### 4.10 Ověření funkce modulů pro napájecí část

V rámci řešení pro napájecí část bylo nutné zajistit bezpečné spínání a vypínání Raspberry Pi a postupné spouštění zařízení při přechodu ze Stand-by. Toho bylo dosaženo nákupem zvoleného modulu s Relé spínači, který je vyobrazen na obrázku 4.36. Provozní napájecí napětí úrovně 3V3 a 5V jsou zajištěny nakoupeným modulem s lineárními stabilizátory na obrázku 4.37.



Obrázek 4.36: Náhled na modul s Relé pro spínání zdrojů. (Zdroj: Vlastní.)



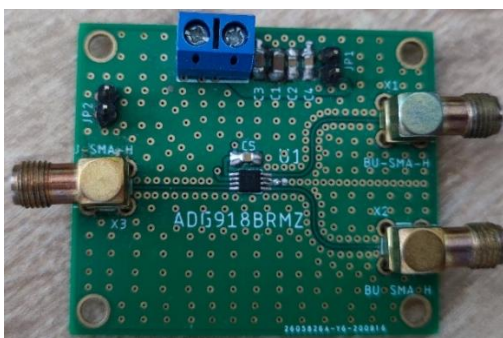
Obrázek 4.37: Náhled na modul zdrojů, použitý v diplomové práci. (Zdroj: Vlastní.)

## 5 Popis modulů navržených pro zařízení a modulů i z jiných projektů využitých v analyzátoru

Jelikož se zabývám návrhem obvodů déle, některé využitelné moduly jsem navrhl již dříve. V této kapitole jsou popsány vlastní moduly, které jsou v analyzátoru využity a provedena ověření jejich vlastností.

### 5.1 Ověření parametru přepínačů signálové cesty

Přepínání signálové cesty bylo řešeno s využitím již vyrobených modulů, které zůstaly k dispozici po konstrukci bakalářské práce. Jejich výrobní data a popis jejich vývoje je popsán v (Kopecký, 2021). Podoba těchto přepínačů je na následujícím obrázku 5.1. Měření jejich parametru je dostupné z citovaného obrázku 5.2. Úryvek z datasheet k obvodu je k dispozici z tištěné přílohy C.



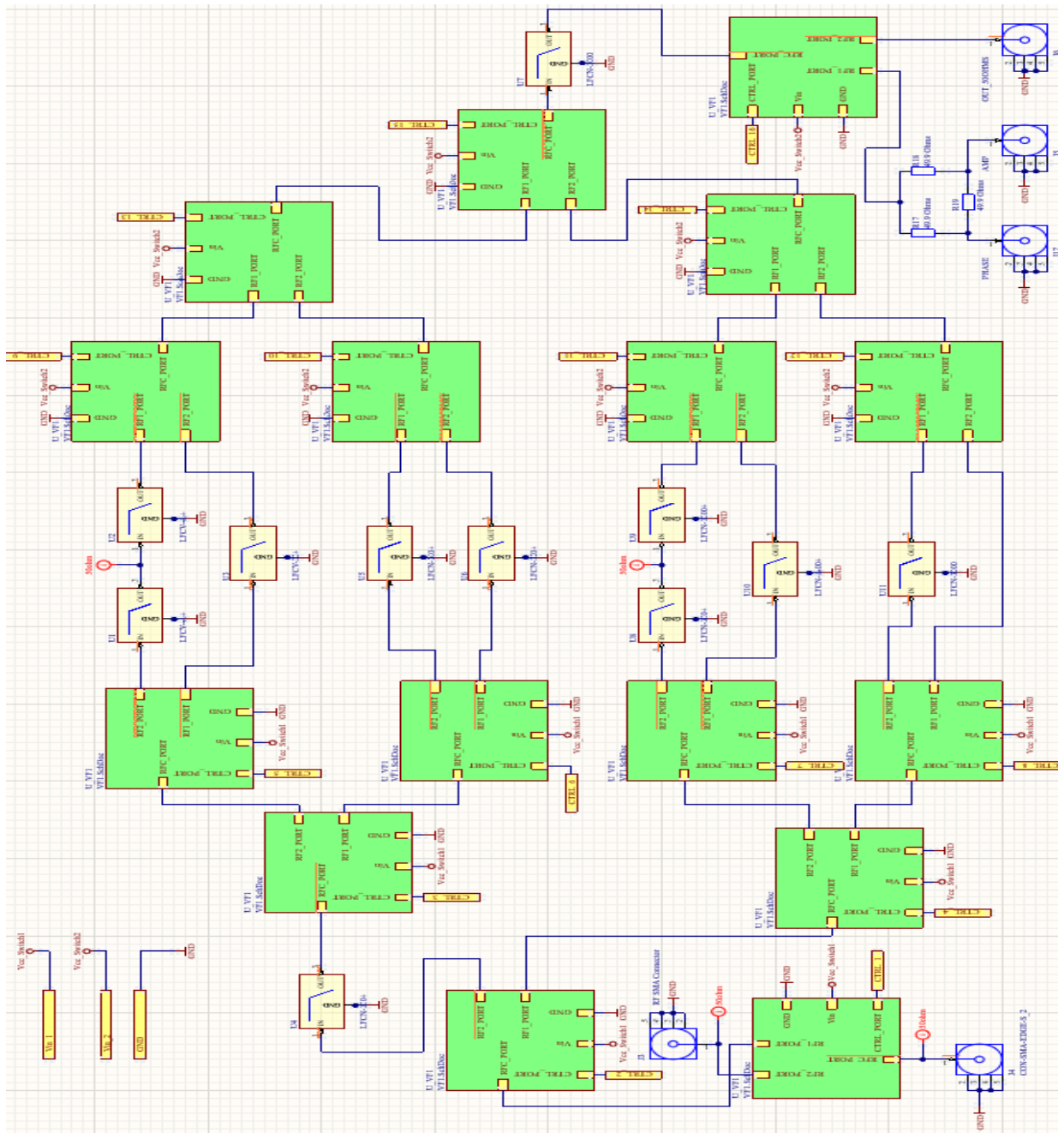
Obrázek 5.1: Náhled na osazenou destičku přepínače s ADG918. (Zdroj: Vlastní.)



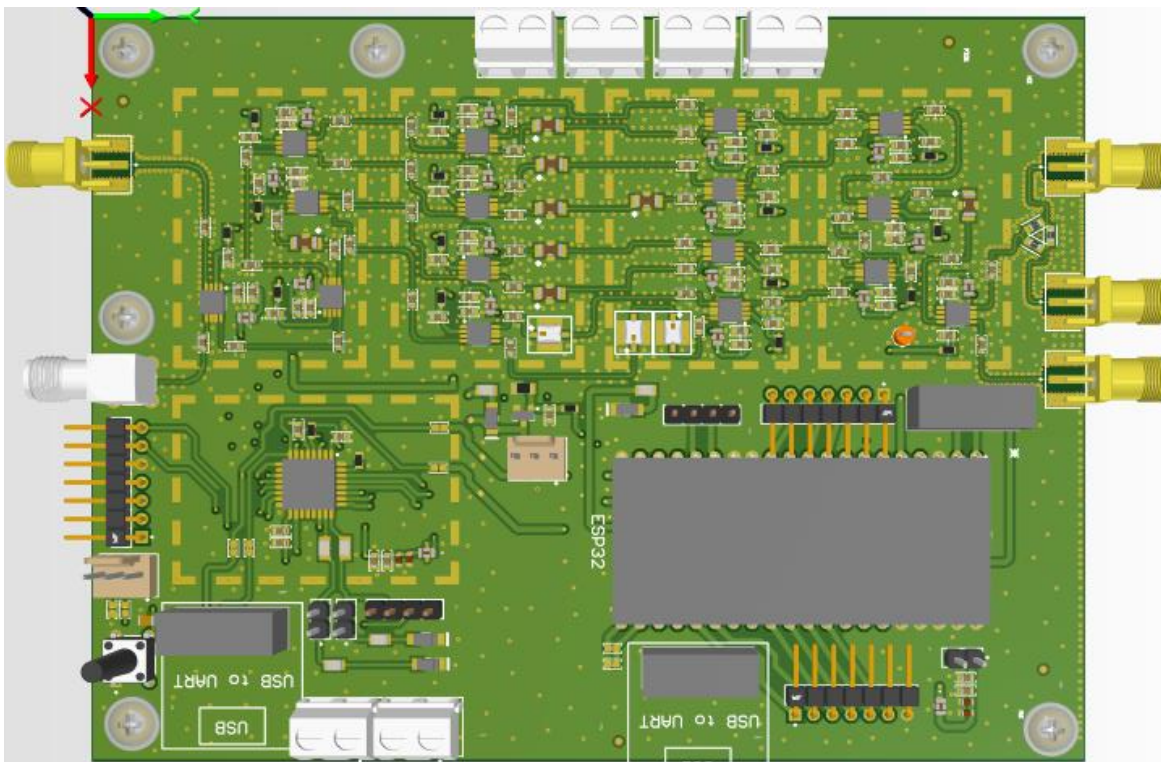
Obrázek 5.2: Náhled na měření přizpůsobení DPS s obvodem ADG918, převzato ze (Kopecký, 2021).

## 5.2 Ověření parametrů modulu filtrace signálu

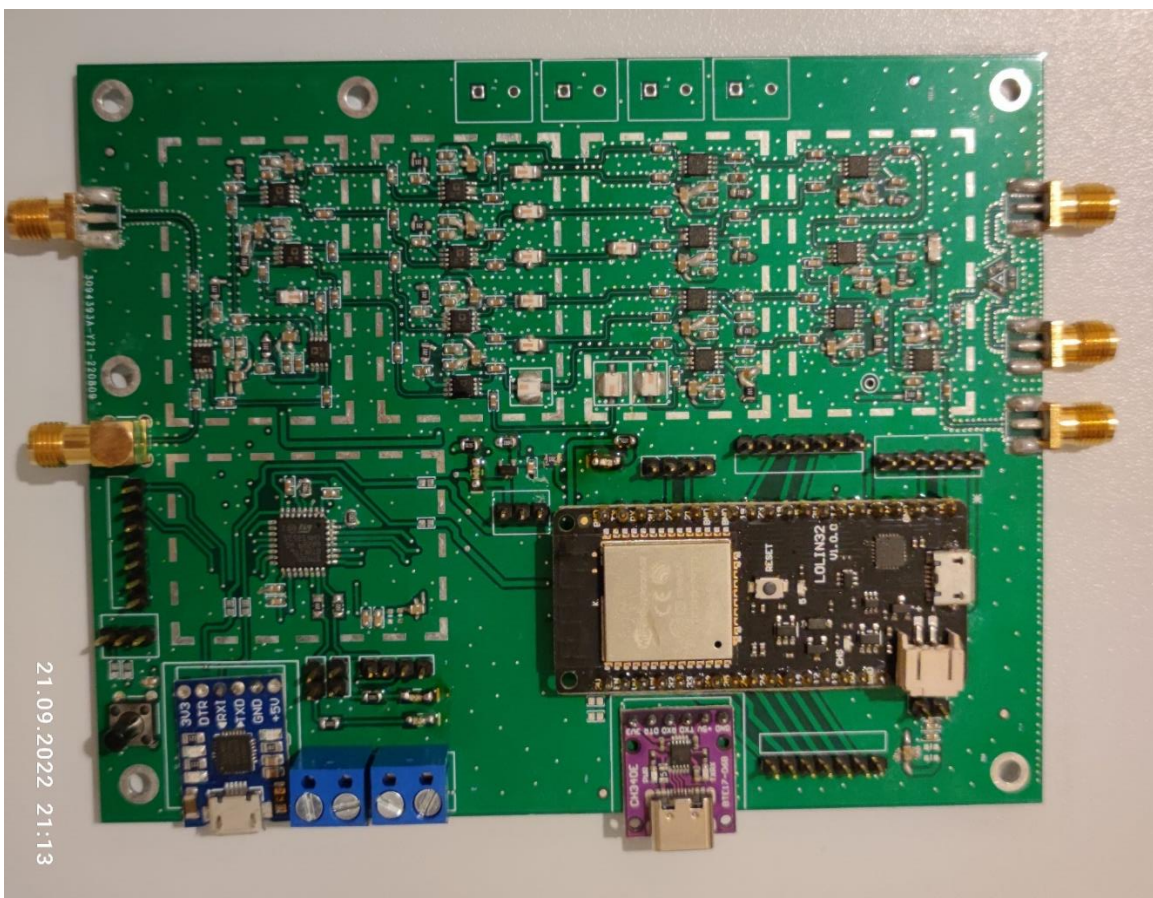
Pro modul syntetizéru signálu bylo nutné navrhnout a vyrobit DPS pro filtraci a potlačení harmonických složek generovaného signálu. Pro tyto účely byla navržena a vyvinuta 6vrstvá DPS s 8 filtračními trasami pro filtraci signálu dle požadavku na generovanou frekvenci. Filtrace je prováděna kaskádami keramických dolních propustí od firmy Mini-Circuits. Pohled na navržené schéma tras je na obrázku 5.3. Přepínání mezi trasami je řízeno elektronicky dle nastavení MCU. Na obrázku 5.4 je pohled na model navržené DPS, který je doplněn obrázky 5.5 a 5.6 s realizovanou osazenou DPS, podrobnější fotografie jsou k nalezení v příloze L.



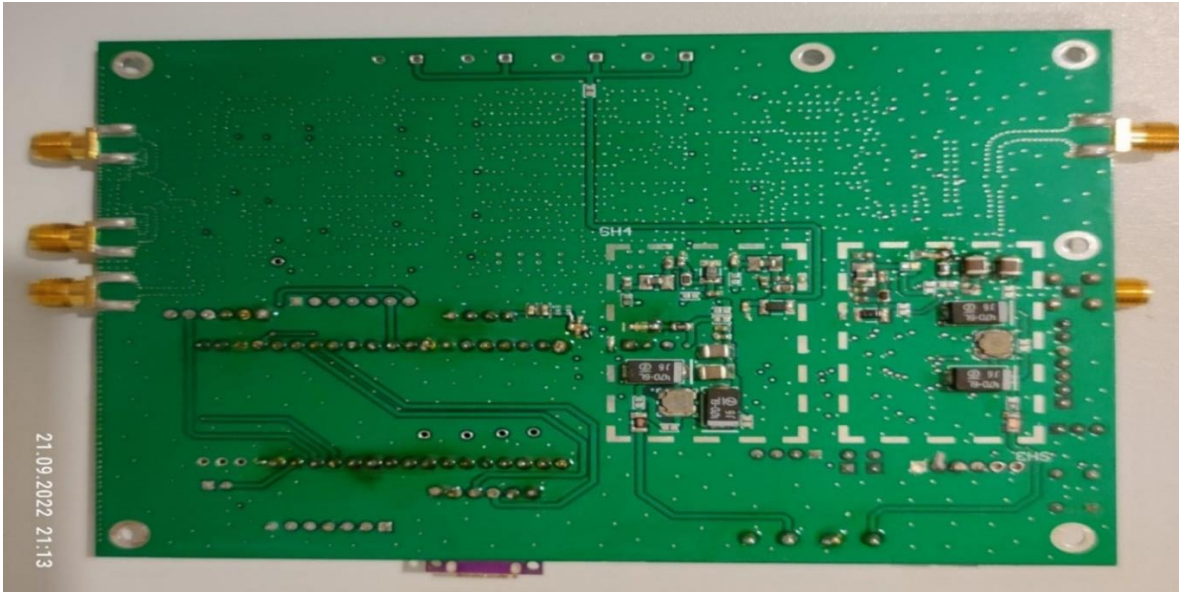
Obrázek 5.3: Náhled na schéma navržené filtrační části na filtrační DPS. (Zdroj: Vlastní)



Obrázek 5.4: Náhled na model navržené filtrační DPS. (Zdroj: Vlastní.)



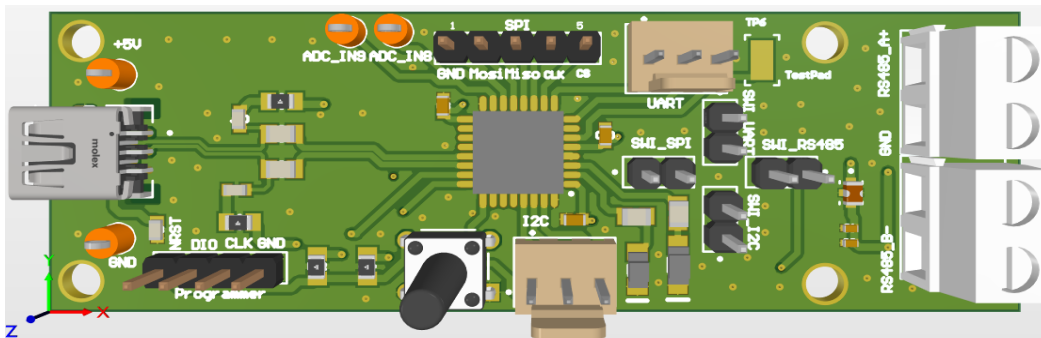
Obrázek 5.5: Náhled na osazenou filtrační DPS, přední strana – TOP. (Zdroj: Vlastní.)



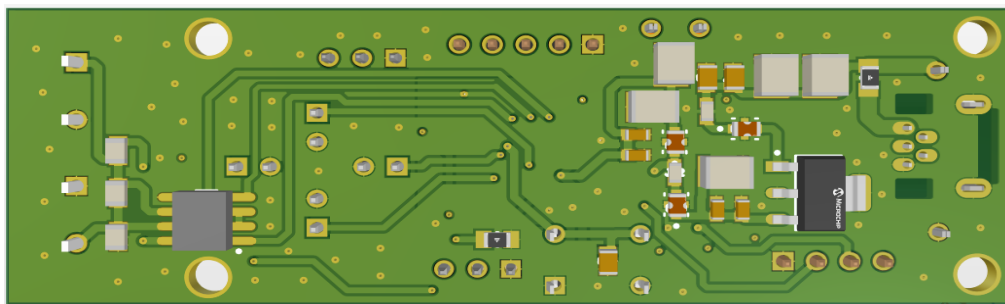
Obrázek 5.6: Náhled na osazenou filtrační DPS, zadní strana – BOTTOM. (Zdroj: Vlastní.)

### 5.3 Návrh modulu pro programování syntetizátoru

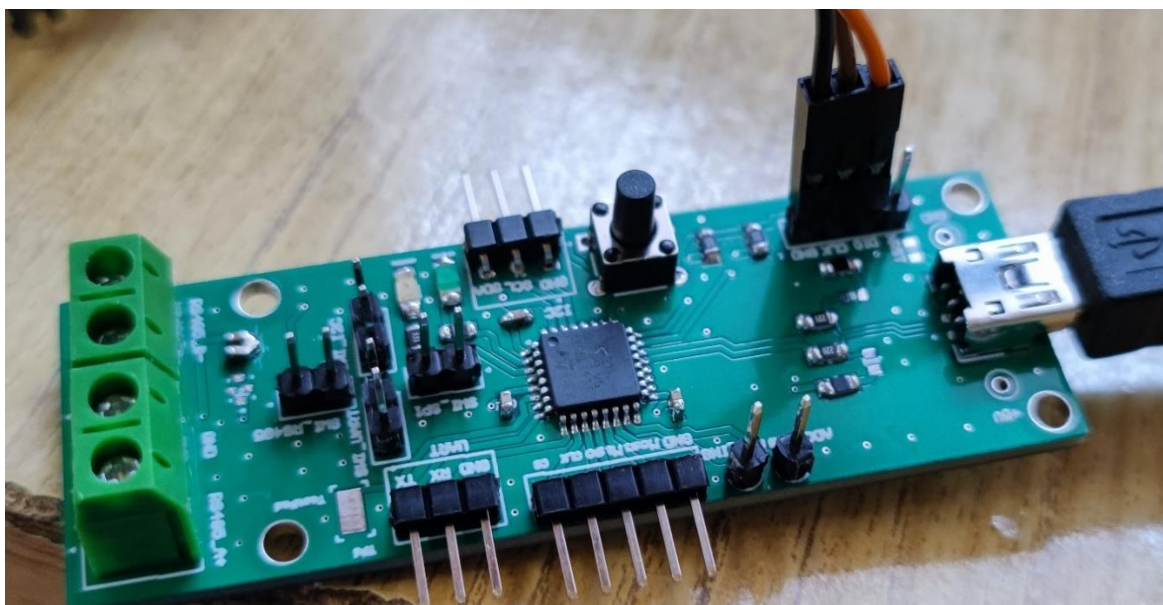
Pro programování syntetizátoru a pro spínání zdrojů byl navržen malý modul s procesorem STM32L072KZ. Tento procesor byl zvolen pro aktuální dostupnost na trhu a low power možnosti užití, rovněž také možnosti využití funkce FS\_USB. Úryvek z datasheet k procesoru je v tištěné příloze H. Na následujících obrázcích 5.7 a 5.8 je podoba modelu navrženého modulu i vyrobený a osazený kus na obrázku 5.9. Podrobnější fotografie modelu, návrhu a schémat je k dispozici v tištěné příloze M.



Obrázek 5.7: Náhled na model modulu programátoru, strana TOP. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 5.8: Náhled na model modulu programátoru, strana BOTTOM. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 5.9: Náhled na osazený modul pro programování syntetizéru. (Zdroj: Vlastní.)

#### 5.4 Návrh modulu s MCU pro řízení přijímací části

Pro řízení přijímací části zařízení byla využita DPS, dostupná z výroby bakalářské práce, která v ni nenašla uplatnění. Jedná se o první generace desky pro generování signálů, která je čtyř vrstvou deskou, která je na obrázku 5.10. Navržená DPS je postavena na procesoru STM32G474VET, který disponuje velkým výkonem a velkým počtem ADC Sběrníc a řídicích GPIO Pinu. Úryvek z datasheet je dostupný v tištěné příloze G. Více informací o této DPS je dostupných z (Kopecký, 2021)



Obrázek 5.10: Náhled na DPS použitou v bloku přijímače, převzato z (Kopecký, 2021)

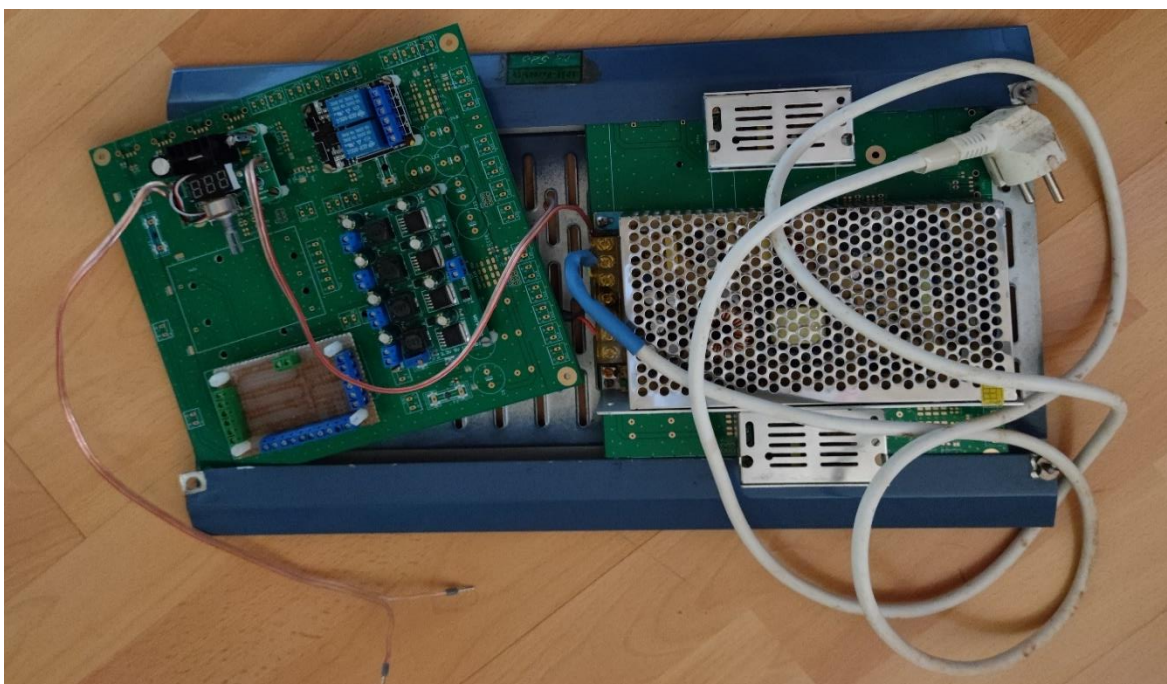


## 6 Návrh a konstrukce bloku napájecí části

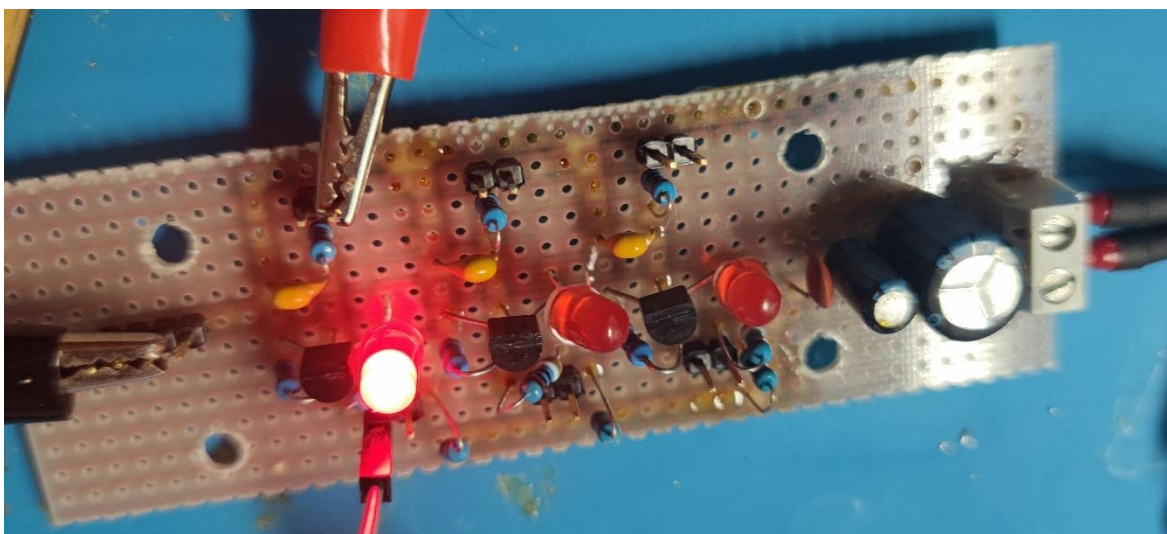
V této kapitole je rozebrána konstrukce bloku zdrojové části zařízení. V následujících odstavcích tak bude vysvětlen postup při sestavování a popis řídicího FW pro zapínání a vypínání zařízení.

### 6.1 Konstrukční část napájecí části

Napájecí část byla sestavována dle blokového schéma 3.2. V první konstrukční etapě došlo k montáži napájecích spínaných zdrojů, patrně z obrázku 6.1 a byla spájena pomocná DPS na obrázku 6.2 pro spínání relé a vytápění přijímače řízeného pomocí MCU.

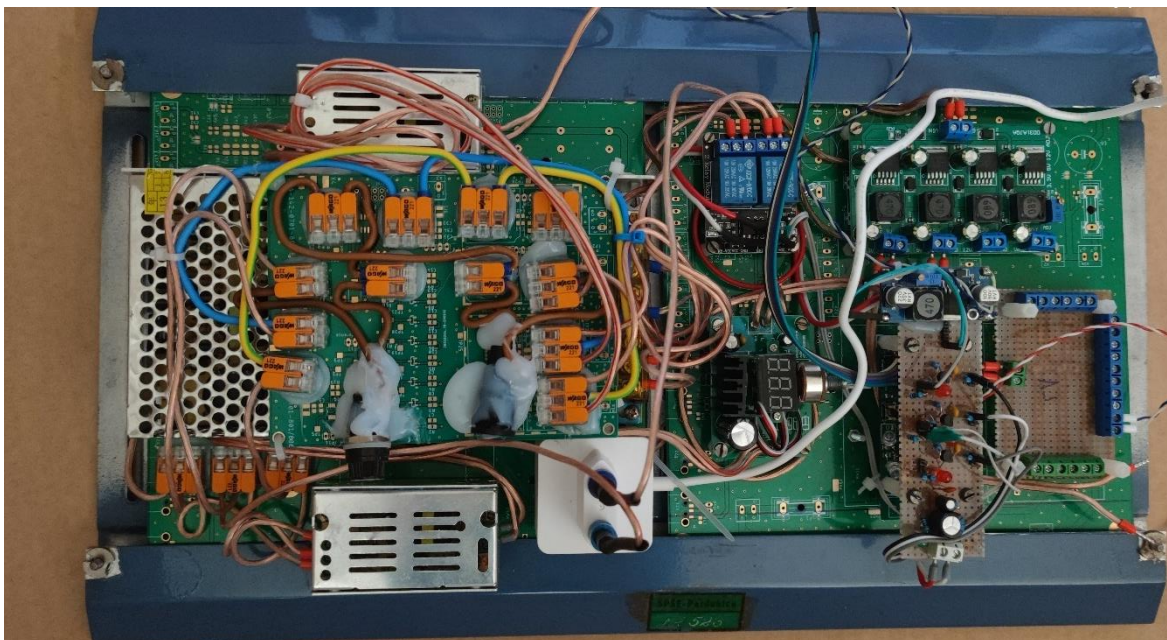


Obrázek 6.1: Náhled na sestavování zdrojové části do spodní části bedny. (Zdroj: Vlastní.)

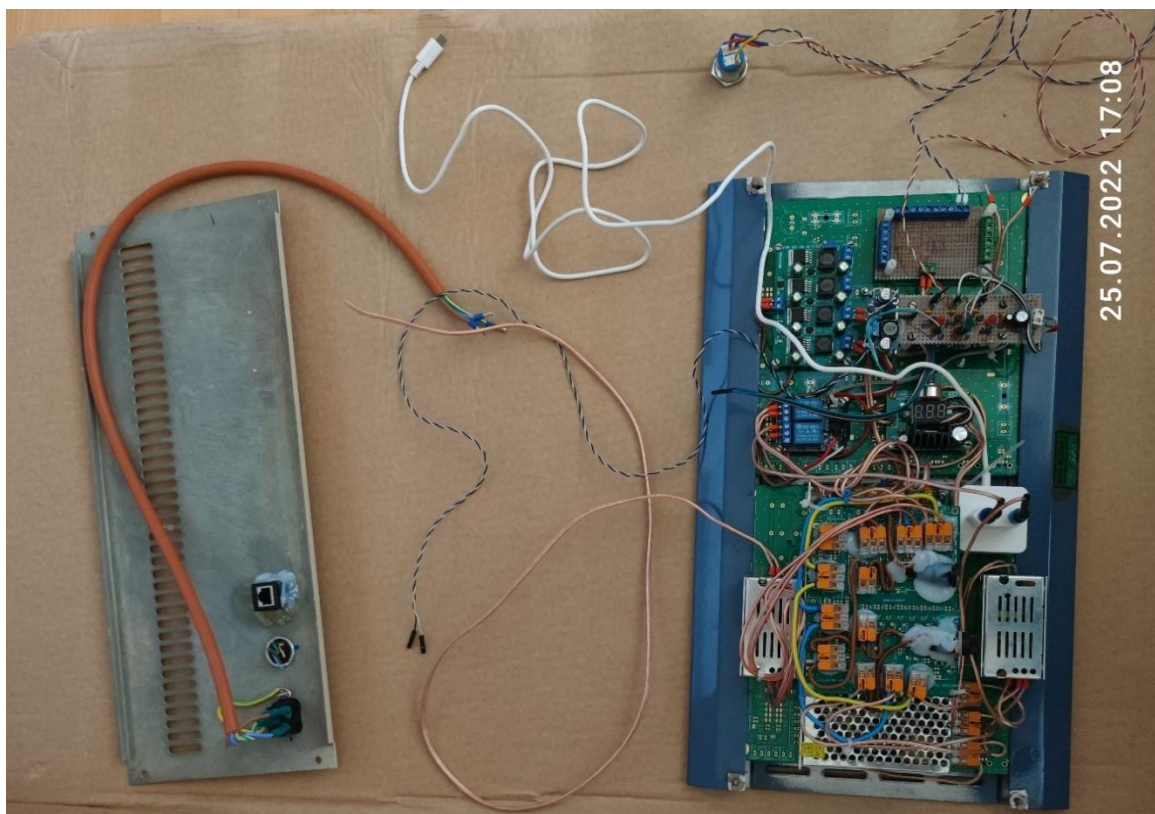


Obrázek 6.2: Náhled na osazenou pomocnou DPS spínačů pro spínání relé. (Zdroj: Vlastní.)

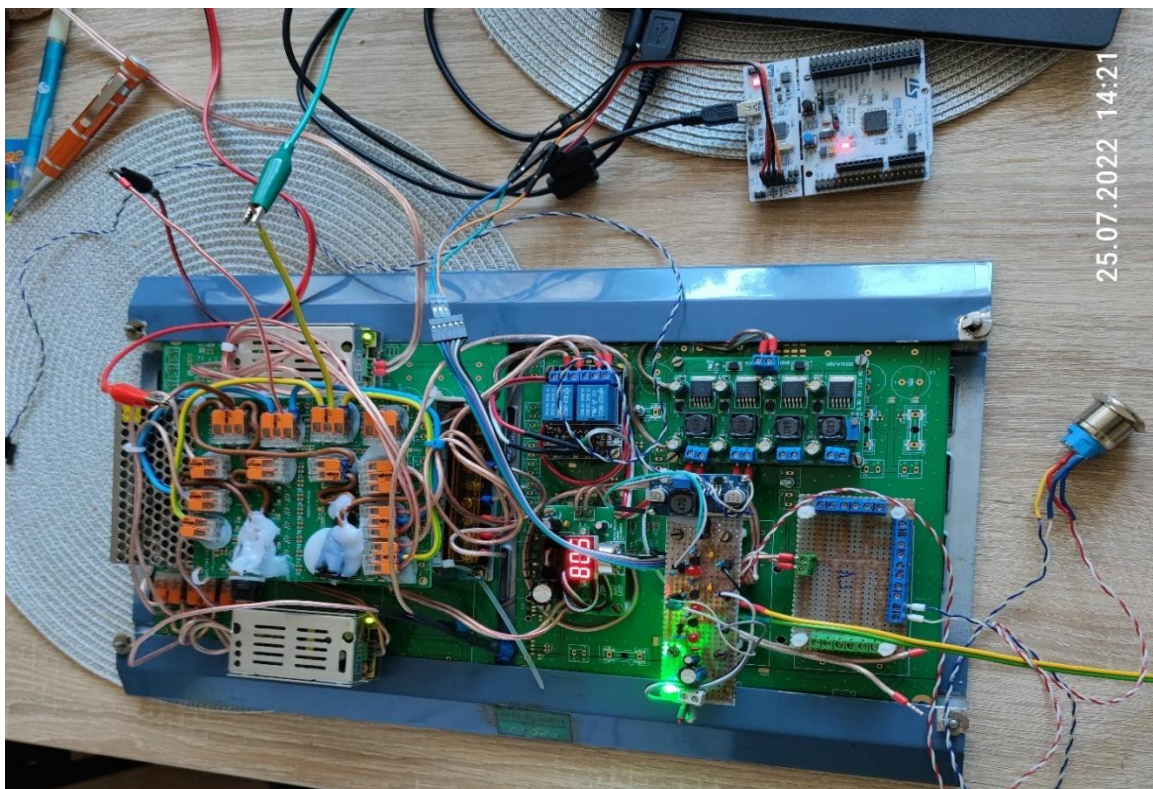
Následně byla provedena montáž zbývajících modulů na DPS Panel, patrně z obrázku 6.3, dále byla provedena příprava na připojení k síťovému napětí, na obrázku 6.4. Následoval test s finálním měřením napájecí části, který proběhl úspěšně. Na obrázcích 6.5 je patrné chování bloku v režimu Stand-by a na obrázku 6.6 při normálním režimu.



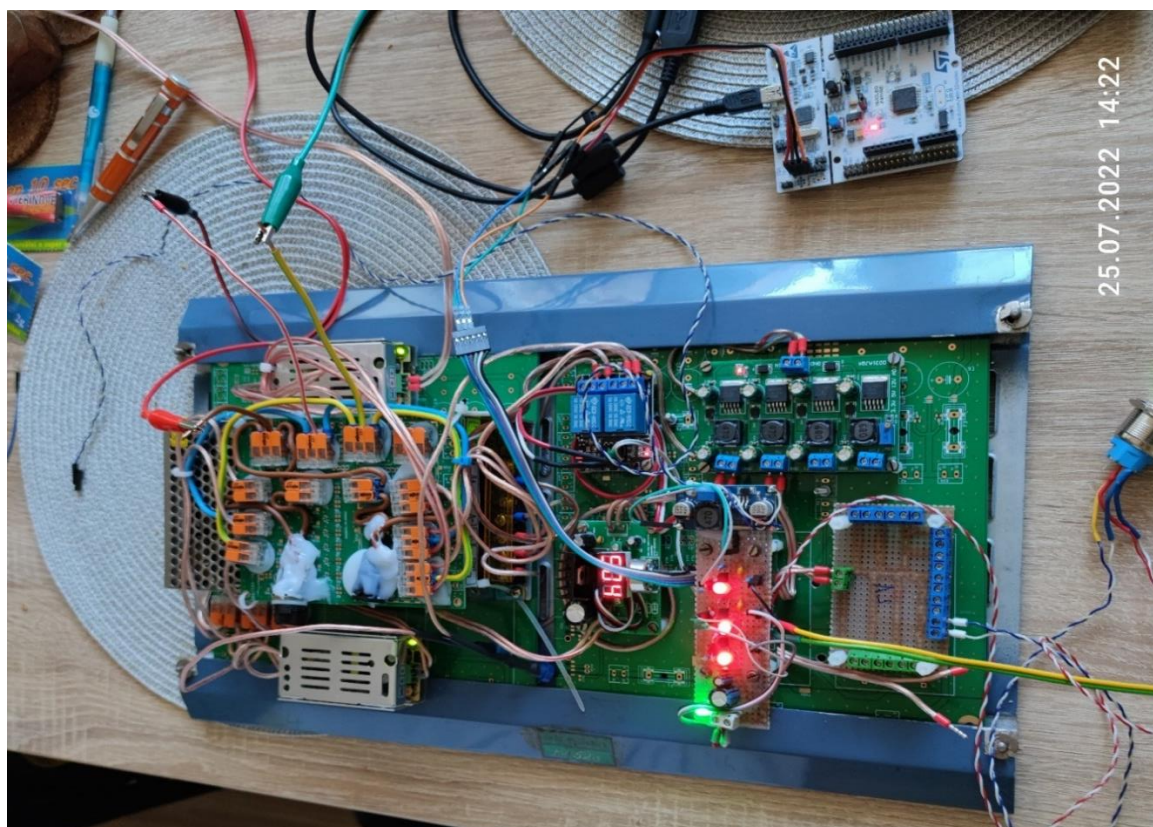
Obrázek 6.3: Náhled na osazení celého bloku zdrojové části zařízení. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 6.4: Náhled na osazení celého bloku zdrojové části zařízení – připojení síťového napětí. (Zdroj: Vlastní.)



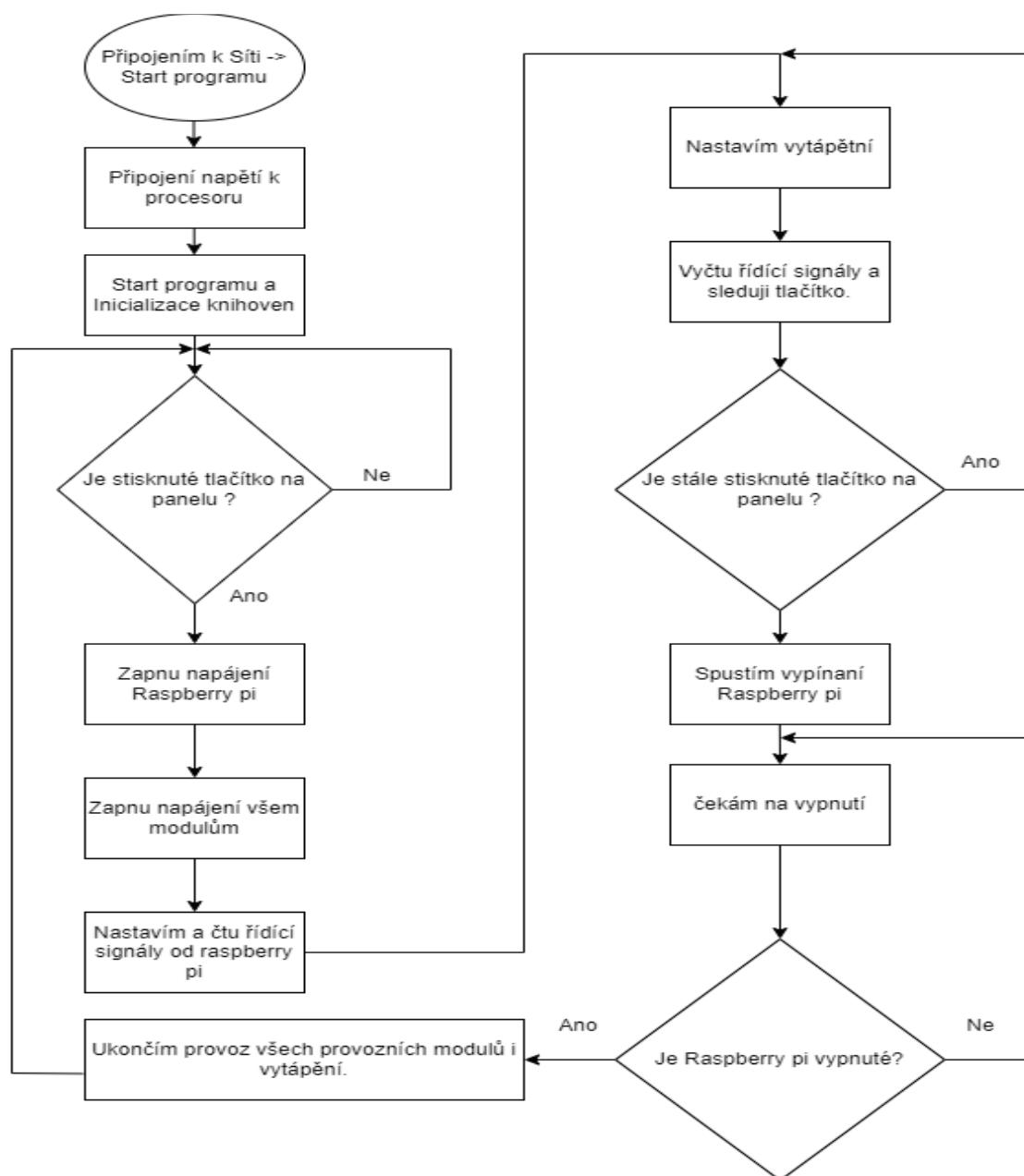
Obrázek 6.5: Náhled na osazení celého bloku zdrojové části zařízení – režim Stand-by.  
(Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 6.6: Náhled na osazení celého bloku zdrojové části zařízení – režim normální.  
(Zdroj: Vlastní.)

## 6.2 Popis řídicího FW napájecí části

Firmware pro napájecí část byl napsán v jazyku C a běží na procesoru STM32L072KZ. Jeho úkolem je zajistit bezpečné chování zařízení po připojení k síťovému napětí a přechod ze Stand-by do normálního režimu dle stisku spínacího tlačítka na panelu, zajistit dodání napájení pro Raspberry Pi a následné spuštění všech měřících součástí v zařízení. Dalším jeho úkolem je zajištění vytápění přijímací části pro zlepšení stability přijímacích detektorů výkonu. Při stisku tlačítka na panelu pro vypnutí pak zajišťuje bezpečné odstavení Raspberry Pi po vypnutí operačního systému, které detekuje přes řídicí signály a následně odstává celé měřící ustrojí opět do režimu Stand-by. Na následujícím obrázku 6.7 je vykreslen vývojový diagram funkce zařízení.



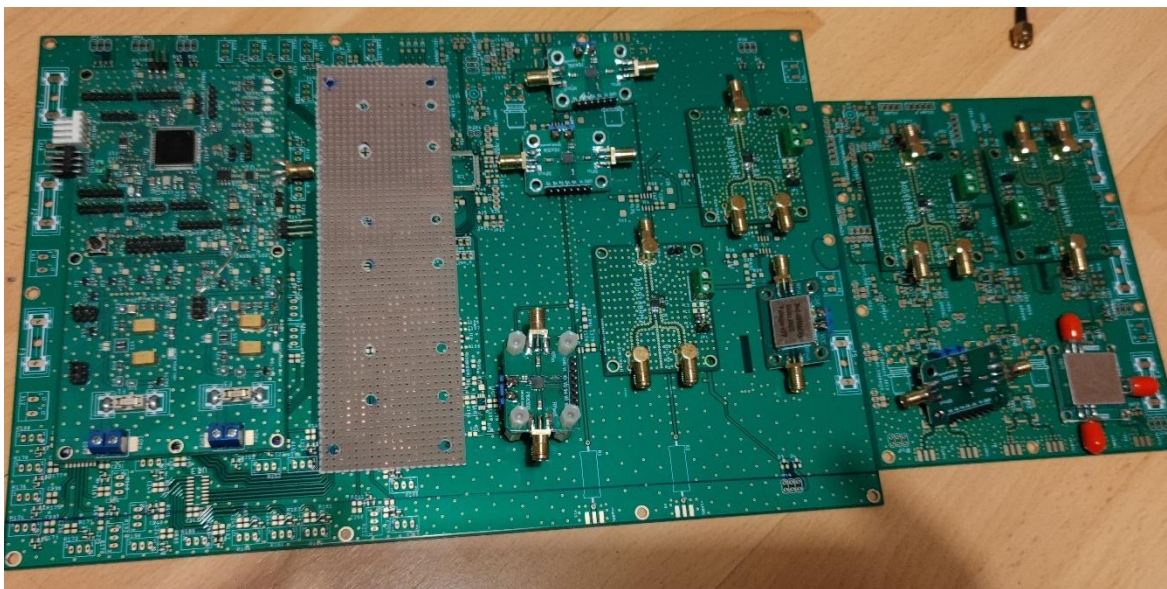
Obrázek 6.7: Stručný vývojový diagram k FW pro zapínání a vypínání zařízení. (Zdroj: Vlastní.)

## 7 Návrh a konstrukce bloku přijímací části

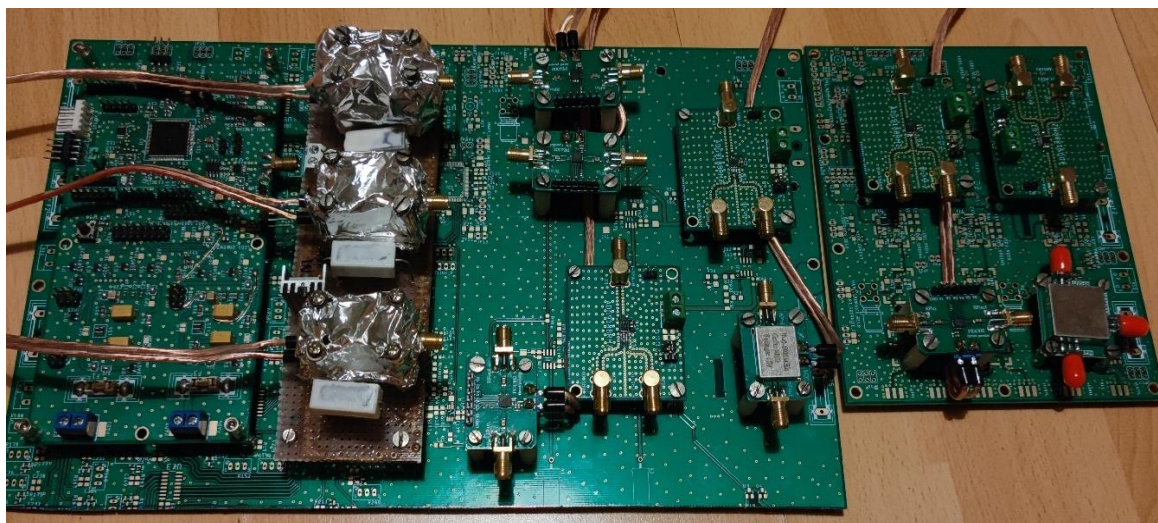
V této kapitole je rozebrána konstrukce bloku přijímací části zařízení. V následujících odstavcích tak bude vysvětlen postup při sestavování a popis řídicího FW pro měřící úkony, dále pak popis vykonaného měření měřících tras i výsledná kalibrace hlavního kanálu.

### 7.1 Konstrukční část přijímací části

Přijímací část byla sestavovaná dle blokového schéma 3.3. Na prvních dvou obrázcích 7.1 a 7.2 je viditelné prvotní sestavení přijímače na DPS panelu. Jsou zde viditelné použité programovatelné atenuátory, přepínače signálu a zesilovač. V levé části je poté řídicí DPS s MCU STM32G474VET, která ovládá všechny říditelné prvky pomocí GPIO Pinu a komunikuje s řídicí částí po USB.



Obrázek 7.1: Náhled na osazování modulu bloku přijímací části – rozřazení. (Zdroj: Vlastní.)

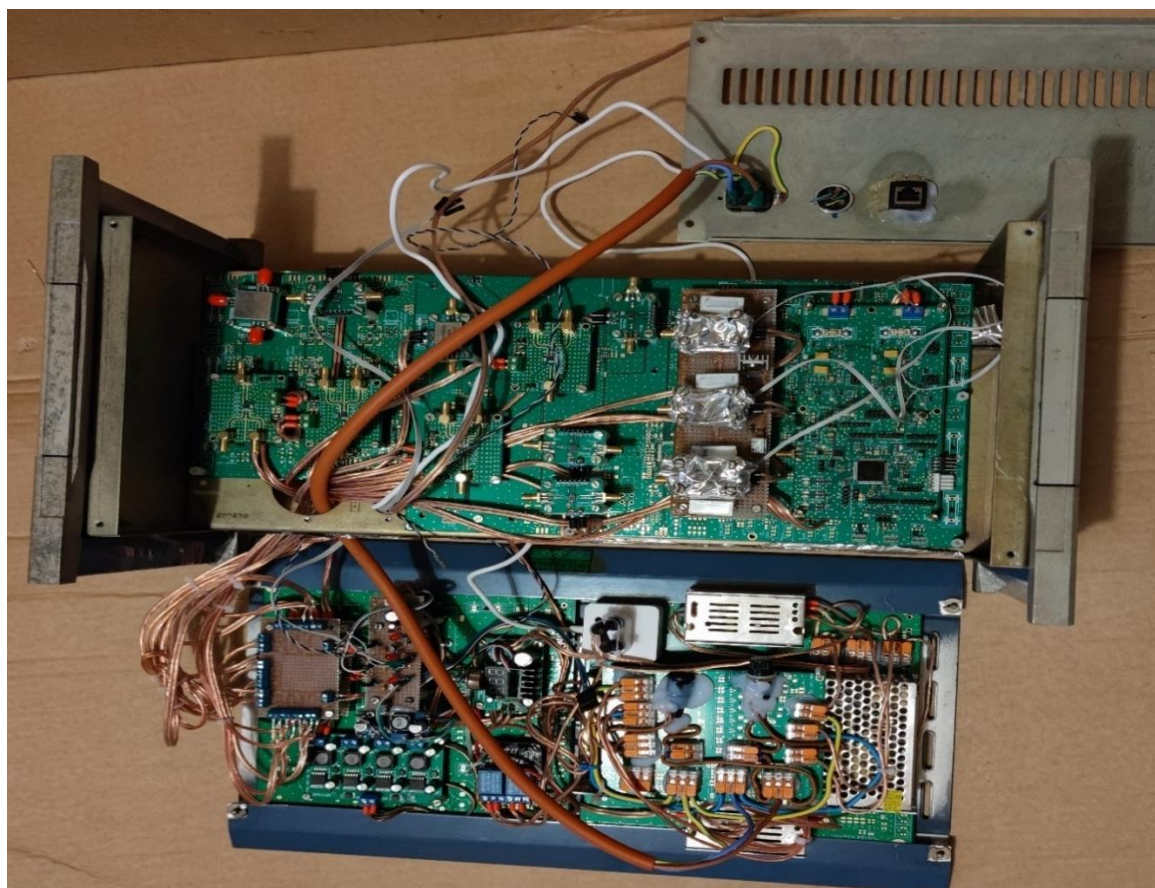


Obrázek 7.2: Náhled na osazování modulu bloku přijímací části – rozřazení a montáž. (Zdroj: Vlastní.)

Následně byla provedena montáž panelu do kovové krabice, viditelné na obrázku 7.3, kde byla provedena integrace s blokem napájecího zdroje, který je popsán v předchozí kapitole. Tato integrace zatím bez signálových vodičů je vyobrazena na obrázku 7.4.

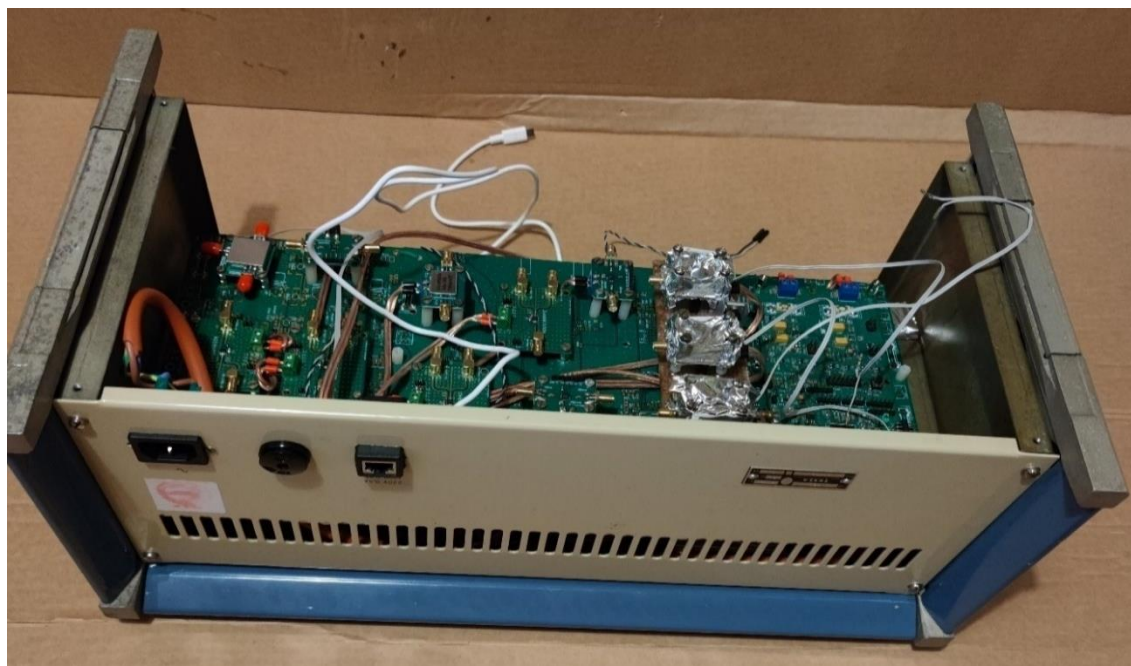


**Obrázek 7.3: Náhled na osazený blok přijímací části do krabice. (Zdroj: Vlastní.)**



**Obrázek 7.4: Náhled na kompletní montáž zdroje a přijímací části do krabice – detail na rozložení. (Zdroj: Vlastní.)**

Následně byla provedena montáž bloku zdroje do krabice a vzniká tak celistvá část zařízení, patrně z obrázku 7.5. V další fázi byly připevněny všechny signálové vodiče SMA-SMA pro propojení všech modulů přijímací části a bylo provedeno zkušební zapnutí zařízení s blokem zdroje a blokem přijímače, patrně z 7.6. Následně již bylo možné přejít na programování Firmware.



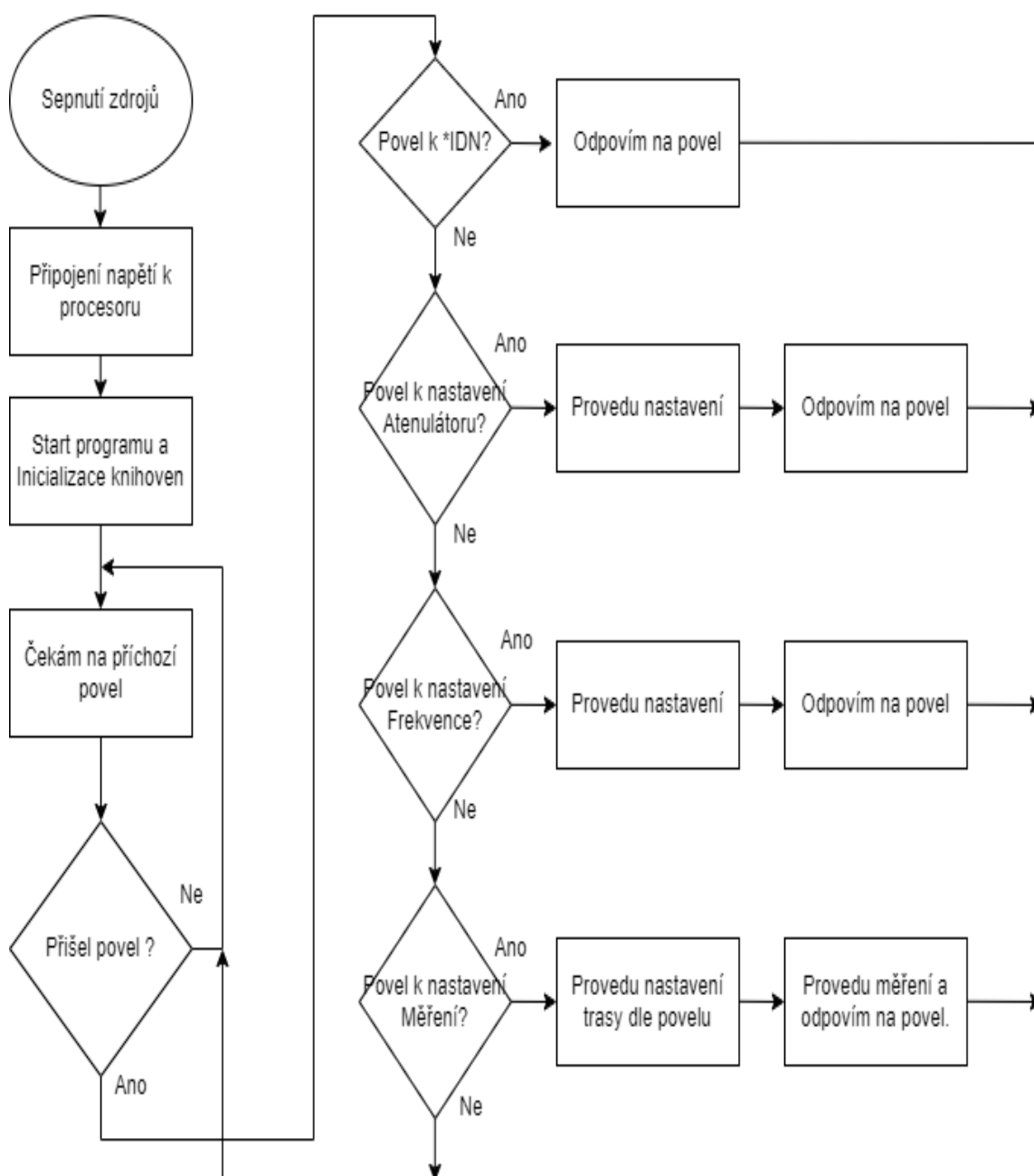
Obrázek 7.5: Náhled na smontovanou část krabice obsahující zdroj a přijímací část – zadní pohled. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 7.6: Náhled na smontovanou část krabice obsahující zdroj a přijímací část – přední pohled. (Zdroj: Vlastní.)

## 7.2 Popis řídicího FW přijímací části

Řídicí firmware pro blok přijímače je určen k řízení všech elektronických ovladatelných prvků ve všech přijímacích trasách. Po zapnutí této části jsou všechny trasy nastaveny na maximální hodnotu atenuace, aby nedošlo k poškození některé z částí. Dle příkazu, jaký přijde do MCU po USB, je zajištěn požadovaný stav. Příkazy elektronicky nastaví všechny atenuátory v trase, dále pak přepínání vysokofrekvenčních spínačů v trase a vyčtení naměřené hodnoty z výkonového detektoru. Popis funkce Firmware je podrobně rozkreslen na obrázku 7.7. vývojovým diagramem.

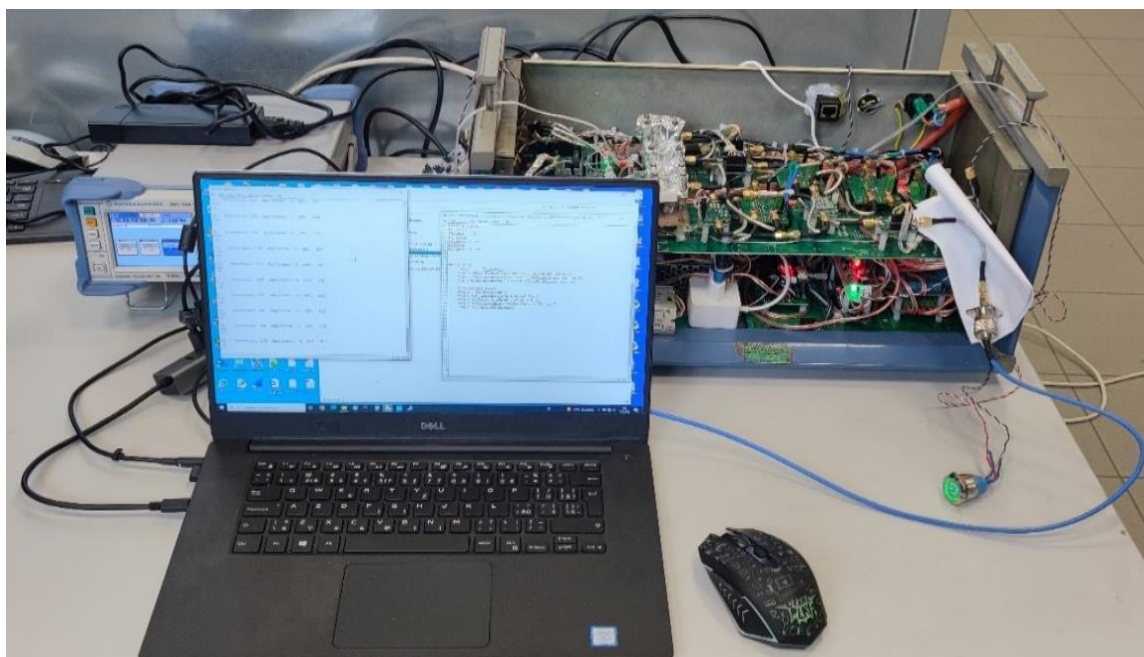


Obrázek 7.7: Stručný vývojový diagram k FW pro ovládání funkce přijímací části zařízení. (Zdroj: Vlastní.)

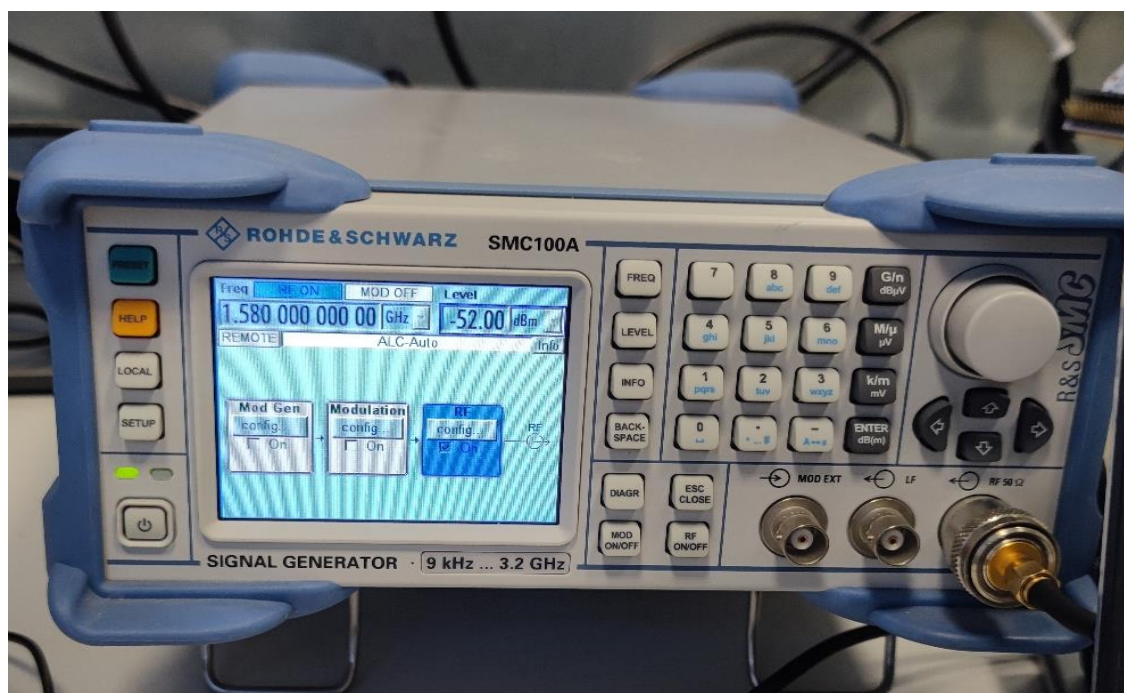


### 7.3 Popis měření přijímací části

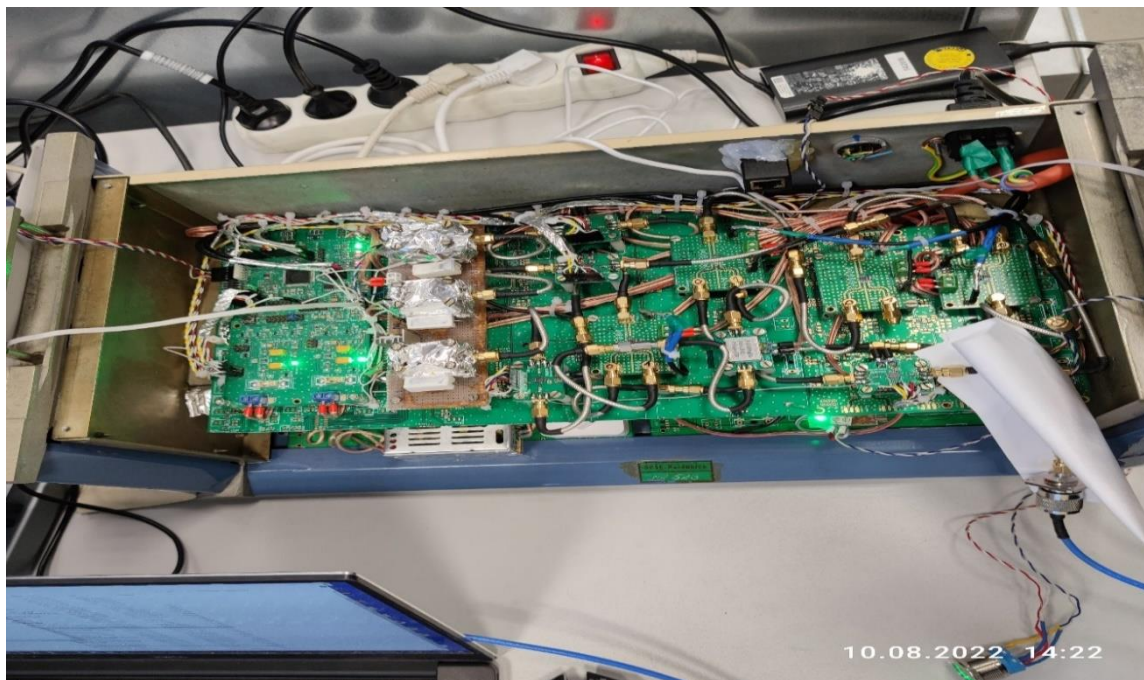
Měření bloku přijímací části probíhalo v laboratoři na Univerzitě Pardubice. Pohled na měřicí pracoviště je zachycen obrázky 7.8 až 7.10. Nejprve byla provedena vektorová analýza přenosových tras pomocí vektorového analyzátoru, kde výsledky z měření jsou popsány v kapitole 7.4. Následně bylo provedeno kalibrační měření výkonových detektorů popsané v kapitole 7.5, kde výsledky těchto měření jsou patrné z obrázku 7.15.



Obrázek 7.8: Náhled na měřicí pracoviště – celkový pohled. (Zdroj: Vlastní.)



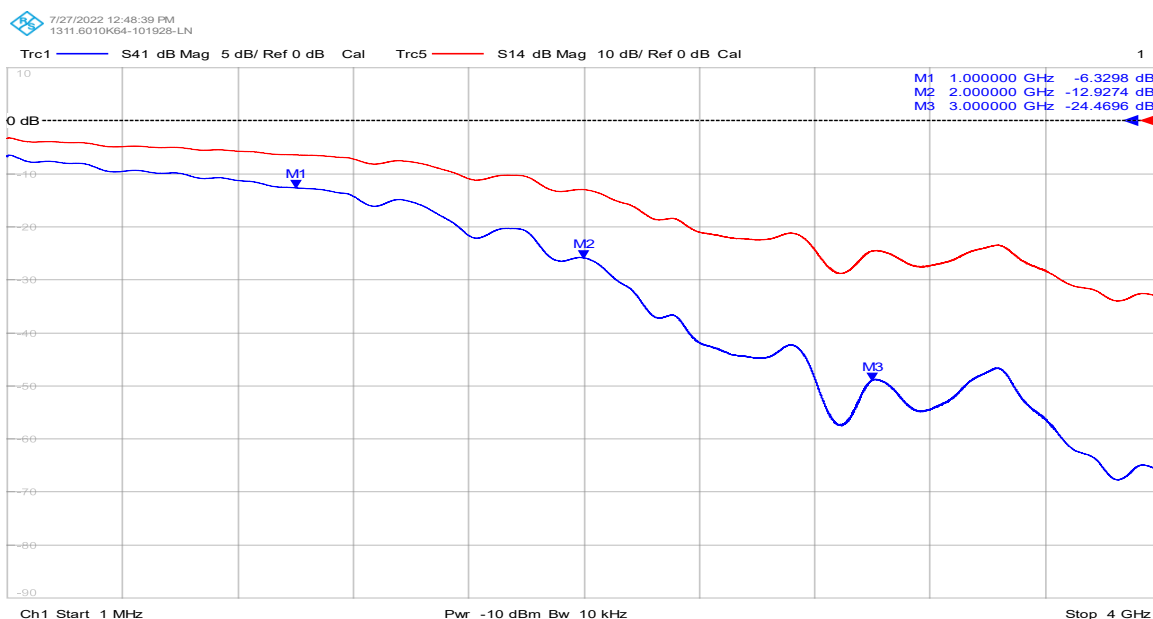
Obrázek 7.9: Náhled na nastavený generátor ovládaný přes SCPI. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 7.10: Náhled na přijímací část zařízení s probíhajícím měřením. (Zdroj: Vlastní.)

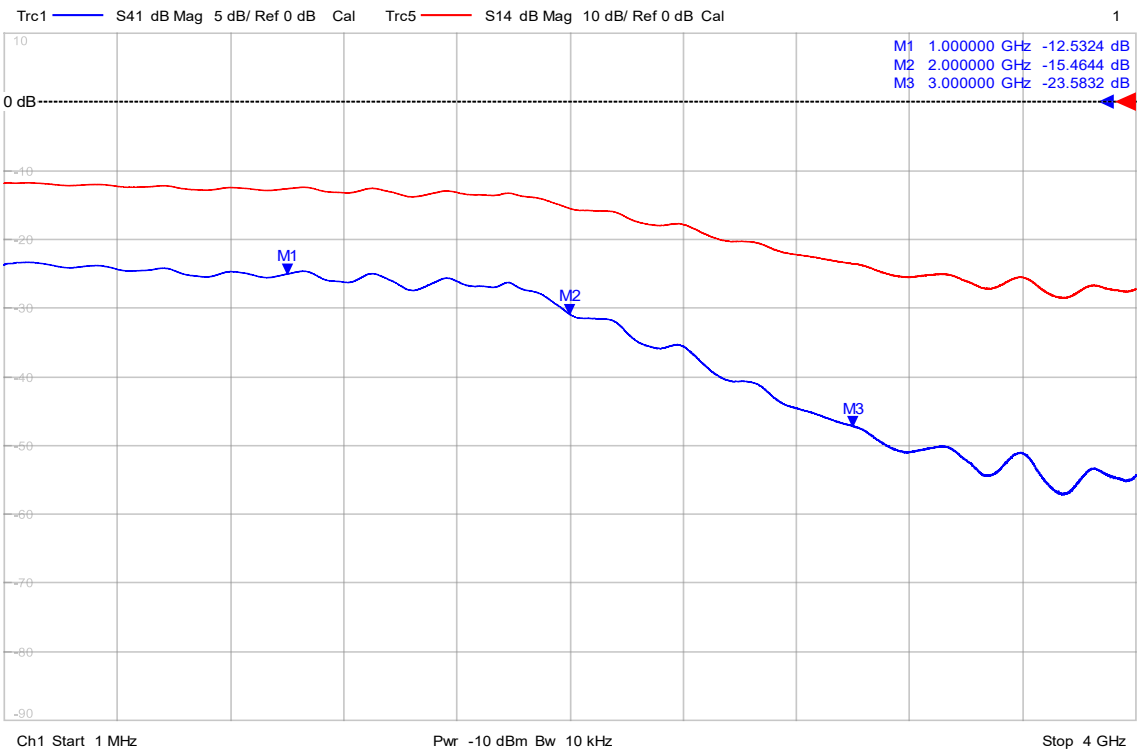
#### 7.4 Měření vlastností přijímače použitého v analyzátoru

Pro měření přenosu všemi 4 dostupnými přijímacími trasami bylo využito školního vektorového analyzátoru Rhode & Schwarz ZNB 20. Na následujícím obrázku 7.11 je vidět přenos  $|S_{41}|$  pro průchod kanálem pro kontrolní měření výkonu na vstupu. Další obrázek 7.12 poskytuje povědomí o přenosu  $|S_{41}|$  pro průchod kanálem pro kontrolní měření vysílaného výkonu na směrové odbočnici. Poslední dva obrázky doplňují informaci pro měření  $|S_{41}|$  hlavního měřicího kanálu ve verzi se zesilovačem 7.13 a bez zesilovače 7.14.



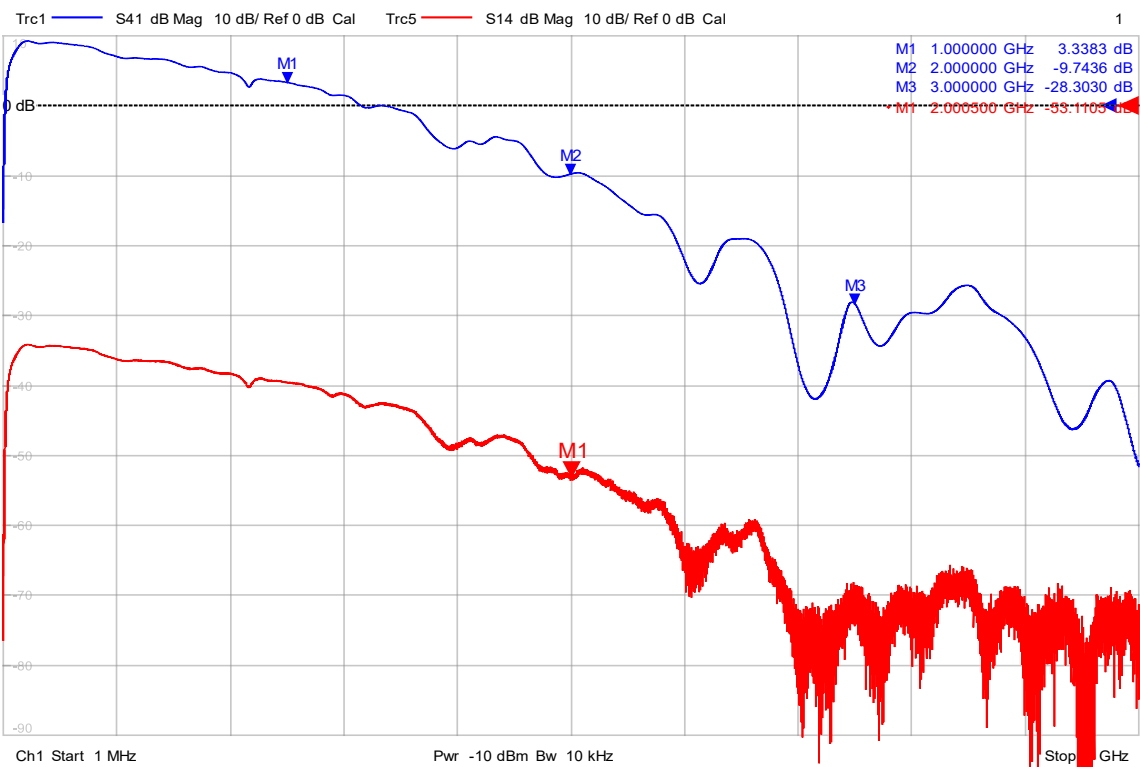
Obrázek 7.11: Náhled naměřená data přenosu  $|S_{41}|(|S_{21}|)$  pro měření kontrolního kanálu. (Zdroj: Vlastní.)

7/27/2022 12:54:29 PM  
1311.6010KB4-101928-LN

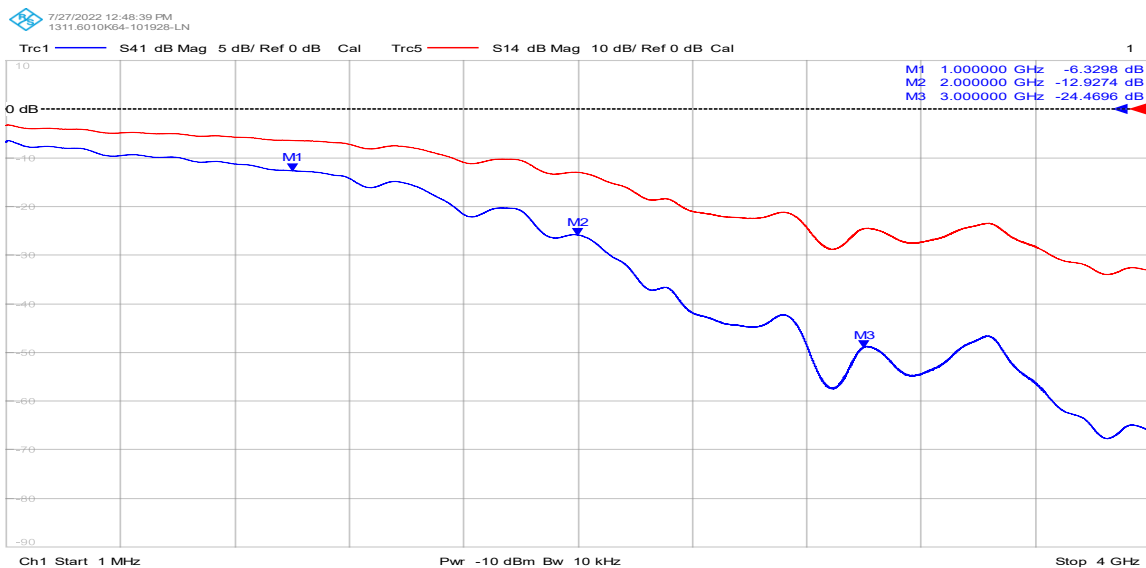


**Obrázek 7.12: Náhled naměřená data přenosu  $|S_{41}|(|S_{21}|)$  pro měření odbočeného kanálu. (Zdroj: Vlastní.)**

7/27/2022 3:13:24 PM  
1311.6010KB4-101928-LN



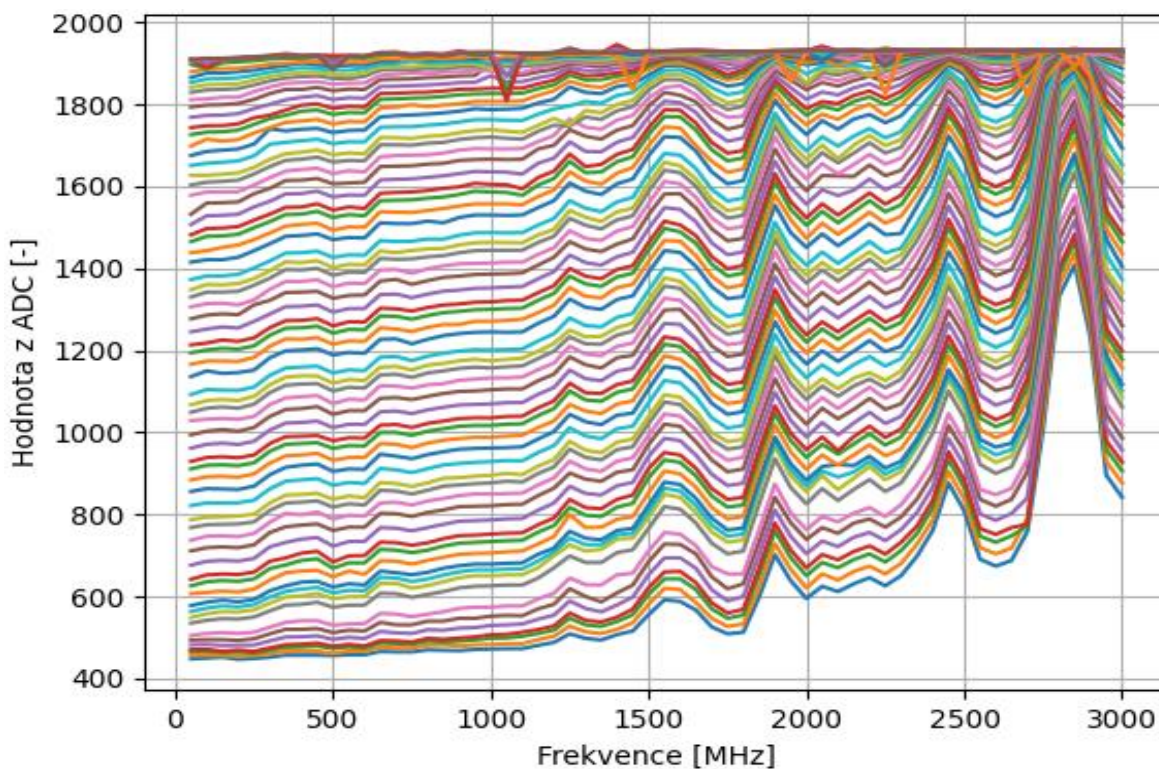
**Obrázek 7.13: Náhled naměřená data přenosu  $|S_{41}|(|S_{21}|)$  pro měření hlavního kanálu se zesilovačem. (Zdroj: Vlastní.)**



Obrázek 7.14: Náhled naměřená data přenosu  $|S_{41}|(|S_{21}|)$  pro měření hlavního kanálu bez zesilovače. (Zdroj: Vlastní.)

## 7.5 Popis kalibrace přijímací části

Měření kalibrací bylo provedeno automatizovaným měřením s generátorem R&S SMC100 a přijímací částí zařízení. Bylo využito jazyku Python a knihovny pyvisa s SCPI příkazy pro ovládání přístrojů. Výsledky měření jsou patrné z grafu na obrázku 6.15. Dle výsledků lze uvažovat o použití rozsahu od 10 MHz do 1600 MHz s cejchovanou citlivostí do -55 dBm.



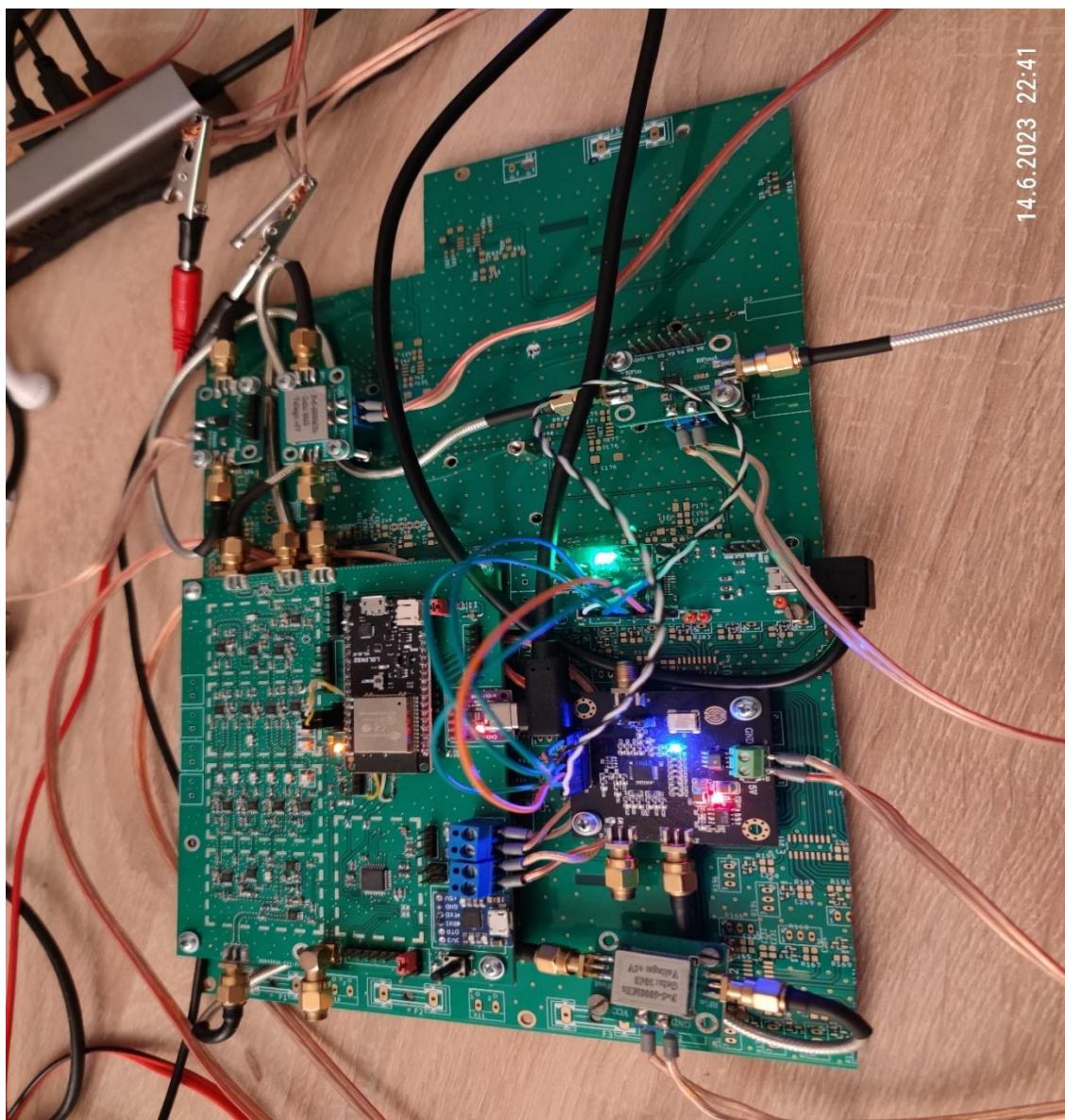
Obrázek 7.15: Náhled na naměřené kalibrační křivky bloku přijímací části. (Zdroj: Vlastní.)

## 8 Návrh a konstrukce bloku vysílací části

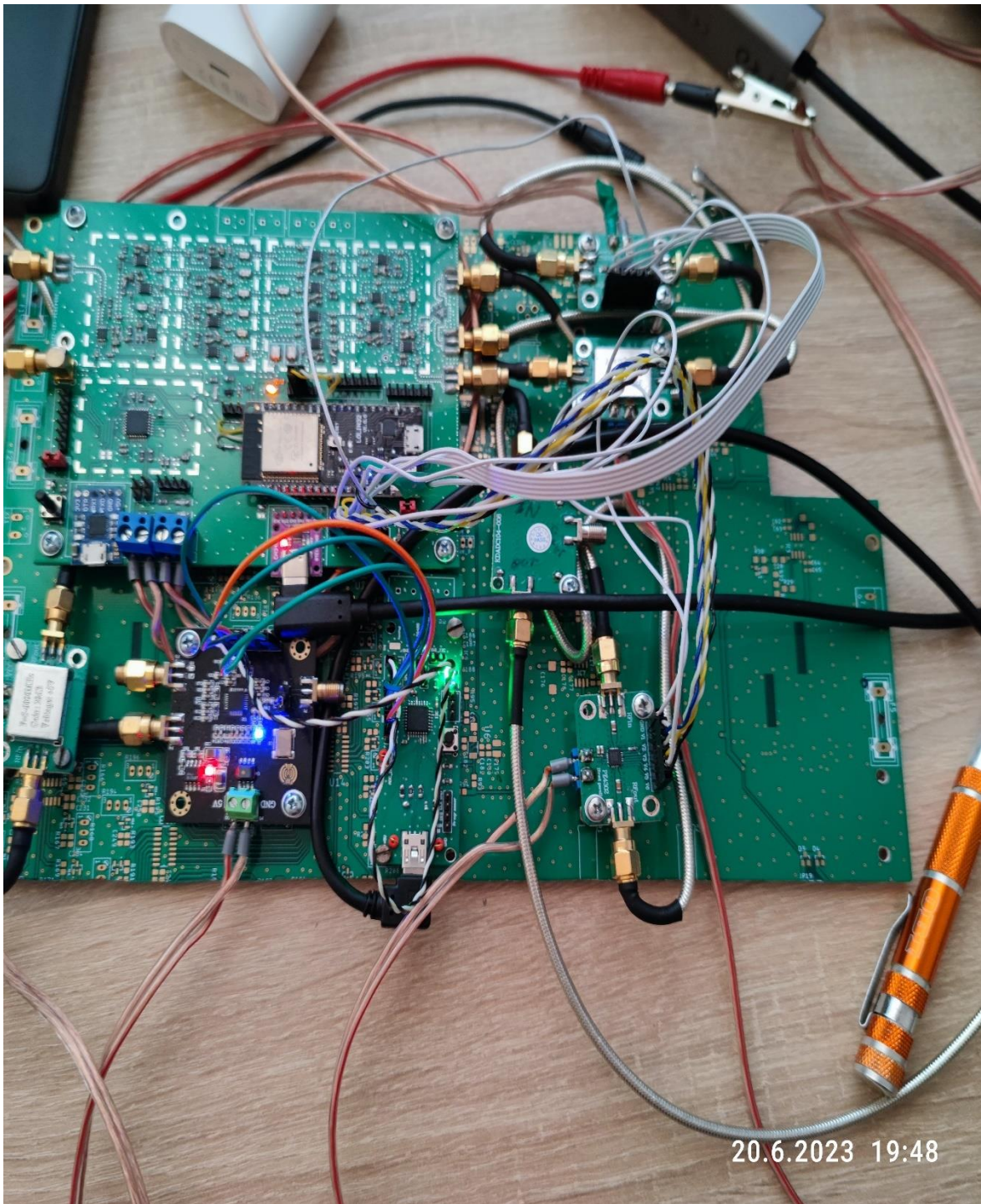
V této kapitole je rozebrána konstrukce bloku vysílací části zařízení. V následujících odstavcích tak bude vysvětlen postup při sestavování a popis řídicího FW pro vysílací úkony při měření, dále pak popis vykonaného kalibračního měření vysílacího portu 1.

### 8.1 Konstrukční část vysílací části

V rámci řešení signálové cesty bylo nejprve nutné sestavit moduly vysílací části na DPS panel. Následně ze získaných předchozích měření propojit měřicí cestu. Následně bylo možné nahrát FW pro programátor syntetizéru a programovat FW pro filtrační modul. Postupným měřením byl vysílač oživován a měřen. Na obrázcích 8.1 a 8.2 je znázorněn průběh oživování a měření vysílacího bloku.

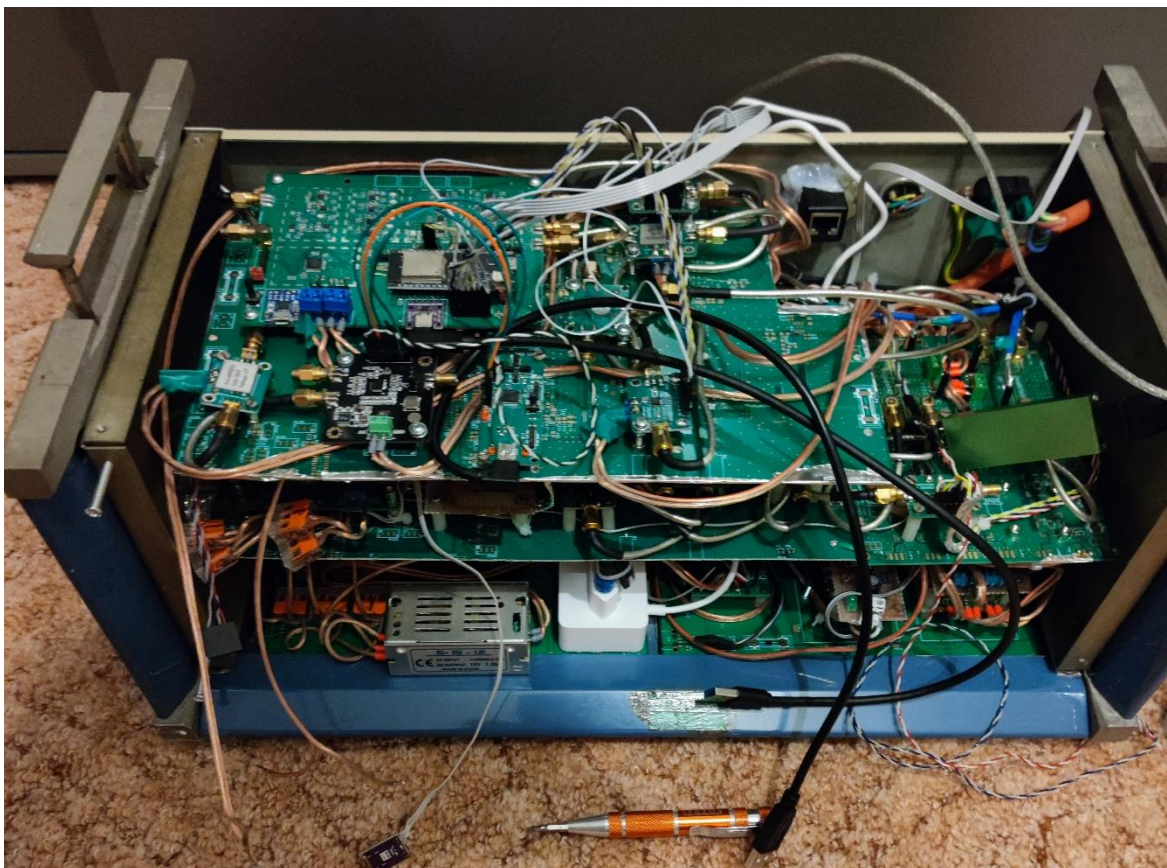


Obrázek 8.1: Náhled na sestavování bloku vysílací části – detail na syntetizér a filtrační část.  
(Zdroj: Vlastní.)



**Obrázek 8.2: Náhled na kompletně sestavený blok vysílací části zařízení. (Zdroj: Vlastní.)**

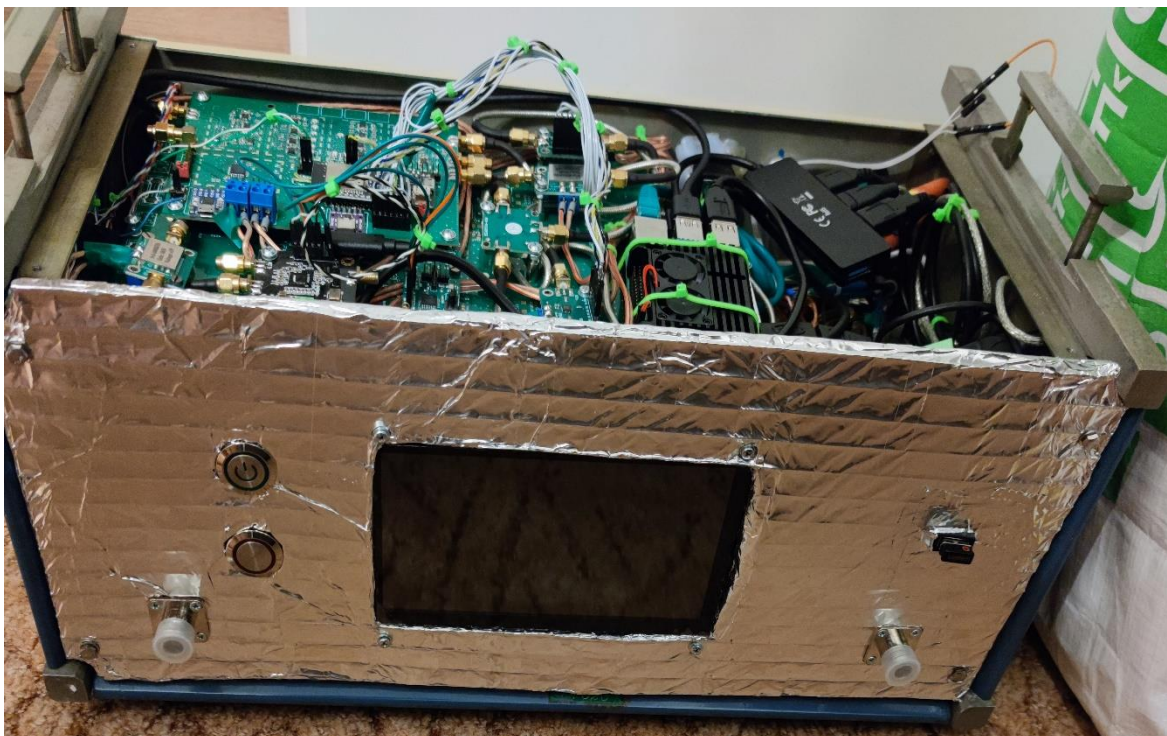
Po úspěšném měření oživených částí bylo možné integrovat do bedny i vysílací část jako nastavbu nad část přijímací. Blok vysílání byl opatřen o stínící fólií ze spodní strany panelu, aby nedocházelo k silnému ovlivňování přijímací části vysokým vysílacím výkonem. Instalace do bedny je znázorněna obrázkem 8.3. Následně byl přidělán vyrobený přední panel s integrací ovládacích prvků a displeje a kompletní blok řídicí části zařízení, znázorněno obrázky 8.4 a 8.5. Následně bylo provedeno testovací zapnutí zařízení, z obrázku 8.6.



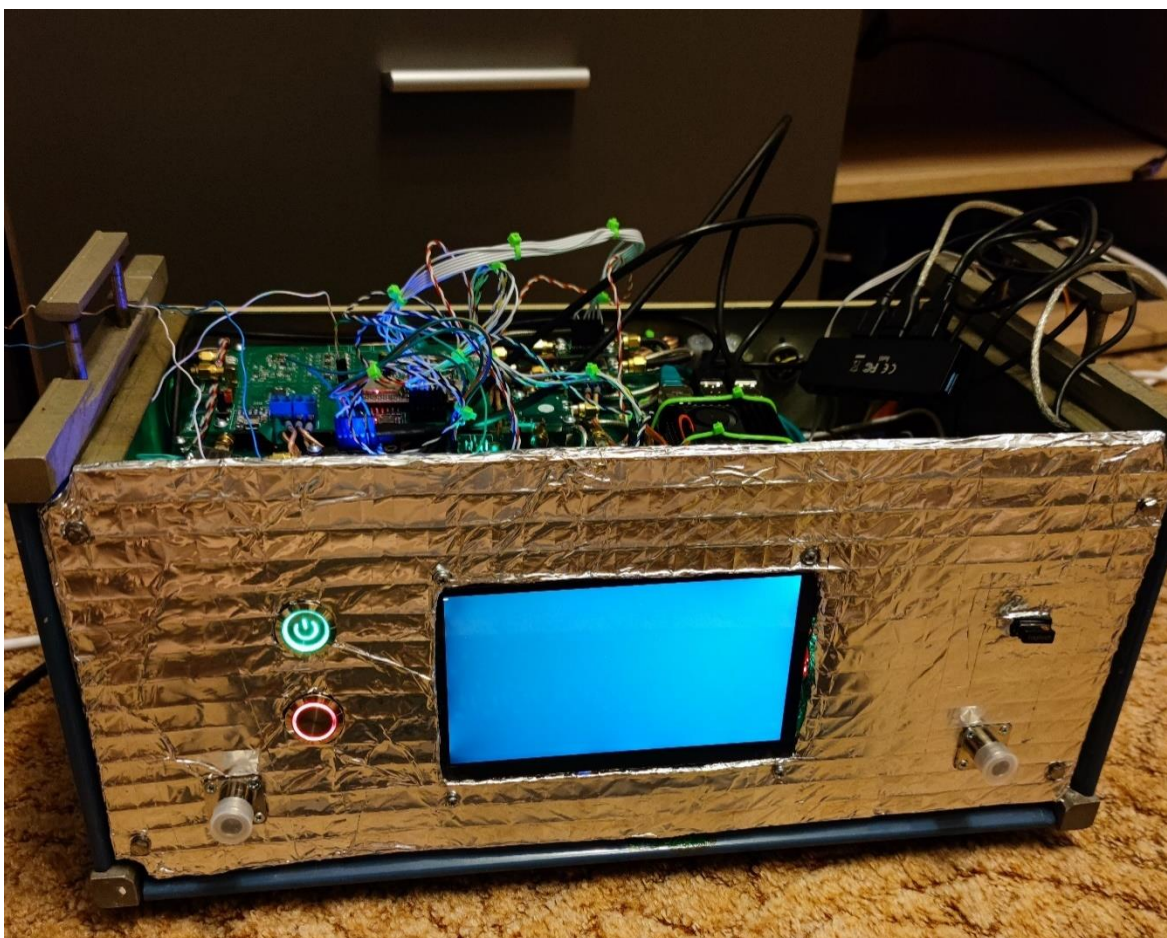
Obrázek 8.3: Náhled na montáž do bedny k ostatním blokům. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 8.4: Náhled na smontovanou bednu se všemi bloky. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 8.5: Náhled na bednu s detailem na přední panel zařízení. (Zdroj: Vlastní.)

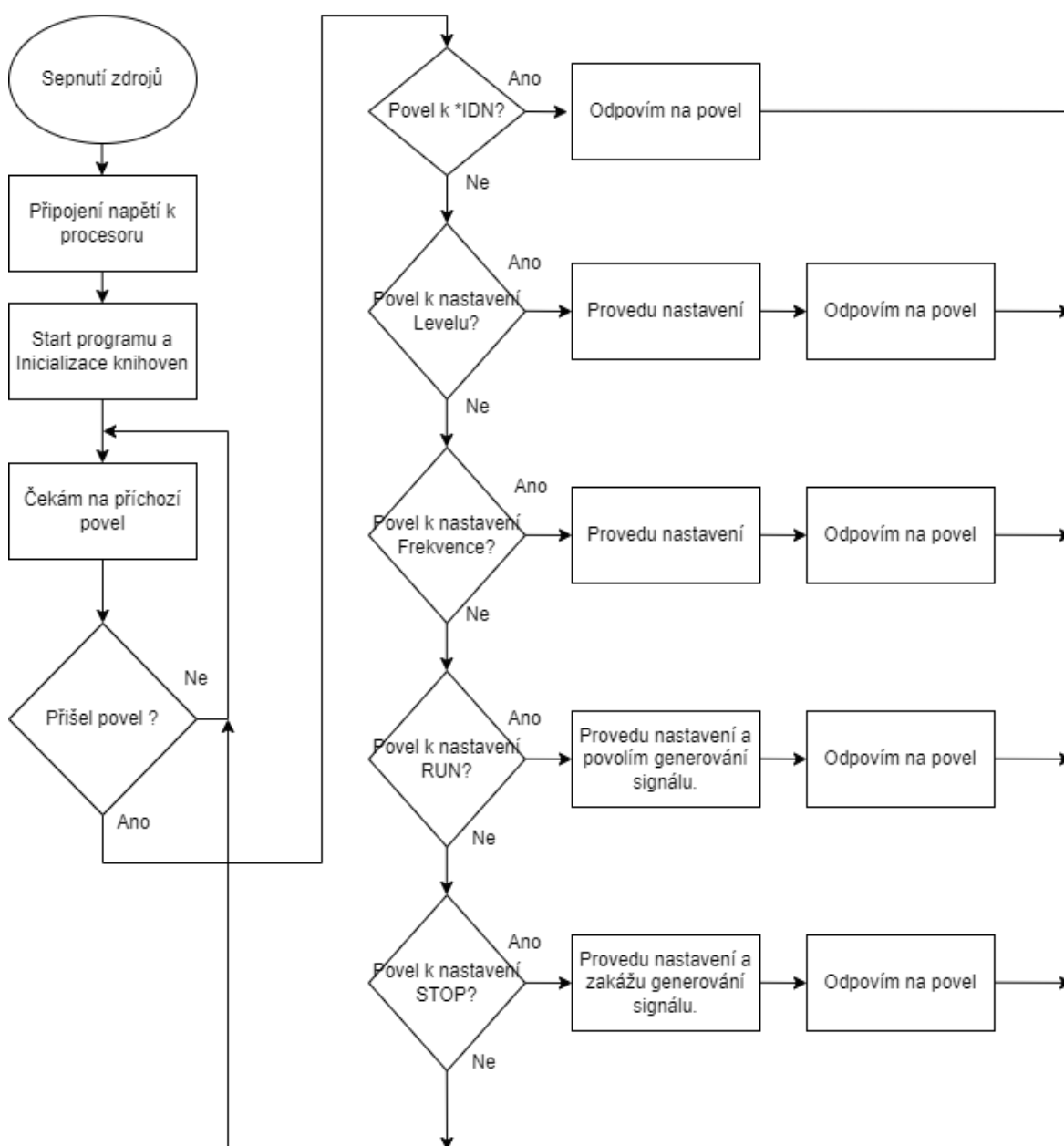


Obrázek 8.6: Náhled na oživené zařízení. (Zdroj: Vlastní.)



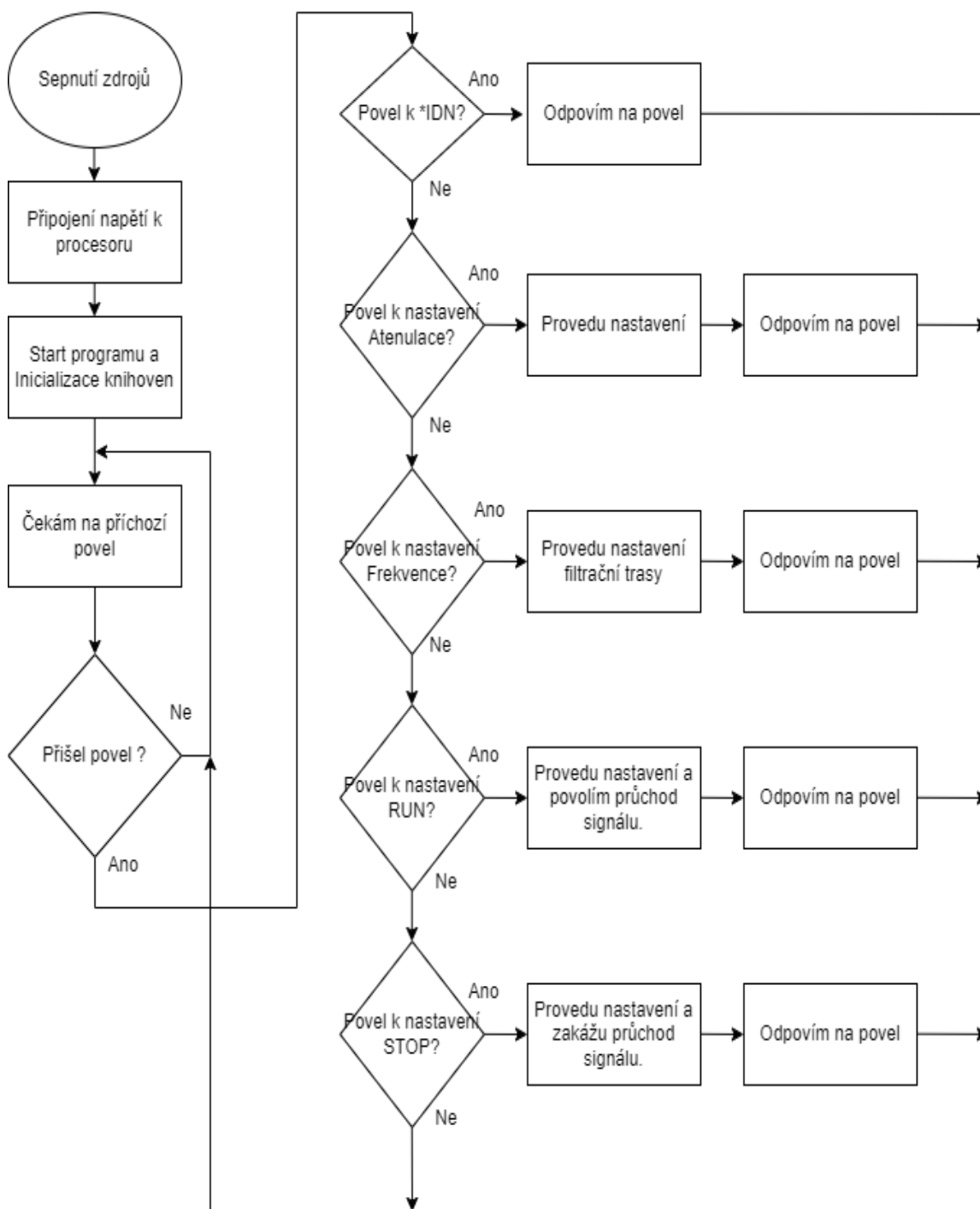
## 8.2 Popis řídicího FW vysílací části

V rámci řešení vysílací části bylo nutné připravit Firmware pro programování syntetizéru a pro ovládání filtrační části. Firmware pro ovládání programování syntetizéru je vyobrazen vývojovým diagramem na obrázku 8.7. Po startu MCU dojde k inicializaci knihoven a procesor bliká a očekává povel, kterým dochází k nastavovací interakci. Po příchozím povelu dojde k nastavení vnitřních podmínek a výpočtům hodnot pro registry. Následně je po příchozím povelu „RUN“ odesláno po SPI všech 7 registrů do syntetizéru. A dojde k požadovanému nastavení generované Frekvence a předdefinované amplitudové úrovně. Následně je možné generování zrušit příkazem „STOP“ a změnit nastavení opětovným přepisem registrů.



Obrázek 8.7: Stručný vývojový diagram k FW v MCU pro programování syntetizéru. (Zdroj: Vlastní.)

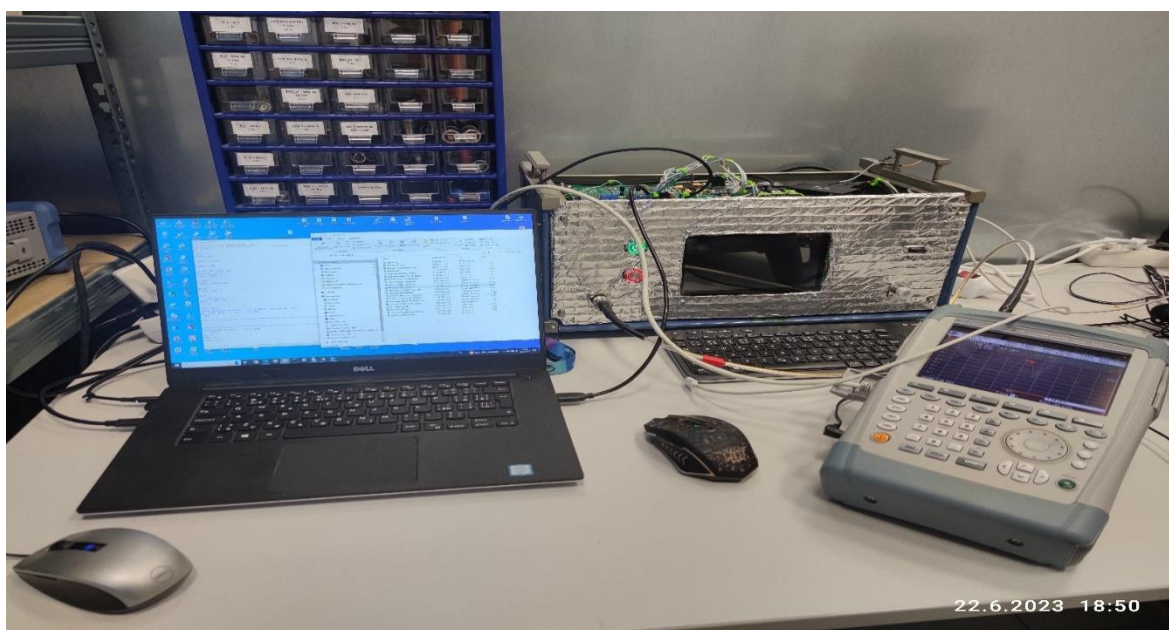
Firmware pro ovládání DPS s filtrací signálu je vyobrazen vývojovým diagramem na obrázku 8.8. Po startu MCU dojde k inicializaci knihoven a procesor bliká a očekává povel, kterým dochází k nastavovací interakci. Následným povelom pro nastavení generované frekvence dojde k úpravě trasy signálu pro zařazení správných filtrů do cesty procházejícímu signálu. Dalším povelom je možné upravit atenuaci programovatelných atenuátorů vložených po cestě generovanému signálu. Potvrzení nastavení se opět provádí povelom „RUN“. Pro zneprůchodnění signálové cesty DPS slouží příkaz „STOP“.



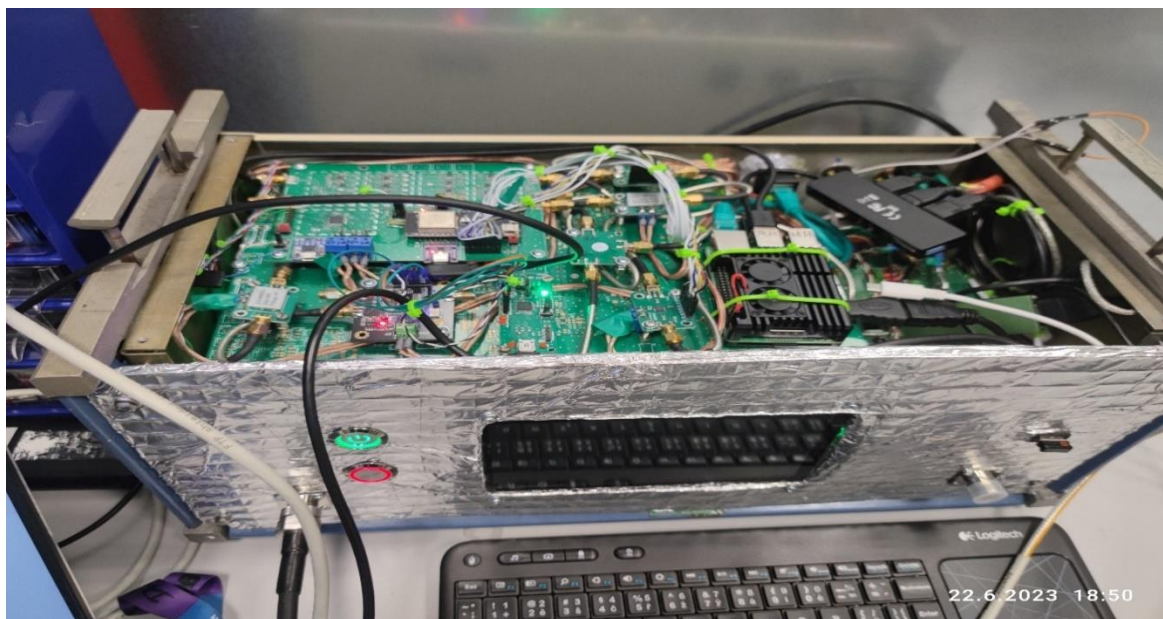
Obrázek 8.8: Stručný vývojový diagram k FW filtrační části. (Zdroj: Vlastní.)

### 8.3 Popis měření vysílací části

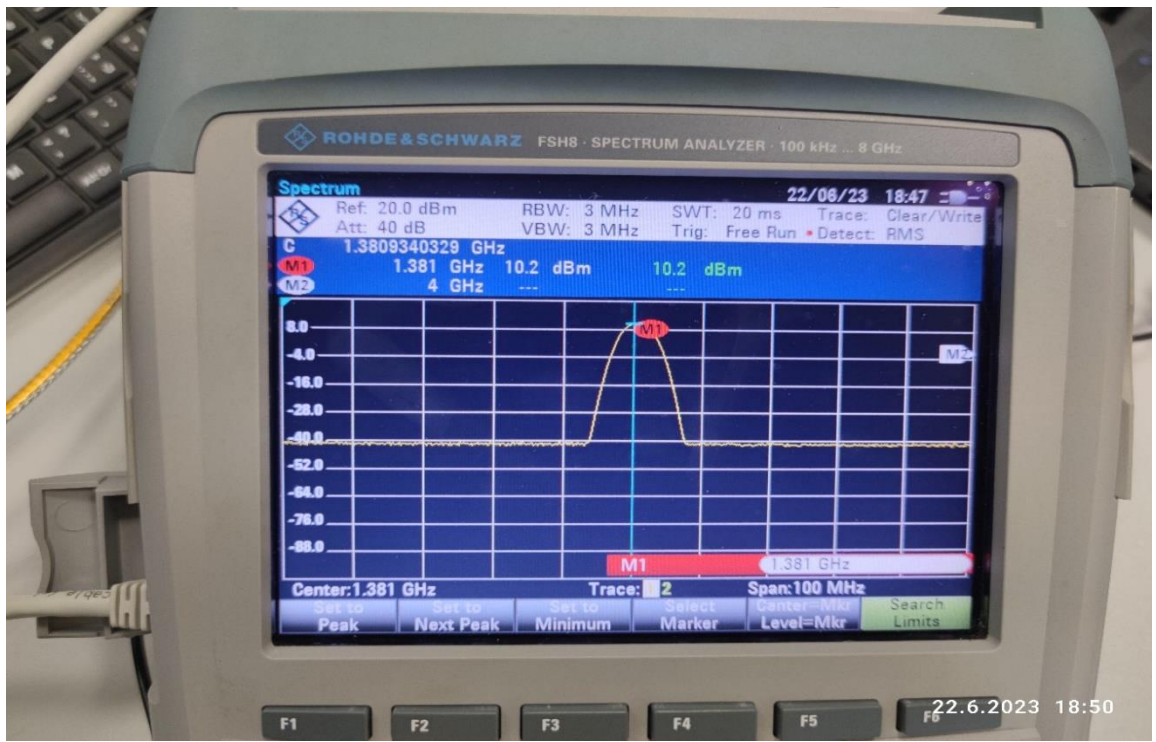
Pro měření amplitudy a frekvence z výstupního konektoru pro provedení kalibrace bloku vysílací části bylo využito školního spektrálního analyzátoru Rhode & Schwarz FSH 8. Na následujícím obrázku 8.9 až 8.11 je vyobrazeno měřicí pracoviště, které bylo použito pro měření. Další obrázek 8.12 poskytuje povědomí o měření maximálního dosaženého výkonu při použití trasy bez filtrace, vykresleno obrázky 8.13 až 8.17. Následně bylo provedeno automatizované měření pro proměření celého zvoleného rozsahu od 36 MHz do 1,6 GHz. Na základě tohoto měření byla sestavena kalibrace vysílací části, rozebrána v kapitole 8.4.



Obrázek 8.9: Náhled na měřicí pracoviště při měření vysílací části. (Zdroj: Vlastní.)



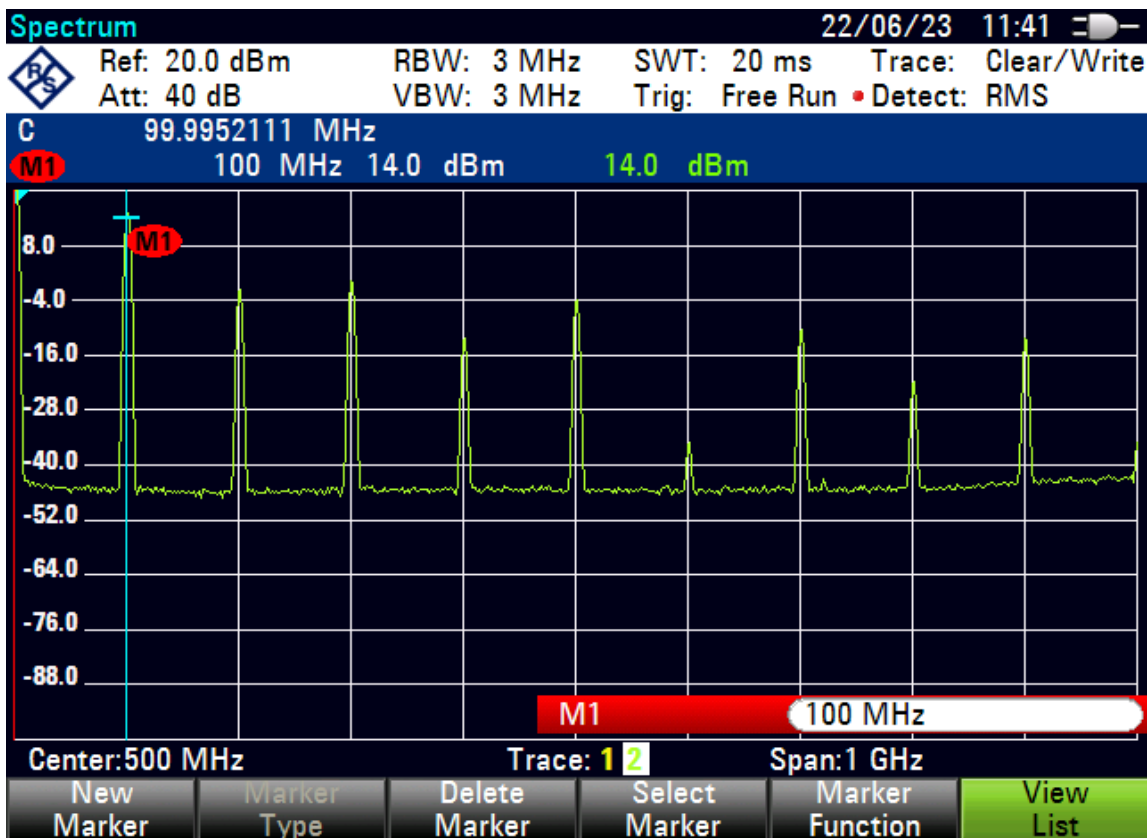
Obrázek 8.10: Náhled na měřicí pracoviště při měření vysílací části – detail na zařízení. (Zdroj: Vlastní.)



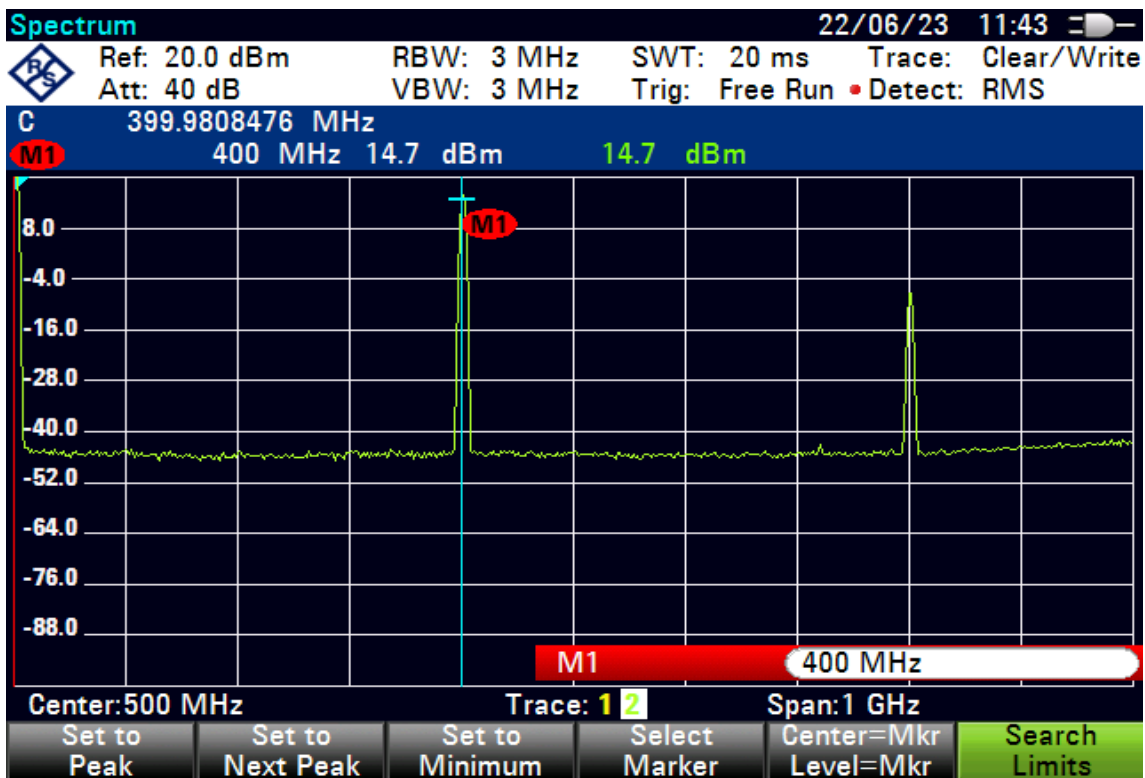
Obrázek 8.11: Náhled na měřící pracoviště při měření vysílací části – detail na spektrální analyzátor. (Zdroj: Vlastní.)



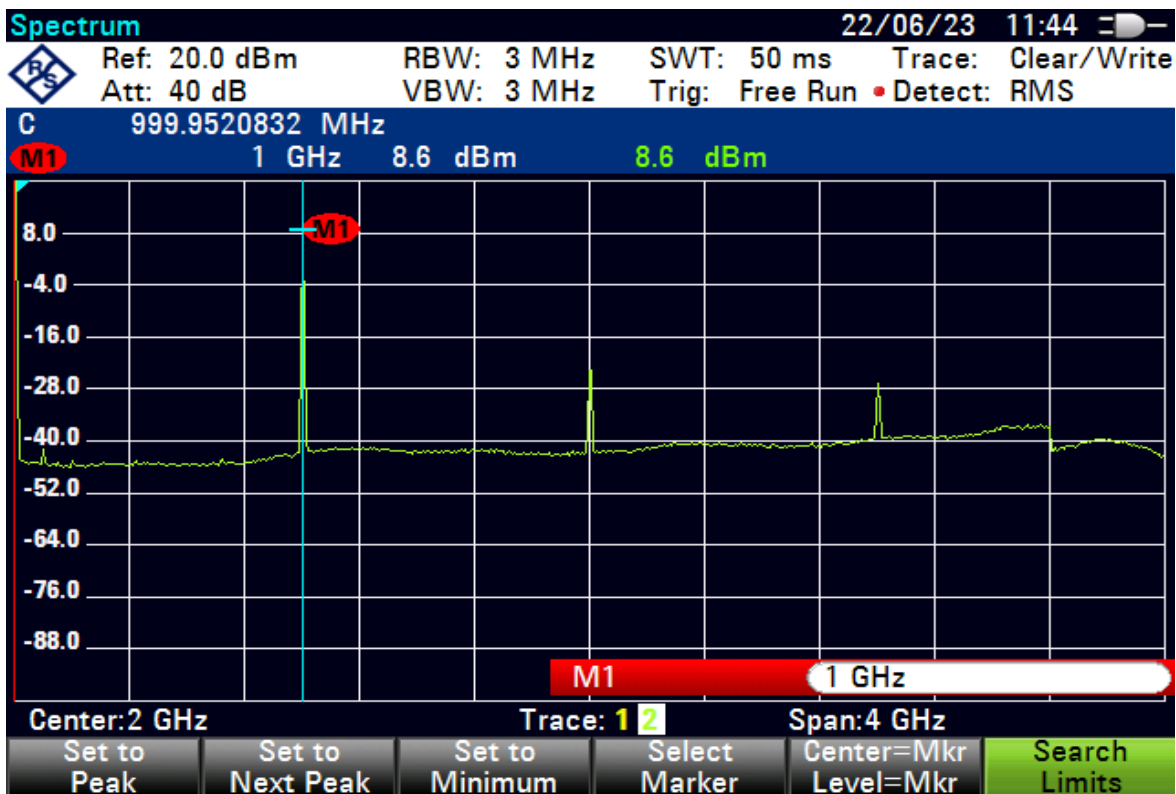
Obrázek 8.12: Náhled na maximální dosahovaný výkon z výstupního portu 1 – pro nízké frekvence. (Zdroj: Vlastní.)



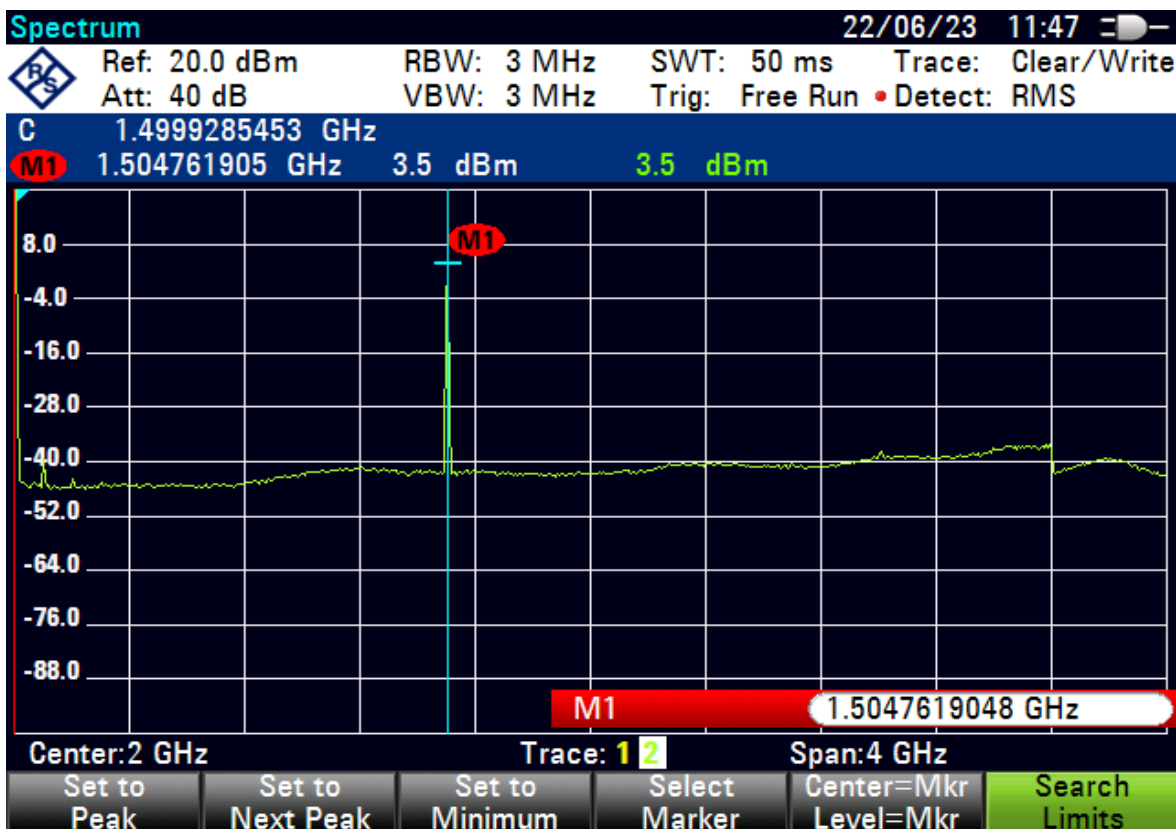
Obrázek 8.13: Ukázka naměřených hodnot pro kanál bez filtrace pro frekvenci 100 MHz.  
 (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 8.14: Ukázka naměřených hodnot pro kanál bez filtrace pro frekvenci 400 MHz.  
 (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 8.15: Ukázka naměřených hodnot pro kanál bez filtrace pro frekvenci 1000 MHz.  
 (Zdroj: Vlastní.)



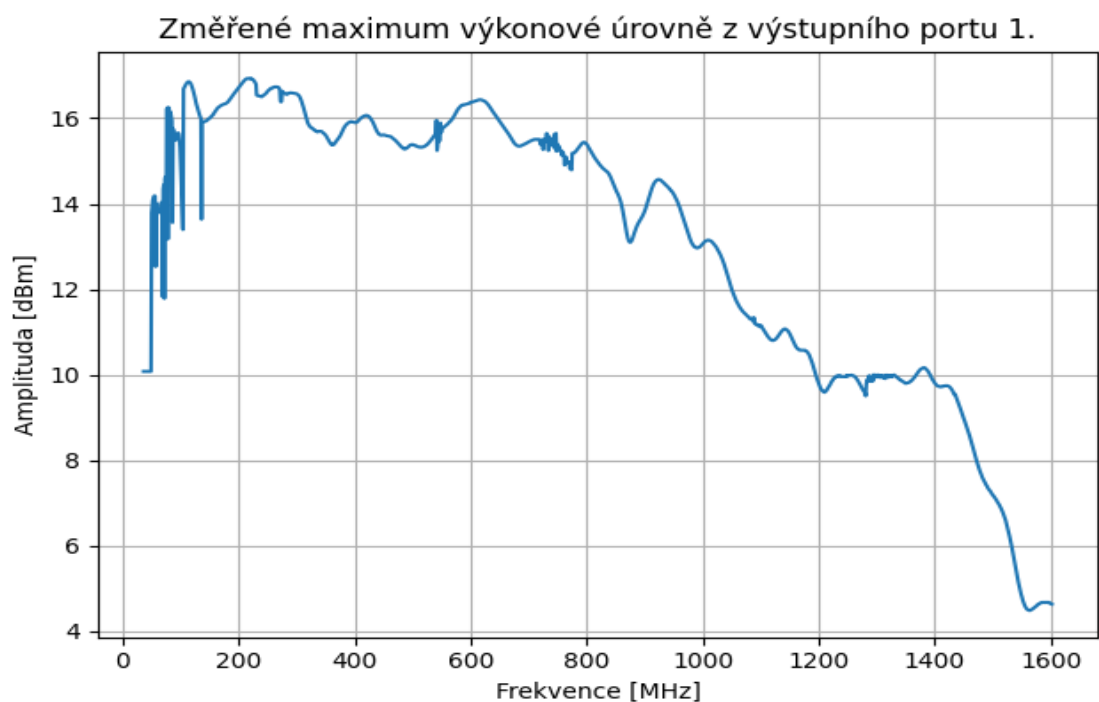
Obrázek 8.16: Ukázka naměřených hodnot pro kanál bez filtrace pro frekvenci 1500 MHz.  
 (Zdroj: Vlastní.)



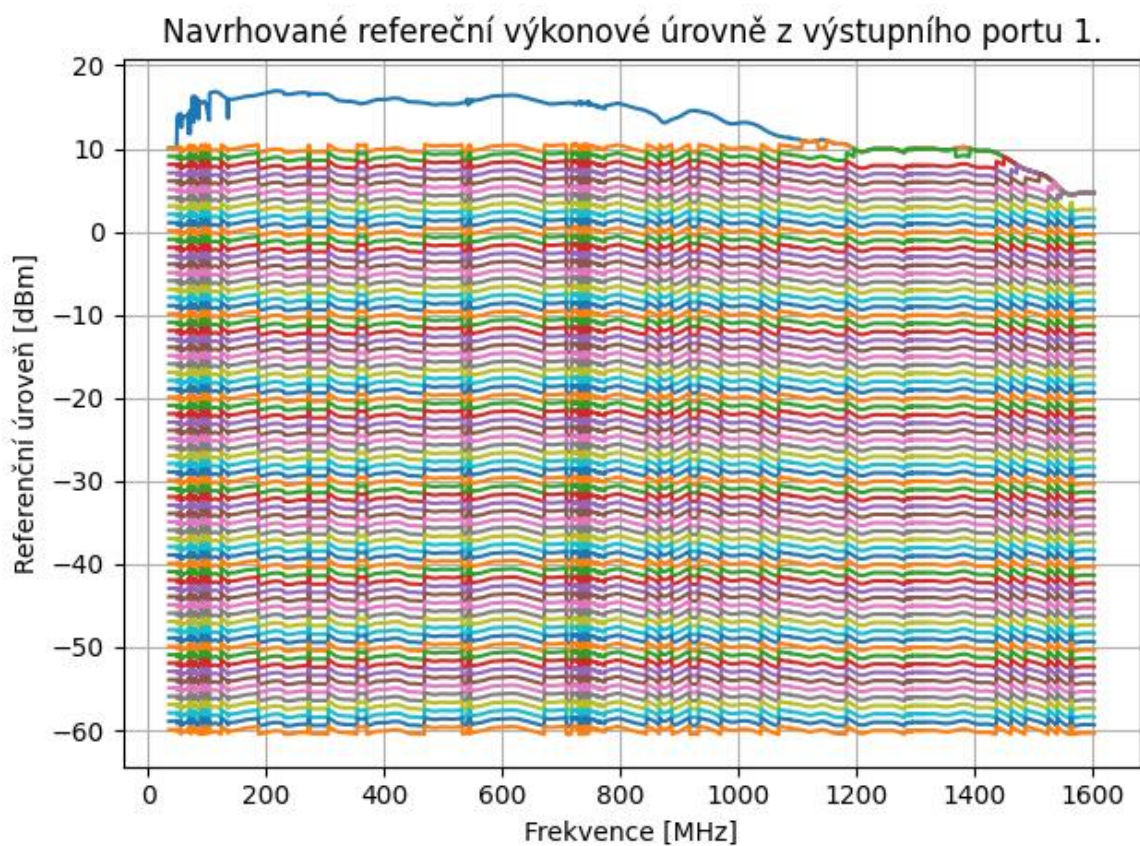
Obrázek 8.17: Ukázka naměřených hodnot pro kanál bez filtrace pro frekvenci 2000 MHz.  
(Zdroj: Vlastní.)

## 8.4 Popis kalibrace vysílací části

Kalibrace vysílací části probíhala automatizovaným měřením se spektrálním analyzátozem a elektronickým nastavením vysílací části bez atenuací. Postupným laděním frekvencí a záznamem amplitudy byla změřena kalibrační křivka maximální dosažitelné hodnoty amplitudy při dané frekvenci, realizováno obrázkem 8.18. Následně byly vytvořeny kalibrační křivky s doplněním dosažitelné atenuace, dostupné z obrázku 8.19. S ohledem na krok atenuátoru 1 dB a nerovnoměrnost všech hodnot a také možné ovlivňování přijímací části silným výkonem z vysílací části, musíme počítat s určitou chybou měření, zejména pak při měření nízkých úrovní, která je částečně vyřešena kalibračním měřením kabeláže a SW kalibrací.



Obrázek 8.18: Náhled na změřenou kalibrační křivku maximální amplitudy signálu z filtrovaných kanálů. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 8.19: Náhled na kalibrační křivky vysílacích referenčních úrovní pro vysílací část. (Zdroj: Vlastní.)

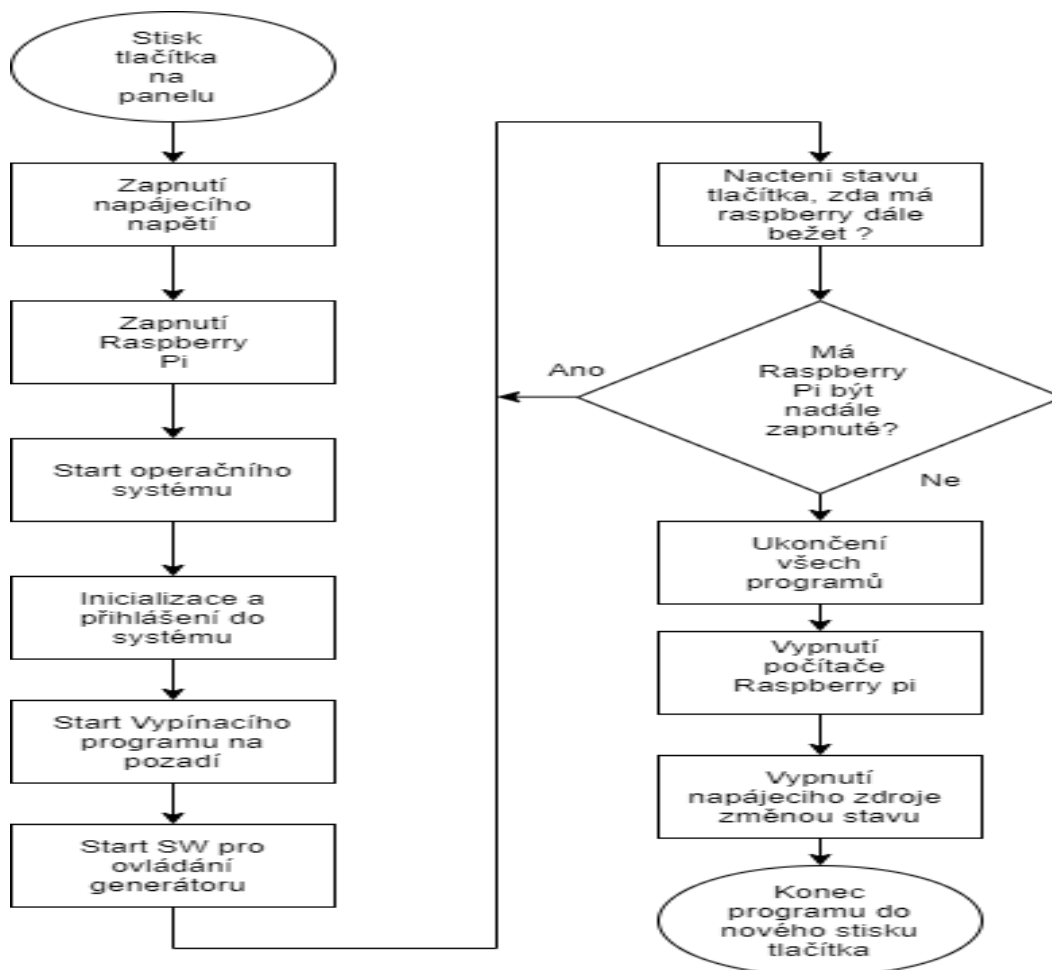


## 9 Vývoj bloku řídicí části a software

Řídicí část byla sestavena z počítače Raspberry Pi a připojeného displeje. Dále je k počítači externě připojena klávesnice pro pohodlnější ovládaní zařízení. K Raspberry Pi jsou poté připojeny všechny funkční bloky pomocí USB. Software, který slouží pro ovládaní zařízení, byl vyvíjen ve vývojovém prostředí IDLE (Python 3.10 64-bit) a byl napsán v jazyku Python. Pro komunikaci mezi periferiemi byla využita knihovna pyvisa a pro grafické návrhy GUI, kterými se zařízení ovládá, byl použit software PyQt5 Designer s nastavbou pro jazyk Python.

### 9.1 Software pro vypínání Raspberry Pi

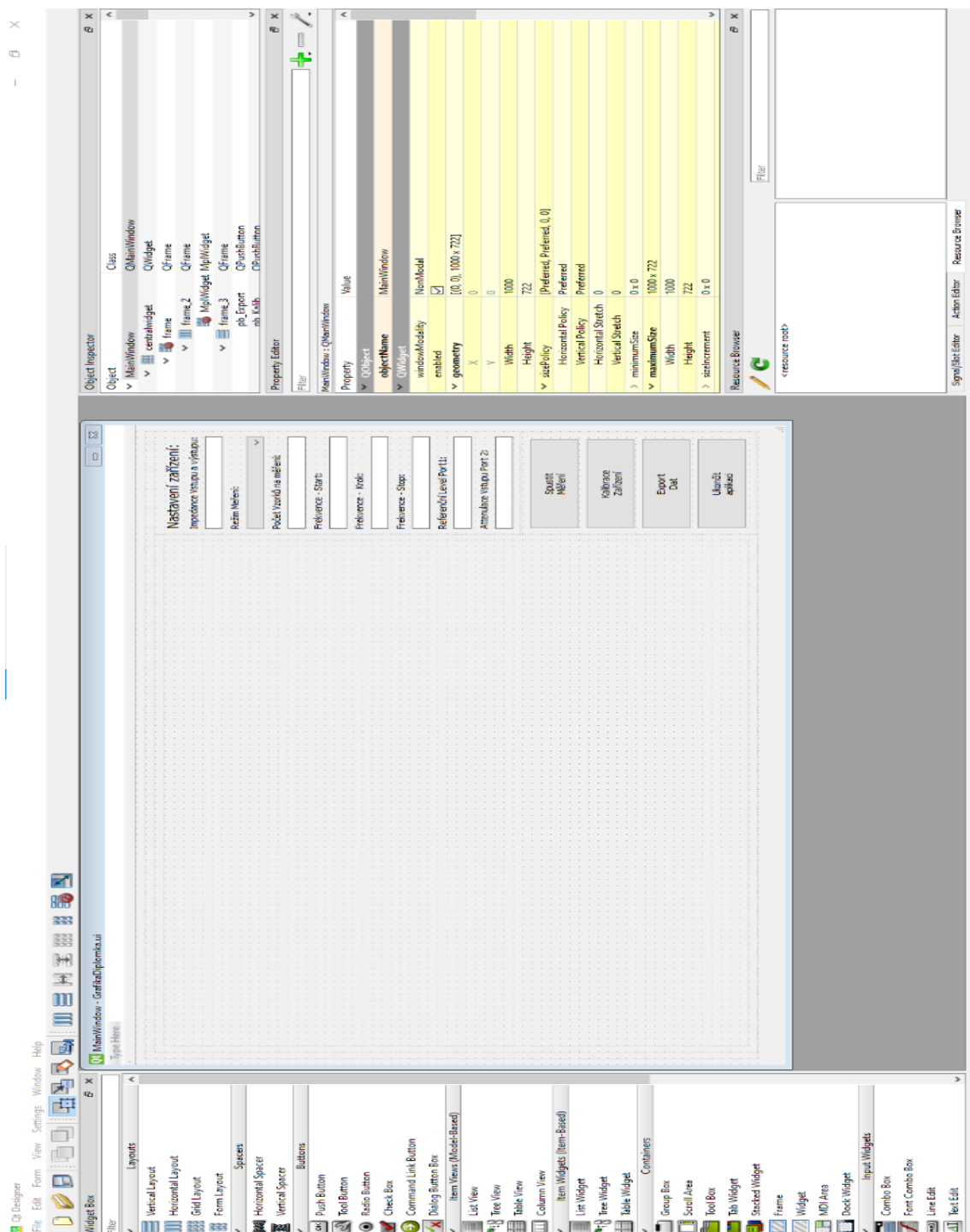
Software pro vypínání Raspberry Pi byl inspirován z již úspěšného použití v bakalářské práci dostupné z (Kopecký, 2021) a také z edukativního návodu (quartoknows.com, 2021), pro diplomovou práci byl pouze upraven pro potřeby použití v zařízení. Software je popsán citovaným vývojovým diagramem na obrázku 9.1. SW je užíván pro nastavení řídicích pinů pro zdrojovou část, aby bylo možné bezpečně vypnout Raspberry Pi a přejít do režimu Stand-by. Zdrojový kód SW a detailnější informace jsou k nalezení v (Kopecký, 2021).



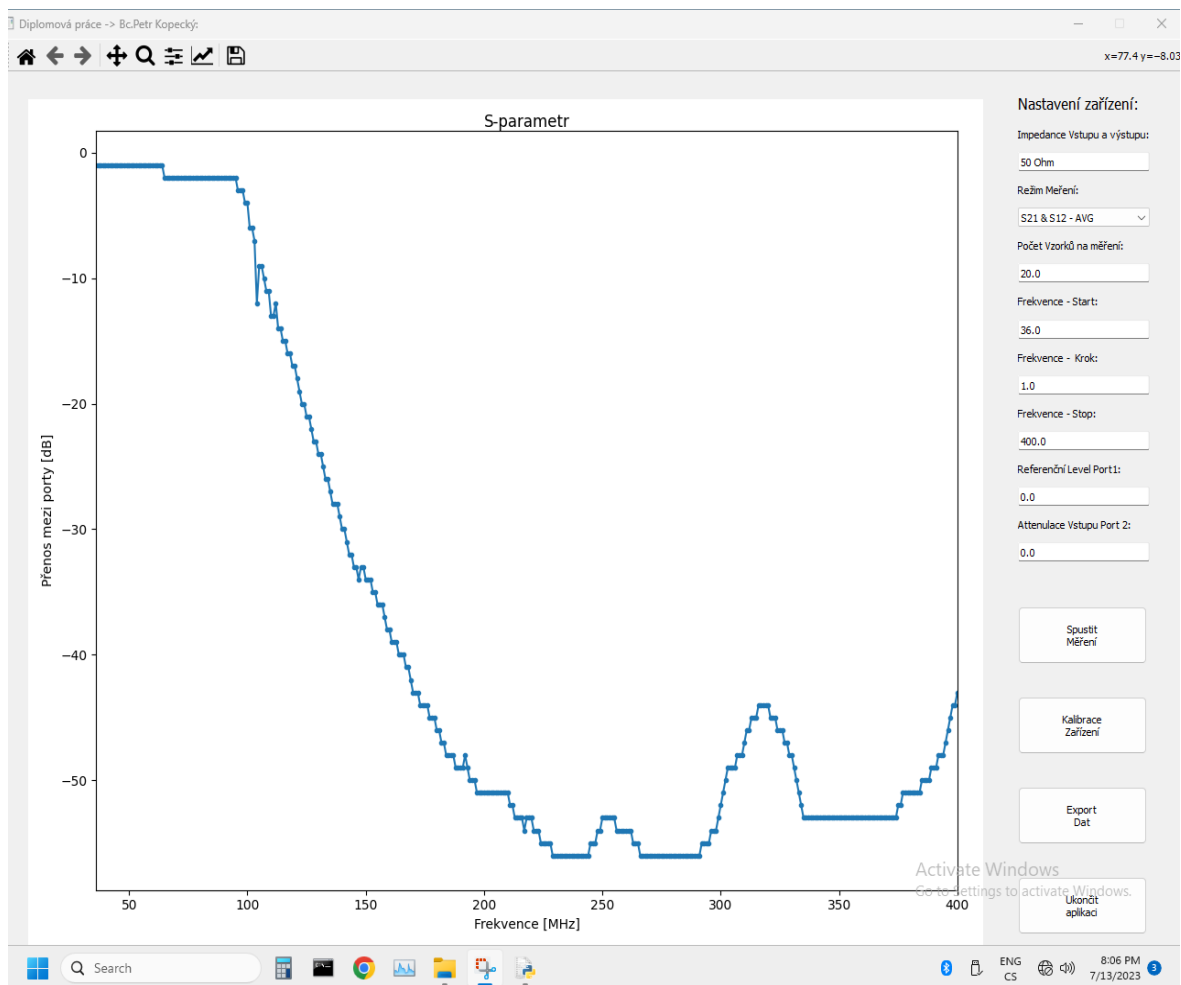
Obrázek 9.1: Stručný vývojový diagram k SW, zapínání a vypínání zařízení, převzato z (Kopecký, 2021).

## 9.2 Grafická podoba ovládacího programu

Pro ovládání zařízení bylo vytvořeno GUI v programu python QT Designer. Náhled na podobu GUI je na obrázku 9.2. Hlavním prvkem je plátno na levé straně, které je využíváno pro vykreslování grafických výsledků z měření. Na levé horní straně jsou poté dostupná všechna nastavení parametrů před spuštěním nového měření. Podoba navrženého GUI použitého jako interface pro ovládání diplomové práce je na obrázku 9.3.



Obrázek 9.2: Ukázka z grafického vývojového prostředí pyQT5. (Zdroj: Vlastní.)



**Obrázek 9.3: Ukázka navržené podoby GUI pro ovládání analyzátoru. (Zdroj: Vlastní.)**

Detailní pohled na nastavované parametry je patrný z obrázku 9.4. První položkou je pohled na nastavenou impedanci přizpůsobení portů  $50 \Omega$ . Následuje režim měření, kde lze vybírat z několika překalibrovaných voleb. Je zde volba pro měření průchozí spojky, pro měření atenuátoru, pro měření filtru v režimu AVG, dále jsou tu dostupná měření se záznamem minimální a maximální hodnoty. Následuje nastavení počtu iterací měření na jedné nastavené frekvenci. Dále pak nastavení počáteční frekvence měření, která z parametrů zařízení dosahuje minima na 36 MHz. Následně je nutné nastavit frekvenční krok a koncovou frekvenci, která byla stanovena z předchozích měření na maximální hodnotu 1600 MHz. Předposledním nastavením je hodnota referenčního výkonu vysílaného z portu 1, ta se pohybuje v rozmezí od 10 dBm do  $-50$  dBm. Poslední volbou je přednastavení pevné atenuace pro vstupní port 2, nad kterou nemůže přijímací část posunout své nastavení.

**Nastavení zařízení:**

Impedance Vstupu a výstupu:

Režim Měření:

Počet Vzorků na měření:

Frekvence - Start:

Frekvence - Krok:

Frekvence - Stop:

Referenční Level Port1:

Attenulace Vstupu Port 2:

**Obrázek 9.4:** Ukázka navržené podoby GUI pro ovládání analyzátoru– detail na vstupy.  
 (Zdroj: Vlastní.)

Poslední částí SW na obrázku 9.5 jsou ovládací tlačítka dostupná v pravém dolním rohu. Tlačítkem spustit měření dochází ke spuštění měřícího skriptu, který dle zadaného nastavení provede měření. Tlačítkem kalibrace zařízení dojde ke spuštění automatizovaného kalibračního měření, kde po dokončení jsou kalibrační data uložena a přehrána pro další měření s novou kalibrací. Předposledním tlačítkem je tlačítko pro export dat, které ukládá naměřená data do souboru a generuje figure s naměřenými daty jako samostatné okno pro možnosti lepšího exportu grafu naměřených dat. Posledním tlačítkem je tlačítko pro ukončení aplikace, které ukončí daný program a spouští rutinu pro vypnutí počítače.

Spustit  
Měření

Kalibrace  
Zařízení

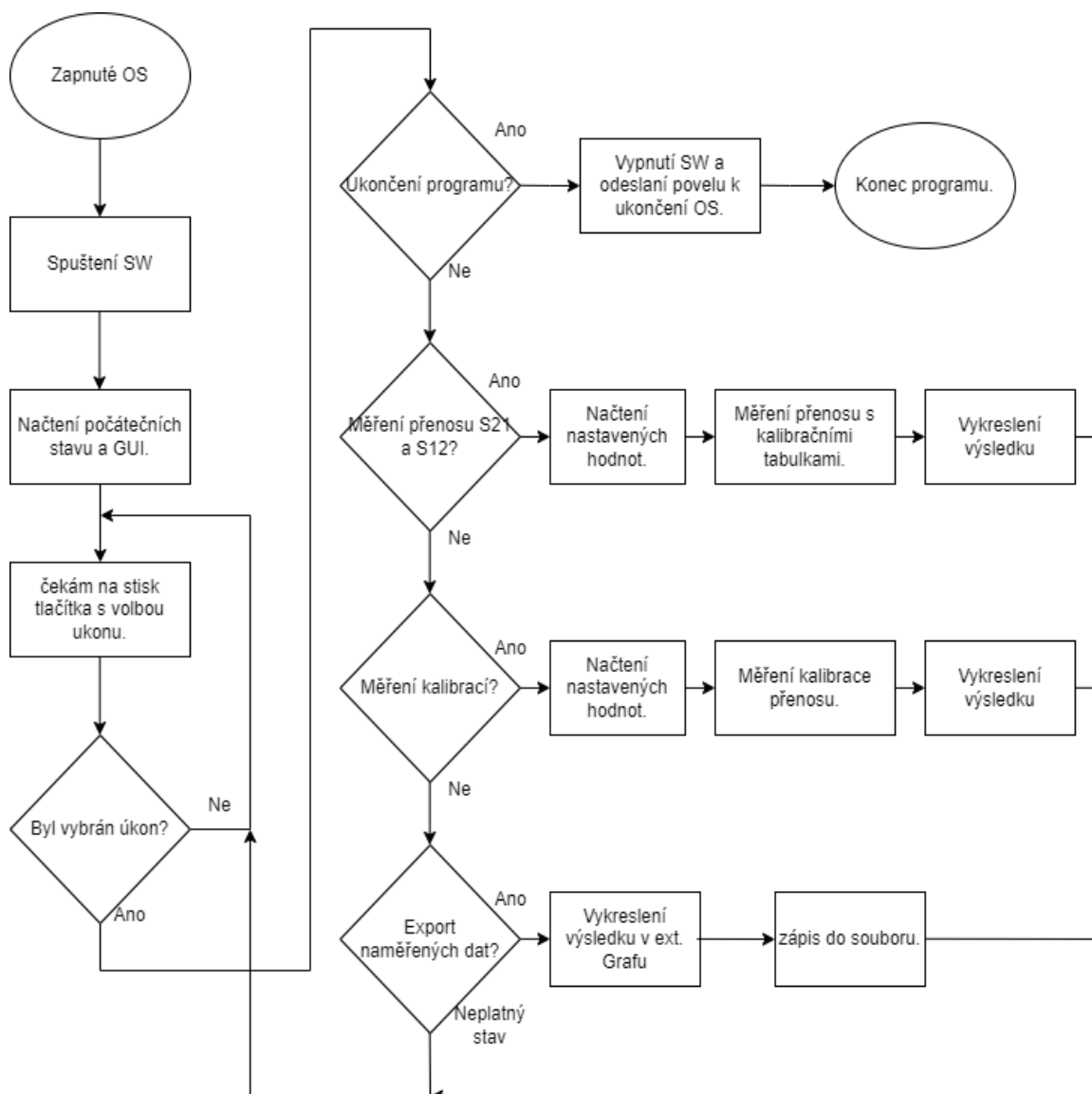
Export  
Dat

Ukončit  
aplikaci

**Obrázek 9.5:** Ukázka navržené podoby GUI pro ovládání analyzátoru– detail na tlačítka.  
 (Zdroj: Vlastní.)

### 9.3 Software ke grafické části

Software pro ovládání GUI vytvořeného v python Qt Designeru je připojen pomocí knihovny python UIloader. Po načtení grafické UI je provedena inicializace knihoven pro ovládání přijímače a vysílače, také je načtena knihovna pyvisa a jsou inicializovány proměnné. Následně jsou načteny všechny kalibrace pro přijímací, vysílací část i kalibrace připojených kabelů. Následně již program čeká na vykonání eventu dle stisku zvoleného tlačítka. Po vyplnění potřebných parametrů do text boxů je možné program spustit stisknutím tlačítka. V závislosti na volbě programu probíhá měření v rozsahu požadovaných parametrů díky využití knihovny pyvisa, která ovládá jednotlivé prvky vysílače, nastavuje jim parametry a vyčítá hodnotu. Po vyčtení všech hodnot je vykreslen graf naměřených hodnot a zařízení se vrací do stavu čekání na interakci. Detailní popis programu je popsán vývojovým diagramem na následujícím obrázku 9.6.



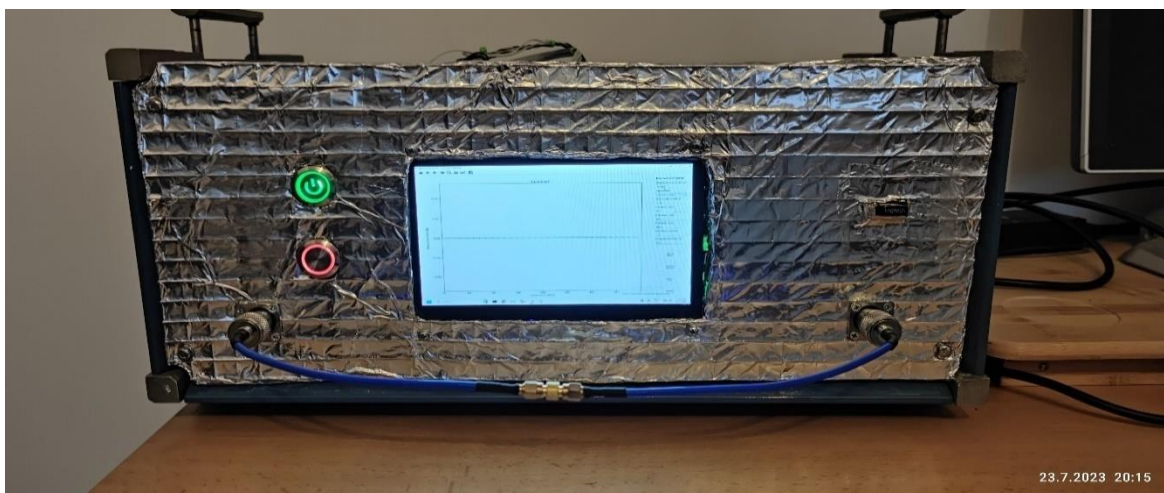
Obrázek 9.6: Stručný vývojový diagram pro popis funkce řídicího SW grafického GUI pro ovládání analyzátoru. (Zdroj: Vlastní.)

## 10 Měření pro ověření funkce sestaveného zařízení

V kapitole měření pro ověření funkce parametrů sestaveného zařízení jsou rozebrány parametry, jednotlivá testovací měření, která byla provedena v rámci ověření funkce. Testováno bylo měření při propojení kabelů pro ověření vykonané kalibrace zařízení. Dále bylo provedeno měření vybraných atenuátorů pro porovnání s naměřenými daty z měření atenuátorů při konstrukci zařízení. Předposlední měření slouží pro ověření funkce v případě připojení filtru, pro vykreslení jejich přenosové charakteristiky. Následně bylo provedeno měření statistické stability naměřených výsledků a měření izolace mezi porty.

### 10.1 Ověření funkce při měření spojení kabelu

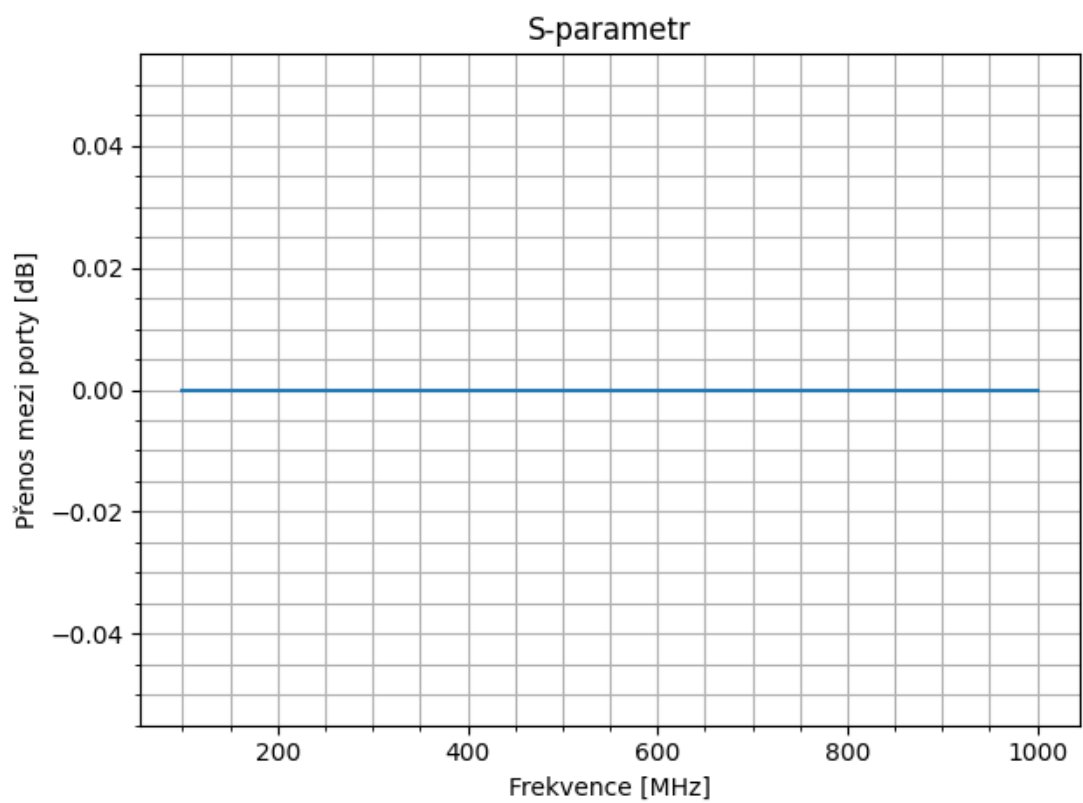
Ověření funkce zařízení při měření spoje kabelu je určeno pro kontrolu kalibračních dat. Na obrázku 10.1 je patrné měřící pracoviště a z naměřených dat pro obrázek 10.2 a 10.3. je patrné, že zařízení testu vyhovělo. Porovnání s analyzátelem NanoVNA je na obrázku 10.4 a 10.5.



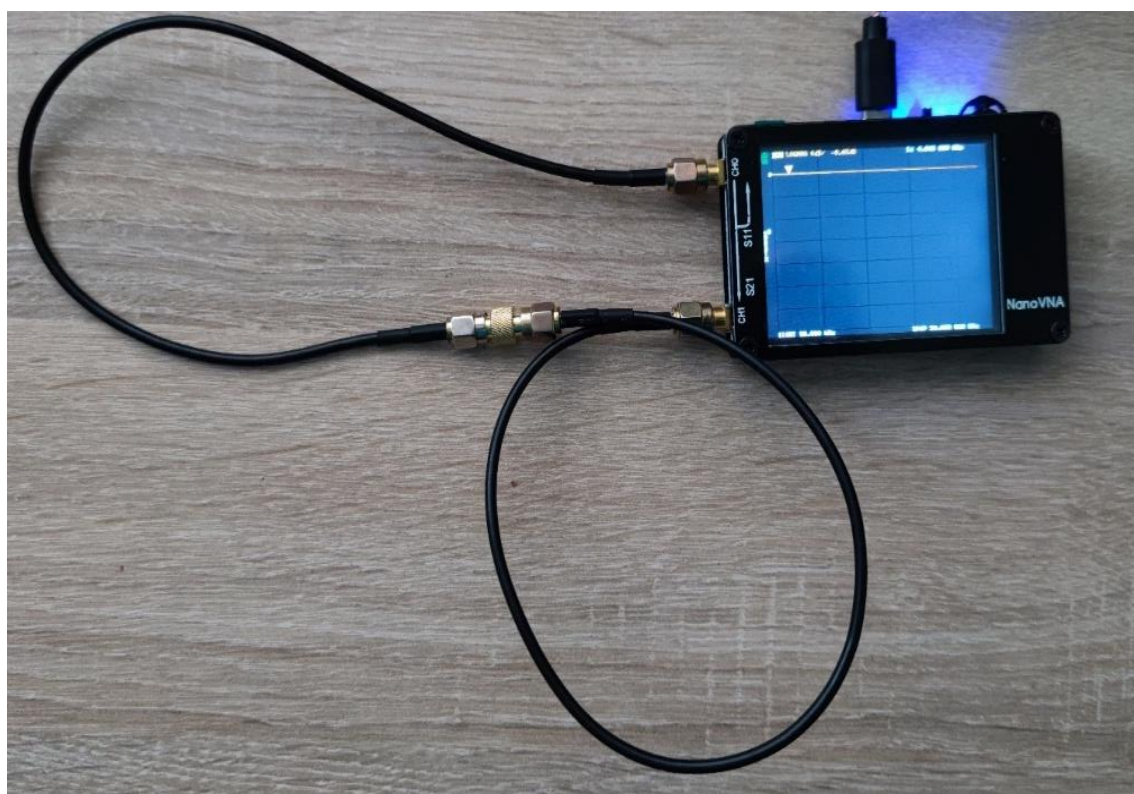
Obrázek 10.1: Ukázka měřícího pracoviště při měření spojky. (Zdroj: Vlastní.)



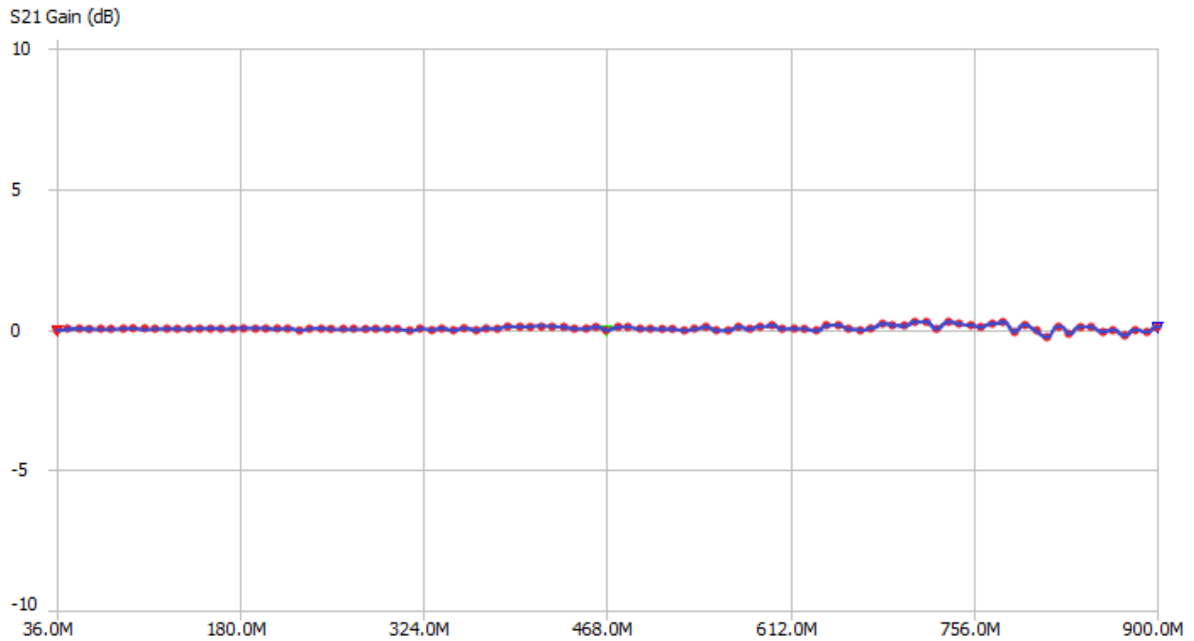
Obrázek 10.2: Ukázka detailu měřícího zobrazovače při měření spojky. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 10.3: Ukázka vykreslených naměřených výsledku s použitím exportní funkce dat GUI. (Zdroj: Vlastní.)



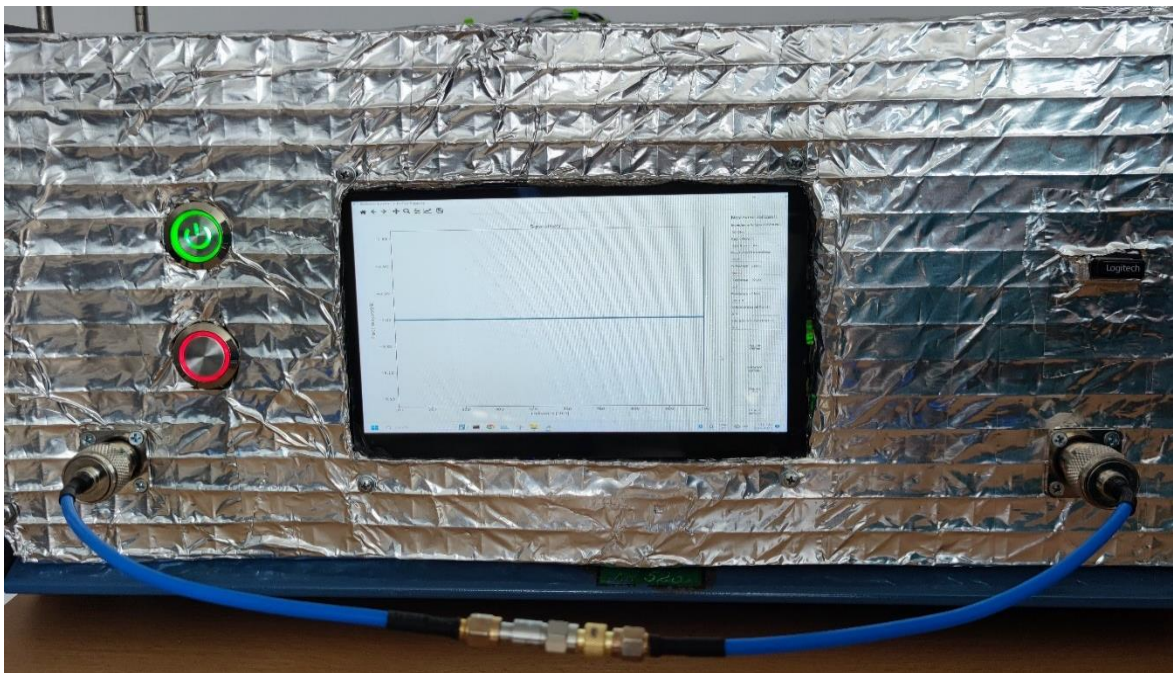
Obrázek 10.4: Ukázka měřícího pracoviště při měření spojky s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 10.5: Ukázka naměřených hodnot z analyzátoru NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.)

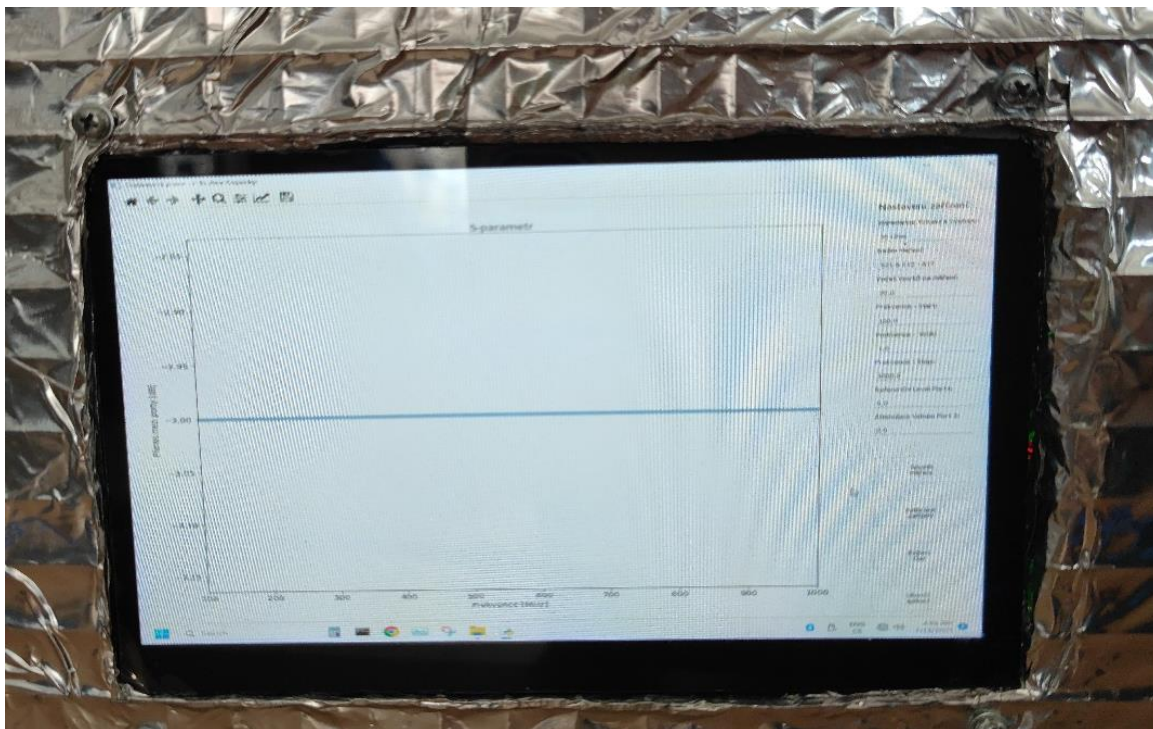
## 10.2 Ověření funkce při měření atenuátoru 3 dB

Ověření funkce při měření atenuátoru je kontrolní měření ověřujících funkci zařízení. Při tomto měření je zařízení v režimu pro měření atenuátoru. Detail na měřicí pracoviště je na obrázku 10.6. Testován byl první vzorek atenuátoru s udávanou statickou hodnotou 3 dB, na obrázcích 10.7 a 10.8 jsou vykresleny dosažené výsledky. Pro porovnání naměřených hodnot bylo využito měření ze školního vektorového analyzátoru Rhode & Schwarz ZNB 20, jehož výsledek je vykreslen obrázkem 10.9.

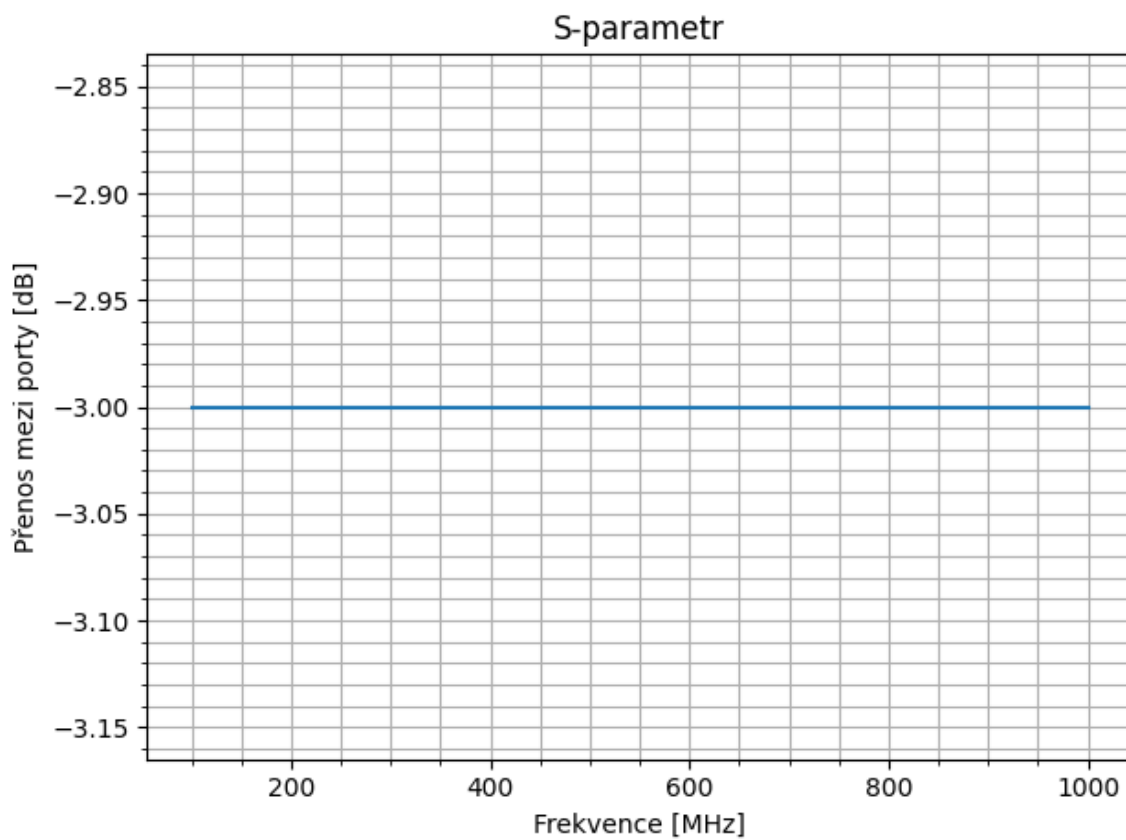


Obrázek 10.6: Ukázka měřicího pracoviště při měření atenuátoru 3 dB. (Zdroj: Vlastní.)

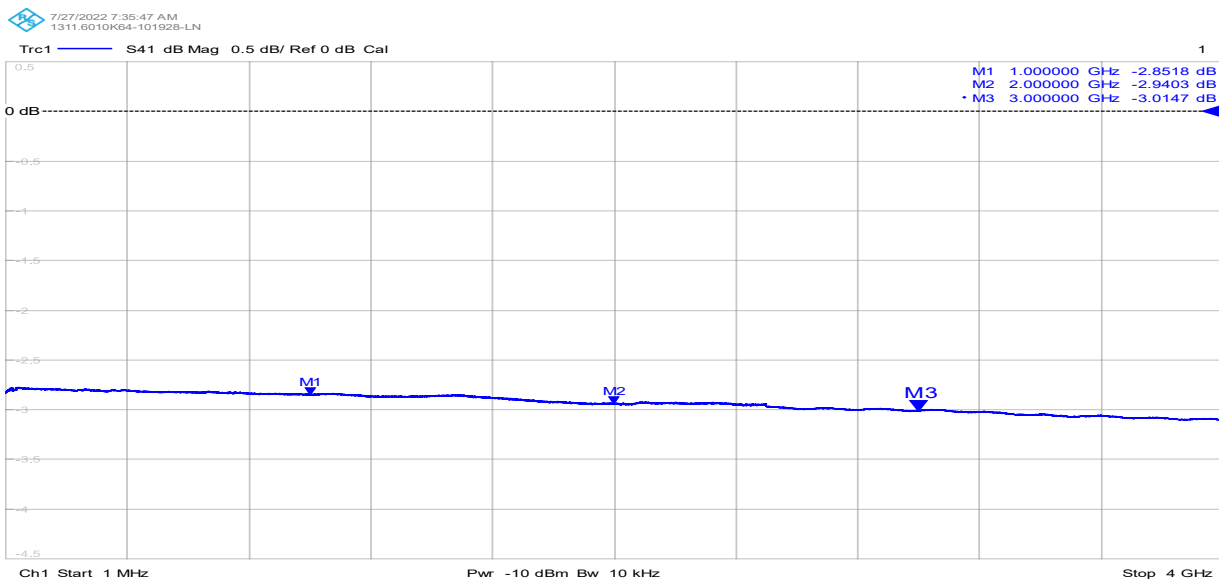




Obrázek 10.7: Ukázka detailu měřícího zobrazovače při měření atenuátoru 3 dB. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 10.8: Ukázka vykreslených naměřených výsledku s použitím exportní funkce dat GUI. (Zdroj: Vlastní.)



**Obrázek 10.9: Naměřená data při měření atenuátoru 3 dB pomocí Rhode & Schwarz ZNB 20. (Zdroj: Vlastní.)**

**Tabulka 10.2: Porovnání naměřených hodnot při měření atenuátoru 3 dB.**

	Frekvence: 50 MHz	Frekvence: 75 MHz	Frekvence: 100 MHz	Frekvence: 250 MHz	Frekvence: 500 MHz	Frekvence: 750 MHz	Frekvence: 1 GHz
R&S  S21  [dB]	-2,75	-2,77	-2,79	-2,80	-2,82	-2,84	-2,85
NanoVNA  S21  [dB]	-2,779	-2,763	-2,755	-2,746	-2,322	-2,581	-2,288
Kopecký analyzátor  S21  [dB]	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
Odchylka: R&S  S21  [dB]	0,25	0,23	0,21	0,20	0,18	0,16	0,15
Odchylka: NanoVNA  S21  [dB]	0,221	0,237	0,245	0,254	0,678	0,419	0,712

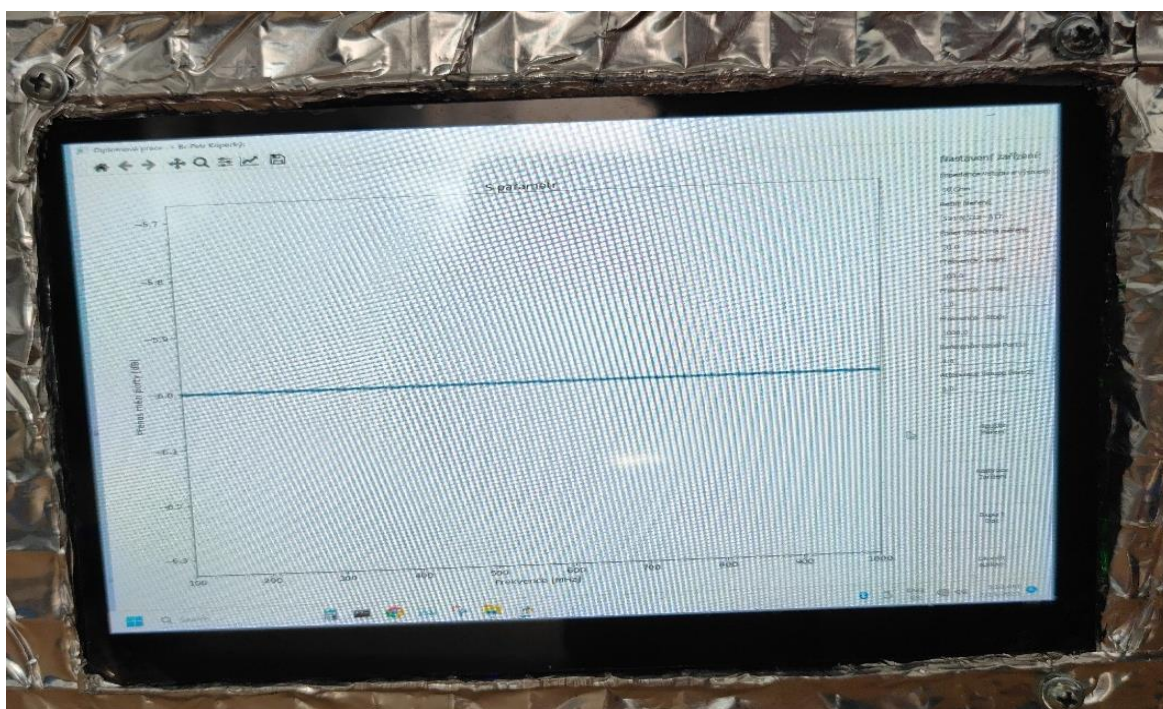
Při porovnání naměřených hodnot v tabulce 2 je nutné uvažovat, že měřící přesnost zařízení nedosahuje takových kvalit, jako vektorový analyzátor Rhode & Schwarz ZNB 20. Přesto je naměřený výsledek v odpovídající a očekávané toleranci, neboť nejsme schopni zařízením měřit v desetinách dB, přesto je měření ve shodě s uvedenou hodnotou 3 dB na obalu měřeného atenuátoru. Měření je proto považováno za validní a ověření zařízení pro tento druh měření v tomto kroku bylo potvrzeno. Pro srovnání bylo měření opakováno s analyzátozem NanoVNA, naměřené výsledky však neodpovídají výsledkům z měření vektorovým analyzátozem Rhode & Schwarz ZNB 20. Hodnoty změřené Rhode & Schwarz ZNB 20 jsou považovány jako věrohodnější a kvalitativně více odpovídající.

### 10.3 Ověření funkce při měření atenuátoru 6 dB

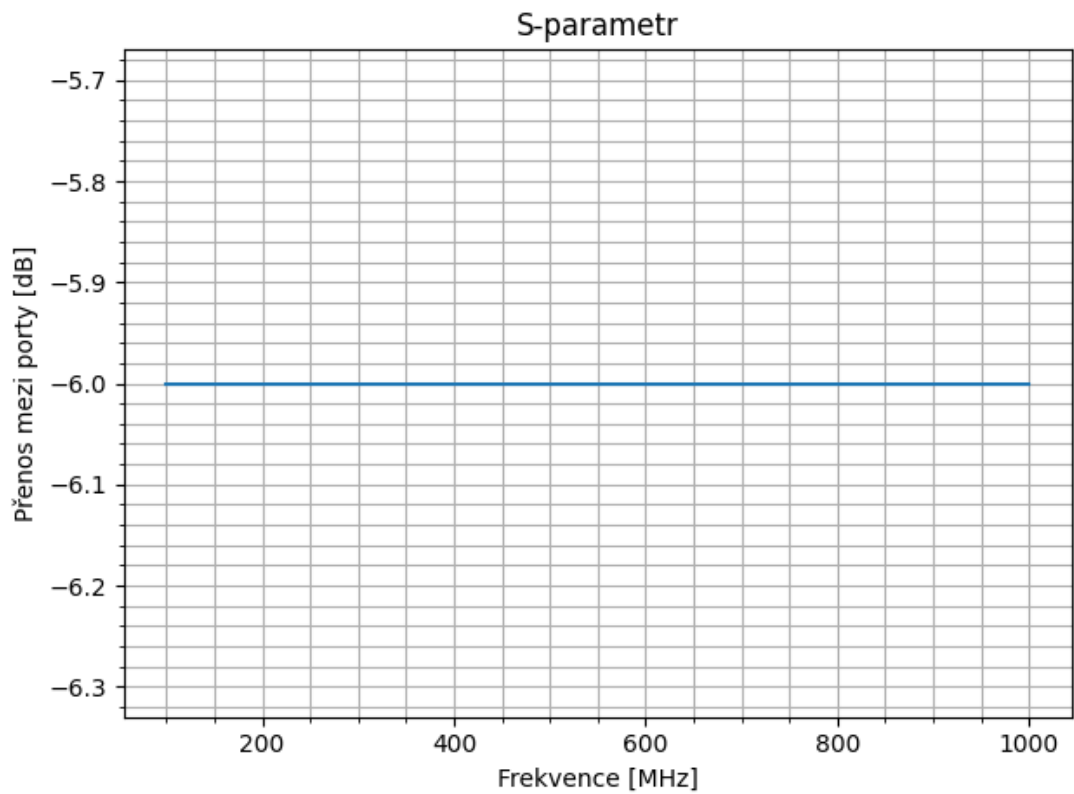
Dalším ověřujícím měřením byl opakovaný test s dalším vzorkem atenuátoru. Detail na měřicí pracoviště je na obrázku 10.10. Testován byl druhým vzorkem atenuátoru s udávanou statickou hodnotou 6 dB, na obrázcích 10.11 a 10.12 jsou vykresleny dosažené výsledky. Pro porovnání naměřených hodnot bylo využito měření ze školního vektorového analyzátoru Rhode & Schwarz ZNB 20, jehož výsledek je vykreslen obrázkem 10.13.



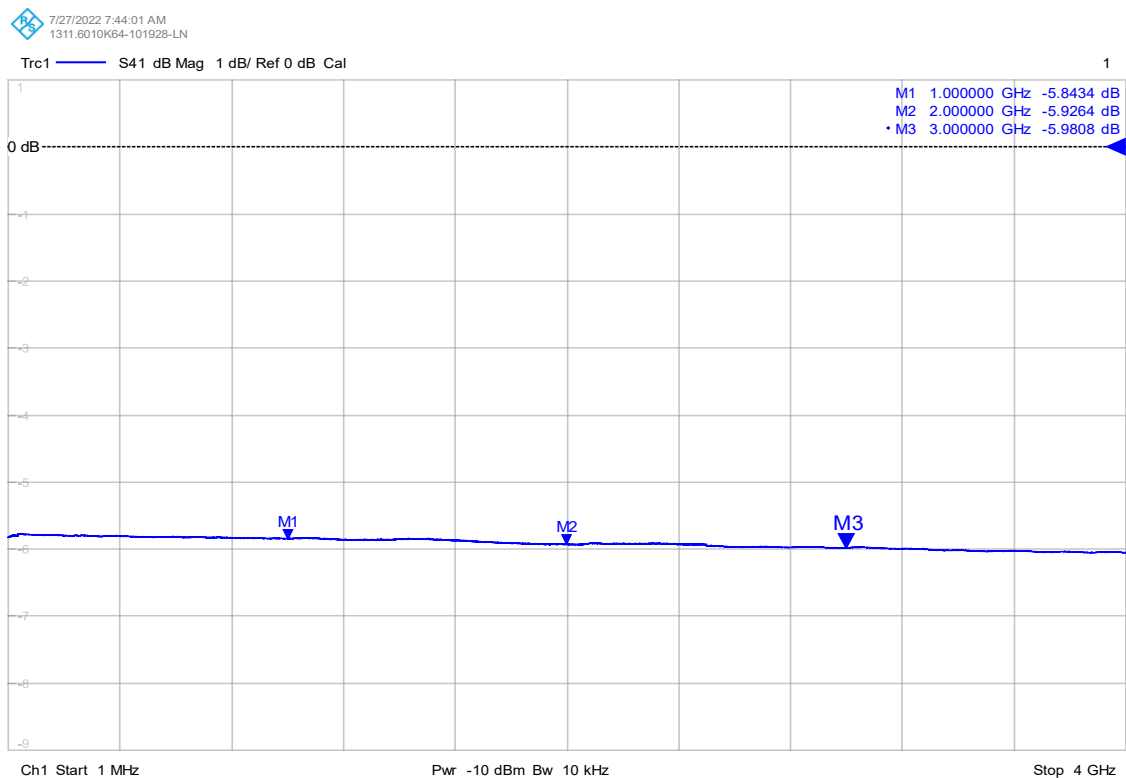
Obrázek 10.10: Ukázka měřicího pracoviště při měření atenuátoru 6 dB. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 10.11: Ukázka detailu měřicího zobrazovače při měření atenuátoru 6 dB. (Zdroj: Vlastní.)



**Obrázek 10.12:** Ukázka vykreslených naměřených výsledků s použitím exportní funkce dat GUI.  
(Zdroj: Vlastní.)



**Obrázek 10.13:** Naměřená data při měření atenuátoru 6 dB pomocí Rhode & Schwarz ZNB 20.  
(Zdroj: Vlastní.)

**Tabulka 10.3: Porovnání naměřených hodnot při měření atenuátoru 6 dB.**

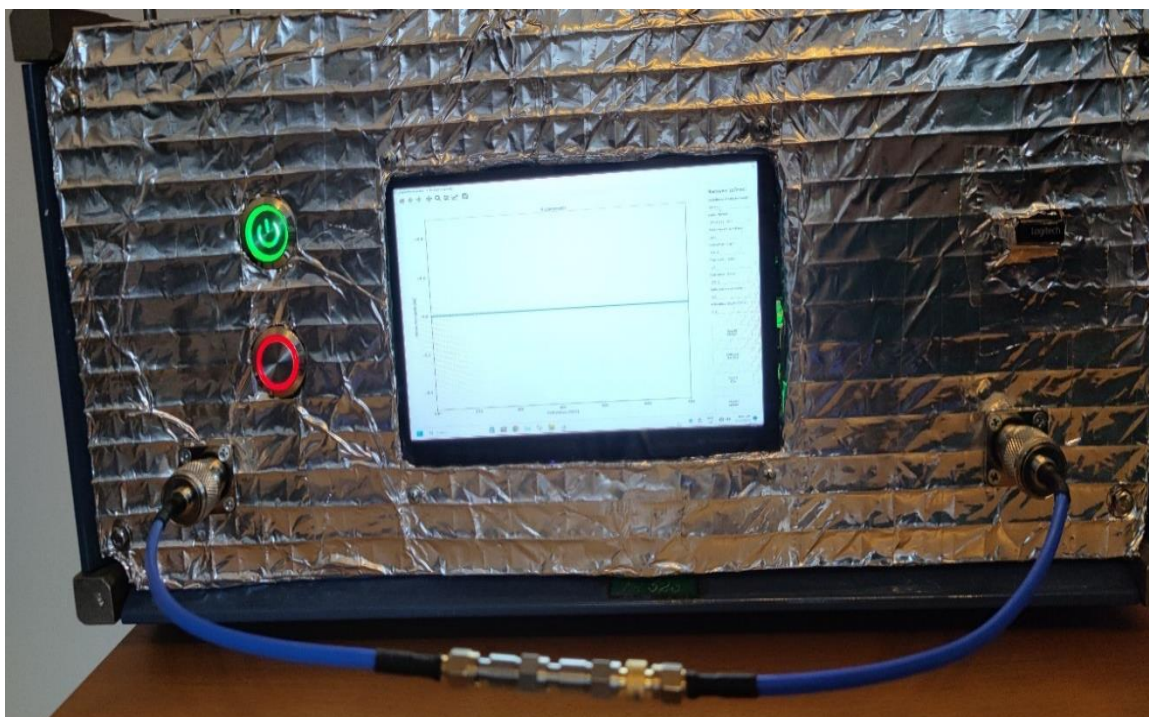
	Frekvence: 50 MHz	Frekvence: 75 MHz	Frekvence: 100 MHz	Frekvence: 250 MHz	Frekvence: 500 MHz	Frekvence: 750 MHz	Frekvence: 1 GHz
R&S  S21  [dB]	-5,78	-5,79	-5,80	-5,81	-5,82	-5,83	-5,84
NanoVNA  S21  [dB]	-5,793	-5,772	-5,762	-5,750	-5,351	-5,629	-5,121
Kopecký analyzátor  S21  [dB]	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6
Odchylka: R&S  S21  [dB]	0,22	0,21	0,20	0,19	0,18	0,17	0,16
Odchylka: NanoVNA  S21  [dB]	0,207	0,210	0,238	0,25	0,649	0,371	0,879

Při porovnání naměřených hodnot v tabulce 3 je nutné uvažovat, že měřící přesnost zařízení nedosahuje takových kvalit, jako vektorový analyzátor Rhode & Schwarz ZNB 20. Přesto je naměřený výsledek v odpovídající a očekávané toleranci, neboť nejsme schopni zařízením měřit v desetinách dB, přesto je měření ve shodě s uvedenou hodnotou 6 dB na obalu měřeného atenuátoru. Měření je proto považováno za validní a ověření zařízení pro tento druh měření v tomto kroku bylo potvrzeno. Pro srovnání bylo měření opakováno s analyzátozem NanoVNA, naměřené výsledky však neodpovídají výsledkům z měření vektorovým analyzátozem Rhode & Schwarz ZNB 20. Hodnoty změřené Rhode & Schwarz ZNB 20 jsou považovány jako věrohodnější a kvalitativně více odpovídající.

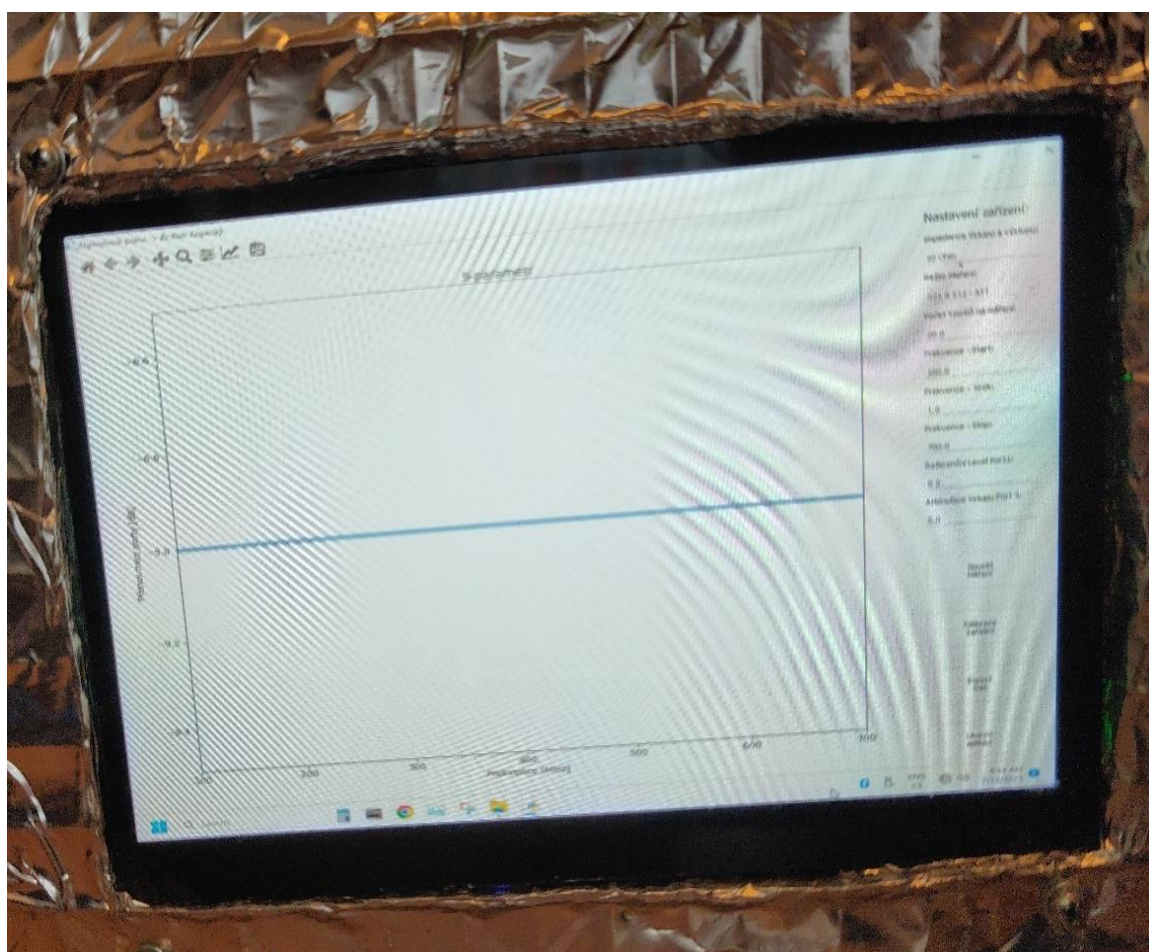
Měření těchto dvojbranů bylo nejprve prováděno v univerzitních laboratorních podmínkách pomocí Rhode & Schwarz ZNB 20 a komerčního NanoVNA. V průběhu řešení práce a následně při dokončování práce již Rhode & Schwarz ZNB 20, ani přístup do laboratoře nebyl k dispozici. Z těchto důvodů bylo možné provádět souběžná měření již pouze pomocí analyzátozu NanoVNA a proto se práce nadále věnuje již pouze porovnání s NanoVNA.

#### **10.4 Ověření funkce při měření atenuátoru 9 dB**

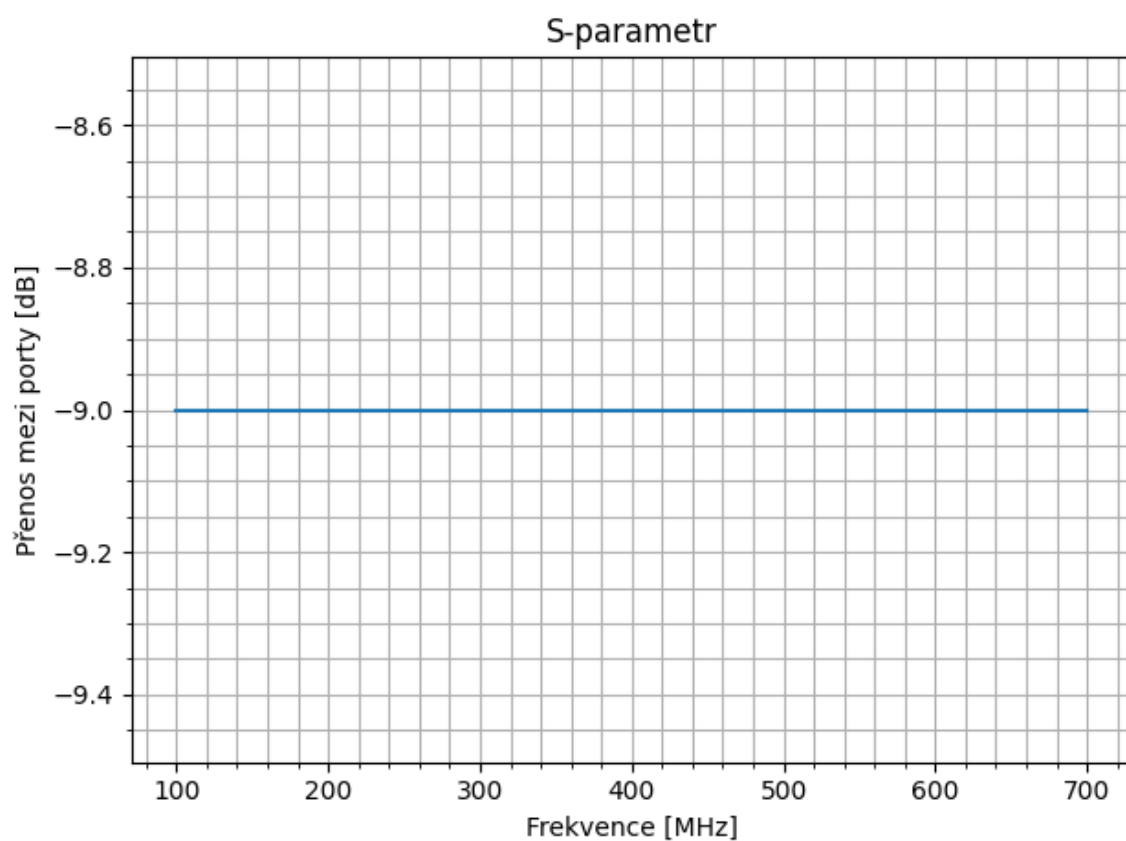
Naposledním ověřujícím měřením byl opakován test s dalším vzorkem atenuátoru. Detail na měřící pracoviště je na obrázku 10.14. Testován byl třetím vzorkem atenuátoru s udávanou statickou hodnotou 9 dB, na obrázcích 10.15 a 10.16 jsou vykresleny dosažené výsledky. Pro porovnání naměřených hodnot bylo využito zapůjčeného vektorového analyzátozu NanoVNA. Měření analyzátozem je vyobrazeno obrázkem 10.17 a jeho výsledek je vykreslen obrázkem 10.18.



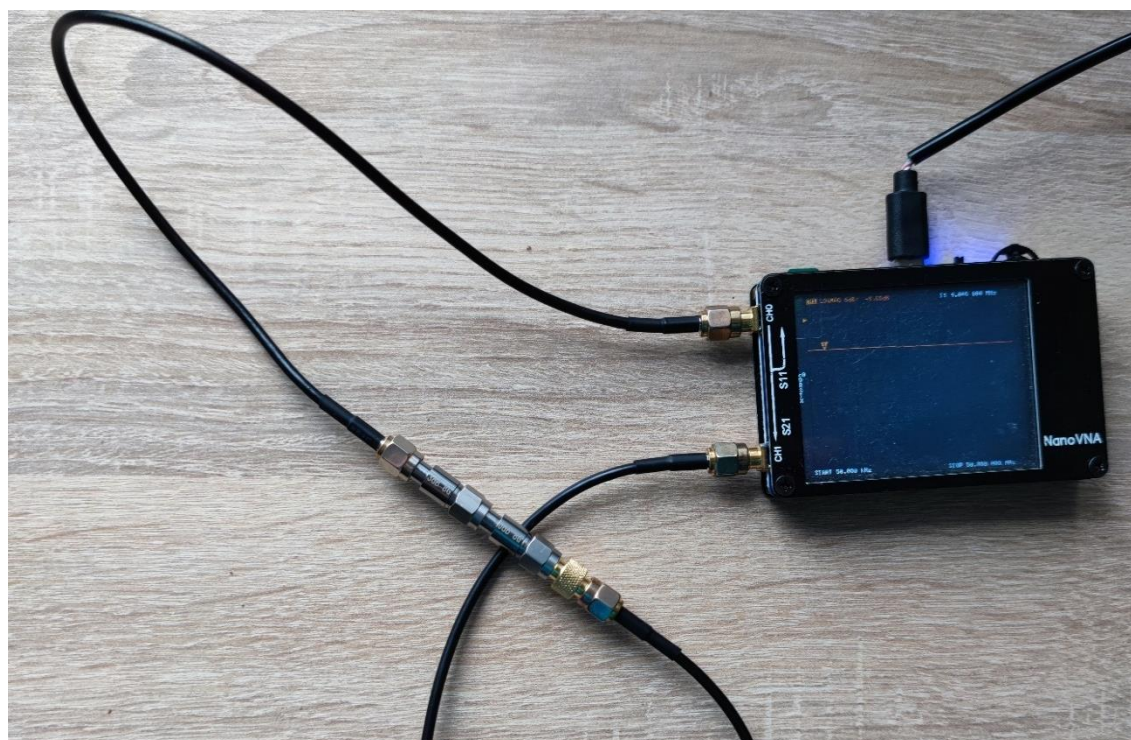
Obrázek 10.14: Ukázka měřicího pracoviště při měření atenuátoru 9 dB. (Zdroj: Vlastní.)



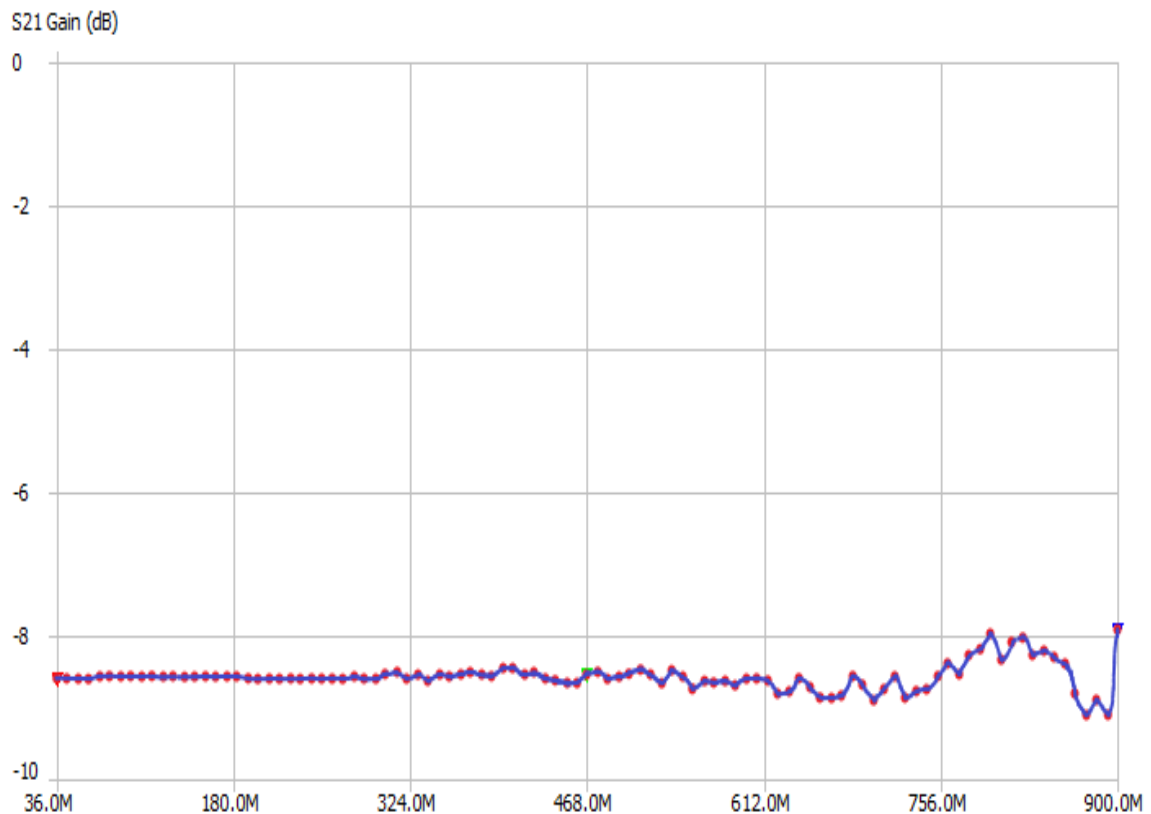
Obrázek 10.15: Ukázka detailu měřicího zobrazovače při měření atenuátoru 9 dB. (Zdroj: Vlastní.)



**Obrázek 10.16:** Ukázka vykreslených naměřených výsledků s použitím exportní funkce dat GUI. (Zdroj: Vlastní.)



**Obrázek 10.17:** Ukázka měřícího pracoviště při měření atenuátoru 9 dB s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.)



**Obrázek 10.18:** Náhled na naměřená data s analyzátozem NanoVNA při měření atenuátoru 9 dB. (Zdroj: Vlastní.)

**Tabulka 10.4:** Porovnání naměřených hodnot při měření atenuátoru 9 dB.

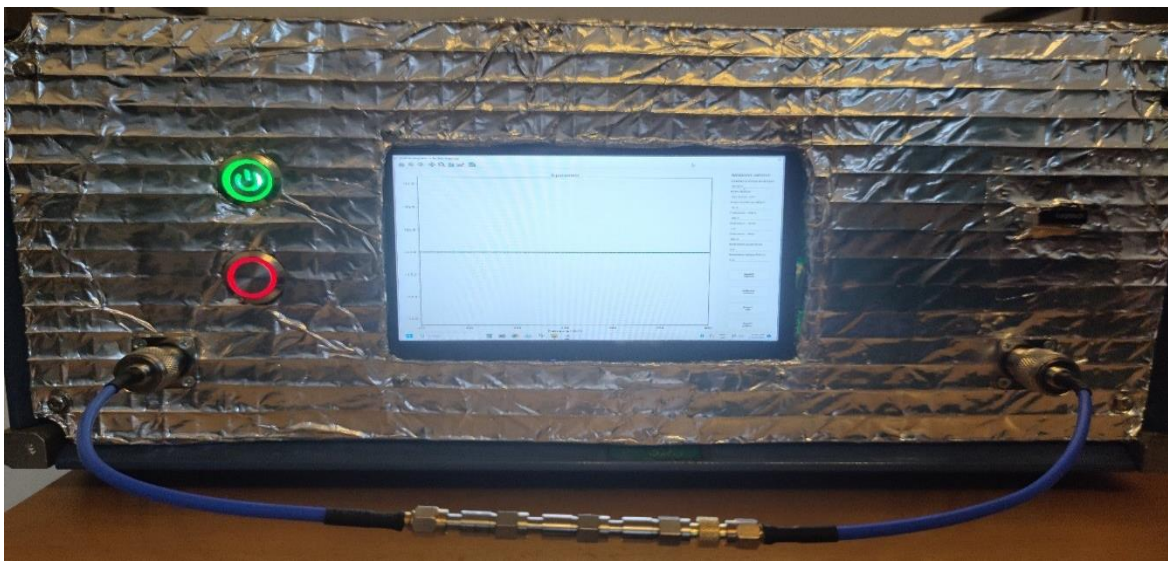
	Frekvence: 36 MHz	Frekvence: 90 MHz	Frekvence: 180 MHz	Frekvence: 250 MHz	Frekvence: 324 MHz	Frekvence: 468 MHz	Frekvence: 612 MHz
NanoVNA  S21  [dB]	-9,1	-9	-9	-9,1	-9	-8,9	-9,1
Kopecký analyzátor  S21  [dB]	-9	-9	-9	-9	-9	-9	-9
Odchylka  S21  [dB]	0,1	0	0	0,1	0	0,1	0,1

Pro následující porovnání naměřených hodnot v tabulce 4 bylo použito pro srovnání vektorového analyzátoru NanoVNA. Při porovnání naměřených výsledků dochází ke shodě měření a rozdíly jsou odpovídající a v očekávané toleranci, neboť nejsme schopni zařízením měřit v desetínách dB, přesto je měření ve shodě s uvedenou hodnotou 6 dB a 3 dB, tedy dohromady 9 dB měřeného atenuátoru. Pro analyzátor NanoVNA přisuzuji naměřené oscilace se vzrůstající frekvencí jako chybu měření pro nekvalitní přívodní kabely a nedokonalou izolaci portu pro vyšší frekvence. Měření je proto považováno za validní a ověření zařízení pro tento druh měření v tomto kroku bylo potvrzeno.

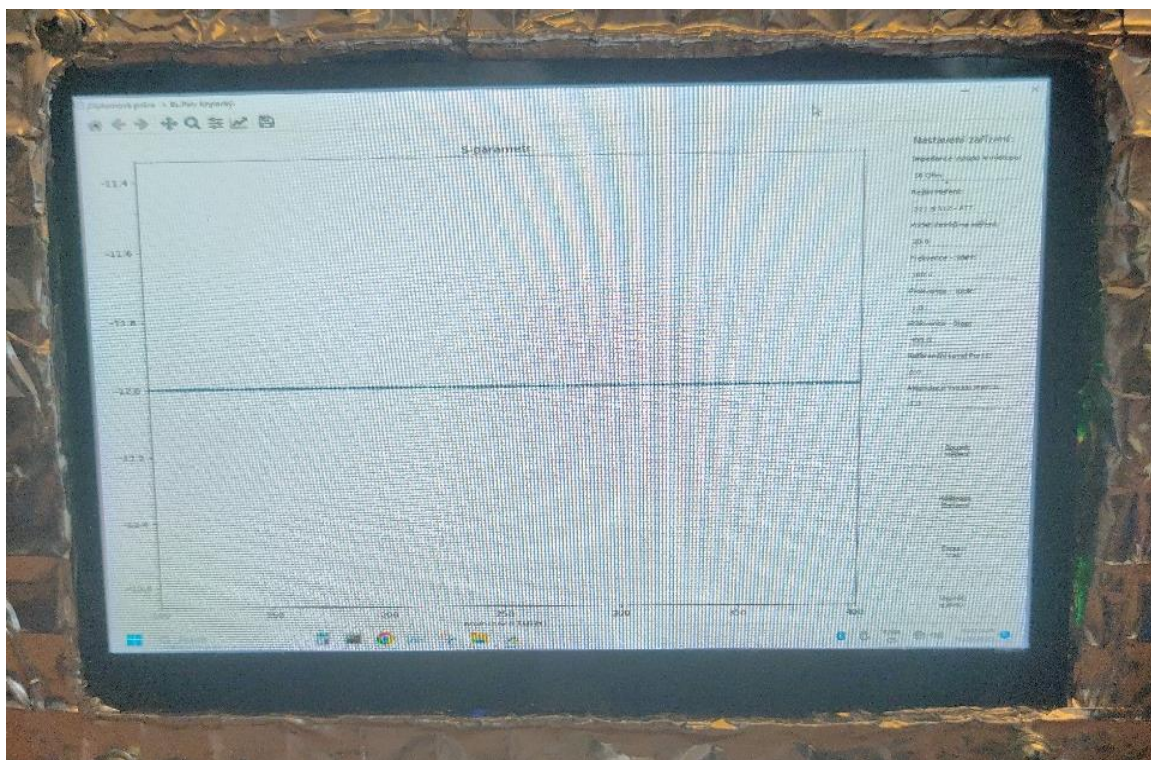


## 10.5 Ověření funkce při měření atenuátoru 12 dB

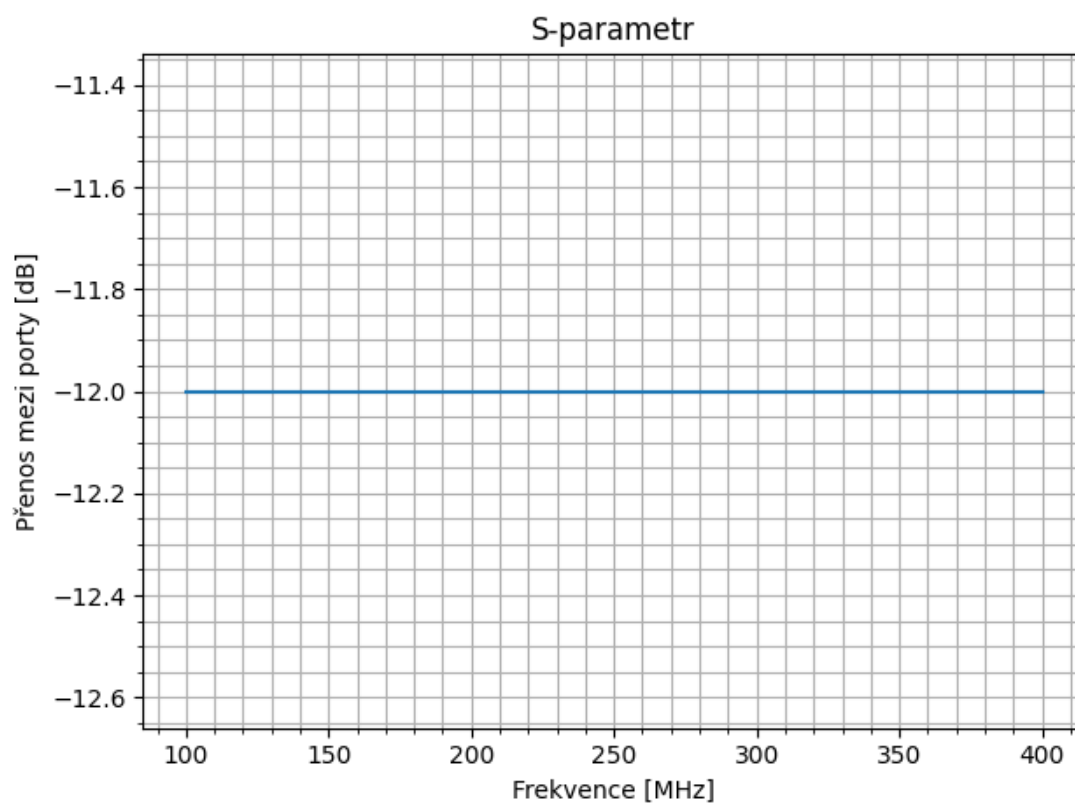
Poslední opakované měření se spojením všech dostupných atenuátorů jakožto dalším vzorkem atenuátoru. Detail na měřicí pracoviště je na obrázku 10.19. Testován byl čtvrtý vzorek atenuátoru s udávanou statickou hodnotou 12 dB, na obrázcích 10.20 a 10.21 jsou vykresleny dosažené výsledky. Pro porovnání naměřených hodnot bylo využito zapůjčeného vektorového analyzátoru NanoVNA. Měření analyzátozem je vyobrazeno obrázkem 10.22 a jehož výsledek je vykreslen obrázkem 10.23.



Obrázek 10.19: Ukázka měřicího pracoviště při měření atenuátoru 12 dB. (Zdroj: Vlastní.)



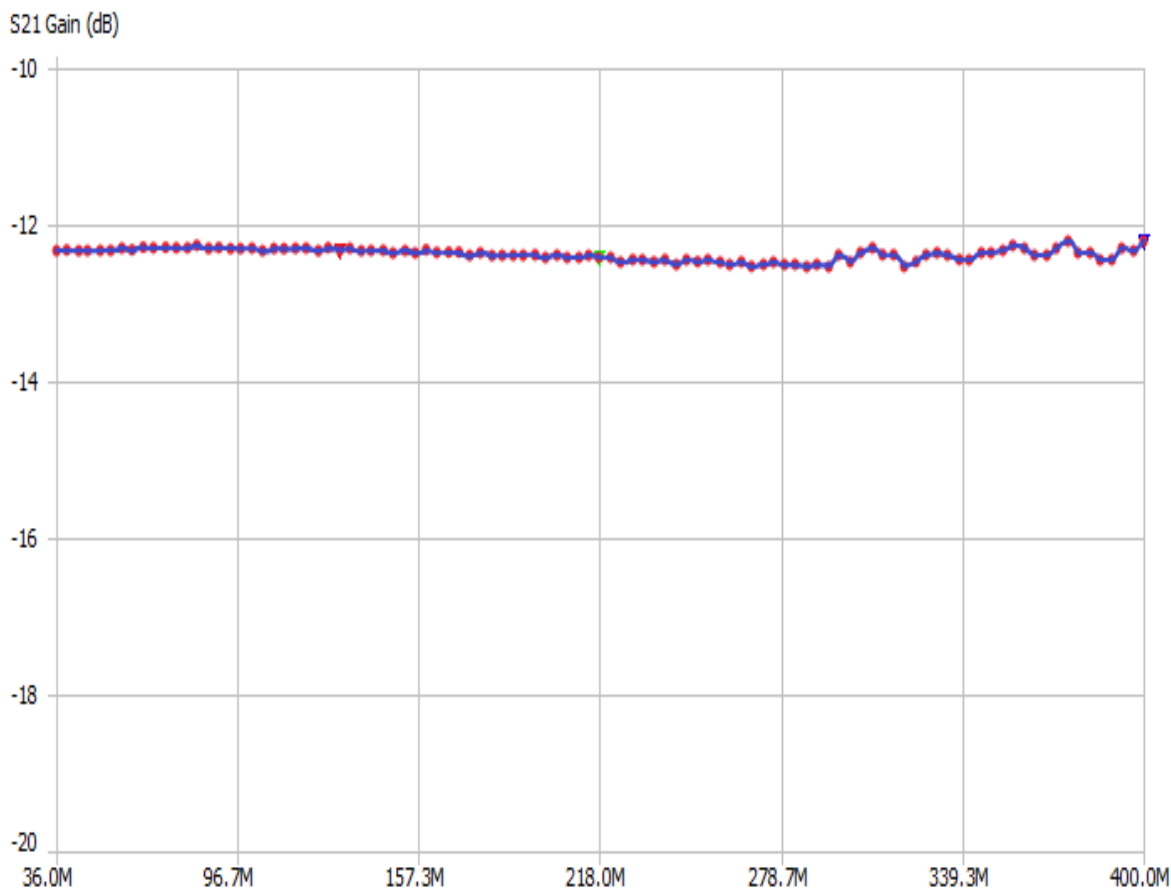
Obrázek 10.20: Ukázka detailu měřicího zobrazovače při měření atenuátoru 12 dB. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 10.21: Ukázka vykreslených naměřených výsledků s použitím exportní funkce dat GUI. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 10.22: Ukázka měřícího pracoviště při měření atenuátoru 12 dB s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 10.23: Náhled na naměřená data s analyzátořem NanoVNA při měření atenuátoru 12 dB. (Zdroj: Vlastní.)

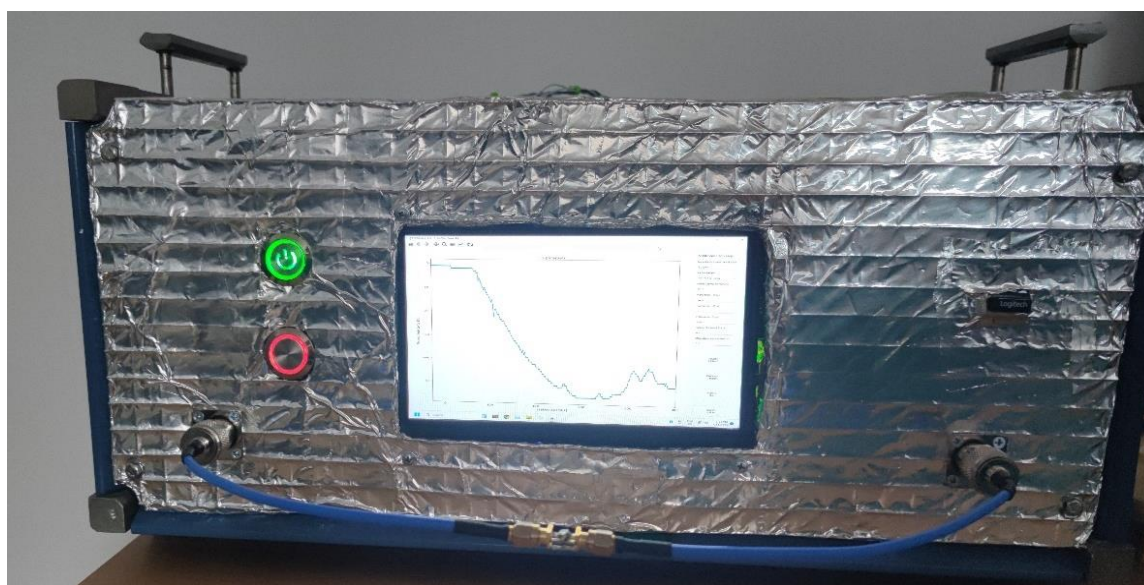
Tabulka 10.5: Porovnání naměřených hodnot při měření atenuátoru 12 dB.

	Frekvence: 36 MHz	Frekvence: 96 MHz	Frekvence: 157 MHz	Frekvence: 218 MHz	Frekvence: 278 MHz	Frekvence: 339 MHz	Frekvence: 400 MHz
NanoVNA  S21  [dB]	-12,3	-12,2	-12,3	-12,4	-12,4	-12,3	-12,1
Kopecký analyzátoř  S21  [dB]	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12
Odchylka  S21  [dB]	0,3	0,2	0,3	0,4	0,4	0,3	0,1

Pro poslední měření tohoto druhu a porovnání naměřených hodnot v tabulce 5 bylo použito pro srovnání vektorového analyzátořu NanoVNA. Při porovnání naměřených výsledků dochází ke shodě měření a rozdíly jsou odpovídající a v očekávané toleranci, neboť nejsme schopni zařizemím měřit v desetínách dB, přesto je měření ve shodě s uvedenou hodnotou 6 dB a 3 dB a 3 dB, tedy dohromady 12 dB měřeného atenuátoru. Měření je proto považováno za validní a ověření zařizemím pro tento druh měření v tomto kroku bylo potvrzeno.

## 10.6 Ověření funkce při měření parametru $|S_{21}|$ u vzorku filtru LFCV-45+

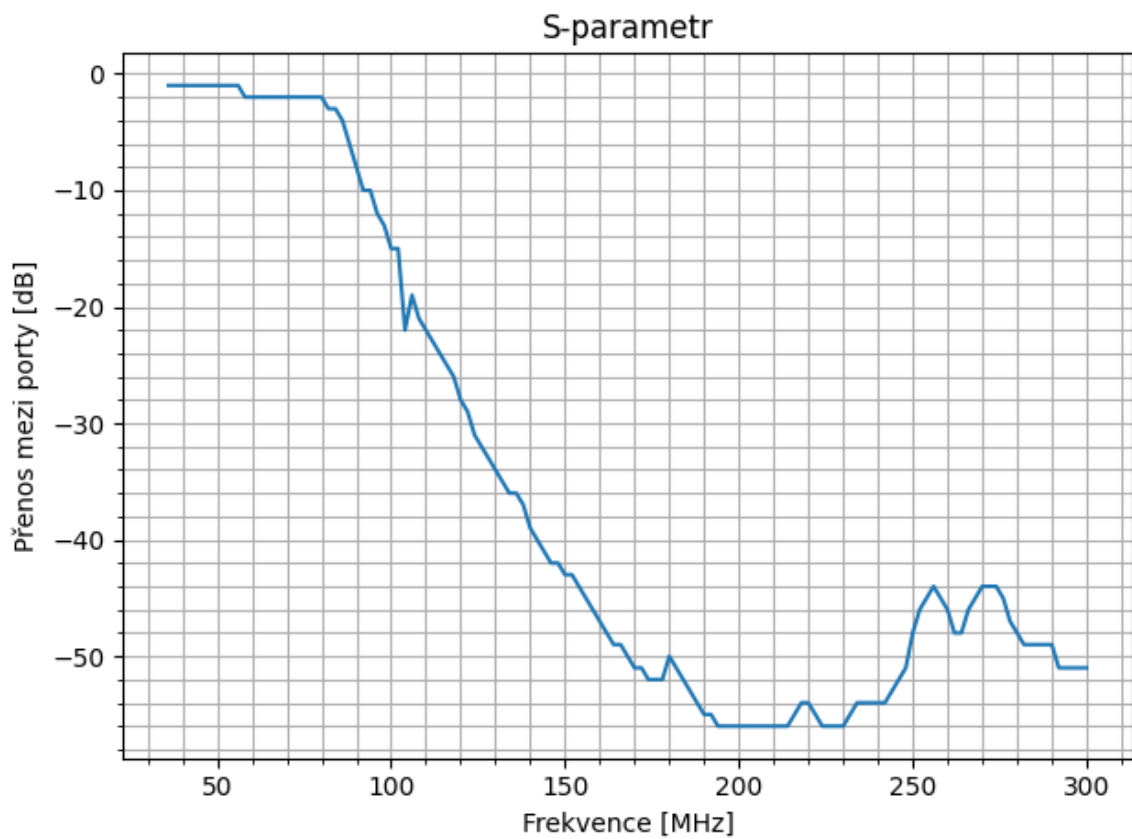
Ověření funkce při měření zvolených filtrů je kontrolní měření ověřující měřicí vlastnosti zařízení. Při tomto měření je zařízení v režimu pro měření s AVG. Detail na měřicí pracoviště je na obrázku 10.24. Prvním vzorkem filtru byl keramický LFCV-45+ od Mini-Circuit, na obrázcích 10.25 a 10.26 jsou dostupné výsledky získané měřením v režimu měření  $|S_{21}|$ . Pro porovnání naměřených hodnot bylo využito zapůjčeného vektorového analyzátoru NanoVNA. Měření analyzátozem je vyobrazeno obrázkem 10.27 a jehož výsledek je vykreslen obrázkem 10.28.



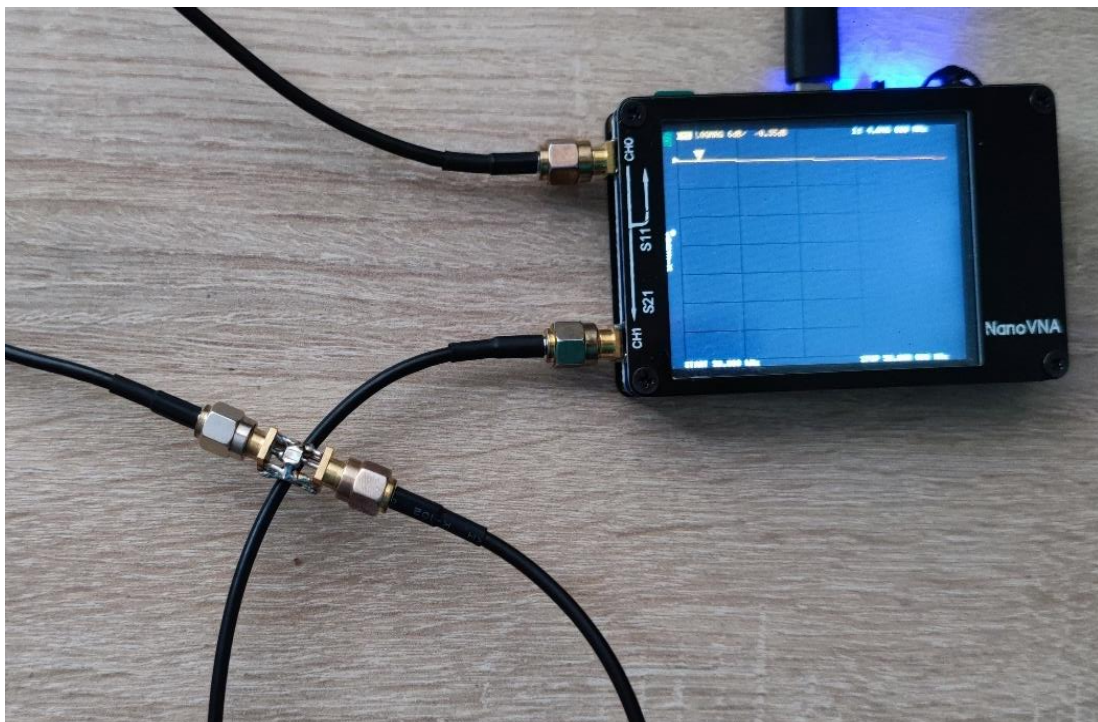
Obrázek 10.24: Ukázka měřicího pracoviště pro měření s-parametru  $|S_{21}|$  u filtru LFCV-45+. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 10.25: Ukázka detailu měřicího zobrazovače při měření s-parametru  $|S_{21}|$  u filtru LFCV-45+. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 10.26: Ukázka vykreslených naměřených výsledků s použitím exportní funkce dat GUI. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 10.27: Ukázka měřicího pracoviště při měření s-parametru  $|S_{21}|$  filtru LFCV-45+ s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.)



**Obrázek 10.28:** Ukázka naměřených dat při měření s-parametru |S21| filtru LFCV-45+ s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.)

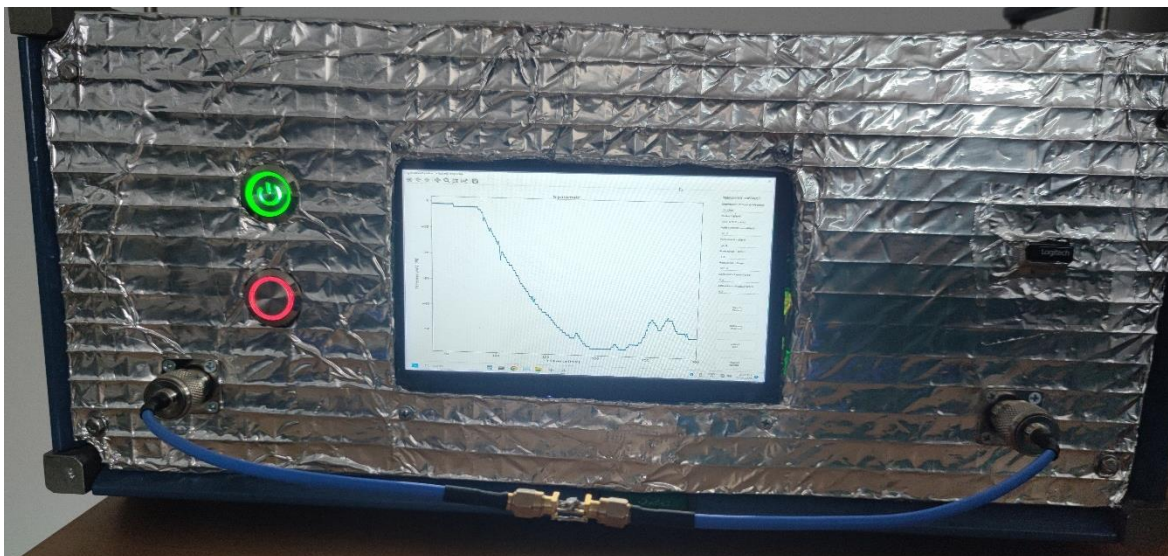
**Tabulka 10.6:** Porovnání naměřených hodnot při měření s-parametru |S21| filtru LFCV-45+.

	Frekvence: 60 MHz	Frekvence: 81 MHz	Frekvence: 100 MHz	Frekvence: 113 MHz	Frekvence: 190 MHz	Frekvence: 200 MHz	Frekvence: 300 MHz
NanoVNA  S21  [dB]	-2	-3	-15	-24	-53	-61	-45
Kopecký analyzátor  S21  [dB]	-2	-3	-15	-24	-55	-56	-51
Odchylka  S21  [dB]	0	0	0	0	2	5	6

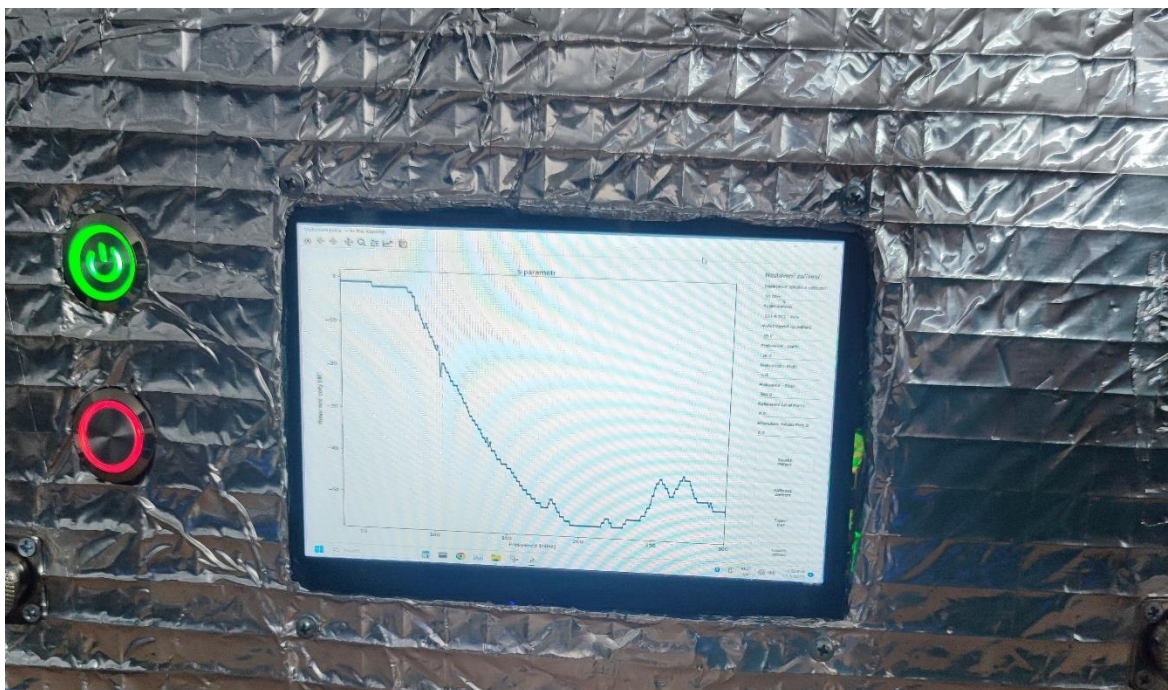
Pro porovnání měření filtru tohoto druhu a porovnání naměřených hodnot z obou měření v tabulce 6 bylo použito vektorového analyzátoru NanoVNA. Pro vyhodnocení naměřených výsledků byl porovnáván trend měření. Porovnáním trendu je viditelné, že v této části dochází ke shodě v důležitých částech měření, jako je zlomová frekvence pro -3 dB, dále očekávaný průběh měřené dolní propusti. Očekávané rozdíly nastávají v oblasti, kdy je měřená hodnota pod limitem citlivosti -55 dB, kdežto NanoVNA je schopna hodnoty ještě adekvátně změřit. Ostatní rozdíly jsou odpovídající nízké citlivosti a očekávané chybě měření postaveného zařízení v šumové oblasti. Měření je proto považováno za validní a ověření zařízení pro schopnost měřit |S21| tohoto filtru s označením LFCV-45+, byla potvrzena.

## 10.7 Ověření funkce při měření parametru $|S_{12}|$ u vzorku filtru LFCV-45+

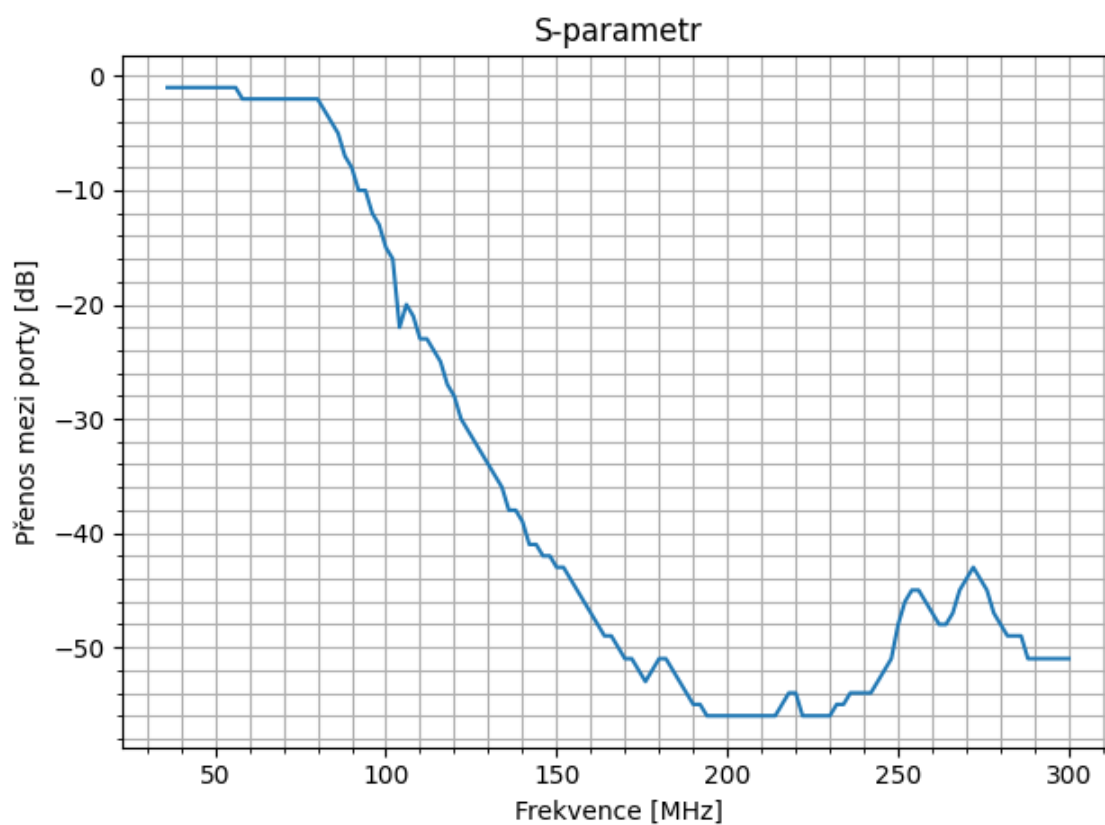
Ověřující měření bylo opakováno při stejných podmínkách, pouze se provedlo pro měření  $|S_{12}|$ . Detail na měřící pracoviště je na obrázku 10.29. Prvním vzorkem filtru byl keramický LFCV-45+ od Mini-Circuit, na obrázcích 10.30 a 10.31 jsou dostupné výsledky získané měřením v režimu měření  $|S_{12}|$ . Pro porovnání naměřených hodnot bylo využito zapůjčeného vektorového analyzátoru NanoVNA. Měření analyzátozem je vyobrazeno obrázkem 10.32 a jeho výsledek je vykreslen obrázkem 10.33.



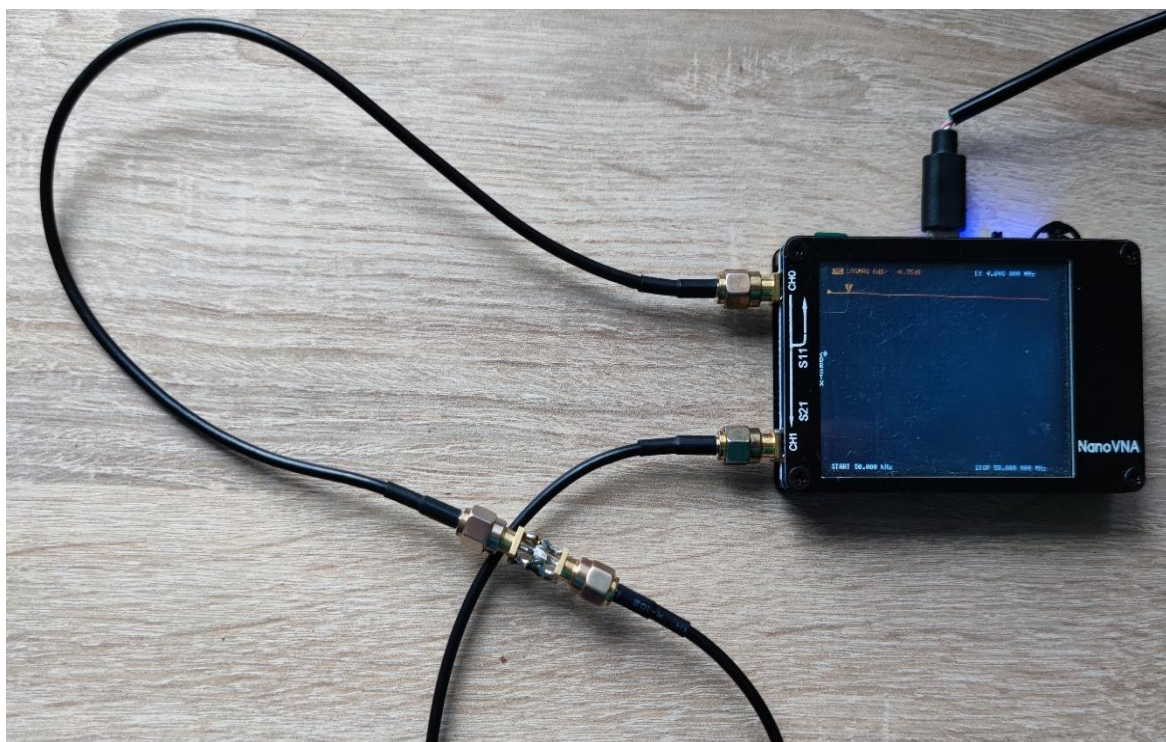
Obrázek 10.29: Ukázka měřícího pracoviště pro měření s-parametru  $|S_{12}|$  u filtru LFCV-45+.  
(Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 10.30: Ukázka detailu měřícího zobrazovače při měření s-parametru  $|S_{12}|$  u filtru LFCV-45+.(Zdroj: Vlastní.)

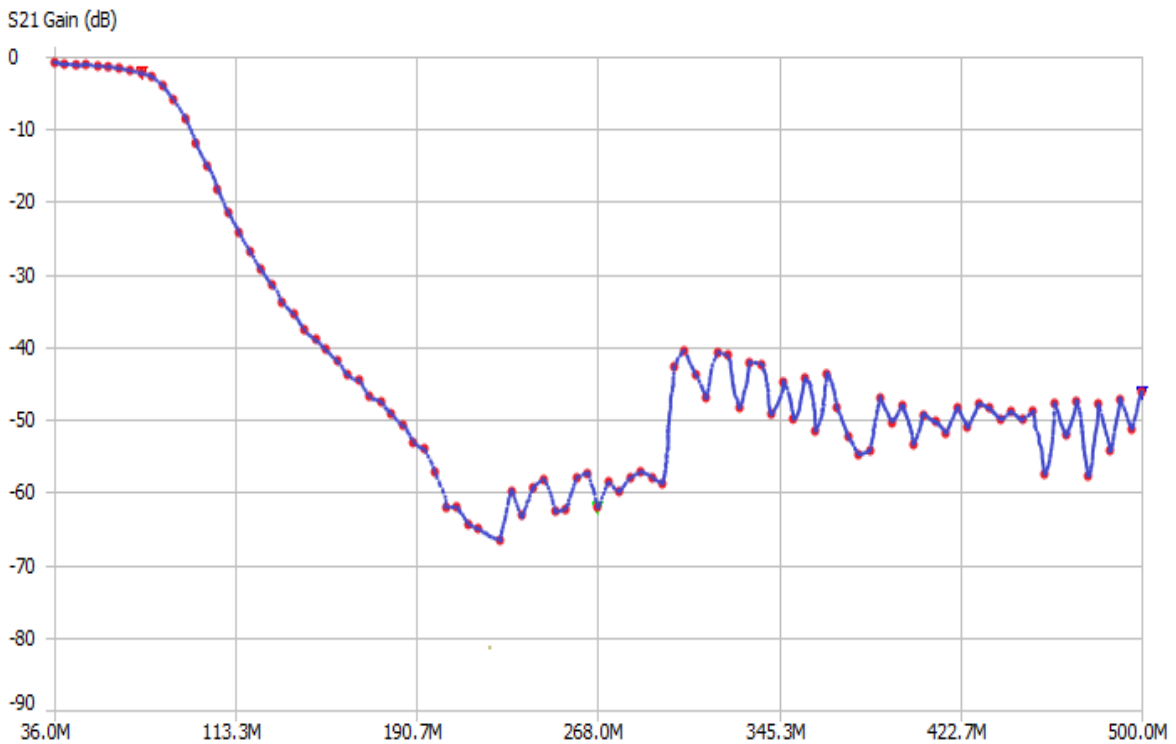


Obrázek 10.31: Ukázka vykreslených naměřených výsledků s použitím exportní funkce dat GUI. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 10.32: Ukázka měřícího pracoviště při měření s-parametru  $|S_{12}|$  filtru LFCV-45+ s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.)





**Obrázek 10.33:** Ukázka naměřených dat při měření s-parametru S12 filtru LFCV-45+ s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.)

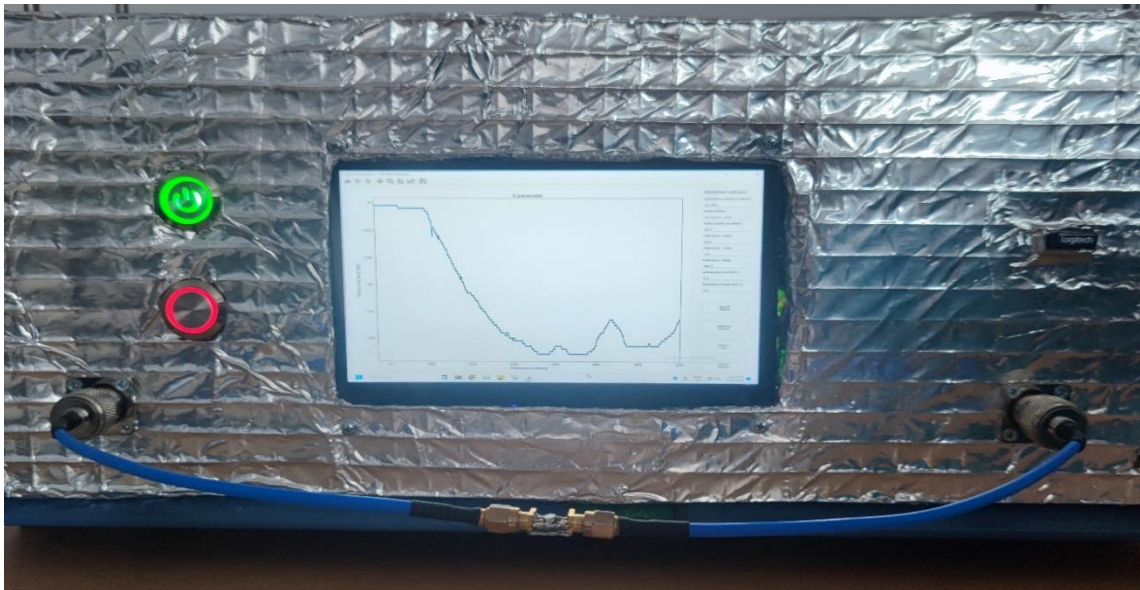
**Tabulka 10.7:** Porovnání naměřených hodnot při měření s-parametru |S12| filtru LFCV-45+.

	Frekvence: 60 MHz	Frekvence: 81 MHz	Frekvence: 100 MHz	Frekvence: 113 MHz	Frekvence: 190 MHz	Frekvence: 200 MHz	Frekvence: 300 MHz
NanoVNA  S12  [dB]	-2	-3	-15	-25	-53	-62	-48
Kopecký analyzátor  S12  [dB]	-2	-3	-15	-24	-54	-56	-51
Odchylka  S12  [dB]	0	0	0	4	1	6	3

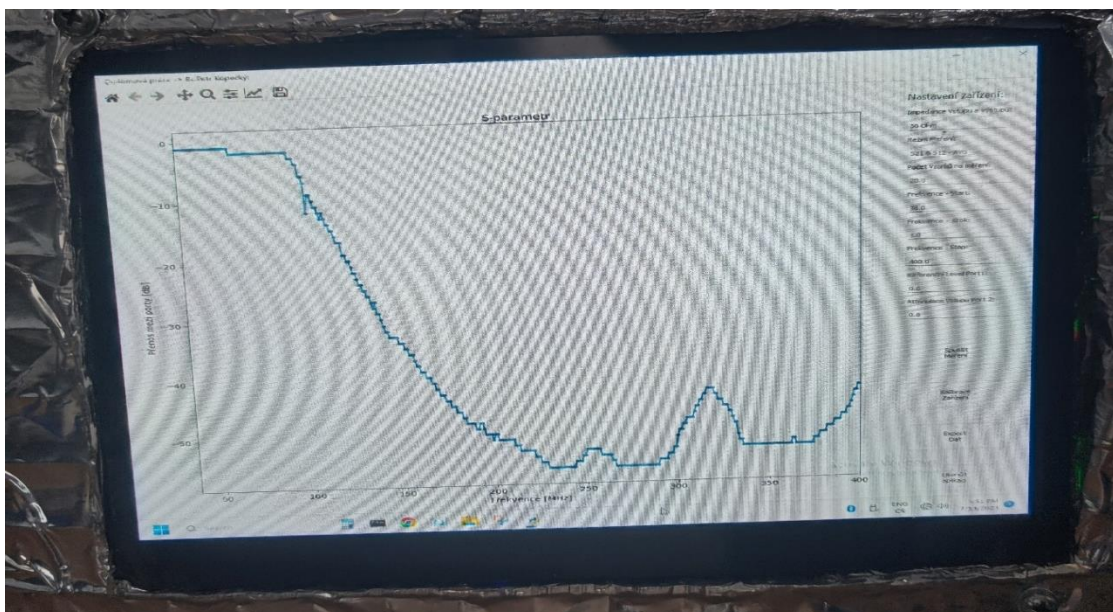
Pro porovnání měření filtru otočeného tohoto druhu a porovnání naměřených hodnot z obou měření v tabulce 7 bylo použito vektorového analyzátoru NanoVNA. Pro vyhodnocení naměřených výsledků byl porovnáván trend měření. Porovnáním trendu je viditelné, že v této části dochází ke shodě v důležitých částech měření, jako je zlomová frekvence pro -3 dB, dále očekávaný průběh měřené dolní propusti. Očekávané rozdíly nastávají v oblasti, kdy je měřená hodnota pod limitem citlivosti -55 dB, kdežto NanoVNA je schopna hodnoty ještě adekvátně změřit. Ostatní rozdíly jsou odpovídající nízké citlivosti a očekávané chybě měření postaveného zařízení v šumové oblasti. Měření je proto považováno za validní a ověření zařízení pro schopnost měřit |S12| tohoto filtru s označením LFCV-45+, byla potvrzena.

## 10.8 Ověření funkce při měření parametru $|S_{21}|$ u vzorku filtru LFCV-52+

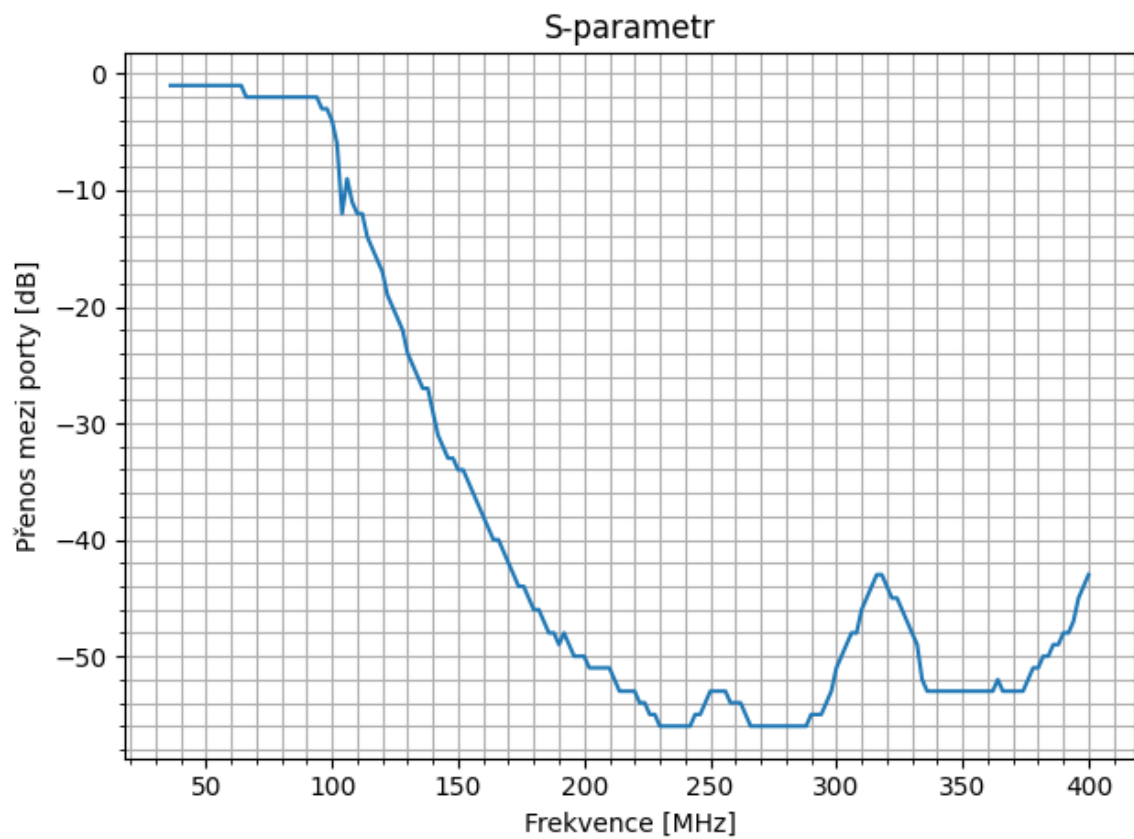
Dalším ověřujícím měřením je opakování měření při zvolení jiného dostupného filtru. Při tomto měření je zařízení v režimu pro měření s AVG. Detail na měřící pracoviště je na obrázku 10.34. Druhým vzorkem filtru byl keramický LFCV-52+ od Mini-Circuit, na obrázcích 10.35 a 10.36 jsou dostupné výsledky získané měřením v režimu měření  $|S_{21}|$ . Pro porovnání naměřených hodnot bylo využito zapůjčeného vektorového analyzátoru NanoVNA. Měření analyzátozem je vyobrazeno obrázkem 10.37 a jeho výsledek je vykreslen obrázkem 10.38.



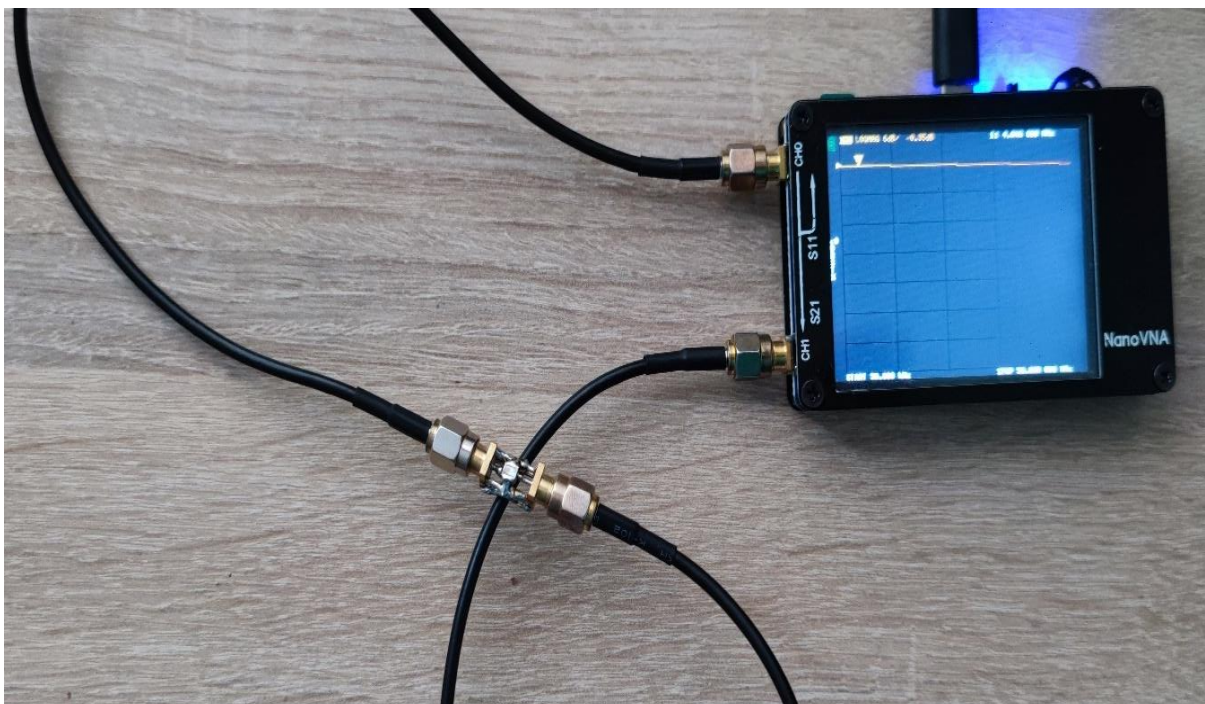
Obrázek 10.34: Ukázka měřícího pracoviště pro měření s-parametru  $|S_{21}|$  u filtru LFCV-52+. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 10.35: Ukázka detailu měřícího GUI při měření s-parametru  $|S_{21}|$  u filtru LFCV-52+. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 10.36: Ukázka vykreslených naměřených výsledků s použitím exportní funkce dat GUI. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 10.37: Ukázka měřicího pracoviště při měření s-parametru  $|S_{21}|$  filtru LFCV-52+ s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.)



**Obrázek 10.38:** Ukázka naměřených dat při měření s-parametru |S21| filtru LFCV-52+ s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.)

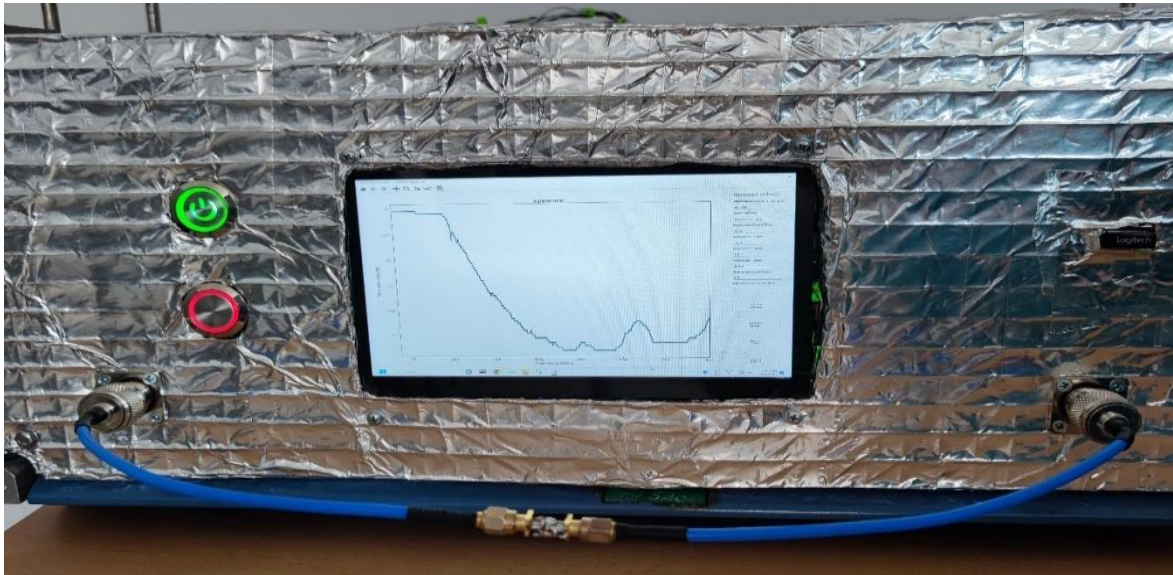
**Tabulka 10.8:** Porovnání naměřených hodnot při měření s-parametru |S21| filtru LFCV-52+.

	Frekvence: 70 MHz	Frekvence: 94 MHz	Frekvence: 113 MHz	Frekvence: 190 MHz	Frekvence: 268 MHz	Frekvence: 322 MHz	Frekvence: 400 MHz
NanoVNA  S21  [dB]	-2	-3	-13	-45	-61	-45	-41
Kopecký analyzátor  S21  [dB]	-2	-3	-13	-49	-54	-45	-43
Odchylka  S21  [dB]	0	0	0	4	7	0	2

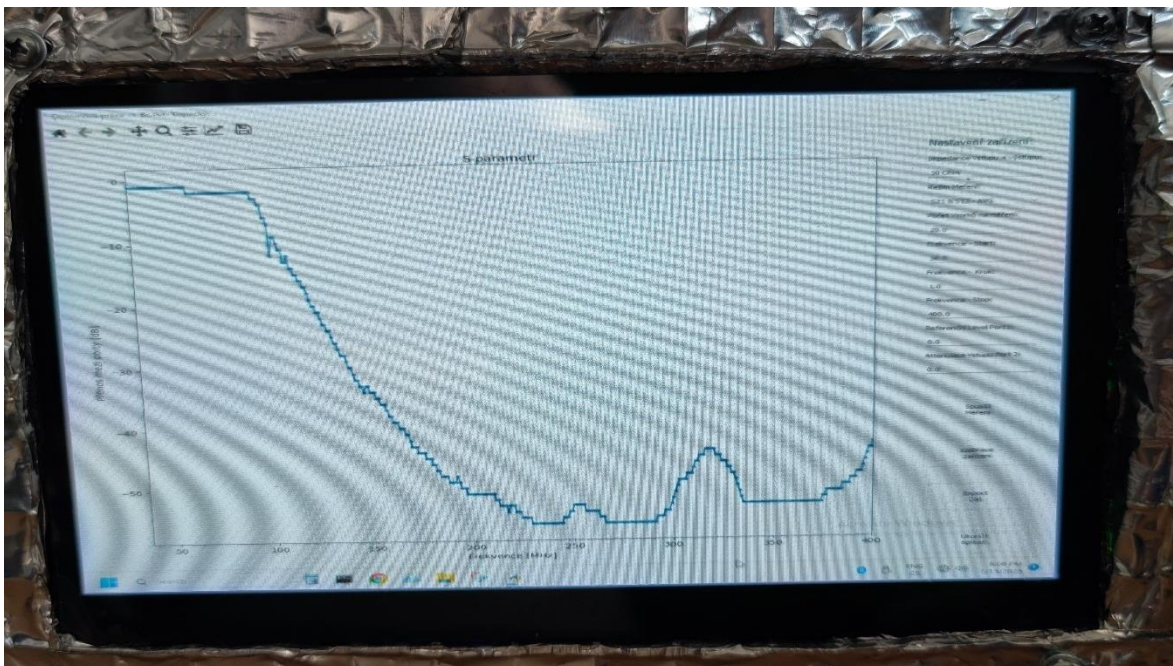
Pro porovnání měření filtru tohoto druhu a porovnání naměřených hodnot z obou měření v tabulce 8 bylo použito vektorového analyzátoru NanoVNA. Pro vyhodnocení naměřených výsledků byl porovnáván trend měření. Porovnáním trendu je viditelné, že v této části dochází ke shodě v důležitých částech měření, jako je zlomová frekvence pro -3 dB dále očekávaný průběh měřené dolní propusti. Očekávané rozdíly nastávají v oblasti, kdy je měřená hodnota pod limitem citlivosti -55 dB, kdežto NanoVNA je schopna hodnoty ještě adekvátně změřit. Ostatní rozdíly jsou odpovídající nízké citlivosti a očekávané chybě měření postaveného zařízení v šumové oblasti. Měření je proto považováno za validní a ověření zařízení pro schopnost měřit |S21| tohoto filtru s označením LFCV-52+, byla potvrzena.

## 10.9 Ověření funkce při měření parametru $|S_{12}|$ u vzorku filtru LFCV-52+

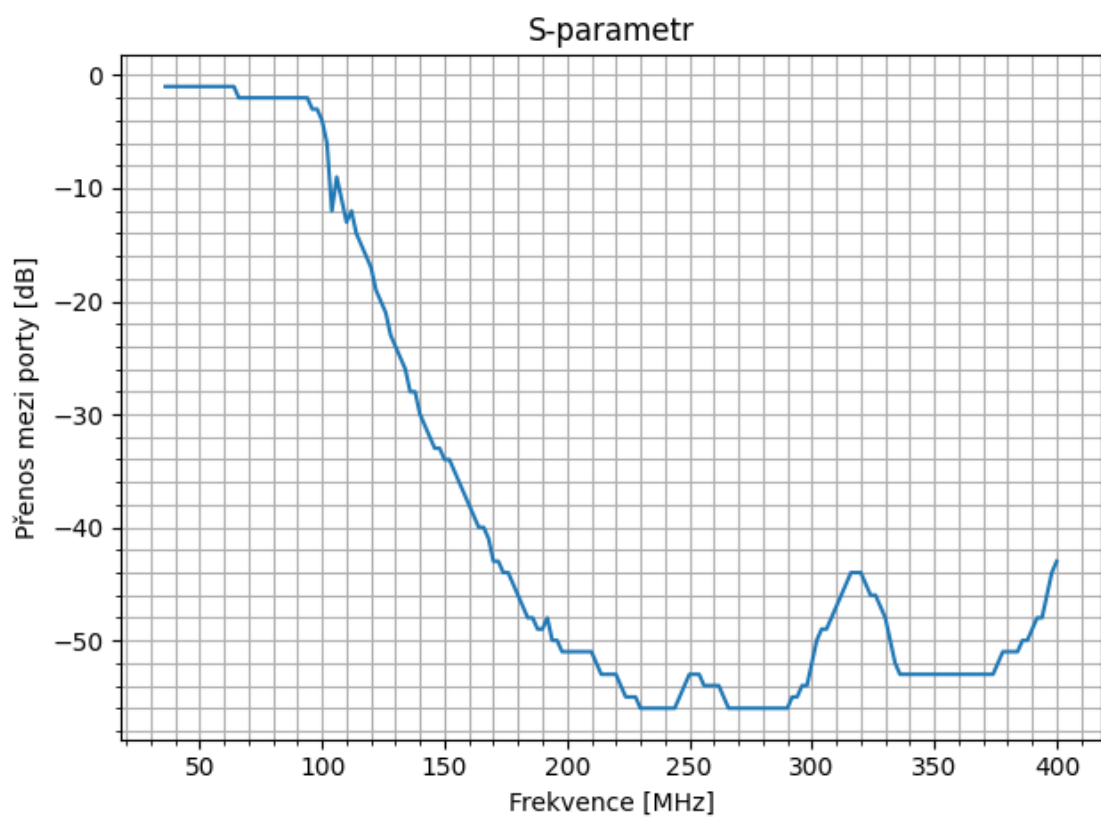
Ověřující měření bylo opakováno při stejných podmínkách, pouze se provedlo pro měření  $|S_{12}|$ . Detail na měřící pracoviště je na obrázku 10.39. Druhým vzorkem filtru byl keramický LFCV-52+ od Mini-Circuit, na obrázcích 10.40 a 10.41 jsou dostupné výsledky získané měřením v režimu měření  $|S_{12}|$ . Pro porovnání naměřených hodnot bylo využito zapůjčeného vektorového analyzátoru NanoVNA. Měření analyzátozem je vyobrazeno obrázkem 10.42 a jeho výsledek je vykreslen obrázkem 10.43.



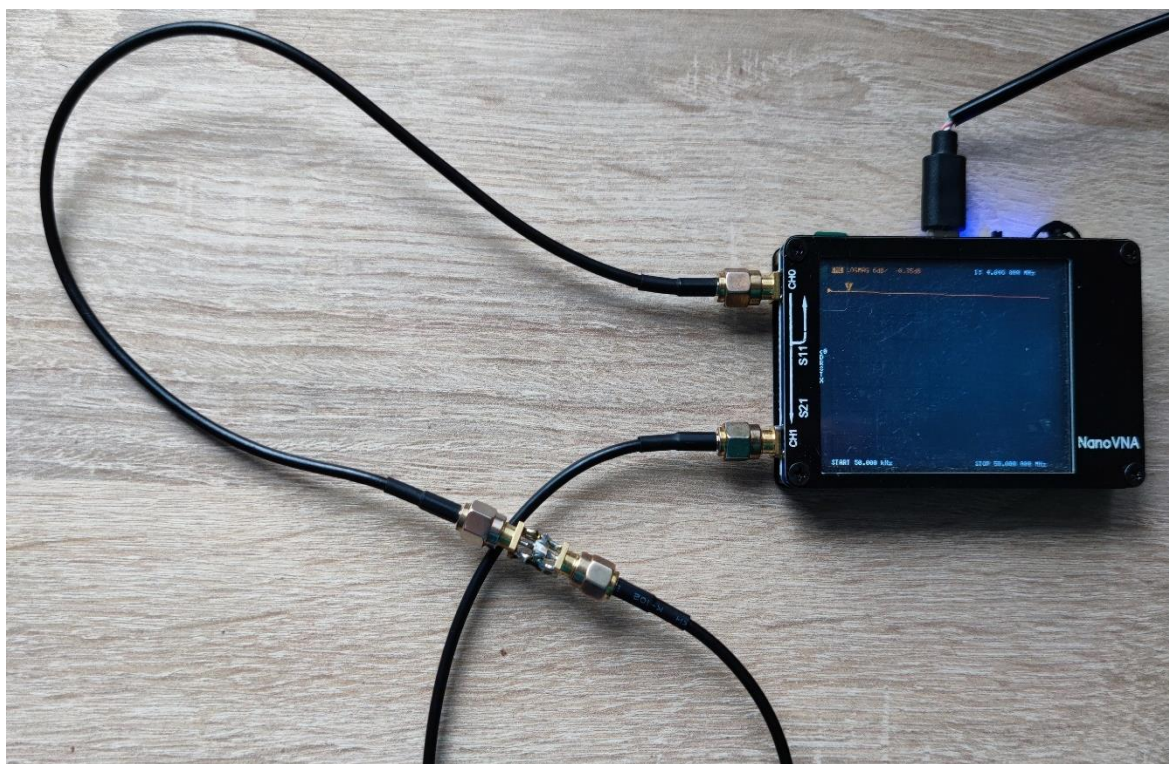
Obrázek 10.39: Ukázka měřícího pracoviště pro měření s-parametru  $|S_{12}|$  u filtru LFCV-52+. (Zdroj: Vlastní.)



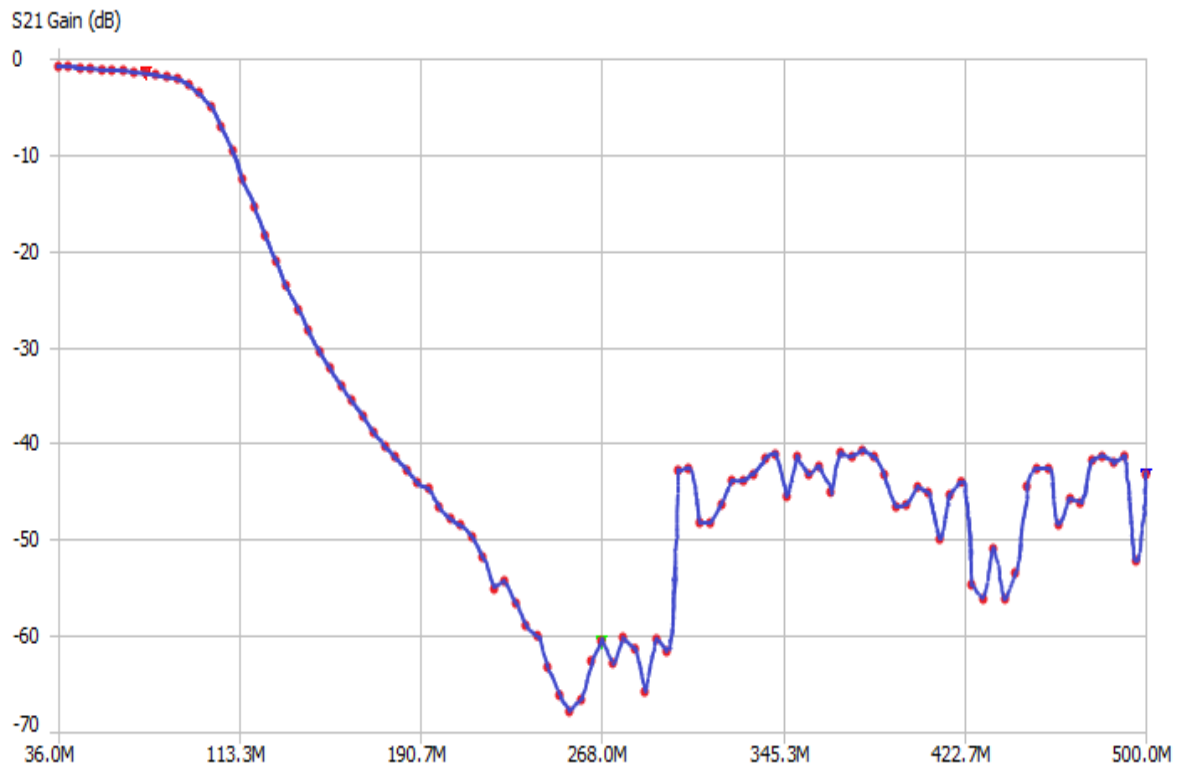
Obrázek 10.40: Ukázka detailu měřícího zobrazovače při měření s-parametru  $|S_{12}|$  u filtru LFCV-52+. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 10.41: Ukázka vykreslených naměřených výsledků s použitím exportní funkce dat GUI. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 10.42: Ukázka měřícího pracoviště při měření s-parametru  $|S_{12}|$  filtru LFCV-52+ s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 10.43: Ukázka naměřených dat při měření s-parametru |S12| filtru LFCV-52+ s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.)

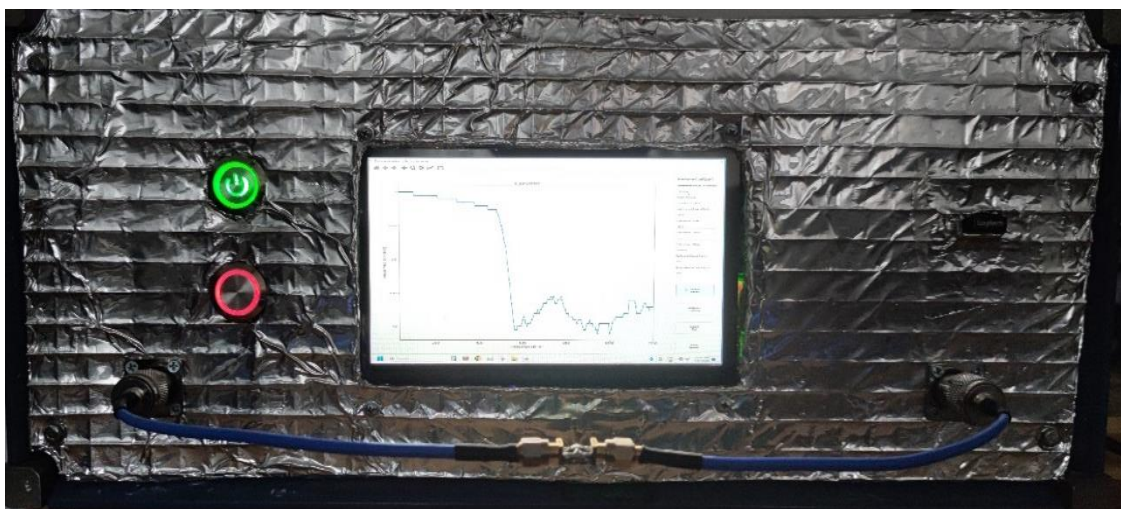
Tabulka 10.9: Porovnání naměřených hodnot při měření s-parametru |S12| filtru LFCV-52+.

	Frekvence: 70 MHz	Frekvence: 94 MHz	Frekvence: 113 MHz	Frekvence: 190 MHz	Frekvence: 268 MHz	Frekvence: 322 MHz	Frekvence: 400 MHz
NanoVNA  S12  [dB]	-2	-3	-13	-45	-60	-44	-45
Kopecký analyzátor  S12  [dB]	-2	-3	-13	-49	-56	-46	-43
Odchylka  S12  [dB]	0	0	0	4	4	2	2

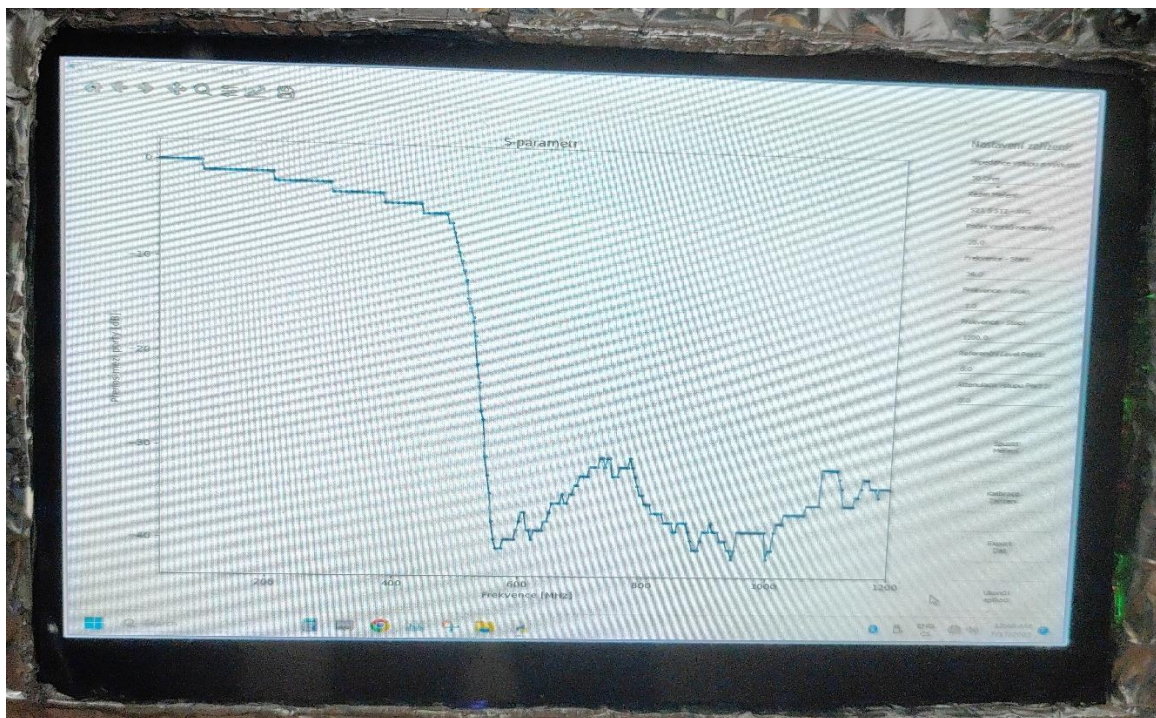
Pro porovnání měření filtru otočeného tohoto druhu a porovnání naměřených hodnot z obou měření v tabulce 9 bylo použito vektorového analyzátoru NanoVNA. Pro vyhodnocení naměřených výsledků byl porovnáván trend měření. Porovnáním trendu je viditelné, že v této části dochází ke shodě v důležitých částech měření, jako je zlomová frekvence pro -3 dB dále očekávaný průběh měřené dolní propusti. Očekávané rozdíly nastávají v oblasti, kdy je měřená hodnota pod limitem citlivosti -55 dB, kdežto NanoVNA je schopna hodnoty ještě adekvátně změřit. Ostatní rozdíly jsou odpovídající nízké citlivosti a očekávané chybě měření postaveného zařízení v šumové oblasti. Měření je proto považováno za validní a ověření zařízení pro schopnost měřit |S12| tohoto filtru s označením LFCV-52+, byla potvrzena.

## 10.10 Ověření funkce při měření parametru $|S_{21}|$ u vzorku LFCN-320+

Posledním ověřujícím měřením tohoto druhu je opakování měření při zvolení jiného dostupného filtru. Při tomto měření je zařízení v režimu pro měření s AVG. Detail na měřící pracoviště je na obrázku 10.44. Třetím vzorkem filtru byl keramický LFCN-320+ od Mini-Circuit, na obrázcích 10.45 a 10.46 jsou dostupné výsledky získané měřením v režimu měření  $|S_{21}|$ . Pro porovnání naměřených hodnot bylo využito zapůjčeného vektorového analyzátoru NanoVNA. Měření analyzátozem je vyobrazeno obrázkem 10.47 a jeho výsledek je vykreslen obrázkem 10.48.

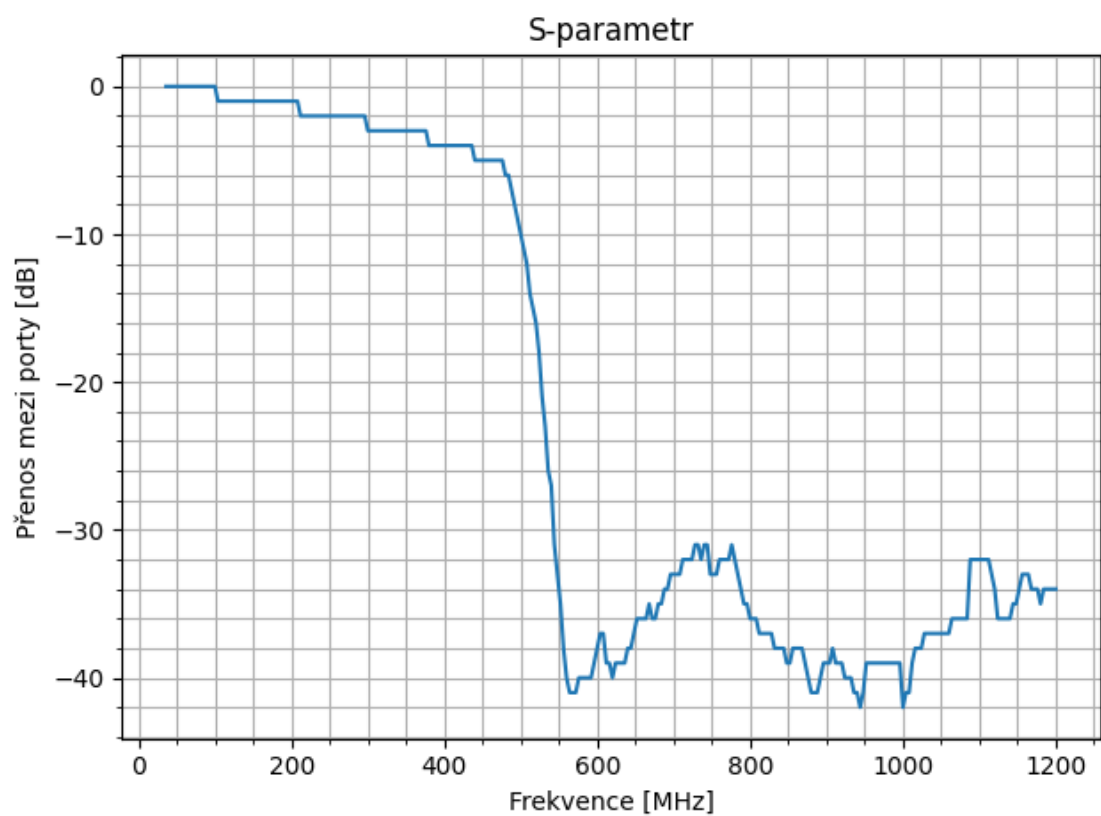


Obrázek 10.44: Ukázka měřícího pracoviště pro měření s-parametru  $|S_{21}|$  u filtru LFCN-320+. (Zdroj: Vlastní.)

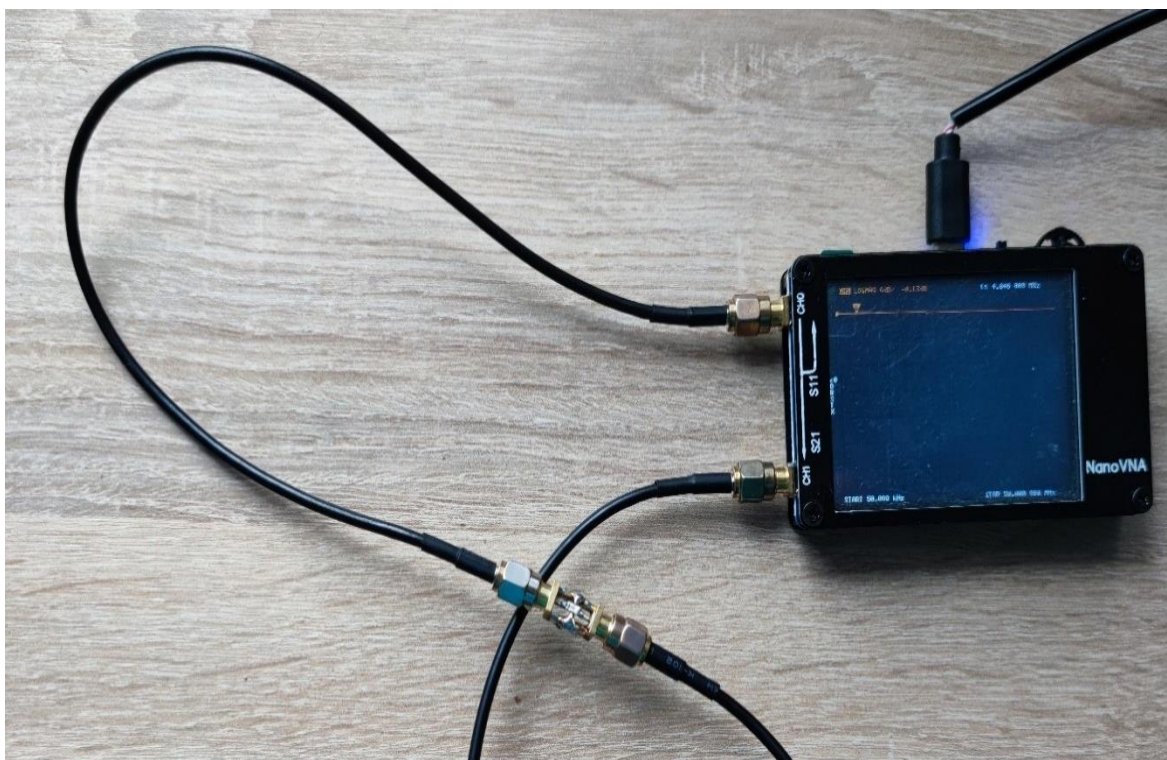


Obrázek 10.45: Ukázka detailu měřícího zobrazovače při měření s-parametru  $|S_{21}|$  u filtru LFCN-320+. (Zdroj: Vlastní.)

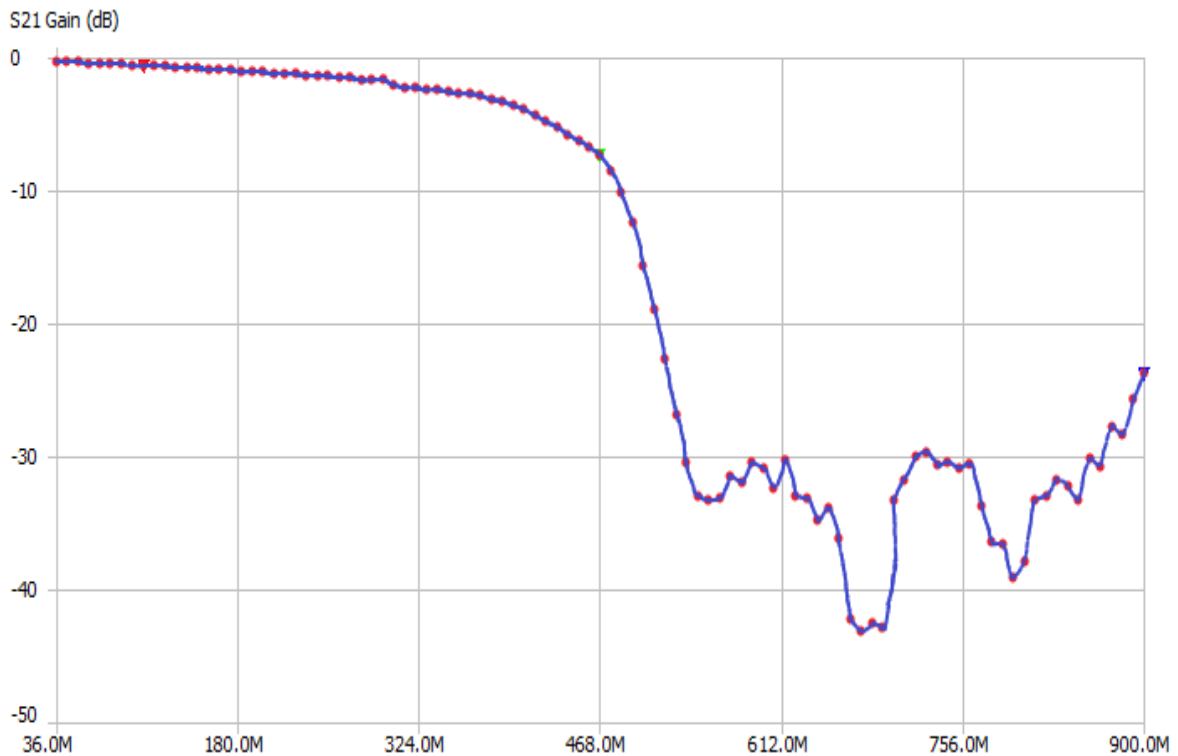




Obrázek 10.46: Ukázka vykreslených naměřených výsledků s použitím exportní funkce dat GUI. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 10.47: Ukázka měřícího pracoviště při měření s-parametru  $|S_{21}|$  filtru LFCN-320+ s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.)



**Obrázek 10.48:** Ukázka naměřených dat při měření s-parametru  $|S_{21}|$  filtru LFCN-320+ s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.)

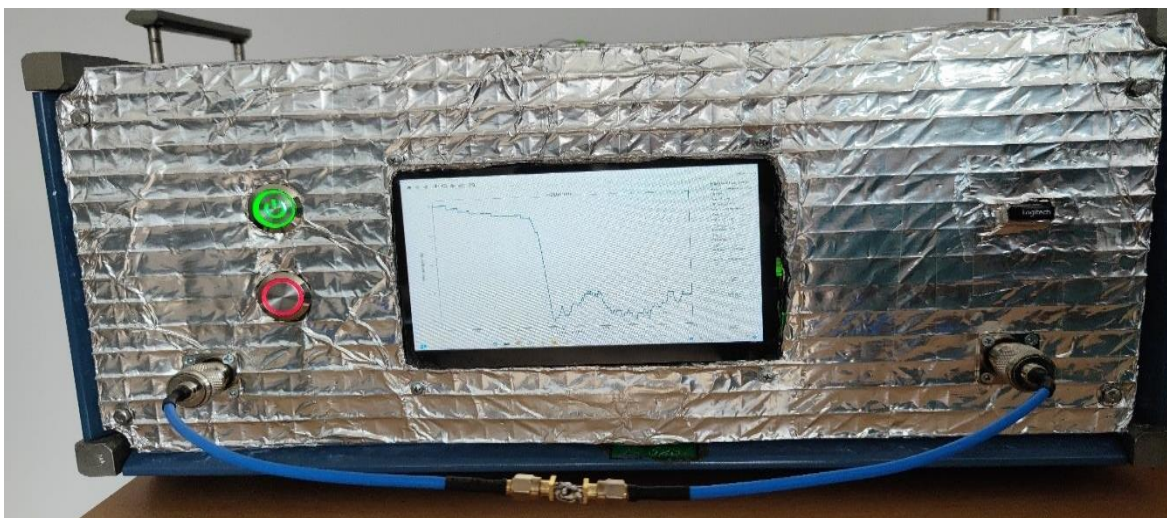
**Tabulka 10.10:** Porovnání naměřených hodnot při měření s-parametru  $|S_{21}|$  filtru LFCN-320+.

	Frekvence: 180 MHz	Frekvence: 300 MHz	Frekvence: 450 MHz	Frekvence: 500 MHz	Frekvence: 550 MHz	Frekvence: 612 MHz	Frekvence: 750 MHz
NanoVNA $ S_{21} $ [dB]	-2	-3	-5	-10	-34	-30	-31
Kopecký analyzátor $ S_{21} $ [dB]	-2	-3	-5	-10	-34	-39	-33
Odchylka $ S_{21} $ [dB]	0	0	0	0	3	6	3

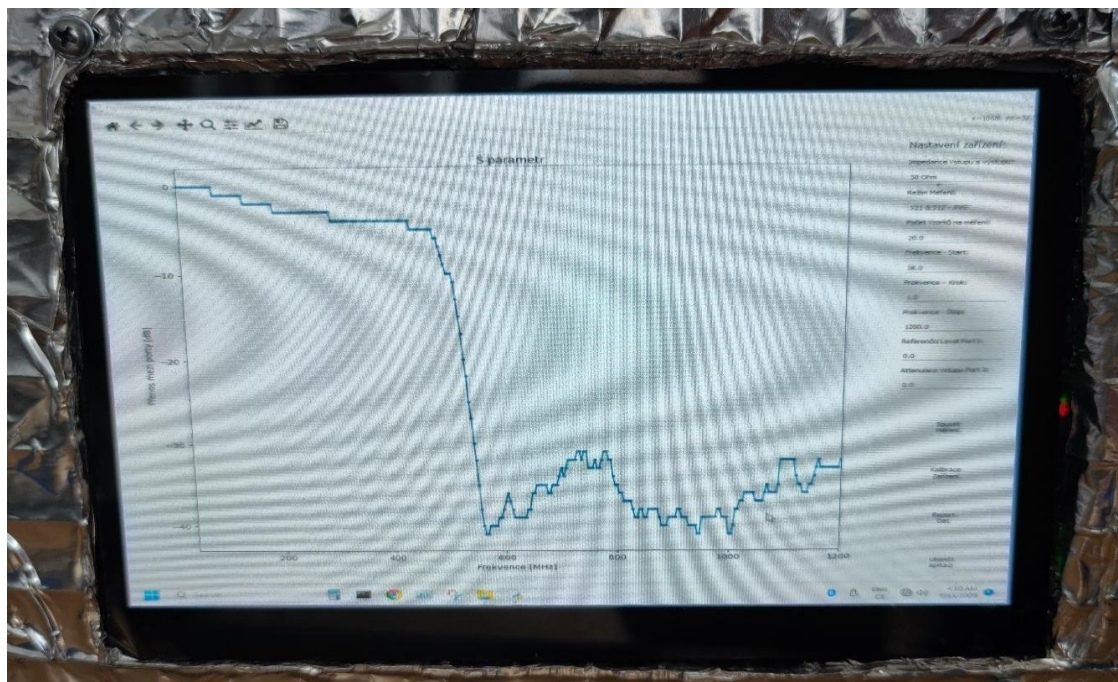
Pro porovnání měření filtru tohoto druhu a porovnání naměřených hodnot z obou měření v tabulce 10 bylo použito vektorového analyzátoru NanoVNA. Pro vyhodnocení naměřených výsledků byl porovnáván trend měření. Porovnáním trendu je viditelné, že v této části dochází ke shodě v důležitých částech měření, jako je zlomová frekvence pro -3 dB, dále očekávaný průběh měřené dolní propusti. Očekávané rozdíly nastávají v oblasti, kdy je měřená hodnota pod limitem citlivosti -55 dB, kdežto NanoVNA je schopna hodnoty ještě adekvátně změřit. Ostatní rozdíly jsou odpovídající nízké citlivosti a očekávané chybě měření postaveného zařízení v šumové oblasti. Měření je proto považováno za validní a ověření zařízení pro schopnost měřit  $|S_{21}|$  tohoto filtru s označením LFCN-320+, byla potvrzena.

## 10.11 Ověření funkce při měření parametru $|S_{12}|$ u vzorku filtru LFCN-320+

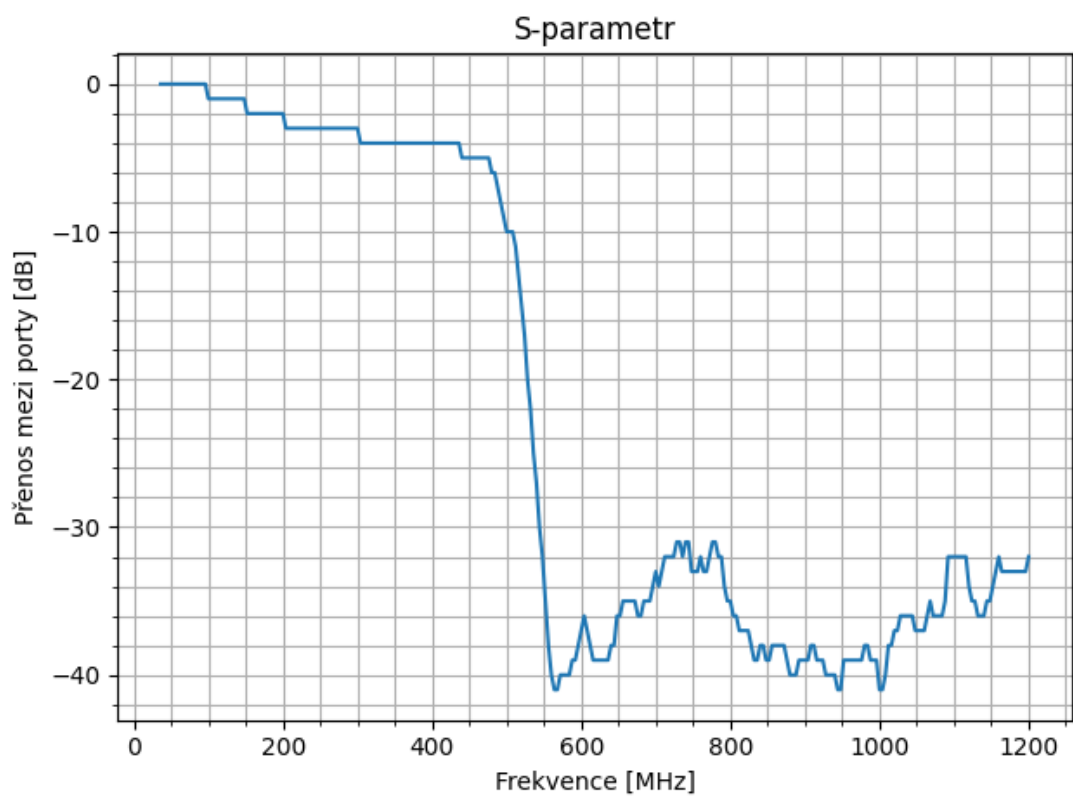
Ověřující měření bylo opakováno při stejných podmínkách, pouze se provedlo pro měření  $|S_{12}|$ . Detail na měřicí pracoviště je na obrázku 10.49. Třetím vzorkem filtru byl keramický LFCN-320+ od Mini-Circuit, na obrázcích 10.50 a 10.51 jsou dostupné výsledky získané měřením v režimu měření  $|S_{12}|$ . Pro porovnání naměřených hodnot bylo využito zapůjčeného vektorového analyzátoru NanoVNA. Měření analyzátozem je vyobrazeno obrázkem 10.52 a jeho výsledek je vykreslen obrázkem 10.53.



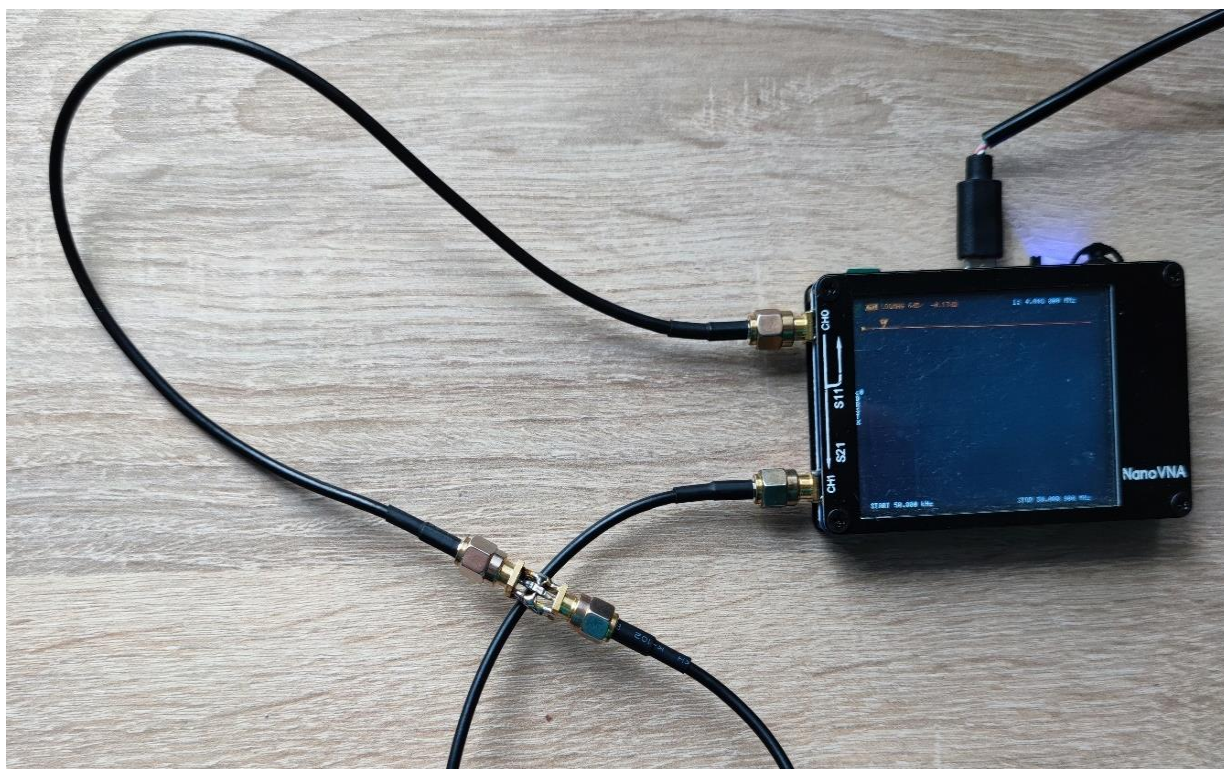
Obrázek 10.49: Ukázka měřicího pracoviště pro měření s-parametru  $|S_{12}|$  u filtru LFCN-320+. (Zdroj: Vlastní.)



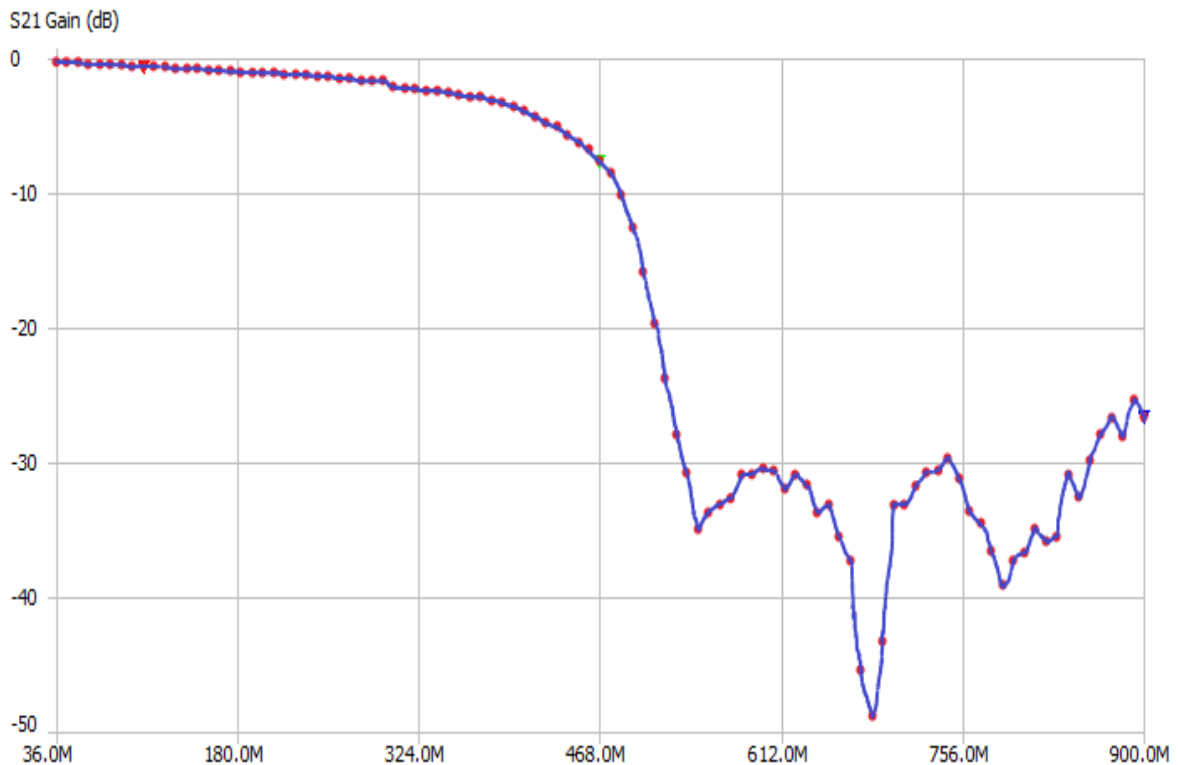
Obrázek 10.50: Ukázka detailu měřicího zobrazovače při měření s-parametru  $|S_{12}|$  u filtru LFCN-320+. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 10.51: Ukázka vykreslených naměřených výsledků s použitím exportní funkce dat GUI. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 10.52: Ukázka měřícího pracoviště při měření s-parametru  $|S_{12}|$  filtru LFCN-320+ s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.)



**Obrázek 10.53:** Ukázka naměřených dat při měření s-parametru |S12| filtru LFCN-320+ s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.)

**Tabulka 10.11:** Porovnání naměřených hodnot při měření s-parametru |S12| filtru LFCN-320+.

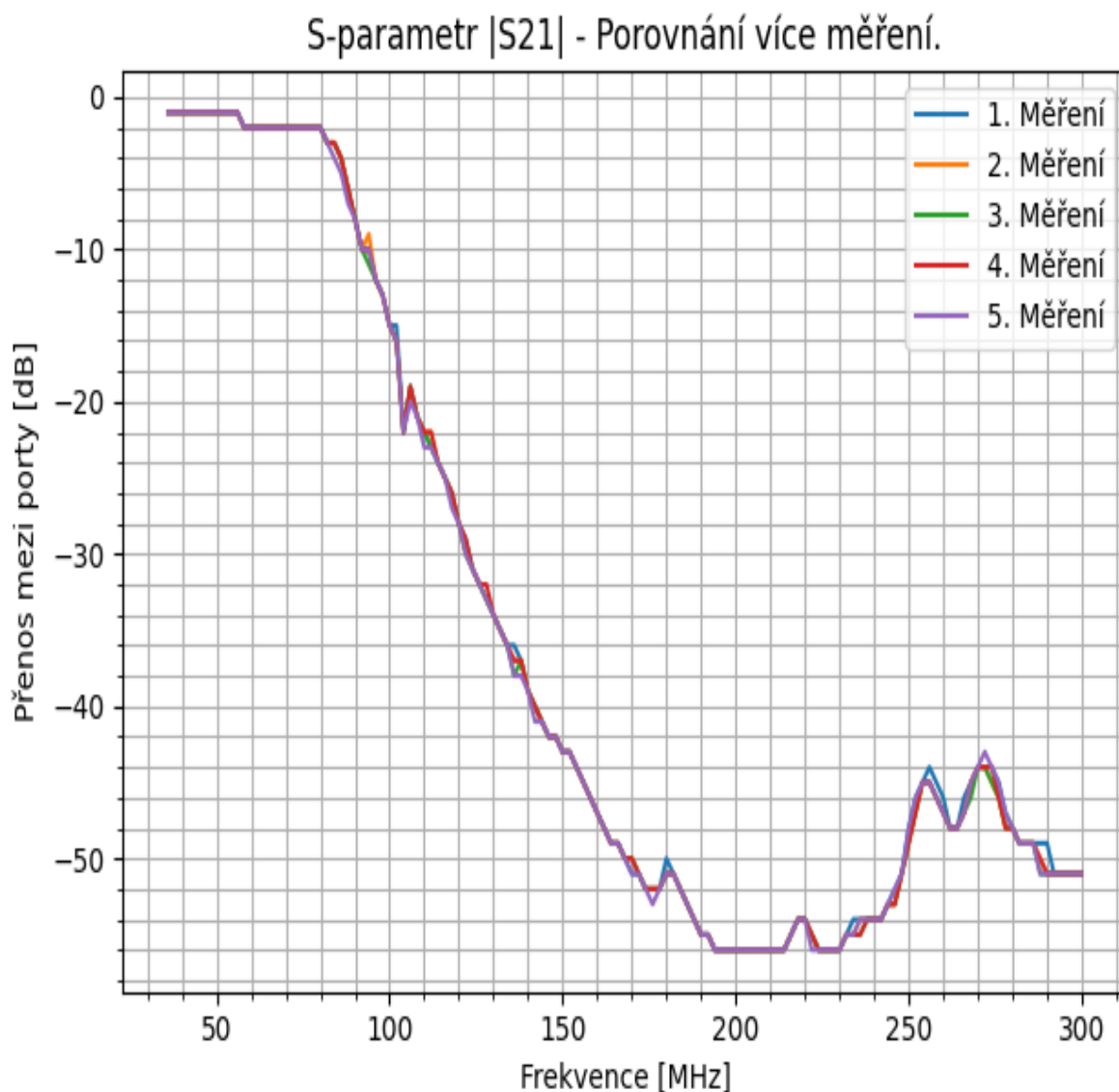
	Frekvence: 180 MHz	Frekvence: 300 MHz	Frekvence: 450 MHz	Frekvence: 500 MHz	Frekvence: 550 MHz	Frekvence: 612 MHz	Frekvence: 750 MHz
NanoVNA  S12  [dB]	-2	-3	-5	-10	-35	-32	-30
Kopecký analyzátor  S12  [dB]	-2	-3	-5	-10	-32	-38	-33
Odchylna  S12  [dB]	0	0	0	0	3	6	3

Pro porovnání měření filtru otočeného tohoto druhu a porovnání naměřených hodnot z obou měření v tabulce 11 bylo použito vektorového analyzátoru NanoVNA. Pro vyhodnocení naměřených výsledků byl porovnáván trend měření. Porovnáním trendu je viditelné, že v této části dochází ke shodě v důležitých částech měření, jako je zlomová frekvence pro -3 dB, dále očekávaný průběh měřené dolní propusti. Očekávané rozdíly nastávají v oblasti, kdy je měřená hodnota pod limitem citlivosti -55 dB, kdežto NanoVNA je schopna hodnoty ještě adekvátně změřit. Ostatní rozdíly jsou odpovídající nízké citlivosti a očekávané chybě měření postaveného zařízení v šumové oblasti. Měření je proto považováno za validní a ověření zařízení pro schopnost měřit |S12| tohoto filtru s označením LFCN-320+, byla potvrzena.

## 10.12 Ověření funkce při opakovaném měření zvoleného filtru

Dalším ověřovacím měřením bylo opakované měření vybraného dvojbranu. Pro toto měření byl zvolen filtr LFCV-45+ od Mini-Circuit. Měření v režimu  $|S_{21}|$  s tímto filtrem bylo 5x opakováno a výsledky tohoto měření jsou vyobrazeny v grafu na obrázku 10.54.

Záznam z tohoto měření je v tabulce 12. Porovnáním výsledků bylo ověřeno, že trend je identický pro všechna měření a hodnoty se liší pouze o jednotky dB pro výkony na úrovni šumu. Zařízení tedy obstálo při tomto testování, výchytky měření byly v akceptovatelných mezích. Odchytky vzniklé při měření nízkých úrovní výkonu byly pravděpodobně způsobeny vnitřním šumem přijímače.



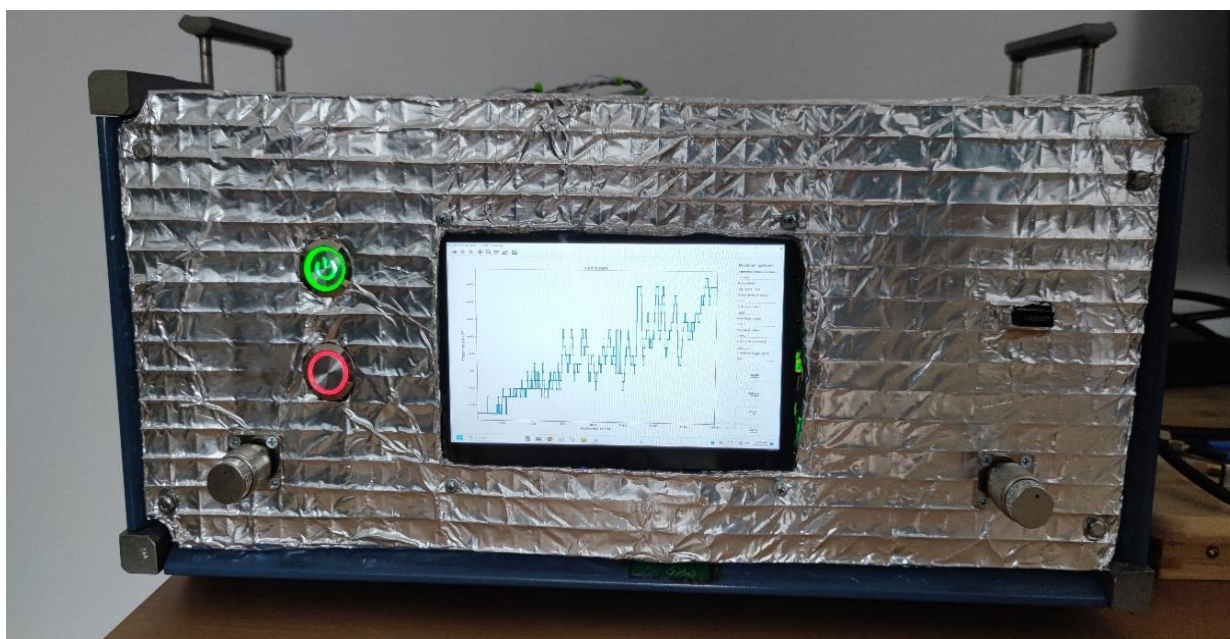
Obrázek 10.54: Ukázka vykreslených naměřených výsledků 5 měření filtru LFCV-45+. (Zdroj: Vlastní.)

**Tabulka 10.12: Porovnání naměřených hodnot při 5 měřeních filtru LFCV-45+.**

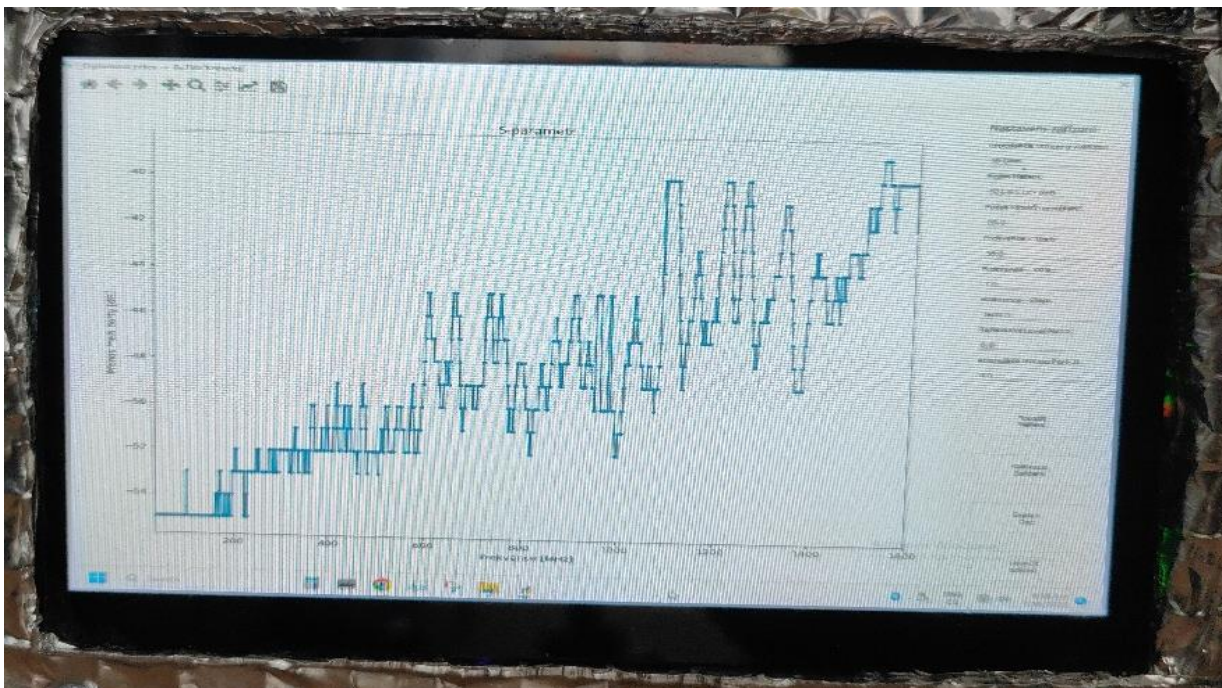
	Frekvence: 36 MHz	Frekvence: 82 MHz	Frekvence: 100 MHz	Frekvence: 136 MHz	Frekvence: 180 MHz	Frekvence: 250 MHz	Frekvence: 272 MHz
1. Měření  S21  [dB]	-1	-3	-15	-36	-50	-49	-44
2. Měření  S21  [dB]	-1	-3	-15	-37	-51	-49	-44
3. Měření  S21  [dB]	-1	-3	-15	-38	-51	-49	-44
4. Měření  S21  [dB]	-1	-3	-15	-37	-51	-49	-44
5. Měření  S21  [dB]	-1	-3	-15	-38	-51	-48	-43

### 10.13 Ověření funkce při měření izolace portu

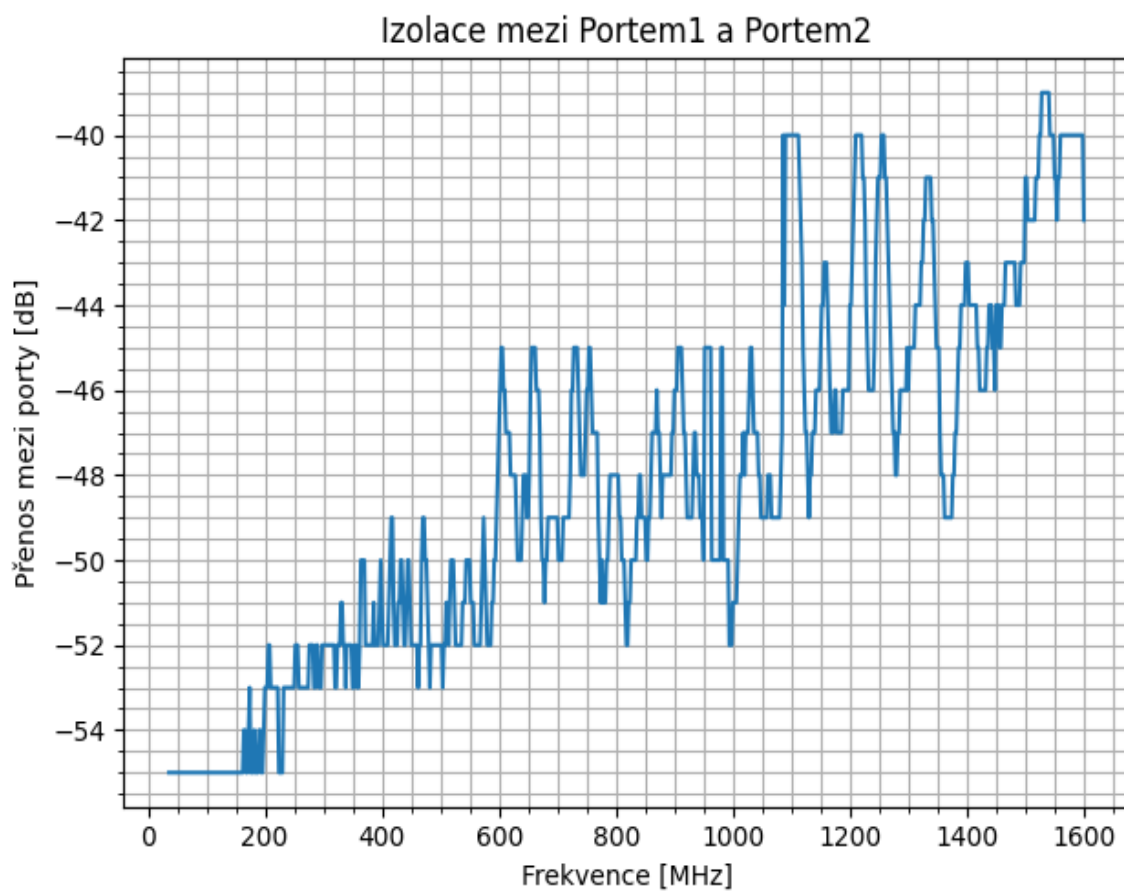
Posledním diagnostickým ověřením funkce je měření izolace Portu1 a Portu2. Toto měření slouží jako kontrolní diagnostické měření ověřujících funkci zařízení. Při tomto měření je zařízení v režimu pro měření s AVG. Zařízení má zakončené oba porty zakončovací impedancí 50  $\Omega$ , vyobrazeno na obrázku 10.55. Naměřené hodnoty izolace portu jsou na obrázcích 10.56 a 10.57 Porovnání naměřených hodnot s hodnotami ze zapůjčeného vektorového analyzátoru NanoVNA je na obrázcích 10.58 a 10.59.



**Obrázek 10.55: Ukázka měřícího pracoviště pro měření izolace portu. (Zdroj: Vlastní.)**

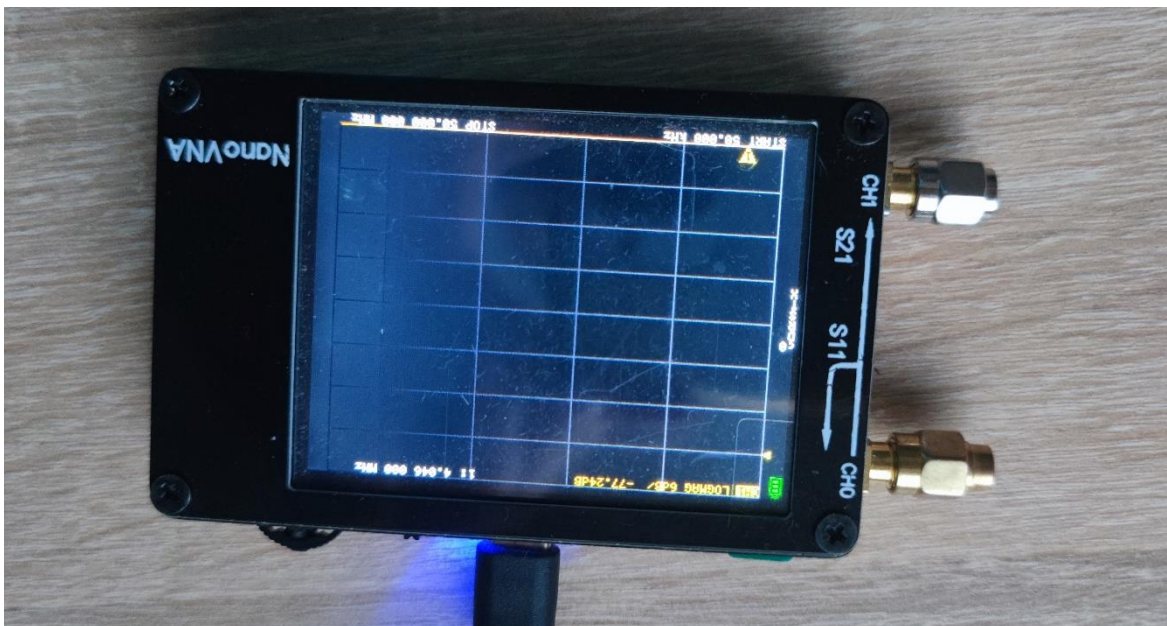


Obrázek 10.56: Ukázka detailu měřícího zobrazovače při měření izolace portu. (Zdroj: Vlastní.)

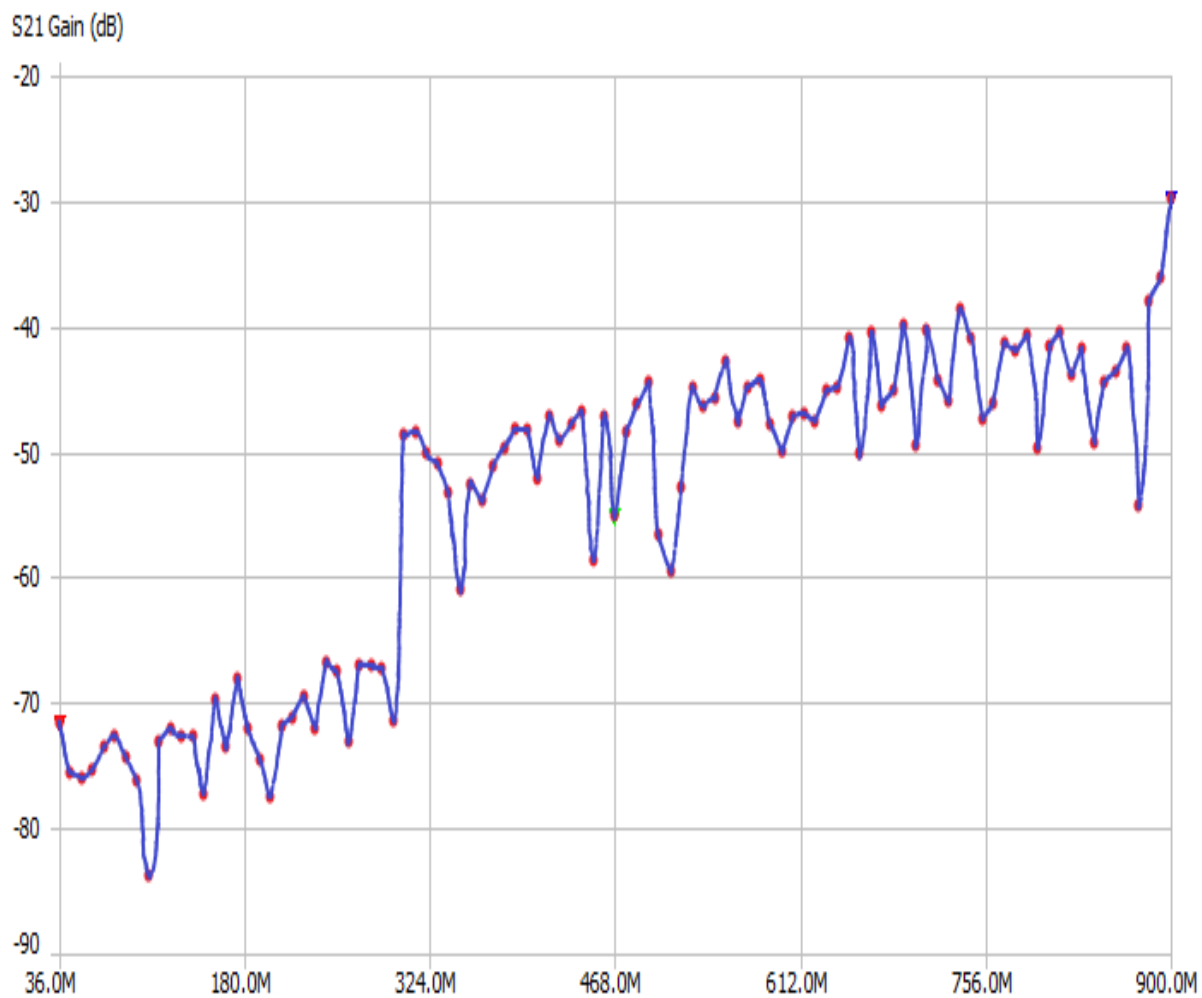


Obrázek 10.57: Ukázka vykreslených naměřených výsledku s použitím exportní funkce dat GUI. (Zdroj: Vlastní.)





Obrázek 10.58: Ukázka měřícího pracoviště při měření izolace Portu1 a Portu2 s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.)



Obrázek 10.59: Ukázka naměřených dat při měření izolace s NanoVNA. (Zdroj: Vlastní.)

**Tabulka 10.13: Porovnání naměřených hodnot při měřeních izolace portů.**

	<b>Frekvence: 36 MHz</b>	<b>Frekvence: 180 MHz</b>	<b>Frekvence: 324 MHz</b>	<b>Frekvence: 468 MHz</b>	<b>Frekvence: 612 MHz</b>	<b>Frekvence: 756 MHz</b>	<b>Frekvence: 900 MHz</b>
NanoVNA  S21  [dB]	-71	-71	-50	-55	-47	-48	-30
Kopecký analyzátor  S21  [dB]	-55	-55	-52	-50	-46	-46	-46
Odchylka  S21  [dB]	16	16	2	5	1	2	16

Posledním porovnáním je nezávislé měření izolace navrženého zařízení a vektorového analyzátoru NanoVNA. Pro porovnání naměřených hodnot z obou měření jsou dostupná data v tabulce 13. Při porovnání naměřených výsledků je patrné, že analyzátor NanoVNA dosahuje lepší izolace na nízkých kmitočtech a to okolo -70 dB. Konstruované zařízení dosahuje minimální úrovně schopné změřit -55 dB, pokud by byla izolace lepší, nebylo možné ji změřit. Pro další kmitočty dle tabulky nastává vyrovnané hodnocení až k vyšším kmitočtům, kde konstruované zařízení dosahuje úrovně -46 dB, kdežto analyzátor NanoVNA jen -30 dB. Ověřením zařízení tímto měřením je ověřeno, že zařízení je schopno pracovat a nedochází k ovlivňování přijímače vysílačem na takové úrovni, že by zařízení nefungovalo. Měření je považováno za validní a ověření izolace zařízení bylo potvrzeno.

## Závěr

Cílem práce bylo navrhnout, vyrobit a ověřit funkčnost přístroje pro měření  $|S_{12}|$  a  $|S_{21}|$  parametrů dvojbranu. V úvodní části byla rozebrána motivace k tvorbě této práce. Poté byl v kapitole 1 proveden rozbor vlastností dvojbranů, jejich parametrů, hlavně S-parametrů využívaných ve VF technice. Vybrané S-parametry byly zvoleny jako měřené vlastnosti navrhovaným zařízením. Další teoretickou částí byl rozbor postupů, jak provést měření S-parametrů. Na základě poznatků o měření S-parametrů získaných z literatury byla vybrána měřící metoda pro navrhované zařízení. Koncept navrženého zařízení je popsán v kapitole 3, kde je i blokové schéma tohoto zařízení.

Jelikož ne všechny moduly použité při výrobě zařízení byly navrženy a vyrobeny v rámci práce, bylo nutné pro moduly komerční a navržené v rámci jiných projektů popsat funkci a ověřit využitelnost v navrhovaném zařízení. Popis modulů byl rozložen do kapitol 4 (pro komerční moduly) a 5 (pro moduly navržené v rámci této práce i moduly z jiných projektů autora využitě v této práci).

Pro měřící zařízení bylo třeba vyřešit napájení jednotlivých částí, popis navrženého napájecího bloku a ověření jeho funkčnosti bylo popsáno v kapitole 6. Zařízení je složeno ze dvou hlavních částí (přijímací a vysílací). Vysílací část zařízení je popsána v kapitole 7. V této kapitole je popsán návrh modulu vysílače a firmware pro jeho řízení. Dále pak ověření funkčnosti pomocí referenčních a kalibračních měření. Z provedených měření je zřejmé, že navržený přijímač je použitelný pro měření v rozsahu od 36 MHz do 1600 MHz, kde citlivost je do -55 dBm. Kapitola 8 se věnuje návrhu (modulu a firmware) a ověření funkčnosti vysílací části. Na základě měření popsanych v této části práce jsou stanoveny výkonové referenční úrovně vysílače. Z měření je patrné, že referenční úroveň bude možné měnit v rozsahu od 5 dBm do -50 dBm (s ohledem na frekvenční rozsah navrženého zařízení a možnosti zesilovačů a atenuátorů použitých v zařízení).

Aby bylo zařízení možné provádět automatizovaně, bylo třeba vytvořit systém pro řízení zařízení. Popis navrženého programu (vývojové diagramy a GUI) pro Raspberry Pi je popsán v kapitole 9.

Všechny popsané moduly, jak komerční, navržené v rámci jiných projektů, tak i navržené v rámci této práce po ověření vykazují aplikovatelnost pro požadované zařízení. Důležité bylo ověření, zda zařízení bude fungovat i jako celek, to bylo provedeno a popsáno v kapitole 10. Ověření funkce bylo provedeno pomocí série měření různých dvojbranů (filtry, atenuátory, apod.). Měření těchto dvojbranů bylo nejprve prováděno v univerzitních laboratorních podmínkách pomocí Rhode & Schwarz ZNB 20 a komerčního NanoVNA. V průběhu řešení práce a následně při dokončování práce již Rhode & Schwarz ZNB 20 ani přístup do laboratoře nebyl k dispozici. Proto bylo možné provádět souběžná měření již pouze pomocí komerčního NanoVNA. Hodnoty změřené oběma přístroji pro každý testovaný dvojbran byly porovnány a z poznatků lze potvrdit, že navržené zařízení je využitelné pro požadované aplikace.

Závěrem lze tedy říci, že navržené zařízení splňuje veškeré požadavky ze zadání diplomové práce v plném rozsahu. Rovněž byl splněn i sekundární cíl zlepšit znalosti autora v oblasti VF techniky.

V budoucnu je v plánu se zaměřit na rozšíření rozsahu měřených hodnot, toho by mohlo být docíleno nahrazením signálových cest kvalitnějšími VF kabely (to nebylo zatím z finančních důvodů možné). Cílem do budoucna je rozšířit rozsah z 1,6 GHz na 4,4 GHz (limitace možnostmi použitého syntetizéru).

## Literatura

AD8317, ©2005–2019. In: *Analog Devices* [online]. USA: Analog Devices [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8317.pdf>

ADF4351, ©2012–2017. In: *Analog Devices* [online]. USA: Analog Devices [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADF4351.pdf>

ADG918, ©2003–2016. In: *Analog Devices* [online]. USA: Analog Devices, Inc. [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: [https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADG918\\_919.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADG918_919.pdf)

BABY, Rajiv, 2022. Vector-network-analyzer-basics. In: *Rfpage* [online]. Singapore: rfpage [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: <https://www.rfpage.com/vector-network-analyzer-basics/>

BABY, Rajiv, 2023a. RF Signal Generators, Types and Applications. In: *Rfpage* [online]. Singapore: rfpage [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: <https://www.rfpage.com/rf-signal-generators-types-and-applications/>

BABY, Rajiv, 2023b. RF Spectrum Analyzers and its applications. In: *Rfpage* [online]. Singapore: rfpage [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: <https://www.rfpage.com/rf-spectrum-analyzers-and-its-applications/>

BELZA, Jaroslav, 2002. *Vf atenuátor: RF attenuator* [online]. In: . [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: <https://www.belza.cz/hf/atten.htm>

BEZDĚK, Miloslav, 2008. *Elektronika: [učebnice]*. 3. vyd. České Budějovice: Kopp. ISBN 978-80-7232-365-4.

BRTNÍK, Bohumil, 2014. *Základy obvodové techniky I*. 1. vydání. Praha: BEN - technická literatura. ISBN 978-80-7300-523-8.

BRTNÍK, Bohumil, 2017. *Teoretická elektrotechnika*. 1. vydání. Praha: BEN - technická literatura. ISBN 978-80-7300-547-4.

ČERNÍK, Martin, 2019. *Dvojbrany: Prezentace k přednášce k předmětu Elektrotechnika* [online]. In: . s. 42 [cit. 2023-07-17]. Dostupné z: [https://elearning.tul.cz/pluginfile.php/336227/mod\\_resource/content/1/2brany\\_ELT.pdf?forcedownload=1](https://elearning.tul.cz/pluginfile.php/336227/mod_resource/content/1/2brany_ELT.pdf?forcedownload=1)

Directional Coupler ADC-10-4+, 2020. In: *Mini-Circuits* [online]. New York, USA: Mini-Circuits [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: <https://www.minicircuits.com/WebStore/dashboard.html?model=ADC-10-4%2B>

KOPECKÝ, Petr, 2021. *Generátor definovaných signálů*. Pardubice. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra elektrotechniky. Vedoucí práce Ing. Luboš Rejfk Ph.D.

LFCN-320+, 2017. In: *Mini-Circuits* [online]. New York, USA: Mini-Circuits [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: <https://www.minicircuits.com/WebStore/dashboard.html?model=LFCN-320%2B>

LFCV-45+, 2017. In: *Mini-Circuits* [online]. New York, USA: Mini-Circuits [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: <https://www.minicircuits.com/WebStore/dashboard.html?model=LFCV-45%2B>

LFCV-52+, 2017. In: *Mini-Circuits* [online]. New York, USA: Mini-Circuits [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: <https://www.minicircuits.com/WebStore/dashboard.html?model=LFCV-52%2B>

Obvodove-analyzatory: Univerzita Pardubice, 2023. In: *Univerzita Pardubice* [online]. Univerzita Pardubice FEI: Univerzita Pardubice [cit. 2023-07-18]. Dostupné z: <https://fei.upce.cz/fei/ke/vybaveni/obvodove-analyzatory>

Odbočnice-Aliexpress, 2010-2022. In: *Aliexpress* [online]. China: AliExpress.com [cit. 2023-08-04]. Dostupné z: <https://www.aliexpress.com/item/1005002978003764.html>

PE4302, 2005. In: *Peregrine Semiconductor* [online]. San Diego, California, USA: Peregrine Semiconductor Corp [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: [https://www.digchip.com/datasheets/download\\_datasheet.php?id=2005347&part-number=PE4302-01](https://www.digchip.com/datasheets/download_datasheet.php?id=2005347&part-number=PE4302-01)

*Power Measurements* [online], 2000. Colorado Springs, USA: Keysight Technologies [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: <https://www.keysight.com/us/en/products/power-meters-power-sensors/epm-epm-p-series-power-meters.html>

PROCHÁZKA, Tomáš a Zdeněk BARTOŇ, 2002. *Elektrorevue.cz: S - parametry* [online]. Brno: Ústav mikroelektroniky, FEKT VUT [cit. 2021-05-03]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02029/index.html>

PUNČOCHÁŘ, Josef, 2011. 4. kapitola: Dvojbrany - rozdělení, rovnice (modely). In: <https://fei1.vsb.cz/> [online]. Ostrava, VŠB.: Univerzita VŠB Ostrava, [cit. 2023-07-17]. Dostupné z: [https://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/FEI/AEO/sylaby/AEO\\_04.pdf](https://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/FEI/AEO/sylaby/AEO_04.pdf)

REJFEK, Luboš, 2020. *Elektrická měření pro bakaláře*. [online]. Pardubice: Školní skriptum [cit. 2021-05-03]. Dostupné z: Studijní opora, Univerzita Pardubice

*RF filter by Mini-Circuits* [online], 2017. 13 Neptune Ave, Brooklyn, NY 11235, Spojené státy: Mini-Circuits [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: <https://www.minicircuits.com/WebStore/RF-Filters.html>

SBB5089Z, 2021. In: *Qorvo* [online]. USA: Qorvo [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: <https://www.qorvo.com/products/d/da001309>

STM32G474VE, 2023. In: *STMicroelectronics* [online]. USA: STMicroelectronics [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32g474ve.pdf>

STM32L072KZ, 2023. In: *STMicroelectronics* [online]. USA: STMicroelectronics [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l072kz.pdf>

ŠIMÁČEK, Vladimír, Jitka DRÁPALOVÁ a Václav ILČÍK, 2015. *Spojovací technika* [online]. 1. vydání. Brno: Code Creator,s.r.o. [cit. 2021-02-24]. ISBN 978-80-88058-14-4. Dostupné z: [publi.cz/books/86/Cover.html](https://publi.cz/books/86/Cover.html)

BENEŠOVÁ, Zdeňka. DVOJBRANY: Defínice a rozdělení dvojbranů. Západočeská univerzita [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2012 [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: [https://home.zcu.cz/~bene/YTE1/DVOJBRANY/Dvojbrany1\\_sit.pdf](https://home.zcu.cz/~bene/YTE1/DVOJBRANY/Dvojbrany1_sit.pdf)

DERICKSON, Dennis, Xiomin JIN a Charles CLAYTON BLAND. The NanoVNA Vector Network Analyzer: This New Open-Source Electronic Test and Measurement Device Will Change Both Remote and In-Person Educational Delivery of Circuits, Electronics, Radio Frequency and Communication Laboratory Course Delivery. American Society for Engineering Education: ID:35185 [online]. California Polytechnic State University, San Luis Obispo: American Society for Engineering Education, 2021 [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: <https://peer.asee.org/the-nanovna-vector-network-analyzer-this-new-open-source-electronic-test-and-measurement-device-will-change-both-remote-and-in-person-educational-delivery-of-circuits-electronics-radio-frequency-and-communication-laboratory-course-delivery>

About NanoVNA. NanoVNA [online]. China: NanoVNA, 2019 [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: <https://nanovna.com/#About%20NanoVNA>

ZÁHLAVA, Vít. Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu. Praha: BEN - technická literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-266-4.

DOLEČEK, Jaroslav. Moderní učebnice elektroniky 4. díl. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0185-3.

DOLEČEK, Jaroslav. Moderní učebnice elektroniky 6. díl. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-240-4.

PECINOVSKÝ, Rudolf. Python: kompletní příručka jazyka pro verzi 3.11. Praha: Grada Publishing, 2023. Knihovna programátora (Grada). ISBN 978-80-271-3891-3.

PECINOVSKÝ, Rudolf. Python: knihovny pro práci s daty pro verzi 3.11. Praha: Grada Publishing, 2023. Myslíme v.. ISBN 978-80-271-0659-2.

S-parameters-measurement-vector-network-analyzer [online]. Sunnyvale,CA94086,USA: Sierra Circuits, 2023 [cit. 2023-07-19]. Dostupné z: <https://www.protoexpress.com/blog/s-parameters-measurement-vector-network-analyzer/>

MATUSZCZYK, Jacek. Antény prakticky. 3. české vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-178-0.

Altium Designer [online]. California,USA: Altium Designer, 2023 [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: <https://www.altium.com/altium-designer>

STM32 Core libraries [online]. Geneva, Switzerland: STMicroelectronics, 2021 [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/embedded-software/stm32-standard-peripheral-libraries.html>

Python chart import library [online]. Netherland: www.mfitzp.com, 2020 [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: <https://www.mfitzp.com/tutorials/plotting-matplotlib/>

Python Core libraries [online]. Wilmington, Delaware, USA: Python Software Foundation, 2001 - 2021 [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: <https://docs.python.org/3/library/>  
Python knihovna PyQt5 [online]. UK: The Qt Company, 2012 [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: <https://pypi.org/project/PyQt5/>

HUNTER, John, Darren DALE, Eric FIRING a Michael DROETTBOOM. Python Knihovna Matplotlib [online]. USA: Matplotlib development team, 2012 [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: [https://matplotlib.org/stable/api/\\_as\\_gen/matplotlib.pyplot.plot.html](https://matplotlib.org/stable/api/_as_gen/matplotlib.pyplot.plot.html)

Python web pypi.org [online]. 2023 [cit. 2023-8-3]. Wilmington, Delaware, USA: PythonSoftware Foundation. Dostupné z: <https://pypi.org/>

quartoknows.com: Raspberry Pi off by python [online]. 2023 [cit. 2023-8-3]. The Quarto group. Dostupné z: [https://www.quartoknows.com/page/raspberry-pi-shutdown-button?fbclid=IwAR0UrRdkxzYgo4zwdCT-jSNc1gYIQ7-4XXytrenIDSv\\_kexLH2gXzuGvnAQ](https://www.quartoknows.com/page/raspberry-pi-shutdown-button?fbclid=IwAR0UrRdkxzYgo4zwdCT-jSNc1gYIQ7-4XXytrenIDSv_kexLH2gXzuGvnAQ)

BRONGER, Torsten, Gregor THALHAMMER, Florian BAUER, Hernan E. GRECCO a Matthieu DARTAILH. Pyvisa library [online]. Innsbruck, Austria: Github, 2012 [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: <https://pyvisa.readthedocs.io/en/latest/>

R&S®ZNA User Manual. Rohde & Schwarz [online]. Rohde & Schwarz USA, Inc. 6821 Benjamin Franklin Drive, Columbia, MD 21046: Rohde & Schwarz USA, 2023 [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: [https://www.rohde-schwarz.com/us/manual/r-s-zna-user-manual-manuals\\_78701-601863.html](https://www.rohde-schwarz.com/us/manual/r-s-zna-user-manual-manuals_78701-601863.html)

FANTOM, Alan E. Fantom. Radio Frequency and Microwave Power Measurement (Materials, Circuits and Devices). United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, June 30, 1990. ISBN 978-0863411205.








## Seznam Tištěných příloh

V následujícím seznamu příloh jsou v odrážkách popsány tištěné přílohy k diplomové práci, zbylé přílohy jsou zaznamenány v elektronických přílohách.

Příloha A: Úryvek datasheet k obvodu AD8317, dostupné z (AD8317, ©2005–2019) ...	134
Příloha B: Úryvek datasheet k obvodu ADF4351, dostupné z (ADF4351, ©2012–2017)	135
Příloha C: Úryvek z datasheet obvodu ADG918, dostupné z (ADG918, ©2003–2016)..	136
Příloha D: Úryvek datasheet k obvodu ADC-10-4+, dostupné z (Directional Coupler ADC-10-4+, 2020) .....	137
Příloha E: Úryvek datasheet k obvodu PE4302, dostupné z (PE4302, 2005).....	138
Příloha F: Úryvek datasheet k obvodu SBB5089Z, dostupné z (SBB5089Z, 2021) .....	139
Příloha G: Úryvek z datasheet STM32G474VET, dostupné z (STM32G474VE, 2023)..	140
Příloha H: Úryvek z datasheet STM32L072KZ, dostupné z (STM32L072KZ, 2023) .....	141
Příloha I: Úryvek datasheet k obvodu LFCV-45+, dostupné z (LFCV-45+, 2017).....	142
Příloha J: Úryvek datasheet k obvodu LFCV-52+, dostupné z (LFCV-52+, 2017).....	143
Příloha K: Úryvek datasheet k obvodu LFCN-320+, dostupné z (LFCN-320+, 2017) ....	144
Příloha L: Export projektu návrhu DPS k filtraci signálu .....	145
Příloha M: Export projektu návrhu DPS k programování syntetizéru signálu.....	162
Příloha N: Celková podoba navrženého zařízení. ....	169

## Seznam Elektronických příloh

Přílohy v elektronické podobě jsou umístěny na CD/DVD. Jsou roztrženy do následujících složek viditelných na následujícím obrázku.

Název	Datum změny	Typ	Velikost
 Datasheety	03.08.2023 9:37	Složka souborů	
 DPS_Filtrace	03.08.2023 9:42	Složka souborů	
 DPS_Programator	03.08.2023 9:42	Složka souborů	
 FW	03.08.2023 9:44	Složka souborů	
 SW	03.08.2023 9:58	Složka souborů	

Ve složce Datasheety jsou vloženy veškeré důležité datasheet stažené od výrobce dané součástky. Ve složce DPS\_Filtrace je vložen projekt DPS z Altium designeru, jsou zde výrobní data a ostatní dokumentace. Ve složce DPS\_Programator je vložen projekt DPS z Altium designeru, také výrobní data a ostatní dokumentace. Ve složce FW jsou vloženy všechny FW ke všem částem, je zde například FW k přijímači – jeho MCU, FW u programátoru syntetizéru a FW u DPS s filtrací a FW pro ESM32 na filtrační DPS. Ve SW je uložen SW pro vypínání a zapínání zařízení, dále je zde řídicí ovládací SW s GUI v jazyku Python.



# 1 MHz to 10 GHz, 55 dB Log Detector/Controller

Data Sheet

AD8317

## FEATURES

- Wide bandwidth: 1 MHz to 10 GHz
- High accuracy:  $\pm 1.0$  dB over temperature
- 55 dB dynamic range up to 8 GHz  $\pm 3$  dB error
- Stability over temperature:  $\pm 0.5$  dB
- Low noise measurement/controller output, VOUT
- Pulse response time: 6 ns/10 ns (fall/rise)
- Small footprint, 2 mm  $\times$  3 mm LFCSP
- Supply operation: 3.0 V to 5.5 V at 22 mA
- Fabricated using high speed SiGe process

## APPLICATIONS

- RF transmitter PA setpoint control and level monitoring
- Power monitoring in radio link transmitters
- RSSI measurement in base stations, WLANs, WiMAX, and radars

## GENERAL DESCRIPTION

The AD8317 is a demodulating logarithmic amplifier, capable of accurately converting an RF input signal to a corresponding decibel-scaled output. It employs the progressive compression technique over a cascaded amplifier chain, each stage of which is equipped with a detector cell. The device can be used in either measurement or controller modes. The AD8317 maintains accurate log conformance for signals of 1 MHz to 8 GHz and provides useful operation to 10 GHz. The input dynamic range is typically 55 dB (referenced to 50  $\Omega$ ) with less than  $\pm 3$  dB error. The AD8317 has 6 ns/10 ns response time (fall time/rise time) that enables RF burst detection to a pulse rate of beyond 50 MHz. The device provides unprecedented logarithmic intercept stability vs. ambient temperature conditions. A supply of 3.0 V to 5.5 V is required to power the device. Current consumption is typically 22 mA, and it decreases to 200  $\mu$ A when the device is disabled.

The AD8317 can be configured to provide a control voltage to a power amplifier or a measurement output from the VOUT pin. Because the output can be used for controller applications, special attention has been paid to minimize wideband noise. In this mode, the setpoint control voltage is applied to the VSET pin.

## FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

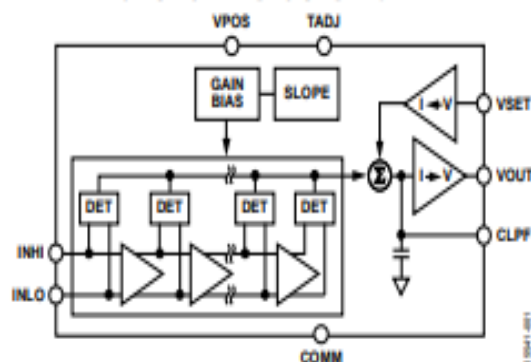


Figure 1.

The feedback loop through an RF amplifier is closed via VOUT, the output of which regulates the output of the amplifier to a magnitude corresponding to  $V_{SET}$ . The AD8317 provides 0 V to ( $V_{POS} - 0.1$  V) output capability at the VOUT pin, suitable for controller applications. As a measurement device, VOUT is externally connected to VSET to produce an output voltage,  $V_{OUT}$ , that is a decreasing linear-in-dB function of the RF input signal amplitude.

The logarithmic slope is  $-22$  mV/dB, determined by the VSET interface. The intercept is 15 dBm (referenced to 50  $\Omega$ , CW input) using the INHI input. These parameters are very stable against supply and temperature variations.

The AD8317 is fabricated on a SiGe bipolar IC process and is available in a 2 mm  $\times$  3 mm, 8-lead LFCSP with an operating temperature range of  $-40^{\circ}\text{C}$  to  $+85^{\circ}\text{C}$ .



# Wideband Synthesizer with Integrated VCO

Data Sheet

ADF4351

## FEATURES

- Output frequency range: 35 MHz to 4400 MHz
- Fractional-N synthesizer and integer-N synthesizer
- Low phase noise VCO
- Programmable divide-by-1/-2/-4/-8/-16/-32/-64 output
- Typical jitter: 0.3 ps rms
- Typical EVM at 2.1 GHz: 0.4%
- Power supply: 3.0 V to 3.6 V
- Logic compatibility: 1.8 V
- Programmable dual-modulus prescaler of 4/5 or 8/9
- Programmable output power level
- RF output mute function
- 3-wire serial interface
- Analog and digital lock detect
- Switched bandwidth fast lock mode
- Cycle slip reduction

## APPLICATIONS

- Wireless infrastructure (W-CDMA, TD-SCDMA, WiMAX, GSM, PCS, DCS, DECT)
- Test equipment
- Wireless LANs, CATV equipment
- Clock generation

## GENERAL DESCRIPTION

The ADF4351 allows implementation of fractional-N or integer-N phase-locked loop (PLL) frequency synthesizers when used with an external loop filter and external reference frequency.

The ADF4351 has an integrated voltage controlled oscillator (VCO) with a fundamental output frequency ranging from 2200 MHz to 4400 MHz. In addition, divide-by-1/-2/-4/-8/-16/-32/-64 circuits allow the user to generate RF output frequencies as low as 35 MHz. For applications that require isolation, the RF output stage can be muted. The mute function is both pin- and software-controllable. An auxiliary RF output is also available, which can be powered down when not in use.

Control of all on-chip registers is through a simple 3-wire interface. The device operates with a power supply ranging from 3.0 V to 3.6 V and can be powered down when not in use.

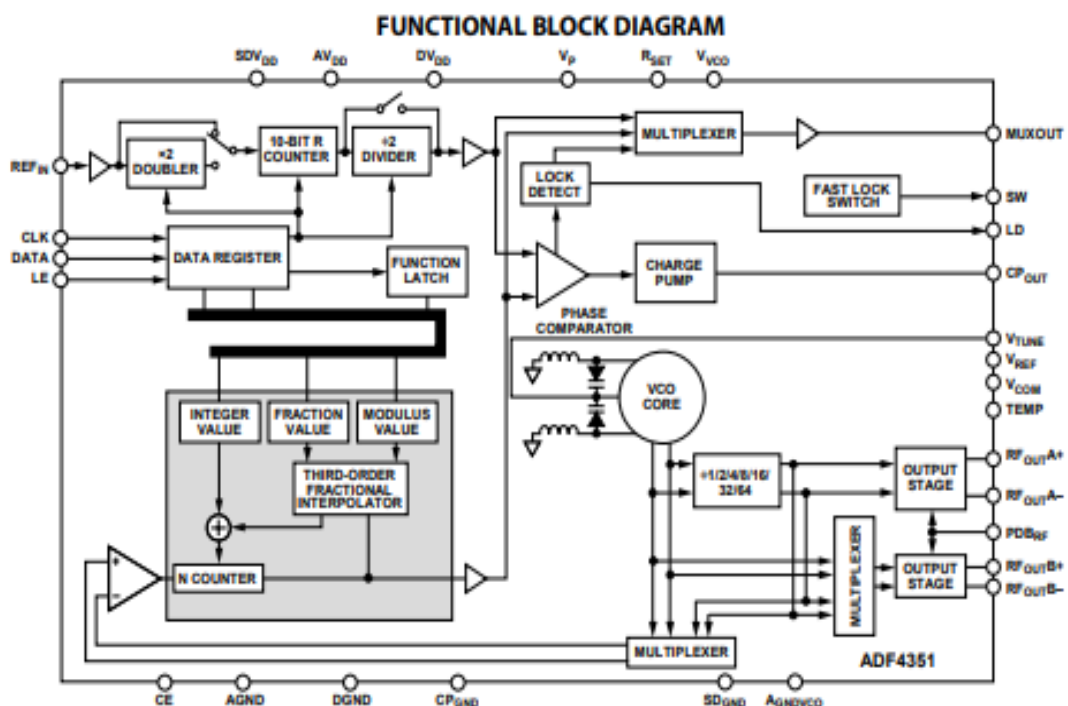


Figure 1.



# Wideband 4 GHz, 43 dB Isolation at 1 GHz, CMOS 1.65 V to 2.75 V, 2:1 Mux/SPDT

Data Sheet

ADG918/ADG919

## FEATURES

- Wideband switch:  $-3$  dB at 4 GHz
- Absorptive/reflective switches
- High off isolation (43 dB at 1 GHz)
- Low insertion loss (0.8 dB at 1 GHz)
- Single 1.65 V to 2.75 V power supply
- CMOS/LVTTL control logic
- 8-lead MSOP and tiny 3 mm  $\times$  3 mm LFCSP
- Low power consumption ( $<1$   $\mu$ A)

## APPLICATIONS

- Wireless communications
- General-purpose RF switching
- Dual-band applications
- High speed filter selection
- Digital transceiver front end switch
- IF switching
- Tuner modules
- Antenna diversity switching

## GENERAL DESCRIPTION

The ADG918/ADG919 are wideband switches using a CMOS process to provide high isolation and low insertion loss to 1 GHz. The ADG918 is an absorptive (matched) switch having 50  $\Omega$  terminated shunt legs, whereas the ADG919 is a reflective switch. These devices are designed such that the isolation is high over the dc to 1 GHz frequency range. They have on-board CMOS control logic, thus eliminating the need for external controlling circuitry. The control inputs are both CMOS and LVTTL compatible. The low power consumption of these CMOS devices makes them ideally suited to wireless and general-purpose high frequency switching applications.

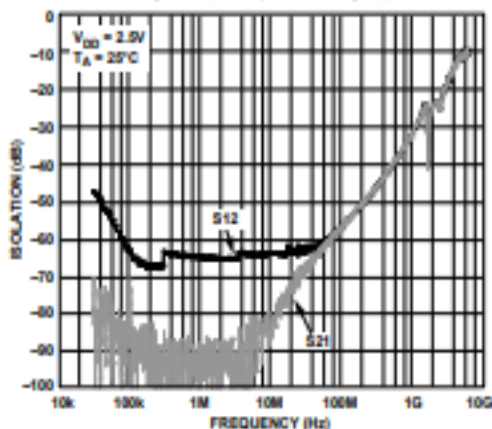


Figure 1. Off Isolation vs. Frequency

## FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAMS

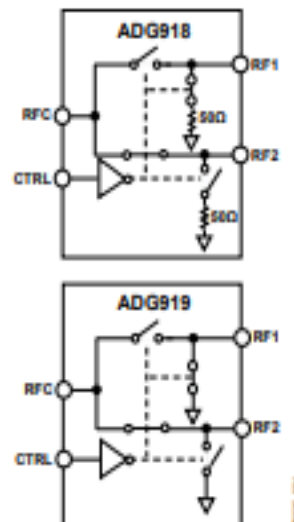


Figure 2.

## PRODUCT HIGHLIGHTS

- $-43$  dB off isolation at 1 GHz.
- 0.8 dB insertion loss at 1 GHz.
- Tiny 8-lead MSOP/LFCSP.

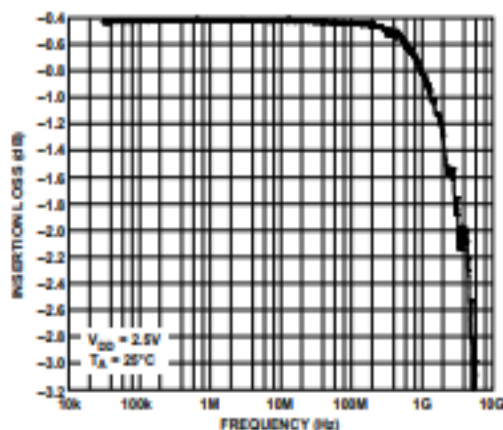


Figure 3. Insertion Loss vs. Frequency

# Surface Mount Directional Coupler

50Ω 5 to 1000 MHz

## ADC-10-4+



Generic photo used for illustration purposes only  
CASE STYLE: CD542

**+RoHS Compliant**  
The +Suffix identifies RoHS Compliance. See our web site for RoHS Compliance methodologies and qualifications



### Maximum Ratings

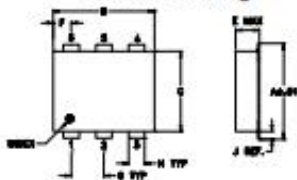
Operating Temperature	-40°C to 85°C
Storage Temperature	-55°C to 100°C

Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.

### Pin Connections

INPUT	1
OUTPUT	6
COUPLED	3
GROUND	2
50Ω TERM EXTERNAL	4
ISOLATE (DO NOT USE)	5

### Outline Drawing



### PCB Land Patterns



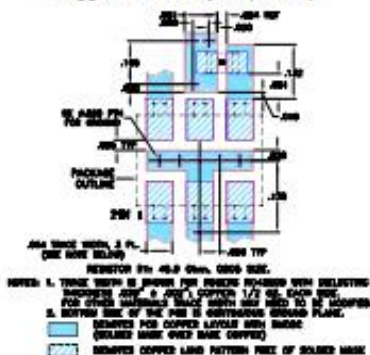
Suggested Layout, Tolerances to be within ±0.02

### Outline Dimensions (inch)

A	B	C	D	E	F	G
.272	.310	.220	.150	.112	.055	.100
6.91	7.87	5.59	3.84	2.84	1.40	2.54

H	J	K	L	wt
.030	.026	.065	.300	grams
0.76	0.66	1.65	7.62	0.20

Demo Board MCL P/N: TB-05  
Suggested PCB Layout (PL-095)



### Notes

- Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification document are intended to be excluded and do not form a part of this specification document.
- Electrical specifications and performance data contained in this specification document are based on Mini-Circuits' applicable established test performance criteria and measurement instructions.
- The parts covered by this specification document are subject to Mini-Circuits' standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"); Purchasers of this part are entitled to benefits and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive right to and remedies thereunder, please visit Mini-Circuits' website at [www.minicircuits.com/MCIS/standardterms.jsp](http://www.minicircuits.com/MCIS/standardterms.jsp)

### Features

- wideband, 5-1000 MHz
- low mainline loss, 0.8 dB typ.
- high directivity, 40 dB typ.
- aqueous washable
- protected by U.S. Patents 6,133,525 & 6,140,887

### Applications

- communications
- cable tv

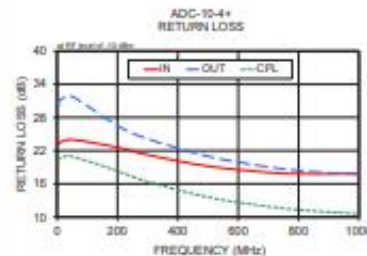
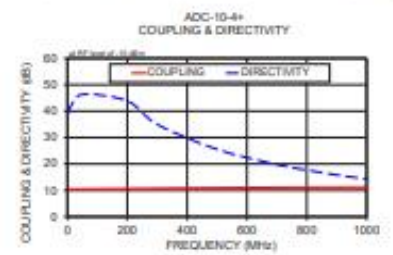
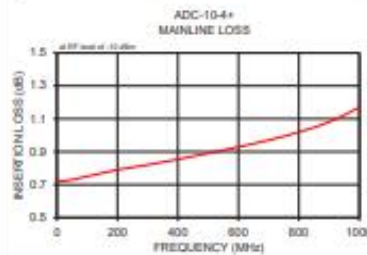
### Directional Coupler Electrical Specifications

FREQ. (MHz)	COUPLING (dB)		MAINLINE LOSS <sup>1</sup> (dB)			DIRECTIVITY (dB)			VSWR (:1)	POWER INPUT, W							
	Nom.	Flatness	L	M	U	L	M	U		L	MU						
5-1000	10.5±0.5	±1.0	0.8	1.3	0.8	1.2	1.0	1.5	40	23	40	20	25	13	1.2	1	1

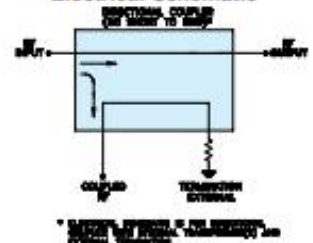
L: 5-50 MHz M: 50-500 MHz U: 500-1000 MHz  
1. Mainline loss includes theoretical power loss at coupled port.

### Typical Performance Data

Frequency (MHz)	Mainline Loss (dB) In-Out	Coupling (dB) In-Cpl	Directivity (dB)	Return Loss (dB)		
				In	Out	Cpl
5.00	0.73	10.45	39.49	22.96	30.01	20.21
10.00	0.72	10.44	41.58	23.49	31.11	20.71
50.00	0.73	10.47	46.29	23.98	31.76	20.95
200.00	0.79	10.62	43.84	22.59	26.52	18.33
300.00	0.82	10.73	34.95	21.24	24.15	16.40
500.00	0.89	10.94	25.53	19.19	20.98	13.59
700.00	0.97	11.12	19.79	18.00	19.06	11.89
800.00	1.02	11.18	17.70	17.82	18.42	11.33
900.00	1.08	11.22	15.83	17.78	17.99	10.91
1000.00	1.17	11.24	14.27	17.91	17.72	10.60



### Electrical Schematic





## Product Specification

### PE4302

50  $\Omega$  RF Digital Attenuator  
6-bit, 31.5 dB, DC – 4.0 GHz

#### Features

- Attenuation: 0.5 dB steps to 31.5 dB
- Flexible parallel and serial programming interfaces
- Unique power-up state selection
- Positive CMOS control logic
- High attenuation accuracy and linearity over temperature and frequency
- Very low power consumption
- Single-supply operation
- 50  $\Omega$  impedance
- Packaged in a 20 lead 4x4mm QFN

#### Product Description

The PE4302 is a high linearity, 6-bit RF Digital Step Attenuator "DSA" covering a 31.5 dB attenuation range in 0.5 dB steps. This 50-ohm RF DSA provides both parallel and serial CMOS control interface operates on a single 3-volt supply and maintains high attenuation accuracy over frequency and temperature. It also has a unique control interface that allows the user to select an initial attenuation state at power-up. The PE4302 exhibits very low insertion loss and low power consumption. This functionality is delivered in a 4x4mm QFN footprint.

The PE4302 is manufactured in Peregrine's patented Ultra Thin Silicon (UTSi®) CMOS process, offering the performance of GaAs with the economy and integration of conventional CMOS.

Figure 1. Functional Schematic Diagram

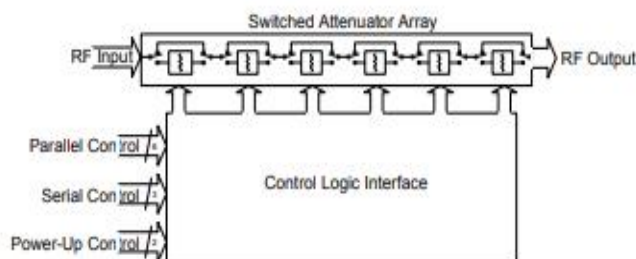


Figure 2. Package Type  
4x4mm -20 Lead QFN

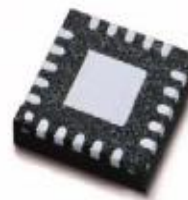


Table 1. Electrical Specifications @ +25°C, V<sub>DD</sub> = 3.0 V

Parameter	Test Conditions	Frequency	Minimum	Typical	Maximum	Units
Operation Frequency			DC		4000	MHz
Insertion Loss <sup>2</sup>		DC - 2.2 GHz	-	1.5	1.75	dB
Attenuation Accuracy	Any Bit or Bit Combination	DC ≤ 1.0 GHz 1.0 < 2.2 GHz	-	-	±(0.10 + 3% of atten setting) ±(0.15 + 5% of atten setting)	dB
1 dB Compression <sup>3</sup>		1 MHz - 2.2 GHz	30	34	-	dBm
Input IP <sub>3</sub> <sup>1,2</sup>	Two-tone inputs +18 dBm	1 MHz - 2.2 GHz	-	52	-	dBm
Return Loss		DC - 2.2 GHz	15	20	-	dB
Switching Speed	50% control to 0.5 dB of final value		-	-	1	µs

Notes: 1. Device Linearity will begin to degrade below 1 MHz

2. See Max input rating in Table 2 & Figures on Pages 2 to 4 for data across frequency.

3. Note Absolute Maximum in Table 3.



## SBB5089Z 50MHz-6000MHz, Cascadable Amplifier

### Product Overview

The SBB5089Z is a high performance InGaP HBT MMIC amplifier utilizing a Darlington configuration with an active bias circuitry. The active bias circuitry provides stable current over temperature and process variations. The SBB5089Z designed to run directly from a 5V supply, does not require a dropping resistor as compared to typical Darlington amplifiers. The SBB5089Z is a high linearity gain block for applications that require small in size with minimal number of external components. It is internally matched to 50  $\Omega$  at input and output.

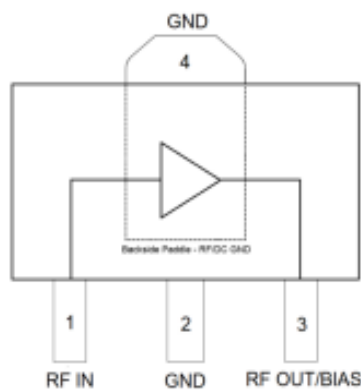


3 Pin SOT-89 Package

### Key Features

- 50 MHz – 6000MHz
- $\pm 1.1$  dB Wideband Flat Gain up to 4000 MHz
- +20.4 dBm P1dB at 1950 MHz
- +5V Single Fixed Supply
- 1000V, HBM Class 1C Robust ESD
- Patented Thermal Design and Bias Circuitry
- Low Thermal Resistance

### Functional Block Diagram



Top View

### Applications

- PA Driver Amplifier
- Cellular, PCS, GSM, UMTS
- Wideband Instrumentation
- Wireless Data, Satellite Terminals

### Ordering Information

Part No.	Description
SBB5089Z	1,000 pieces on a 7" reel (standard)
SBB5089ZPCK1	500–3500 MHz Evaluation Board with a 5-piece sample bag





life.augmented

## STM32G474xB STM32G474xC STM32G474xE

Arm® Cortex®-M4 32-bit MCU+FPU, 170 MHz / 213 DMIPS,  
128 KB SRAM, rich analog, math acc, 184 ps 12 chan Hi-res timer

Datasheet - production data

### Features

- Core: Arm® 32-bit Cortex®-M4 CPU with FPU, Adaptive real-time accelerator (ART Accelerator) allowing 0-wait-state execution from Flash memory, frequency up to 170 MHz with 213 DMIPS, MPU, DSP instructions
  - Operating conditions:
    - $V_{DD}$ ,  $V_{DDA}$  voltage range: 1.71 V to 3.6 V
  - Mathematical hardware accelerators
    - CORDIC for trigonometric functions acceleration
    - FMAC: filter mathematical accelerator
  - Memories
    - 512 Kbytes of Flash memory with ECC support, two banks read-while-write, proprietary code readout protection (PCROP), securable memory area, 1 Kbyte OTP
    - 96 Kbytes of SRAM, with hardware parity check implemented on the first 32 Kbytes
    - Routine booster: 32 Kbytes of SRAM on instruction and data bus, with hardware parity check (CCM SRAM)
    - External memory interface for static memories FSMC supporting SRAM, PSRAM, NOR and NAND memories
    - Quad-SPI memory interface
  - Reset and supply management
    - Power-on/power-down reset (POR/PDR/BOR)
    - Programmable voltage detector (PVD)
    - Low-power modes: sleep, stop, standby and shutdown
    - $V_{BAT}$  supply for RTC and backup registers
  - Clock management
    - 4 to 48 MHz crystal oscillator
    - 32 kHz oscillator with calibration
    - Internal 16 MHz RC with PLL option ( $\pm 1\%$ )
- 
- Internal 32 kHz RC oscillator ( $\pm 5\%$ )
  - Up to 107 fast I/Os
    - All mappable on external interrupt vectors
    - Several I/Os with 5 V tolerant capability
  - Interconnect matrix
  - 16-channel DMA controller
  - 5 x 12-bit ADCs 0.25  $\mu$ s, up to 42 channels. Resolution up to 16-bit with hardware oversampling, 0 to 3.6 V conversion range
  - 7 x 12-bit DAC channels
    - 3 x buffered external channels 1 MSPS
    - 4 x unbuffered internal channels 15 MSPS
  - 7 x ultra-fast rail-to-rail analog comparators
  - 6 x operational amplifiers that can be used in PGA mode, all terminals accessible
  - Internal voltage reference buffer (VREFBUF) supporting three output voltages (2.048 V, 2.5 V, 2.95 V)
  - 17 timers:
    - HRTIM (Hi-Resolution and complex waveform builder): 6 x 16-bit counters, 184 ps resolution, 12 PWM
    - 2 x 32-bit timer and 2 x 16-bit timers with up to four IC/OC/PWM or pulse counter and quadrature (incremental) encoder input
    - 3 x 16-bit 8-channel advanced motor control timers, with up to 8 x PWM



life.augmented

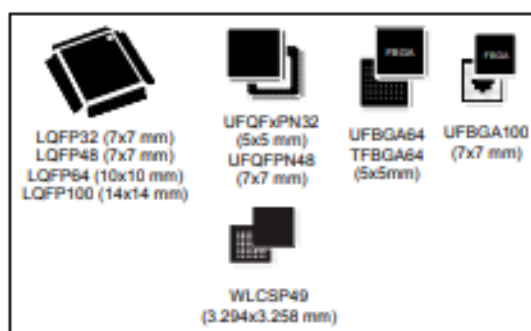
# STM32L072x8 STM32L072xB STM32L072xZ

Ultra-low-power 32-bit MCU Arm<sup>®</sup>-based Cortex<sup>®</sup>-M0+, up to 192KB Flash, 20KB SRAM, 6KB EEPROM, USB, ADC, DACs

Datasheet - production data

## Features

- Ultra-low-power platform
  - 1.65 V to 3.6 V power supply
  - -40 to 125 °C temperature range
  - 0.29 µA Standby mode (3 wakeup pins)
  - 0.43 µA Stop mode (16 wakeup lines)
  - 0.86 µA Stop mode + RTC + 20-Kbyte RAM retention
  - Down to 93 µA/MHz in Run mode
  - 5 µs wakeup time (from Flash memory)
  - 41 µA 12-bit ADC conversion at 10 ksps
- Core: Arm<sup>®</sup> 32-bit Cortex<sup>®</sup>-M0+ with MPU
  - From 32 kHz up to 32 MHz max.
  - 0.95 DMIPS/MHz
- Memories
  - Up to 192-Kbyte Flash memory with ECC(2 banks with read-while-write capability)
  - 20 -Kbyte RAM
  - 6 Kbytes of data EEPROM with ECC
  - 20-byte backup register
  - Sector protection against R/W operation
- Up to 84 fast I/Os (78 I/Os 5V tolerant)
- Reset and supply management
  - Ultra-safe, low-power BOR (brownout reset) with 5 selectable thresholds
  - Ultra-low-power POR/PDR
  - Programmable voltage detector (PVD)
- Clock sources
  - 1 to 25 MHz crystal oscillator
  - 32 kHz oscillator for RTC with calibration
  - High speed internal 16 MHz factory-trimmed RC (+/- 1%)
  - Internal low-power 37 kHz RC
  - Internal multispeed low-power 65 kHz to 4.2 MHz RC
  - Internal self calibration of 48 MHz RC for USB
  - PLL for CPU clock
- Pre-programmed bootloader
  - USB, USART supported
- Development support
  - Serial wire debug supported



- Rich Analog peripherals
  - 12-bit ADC 1.14 Msps up to 16 channels (down to 1.65 V)
  - 2 x 12-bit channel DACs with output buffers (down to 1.8 V)
  - 2x ultra-low-power comparators (window mode and wake up capability, down to 1.65 V)
- Up to 24 capacitive sensing channels supporting touchkey, linear and rotary touch sensors
- 7-channel DMA controller, supporting ADC, SPI, I2C, USART, DAC, Timers
- 11x peripheral communication interfaces
  - 1x USB 2.0 crystal-less, battery charging detection and LPM
  - 4x USART (2 with ISO 7816, IrDA), 1x UART (low power)
  - Up to 6x SPI 16 Mbits/s
  - 3x I2C (2 with SMBus/PMBus)
- 11x timers: 2x 16-bit with up to 4 channels, 2x 16-bit with up to 2 channels, 1x 16-bit ultra-low-power timer, 1x SysTick, 1x RTC, 2x 16-bit basic for DAC, and 2x watchdogs (independent/window)
- CRC calculation unit, 96-bit unique ID
- True RNG and firewall protection
- All packages are ECOPACK2

Table 1. Device summary

Reference	Part number
STM32L072xB	STM32L072VB
STM32L072xB	STM32L072VB, STM32L072RB, STM32L072CB, STM32L072KB
STM32L072xZ	STM32L072VZ, STM32L072RZ, STM32L072CZ, STM32L072KZ

# Ceramic Low Pass Filter

50Ω DC to 45 MHz

LFCV-45+



Generic photo used for illustration purposes only  
CASE STYLE: JV1210C

**+RoHS Compliant**  
The +RoHS identifies RoHS Compliance. See our web site for RoHS Compliance methodologies and qualifications.

## Maximum Ratings

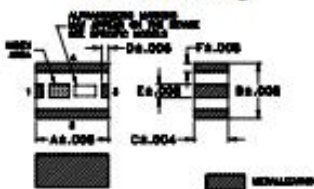
Operating Temperature	-55°C to 100°C
Storage Temperature	-55°C to 100°C
RF Power Input*	8.5W max. at 25°C

\* Peak-and-trailing, decays linearly to 3.5W at 100°C ambient.  
Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.

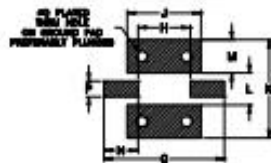
## Pin Connections

RF IN	1
RF OUT	3
GROUND	2,4

## Outline Drawing



## PCB Land Pattern

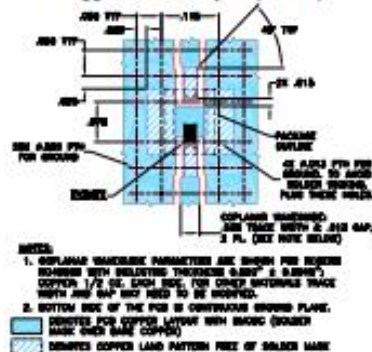


Suggested Layout,  
Tolerance to be within ±0.02

## Outline Dimensions (inch/mm)

A	B	C	D	E	F	G	H
.156	.598	.050	.012	.004	.216	.300	.281
3.95	1.51	1.27	0.30	0.10	5.49	7.62	7.13
J	K	L	M	N	P	Q	wt
.128	.175	.057	.059	.059	.038	.030	grams
3.25	4.43	1.45	1.50	1.50	0.97	0.76	

## Demo Board MCL P/N: TB-526+ Suggested PCB Layout (PL-307)



## Features

- excellent power handling, 8.5W
- small size
- 7 sections
- temperature stable
- hermetically sealed
- protected by U.S. Patent 6,943,646

## Applications

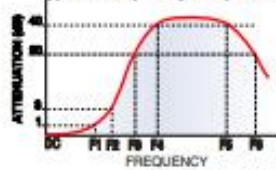
- harmonic rejection
- VHF/UHF transmitters/receivers
- anti-aliasing for A/D converter

## Electrical Specifications<sup>1,2</sup> at 25°C

Parameter	F <sub>1</sub>	Frequency (MHz)	Min.	Typ.	Max.	Unit	
Pass Band	Insertion Loss	DC-F1	DC-45	—	—	1.2	dB
	Freq. Cut-Off	F2	77	—	3.0	—	dB
	VSWR	DC-F1	DC-45	—	1.2	—	:1
Stop Band	Rejection Loss	F3	120	20	—	—	dB
		F4-F5	150-910	—	40	—	dB
	VSWR	F6	1000	—	20	—	dB
		F3-F6	120-1000	—	20	—	:1

1. Coupling capacitors at input and output are recommended for use in applications that require DC isolation of input to output port or either port to ground.  
2. Measured on Mini-Circuits Characterization Test Board TB-526+.

## Typical Frequency Response

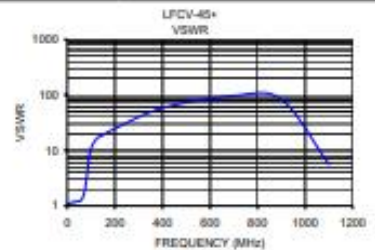
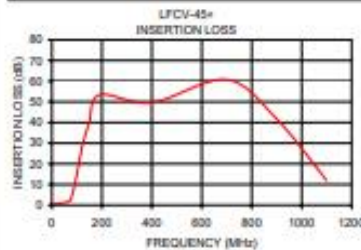


## Electrical Schematic



## Typical Performance Data at 25°C

Frequency (MHz)	Insertion Loss (dB)	VSWR (:1)
0.30	0.42	1.09
29.00	0.74	1.17
37.00	0.89	1.19
40.00	0.95	1.19
60.00	1.43	1.29
75.00	2.66	2.03
95.00	11.96	9.18
120.00	27.64	15.67
140.00	36.43	17.93
150.00	39.88	18.90
190.00	53.36	23.49
400.00	49.80	57.91
700.00	60.72	96.51
900.00	41.85	62.73
1100.00	12.04	5.54



Notes:  
A. Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification document are intended to be excluded and do not form a part of this specification document.  
B. Electrical specifications and performance data contained in this specification document are based on Mini-Circuits' applicable established test performance criteria and measurement instructions.  
C. The parts covered by this specification document are subject to Mini-Circuits' standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"). Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights and remedies thereunder, please visit Mini-Circuits' website at [www.minicircuits.com/MCIShowTerms.jsp](http://www.minicircuits.com/MCIShowTerms.jsp)



# Ceramic Low Pass Filter

50Ω DC to 52 MHz

## LFCV-52+



Generic photo used for illustration purposes only  
CASE STYLE: JV1210C

**+RoHS Compliant**  
The +Suffix identifies RoHS Compliance. See our web site for RoHS Compliance methodologies and qualifications.

### Maximum Ratings

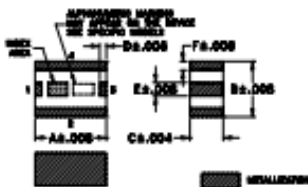
Operating Temperature	-55°C to 100°C
Storage Temperature	-55°C to 100°C
RF Power Input*	8.5W max. at 25°C

\* Passband rating, derate linearly to 3.5W at 100°C ambient.  
Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.

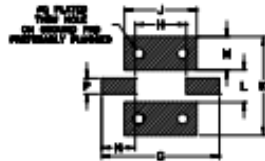
### Pin Connections

RF IN	1
RF OUT	3
GROUND	2,4

### Outline Drawing



### PCB Land Pattern

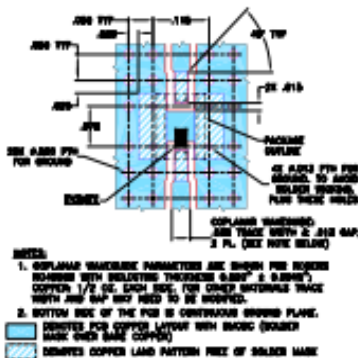


Suggested Layout,  
Tolerance to be within ±.002

### Outline Dimensions (inch/mm)

A	B	C	D	E	F	G	H
.106	.098	.059	.012	.024	.016	.309	.091
2.70	2.49	1.50	0.30	0.61	0.41	7.81	2.31
J	K	L	M	N	P	Q	wt
.128	.175	.057	.059	.059	.028	.020	grams
3.25	4.45	1.45	1.50	1.50	0.71	0.51	.00

Demo Board MCL P/N: TB-526+  
Suggested PCB Layout (PL-307)



### Features

- excellent power handling, 8.5W
- small size
- 7 sections
- temperature stable
- hermetically sealed
- protected by U.S. Patent 6,943,646

### Applications

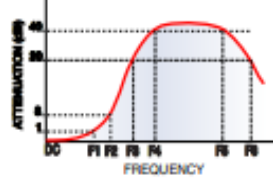
- harmonic rejection
- VHF/UHF transmitters/receivers
- anti-aliasing for A/D converter

### Electrical Specifications<sup>1,2</sup> at 25°C

Parameter	F#	Frequency (MHz)	Min.	Typ.	Max.	Unit
Pass Band	Insertion Loss	DC-F1	DC-52	—	—	1.2
	Freq. Cut-Off	F2	93	—	3.0	dB
	VSWR	DC-F1	DC-52	—	1.2	—
Stop Band	Rejection Loss	F3	140	20	—	dB
		F4-F5	170-1100	—	40	dB
	VSWR	F6	1200	—	20	dB
		F3-F6	140-1200	—	20	—

1. Coupling capacitors at input and output are recommended for use in applications that require DC isolation of input to output port or either port to ground.  
2. Measured on Mini-Circuits Characterization Test Board TB-526+.

### Typical Frequency Response

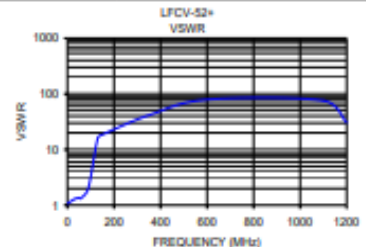
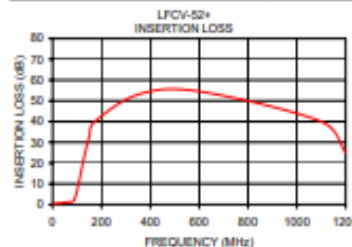


### Electrical Schematic



### Typical Performance Data at 25°C

Frequency (MHz)	Insertion Loss (dB)	VSWR (-1)
0.30	0.33	1.07
23.00	0.54	1.23
31.00	0.67	1.29
45.00	0.91	1.35
49.00	0.97	1.35
50.00	0.98	1.35
58.00	1.10	1.33
90.00	2.59	2.01
130.00	23.25	15.81
150.00	32.73	18.50
170.00	39.67	20.22
350.00	53.02	41.37
600.00	54.54	78.97
1100.00	39.99	75.53
1200.00	24.93	30.49



Notes  
A. Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification document are intended to be excluded and do not form a part of this specification document.  
B. Electrical specifications and performance data contained in this specification document are based on Mini-Circuit's applicable established test performance criteria and measurement instructions.  
C. The parts covered by this specification document are subject to Mini-Circuits standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"); Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights and remedies thereunder, please visit Mini-Circuits' website at [www.minicircuits.com/MCLStore/terms.jsp](http://www.minicircuits.com/MCLStore/terms.jsp)





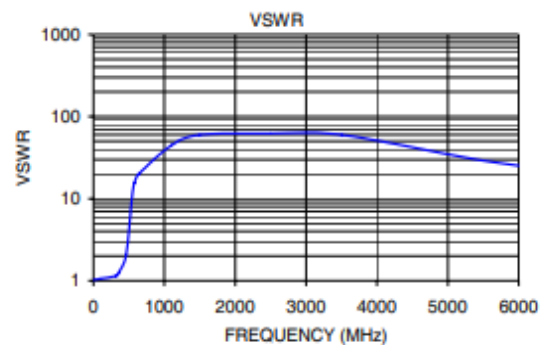
CERAMIC

# Low Pass Filter

LFCN-320+

TYPICAL PERFORMANCE DATA AT 25°C

Frequency (MHz)	Insertion Loss (dB)	VSWR (:1)
1.00	0.09	1.02
100.00	0.30	1.06
320.00	0.78	1.14
360.00	0.99	1.26
460.00	2.60	2.03
535.00	15.40	8.90
560.00	27.43	13.29
580.00	40.10	15.53
640.00	48.87	19.98
1100.00	46.62	44.55
1500.00	48.50	59.91
2500.00	53.58	62.05
3500.00	40.54	59.91
5300.00	25.47	31.03
6000.00	24.68	25.19

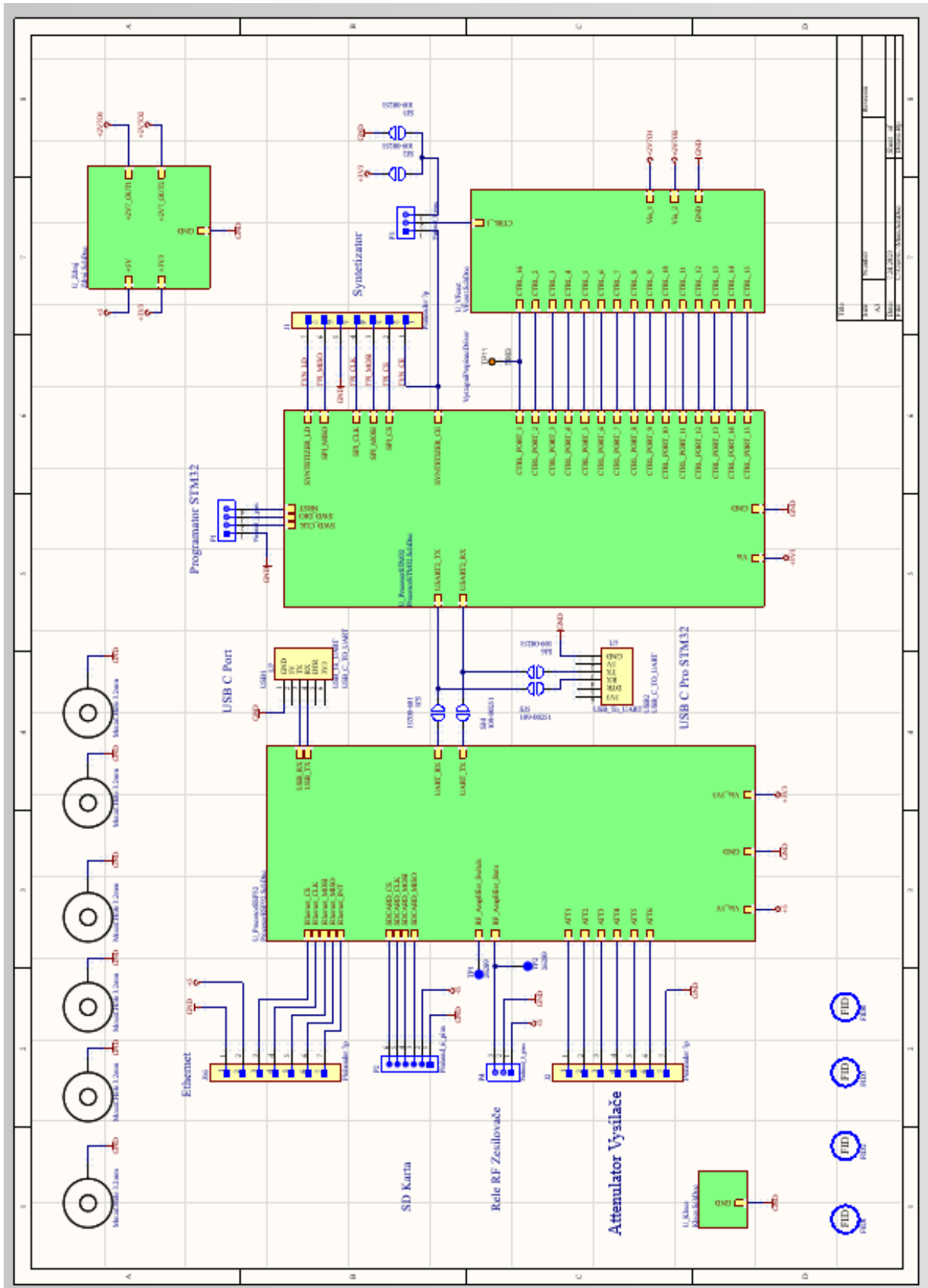


NOTES

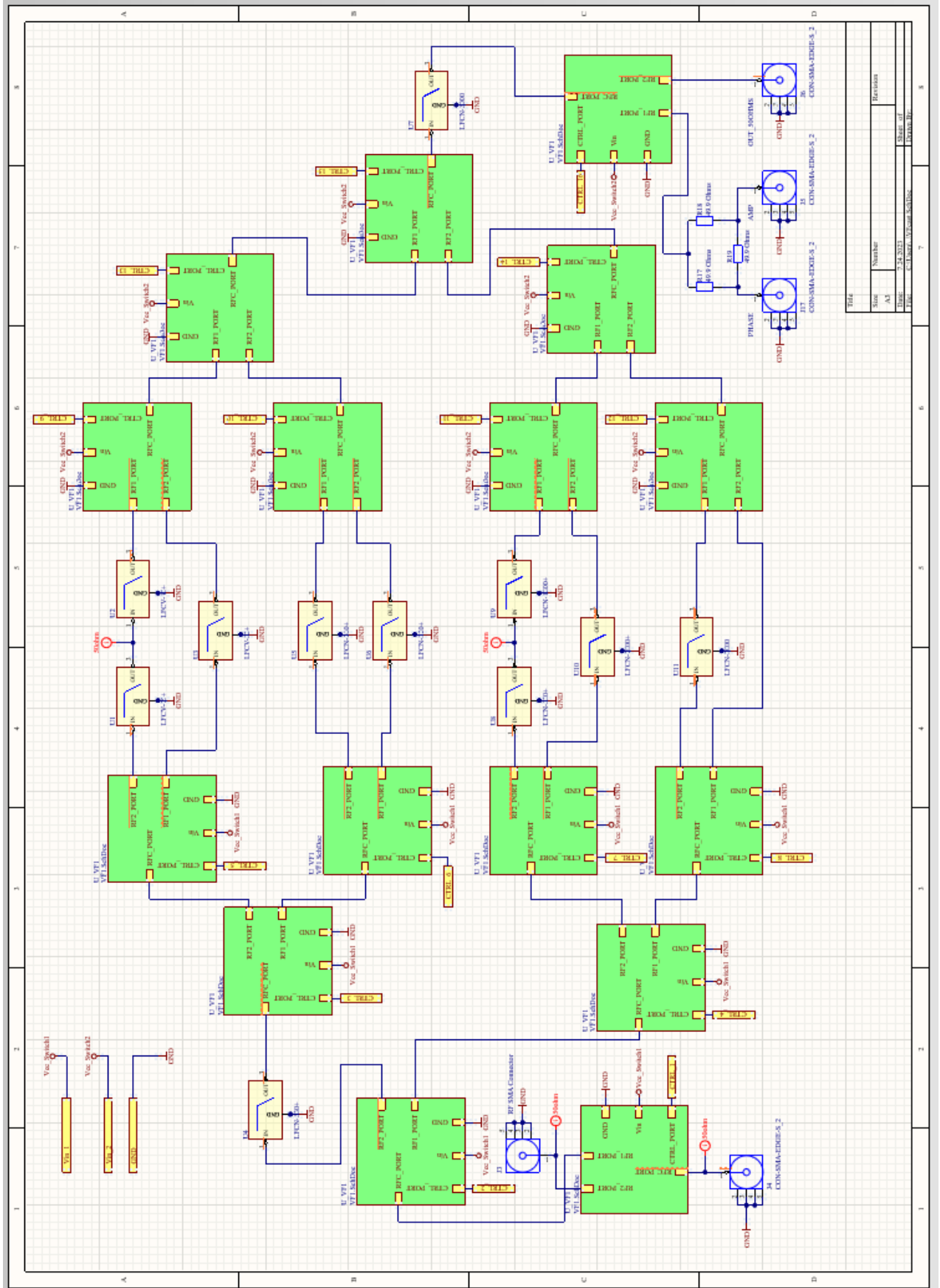
- A. Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification document are intended to be excluded and do not form a part of this specification document.
- B. Electrical specifications and performance data contained in this specification document are based on Mini-Circuit's applicable established test performance criteria and measurement instructions.
- C. The parts covered by this specification document are subject to Mini-Circuits standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"); Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the standard, terms and the exclusive rights and remedies thereunder, please visit Mini-Circuits' website at [www.minicircuits.com/MCLStore/terms.jsp](http://www.minicircuits.com/MCLStore/terms.jsp)



Příloha L: Export projektu návrhu DPS k filtraci signálu



Obr L.1 TOP vrstva Schématu. (Zdroj: Vlastní.)

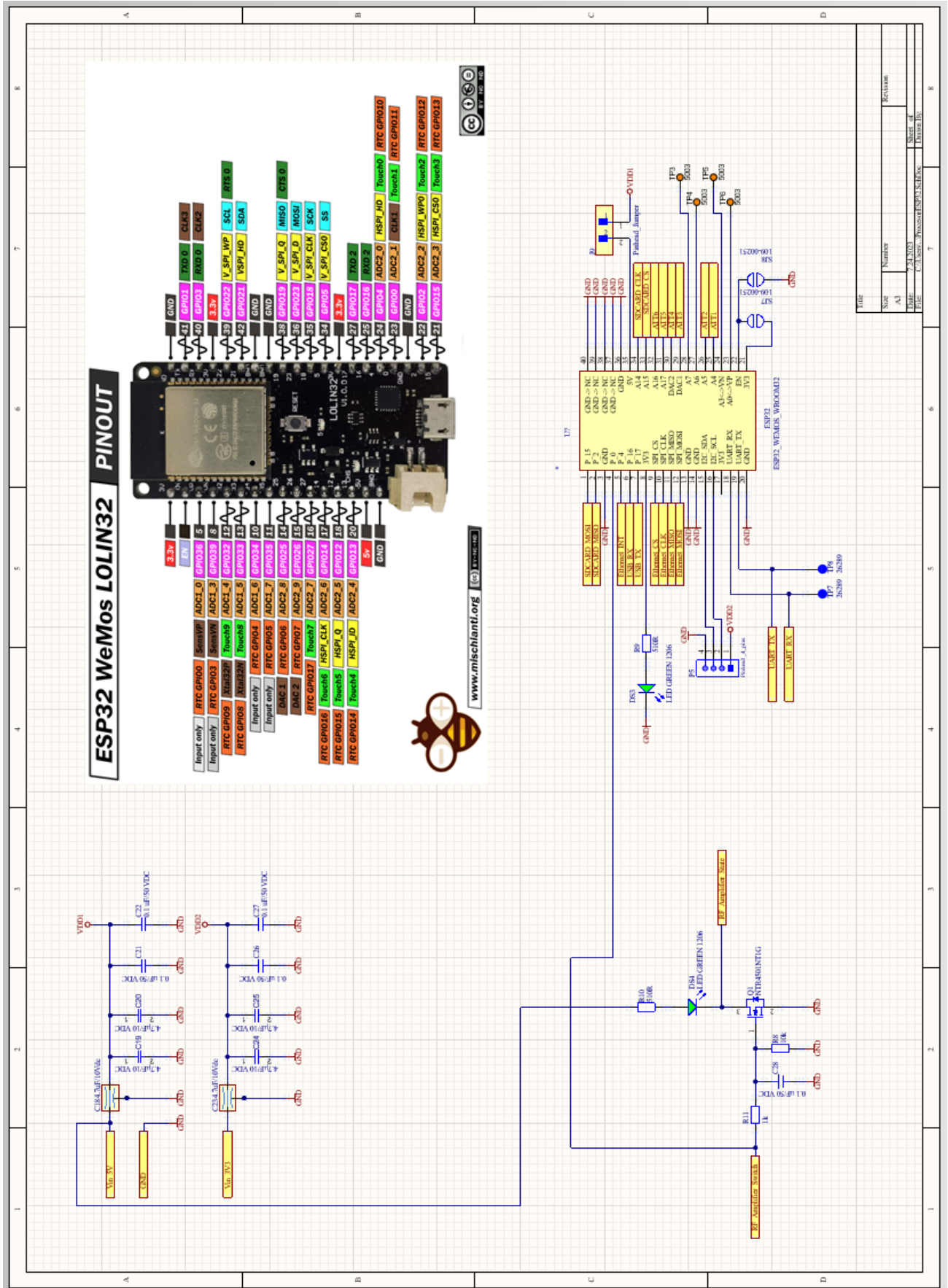


Obr L.2 Schéma filtrační části DPS. (Zdroj: Vlastní.)

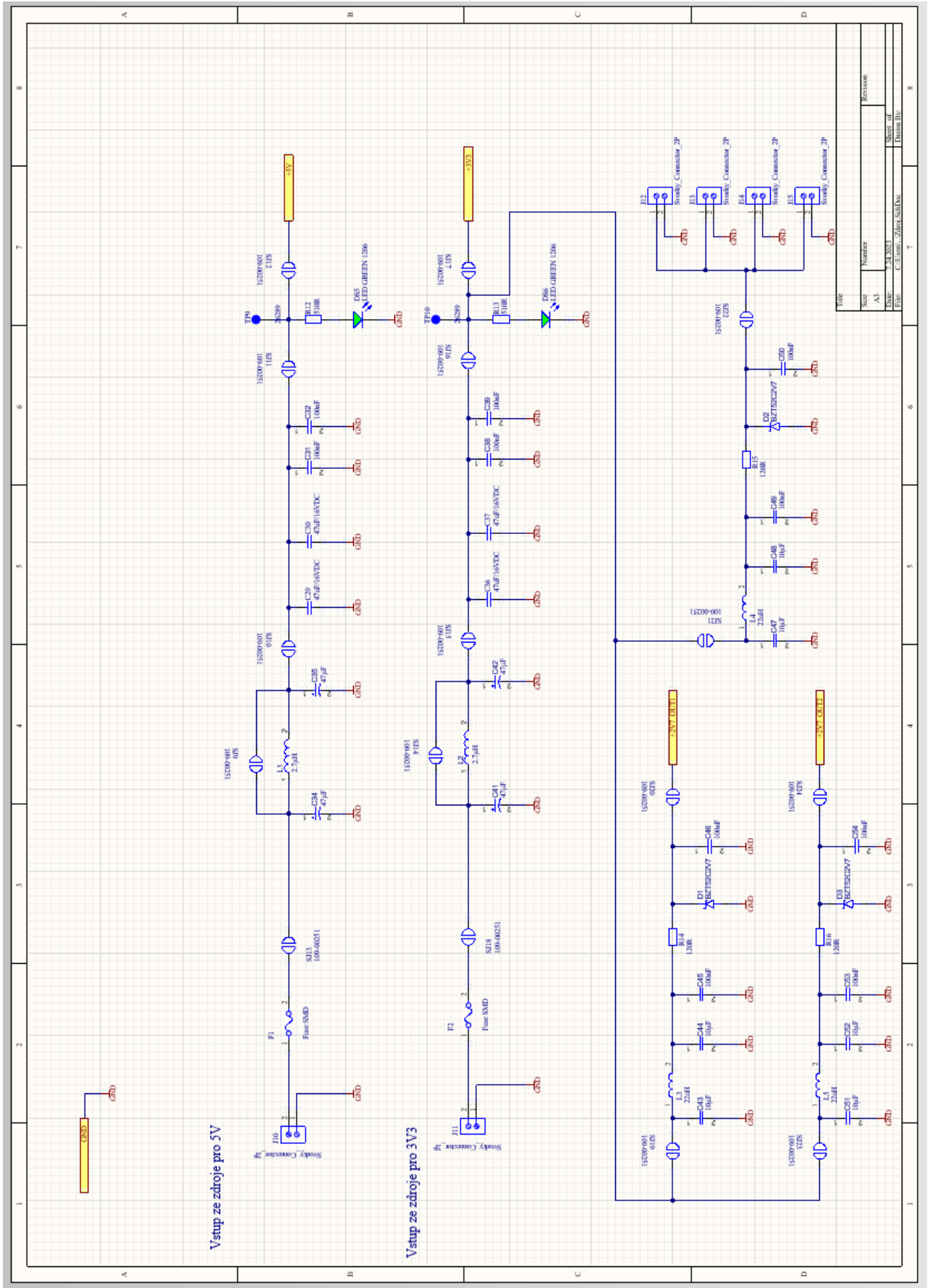




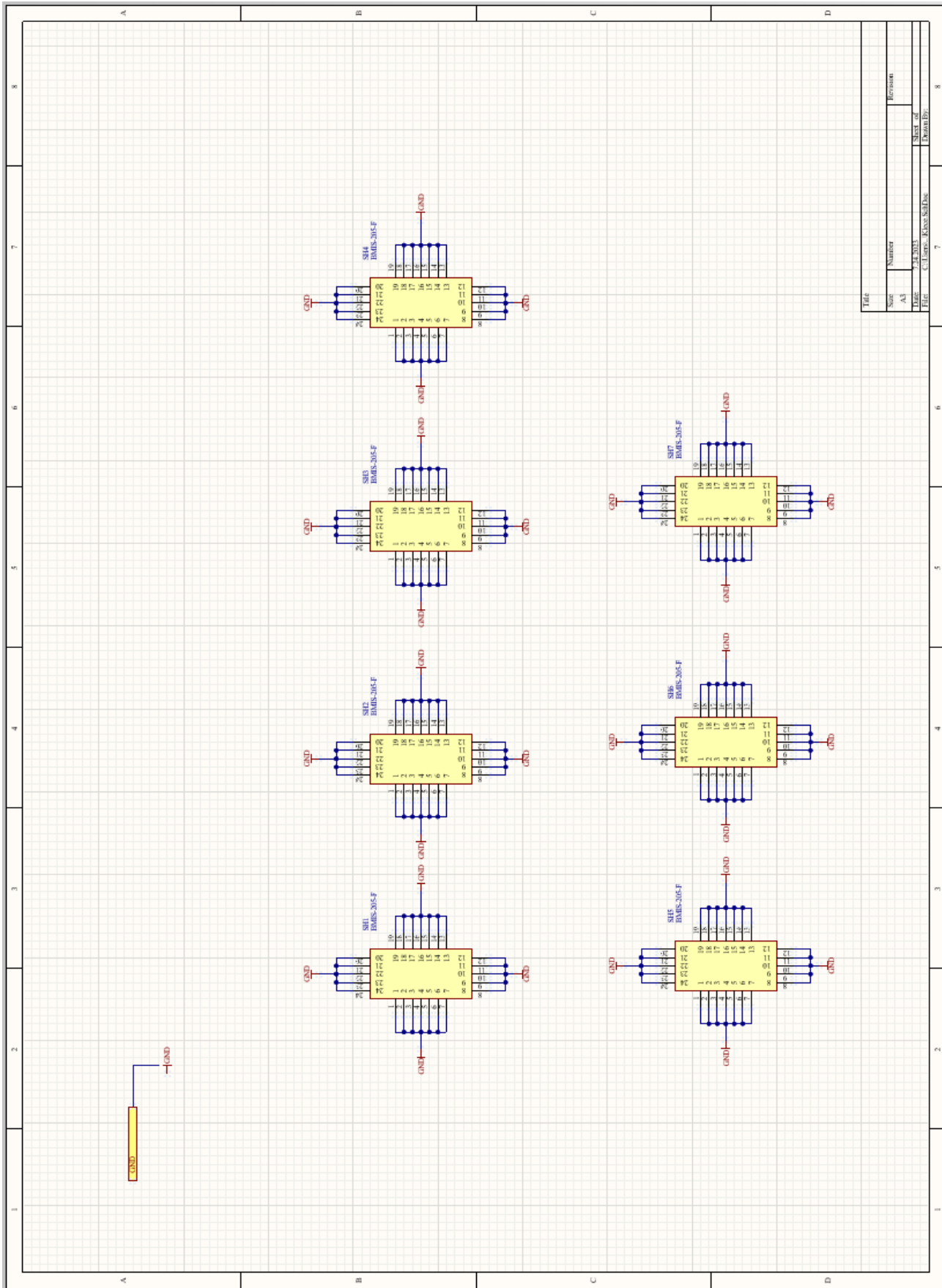




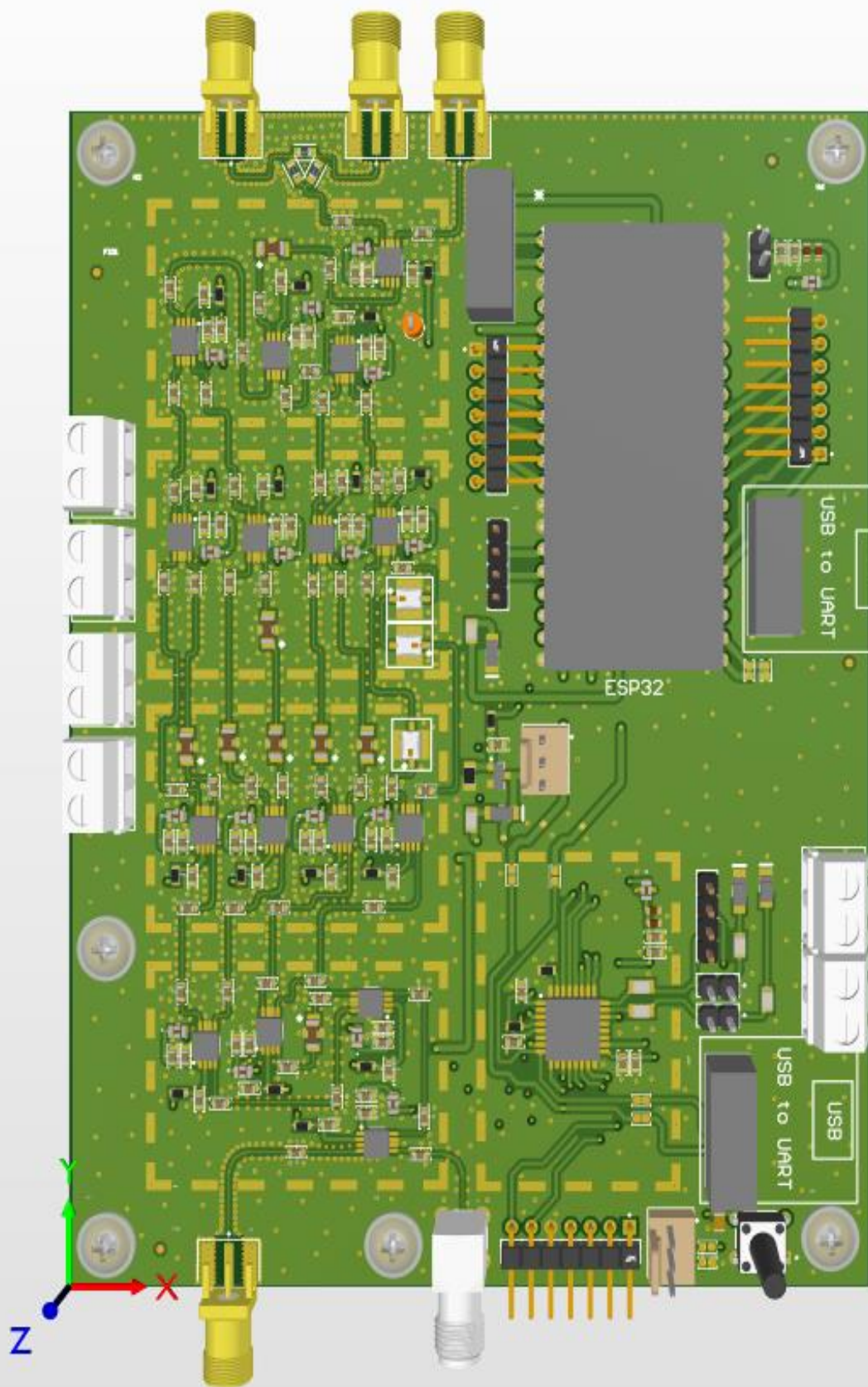
Obr L.5 Schéma řídicího MCU na části DPS. (Zdroj: Vlastní.)



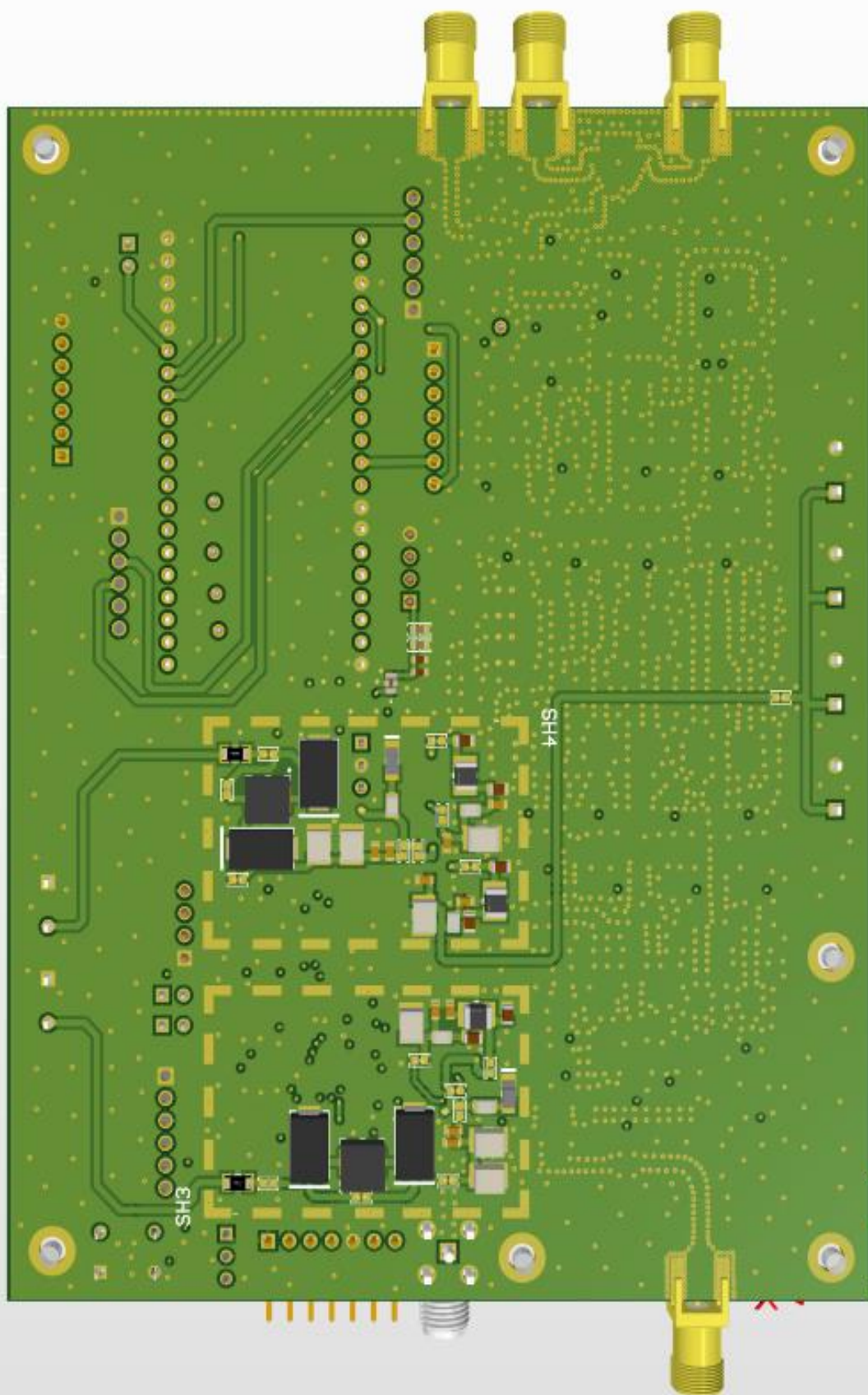
Obr L.6 Schéma napájecího zdroje na části DPS. (Zdroj: Vlastní.)



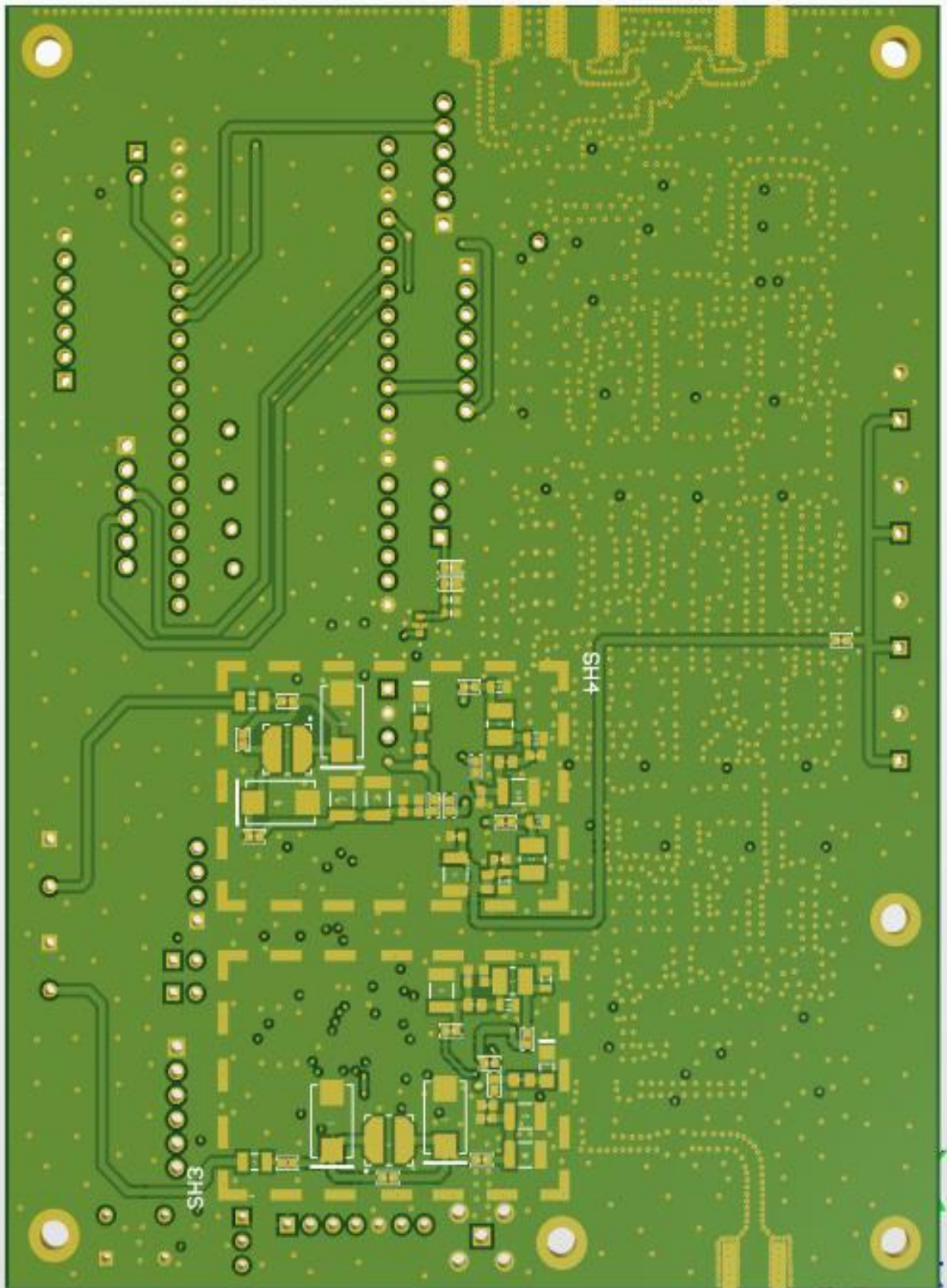
Obr L.7 Schéma všech EMC klecí na DPS. (Zdroj: Vlastní.)



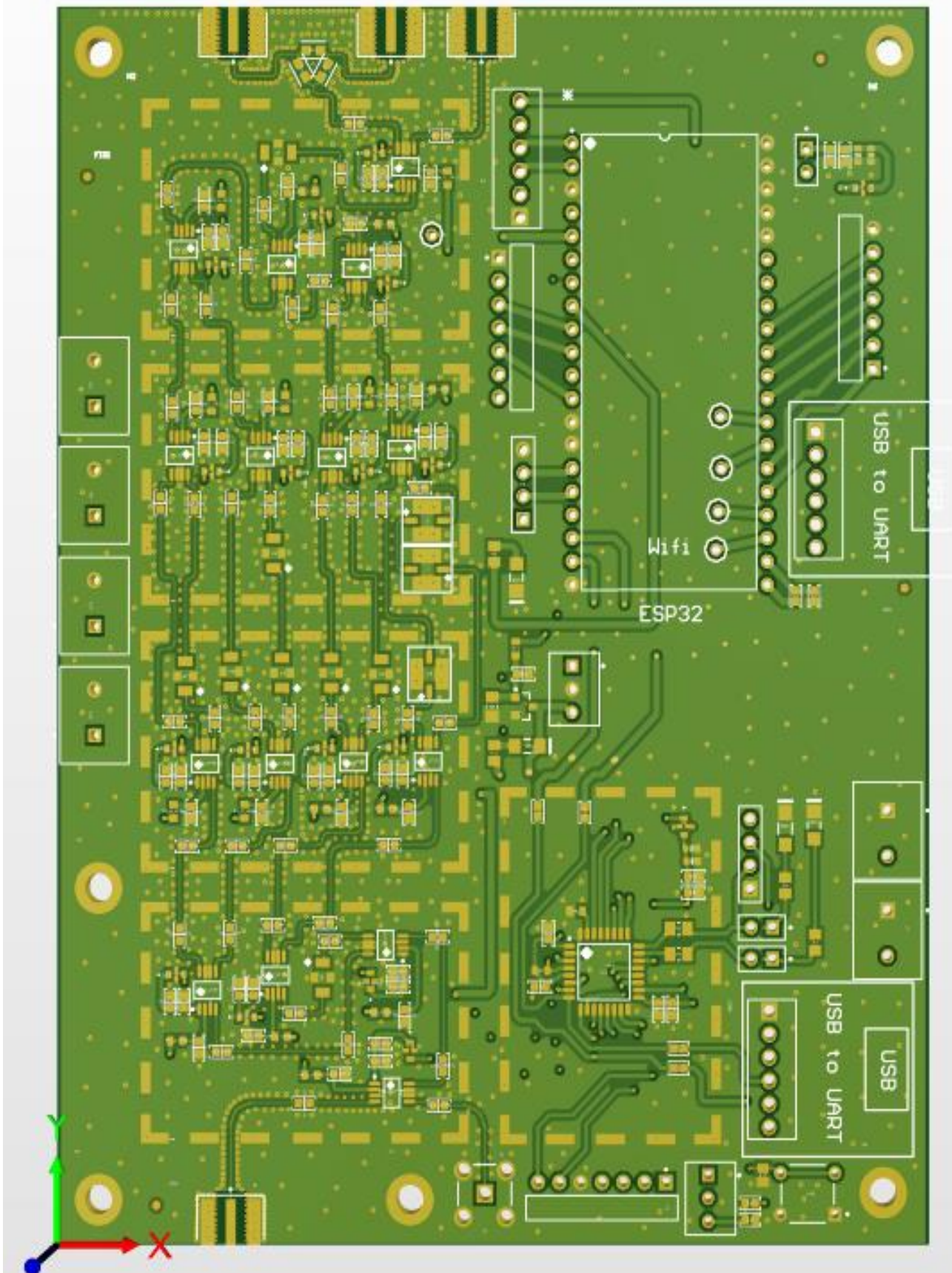
Obr L.8 Model navržené DPS – TOP. (Zdroj: Vlastní.)



Obr L.9 Model navržené DPS – BOTTOM. (Zdroj: Vlastní.)

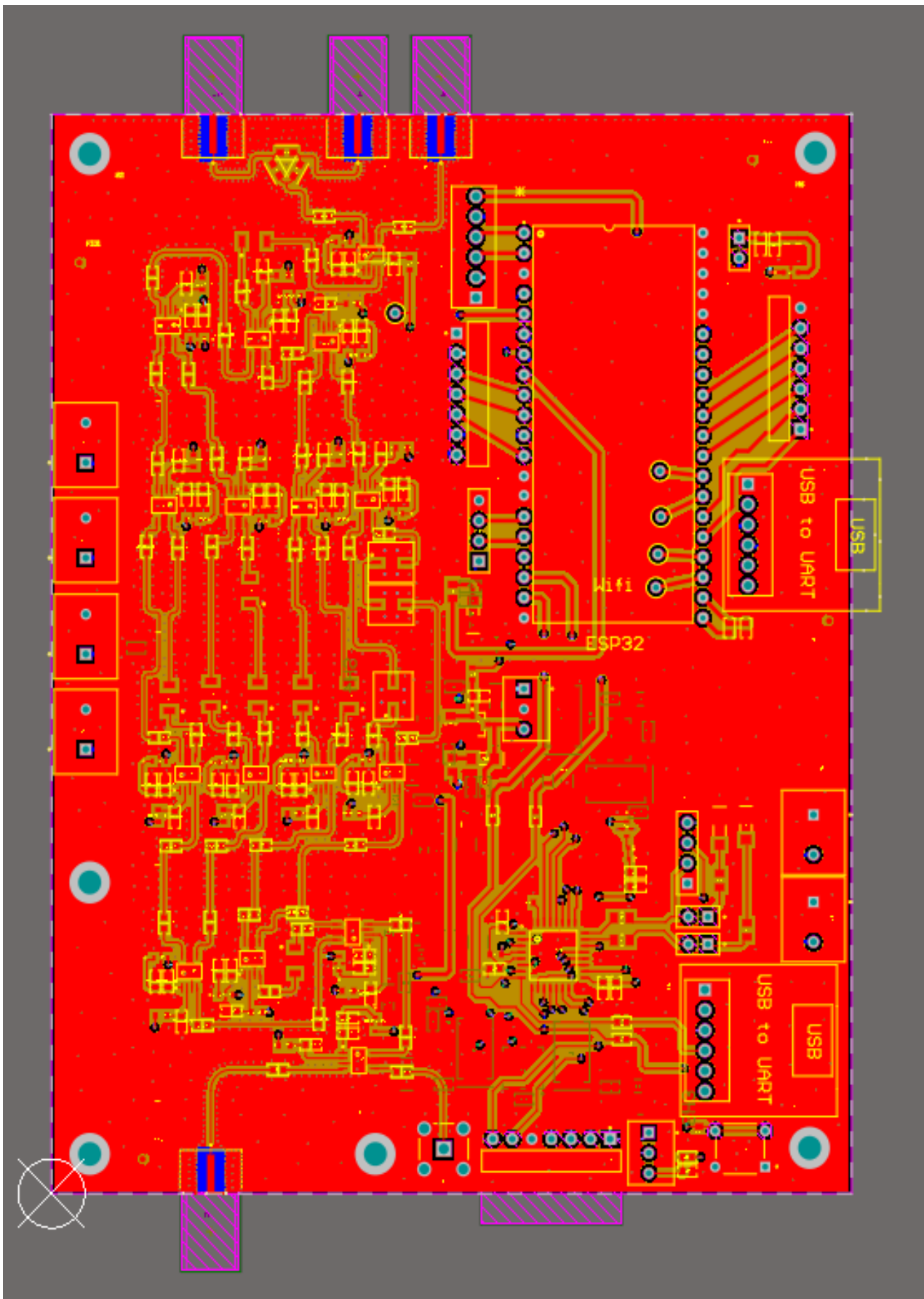


Obr L.10 Model navržené DPS bez obvodu – BOTTOM. (Zdroj: Vlastní.)

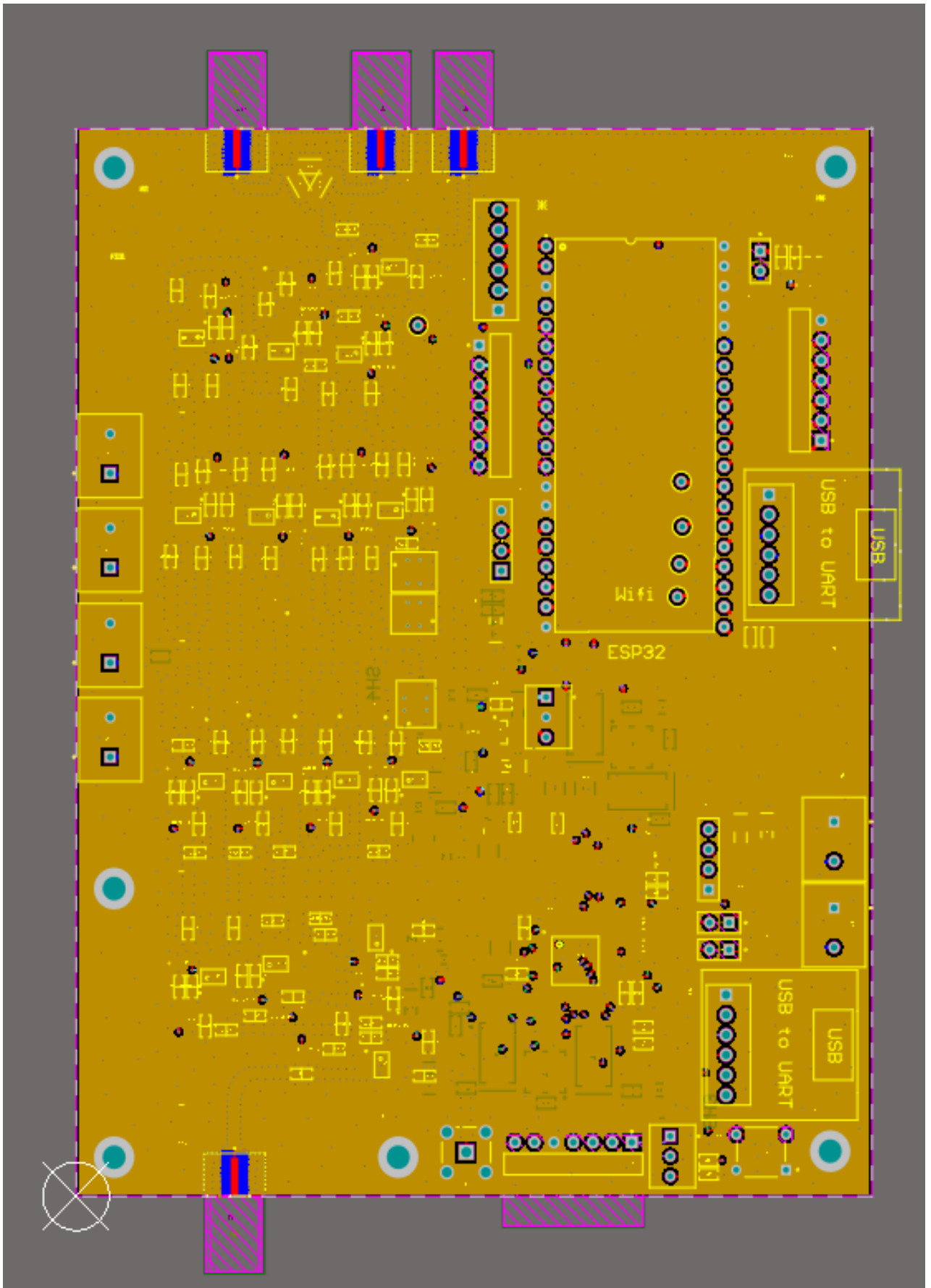


Obr L.11 Model navržené DPS bez obvodu – TOP. (Zdroj: Vlastní.)

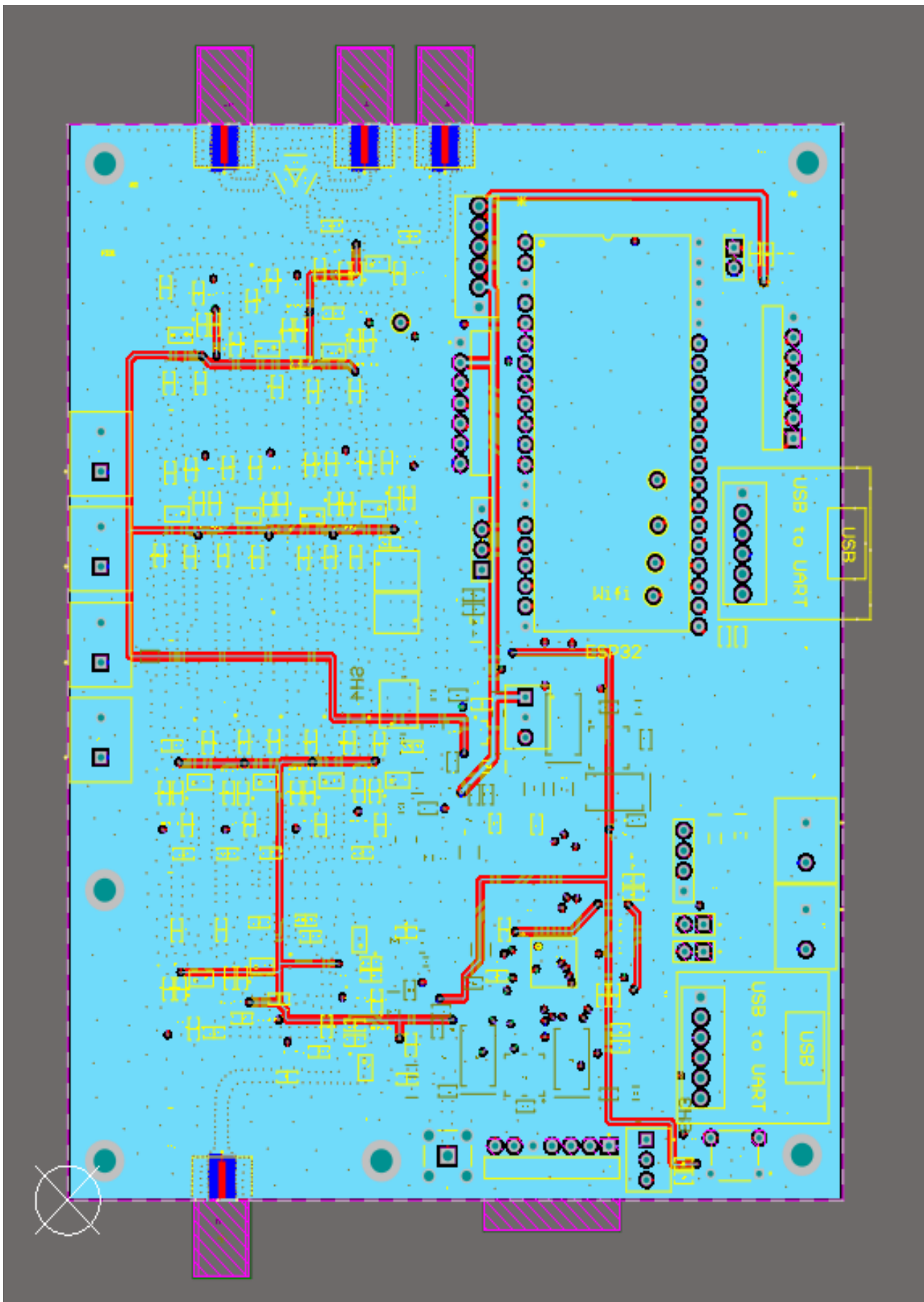




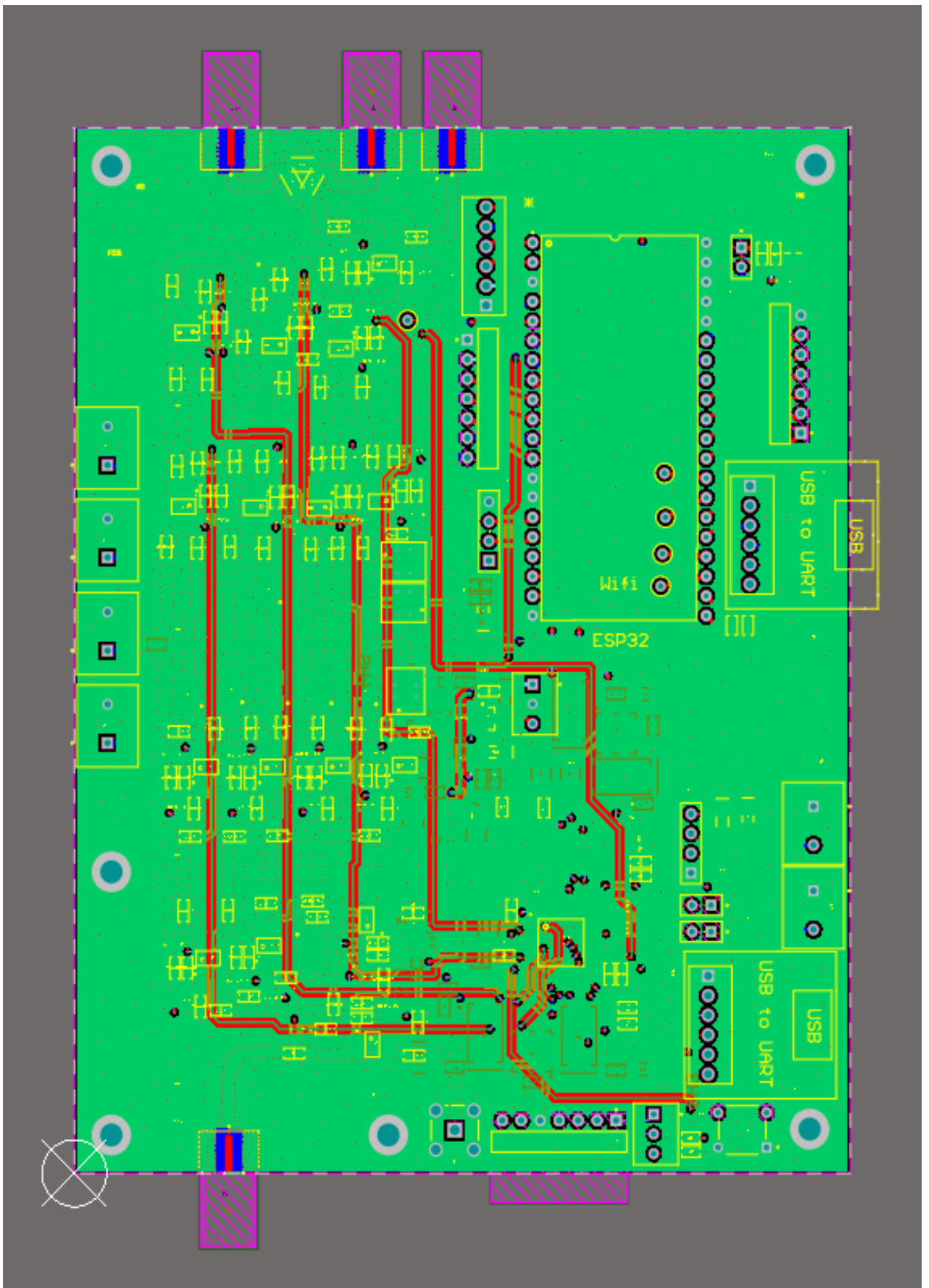
Obr L.12 Vrstva 1 – VF části a vedení – strana TOP. (Zdroj: Vlastní.)



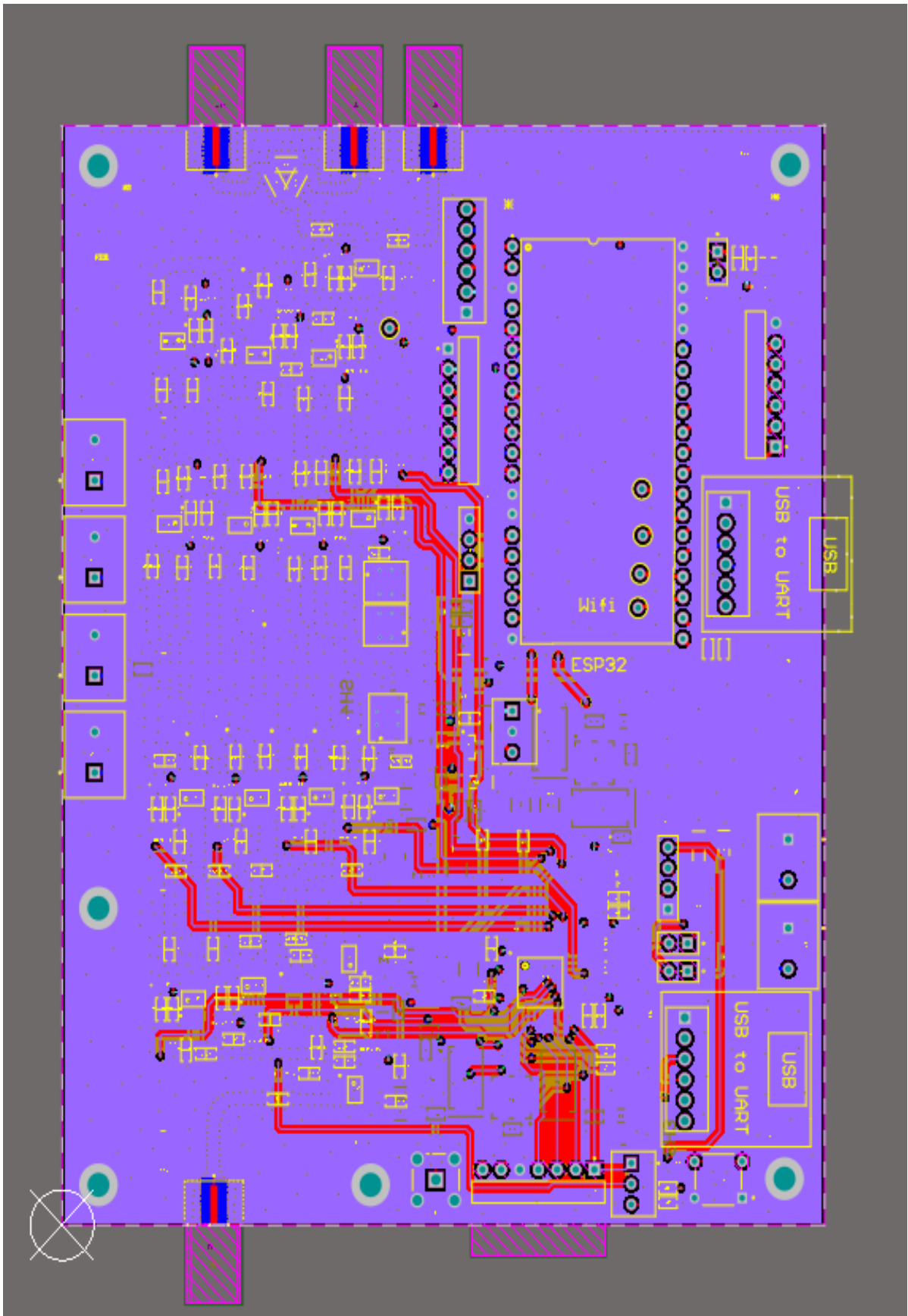
Obr L.13 Vrstva 2 – VF GND. (Zdroj: Vlastní.)



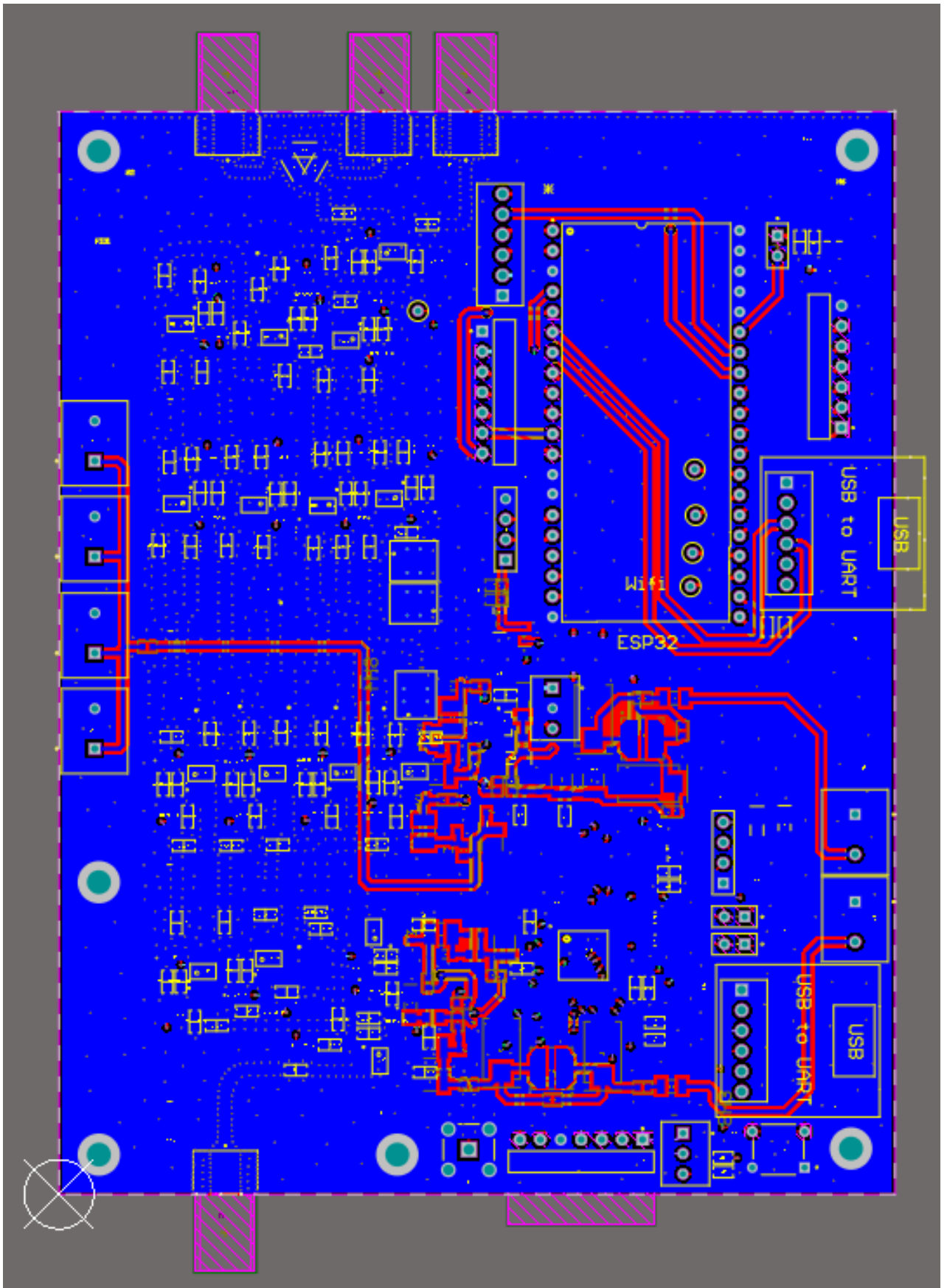
Obr L.14 Vrstva 3 – Vrstva napájecí napětí. (Zdroj: Vlastní.)



Obr L.15 Vrstva 4 – Trasy přepínání část 1. (Zdroj: Vlastní.)

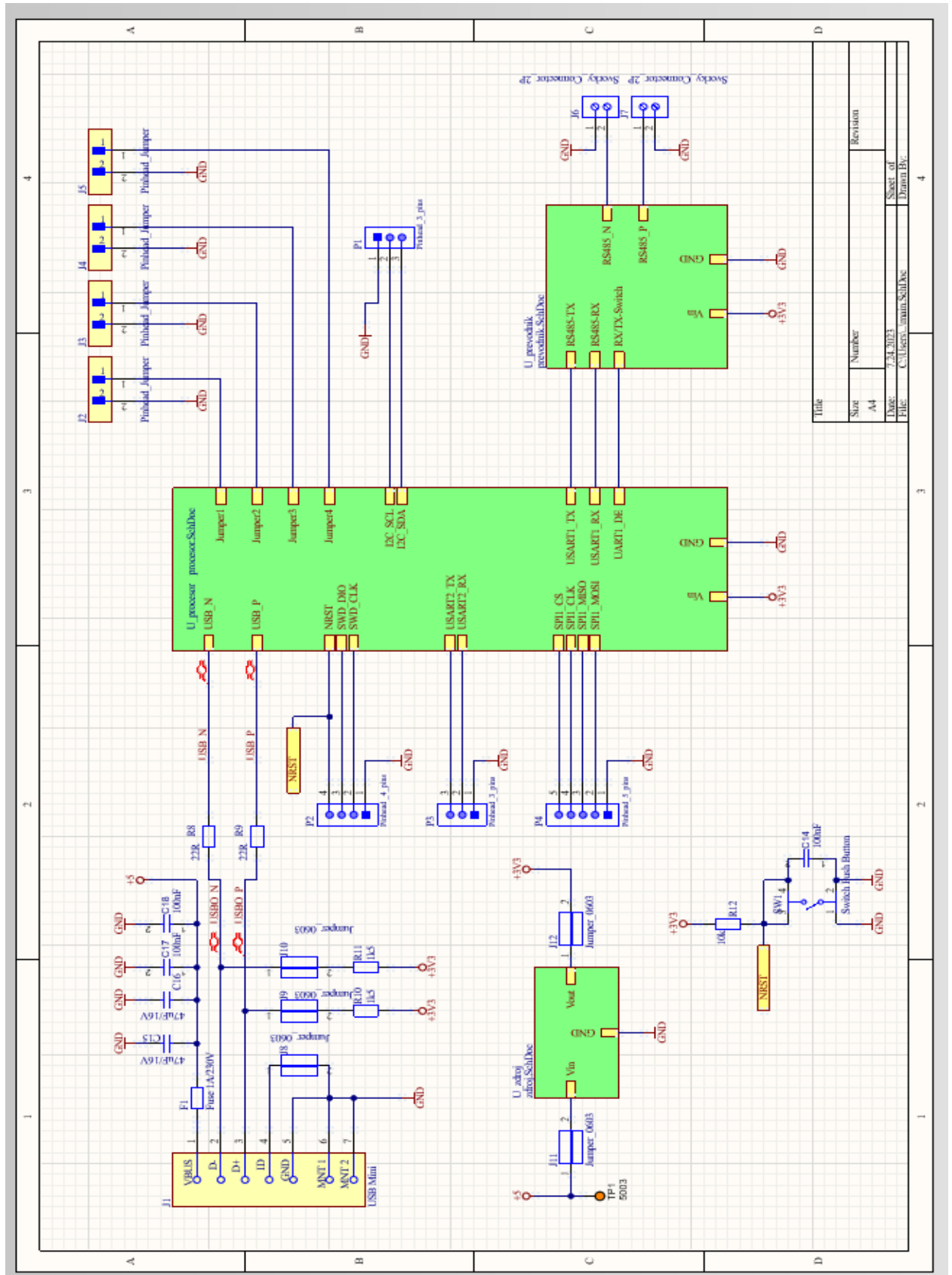


Obr L.16 Vrstva 5 – Trasy přepínání část 2. (Zdroj: Vlastní.)

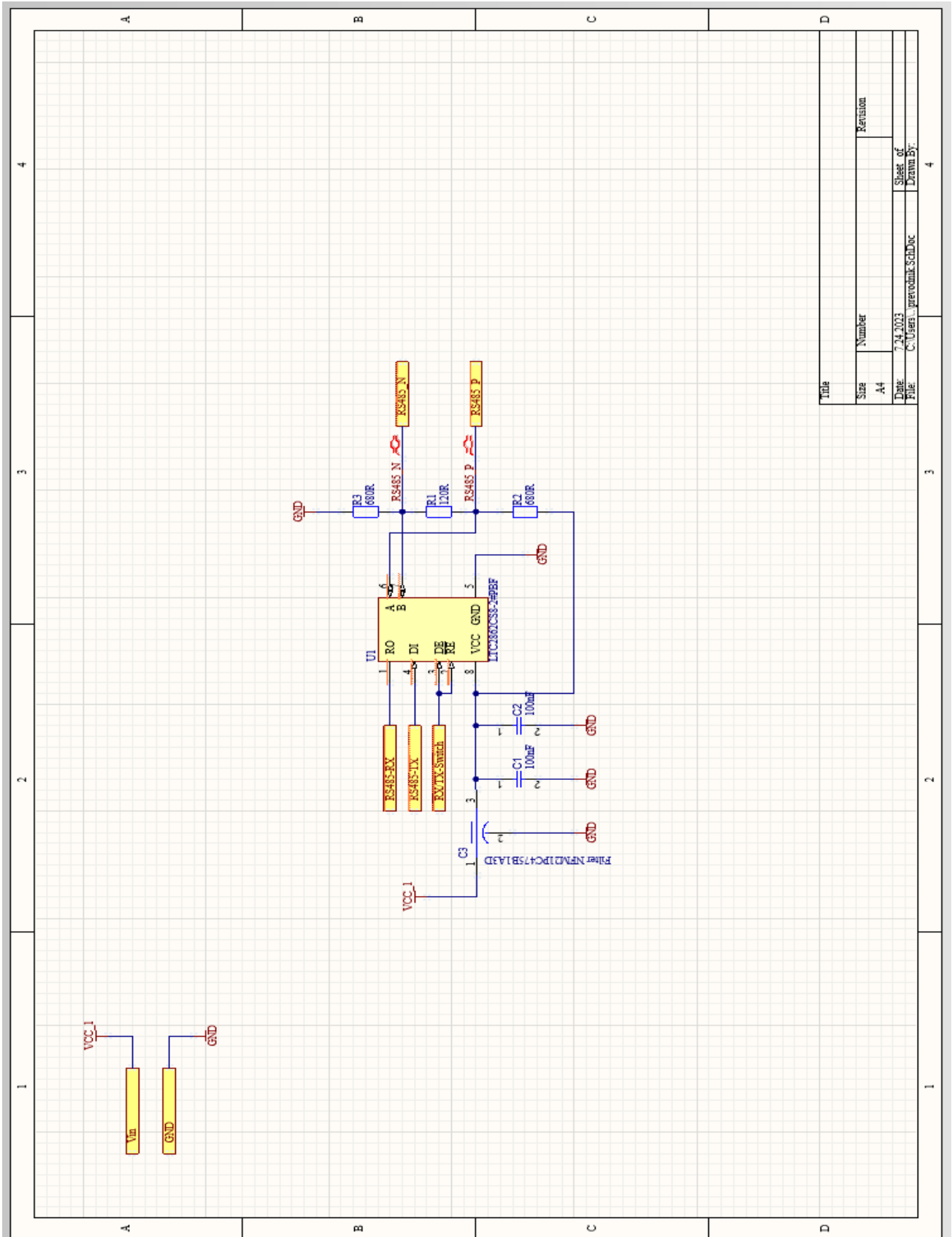


Obr L.17 Vrstva 6 – Napájecí zdroje – strana BOTTOM. (Zdroj: Vlastní.)

Příloha M: Export projektu návrhu DPS k programování syntetizéru signálu



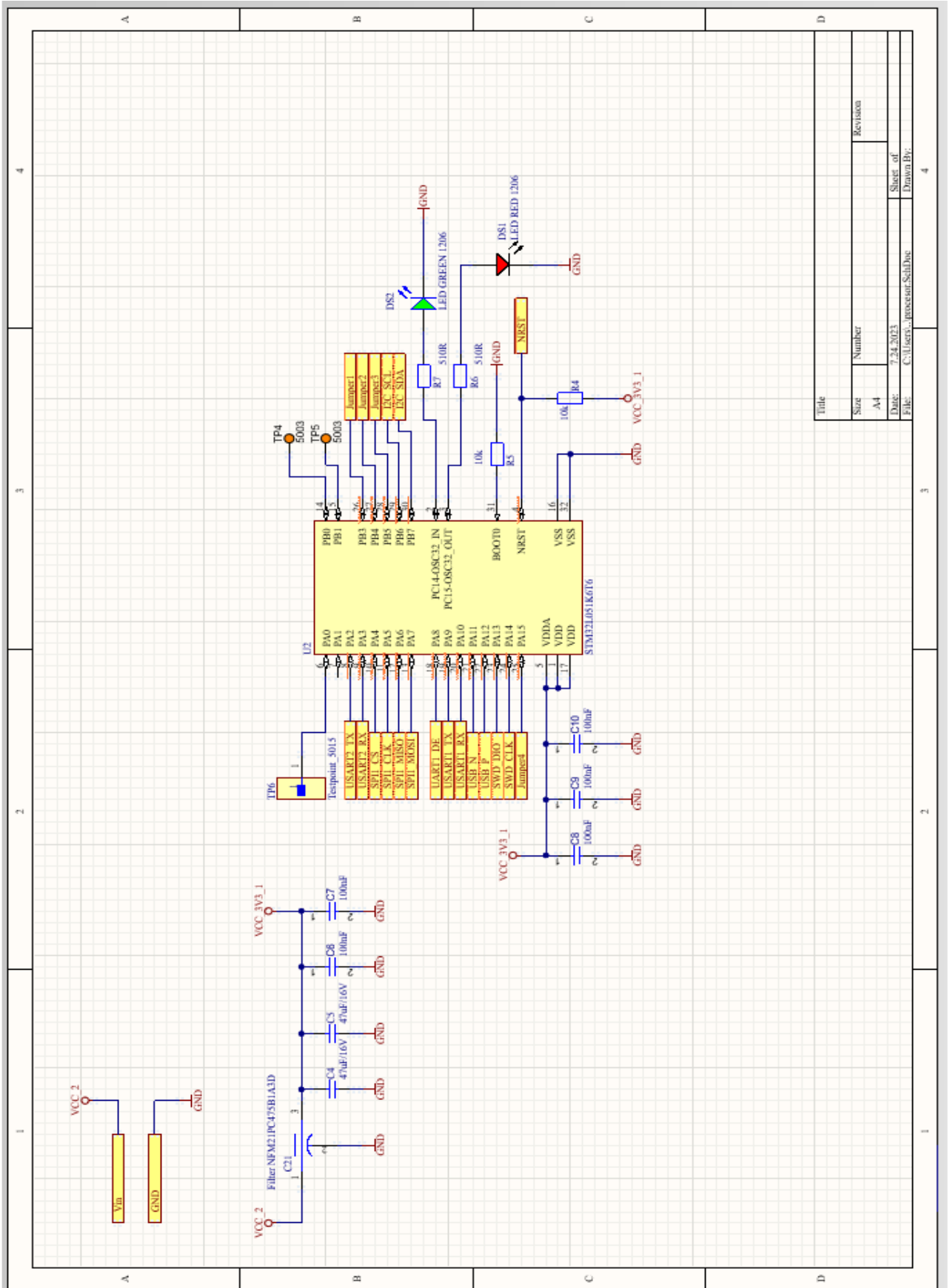
Obr M.1 TOP Schéma k DPS. (Zdroj: Vlastní.)



Title		Revision	
Size	Number		
A4			
Date:	7.24.2023	Sheet of	
File:	C:\Users\... \projekt\schoboc	Drawn by:	

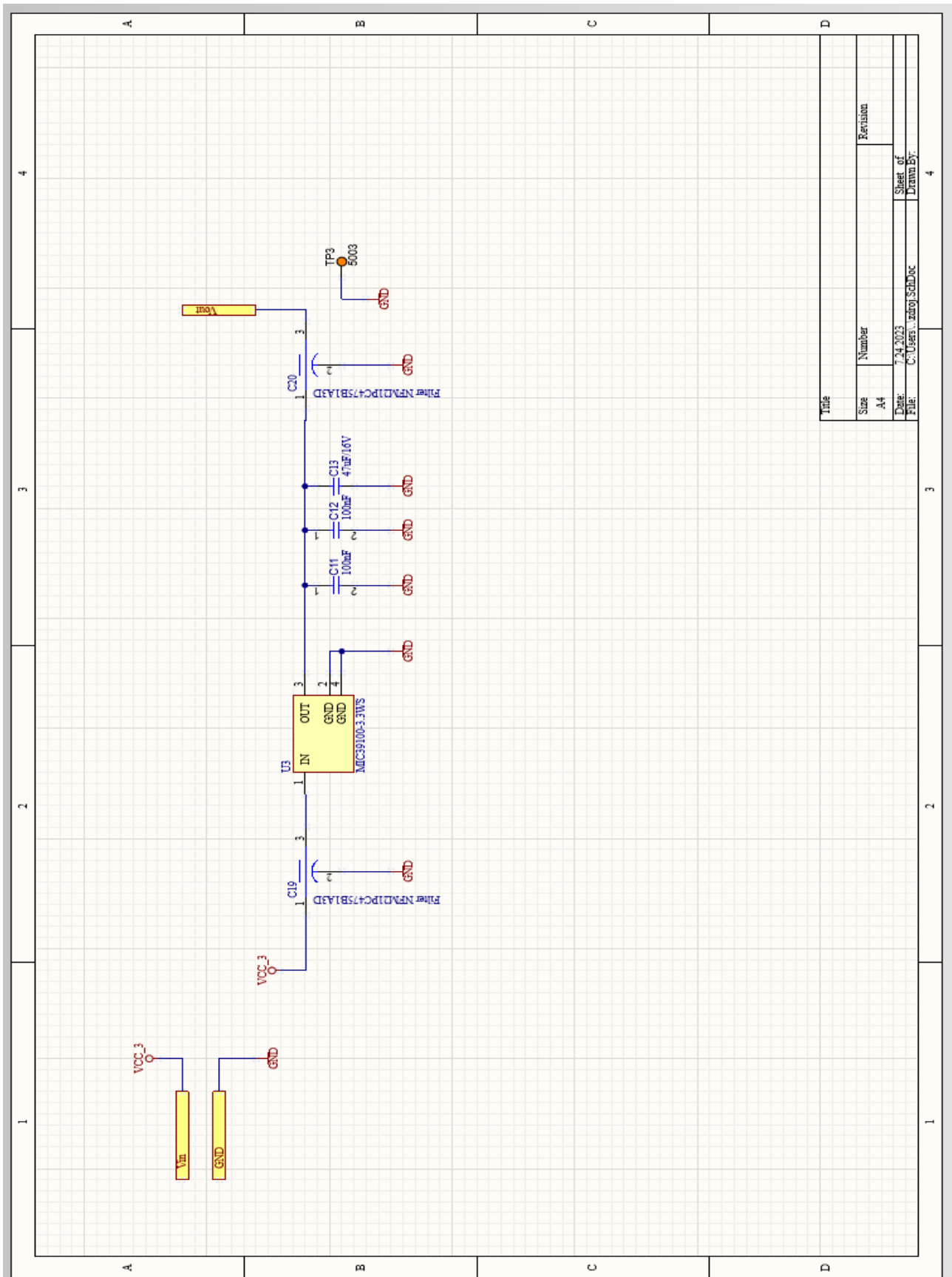
Obr M.2 Schéma k neosazené RS485 na DPS. (Zdroj: Vlastní.)





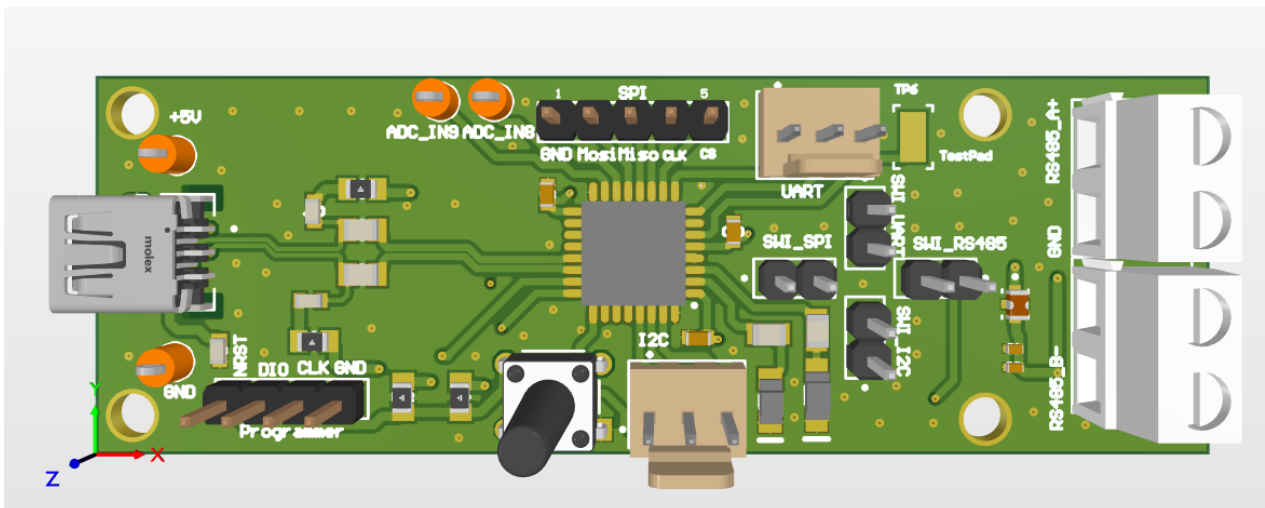
Title	
Size	Number
A4	
Date:	Revision
7.24.2023	
File:	Sheet of
C:\Users\...projektor\Sch106	1
	Drawn By:

Obr M.3 Schéma k MCU na DPS. (Zdroj: Vlastní.)

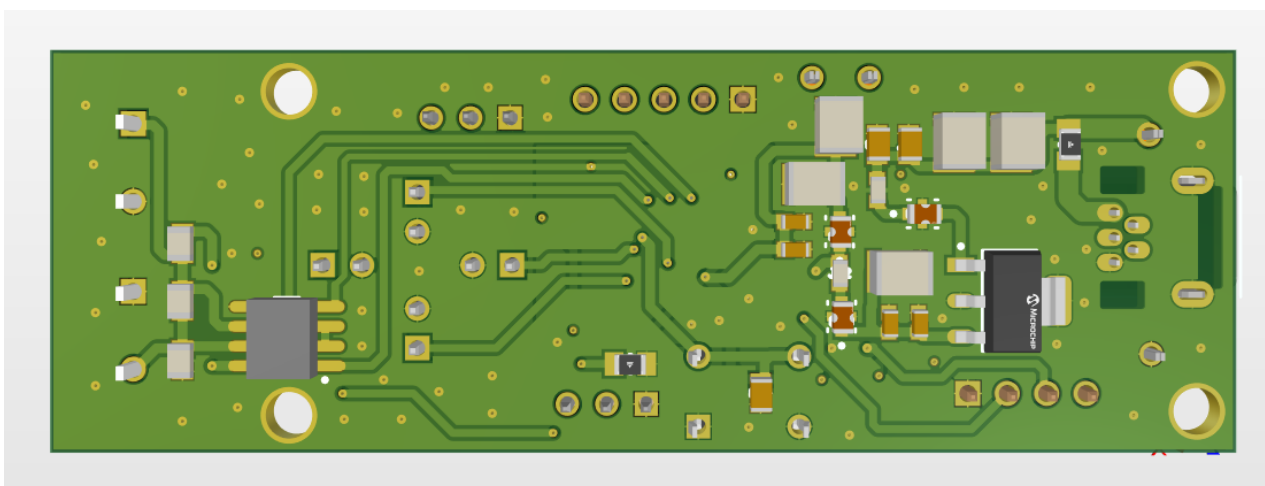


Title	
Size	Number
A4	
Date	Revision
7.24.2023	
File	Sheet of
C:\Users\zdroj\Documents	Drawn By:
	4

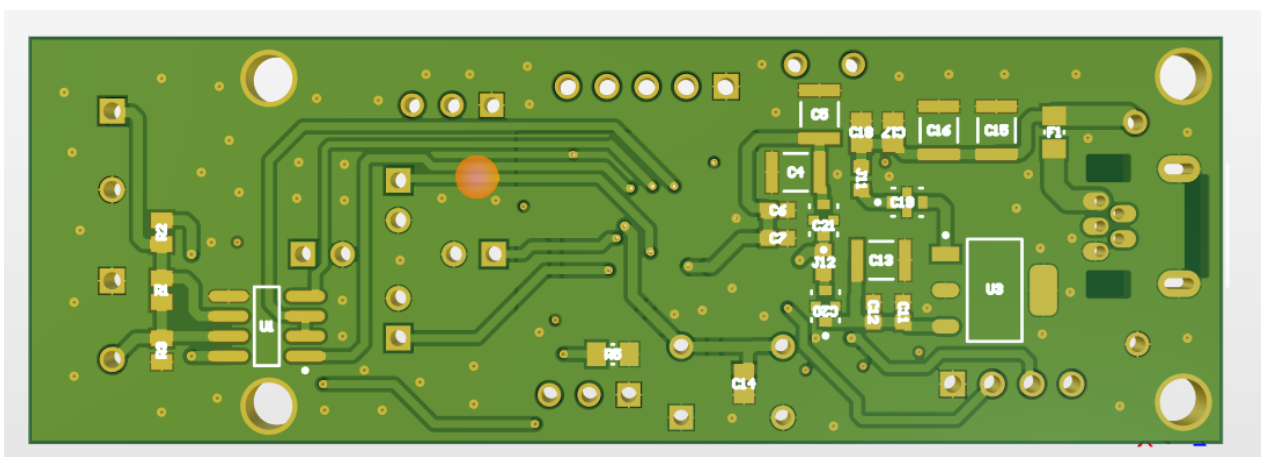
Obr M.4 Schéma k napájecímu zdroji na DPS. (Zdroj: Vlastní.)



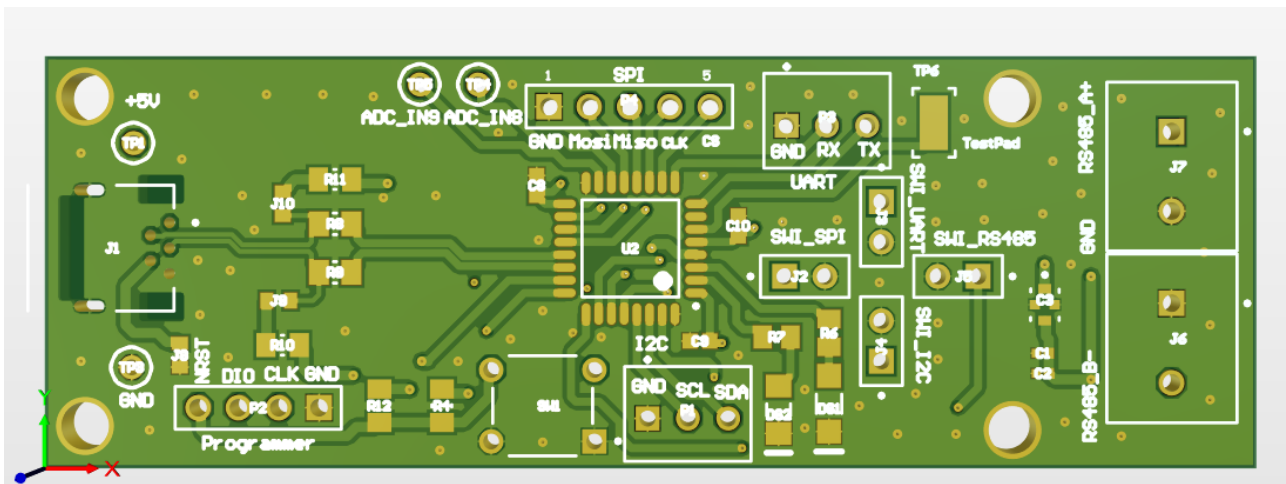
Obr M.5 Model navržené DPS – strana TOP. (Zdroj: Vlastní.)



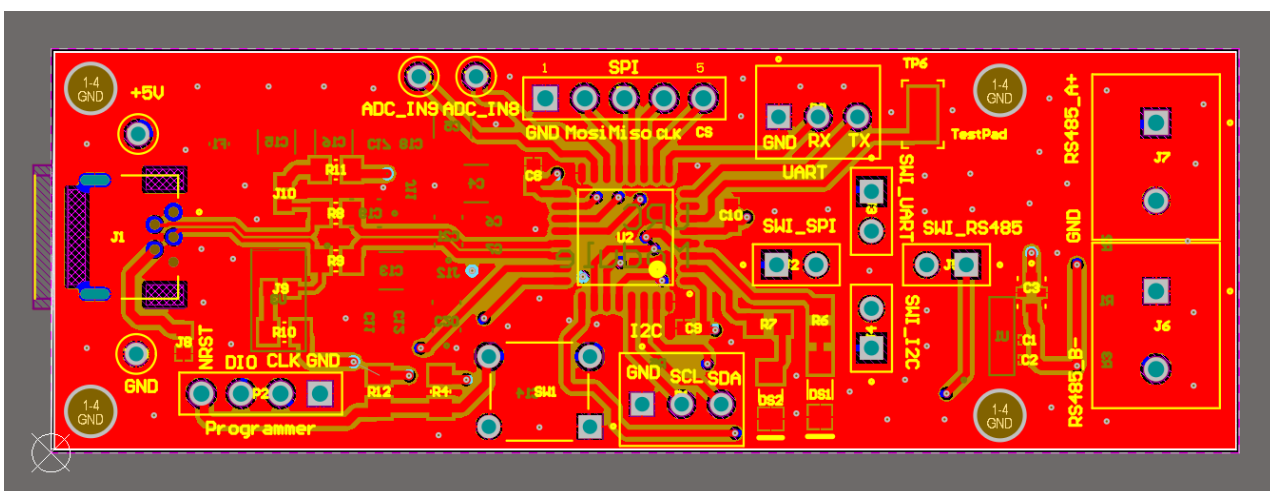
Obr M.6 Model navržené DPS – strana BOTTOM. (Zdroj: Vlastní.)



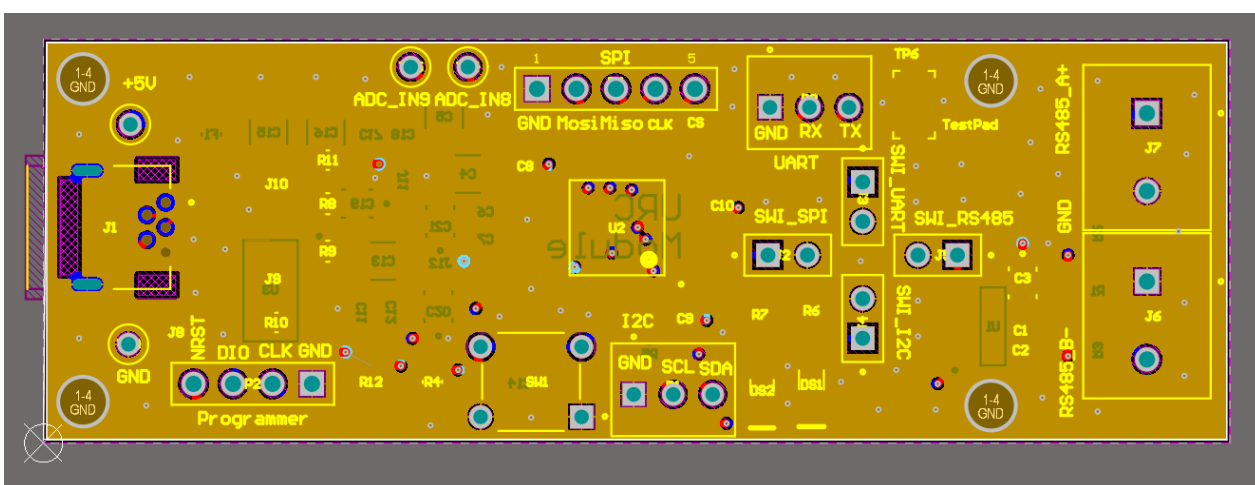
Obr M.7 Model navržené bez obvodu DPS – strana BOTTOM. (Zdroj: Vlastní.)



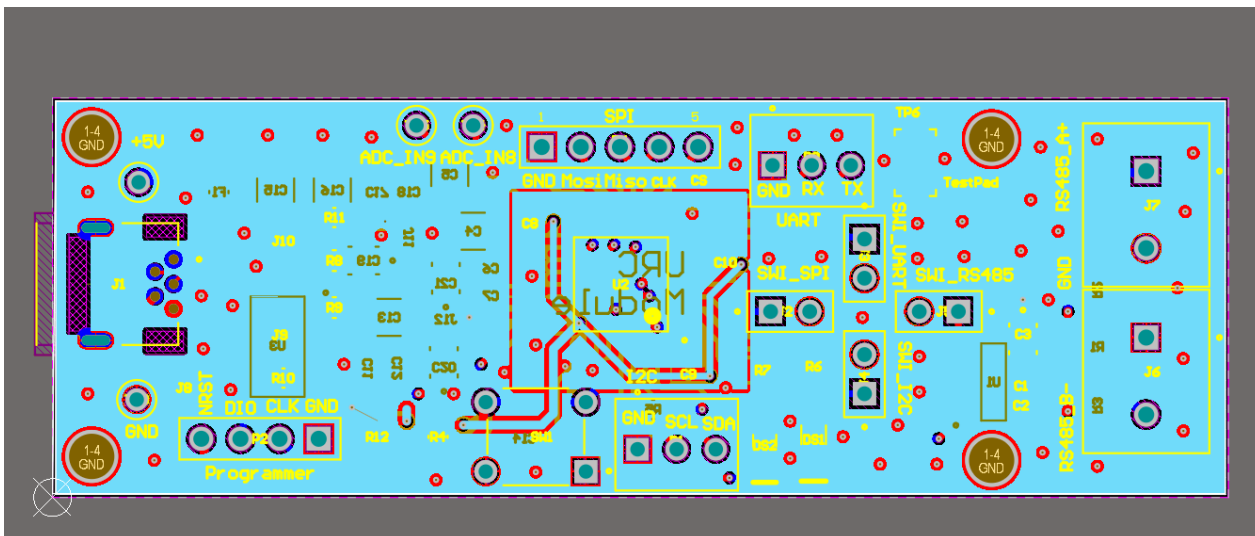
Obr. M.8 Model navržené bez obvodu DPS – strana TOP. (Zdroj: Vlastní.)



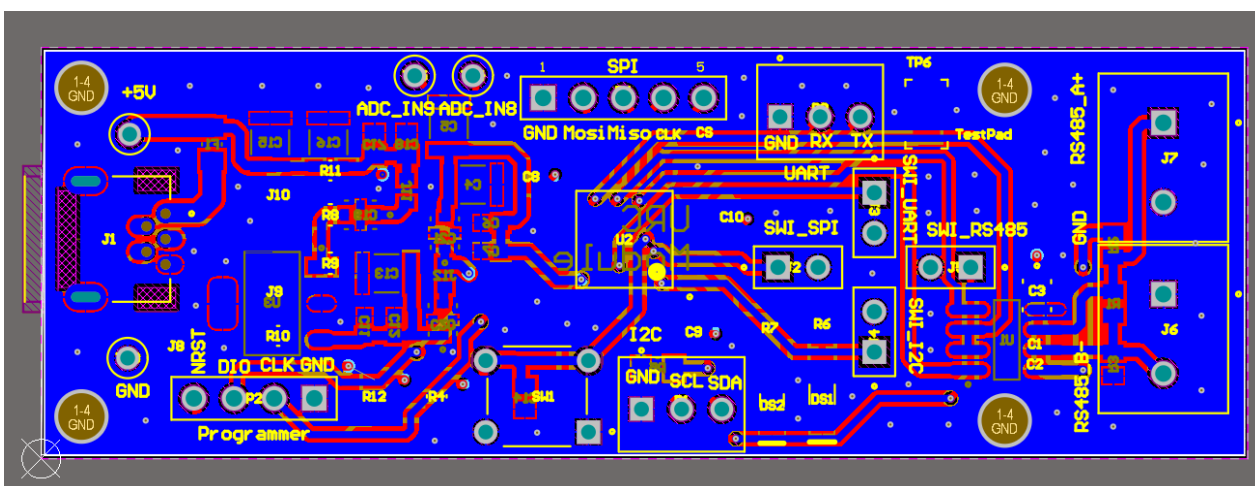
Obr. M.9 Vrstva 1 - MCU s konektory na DPS – strana TOP. (Zdroj: Vlastní.)



Obr. M.10 Vrstva 2 - GND pro DPS. (Zdroj: Vlastní.)



Obr M.11 Vrstva 3 - Napájení pro DPS. (Zdroj: Vlastní.)



Obr M.12 Vrstva 4 - Napájecí zdroj pro DPS – strana BOTTOM. (Zdroj: Vlastní.)

**Příloha N: Celková podoba navrženého zařízení.**



Obr N.1 Pohled na analyzátor – přední panel. (Zdroj: Vlastní.)



Obr N.2 Pohled na analyzátor – zadní panel. (Zdroj: Vlastní.)



Obr N.3 Pohled na detail vnitřního zapojení. (Zdroj: Vlastní.)



Obr N.4 Pohled na analyzátor – zařízení horní strana. (Zdroj: Vlastní.)



Obr N.5 Pohled na analyzátor – zařízení spodní strana. (Zdroj: Vlastní.)