



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## PROGRAMOVATELNÝ ATENUÁTOR PRO LABORATORNÍ MĚŘENÍ

PROGRAMMABLE ATTENUATOR FOR LABORATORY MEASUREMENT

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Husslik

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ladislav Polák, Ph.D.

BRNO 2024



# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

**Student:** Tomáš Husslik

**ID:** 240627

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2023/24

**NÁZEV TÉMATU:**

## Programovatelný atenuátor pro laboratorní měření

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V teoretické části práce podejte přehled o možnostech realizace útlumových článků (atenuátor) pro RF pásmo 1 až 2500 MHz. Navrhněte atenuátor s nominální impedancí 50  $\Omega$ , nastavitelnou hodnotu útlumu v rozsahu 0 až 40 dB, který je řízený digitálně. Ověřte základní funkčnost navržené koncepce a navrhněte desky plošných spojů.

V experimentální části práce kompletně zrealizujte navrženou koncepci. Programovatelný atenuátor otestujte v reálných podmínkách a proměřte jeho základní parametry. Jeho vlastnosti porovnejte s komerčně dostupným atenuátorem. Získané výsledky přehledně zpracujte.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] NAIMI Sepehr, NAIMI Sarmad, MAZIDI, Muhammad Ali. The AVR Microcontroller and Embedded Systems Using Assembly and C: Using Arduino Uno and Atmel Studio. MicroDigitalEd, 2nd edition, 630 pages, 2017. ISBN-13: 978-0997925968.

[2] Passive Attenuators [cit. 2023-5-13]. Dostupné z: <https://www.electronics-tutorials.ws/attenuators/attenuator.html>

[3] Mini-Circuits, Programmable Attenuator RCDAT-6000-30 [cit. 2023-5-13]. Dostupné z: <https://www.minicircuits.com/pdfs/RCDAT-6000-30.pdf>

**Termín zadání:** 16.2.2024

**Termín odevzdání:** 27.5.2024

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Ladislav Polák, Ph.D.

**doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

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

## **ABSTRAKT**

Práce se zabývá návrhem programovatelného atenuátoru s digitálním řízením. Cílem práce je návrh atenuátoru s impedancí  $50\ \Omega$  s útlumem v rozsahu 0 až 40 dB, pracujícího v pásmu 1 až 2 500 MHz. Navržený atenuátor je řízen mikrokontrolérem, který ovládá obvod integrovaného atenuátoru. Součástí atenuátoru je základní uživatelské rozhraní. Pro atenuátor byla navržena a posléze vyrobena DPS. Zařízení bylo následně sestaveno a změřeny jeho klíčové parametry.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

atenuátor, mikrokontrolér, útlumový článek, AVR, I<sup>2</sup>C, rotační enkodér, relé, DPS, VF

## **ABSTRACT**

This thesis deals with the design of a programmable attenuator with digital control. The main objective of the work is to design and create an attenuator with a nominal impedance of  $50\ \Omega$ , providing adjustable attenuation in the range of 0 to 40 dB, functioning within a bandwidth of 1 to 2 500 MHz. Control of the proposed attenuator is facilitated by a microcontroller that manages the settings of an integrated circuit attenuator. Furthermore, the attenuator features a basic user interface. A PCB was designed for the attenuator and subsequently manufactured. The device was then assembled and its key parameters were measured.

## **KEYWORDS**

attenuator, microcontroller, attenuation pad, AVR, I<sup>2</sup>C, rotary encoder, relay, PCB, RF

HUSSLIK, Tomáš. *Programovatelný atenuátor pro laboratorní měření*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2024. Vedoucí práce: doc. Ing. Ladislav Polák, Ph.D.

# Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení autora:** Tomáš Husslik  
**VUT ID autora:** 240627  
**Typ práce:** Bakalářská práce  
**Akademický rok:** 2023/24  
**Téma závěrečné práce:** Programovatelný atenuátor pro laboratorní měření

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

Brno .....

.....

podpis autora\*

---

\* Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Ladislavu Polákovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Velké poděkování patří též Bc. Dominiku Cabanovi za cenné rady při návrhu DPS a konstrukci zařízení.

# Obsah

Úvod	11
<b>1 Teoretická část</b>	<b>12</b>
1.1 Druhy atenuátorů	12
1.2 Zajištění útlumu	12
1.2.1 Útlumové články	12
1.2.2 PIN dioda	16
1.3 Řízení atenuátoru	18
1.3.1 Přepínání útlumových článků	19
1.3.2 Mikrokontroléry	20
1.3.3 Rodina AVR	20
<b>2 Návrh a popis koncepce</b>	<b>22</b>
2.1 Základní rozdělení	22
2.2 Zdůvodnění zvolené koncepce	23
2.3 Řídicí část	23
2.3.1 Požadavky na mikrokontrolér	24
2.3.2 Výběr mikrokontroléru	24
2.3.3 Rotační enkodér	24
2.3.4 Displej	25
2.3.5 Další komponenty	25
2.3.6 Programování mikrokontroléru	26
2.3.7 Popis programu mikrokontroléru	26
2.4 Vysokofrekvenční (VF) část	27
2.4.1 Čipové atenuátory	27
2.4.2 Vysokofrekvenční relé a konektory	28
2.4.3 Návrh DPS	28
2.5 Napájecí část	29
2.5.1 Spotřeba zařízení	29
<b>3 Testování a výsledky měření</b>	<b>31</b>
3.1 Testování	31
3.2 Výsledky měření	32
3.2.1 Měření útlumu	32
3.2.2 Měření frekvenční závislosti	34
3.2.3 Měření S-parametrů	36
3.2.4 Zhodnocení výsledků měření	37

3.2.5	Provozní parametry atenuátoru . . . . .	38
<b>Závěr</b>		<b>40</b>
<b>Literatura</b>		<b>41</b>
<b>Seznam symbolů a zkratek</b>		<b>44</b>
<b>Seznam příloh</b>		<b>46</b>
<b>A Fotografie</b>		<b>47</b>
<b>B Software</b>		<b>49</b>
<b>C Návrh DPS</b>		<b>51</b>
C.1	Schéma zapojení . . . . .	51
C.2	Výrobní podklady pro DPS . . . . .	57
<b>D Obsah elektronické přílohy</b>		<b>60</b>



# Seznam obrázků

1.1	L-článek . . . . .	13
1.2	T-článek . . . . .	14
1.3	$\pi$ -článek . . . . .	15
1.4	přemostěný T-článek . . . . .	16
1.5	Náhradní schéma PIN diody . . . . .	17
1.6	PIN přemostěný T-článek . . . . .	17
1.7	PIN $\pi$ -článek . . . . .	18
1.8	Porovnání relé a MEMS . . . . .	20
2.1	Blokové schéma . . . . .	22
2.2	Schéma převodníku úrovní signálu sběrnice . . . . .	25
2.3	Stackup – stavba vrstev . . . . .	29
3.1	Měřicí pracoviště pro měření útlumu . . . . .	31
3.2	Schéma zapojení měřicího pracoviště pro měření S-parametrů . . . . .	32
3.3	Závislost útlumu na nastavení . . . . .	32
3.4	Závislost odchylky útlumu na nastavení . . . . .	33
3.5	Závislost odchylky na nastavení . . . . .	34
3.6	Závislost útlumu na frekvenci . . . . .	35
3.7	Závislost odchylky útlumu na frekvenci . . . . .	35
3.8	Parametry $S_{11}$ a $S_{21}$ pro nulové nastavení atenuátoru . . . . .	36
3.9	Parametry $S_{11}$ a $S_{21}$ pro nastavení 20 dB . . . . .	37
A.1	3D render vrchní strany . . . . .	47
A.2	3D render spodní strany . . . . .	47
A.3	Foto finálního zařízení . . . . .	48
A.4	Detail uživatelského rozhraní . . . . .	48
C.1	Schéma DPS . . . . .	51
C.2	Část ATT1 . . . . .	52
C.3	Část ATT2 . . . . .	52
C.4	Část Debounce_buttons . . . . .	53
C.5	Část Debounce_encoder . . . . .	53
C.6	Část Relay_ATT1_before . . . . .	54
C.7	Část Relay_ATT1_after . . . . .	54
C.8	Část Relay_ATT2_before . . . . .	55
C.9	Část Relay_ATT2_after . . . . .	55
C.10	Část Filter_ATT1_C05-C16 . . . . .	56
C.11	Část Filter_ATT2_C05-C16 . . . . .	56
C.12	Vrchní vrstva . . . . .	57
C.13	Vnitřní vrstva č. 1 . . . . .	57

C.14 Vnitřní vrstva č. 2 . . . . .	58
C.15 Spodní vrstva . . . . .	58
C.16 Silkscreen . . . . .	59

# Úvod

Úroveň signálu je jedním ze základních parametrů, které udávají celkovou charakteristiku signálu. Při návrhu elektronických zařízení se zpravidla setkáme s požadavkem užitečný signál zesílit, nicméně v laboratorním prostředí je nutné naopak mít možnost signál rychle a spolehlivě zeslabit. Může nastat situace, že zkoumaný signál je příliš výkonný a nemáme nad ním kontrolu. To by v krajním případě mohlo vést až k poškození testovacího vybavení. Nezřídka kdy je ale právě nízká úroveň signálu a s ní související chování systému samotným předmětem zájmu. K uvedeným účelům slouží tzv. atenuátory (v českém prostředí se můžeme setkat s označením zeslabovače). Ideální atenuátor je zařízení, které snižuje úroveň signálu a zároveň nemění jeho jiné parametry, např. složení frekvenčního spektra.

Tato práce se zabývá návrhem programovatelného atenuátoru, který lze využít v laboratorním prostředí pro účely výzkumu, vývoje nebo testování. Přídavné jméno *programovatelný* značí, že útlum atenuátoru má být nastavitelný podle požadavku uživatele v rámci definovaného rozsahu. Atenuátor nalezne uplatnění v laboratorních úlohách předmětů, ve kterých se pracuje s bezdrátovým nebo kabelovým přenosem dat. Díky nastavitelnému útlumu bude možné detailně zkoumat vliv zeslabení signálu, což je jeden z jevů, ke kterým dochází v reálném přenosovém kanálu.

Bakalářská práce je rozvržena do tří základních celků. V první, teoretické části jsou rozebrány útlumové články a jiná řešení používaná k zeslabení signálu. Dále je zde podán přehled o možnostech elektrického řízení atenuátoru. Druhá část práce se zabývá návrhem samotného zařízení, popisuje jednotlivé části a jejich funkci. Věnuje se též návrhu DPS. V třetí části je vyrobené zařízení otestováno a změřeny jeho klíčové parametry.

# 1 Teoretická část

## 1.1 Druhy atenuátorů

Atenuátor je obecně dvojbran, má vždy dva vstupní a dva výstupní póly. Z funkčního hlediska rozlišujeme atenuátory pevné a nastavitelné. Pevné, jak už název napovídá, mají neměnnou úroveň útlumu a používají se například pro zlepšení impedančního výstupu směšovačů [1] nebo pro ochranu měřicích přístrojů před vysokou úrovní signálu [2]. Atenuátory s nastavitelným útlumem dále dělíme na napětím řízené a digitálně řízené, které nastavují útlum po jednotlivých krocích [3].

## 1.2 Zajištění útlumu

Dle typu atenuátoru se používají různé elektronické prvky. Nejjednodušším typem jsou pasivní útlumové články, složené pouze z rezistorů. Složitější konstrukce pomocí PIN diod (viz Kap. 1.2.2) nabízí přesnější nastavení útlumu, nicméně za cenu vyšší složitosti obvodu.

Přenos je výhodné uvádět v decibelech jako poměr výstupního a vstupního napětí. Útlum se značí buď jako zesílení se zápornou hodnotou, nebo jako zvláštní jednotka se značkou  $L$ . Zesílením (přenosem)  $-3$  dB tedy rozumíme útlum 3 dB. Při útlumu signálu bude výstupní signál vždy slabší – celkový přenos vyjde v záporných hodnotách (v dB) a útlum zapíšeme v kladných hodnotách.

Napěťový přenos a útlum se vypočítají dle následujících vztahů [1]:

$$G = \frac{U_{\text{OUT}}}{U_{\text{IN}}} \quad (1.1)$$

$$G_{dB} = 20 \log \left( \frac{U_{\text{OUT}}}{U_{\text{IN}}} \right) \quad (1.2)$$

$$L = \frac{U_{\text{IN}}}{U_{\text{OUT}}} = \frac{1}{G} \quad (1.3)$$

$$L_{dB} = 20 \log \left( \frac{U_{\text{IN}}}{U_{\text{OUT}}} \right) = -G_{dB} \quad (1.4)$$

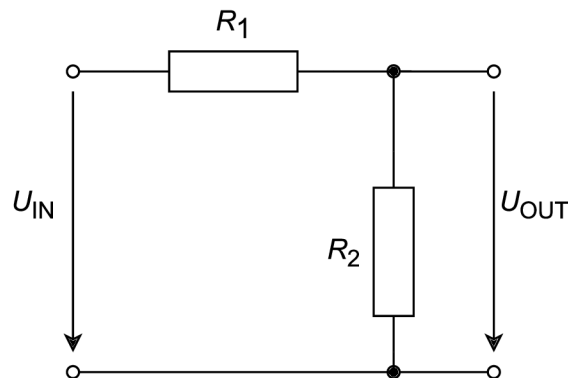
### 1.2.1 Útlumové články

Útlum zprostředkovávají soustavy prvků (rezistorů) v určité konfiguraci, nazývané jako (útlumové) články. Kromě útlumu lze pomocí nich také přizpůsobit zátěž s reálnou impedancí. To je výhodné, pokud nelze použít přizpůsobení vedením. V základu lze rozdělit články na symetrické a nesymetrické. Symetrické mají stejnou impedanci na vstupu a výstupu, běžně  $50 \Omega$ . Naopak nesymetrické se vyznačují různou vstupní

a výstupní impedancí. Pomocí vhodně navrženého nesymetrického článku lze tedy přizpůsobit dvě části vedení s různou charakteristickou impedancí, čímž snížíme zpětný odraz nepřizpůsobené zátěže. Protože útlumové články sestávají pouze z rezistivních prvků, nevzniká v nich fázový posuv signálu. To ovšem platí pouze u ideálních rezistorů, v praxi mají vždy na vyšších frekvencích nějaké parazitní indukčnosti a kapacity.

### L-článek

Nejjednodušší typ článku, jedná se v podstatě o napěťový dělič o dvou rezistorech. Nachází využití pro přizpůsobování zátěží, například z  $75\ \Omega$  na  $50\ \Omega$ . Nelze ovšem přizpůsobit oba směry zároveň. Hojně se uplatňují v audio technice, typicky k zeslabení signálu před reproduktorem. Problémem je, že při zatížení článku se mění jeho vstupní impedance, proto se více využívají jiné typy článků. Parazitní kapacity na vysokých frekvencích zkratují  $R_2$ , čímž sníží útlum a článek je nepoužitelný [2].



Obr. 1.1: Schéma L-článku

Rezistor  $R_1$  je v sérii se zátěží, rezistor  $R_2$  je paralelně (viz Obr. 1.1). Pro případ stejné impedance zdroje a zátěže a pohled směrem ke zdroji platí pro výpočet hodnot rezistorů vztah [2]:

$$R_1 = Z_S \left( \frac{K - 1}{K} \right) \quad (1.5)$$

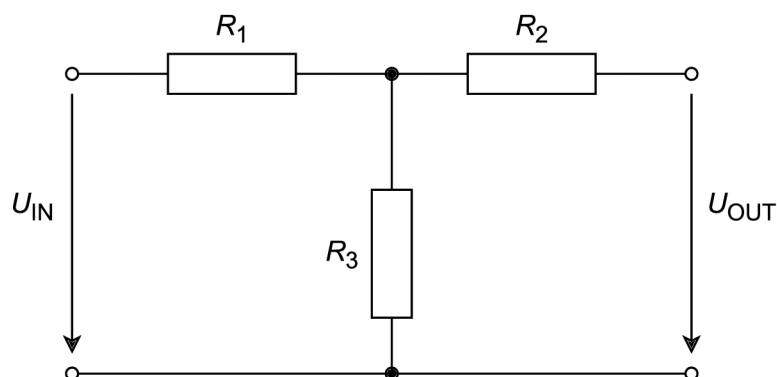
$$R_2 = Z_S \left( \frac{1}{K - 1} \right) \quad (1.6)$$

kde:

$$K = \frac{U_{IN}}{U_{OUT}} \quad (1.7)$$

## T-článek

T-článek vznikne spojením dvou L-čláнкů zády k sobě, obsahuje tedy 3 rezistory (viz Obr. 1.2). T-článek je symetrický, ve většině případů má stejnou impedanci na vstupu i na výstupu. Lze jej ale navrhnout tak, aby transformoval impedance (v anglické literatuře se tento typ označuje jako „mismatch pads“).



Obr. 1.2: Schéma T-čláнку

Hodnoty rezistorů pro daný útlum lze vypočítat podle vzorce (v případě symetrického článku, tj. stejná vstupní i výstupní impedance) [2]:

$$R_1 = R_2 = Z \left( \frac{K - 1}{K + 1} \right) \quad (1.8)$$

$$R_3 = 2Z \left( \frac{K}{K^2 - 1} \right) \quad (1.9)$$

Pro případ přizpůsobení impedance článkem:

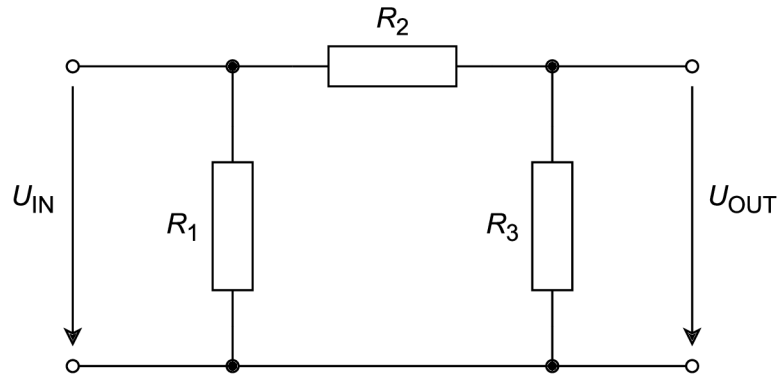
$$R_1 = Z_1 \left( \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} \right) - R_3 \quad (1.10)$$

$$R_2 = Z_2 \left( \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} \right) - R_3 \quad (1.11)$$

$$R_3 = 2\sqrt{Z_1 Z_2} \left( \frac{K}{K^2 - 1} \right) \quad (1.12)$$

## $\pi$ -článek

Stejně jako T-článek je symetrický a obsahuje  $\pi$ -článek (někdy psáno PI-článek, případně II-článek) 3 rezistory. Jejich konfigurace připomíná řecké písmeno  $\pi$ , tedy jeden rezistor sériově mezi dvěma rezistory zapojenými paralelně (na Obr. 1.3). Pokud je navržen pro funkci mezi dvěma obvody se stejnou charakteristickou impedancí, jsou hodnoty rezistorů  $R_1$  a  $R_3$  stejné.



Obr. 1.3: Schéma  $\pi$ -článku

Vztah pro výpočet hodnot rezistorů (stejná impedance) [2]:

$$R_1 = R_3 = Z \left( \frac{K + 1}{K - 1} \right) \quad (1.13)$$

$$R_2 = Z \left( \frac{K^2 - 1}{2K} \right) \quad (1.14)$$

Vztah pro různé vstupní a výstupní impedance:

$$R_1 = Z_S \left( \frac{K^2 - 1}{K^2 - 2K \sqrt{\frac{Z_S}{Z_L}} + 1} \right) \quad (1.15)$$

$$R_2 = \frac{1}{2} \sqrt{Z_S Z_L} \left( \frac{K^2 - 1}{K} \right) \quad (1.16)$$

$$R_3 = Z_L \left( \frac{K^2 - 1}{K^2 - \frac{2K}{\sqrt{Z_S Z_L}} + 1} \right) \quad (1.17)$$

### Přemostěný T-článek

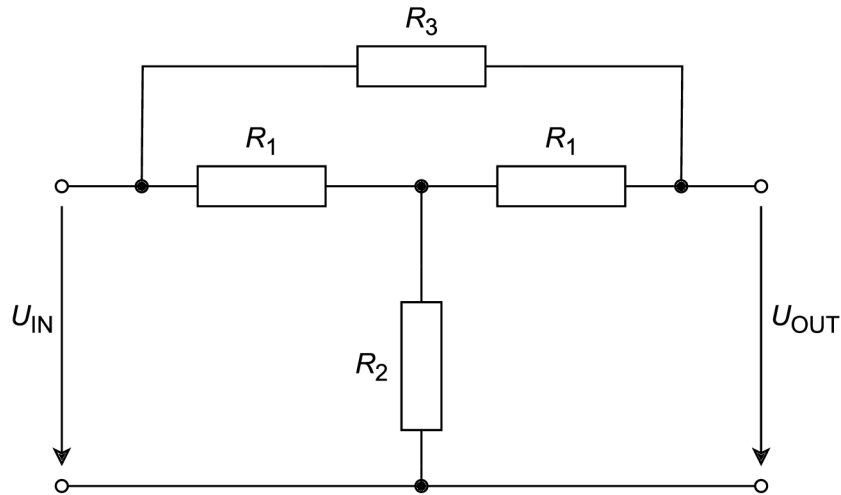
Přemostěný T-článek je modifikace klasického T-článku. Vytvoříme jej tak, že „nad“ celý článek zapojíme další rezistor. Výhodou tohoto uspořádání (na Obr. 1.4) je fakt, že článek má tendenci se sám přizpůsobit impedanci vedení. Omezující může být, že vstupní a výstupní impedance musí být vždy stejná a nelze jej tedy použít pro přizpůsobení. Také obsahuje o jeden rezistor navíc, což zvyšuje komplikovanost obvodu.

Vztah pro výpočet hodnot rezistorů [2]:

$$R_1 = R_3 = Z_S = Z_L \quad (1.18)$$

$$R_2 = \frac{R_1}{K - 1} \quad (1.19)$$

$$R_3 = R_1(K - 1) \quad (1.20)$$



Obr. 1.4: Schéma přemostěného T-článku

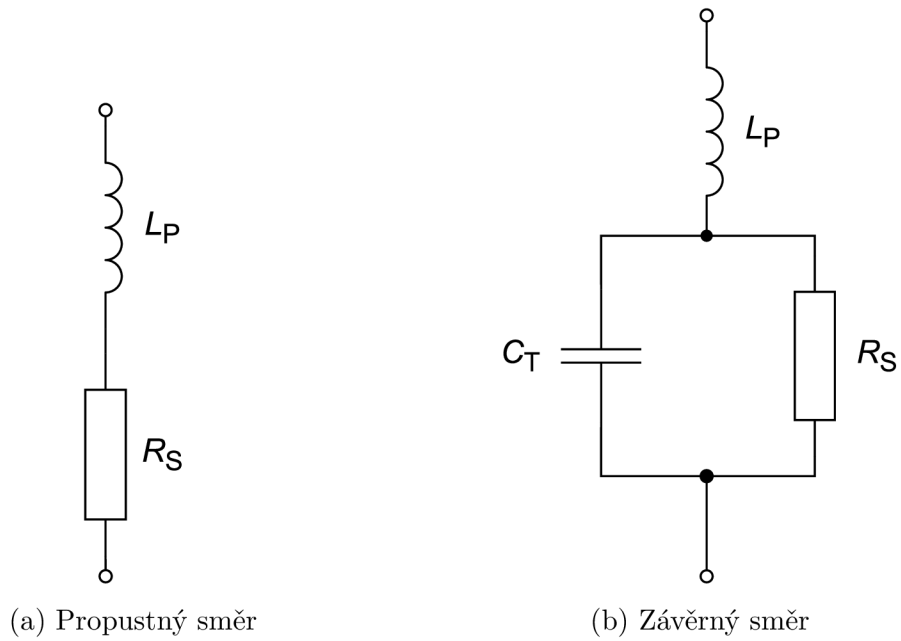
## 1.2.2 PIN dioda

PIN dioda je speciální typ diody, která obsahuje tři vrstvy polovodičů. Důsledkem je, že odpor diody je téměř lineární. Díky tomu nachází PIN diody široké uplatnění ve vysokofrekvenční (VF) technice. Využívají se jako spínače, prepínače, nebo limitery. Neméně významná je možnost použití jako atenuátoru.

Kromě vrstev P a N obsahuje ještě třetí vrstvu I, která je vložena mezi P a N. Tato vrstva je málo dotovaná vrstva a označuje se jako intrinzická. Podle přiloženého napětí má dioda buď nízkou (propustný směr/režim) (viz Obr. 1.5a) nebo vysokou (závěrný směr) (viz Obr. 1.5b) impedanci pro VF signál [4].

Pomocí PIN diod lze sestavit napětím řízený atenuátor VVA – díky lineárnímu odporu diody s ní můžeme pracovat jako s rezistorem. V základu existují dva typy, přemostěný  $T$  a  $\pi$ -článek. Problematické je ovšem přizpůsobení na zadanou impedanci – při zvyšování útlumu se některé diody otevírají (snižuje se jejich odpor) a některé zase zavírají. To mění impedanci celého článku a je nutné nastavit *biasovací* obvod (obvod řídicího stejnosměrného napětí) tak, aby impedance zůstala konstantní při změně útlumu [5]. Jejich další nevýhodou je, že jejich útlum je závislý na frekvenci (při stejném *biasovacím* napětí), proto se často používají v obvodech s automatickým řízením zisku (AGC – Automatic Gain Control) [6]. Jejich použitelné kmitočtové pásmo obvykle začíná na jednotkách MHz a končí jednotkami GHz, přičemž při maximální frekvenci dosahují útlumu okolo 35 dB [7] [8].

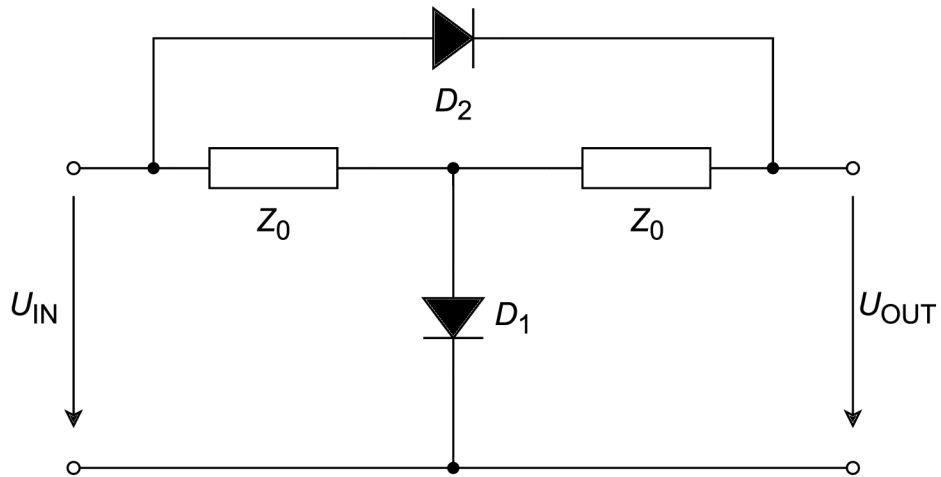




Obr. 1.5: Náhradní schéma PIN diody.  $L_P$  je parazitní indukčnost diody,  $R_S$  reprezentuje (nízký) odpor diody v propustném směru.  $C_T$  je celková kapacita diody (přechodu a pouzdra) a  $R_S$  je (vysoký) odpor diody v závěrném směru [4].

### Přemostěný T-článek

Přemostěný T-článek obsahuje dva rezistory označované jako  $Z_1$  a  $Z_2$  a mezi ně je vložena jedna dioda na zem a druhá paralelně k obou rezistorům (viz Obr. 1.6).



Obr. 1.6: Schéma PIN-diodového přemostěného T-článku

Útlum článku je určen vztahem [5]:

$$L_{dB} = 20 \log \left( 1 + \frac{Z_0}{R_{S1}} \right) \quad (1.21)$$

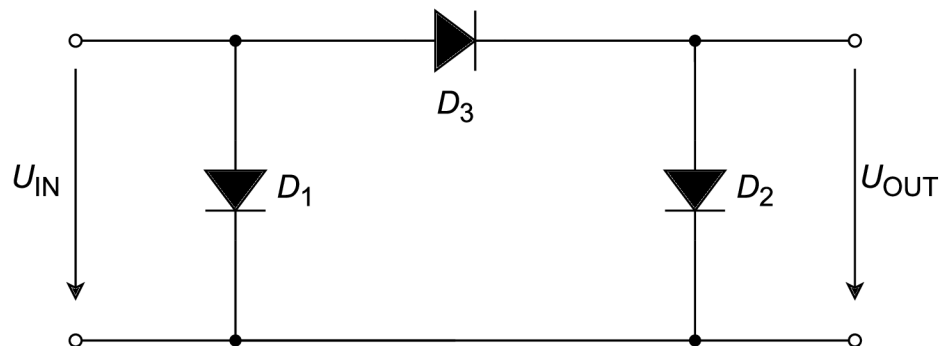
kde:

$$Z_0^2 = R_{S1} \times R_{S2} \quad (1.22)$$

$R_S$  značí odpor příslušné diody.

### $\pi$ -článek

Druhou variantou je  $\pi$ -článek, ten má stejnou topologii jako  $\pi$ -článek z rezistorů z Kap. 1.2.1, tedy jedna dioda v sérii (ze vstupu na výstup) a před ní a za ní vždy jedna na zem. Tyto dvě diody jsou v propustném směru, katodou na zem (viz. Obr. 1.7).



Obr. 1.7: Schéma PIN-diodového  $\pi$ -člátku

Útlum PIN-diodového  $\pi$ -člátku je dán vzorcí [5]:

$$L_{dB} = 20 \log \left( \frac{R_{S1} + Z_0}{R_{S1} - Z_0} \right) \quad (1.23)$$

kde:

$$R_{S1} = R_{S2} \quad (1.24)$$

$$R_{S3} = \frac{2R_{S1}Z_0^2}{R_{S1}^2 - Z_0^2} \quad (1.25)$$

## 1.3 Řízení atenuátoru

Atenuátory s nastavitelným útlumem musí být nějakým způsobem regulované. V případě napětím řízených atenuátorů (Voltage Variable Attenuator – VVA) je útlum měněn spojitě pomocí regulačního napětí. Do této kategorie spadají atenuátory na bázi PIN diod. VVA tedy nemají omezení minimálního kroku a nevyžadují zajištění přepínání jednotlivých útlumových sub-čládků. Jsou též jednodušší na návrh pro použití ve vysokých frekvencích. Problémový je jejich nestálý útlum napříč využívaným kmitočtovým pásmem. Jinou variantou je použití digitálních krokových atenuátorů (Digital Step Attenuator – DSA). V tomto případě se útlum mění skokově a řízení

zajišťuje digitální signál. Proto je tedy vyžadován digitální prvek, nejčastěji mikrokontrolér. Výhodou DSA je opakovatelnost a možnost přesného a rychlého nastavení požadovaného útlumu [3].

### 1.3.1 Přepínání útlumových článků

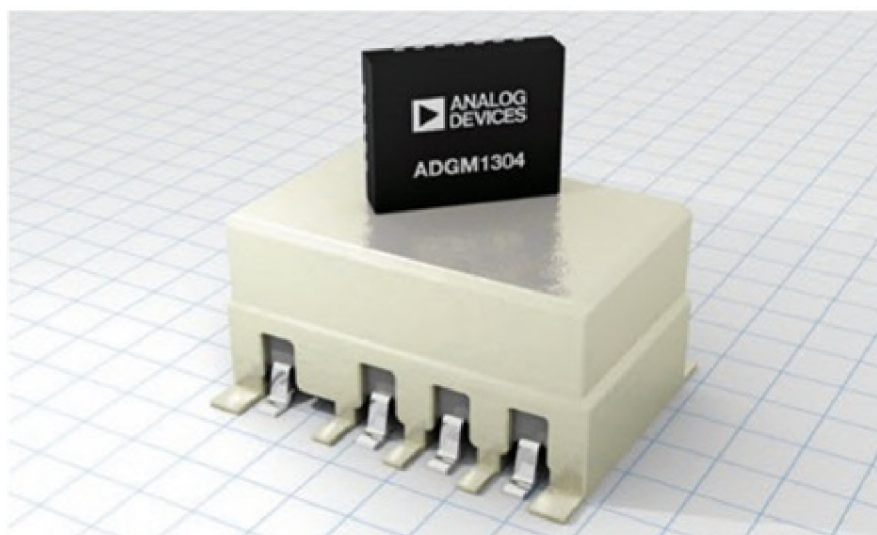
DSA jsou vnitřně složeny z kaskády útlumových sub-článků (*pads*) s fixním útlumem a digitální řízení je buď zařadí nebo vyřadí z cesty signálu. Z toho vyplývá potřeba přepínání článku, kterou lze naplnit různými způsoby. Nejpřímochařejší řešení je takzvaná *Through Line* konfigurace, u které se před a za článek zařadí Single Pole Double Throw (SPDT) přepínač, který přepíná mezi volnou a utlumující cestou. Sofistikovanější řešení spočívá v integraci tranzistorů typů FET, HEMT (High-Electron-Mobility Transistor), nebo CMOS přímo do článku. Toto řešení se používá převážně u atenuátorů, které jsou navrženy a vyrobeny jako integrovaný obvod. Návrh takových integrovaných obvodů je komplikovaný a mimo rozsah této práce.

#### Polovodičové přepínače

Základní přepínač lze vytvořit z několika tranzistorů, většinou typu FET. Tento typ můžeme najít pod označením analogové přepínače, případně spínače. Analogové proto, že řízení součástky se provádí přivedením napětí na kontrolní pin. VF přepínače lze rovněž realizovat použitím PIN diod. Speciální vlastnosti PIN diod v oblasti vysokých frekvencí umožňují vložení PIN diody do cesty signálu. Stejnoseměrným napětím přiváděným na diodu dochází buď k propustné nebo závěrné polarizaci diody. Výhodou takovýchto přepínačů je velká rychlost přepínání a spolehlivost [1].

#### Elektromechanické přepínače

Jedním z nejstarších druhů přepínačů je elektromagnetické relé, které funguje na jednoduchém principu. Procházející proud cívkou vytváří magnetické pole a to přitáhne kovádlinku na kontakt, kterým následně začne procházet elektrický proud. Tento princip zajišťuje galvanické oddělení řídicího a řízeného obvodu. Jejich nevýhodou je poměrně dlouhá doba přepnutí, nicméně speciální VF relé tento problém částečně odstraňují. Další nevýhody jako velikost, hmotnost a vysoká spotřeba ovšem zůstávají. Moderním řešením jsou součástky na bázi MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems), tedy mikroskopické mechanicko-elektrické součástky. Tyto součástky mají výhody v jejich malých rozměrech a nízké spotřebě proudu. Nevýhodou zůstává poměrně vysoká pořizovací cena [1].



Obr. 1.8: Propagační materiál zobrazující hlavní přednost MEMS přepínačů – velikost (převzato z [9])

### 1.3.2 Mikrokontroléry

Mikrokontrolér je integrovaný obvod, který se chová jako malý počítač. Obsahuje mikroprocesor, paměť a vstupně výstupní (I/O) linky. Jsou navrženy pro použití v jednoúčelových *embedded* (v české literatuře se používá pojem *vestavěné*) zařízeních jako jsou bankomaty, samoobslužné terminály, domácí spotřebiče, počítačové periferie, řídicí jednotky, automatické ovládací systémy apod [10].

Architektury mikrokontrolérů se v základu dělí na dva druhy: Harvardskou a Von Neumannovu. Harvardská architektura využívá oddělené datové linky pro program (instrukce) a data na vnitřní sběrnici, Von Neumannova využívá stejné linky pro obojí. Oddělené datové linky zmenšují úzké hrdlo, které plyne z toho, že procesor je významně rychlejší než je doba přístupu do paměti. Tím, že procesor může přistupovat k datům a programu zároveň, toto omezení částečně obejde.

### 1.3.3 Rodina AVR

AVR (název pochází ze jmen strůjců této architektury – Alf and Vegard's RISC processor) je rozsáhlá rodina převážně 8-bitových (vyjma 32-bitových AVR32) mikrokontrolérů vyráběná firmou Microchip, dříve Atmel. Dosáhla velké popularity díky použití ve vývojové platformě Arduino. AVR využívá upravenou Harvardskou architekturu typu RISC, tedy počítač s redukovanou instrukční sadou. Zpravidla obsahují programovou paměť v řádu jednotek až desítek kilobajtů a operační paměť v jednotkách kilobajtů, někdy i nevolatilní paměť EEPROM do jednoho kilobajtu.

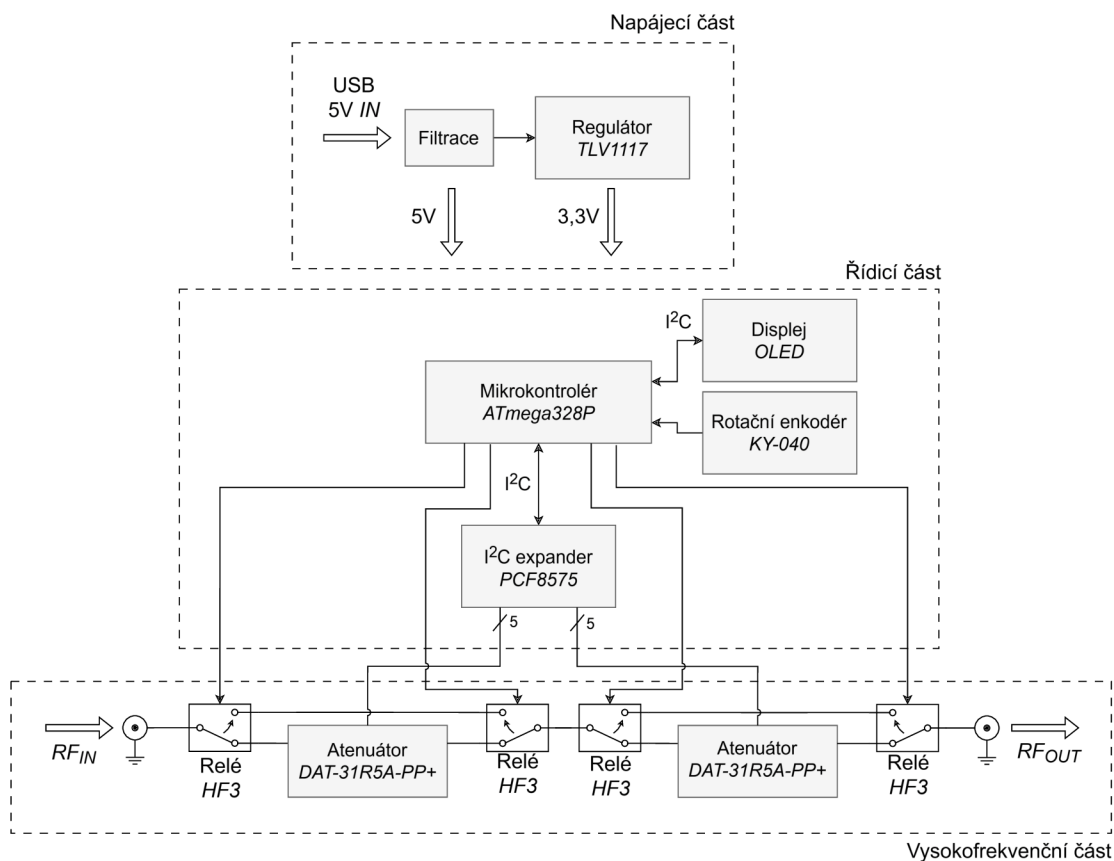
Podle produktové řady můžeme uvnitř najít: ADC převodníky, komparátory, teplotní senzory, generátory pulzně šířkové modulace (PWM), 8 nebo 16-bitové časovače, rozhraní SPI, I<sup>2</sup>C a další funkcionality [12].

Základní řady AVR jsou *ATtiny*, *ATmega*, *ATxmega* a nejnověji i *AVR-DA*, *AVR-DB*, *AVR-DD* a *AVR-EA* [11]. Skutečné portfolio produktů je ale ještě rozmanitější, ovšem není účelem této práce jej zde popisovat. V případě řad *ATtiny* a *ATmega* se název řídí následujícím pravidlem: první číslo odpovídající nejvyšší mocnině 2 za označením řady značí velikost programové paměti flash v kilobajtech, např. mikrokontrolér *ATmega328P* má tedy k dispozici 32 kB místa pro program [13].

## 2 Návrh a popis koncepce

Snahou je, aby atenuátor byl poměrně kompaktní a na ovládání jednoduché zařízení. Z funkčního (uživatelského) hlediska zahrnuje dva porty pro vstup a výstup VF signálu, ovládací rozhraní a konektor pro napájení.

### 2.1 Základní rozdělení



Obr. 2.1: Blokové schéma atenuátoru

Navržený programovatelný atenuátor se skládá ze tří základních částí:

- Vysokofrekvenční (VF) část
- Řídicí část a
- Napájecí část.

VF část zahrnuje integrované obvody atenuátoru, prepínací relé, VF konektory a kondenzátor pro blokování DC složky signálu. Úkolem této části je zpracování RF signálu ze vstupu, jeho zeslabení a převedení na výstup.

Řídicí část je zodpovědná za změnu útlumu podle povelu uživatele. Jádrem této části je mikrokontrolér, který obstarává vstupní (rotační enkodér) a výstupní (displej) prvky uživatelského rozhraní. Dále obsahuje pomocné obvody pro zpracování signálů a řízení relé a atenuátorů.

Část napájecí zajišťuje zpracování, odrušení a konverzi napětí ze vstupního prvku. Převádí hladinu 5 V na 3,3 V, kterou vyžadují některé komponenty.

## 2.2 Zdůvodnění zvolené koncepce

Prvotní návrh používal místo integrovaných atenuátorů útlumové články typu  $\Pi$ , tvořené rezistory. Tyto články měly být odděleny RF SPDT přepínači na bázi GaAs. Mikrokontrolér by podobně jako ve výsledné koncepci řídil tyto přepínače a tím i celkový útlum obvodu. Kromě drobných zádrhelů při návrhu DPS se jako nepřekonatelný problém ukázal být vložený útlum přepínačů. Sám o sobě má přepínač útlum v přijatelných mezích, ale při jejich zařazení do série se naakumuluje a výsledkem byl celkový vložený útlum přesahující 5 dB, což se jeví jako nevhodné. Alternativa v podobě nahrazení RF přepínačů vysokofrekvenčními relé by zase byla neekonomická a relé by neúměrně zvětšila rozměry zařízení. Z těchto důvodů bylo od této koncepce ustoupeno ve prospěch komerčně dostupných atenuátorů integrovaných na samostatném čipu.

U koncepce s čipovými atenuátory bylo zvažováno též použití Wilkinsonových děličů namísto relé. Tato varianta by byla jednak ekonomicky úspornější a také snazší na výrobu (osazení desky). Klíčovým problémem ovšem je, že Wilkinsonův dělič je úzkopásmový a nelze jej přizpůsobit na celé návrhové frekvenční pásmo atenuátoru. Použitím relé tento problém odpadá, jelikož nepoužitá cesta je plně vyřazena z trasy signálu a neovlivňuje tím jeho impedanční přizpůsobení.

## 2.3 Řídicí část

Řídicí část zodpovídá za vnitřní chod atenuátoru. Zpracovává povely od uživatele a podle nich mění útlum a rozlišení (krok). Dále řídí displej, na kterém zobrazuje informace o aktuálním nastavení. Sestává z těchto součástí:

- Displej zobrazující aktuální nastavení atenuátoru,
- Rotační enkodér s tlačítkem pro ovládání přístroje,
- Tlačítko pro potvrzení nastavení (nakonec nepoužito),
- I<sup>2</sup>C expander,
- Obvody pro potlačení zákmitů vstupních signálů,
- Pomocné obvody pro řízené relé a

- Mikrokontrolér obsluhující výše uvedené.

Uživatel ovládá přístroj přes rotační enkodér, otáčením po směru hodinových ručiček zvyšuje nastavený útlum, v opačném směru jej snižuje. Rotační enkodér lze stisknout pro změnu kroku nastavovaného pootočením. Uživatel je o zvoleném kroku a nastaveném útlumu informován na displeji.

Původně bylo pracováno s myšlenkou, že uživatel nejprve vybere požadovaný útlum a následně jej tlačítkem potvrdí a až tehdy se útlum nastaví. Z důvodu uživatelské přívětivosti bylo toto řešení nakonec vypuštěno a nastavení proběhne okamžitě po otočení enkodérem.

### 2.3.1 Požadavky na mikrokontrolér

Vzhledem k tomu, že mikrokontrolér nevykonává a ani se nepředpokládá vykonávání složitých matematických nebo jiných výpočetně náročných operací, nejsou na něj kladeny speciální požadavky. Měl by ale mít dostatek digitálních vstupně/výstupních portů pro zpracování signálů rotačního enkodéru a řízení relé, podporovat sběrnici I<sup>2</sup>C pro komunikaci s displejem a podporovat řízení pomocí přerušení. Na uváženou je výběr pouzdra, výhoda SMD pouzdra spočívá v menších rozměrech, nicméně obtížněji se s ním manipuluje při programování mikrokontroléru. Z tohoto důvodu bylo nakonec zvoleno THT pouzdro navíc osazené v patici, která umožňuje snadné vyjmutí mikrokontroléru bez nutnosti pájení.

### 2.3.2 Výběr mikrokontroléru

Po zhodnocení nabídky a cenové situace na trhu byl pro účely atenuátoru vybrán populární mikrokontrolér ATmega328P od výrobce Microchip z jeho typové řady AVR. Menší mikrokontroléry typů ATTiny mají buď nedostatečný počet portů, nebo jsou cenově srovnatelné s vyššími řadami. Mikrokontrolér ATmega328P bez problému splňuje požadavky stanovené v předchozí sekci.

### 2.3.3 Rotační enkodér

Jako ovládací prvek atenuátoru slouží rotační enkodér s tlačítkem. V práci byl využit modul rotačního enkodéru KY-040, jenž má enkodér osazený na samostatné DPS. Tato deska navíc obsahuje pull-up rezistory pro výstupní signály. Napájecí napětí je 5 V (viz např. [21]).

Výstupem enkodéru jsou celkem 3 signály CLK, DT a SW. Při otáčení osou enkodéru se spojují nebo rozpojují kontakty uvnitř enkodéru a tím se generují signály CLK a DT, které nabývají hodnot log. 0 (0 V) nebo 1 (napájecí napětí). Kontakty jsou umístěny vedle sebe po obvodu enkodéru a jeden signál vždy předchází druhý.



Tím lze určit směr rotace. Stisknutí osy rotačního enkodéru vytváří signál tlačítka, který je přiveden na pin SW.

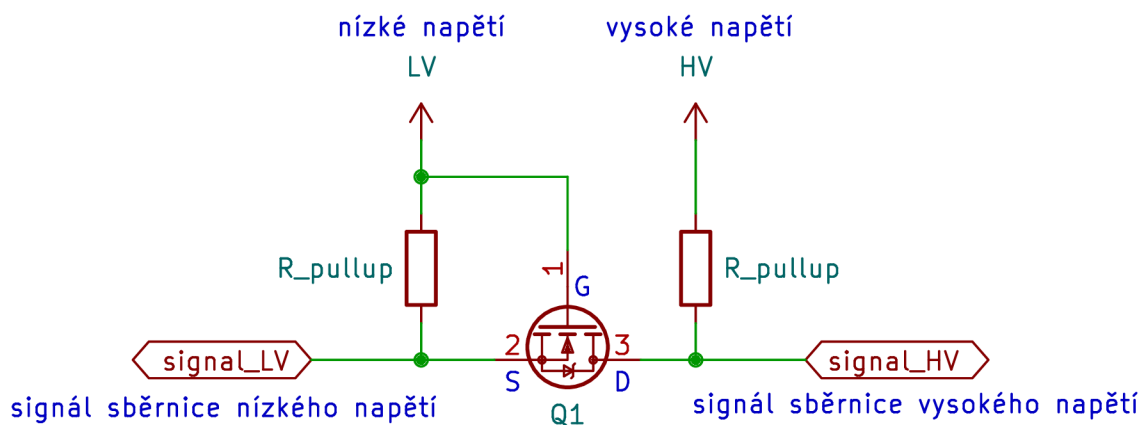
### 2.3.4 Displej

Zobrazení informací probíhá na grafickém displeji OLED s rozlišením 128x32 bodů. Obsahuje řadič SSD1306, který je integrován v modulu displeje. Tím je umožněno řízení přes sběrnici I<sup>2</sup>C. Jeho pracovní napětí je 3-5 V (viz např. [22]).

### 2.3.5 Další komponenty

Z důvodu potřeby nadstandardního počtu řídicích signálů byl obvod rozšířen o expander PCF8575 od výrobce Texas Instruments [14]. Tento rozšiřující modul komunikuje přes sběrnici I<sup>2</sup>C a může používat až 16 výstupních nebo vstupních portů.

Jelikož čip atenuátoru pracuje s napětím 3,3 V a mikrokontrolér je napájen 5 V, je nutný převodník logických úrovní I<sup>2</sup>C. Převodník funguje na jednoduchém principu s využitím jednoho N-kanálového MOSFETu, který je vřazen mezi část s nízkým a vysokým napětím. Nízké napětí je přivedeno na *Gate* MOSFETu, signál sběrnice nízkého napětí na *Source* a na *Drain* signál sběrnice s vysokým napětím. Signály sběrnice jsou přes pull-up rezistory připojeny na dané napájecí napětí. Pokud zařízení na nízkonapěťové straně uzemní signál, napětí  $V_{gs}$  přesáhne prahovou hodnotu a MOSFET se otevře, čímž se logická nula propíše i na vysokonapěťovou stranu. V případě, že je uzemněn signál sběrnice vysokonapěťové části, začne vést integrovaná dioda MOSFETu, což způsobí zvýšení  $V_{gs}$  nad prahovou hodnotu a tranzistor se otevře. Při logické 1 na jedné straně je na druhé straně také logická 1 a MOSFET zůstává zavřený.



Obr. 2.2: Schéma převodníku úrovní signálu sběrnice

Pro potlačení nežádoucích zákmitů je za každým výstupním signálem rotačního enkodéru a tlačítka přítomen R-C člen se Schmittovým klopným obvodem. R-C

člen vyhlazuje zákmity tlačítka (nebo signálu enkodéru) a Schmittův klopný obvod přidává hysterezi. Toto řešení při volbě vhodné RC konstanty (v návrhu  $RC = 1$  ms) spolehlivě zamezí chybným detekcím změny logické úrovně.

Pomocný obvod pro řízení relé se skládá z tranzistoru, který je nutný z důvodu vysokého odběru cívky relé. Použit byl MOSFET BSS138 v SMD pouzdru SOT-23-3, který má i tak dostatečnou rezervu pro rozptylový výkon a maximální protékající proud. Kvůli omezení náběhového proudu je mezi mikrokontrolérem a *Gate* MOSFETu zařazen rezistor s hodnotou  $330\ \Omega$  a pro odčerpání náboje z hradla je mezi hradlem a zemí umístěn rezistor o hodnotě  $15\ k\Omega$ .

### 2.3.6 Programování mikrokontroléru

Mikrokontrolér ATmega328P je řízen interním oscilátorem s frekvencí 8 MHz. Pro jeho správnou funkci je nutné nastavit tzv. *fuse bits*. Tyto speciální registry ovládají pokročilé funkcionality mikrokontroléru jako např. detekci příliš nízkého napájecího napětí, chování paměti EEPROM při vymazání paměti čipu nebo právě použitý typ oscilátoru.

V továrním nastavení je mikrokontrolér nastaven na použití interního 8 MHz oscilátoru, nicméně zároveň je aktivován bit registru, který dělí frekvenci 8, tedy výsledná frekvence je 1 MHz. Pro dosažení plně maximální frekvence je nutné změnit bit CKDIV8, který se nachází v registru *Fuse Low Byte* na pozici 7 (tedy MSB), na hodnotu 1. Výsledná hodnota registru *Fuse Low Byte* je  $0x62$ , neboli  $0b1110\_0010$  (změněný bit zvýrazněn tučně).

Nevýhodou interního oscilátoru je kromě jeho nižší frekvence oproti externímu také jeho poměrně nízká přesnost tovární kalibrace. V případě použití asynchronní komunikace (např. UART – Universal asynchronous receiver-transmitter) by tato odchylka mohla způsobit chyby v přenosu, pro sběrnici I<sup>2</sup>C to ale nepředstavuje problém.

### 2.3.7 Popis programu mikrokontroléru

Program mikrokontroléru zpracovává signály z rotačního enkodéru pomocí přerušování. Pokud zaregistruje sestupnou hranu signálu CLK, tak podle okamžité hodnoty signálu DT přičte nebo odečte *krok* od hodnoty nastaveného útlumu. Krok může být nastaven na hodnotu buď 0,5 nebo 10 dB. Tlačítkem enkodéru, které je připojeno na signál SW, se přepíná krok atenuátoru. Signál SW je zpracováván pomocí přerušování aktivovaného změnou úrovně na příslušném pinu.

Relé jsou řízena změnou logické úrovně GPIO (General-purpose input/output) portů, nastavených jako výstup. Změna útlumu čipových atenuátorů probíhá ne-

přímo nastavením expanderu přes I<sup>2</sup>C<sup>1</sup> sběrnici odesláním tří bajtů s definovaným obsahem. Prvních 7 bitů prvního bajtu obsahuje pevnou adresu expanderu, poslední bit řídí zápis nebo čtení z jeho portů. V případě zápisu odešle mikrokontrolér další dva bajty obsahující žádané nastavení výstupů. V případě čtení odešle tyto dva bajty expander. Bajty reprezentují zapisované/čtené hodnoty logických úrovní na jeho portech.

V hlavní smyčce programu probíhá nastavení výstupů a aktualizace displeje. Aktualizace proběhne vždy, když přerušení přepíše hodnotu pomocné proměnné. Pro řízení displeje a pinů je využíváno knihoven třetích stran – je uvedeno v hlavičce souboru *main.c*, případně hlavičkových souborech jednotlivých knihoven. Detailnější popis činnosti programu se nachází v komentářích zdrojového kódu. Některé podstatné části kódu jsou prezentovány v příloze (B).

## 2.4 Vysokofrekvenční (VF) část

VF částí prochází signál, který je na výstupu v ideálním případě pouze utlumen (nedochází ke zkreslení) podle nastavené hodnoty. Skládá se z těchto částí:

- Čipové atenuátory,
- Vysokofrekvenční relé,
- Vstupní a výstupní konektory a
- VF cesta signálu na DPS.

### 2.4.1 Čipové atenuátory

Hlavní součástí vysokofrekvenční části jsou dva čipové<sup>2</sup> atenuátory DAT-31R5A-PP+ [15] od výrobce Mini-Circuits řazené v sérii. Tento atenuátor má paralelní řídicí rozhraní, což znamená, že na jeho piny jsou přivedeny logické úrovně napětí podle žádaného útlumu. Ovládacích pinů je celkem 6 a v případě jejich aktivace způsobí útlum o danou hodnotu. Tyto hodnoty jsou v mocninách dvou, od 0,5 ( $2^{-1}$ ) až po 16 ( $2^4$ ) dB. Maximální útlum jednoho atenuátoru tedy činí 31,5 dB. Aby bylo možné dosáhnout návrhového útlumu 40 dB, jsou použity dva tyto atenuátory, což vede k teoretickému maximálnímu útlumu 63 dB. Rozlišení čipového atenuátoru je 0,5 dB, je přizpůsoben na impedanci 50 Ω a jeho frekvenční rozsah je od 0 do 4 GHz. Svými parametry tedy plně vyhovuje zadání.

---

<sup>1</sup>Společnost Microchip používá identickou sběrnici pod označením TWI – Two Wire Interface, aby předešla konfliktům s ochrannými známkami souvisejícími s I<sup>2</sup>C. Pro přehlednost je v této práci používán pouze pojem I<sup>2</sup>C.

<sup>2</sup>Název „čipový atenuátor“ je v této práci používán k označení komerčního integrovaného obvodu atenuátoru, aby došlo k jeho odlišení od atenuátoru jako celku, který je předmětem této práce.

Doporučený maximální vstupní výkon čipového atenuátoru je 24 dBm pro frekvence nad 50 MHz, pro frekvence menší než 1 MHz je 8 dBm. Bod 0,2 dB komprese nastává při výkonu 24 dBm. Absolutní maximální vstupní výkon je 30 dBm. Tato mez nesmí být překročena, jinak dojde k poškození zařízení.

## 2.4.2 Vysokofrekvenční relé a konektory

Nevýhodou zmíněných atenuátorů je jejich vložný útlum (při nulovém nastavení), který může činit až 2,4 dB. Při spojení dvou atenuátorů by toto představovalo poměrně velký vložný útlum. Proto jsou použita přepínací vysokofrekvenční relé HF3 [16], která tento problém řeší tím, že vždy atenuátor zařadí nebo vyřadí z cesty signálu podle aktuálního útlumu. Vložný útlum relé je oproti atenuátoru minimální (výrobce uvádí 0,12 dB na kmitočtu 900 MHz).

Vstupní a výstupní konektory jsou typu BNC s impedancí 50  $\Omega$  a THT montáží do desky [17]. Maximální udávaný vložný útlum je 0,3 dB na kmitočtu 3 GHz. Pro blokování frekvencí nižších než 1 MHz je signál za vstupním konektorem oddělen keramickým SMD kondenzátorem s kapacitou 3 nF.

## 2.4.3 Návrh DPS

Nezanedbatelný podíl VF části představuje samotné propojení komponentů na DPS. Je nutné zajistit danou impedanci vedení, dodržovat obecná pravidla návrhu VF desek a zároveň brát ohled na vyrobitelnost desky a proveditelnost montáže.

Deska je čtyřvrstvá, se stackupem dle obrázku 2.3 od výrobce JLCPCB<sup>3</sup>. Návrh desky byl proveden v softwaru KiCad 8.0<sup>4</sup>. Vedení signálu je realizováno koplanárním mikropáskovým vlnovodem se zemnicí plochou. Na vrstvě L1 (horní) jsou vedeny VF signály a některé řídicí signály. VF signály jsou izolovány zemnicími prokvy. První vnitřní vrstva L2 obsahuje zemnicí plochu, která jednak umožňuje připojení součástek na společný potenciál a jednak vymezuje charakteristickou impedanci VF cesty. Druhá vnitřní vrstva L3 je využita k rozvodu napájení a spodní vrstva L4 obsahuje nízkorychlostní signály sběrnice I<sup>2</sup>C.

Rozměry desky činí 100 × 70 mm. V rozích se nachází montážní otvory pro šrouby M3. U pravého horního rohu (při pohledu šeshora) je napájecí USB-Type C konektor a v jeho blízkosti komponenty napájecí části. Horní okraj je osazen konektory JST-XH pro připojení rotačního enkodéru, displeje a potvrzovacího tlačítka (nakonec nepoužito). V horní polovině a na spodním okraji je umístěna řídicí část, rozdělená pruhem VF části uprostřed dolní poloviny. Na stranách VF části se nachází vstupní a výstupní BNC konektory VF signálu, vyčnívající z desky do boků.

---

<sup>3</sup><https://jlcpcb.com/>

<sup>4</sup><https://www.kicad.org/>

Layer	Material Type	Thickness	
Layer	Copper	0.035mm	
Prepreg	7628*1	0.2104mm	
inner Layer	Copper	0.0152mm	1.1mm (with copper core)
Core>	Core	1.065mm	
inner Layer	Copper	0.0152mm	
Prepreg	7628*1	0.2104mm	
Layer	Copper	0.035mm	

Obr. 2.3: Stackup – stavba vrstev DPS, převzato z [23]

Návrh upřednostňuje SMD součástky z důvodu úspory místa na desce a jednoduchosti návrhu. Veškeré rezistory a kondenzátory jsou v pouzdru 0603. Výjimkou je THT pouzdro mikrokontroléru, který je pro snadnější manipulaci osazen v patičce. Fotografie desky se nachází v příloze A této práce. Projektové soubory jsou k dispozici v samostatné příloze.

## 2.5 Napájecí část

Vstupním prvkem napájecí části je USB Type-C konektor, poskytující stejnosměrné napětí 5 V. Tento konektor má 24 pinů, ovšem většina z nich slouží pro datovou komunikaci, která zde není využita. Jsou tedy využity pouze piny napájení (VBUS, GND) a piny konfiguračního kanálu pro řízení napájení dle specifikace [18]. Přímo pro toto využití se vyrábí konektory s redukováným počtem kontaktů. Konkrétně konektor USB4125 od výrobce GCT (použitý v této práci) [19] využívá celkem 6 pinů: 2x VBUS a 2x GND spolu s CC1 a CC2. Kontakty CC (*Configuration Channel*) jsou připojeny přes 5,1 k $\Omega$  rezistor na zem.

Vstupní napětí 5 V je dále odrušeno pomocí feritové perly a filtračních kondenzátorů. Nachází se zde také lokální kondenzátor o kapacitě 4,7  $\mu$ F, sloužící pro vykrytí proudových špiček zařízení.

S využitím napěťového regulátoru TLV1117 [20] s fixním výstupním napětím je napětí 5 V konvertováno na 3,3 V. Opět je zde přítomen lokální kondenzátor s kapacitou 100  $\mu$ F.

### 2.5.1 Spotřeba zařízení

Spotřeba zařízení je nejvíce ovlivněna spotřebou cívek relé. V každém okamžiku jsou aktivní právě 2 relé, což při spotřebě jednoho relé 28 mA vychází na 56 mA. Mikrokontrolér mění svoji spotřebu podle aktuálního zařízení v řádu jednotek až nízkých

desítek miliampérů. OLED displej spotřebovává přibližně 10 mA. Další obvody které spotřebovávají energii jsou pull-up rezistory pro I<sup>2</sup>C sběrnici a rotační enkodér.

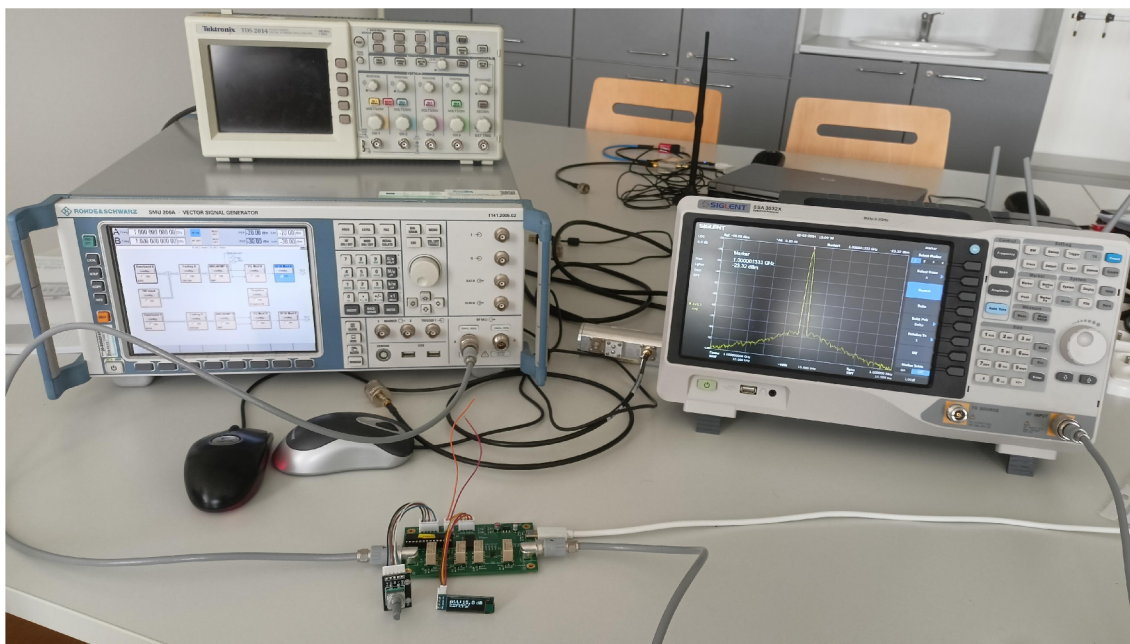
Celková naměřená spotřeba se pohybuje v rozmezí 70-80 mA podle zatížení mikrokontroléru.

## 3 Testování a výsledky měření

### 3.1 Testování

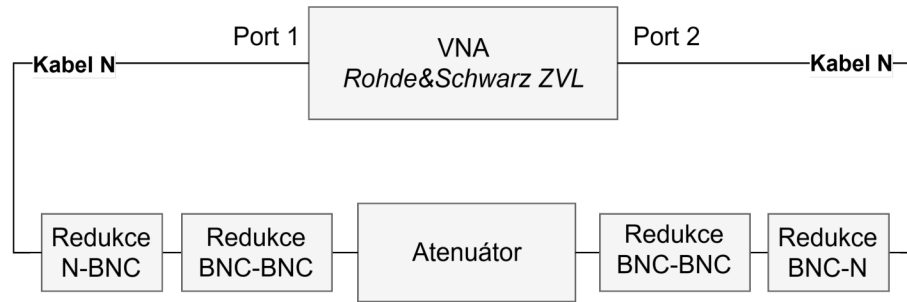
Základním cílem bylo zjistit, zda navržený atenuátor pracuje správně, tedy že skutečně zeslabuje signál podle zadaných hodnot a nevyskytují se nepředpokládané jevy. Podstatné bylo též zjistit, zda je atenuátor přizpůsoben na zadanou impedanci a nezanáší do signálu nežádoucí složky. Jedním z požadavků návrhu bylo též, aby atenuátor blokoval nízké frekvence, proto byla změřena frekvenční charakteristika útlumu v návrhovém pásmu kmitočtů (1-2500 MHz). Bylo také vhodné zjistit jestli, případně jak jsou parametry atenuátoru závislé na použitém kmitočtu. Maximální vstupní výkon nebyl nijak testován, byly respektovány údaje výrobce.

Pro testování útlumu byl využit spektrální analyzátor Siglent SSA 3032X a vektorový signálový generátor Rohde&Schwarz SMU 200A. Výstupem generátoru byl nemodulovaný harmonický signál o frekvencích v rozsahu 100 kHz až 3,2 GHz o výkonu -20 až -40 dBm. Komerční atenuátor, který sloužil k porovnání, byl model 50BR-104 od společnosti JFW, který lze manuálně nastavit až do 80 dB a pracuje v pásmu DC-2,7 GHz.



Obr. 3.1: Měřicí pracoviště pro měření útlumu

K určení S-parametrů v daném frekvenčním rozmezí byl využit vektorový síťový analyzátor Rohde&Schwarz ZVL a změřeny parametry odrazu  $S_{11}$  a přenosu  $S_{21}$ .

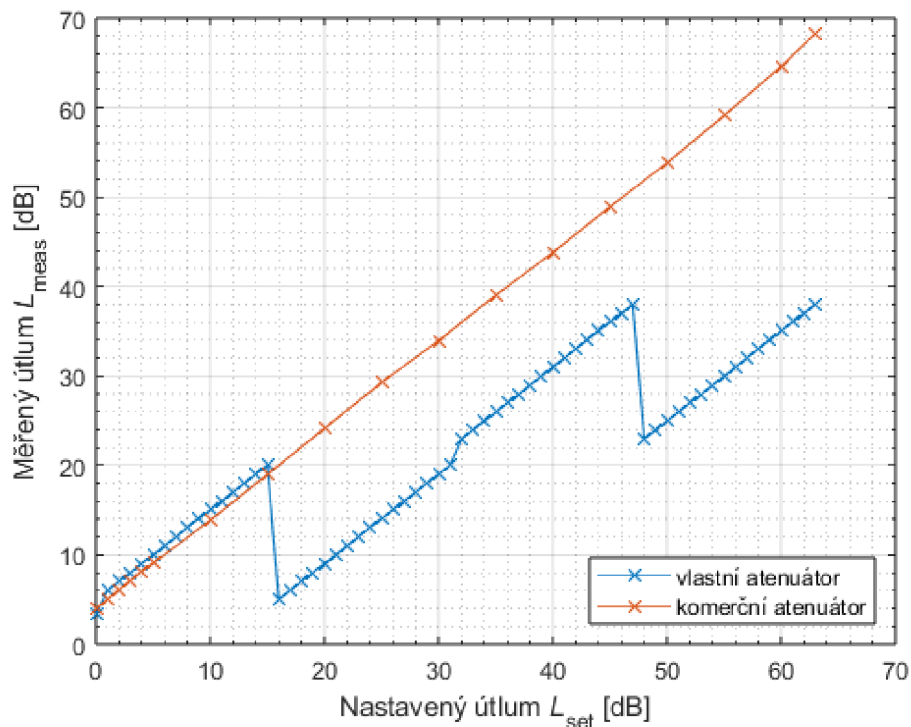


Obr. 3.2: Schéma zapojení měřicího pracoviště pro měření S-parametrů

## 3.2 Výsledky měření

### 3.2.1 Měření útlumu

V této sekci je vykreslena závislost dvou parametrů na nastavení atenuátoru. Parametry jsou měřený útlum a odchylka útlumu. Měřený útlum byl získán jako  $L_{meas} = P_{set} - P_{meas}$ , kde  $P_{set}$  je výkon nastavený na generátoru a  $P_{meas}$  změřený výkon. Odchylka útlumu se vypočítá jako  $\Delta_L = L_{meas} - L_{set}$ . Při kladných hodnotách odchylky tlumí atenuátor více než je nastavení, při záporných méně.



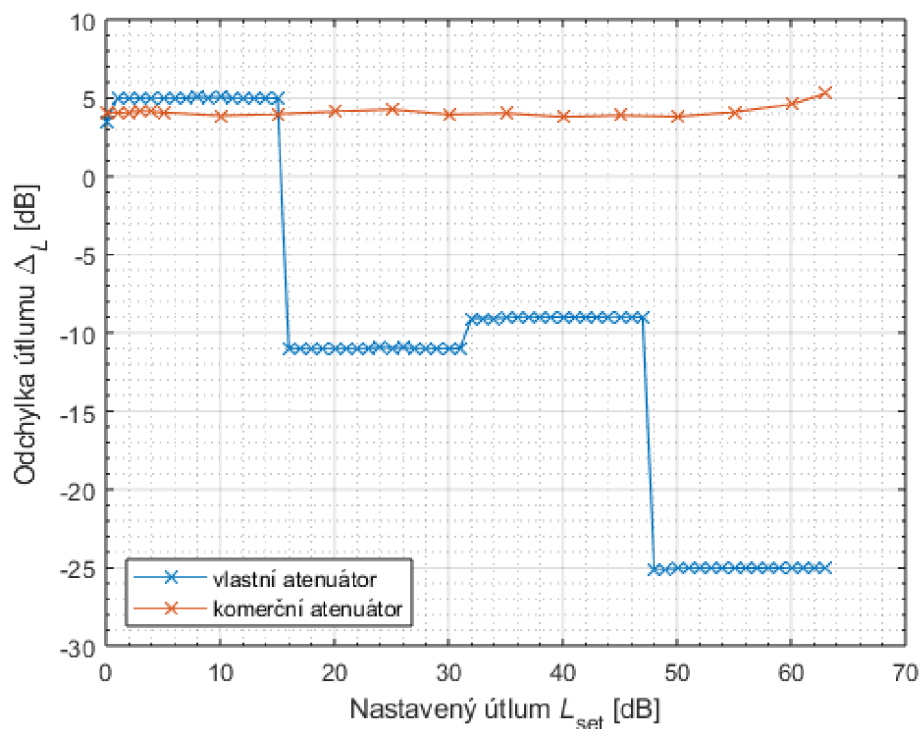
Obr. 3.3: Závislost útlumu na nastavené hodnotě a srovnání s komerčním atenuátorem na frekvenci 1000 MHz



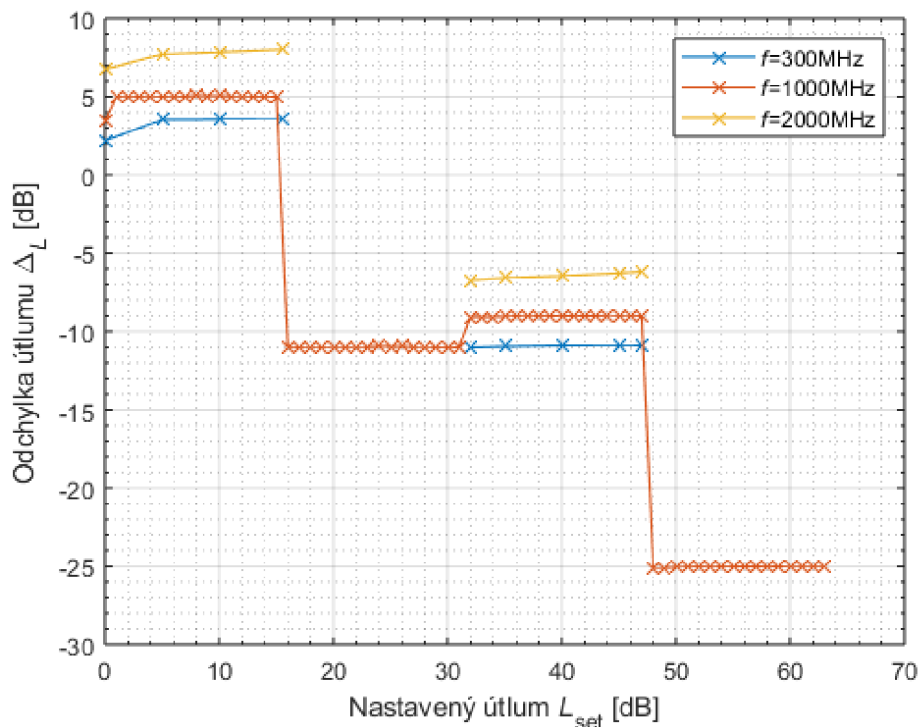
Obrázek 3.3 vykresluje závislost změřeného útlumu na nastavení atenuátoru. Pro porovnání byl identickou metodikou změřen i útlum atenuátoru 50BR-104 od firmy JFW. Až do nastavení 16 dB je útlum vyrobeného atenuátoru mírně vyšší než komerčního, jedná se ale o odchylku do 1 dB. Avšak při nulovém nastavení má vyrobený atenuátor o 0,5 dB nižší vložný útlum. Při zvýšení útlumu nad 16 dB útlum skokově klesne k 0 dB a dále roste až k 48 dB. Zde opět nastává skokové snížení útlumu.

To je zřetelnější na obrázku 3.4. Skoky v odchylce nastávají na hodnotách 1 dB, 16 dB, 32 dB a 48 dB. V úsecích mezi nimi je ale odchylka konstantní. Z rozdílu odchylky při 0 a 1 dB lze stanovit vložný útlum prvního čipového atenuátoru  $L_{0ATT1} = 1,56$  dB. Vložný útlum druhého atenuátoru stanovíme rozdílem odchylky při 31 a 32 dB a je roven  $L_{0ATT2} = 1,93$  dB.

Následující obrázek 3.5 porovnává odchylku pro více frekvencí. Pouze pro frekvenci lze pozorovat mírnou závislost na nastaveném útlumu. Atenuátor na této frekvenci tlumí více než je předpoklad.



Obr. 3.4: Závislost odchylky útlumu na nastavené hodnotě a srovnání s komerčním atenuátorem na frekvenci 1000 MHz



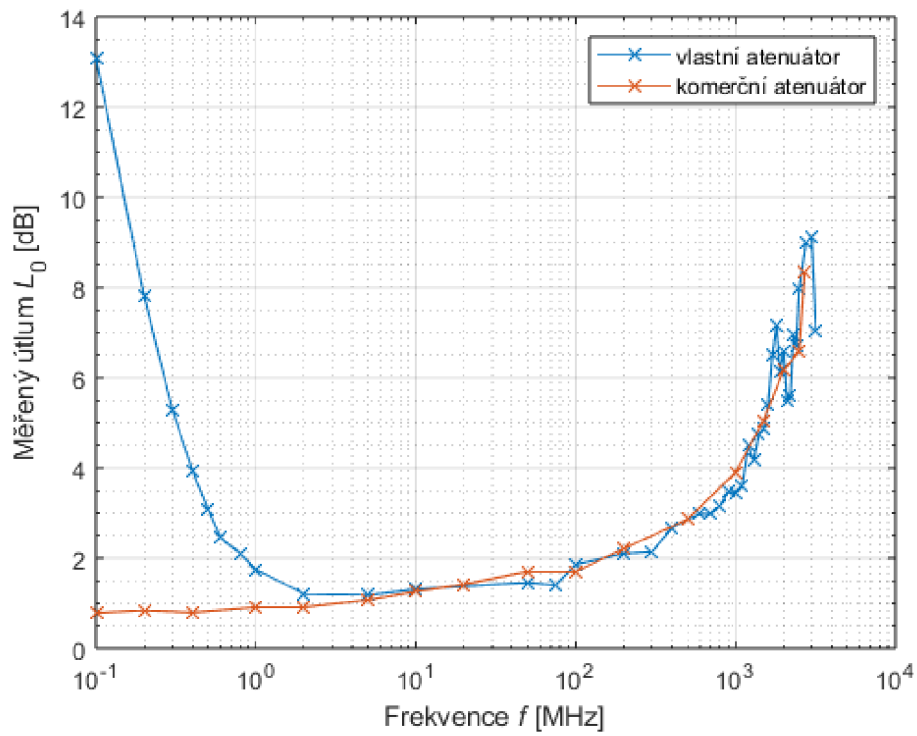
Obr. 3.5: Závislost odchylky útlumu na nastavené hodnotě pro různé frekvence

### 3.2.2 Měření frekvenční závislosti

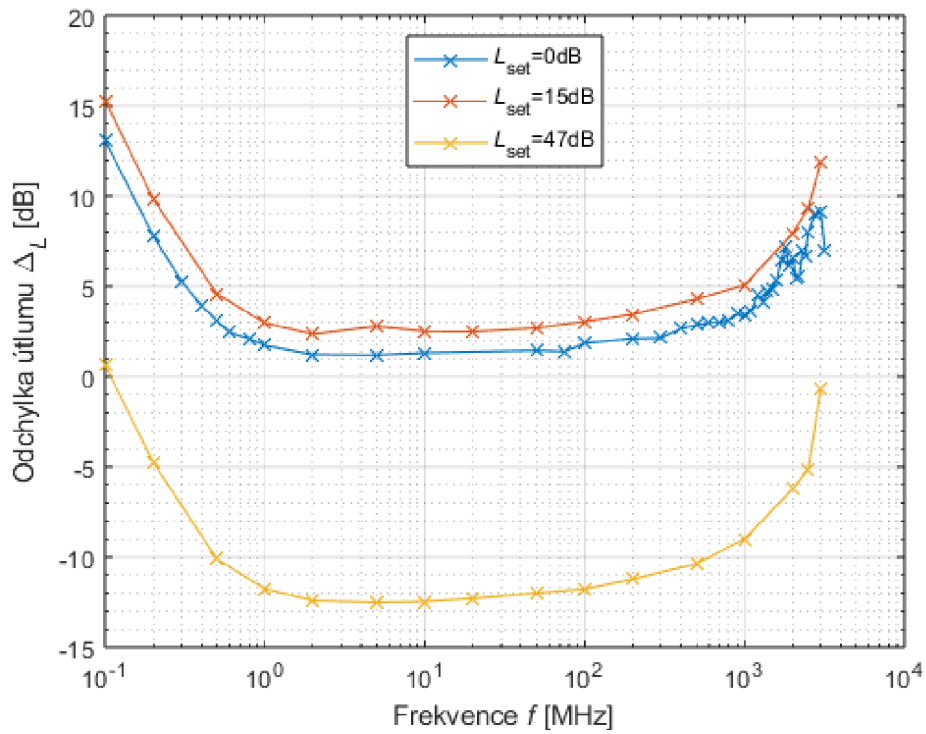
Tato sekce opět měří dříve definované parametry měřený útlum a odchylku útlumu. Nyní je vykreslena jejich závislost na frekvenci. Je použit stejný komerční atenuátor jako v předchozím bodě. Tento atenuátor má pracovní rozsah frekvencí DC-2,7 GHz.

Obrázek 3.6 zachycuje porovnání frekvenční charakteristiky vlastního a komerčního atenuátoru. Oba atenuátory byly nastaveny na hodnotu 0 dB. Je patrné, že na vyšších kmitočtech jsou jejich měřené útlumy velmi podobné. Z části je to způsobeno tím, že obě měření jsou zatížena neznámým faktorem v podobě redukce a kabelů BNC. Dá se předpokládat, že útlum těchto kabelů se zvyšuje s frekvencí.

Dle obrázku 3.7 má odchylka útlumu má stejnou charakteristiku pro různá nastavení útlumu. Pro nastavení 15 dB má odchylka větší hodnotu v celém rozsahu. Výrazně nižší odchylka je při nastavení 47 dB, což je způsobeno vadou pozorovanou v předchozí sekci. Tato vada je podrobněji diskutována v části 3.2.4.



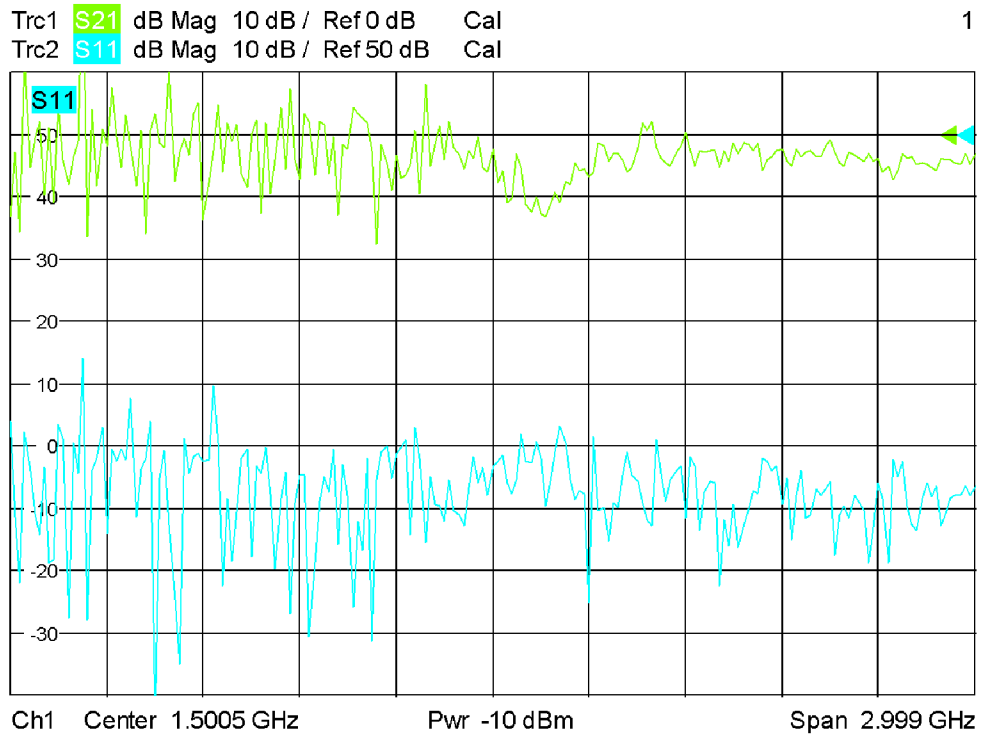
Obr. 3.6: Závislost útlumu na frekvenci a srovnání s komerčním atenuátorem při nulovém nastavení atenuátoru



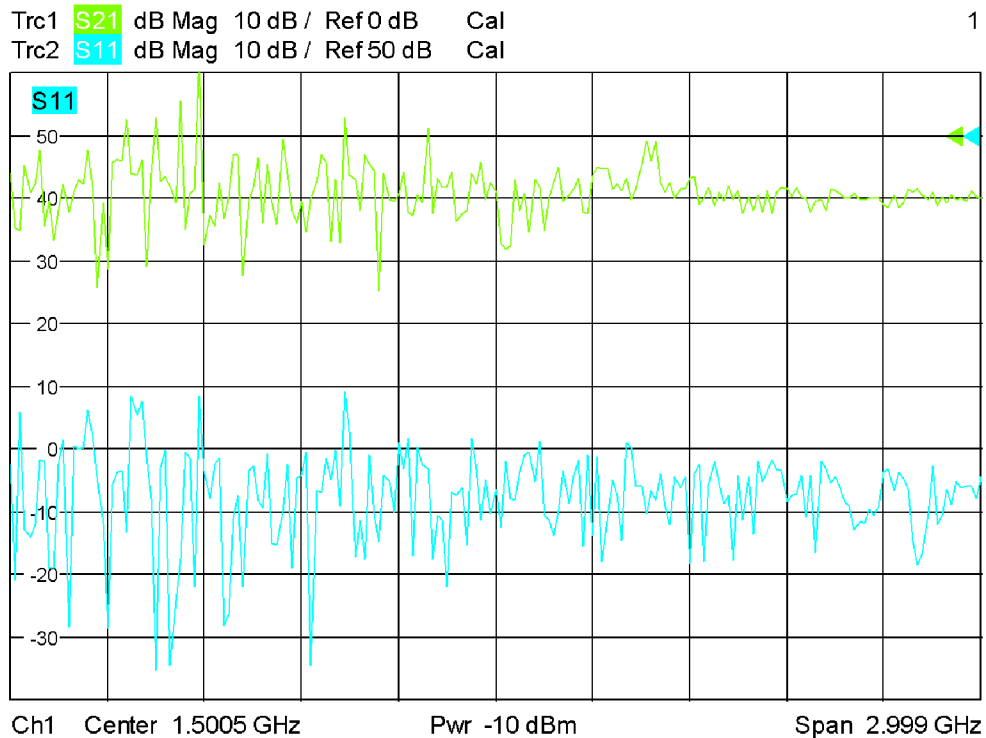
Obr. 3.7: Závislost odchylky útlumu na frekvenci pro různá nastavení útlumu

### 3.2.3 Měření S-parametrů

Vektorový síťový analyzátor byl použit k měření atenuátoru dle schématu. Použity byly redukce N-BNC a také BNC-BNC. VNA byl zkalibrován na konce kabelů N. Snímky obrazovky z měření pro nastavení 0 dB a 20 dB jsou na obrázcích 3.8, respektive 3.9. Diskuze výsledků se nachází v následující sekci 3.2.4.



Obr. 3.8: Parametry  $S_{11}$  a  $S_{21}$  pro nulové nastavení atenuátoru



Obr. 3.9: Parametry  $S_{11}$  a  $S_{21}$  pro nastavení 20 dB

### 3.2.4 Zhodnocení výsledků měření

Z naměřených hodnot lze konstatovat, že attenuátor nefunguje přesně podle očekávání. Z obrázku 3.3 je patrné, že nastává zlom při nastavení hodnot útlumu 16 a 47,5 dB a útlum se nečekaně sníží. Tyto hodnoty nejsou náhodné, jedná se o stav, kdy jeden nebo druhý čipový attenuátor zařadí svůj 16 dB článek. Při změně nastavení z 15,5 dB na 16 dB attenuátoru se logické hodnoty (vyjádřené binární reprezentací, kde „MSB“ odpovídá 16 dB článku a „LSB“ článku 0,5 dB) na vstupech attenuátoru mění z 0b01\_1111 na 0b10\_0000. Attenuátor neregistruje změnu „MSB“ a dále udržuje svůj 16 dB článek vyřazený. Konkrétní příčinu tohoto problému se i po důsledném měření jednotlivých součástek a spojů nepodařilo identifikovat.

Mimo tento problém je attenuátor v zásadě funkční a krokuje velmi přesně do hodnoty nastavení 15,5 dB. Změnou softwaru by šlo relativně jednoduše zařídit, aby se nepoužívaly nefungující 16 dB články, ale attenuátor by poté nedosáhl požadovaného útlumu 40 dB, ale pouze 32 dB.

Při analýze naměřených dat je nutné brát v potaz nezanedbatelný útlum kabelů a redukci N-BNC. V případě přímého propojení generátoru a spektrálního analyzátoru jedním kabelem činil tento útlum na frekvenci 1 GHz 2,4 dB. To je vidět i v porovnání s komerčním attenuátorem.

Na obrázku 3.4 lze také sledovat chování attenuátoru při hodnotách přepínání

relé. Při přechodu z nulového nastavení na 1 dB dojde ke skokovému nárůstu neodpovídajícímu zvolenému útlumu. Tento skok je očekávaný a je způsobem nenulovým vložným útlumem čipového atenuátoru. Stejná situace se opakuje při zařazení druhého čipového atenuátoru na hodnotě 32 dB. Bez přidaných relé by tento vložný útlum způsobil nežádoucí vysokou hodnotu i při nulovém nastavení. Konkrétně by se jednalo o celkový vložný útlum  $L_0 = L_{0ATT1} + L_{0ATT2} = 3,49$  dB, podle hodnot vypočítaných v sekci 3.2.1. Na druhou stranu by výsledná závislost útlumu na nastavení byla prakticky lineární. Jde tedy o kompromis mezi linearitou útlumu a minimalizací vložného útlumu.

Měření S-parametrů též nedopadlo dle předpokladů. Ideálně by měl být odraz na vstupu  $S_{11}$  co nejmenší a přenos  $S_{21}$  co nejvyšší. Výrobce udávaný  $S_{11}$  je menší než -18 dB. Především by ale měl být konstantní a ne takto chaotická. Jako velmi pravděpodobné vysvětlení se jeví nevhodná konfigurace a kalibrace měřicího pracoviště. Vektorový analyzátor má konektory typu N, atenuátor typu BNC. Pro připojení tedy muselo být využito vícero redukci, ale analyzátor byl zkalibrován jen na konec kabelu s koncovkou N. Vliv redukcí N-BNC tedy nebyl nijak eliminován. Z toho důvodu nelze brát výsledky měření S-parametrů za směrodatné. Nekonstantní charakteristika viditelná na obrázcích 3.8 a 3.9 vymizí až na vyšších kmitočtech, ale i tak zůstává  $S_{11}$  špatný. Pouze přenos  $S_{21}$  na těchto kmitočtech se zdá být v pořádku a přibližně odpovídá očekávanému útlumu - 5 dB při nulovém nastavení a 10 dB při nastavení 20 dB (z důvodu nefunkčního 16 dB článku tedy ve skutečnosti nastavení 4 dB + vložný útlum atenuátoru a redukcí).

### 3.2.5 Provozní parametry atenuátoru

Na základně použitých komponent a výsledků měření lze stanovit provozní parametry atenuátoru. Jsou přehledně uvedeny v tabulce 3.1.

Parametr	Hodnota	Poznámka
Nominální impedance	50 $\Omega$	-
Frekvenční rozsah	1-3000 MHz	-
Rozsah útlumu	0-32 dB	Závislost útlumu na nastavení není lineární v celém rozsahu
Nejmenší nastavitelný krok	0,5 dB	-
Maximální vstupní výkon	20 dBm	Při maximálním výkonu může dojít na kmitočtech nižších než 50 MHz k degradaci signálu
Napájecí napětí a konektor	5 V USB-C	-

Tab. 3.1: Provozní parametry atenuátoru

## Závěr

Cílem bakalářské práce byl návrh a zhotovení digitálně řízeného atenuátoru s nastavitelným útlumem v rozsahu 0-40 dB a krokem 1 dB. Atenuátor by měl být schopen pracovat v pásmu 1-2500 MHz s nominální impedancí 50  $\Omega$ .

V teoretické části práci byl podán přehled o způsobech realizace útlumu atenuátoru a rozebrány možnosti digitálního řízení. V návrhové části byly zváženy různé koncepce vnitřního fungování atenuátoru a diskutovány jejich výhody a nevýhody. Na základě zpětné vazby bylo vytvořeno jednoduché uživatelské rozhraní.

V experimentální části byla zvolena finální koncepce atenuátoru a tento návrh implementován na DPS. Realizovaný atenuátor využívá integrované obvody atenuátorů, které jsou navíc odděleny pomocí vysokofrekvenčních relé. Mikrokontrolér řídí útlum jednotlivých čipových atenuátorů, ovládá relé a zpracovává povely z uživatelského rozhraní. Navržená koncepce byla realizována, otestována a získané parametry porovnány s vlastnostmi komerčně dostupného atenuátoru. Na základě výsledků byly stanoveny provozní parametry vyrobeného atenuátoru, vypsané v tabulce 3.1.

Měřením bylo zjištěno, že atenuátor nepracuje zcela podle předpokladů a tlumí pouze do poloviny návrhového rozsahu. Příčina problému byla lokalizována, ale nepodařilo se ji ve stanoveném časovém rámci odstranit. Kromě této vady je ale atenuátor v zásadě funkční a jeho jiné parametry jsou srovnatelné nebo lepší v porovnání s komerční alternativou. Změnou softwaru by bylo možné uvedenou vadu odstranit s tím, že by návrhový rozsah byl poloviční. K tomuto řešení ale nakonec nebylo přistoupeno z důvodu neobjasněné příčiny problému a případnému nesplnění požadavku na minimální rozsah útlumu atenuátoru.



# Literatura

- [1] VÁGNER, Petr. *Vysokofrekvenční technika*. FEKT VUT v Brně, 2013. Elektronická skripta.
- [2] *Attenuator Archives*. Online. Electronics Tutorials. Dostupné z: <https://www.electronics-tutorials.ws/attenuators>. [cit. 2023-11-21].
- [3] PATYUCHENKO, Anton. *RF Demystified-What Is an RF Attenuator?* Online. Analog Devices. 2022. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/raqs/raq-issue-204.html>. [cit. 2023-11-21].
- [4] *How and Why to Use PIN Diodes for RF Switching*. Online. DigiKey. 2016. Dostupné z: <https://www.digikey.com/en/articles/how-and-why-to-use-pin-diodes-for-rf-switching>. [cit. 2023-12-10].
- [5] DOHERTY, W. E. a JOOS, R. D. *The PIN Diode Circuit Designers- Handbook*. Microsemi Corporation, 1998.
- [6] *A Wideband General Purpose PIN Diode Attenuator*. Online. SKYWORKS SOLUTIONS, INC. Skyworks. 2011. Dostupné z: <https://www.skyworksinc.com/-/media/SkyWorks/Documents/Products/1-100/200313B.pdf>. [cit. 2023-12-20].
- [7] MACOM INC. *MA4P7455-1225: Quad PIN Diode - Attenuator*. Rev. V2. Dostupné z: <https://cdn.macom.com/datasheets/MA4P7455-1225.pdf>. [cit. 2023-12-20]. Datasheet.
- [8] NXP B.V. *BAP70Q: Quad PIN diode attenuator*. Rev. 3. 2018. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/302/BAP70Q-1544398.pdf>. [cit. 2023-12-20]. Datasheet.
- [9] *The Fundamentals of Analog Devices- Revolutionary MEMS Switch Technology*. Online. Analog Devices. 2016. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/thought-leadership/fundamentals-adi-revolutionary-mems-switch-technology.html>. [cit. 2023-12-10].
- [10] MAZIDI, Muhammad Ali; NAIMI, Sarmad a NAIMI, Sepehr. *The AVR microcontroller and embedded systems: using Assembly and C*. Second edition. Micro-DigitalEd, 2017. ISBN 978-0997925968.

- [11] *8-bit AVR® MCUs*. Online. Microchip Technology. Dostupné z: <https://www.microchip.com/en-us/products/microcontrollers-and-microprocessors/8-bit-mcus/avr-mcus>. [cit. 2023-12-17].
- [12] *AVR Microcontrollers Peripheral Integration*. Online. Microchip Technology. 2022. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/MCU08/ProductDocuments/Brochures/AVR-Microcontrollers-Peripheral-Integration-30010135.pdf>. [cit. 2023-12-10].
- [13] *ATmega328P: 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash*. Online. Microchip Technology. 2015. Dostupné z: [https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P\\_Datasheet.pdf](https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf). [cit. 2023-12-10].
- [14] TEXAS INSTRUMENTS. *PCF8575 Remote16-BIT I2C AND SMBus I/O Expander with Interrupt Output*. 2020. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/pcf8575.pdf>. [cit. 2024-05-20]. Datasheet.
- [15] MINI CIRCUITS. *DAT-31R5A+ Series Digital Step Attenuator*. Online. Dostupné z: <https://www.minicircuits.com/pdfs/DAT-31R5A-PP+.pdf>. [cit. 2024-05-20]. Datasheet.
- [16] TE CONNECTIVITY. *HF3 Relay*. Online. Dostupné z: [https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Specification+Or+Standard%7F108-98000%7FS%7Fpdf%7FEnglish%7FENG\\_SS\\_108-98000\\_S.pdf%7FN-A](https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Specification+Or+Standard%7F108-98000%7FS%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_SS_108-98000_S.pdf%7FN-A). [cit. 2024-05-20]. Datasheet.
- [17] TE CONNECTIVITY. *BNC Connectors - RF Coax Connectors*. Online. Dostupné z: [https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Catalog+Section%7F1307191\\_BNC\\_Connectors%7F0218%7Fpdf%7FEnglish%7FENG\\_CS\\_1307191\\_BNC\\_Connectors\\_0218.pdf%7F5415025-2](https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Catalog+Section%7F1307191_BNC_Connectors%7F0218%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_CS_1307191_BNC_Connectors_0218.pdf%7F5415025-2). [cit. 2024-05-20]. Datasheet.
- [18] USB-IF. *USB Type-C® Cable and Connector Specification Release 2.3*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.usb.org/document-library/usb-type-cr-cable-and-connector-specification-release-23>. [cit. 2024-05-20].
- [19] GCT. *USB4125 - Type C USB Charging Connector*. Online. Dostupné z: <https://gct.co/connector/usb4125>. [cit. 2024-05-20].

- [20] TEXAS INSTRUMENTS. *TLV1117 Adjustable and Fixed Low-Dropout Voltage Regulator*. Online. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlv1117.pdf>. [cit. 2024-05-20]. Datasheet.
- [21] *KY-040 rotační enkodér s tlačítkem*. Online. HWKITCHEN. Dostupné z: <https://www.hwkitchen.cz/ky-040-rotacni-enkoder-s-tlacitkem/>. [cit. 2024-05-23].
- [22] *OLED displej 0.91"128x32, I2C, bílý*. Online. GM electronic. Dostupné z: <https://www.gme.cz/v/1509096/oled-displej-091-128x32-i2c-bily>. [cit. 2024-05-23].
- [23] *Controlled Impedance PCB Layer Stackup*. Online. JLCPCB. Dostupné z: <https://jlcpcb.com/impedance>. [cit. 2024-05-23].

## Seznam symbolů a zkratek

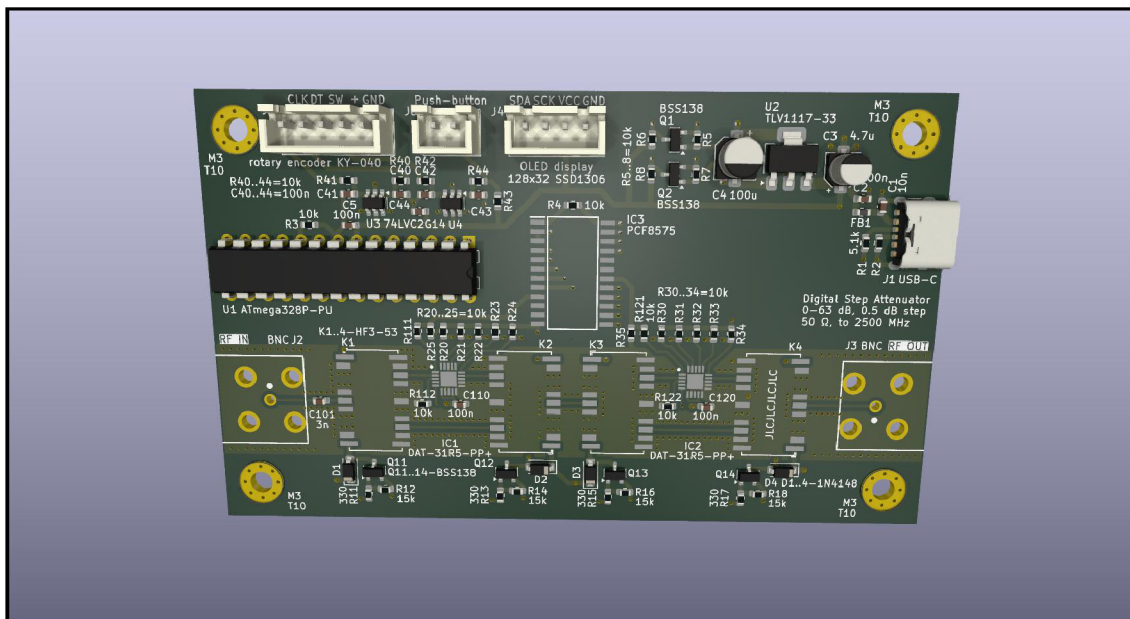
<b>ADC</b>	analogově-digitální převodník Analog-to-Digital Converter
<b>AGC</b>	automatická kontrola zisku Automatic Gain Control
<b>AVR</b>	RISC procesor Alfa a Vegarda Alf and Vegard's RISC processor
<b>CMOS</b>	doplňkový polovodič na bázi oxidu a kovu Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
<b>DPS</b>	Deska Plošných Spojů
<b>DSA</b>	digitální krokový atenuátor Digital Step Attenuator
<b>EEPROM</b>	elektronicky vymazatelná paměť pouze pro čtení Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
<b>FET</b>	tranzistor řízený elektrickým polem Field-Effect Transistor
<b>GPIO</b>	Univerzální vstupní/výstupní pin General-Purpose Input/Output
<b>HEMT</b>	tranzistor s vysokou pohyblivostí elektronů High-Electron-Mobility Transistor
<b>I2C</b>	sériová sběrnice Inter-Integrated Circuit
<b>LSB</b>	nejméně významný bit Least Significant Bit
<b>MEMS</b>	mikro elektro-mechanické systémy Micro Electro-Mechanical Systems
<b>MSB</b>	nejvýznamnější bit Most Significant Bit
<b>OLED</b>	organická elektroluminiscenční dioda Organic Light-Emitting Diode

<b>PSV</b>	Poměr Stojatých Vln
<b>PWM</b>	pulzně šířková modulace Pulse Width Modulation
<b>RF</b>	vysokofrekvenční Radio Frequency
<b>RISC</b>	procesor s redukovanou instrukční sadou Reduced Instruction Set Computer
<b>SPDT</b>	přepínač s jedním vstupem a dvěma výstupy Single Pole Double Throw
<b>SPI</b>	sériové periferní rozhraní Serial Peripheral Interface
<b>TWI</b>	dvoudrátové rozhraní Two Wire Interface
<b>UART</b>	univerzální asynchronní přijímač-vysílač Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
<b>VVA</b>	napětím řízený atenuátor Voltage Variable Attenuator

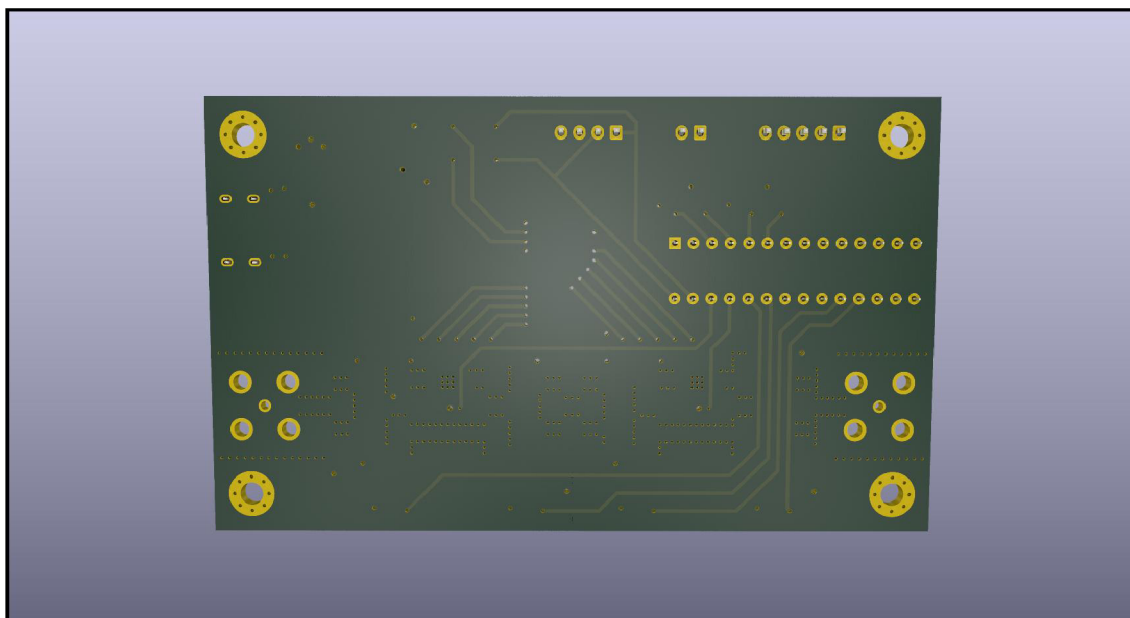
# Seznam příloh

<b>A Fotografie</b>	<b>47</b>
<b>B Software</b>	<b>49</b>
<b>C Návrh DPS</b>	<b>51</b>
C.1 Schéma zapojení . . . . .	51
C.2 Výrobní podklady pro DPS . . . . .	57
<b>D Obsah elektronické přílohy</b>	<b>60</b>

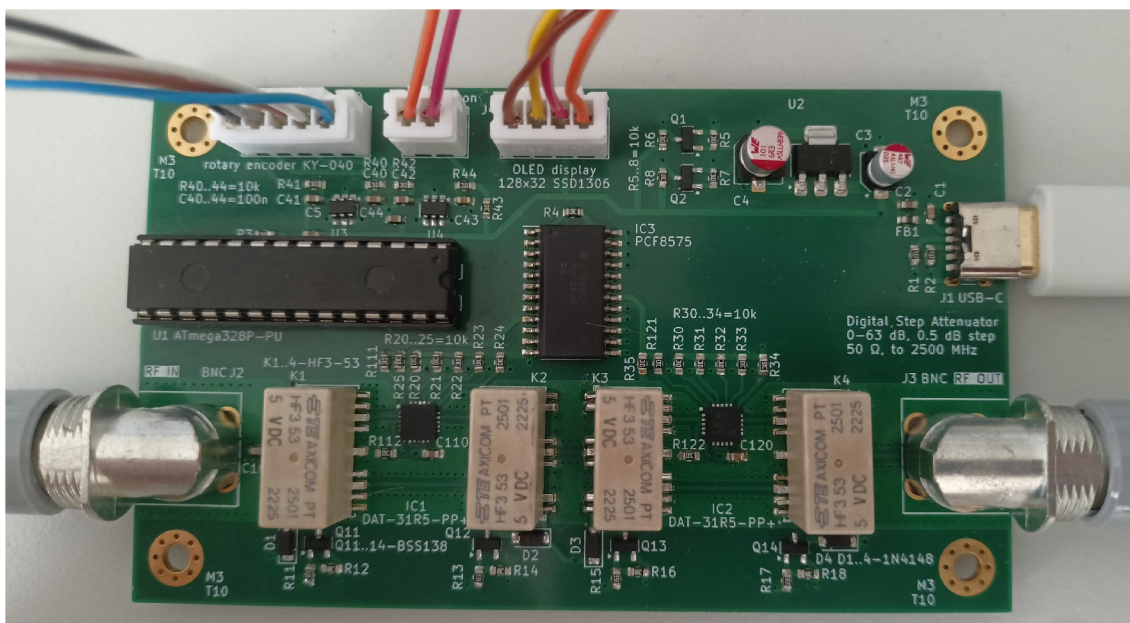
# A Fotografie



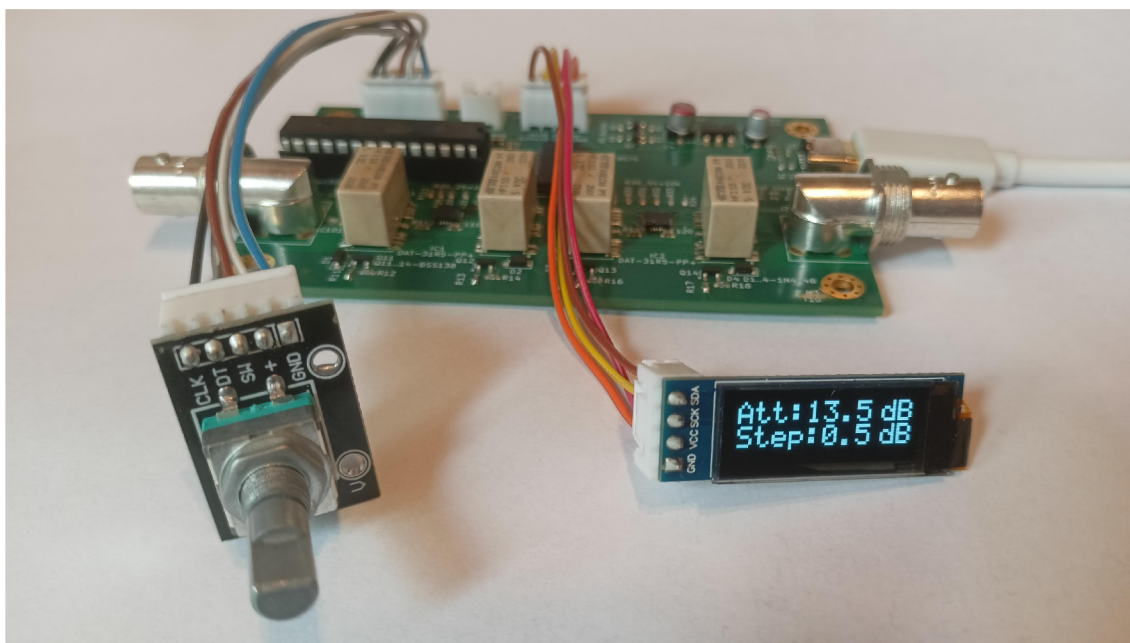
Obr. A.1: 3D render vrchní strany (některé součástky nemají k dispozici 3D model, proto nejsou vykresleny)



Obr. A.2: 3D render spodní strany



Obr. A.3: Foto finálního zařízení



Obr. A.4: Detail uživatelského rozhraní



## B Software

Výpis B.1: Hlavní smyčka programu

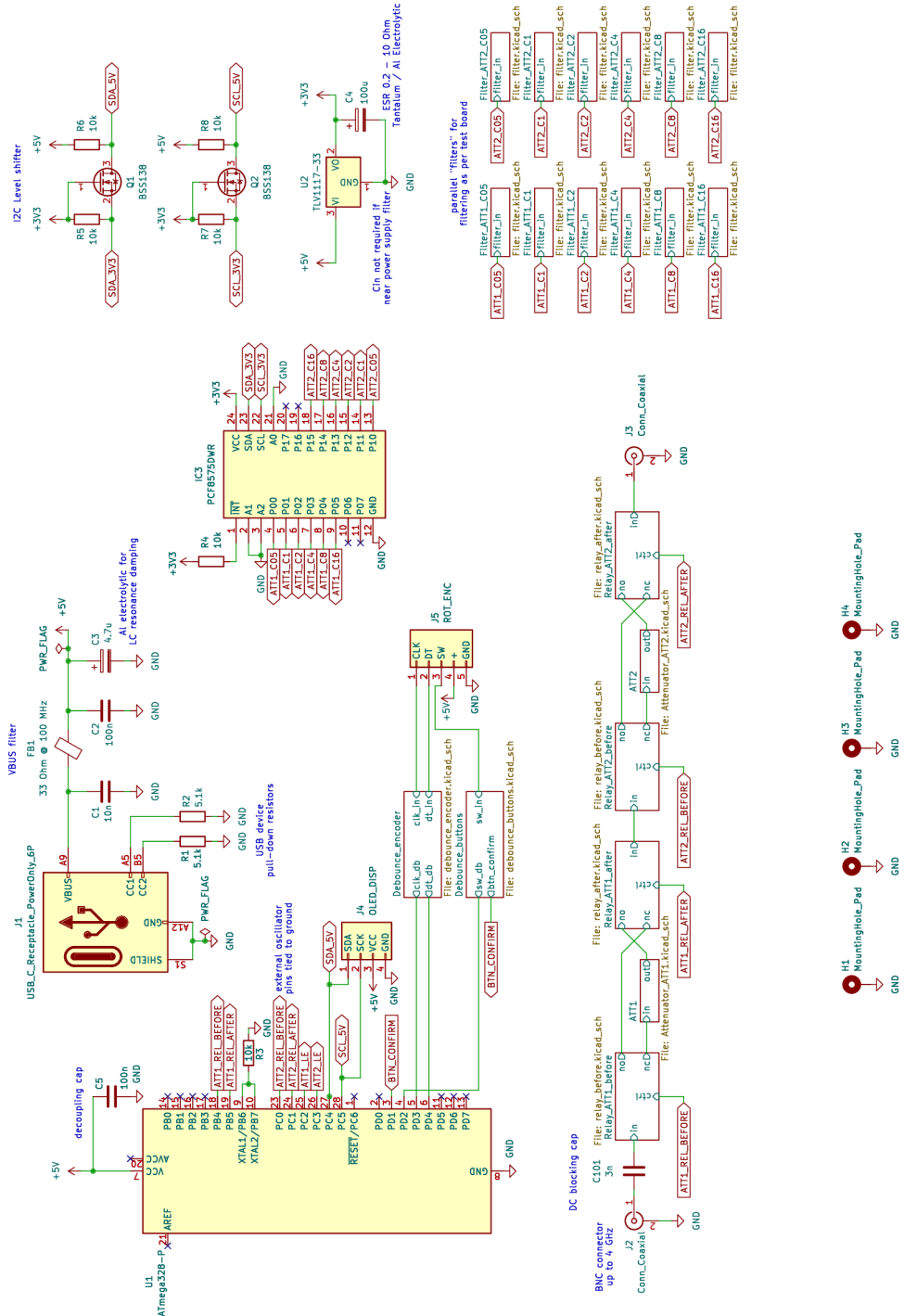
```
180 while(1) { // Main loop
181     if (displayChangeReady) { // Update display if control
        variable is changed to 1
182         updateDisplay();
183         displayChangeReady = 0;
184     }
185     if (outputChangeReady) { // Update output every if
        control variable is changed to 1
186         cli(); // Disable interrupts temporarily during I2C
        communication
187         updateOutput();
188         outputChangeReady = 0;
189         sei(); // Enable interrupts after I2C communication
190     }
191 }
```

## Výpis B.2: Přerušování detekující otočení enkodéru

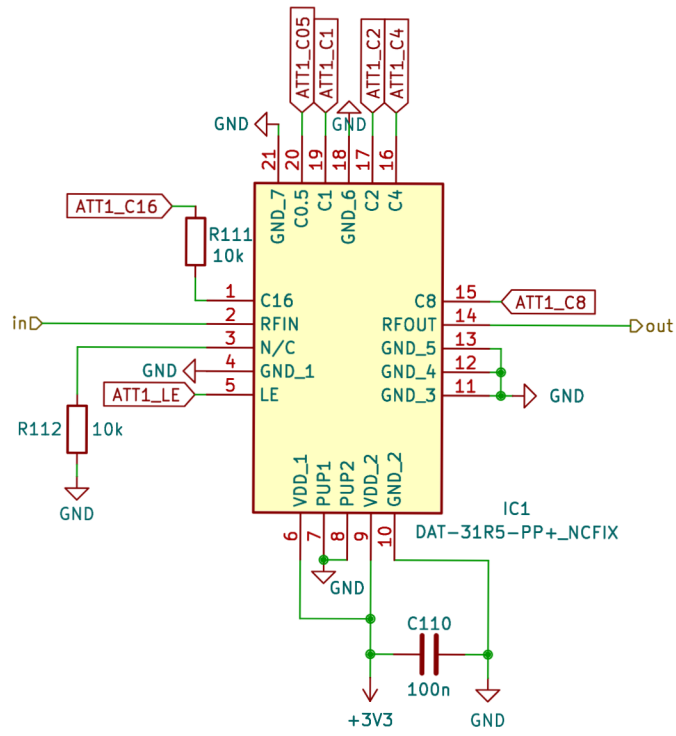
```
195 ISR(INT1_vect) { // INT1 interrupt on pin PD3...CLK
196     if (!(GPIO_read(&PIND, DT))) { // if DT is HIGH (when CLK
        is FALLING), it means the rotation is clockwise, +
        invert Schmitt trigger -> LOW + RISING
197         attenuation += step;
198     }
199     else { // if DT is LOW, it means the rotation is counter-
        clockwise, + invert Schmitt trigger -> HIGH
200         attenuation -= step;
201     }
202     if(attenuation > 190) { // Set maximum limit of attenuation
        to 63 (dB) (190 = 0b0011.1111 << 1 + 64)
203         attenuation = 190;
204     }
205     if(attenuation < 64) { // Set minimum limit of attenuation
        to 0 (dB)
206         attenuation = 64;
207     }
208     outputChangeReady = 1; // Update output when encoder is
        rotated
209 }
```

# C Návrh DPS

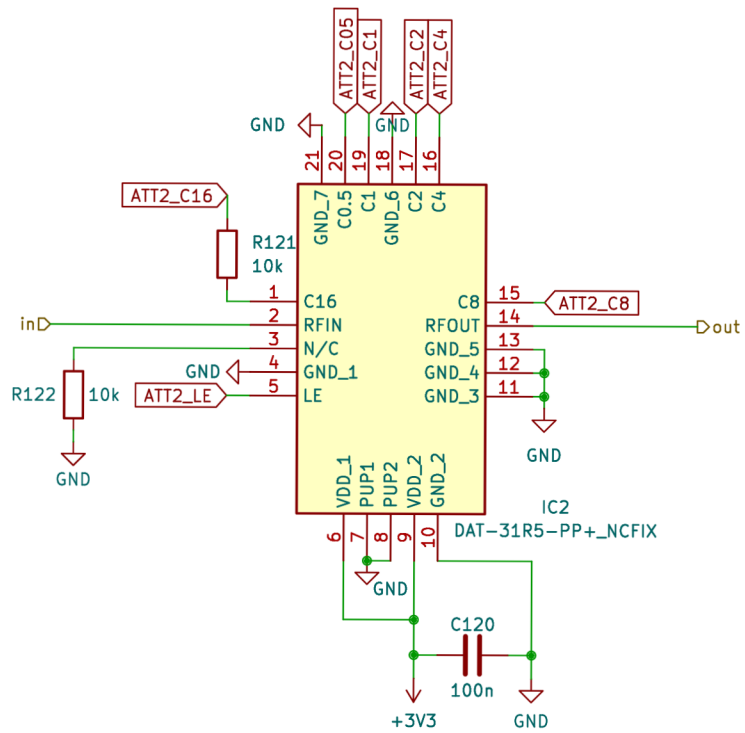
## C.1 Schéma zapojení



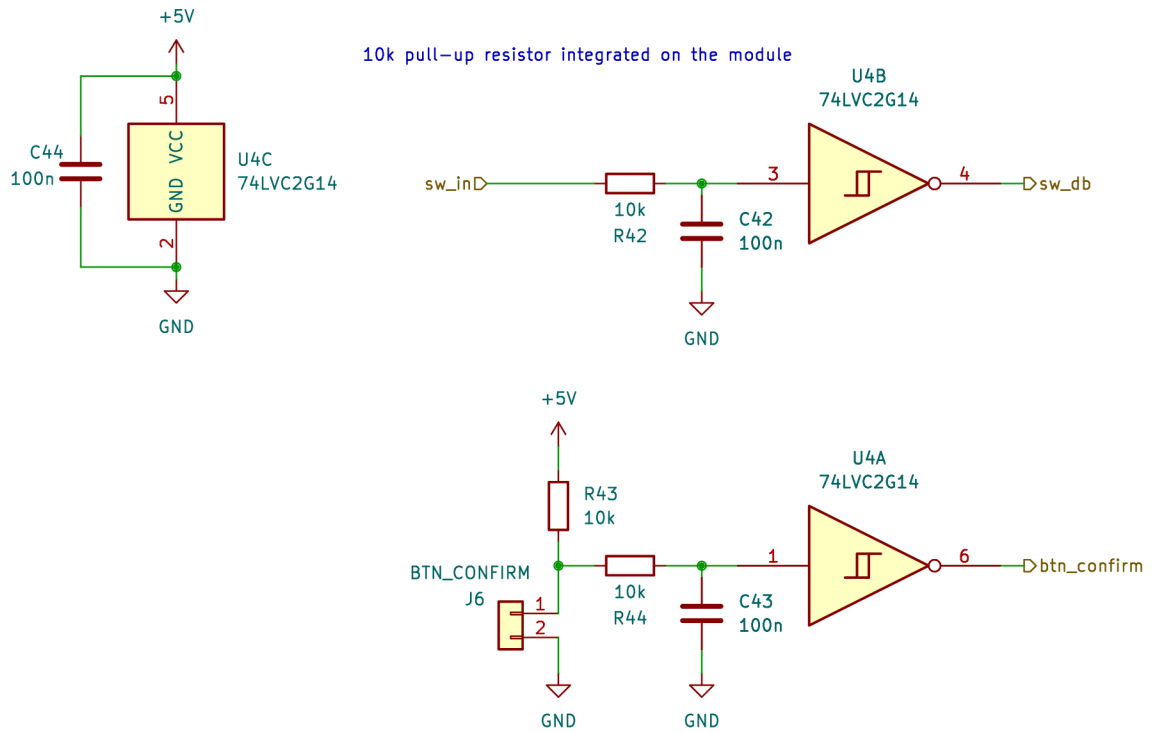
Obr. C.1: Hlavní schéma DPS



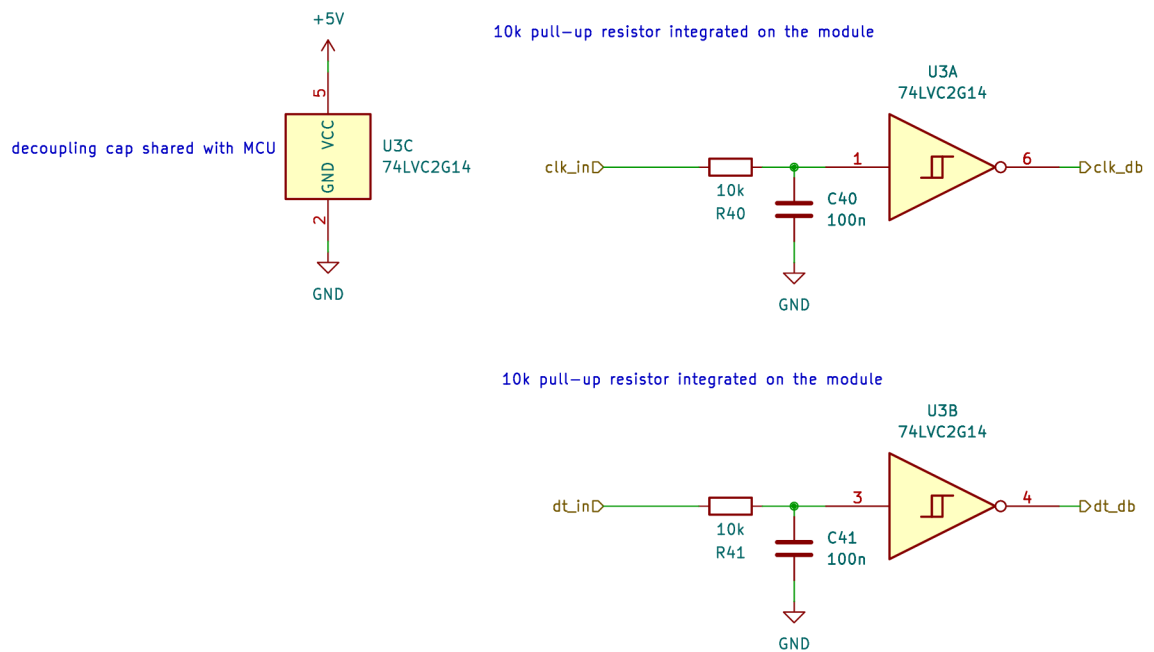
Obr. C.2: Dílčí část ATT1



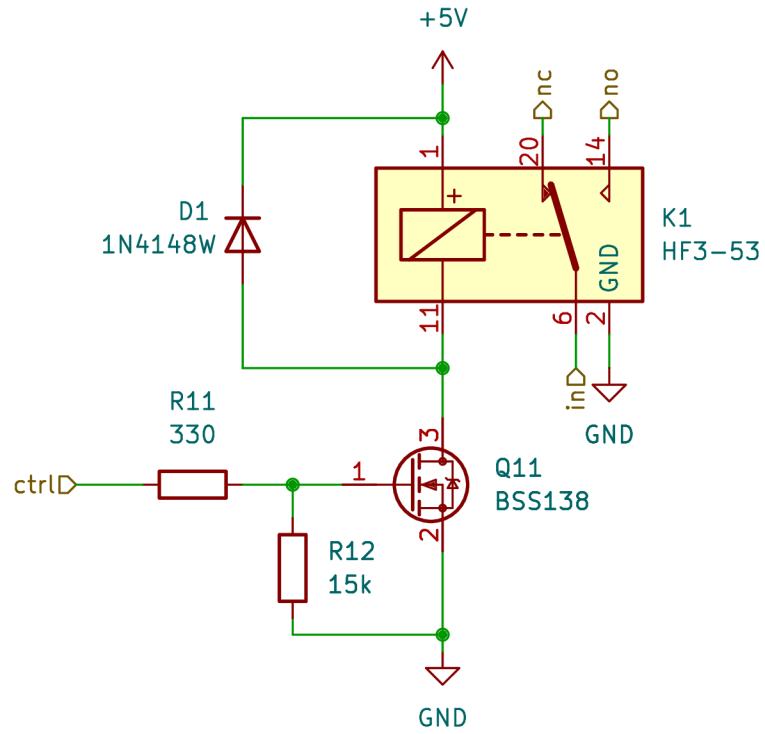
Obr. C.3: Dílčí část ATT2



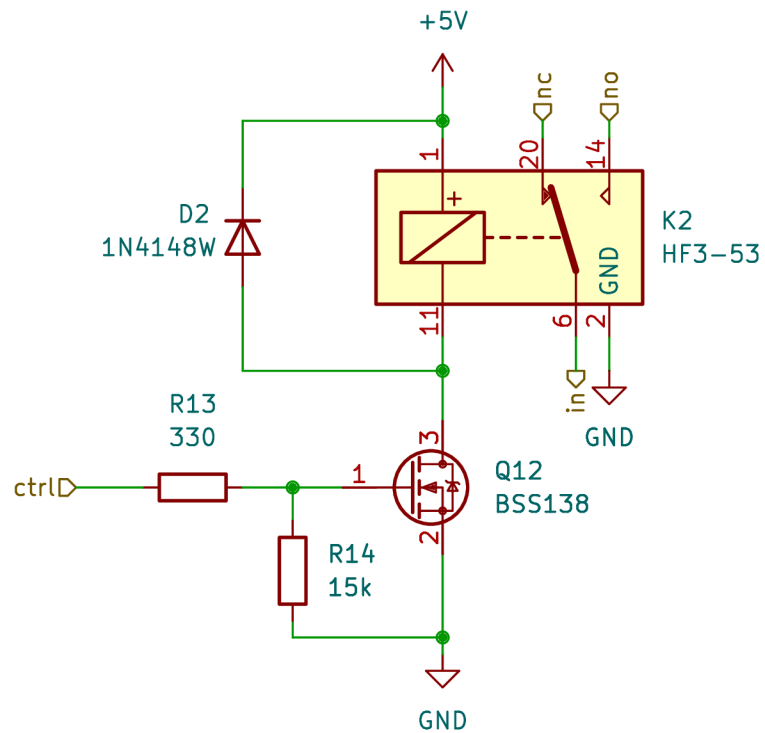
Obr. C.4: Dílčí část *Debounce\_buttons*



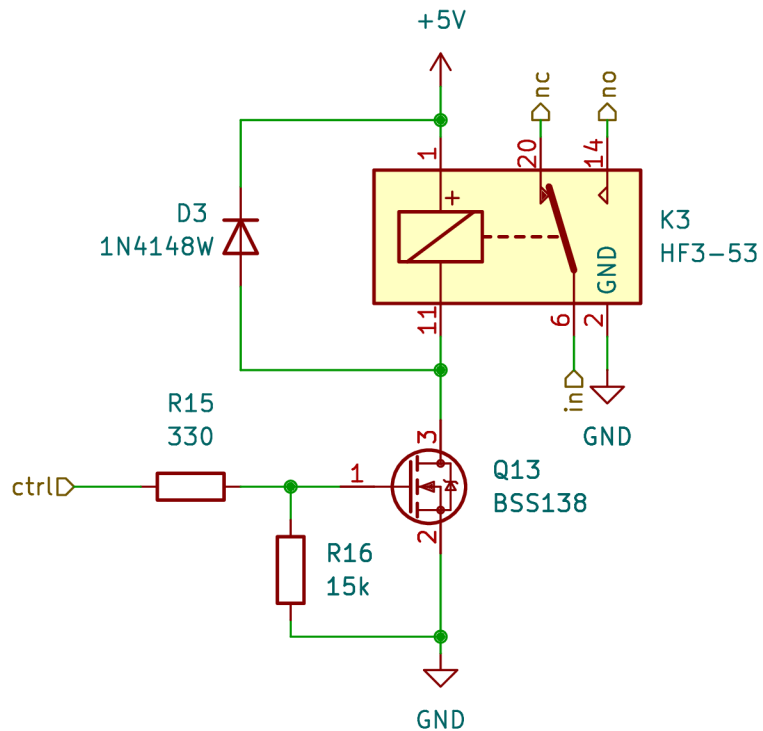
Obr. C.5: Dílčí část *Debounce\_encoder*



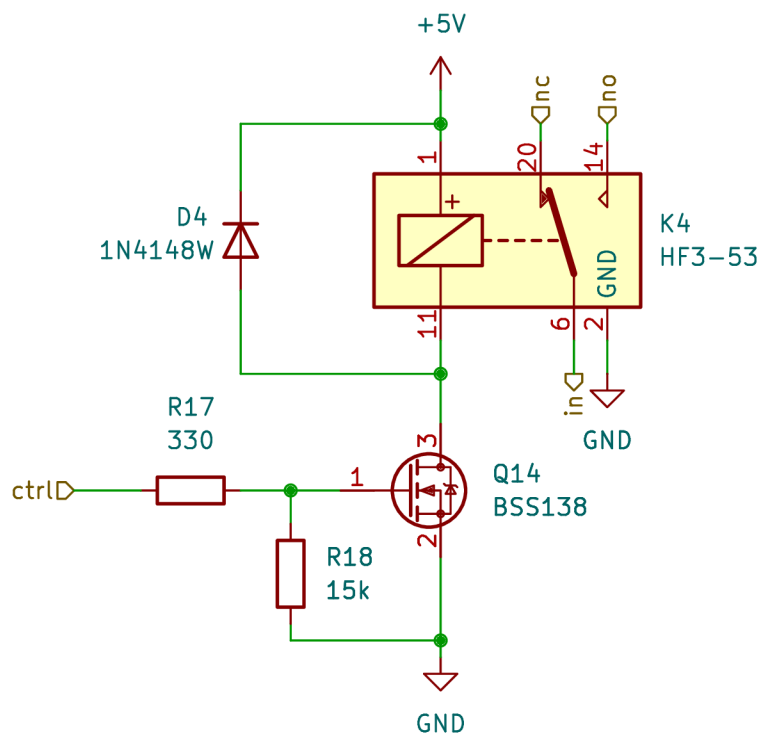
Obr. C.6: Dílčí část *Relay\_ATT1\_before*



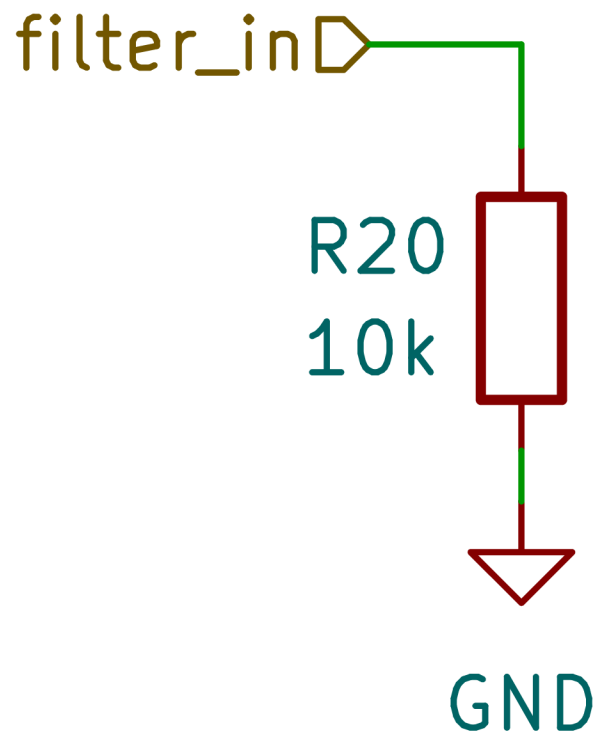
Obr. C.7: Dílčí část *Relay\_ATT1\_after*



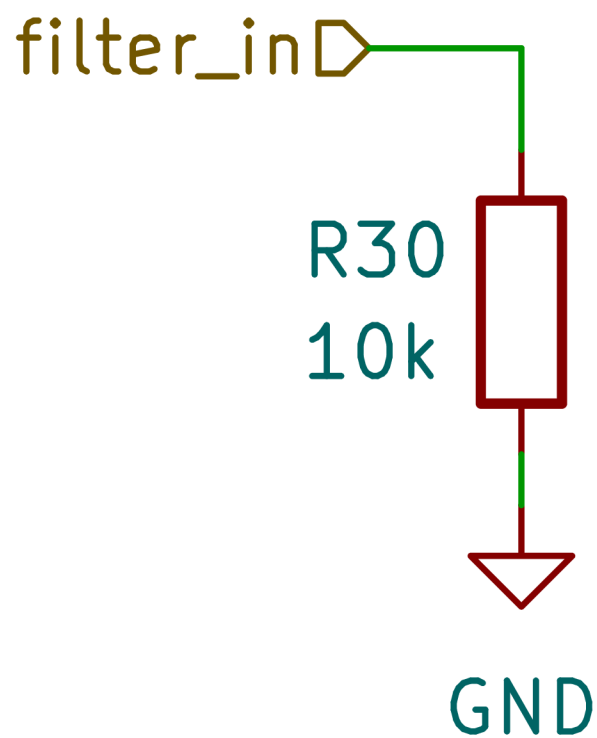
Obr. C.8: Dílčí část *Relay\_ATT2\_before*



Obr. C.9: Dílčí část *Relay\_ATT2\_after*



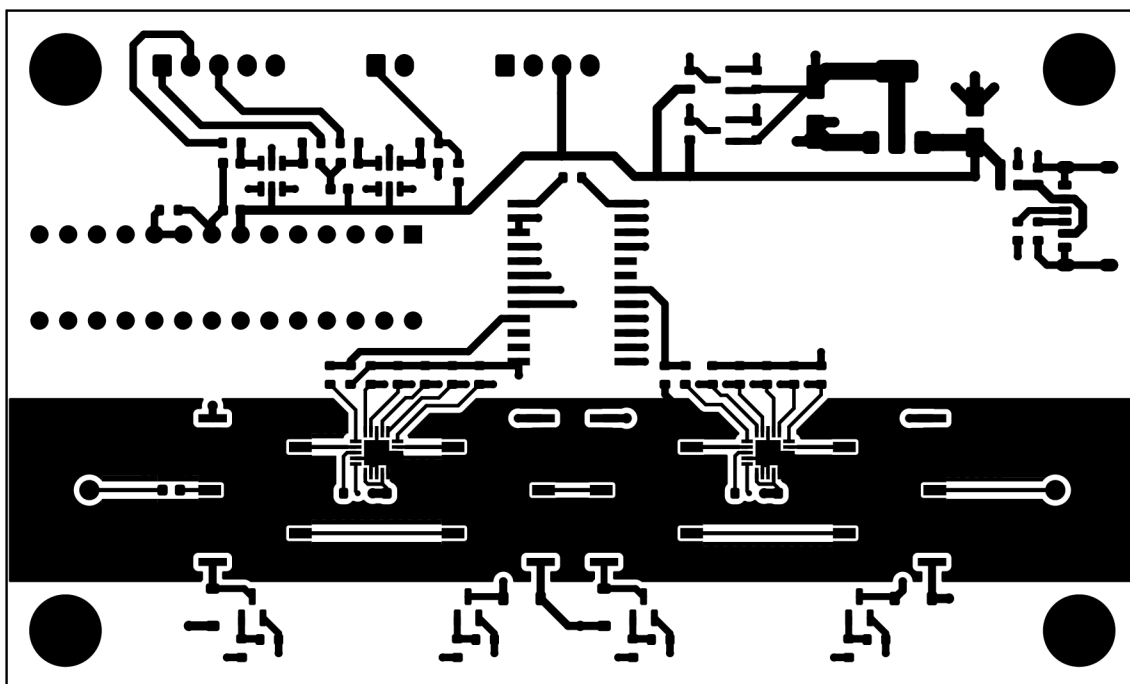
Obr. C.10: Dílčí části *Filter\_ATT1\_C05-C16* (identické)



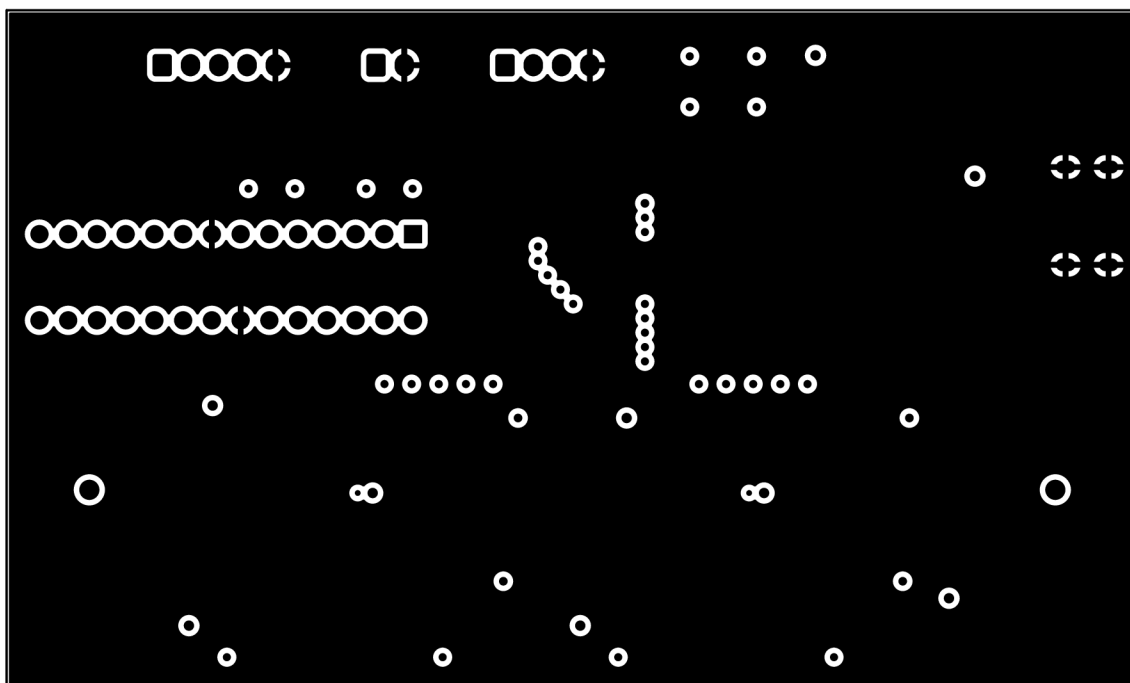
Obr. C.11: Dílčí části *Filter\_ATT2\_C05-C16* (identické)



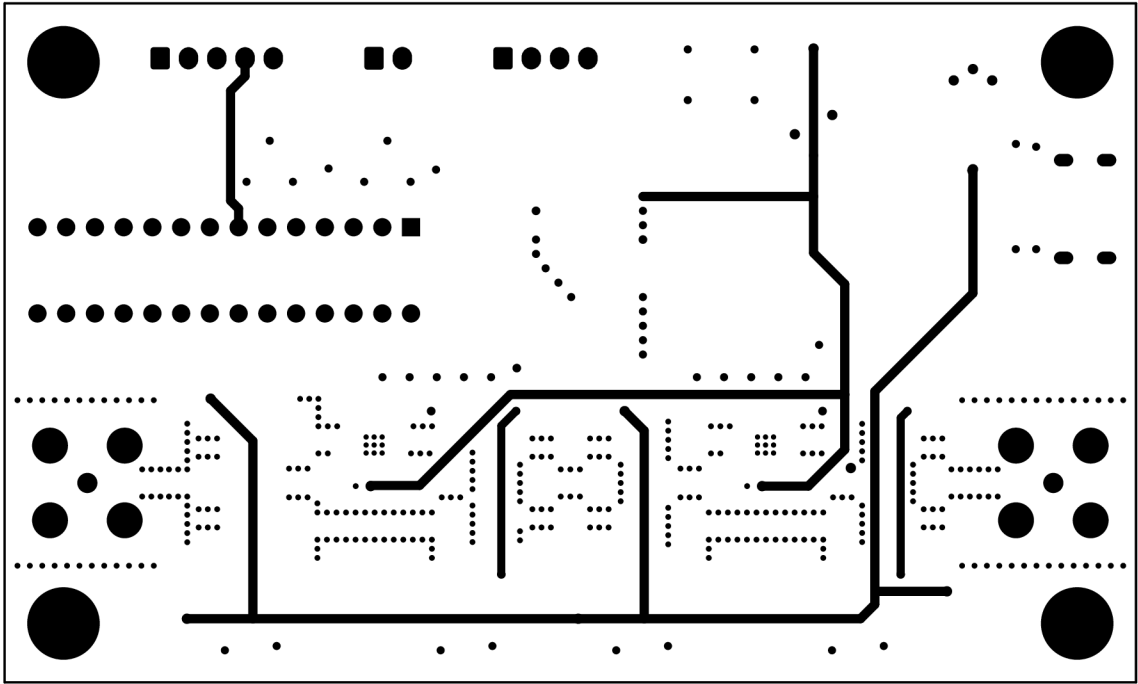
## C.2 Výrobní podklady pro DPS



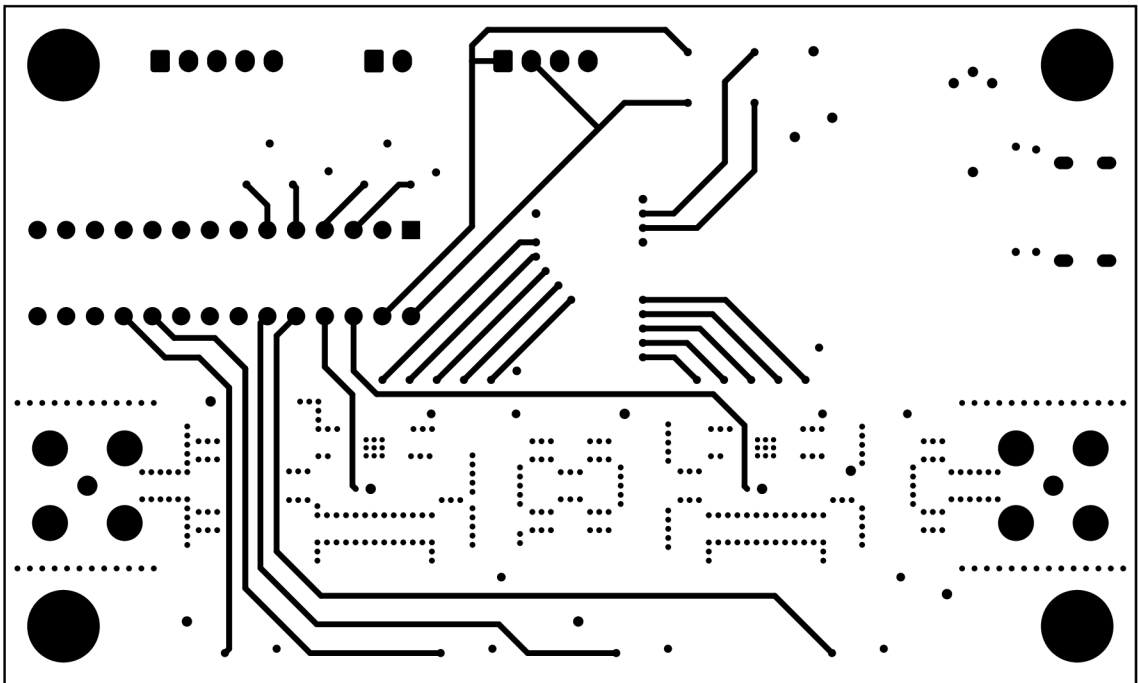
Obr. C.12: Vrchní vrstva F\_Cu



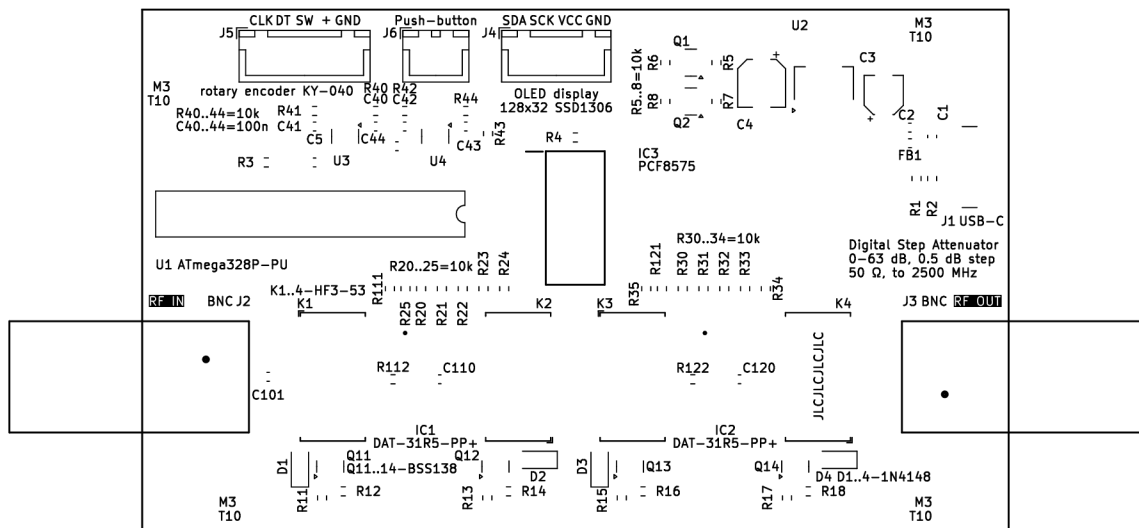
Obr. C.13: První vnitřní vrstva In1\_Cu



Obr. C.14: Druhá vnitřní vrstva In2\_Cu



Obr. C.15: Spodní vrstva DPS B\_Cu



Obr. C.16: Vrstva popisků DPS F\_Silkscreen

## D Obsah elektronické přílohy

/	kořenový adresář přiloženého archivu
└─ PCB	vše týkající se DPS
└─ BOM	soupiska součástek
└─ BOM.xlsx	
└─ KiCad_files	KiCad schémata a soubor projektu
└─ libs	knihovny projektu
└─ project_lib.bak	
└─ project_lib.kicad_sym	
└─ Attenuator_ATT1.kicad_sch	
└─ Attenuator_ATT2.kicad_sch	
└─ debounce_buttons.kicad_sch	
└─ debounce_encoder.kicad_sch	
└─ dps.kicad_dru	
└─ dps.kicad_pcb	
└─ dps.kicad_prl	
└─ dps.kicad_pro	
└─ dps.kicad_sch	
└─ filter.kicad_sch	
└─ relay_after.kicad_sch	
└─ relay_before.kicad_sch	
└─ sym-lib-table	
└─ gerbers	gerber+drill výrobní podklady
└─ dps-B_Cu.gbl	
└─ dps-B_Mask.gbs	
└─ dps-B_Paste.gbp	
└─ dps-B_Silkscreen.gbo	
└─ dps-Edge_Cuts.gm1	
└─ dps-F_Cu.gtl	
└─ dps-F_Mask.gts	
└─ dps-F_Paste.gtp	
└─ dps-F_Silkscreen.gto	
└─ dps-In1_Cu.g2	
└─ dps-In2_Cu.g3	
└─ dps-NPTH.drl	
└─ dps-NPTH-drl_map.gbr	
└─ dps-PTH.drl	
└─ dps-PTH-drl_map.gbr	
└─ code	zdrojový kód programu prototypu řídicí části
└─ include	
└─ timer.h	
└─ lib	použité knihovny
└─ gpio	
└─ gpio.c	
└─ gpio.h	

