

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektroenergetiky a ekologie**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Aktivní osciloskopická sonda**

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**

**Fakulta elektrotechnická**

**Akademický rok: 2017/2018**

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš VLČEK**

Osobní číslo: **E15N0047K**

Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**

Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

Název tématu: **Aktivní osciloskopická sonda**

Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

### **Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :**


1. Popište druhy používaných aktivních sond.
2. Navhňte aktivní osciloskopickou sondu.
3. Navržené řešení realizujte a otestujte.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:  
**1. Artur Seibt: Osciloscropy od A do Z**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Aleš Voborník, Ph.D.**  
Katedra technologií a měření  
Datum zadání diplomové práce: **10. října 2017**  
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2018**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá příslušenstvím k měření osciloskopem, kterými jsou osciloskopické sondy. V první části se nachází přehled dostupných sond s krátkým vysvětlením rozdílů mezi nimi. Před samotným návrhem je uvedeno, jaké aktivní prvky je možné pro stavbu sondy použít. Praktická část se věnuje návrhu aktivní osciloskopické sondy, její realizaci a také měření hotového výrobku. V závěru práce lze najít shrnutí naměřených dat a vyhodnocení výsledků.

## **Klíčová slova**

Aktivní sonda, osciloskop, vstupní dělič, operační zesilovač, měření sondy

**Abstract**

This thesis deals with the oscilloscope measuring accessories, which are oscilloscope probes. In the first part there is an overview of available probes with a short explanation of the differences between them. Before designing, it is started, which active elements can be used for the construction. The practical part deals with the design of an active oscilloscope probe, its realization and the measurement of the final product. At the end of this thesis is a summary of the measured data and evaluation of the results.

**Key words**

Active probe, oscilloscope, input divider, operational amplifier, probe measurement

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

V Plzni dne 24. 5. 2018

Lukáš Vlček

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Aleši Voborníkovi, Ph.D. za cenné připomínky, profesionální rady a metodické vedení při vypracování diplomové práce.

## Obsah

|   |    |
|---|----|
| Seznam použitých symbolů a zkratk .....                   | 9  |
| 1 Úvod.....   | 10 |
| 2 Přehled osciloskopických sond .....                     | 11 |
| 2.1 Obecný rozbor připojení sondy a měřeného obvodu ..... | 11 |
| 2.2 Pasivní sondy.....                                    | 12 |
| 2.2.1 Vysokoimpedanční pasivní sondy.....                 | 12 |
| 2.2.2 Nízkoimpedanční pasivní sondy.....                  | 13 |
| 2.3 Proudové sondy .....                                  | 14 |
| 2.3.1 S odporovým převodníkem.....                        | 14 |
| 2.3.2 S transformátorem .....                             | 15 |
| 2.3.3 S Hallovou sondou .....                             | 16 |
| 2.4 Aktivní sondy.....                                    | 17 |
| 2.4.1 Aktivní napěťové sondy .....                        | 17 |
| 2.4.2 Aktivní rozdílové sondy.....                        | 19 |
| 3 Aktivní součástky vhodné ke konstrukci sond .....       | 22 |
| 3.1 Unipolární tranzistory .....                          | 22 |
| 3.1.1 Tranzistor MOSFET.....                              | 22 |
| 3.1.2 Tranzistor MOSFET s dvojitým hradlem.....           | 23 |
| 3.1.3 Tranzistor JFET .....                               | 23 |
| 3.2 Operační zesilovače.....                              | 24 |
| 4 Návrh a konstrukce sondy.....                           | 25 |
| 4.1 Simulace zapojení při návrhu sondy .....              | 25 |
| 4.1.1 Jednocestná aktivní sonda.....                      | 26 |
| 4.1.2 Dvoucestná sonda.....                               | 27 |
| 4.2 Tvorba layoutu a realizace .....                      | 30 |
| 4.2.1 Schéma a layout jednocestné varianty .....          | 31 |
| 4.2.2 Schéma a layout dvoucestné varianty .....           | 32 |



---

|  |    |
|--|----|
| 4.2.3 Napájení $\pm 5$ V z USB.....                    | 33 |
| 4.3 Testování sond .....                               | 33 |
| 4.3.1 Příslušenství potřebné k měření .....            | 33 |
| 4.3.2 Nastavitelný DC offset u jednocestné sondy ..... | 34 |
| 4.3.3 Linearita DC napětí .....                        | 35 |
| 4.3.4 Frekvenční charakteristika.....                  | 36 |
| 4.3.5 Přenos obdélníkového signálu .....               | 37 |
| 4.3.6 Doba vzestupné a sestupné hrany.....             | 40 |
| 5 Závěr .....  | 42 |
| Seznam literatury .....                                | 44 |
| Seznam obrázků .....                                   | 46 |
| Seznam tabulek .....                                   | 47 |
| Seznam příloh.....                                     | 47 |
| Přílohy .....  | 48 |

## Seznam použitých symbolů a zkratek

|            |  |
|------------|--|
| AC .....   | střídavé napětí  |
| BNC .....  | typ konektoru (Bayonet Neill Concelman)                            |
| CMRR ..... | činitel potlačení souhlasného napětí (Common Mode Rejection Ratio) |
| DC .....   | stejnoseměrné napětí   |
| DMM .....  | digitální multimetr  |
| DP .....   | dolní propust  |
| DPS .....  | deska plošných spojů   |
| GND .....  | označení zemního bodu (ground)                                     |
| HP .....   | horní propust  |
| NF .....   | nízkofrekvenční  |
| OZ .....   | operační zesilovač   |
| USB .....  | rozhraní (Universal Serial Bus)                                    |
| VF .....   | vysokofrekvenční   |

# 1 Úvod

Používání osciloskopů je v dnešní době velmi rozšířené. Při měření s těmito přístroji potřebujeme dosáhnout co nejlepších výsledků, tedy minimálního ovlivnění měřeného signálu. Propojení vstupu osciloskopu s výstupem generátoru realizujeme pouze kabelem. Když potřebujeme připojit osciloskop k nějakému měřenému místu, potřebujeme zvolit vhodná příslušenství, kterými jsou osciloskopické sondy.

Tyto sondy umožňují propojit měřený obvod externího zařízení s neznámými vlastnostmi ke vstupu osciloskopu nebo jiného měřicího zařízení s definovanými vlastnostmi vstupu. Pro většinu požadavků postačí cenově dostupnější pasivní sondy, v některých případech je třeba signál zpracovat na vstupu osciloskopu aktivní sondou.

Rozdíl mezi těmito zařízeními je popsán v první části této diplomové práce. Další část se zabývá praktickým návrhem a popisem jednotlivých částí aktivní sondy. Cílem je navrhnout analogovou aktivní sondu, kterou je možné potom také realizovat a používat.

## 2 Přehled osciloskopických sond

Osciloskopické sondy dělíme podle vlastností měřeného obvodu a potřeb zpracování měřeného signálu osciloskopem. Podle toho dělíme sondy do několika kategorií, kterými se budou zabývat následující kapitoly.

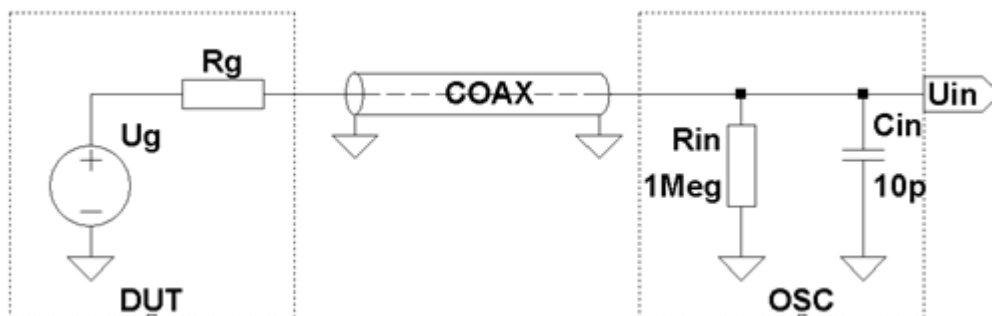
### 2.1 Obecný rozbor připojení sondy a měřeného obvodu

Nejjednodušší typ připojení je přímé propojení, protože použijeme pouze kabel připojený přímo k osciloskopu a k měřenému objektu. Je nutné použít koaxiální nebo alespoň stíněný kabel, protože na přívodních spojích by se mohlo indukovat rušivé napětí nepřijatelné velikosti. To je způsobeno velkou kapacitou kabelu.

Vlastnosti měřeného obvodu jsou na obrázku realizovány zdrojem  $U_g$  a jeho vnitřním odporem  $R_g$ . Vstup osciloskopu je realizován odporem  $R_{in}$  o velikosti  $1\text{ M}\Omega$  a vstupní kapacitou  $C_{in}$  o velikosti  $10\text{ pF}$ . Obvody jsou propojené koaxiálním kabelem o daných vlastnostech. Šířku propouštěného pásma  $B$  lze vypočítat rovnicí 2.1.

Pokud do rovnice dosadíme hodnotu odporu  $R_g$   $100\ \Omega$  a celkovou kapacitu  $C$ , kterou dostaneme součtem kapacity vstupu osciloskopu  $10\text{ pF}$  s kapacitou kabelu  $100\text{ pF}$ , dostaneme šířku pásma o velikosti pouze  $14,5\text{ MHz}$ . [3]

$$B = \frac{1}{2\pi R_g C} = \frac{1}{2\pi * 100 * 110 * 10^{-12}} = 14,5\text{ MHz} \quad (2.1)$$



Obrázek 2.1: Přímé připojení

Na základě rozboru potřebujeme k navýšení šířky pásma použít sondu s velkým vstupním odporem a nízkou vstupní kapacitou. K docílení těchto požadavků rozlišujeme pro měření napětí aktivní a pasivní sondy.

## 2.2 Pasivní sondy

Pasivní sondy nejsou napájené, obsahují pouze pasivní prvky. U těchto sond je výběr z několika možností podle vlastností měřeného objektu. Existují sondy s různým dělicím poměrem od 1:1 až po sondy vysokonapěťové s dělicím poměrem 1000:1. Dále se také liší svými parametry, tedy vstupním odporem a kapacitou. S tím pak souvisí frekvenční rozsah sondy a rychlost odezvy. Některé mají také možnost přepínání dělení, se kterým dojde i ke změně vlastností. Výhodou těchto sond je široký rozsah použití, odolnost a také nižší cena ve srovnání s aktivními sondami. Dle konstrukce rozlišujeme dva typy sond, vysokoimpedanční a nízkoimpedanční.

### 2.2.1 Vysokoimpedanční pasivní sondy

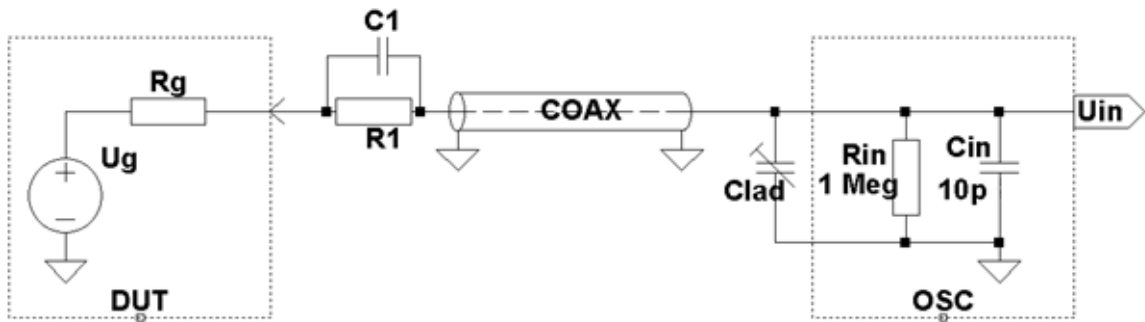
Pro co nejmenší ovlivnění měřeného objektu je nutný velký vstupní odpor a co nejmenší kapacita. Vstupní odpor by měl být alespoň 10x větší než vnitřní odpor zdroje signálu.

Sondy s dělicím poměrem 1:1 nemají žádné dělení vstupního signálu. Realizovány jsou pouze koaxiálním kabelem jako u přímého připojení, který se zakončuje měřicím hrotem. Z důvodu jejich vysoké vstupní kapacity, která má hodnotu několik desítek pF, nemají velký kmitočtový rozsah. Ten je maximálně v několika málo desítkách MHz. Je-li k dispozici dostatečný vertikální rozsah osciloskopu, je lepší použít sondu s dělicím poměrem 10:1, která zmenšuje měřený signál 10x. Vstupní odpor je nejčastěji 10 MΩ. Vstupní kapacita dosahuje hodnoty přibližně 10 pF, tedy mnohem méně než u dělení s poměrem 1:1. Z tohoto důvodu lze měřit do 600 MHz. Vyšší dělicí poměr se používá pro měření vysokého napětí. Tyto sondy s vysokým dělicím poměrem mají vysoký vstupní odpor okolo 100 MΩ, čím se snižuje jejich použitelnost pro vyšší frekvence.

U sond s dělicím poměrem je na vstupu zařazen dělič napětí, který je pro sondu 10:1 zobrazen na obrázku 2.2. Tento dělič musí být vykompenzován podle rovnice 2.2. Ze zapojení těchto kondenzátorů  $C_1$  a  $(C_K+C_2)$  se určí teoretická vstupní impedance. Vypočtená hodnota podle schéma na obrázku 2.2 je 12 pF. Reálná kapacita je o něco vyšší, dosahuje až 20 pF. Efektivní hodnota kapacity je důležitý parametr sondy ovlivňující celkové použití. Je proto nutné použít kabely s co nejmenší kapacitou, tedy nejlépe vysokoimpedanční kabely. Ty mají kapacitu okolo 25 pF/m, např. RG-146 má parametry 190 Ω s kapacitou 20pF/m. [1]

$$R_1 C_1 = R_2 (C_k + C_2) = 1M\Omega * 120 pF = 120 \mu s \quad (2.2)$$

Tato hodnota je dosažena velkým rozdílem průměru vnitřního a vnějšího vodiče. Aby byl kabel dostatečně ohebný, musí být použit velmi tenký středový vodič. Ohnutím nebo stlačením kabelu dochází k nárůstu kapacity, která pak ovlivňuje parametry sondy. Nárůst kapacity způsobuje také mechanické namáhání nebo změna teploty tělesa sondy, proto je ladicí kondenzátor umístěn na konci kabelu.



Obrázek 2.2: Pasivní vysokoimpedanční sonda 10:1

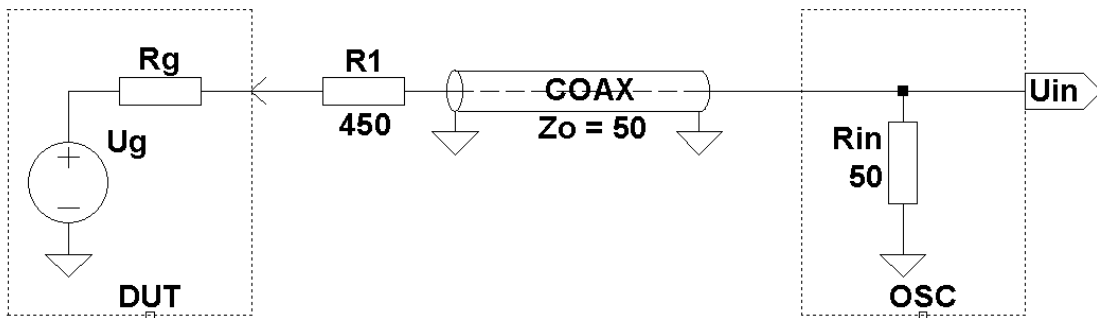
## 2.2.2 Nízkoimpedanční pasivní sondy

K osciloskopům se vstupním odporem  $50 \Omega$  jsou přizpůsobené pasivní sondy s nízkým vstupním odporem. Použití je při měření velmi rychlých signálů na nízké impedanci. V porovnání s aktivními sondami je toto levnější a velmi výhodné řešení. Pro jejich malé rozměry jsou vhodné i pro obvody s velmi hustě osazenými součástkami. Zároveň se výrobci snaží dodržovat kompatibilitu různých nastavečů s aktivními sondami.

Jejich nízký vstupní odpor, který je  $500 \Omega$  až  $1,5 k\Omega$ , zůstává v celém frekvenčním spektru téměř konstantní. Společně s velmi nízkou kapacitou pod  $0,5 pF$  je dosaženo nízkých hodnot šumu a vysoké linearity. Sondy dosahují šířky pásma až  $8 GHz$ . [5] Vyrábí se s různým dělicím poměrem, nejčastěji 10:1 s maximální hodnotou vstupního napětí jen několik desítek voltů.

Při návrhu má největší vliv na parametry vstupní odpor  $R_1$ , tedy jeho parazitní kapacita vůči okolí a vlastní indukčnost. Dalším důležitým krokem je správné uzemnění sondy. Při vyšších frekvencích nelze použít klasické připojení přes kabel zakončeným „krokodýlem“, ale zemnicí hroty podobné jako u aktivních sond. Dlouhý zemnicí přívod by svojí vysokou indukčností vytvořil s kapacitou tlumený sériový obvod, ten by se projevoval překmity nebo jinými přechodnými jevy.

Výstup sond je přizpůsoben impedancí  $50\ \Omega$ . U tohoto typu sond se na výstupu používá SMA konektor. Výrobce pak zároveň dodává i přechodku SMA-BNC pro připojení k BNC vstupu osciloskopu.



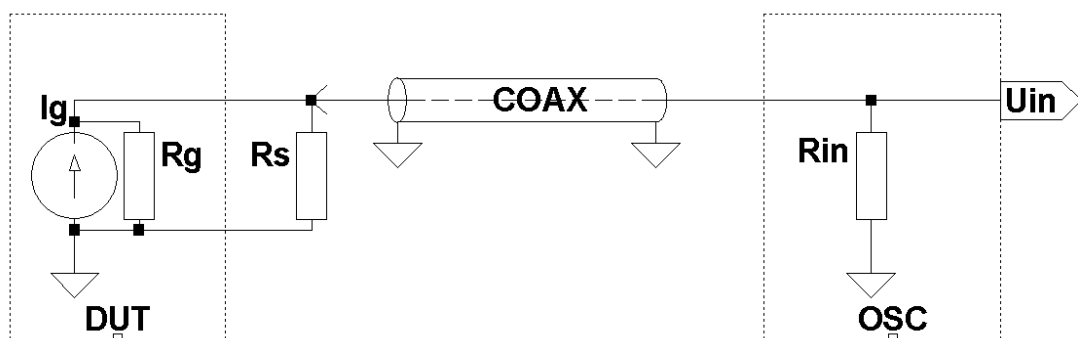
Obrázek 2.3: Pasivní nízkoimpedanční sonda 10:1

## 2.3 Proudové sondy

Měření proudu je méně časté a ve většině případů problematictější než měření napětí. K měření proudu používáme proudové sondy, které se dělí podle způsobu snímání této veličiny.

### 2.3.1 S odporovým převodníkem

Měření proudu se provádí přes odporový převodník  $R_s$ , tzv. bočník. Jde o velmi přesný rezistor, na kterém se podle protékajícího proudu snímá napětí.



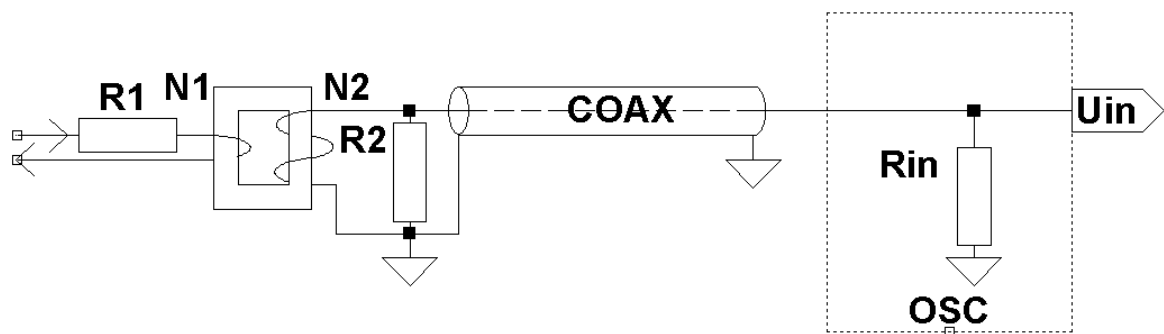
Obrázek 2.4: Proudová sonda s odporovým převodníkem

Tato varianta zapojení je sice nejjednodušší možnost, ale také nejproblematictější. Velmi přesný rezistor se musí umístit do obvodu tak, aby přes něj protékal zkoumaný proud. Toto přerušování obvodu může způsobit, že proud bude úplně

jiný než bez přidaného rezistoru. Velikost bočnicku se volí podle velikosti proudu, aby bylo možné sledovat dostatečně přesné změny napětí. Při velkém proudu stačí použít bočník s malou hodnotou odporu a měřený proud nebude téměř ovlivněn. Naopak u malých proudů je nutné použít bočník s velkou hodnotou odporu. Zde bude zjištěný proud velmi zkreslený od skutečnosti.

Výhodou je měření DC i AC složky proudu a při použití pasivní sondy pro snímání napětí na rezistoru není nutné napájení. Nevýhodou je již zmíněné zkreslení měřeného proudu, nutnost rozpojit obvod a vzájemné propojení bez galvanického oddělení.

### 2.3.2 S transformátorem



Obrázek 2.5: Proudová sonda s transformátorem

Princip této proudové sondy je podobný jako u transformátoru. Na straně primárního vinutí je jeden závit, což je vodič, kterým protéká měřený proud. Použitím více závitů by se zvýšila citlivost sondy, ale také zatížení měřeného obvodu. Na sekundární straně může být větší počet vinutí, aby naindukované napětí bylo větší než na primární straně. Sekundární vinutí je nutné zakončit odporem  $R_2$ . Tento odpor omezuje frekvenční závislost sondy a také brání zničení sondy sekundárním napětím naprázdno. Z odporu  $R_2$  a vstupního odporu  $R_{in}$  se jednoduše určí hodnota odporu  $R_1$ . Touto velmi malou hodnotou odporu  $R_1$  je měřený obvod sériově zatížen. Odpor  $R_1$  se určí ze vztahu 2.3, kde  $n_1$  a  $n_2$  jsou počty závitů na primárním a sekundárním vinutí:

$$R_1 = R_z * \frac{n_1^2}{n_2^2} \quad (2.3)$$

$$R_z = \frac{R_2 * R_{in}}{R_2 + R_{in}} \quad (2.4)$$

Výhodou těchto sond je tedy velmi malé zatížení měřeného obvodu. Měřený a měřicí obvod jsou přes transformátor galvanicky oddělené. Nutnost rozpojovat

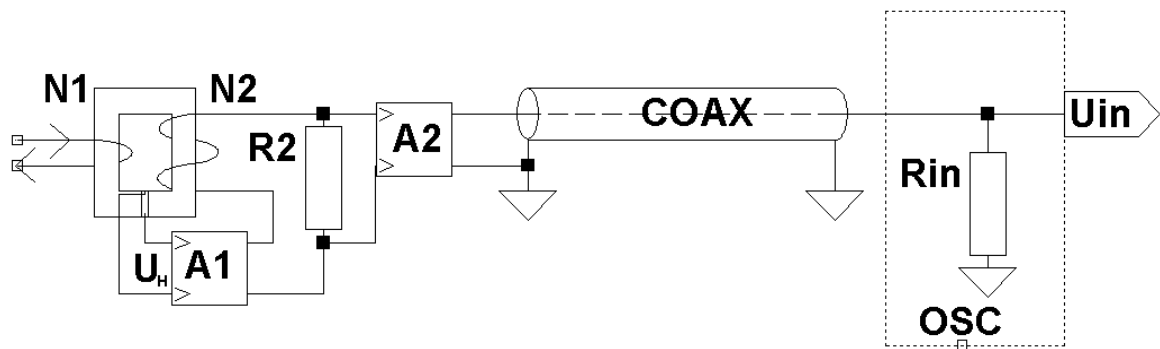


měřený obvod záleží na realizaci transformátoru. U pevného jádra se musí vodič odpájet, prostrčit transformátorem a znovu připojit. Většina současných sond obsahuje pohyblivou část feritového magnetického obvodu, takže rozpojování vodiče není nutné.

Proudové sondy nejsou schopné měřit signál od DC. Dolní mezní kmitočet se vypočítá podle vztahu uvedeného v rovnici 2.5. Další nevýhodou je pokles temene přenášeného impulsu. Tento pokles se zvětšuje s délkou impulsu. Při přenosu krátkých impulsů se chová proudová sonda s transformátorem jako každá jiná sonda.

$$f_d = \frac{R_z}{2\pi L_2} \quad (2.5)$$

### 2.3.3 S Hallova sondou



Obrázek 2.6 : Proudová aktivní sonda s Hallova generátorem

Na obrázku 2.6 je naznačeno schéma sondy. Jde o propojení transformátoru a Hallova generátoru, který je založen na principu Hallova jevu. Vstupní měřený proud vyvolá v jádře magnetický tok  $B$ , který prochází destičkou Hallova generátoru a na jejích vývodech vytváří Hallovo napětí  $U_H$ . Střídavý magnetický tok  $B$  budí sekundární vinutí a obě napětí se pak sčítají v zesilovačích  $A_1$  a  $A_2$ . Vysoké kmitočty se přenáší pouze přes sekundární vinutí.

S touto proudovou sondou je možné měřit jak DC, tak i AC. Nedochozí zde k poklesu temene i u velmi dlouhého impulsu. Sondy je nutné napájet stejnosměrným napětím. Mají napájení z externího zdroje, na pinech připojovacího boxu k BNC konektoru nebo z vlastní baterie.

## 2.4 Aktivní sondy

Potřebujeme-li obejít problematiku pasivních sond, musíme použít aktivní sondy. Tyto sondy zahrnují přednosti pasivních sond s velkým a malým odporem, tedy mají velký vstupní odpor  $1\text{ M}\Omega$  a malou vstupní kapacitu i pod  $1\text{ pF}$ . S těmito vlastnostmi je měřený obvod mnohem méně zatěžovaný, proto je možné měření i větších frekvencí v řádech GHz.

### 2.4.1 Aktivní napěťové sondy

Při použití pasivních sond se první zesilovací stupeň nachází na vstupu osciloskopu. U konstrukce aktivních sond dochází k tomu, že první zesilovací stupeň posuneme přímo do sondy. Principem aktivních sond je tedy emitorový sledovač s tranzistorem FET. Výstupní elektroda Source sleduje řídicí elektrodu Gate. Jelikož elektroda Source má konstantní napětí, není vstup ovlivněn kapacitou mezi Source a Gate. Vstupní kapacitu ideálního sledovače tedy určuje kapacita mezi Gate a Drain současně s kapacitou přívodu k elektrodě Gate.

Mezi výhody aktivních sond tedy patří hlavně vstupní parametry. Vysoká vstupní impedance nezatěžuje měřený obvod, tím se reálné náhradní schéma přibližuje ideálnímu zapojení paralelního odporu a bezeztrátového kondenzátoru. Kromě vlivu aktivní součástky odpadá problém jako u pasivních sond s odporovým vodičem, který výrazně snižoval paralelní odpor vstupu. Jako výhodou je také využití nastavitelného offsetu u signálu, kdy si můžeme posunout stejnosměrnou úroveň signálu.

Nevýhodou je, že u aktivního prvku může dojít k přebuzení, o kterém uživatel nemusí vědět. To způsobí zkreslení nebo omezení signálu. Aktivní sondy mají tedy omezený dynamický rozsah, který způsobuje již zmíněné zkreslení signálu.

Další nevýhodou ve srovnání s pasivními sondami je vyšší pořizovací cena a nutnost napájení sondy, což je obvyklá výbava osciloskopů s  $50\ \Omega$  vstupem. Tyto vstupy BNC jsou vybaveny piny pro napájení, rozhraní aktivních sond a také pro rozpoznávání dělicího poměru pasivních sond. Aktivní sondy tedy nejsou univerzální pro všechny typy osciloskopů, protože výrobci mají různé rozmístění pinů po straně BNC konektoru a zároveň musí být sonda podporována ve firmwaru přístroje.

Poslední nevýhodou je omezení rozsahu vstupního napětí. U sond s dělicím poměrem 10:1 je maximální přípustné vstupní špičkové napětí nejčastěji okolo 10 V. Hodnoty u běžně používaných aktivních sond jsou uvedené v tabulce 2.1.

| Výrobce         | Model   | Šířka pásma [GHz] | Vstupní impedance [k $\Omega$    pF] | Dynamický rozsah | Nastavitelný offset | Vstupní dělení |
|-----------------|---------|-------------------|--------------------------------------|------------------|---------------------|----------------|
| Keysight        | N2796A  | 2                 | 1000    1                            | $\pm 8$ V        | $\pm 12$ V          | 10:1           |
| LeCroy          | ZS4000  | 4                 | 1000    0,6                          | $\pm 8$ V        | $\pm 12$ V          | 10:1           |
| Rohde & Schwarz | RT-ZS60 | 6                 | 1000    0,3                          | $\pm 8$ V        | $\pm 10$ V          | 10:1           |
| Tektronix       | TAP3500 | 3,5               | 40    0,8                            | $\pm 4$ V        | $\pm 10$ V          | 10:1           |
| Rigol           | RP7150S | 1,5               | 25    2                              | $\pm 7$ V        | $\pm 12$ V          | 10:1           |

**Tabulka 2.1:** Přehled aktivních napěťových sond

Mechanická konstrukce aktivní sondy se skládá z hlavičky sondy, propojovacího kabelu a připojovací hlavičky ke vstupu osciloskopu.

### Typická obvodová řešení

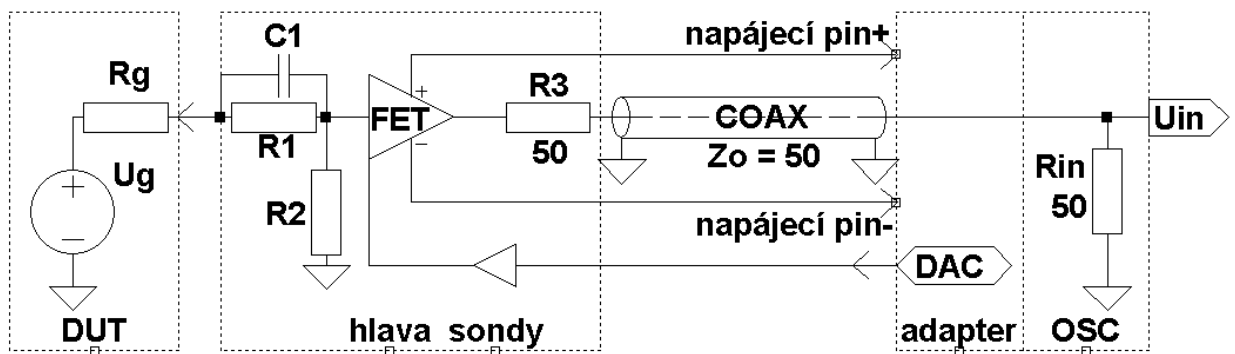
Podle konstrukce hlavičky sondy rozlišujeme aktivní sondy bez vstupního děliče – „pravé“ FET sondy a aktivní sondy se vstupním děličem. U „pravé“ FET sondy ovlivňuje parametry nejvíce aktivní prvek. Tento typ je 1:1, celý signál prochází tranzistorem bez dělení signálu. Vlastnosti tranzistoru se pak projevují až na vstupu sondy, protože na řídicí elektrodě Gate není žádný dělič, který by tyto vlastnosti ovlivnil. Na vstupu v sérii s řídicí elektrodou je pouze odpor o velikosti desítek až stovek ohmů, aby u zapojení nedošlo ke splnění podmínek kmitání. Dále se používá sériové spojení R a C paralelně s řídicí elektrodou k omezení proudu. Do vstupu nelze použít ochranné diody, protože by zvyšovali vstupní kapacitu. Také jejich závislost kapacity na napětí působí rušivě. Na výstupu FET sledovače musí být bipolární tranzistory k buzení 50 nebo 93 ohmového kabelu. Za sledovač se zapojují dva bipolární tranzistory, aby byl výstup sledovače co nejméně zatížen a nebyla ovlivněna linearita sondy.[1]

V současnosti se více používají sondy se vstupním děličem, za kterým je zapojen FET tranzistor nebo operační zesilovač s napěťovou zpětnou vazbou. Tento OZ může být zapojen jako sledovač s napěťovým přenosem 1 nebo s definovaným zesílením daným prvky ve zpětné vazbě. Nevýhodou je, že zesílením se omezí použití zesilovače do maximální šířky pásma. Tyto parametry jsou popsány v datovém listě OZ.[2]

Nejčastěji se u aktivních sond setkáváme s dělením 10:1. Na vstupu sondy před FET sledovačem je odporový kompenzovaný dělič. Tím dojde ke snížení vstupní kapacity a omezení vlivu aktivního prvku na vstupní parametry sondy. Vstupním děličem se také sníží citlivost sondy.

### Kalibrace sond

Během výroby aktivní sondy je nutné sondu před používáním nastavit. Jako první se nastaví offset sondy, aby při zkratovaném vstupu bylo na výstupu 0 V. To se realizuje trimrem v okolí aktivního prvku podle jeho zapojení. Další nastavení jsou VF a NF. Z důvodu tolerancí součástek je nutné kapacitní nebo odporové trimování. V současné době se toto trimování provádí elektronicky pomocí DA převodníků. Frekvenční nastavení je pro dosažení správné amplitudy v celém frekvenčním spektru a také pro zkompenzování překmitů při sledování obdélníkového signálu. [1]



Obrázek 2.7: Schéma aktivní napěťové sondy

### 2.4.2 Aktivní rozdílové sondy

Sonda obsahuje dva neuzemněné vstupy, které mezi sebou provádějí odečtení napětí. Toto odečtení napětí provádí sondy pomocí elektronických obvodů na rozdíl od rozdílových pasivních sond. Na výstupu je tedy rozdílové napětí vztažené proti zemi a zároveň je velmi výrazně potlačeno souhlasné napětí. Nejčastěji se vyjadřuje poměr souhlasného napětí na vstupech  $U_{soulh\_i}$  u na výstupech  $U_{soulh\_o}$ , tzv. činitel potlačení souhlasného napětí uvedený v rovnici 2.6. Z tohoto vzorce požadujeme velký poměr CMRR. Díky tomu můžeme se sondou měřit malá napětí s vyloučením velkého souhlasného napětí od zdroje.

$$CMRR_{dB} = 20 \log \frac{U_{soulh\_i}}{U_{soulh\_u}} \quad (2.6)$$

Vstupní parametry sondy se v porovnání vůči zemi a mezi vstupy liší. Odpor mezi vstupy aktivní rozdílové sondy je až dvojnásobný ve srovnání s odporem jednotlivých vstupů proti zemi. Naopak kapacita má mezi vstupy poloviční hodnotu. Srovnání parametrů rozdílových sond známých výrobců je uvedeno v tabulce 2.2:

| Výrobce         | Model   | Šířka pásma [GHz] | Vstupní impedance [k $\Omega$    pF] | Dynamický rozsah    | Nastavitelný offset | Vstupní dělení |
|-----------------|---------|-------------------|--------------------------------------|---------------------|---------------------|----------------|
| Keysight        | N2803A  | 30                | 100    0,032                         | 1,6 V <sub>pp</sub> | ±16 V               | 6:1            |
| LeCroy          | D2505-A | 25                | 0,12    -                            | 2,0 V <sub>pp</sub> | ±2,5 V              | -              |
| Rohde & Schwarz | RT-ZD40 | 4,5               | 1000    0,4                          | ±8 V                | ±10 V               | 10:1           |
| Tektronix       | P7720   | 20                | 100    0,4                           | 5 V <sub>pp</sub>   | ±4 V                | 4:1            |
| Rigol           | RP7150  | 1,5               | 50    2                              | ±7 V                | ±12 V               | 10:1           |

**Tabulka 2.2:** Přehled aktivních rozdílových sond

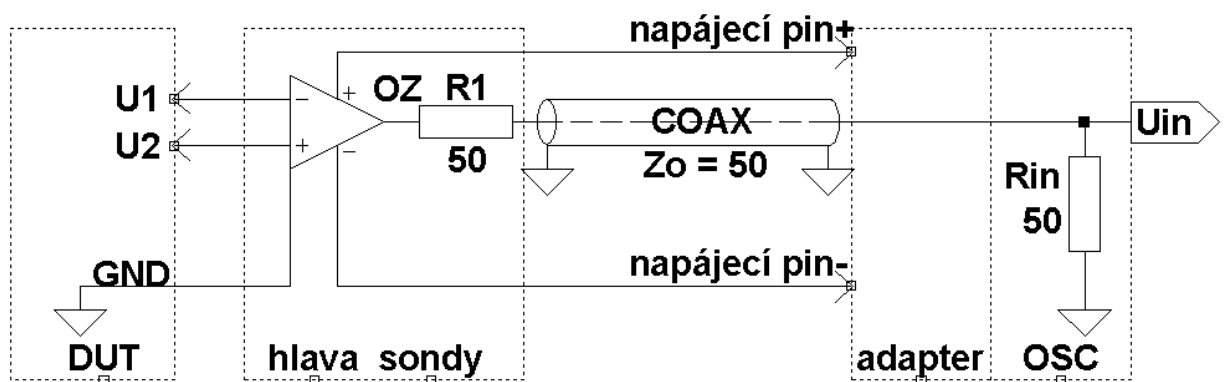
Nevýhodou u tohoto typu sond je podobně jako u předchozího typu vyšší pořizovací cena, potřeba přivedeného napájení a velmi snadné zničení nebo poškození sondy. Toto snadné zničení může nastat také používáním sondy bez napájecího napětí, protože ve vypnutém stavu je vstupní impedance mnohem menší. Přiložením napětí na vstup se vstupní tranzistory otevrou již při 0,6 V a může dojít k jejich zničení. Sondy se vstupním dělením jsou proti této skutečnosti odolnější. Někdy nemusí dojít k úplnému zničení, jen poškození, což může výrazně ovlivňovat přesnost měření. Podobně jako aktivní napěťové sondy obsahují i aktivní rozdílové sondy piny pro napájení a rozhraní mezi osciloskopem a sondou.

### Typická obvodová řešení

Nejdůležitější část v konstrukci je vytvoření rozdílového stupně. Ten je vytvořen z tranzistorů typu FET nebo z operačních zesilovačů. Důležité je obvod realizovat tak, aby z rozdílového vstupního signálu došlo k převodu na nesymetrický signál. Zapojení aktivních prvků může být realizováno jako diferenční zesilovač nebo jako přístrojový zesilovač. Zapojení přístrojového zesilovače v obvodu má výhodu vysokoimpedančního vstupu a zesílení pouze užitečného signálu, kterým se docílí dobrá hodnota CMRR.

Rozdílové sondy mohou signál jak zesilovat, tak i zeslabovat. Zeslabení sond se realizuje buď zeslabovacími články, které se nasazují na vstup sondy, nebo přidáním napěťového děliče před aktivní prvky uvnitř sondy. Napěťové děliče musí být v obou vstupech stejné. Tyto děliče jsou běžně 10:1, ale u vysokonapěťových rozdílových sond mohou být i 1000:1.

Symetrie platí pro oba vstupy až k rozdílovému stupni. Do obvodů sond se tedy přidávají odporové a kapacitní trimery pro dosažení vstupní symetrie. Tyto trimery se nastavují při kalibraci po připojení shodného signálu do obou vstupů. Správným nastavením trimerů během kalibrace by se mělo docílit napětí 0 voltů na výstupu sondy podobně jako u napěťových aktivních sond.



Obrázek 2.8: Schéma aktivní rozdílové sondy

## 3 Aktivní součástky vhodné ke konstrukci sond

Jelikož potřebují mít aktivní sondy specifické vlastnosti k měření signálu, není vhodná k realizaci jakákoli aktivní součástka. V této kapitole je uveden přehled a popis součástek, z kterých by bylo možné stavět aktivní sondu.

### 3.1 Unipolární tranzistory

Princip funkce těchto součástek je v řízení proudu elektrickým polem, které je kolmé ke směru protékajícího proudu. Z tohoto důvodu se obvykle označují jako FET, tzn. Field-Effect-Transistor. Proud zde protéká pouze jedním materiálem, podle toho rozlišujeme tranzistory s vodivostí N nebo P. Materiálem kanálu typu N protéká proud tvořený elektrony a materiálem kanálu typu P proud tvořený děrami.

Klasické unipolární tranzistory mají 3 vývody, kterými jsou elektroda Gate (angl. gate = brána, hradlo), elektroda Source (angl. source = zdroj, zřídlo) a elektroda Drain (angl. drain = výpusť, odtok). V českém znění se Gate označuje jako hradlo, Source jako emitor a Drain jako kolektor.[8]

Všeobecně výhodou u unipolárních tranzistorů je velký vstupní odpor až  $10^{15} \Omega$ , proto je řízení proudu prováděno téměř při nulovém výkonu. Právě vstupní odpor je jedna z vlastností důležitá také u aktivních sond. Ze skupiny tranzistorů jsem jako vhodné ke konstrukci sondy vybral JFET a MOSFET, které pracují do kmitočtu okolo 1 GHz. Speciální tranzistory MESFET nebo nejmodernější HEMT pracují při ještě vyšších kmitočtech, MESFET v oblasti do 12 GHz, HEMT téměř až do 100 GHz. [6]

#### 3.1.1 Tranzistor MOSFET

Pro řízení vodivosti kanálu musí být hradlo oddělené vrstvičkou izolantu. U MOSFET tranzistoru je izolantem oxid křemičitý. Od složení tranzistoru je odvozen název Metal-Oxid-Semiconductor, tzn. kov-oxid-polovodič. Podle izolační vrstvy jsou známé také označení IGFET, MISFET a další.

Rozlišujeme dva typy tranzistorů podle vodivosti při napětí  $U_{GS}=0$ . První typ tranzistoru je s vodivým kanálem. U kanálu typu N dojde k uzavření kanálu až po přiložení záporného napětí na hradlo, naopak po přiložení kladného napětí se vodivost kanálu zvyšuje ještě více než při  $U_{GS}=0$ . Schematická značka tranzistoru MOSFET s vodivým kanálem typu N je na obrázku 3.1.

Druhý typ je tranzistor s indukovaným kanálem. Technologické zpracování je u obou tranzistorů podobné, jen v tomto případě je kanál při  $U_{GS}=0$  nevodivý. Po přiložení kladného napětí na hradlo se začne vytvářet vodivý kanál mezi Drain a Source. Schematická značka MOSFETu s indukovaným kanálem typu N je na obrázku 3.2.



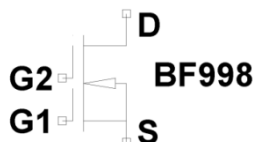
Obrázek 3.1: MOSFET s vodivým kanálem



Obrázek 3.2: MOSFET s indukovaným kanálem

### 3.1.2 Tranzistor MOSFET s dvojitým hradlem

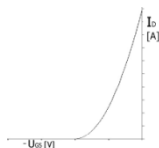
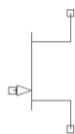
Je to speciální případ MOSFETU s vodivým kanálem, jen konstrukčně se dvěma hradly. Jak je vidět na obrázku 3.3, hradla jsou spojena sériově. Lze tedy ovládat kanál dvěma napětími. Použití tranzistoru v sondě je pak takové, že hradlo G2 se propojí s elektrodou Drain a jako vstup se použije hradlo G1. Např. tranzistor s dvojitým hradlem BF998 má podle datového listu vstupní kapacitu  $C_{G2}$  pouze 1,2 pF a  $C_{G1}$  2,1 pF, s vazebním kondenzátorem pak lze dosáhnout vstupní kapacity sondy méně než 1 pF.



Obrázek 3.3: Mosfet se dvěma hradly

### 3.1.3 Tranzistor JFET

Kanál tranzistoru je bez přiloženého napájení průchozí, začne se uzavírat až po připojení napětí podle typu kanálu. Po dosažení prahové hodnoty napětí  $U_{GS}$  dojde k úplnému uzavření kanálu. Vstupní kapacita je nízká, v řádech jednotek pF. Např. tranzistor BF245 má podle datového listu vstupní kapacitu 3 pF.



Obrázek 3.4: Tranzistor JFET s kanálem n s převodní charakteristikou

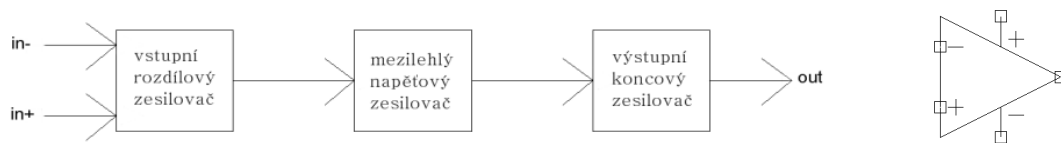


Do této skupiny patří také tranzistor MESFET, který má hradlo realizované Schottkyho přechodem. Vlastnosti tranzistoru MESFET jsou téměř shodné s tranzistorem JFET, jen z důvodu větší pohyblivosti nosičů dosahují vyšších rychlostí a rovněž i vyšší frekvence.[7]

## 3.2 Operační zesilovače

OZ jsou analogové integrované obvody složené z tranzistorů. Svým zapojením se považují za kompaktní prvky, které lze popsat určitými parametry a jejich vlastnosti lze ovlivnit zapojením vnějších prvků. Jak je naznačeno na obrázku 3.5, operační zesilovač má minimálně 5 vývodů. Dva vývody jsou vstupní, invertující a neinvertující vstup. Dva vývody jsou k napájení kladným a záporným stejnosměrným napětím. Poslední vývod je výstup.

U operačních zesilovačů vhodných ke stavbě sondy požadujeme velký vstupní odpor, který dosahuje až  $10^{15} \Omega$ , nízkou vstupní kapacitu jednotlivých vstupů, nízký šum na výstupu OZ, velkou maximální šířku přenášeného pásma a rovněž i vysokou rychlost OZ.



**Obrázek 3.5:** Bloková struktura a značka operačního zesilovače

Tyto vlastnosti splňují OZ, které mají vstup realizovaný z tranzistorů typu FET. Mezi tyto OZ patří například OPA659 nebo ADA4817.

## 4 Návrh a konstrukce sondy

Před samotným návrhem byly stanoveny tyto parametry, kterých by bylo žádoucí u aktivní sondy dosáhnout:

- Minimální rozsah vstupního napětí:  $\pm 8$  V
- Dělicí poměr sondy: 2 – 10:1
- Šířka frekvenčního pásma: DC – 100 MHz
- Napájecí napětí sondy:  $\pm 5$  V

### 4.1 Simulace zapojení při návrhu sondy

K simulaci mého návrhu sondy jsem se rozhodl použít program LT-Spice, protože program je volně dostupný ke stažení. Je zde možnost přidávání modelů reálných součástek a spuštění simulace obvodu jak ve frekvenční oblasti, tzv. střídavá analýza, tak i v časové oblasti, tzv. transientní analýza.

Jelikož jsem se rozhodl stavět sondu s operačním zesilovačem, bylo důležité najít ten, se kterým bude možné splnit zadané parametry. Jako nejvhodnější jsem zvolil operační zesilovač ADA4817. Tento operační zesilovač je typu FastFet s napěťovou zpětnou vazbou. Dosahuje maximální šířky pásma až 1050 MHz při poklesu charakteristiky o -3 dB. Tento údaj je platný pouze při výstupní amplitudě napětí do 0,1 V<sub>p-p</sub>. Při vyšší hodnotě napětí je maximální šířka pásma menší, tedy při 2 V<sub>p-p</sub> je možné operační zesilovač používat pouze do 200 MHz.

Dalšími parametry, podle kterých jsem zvolil tento operační zesilovač, je vstupní odpor, vstupní kapacita a napájení. Vstupní odpor  $R_{in}$  proti zemi je podle datového listu 500 G $\Omega$  a vstupní kapacita  $C_{in}$  proti zemi je 1,3 pF. Operační zesilovač je typu rail-to-rail a doporučené napájení je  $\pm 5$  V.

Naopak operační zesilovač má poměrně vysoký vstupní napěťový drift. Ten může dosáhnout až 80  $\mu$ V/°C. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl realizovat dvě varianty sondy. První je jednocestná sonda s nastavitelným offsetem, ve které bude jeden operační zesilovač ADA4817 pro celé frekvenční spektrum. Schéma jednocestné sondy je na obrázku 4.1. Druhá varianta je dvoucestná sonda, ve které bude operační zesilovač ADA4817 ve VF větvi a v DC větvi bude jiný stabilnější operační zesilovač pro nízké frekvence. Schéma dvoucestné sondy je na obrázku 4.3.

### 4.1.1 Jednocestná aktivní sonda

Vstup je tvořen kompenzovaným odporovým děličem. Ten je nastaven na zeslabení vstupního signálu na hodnotu přibližně  $U_{V1}$ . Pro výpočet napětí za děličem  $U_{dělč}$  musím použít postup pro zatížený odporový dělič, který je uveden v rovnici 4.2. Nejprve sečtu paralelní kombinaci odporu  $R_3$  a  $R_{in}$  operačního zesilovače,  $R_1$  mohu z důvodu jeho velikosti zanedbat. Potom vypočítám proud  $I_{dělč}$  tekoucí těmito odpory a nakonec z proudu a paralelní kombinace odporů určím napětí na vstupu OZ. Pro tento výpočet napětí za děličem mohu také použít zjednodušený vzorec uvedený v rovnici 4.3. Výpočet napětí za kapacitním děličem  $U_{C\_dělč}$  je uveden v rovnici 4.4. Pro výpočet jsem zvolil hodnotu napětí  $U_{V1}$  rovnou 10 V.

$$I_{dělč} = \frac{U_{V1}}{R_2 + \frac{R_3 R_{in}}{R_3 + R_{in}}} = \frac{10}{10^6 + \frac{220 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{14}}{220 \cdot 10^3 + 5 \cdot 10^{14}}} = 8,19 \mu A \quad (4.1)$$

$$U_{dělč} = I_{dělč} * \frac{R_3 R_{in}}{R_3 + R_{in}} = 8,19 * 10^{-6} * \frac{220 * 10^3 * 5 * 10^{14}}{220 * 10^3 + 5 * 10^{14}} = 1,8 V \quad (4.2)$$

$$U_{dělč} = U_{V1} \frac{R_3 R_{in}}{R_2 R_3 + R_2 R_{in} + R_3 R_{in}} = 1,8 V \quad (4.3)$$

$$U_{C\_dělč} = U_{V1} \frac{C_3}{C_3 + C_2 + C_{in}} = 10 * \frac{2,9 \cdot 10^{-12}}{2,9 \cdot 10^{-12} + 1,2 \cdot 10^{-11} + 1,3 \cdot 10^{-12}} = 1,8 V \quad (4.4)$$

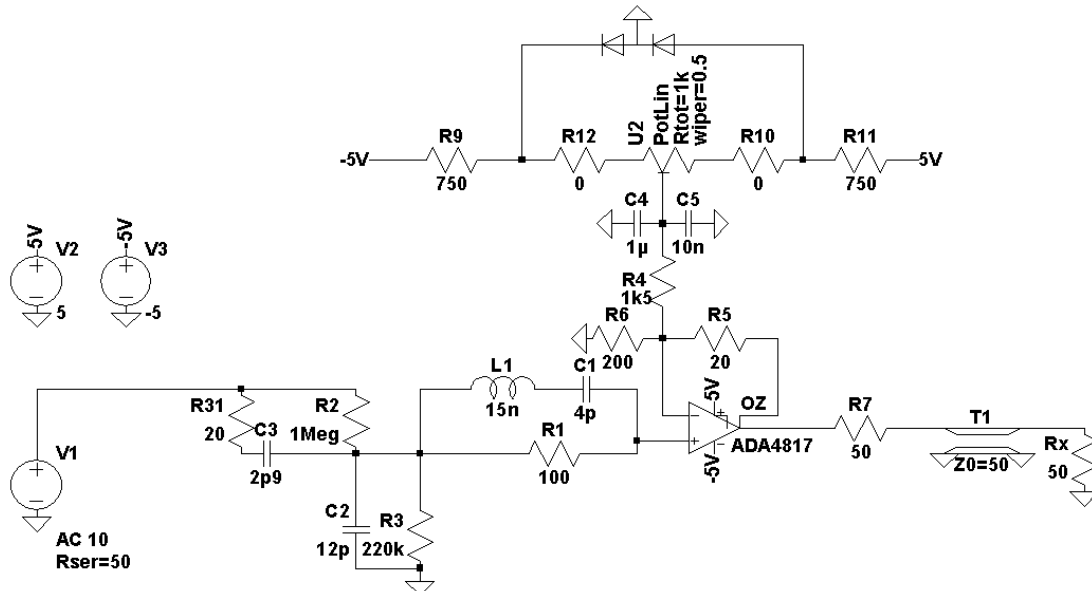
Část vedle vstupního děliče, tvořená z odporu  $R_1$ ,  $L_1$  a  $C_1$ , je zapojení doporučené v datovém listě operačního zesilovače ADA4817. Toto zapojení kompenzuje zvlnění na konci frekvenční charakteristiky.

Další část je tvořena operačním zesilovačem ADA4817 s velmi malým zesílením ve zpětné vazbě. Výpočet zesíleného napětí  $U_{oz}$  je uveden v rovnici 4.5. Na výstupu operačního zesilovače je odpor o velikosti  $50 \Omega$  pro přizpůsobení výstupu sondy do koaxiálního kabelu  $50 \Omega$  a na vstup osciloskopu  $50 \Omega$ . Na tomto odporu dochází k zeslabení signálu o jeho polovinu. Celkové dělení sondy je 10:1.

$$U_{oz} = U_{dělč} * \left(1 + \frac{R_5}{R_6}\right) = 1,8 * \left(1 + \frac{20}{200}\right) = 2 V \quad (4.5)$$

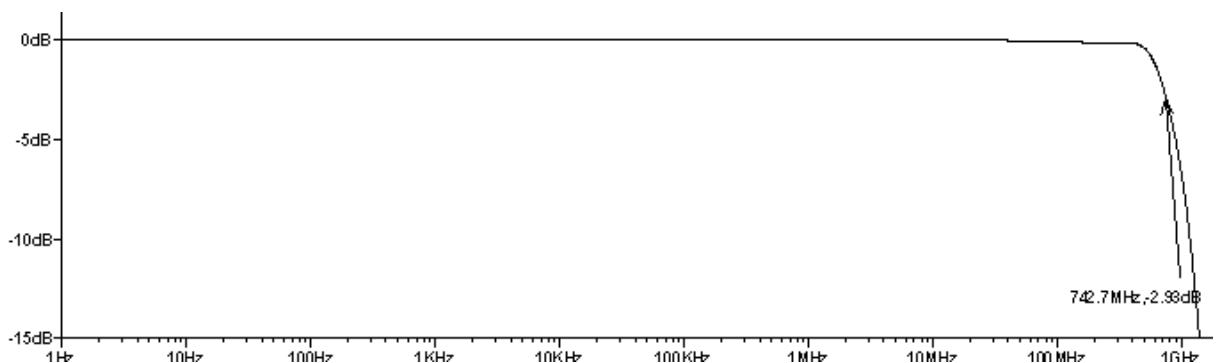
Poslední část připojená do zpětné vazby slouží k nastavení vstupního offsetu operačního zesilovače na 0 voltů. Paralelně k odporu  $R_6$  je připojen 7,5x větší odpor s kondenzátorem proti zemi, aby se tato větev co nejméně projevovala do zpětné vazby. K odporu  $R_6$  je dále připojen trimer, který bude k nastavování pevné hodnoty offsetu.

Napájení je k tomuto trimeru přivedeno přes odpory a paralelní diody k docílení stabilních napětí. Změnou polohy jezce u trimeru se vstupní offset změní maximálně o  $\pm 5$  mV.



Obrázek 4.1: Schéma jednocestné sondy

Podle simulátoru je šířka pásma při poklesu o -3 dB na hodnotě přes 740 MHz. Graf s hodnotou mezní frekvence ze simulátoru je na obrázku 4.2. Maximální šířka pásma je ale omezena parametry operačního zesilovače. Tedy při 8 V na vstupu by mělo být možné přenést sinusový signál o frekvenci asi jen 200 MHz.



Obrázek 4.2: AC Analýza jednocestné sondy

#### 4.1.2 Dvoucestná sonda

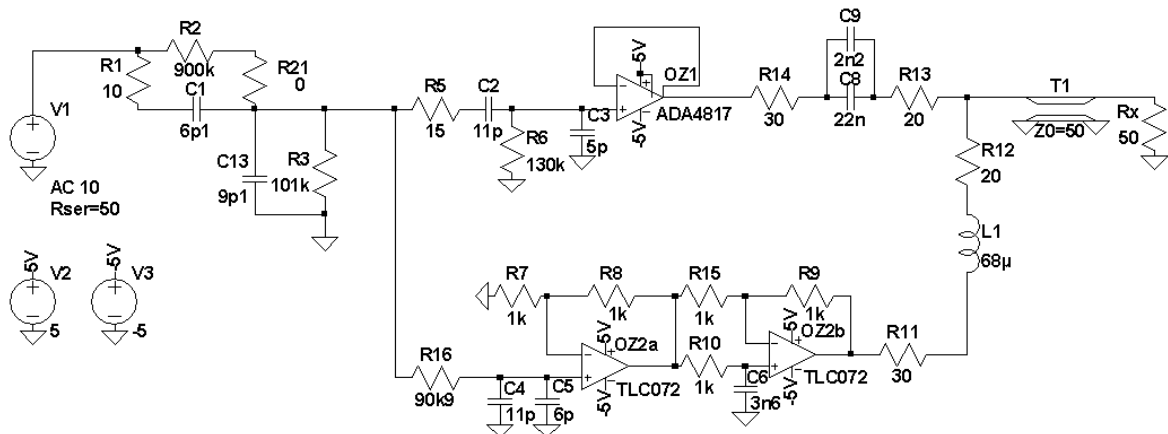
Vstup je tvořen společným kompenzovaným děličem pro obě cesty. Ve srovnání s předchozí variantou je tento dělič 10:1 pro NF cestu a přibližně 3:1 pro VF cestu. V sérii s kompenzačním kondenzátorem je přidán odpor  $R_1$  pro zvýšení impedance

sondy při měření vyšších kmitočtů. Výpočet napětí za společným odporovým děličem je uveden v rovnici 4.6 a výpočet napětí za společným kapacitním děličem je uveden v rovnici 4.7, jde o napětí na kondenzátoru  $C_{13}$ . Napětí  $U_{C_{oz1}}$  na vstupu OZ je v rovnici 4.8. Hodnota  $C_{oz1}$  je odpor nahrazující celkovou kapacitu vstupu OZ1 a kondenzátorů  $C_6$  a  $C_2$ , hodnota  $R_{oz2}$  je odpor nahrazující celkový odpor vstupu OZ2 a odporu  $R_{16}$ . Odporů  $R_1$  a  $R_5$  jsem zanedbal z důvodu jejich malé velikosti.

$$U_{d\acute{e}li\acute{c}} = U_{V1} \frac{R_3 R_{oz2}}{R_2 R_3 + R_2 R_{oz2} + R_3 R_{oz2}} = 1 \text{ V} \quad (4.6)$$

$$U_{C\_d\acute{e}li\acute{c}} = U_{V1} \frac{C_1}{C_1 + C_{13} + C_{oz1}} = 3,18 \text{ V} \quad (4.7)$$

$$U_{C\_OZ1} = U_{C\_d\acute{e}li\acute{c}} \frac{C_2}{C_2 + C_3 + C_{in}} = 2 \text{ V} \quad (4.8)$$

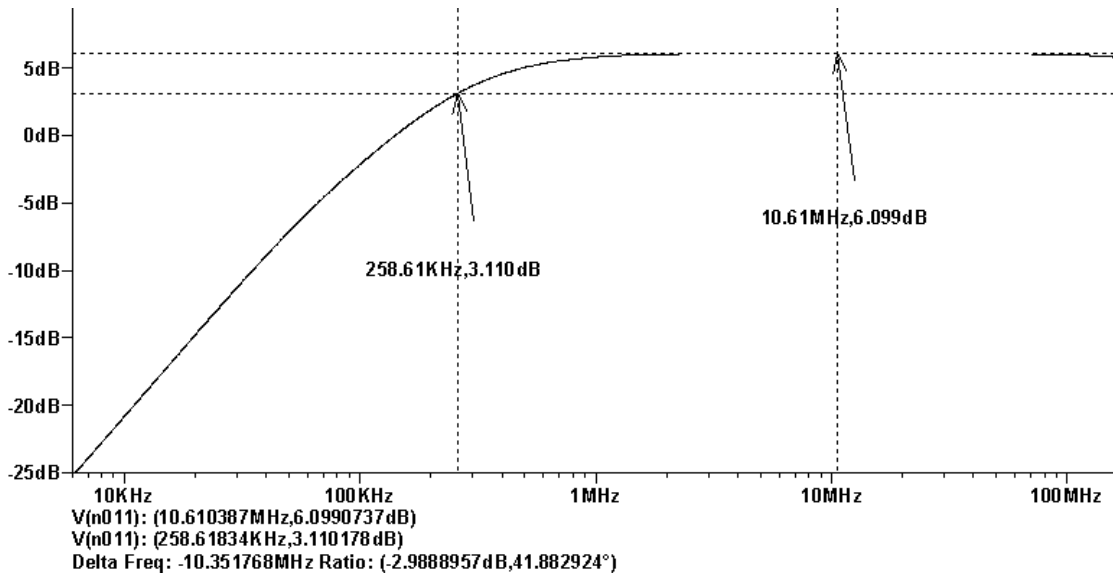


Obrázek 4.3: Schéma dvoucestné sondy

Za společným děličem je signál rozdělen filtrem horní propust pro VF cestu a filtrem dolní propust pro NF cestu. Pro návrh filtrů jsem používal program FilterPro od Texas Instruments. Nejprve jsem zkoušel nastavit oba filtry na stejnou mezní frekvenci, ale v simulaci se mi nedařilo spojit obě cesty tak, aby se na frekvenční charakteristice netvořilo zvlnění. Téměř rovné charakteristiky jsem dosáhl až nastavením filtrů s mírným překrytím.

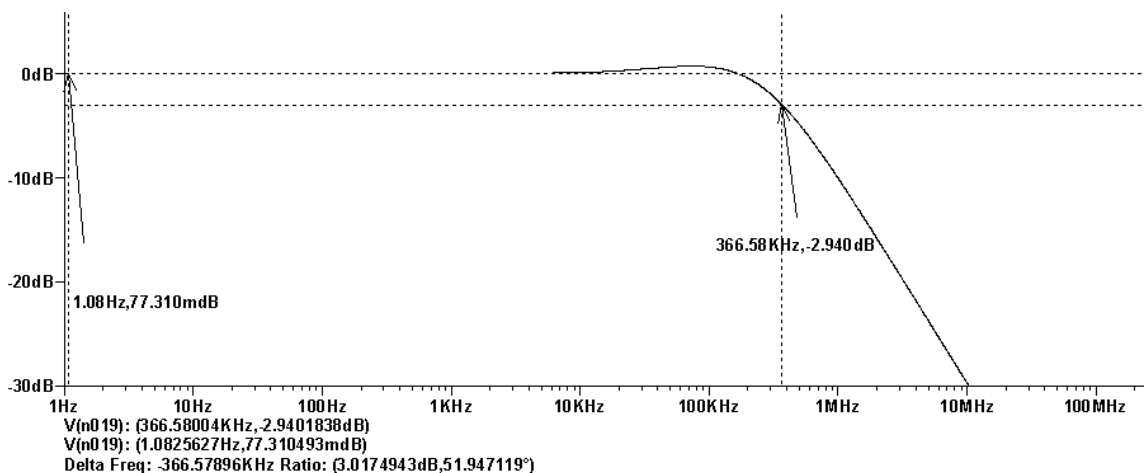
Filtr HP má mezní kmitočet 260 kHz. Kondenzátor  $C_2$  je ve filtru pro horní propust, kde je zároveň vazebním kondenzátorem pro odfiltrování stejnosměrné složky, a s kondenzátorem  $C_3$  tvoří kapacitní dělič. Za tímto děličem je signál zeslaben podle rovnice 4.8. Další zapojení ve VF cestě je sledovač s operačním zesilovačem ADA4817. Za operačním zesilovačem je  $50 \Omega$  přizpůsobení z odporů  $R_{13}$  a  $R_{14}$ , jimiž je dosaženo celkové dělení cesty 10:1. Mezi těmito odpory jsou vazební kondenzátory  $C_8$  a  $C_9$

pro filtraci stejnosměrného nebo nízkofrekvenčního signálu z NF cesty. Mezní frekvence pro HP určená v simulačním programu LT-Spice je na obrázku 4.4. Průběh frekvenční charakteristiky je měřen na vstupu OZ ADA4817, tedy na kondenzátoru  $C_3$ .



Obrázek 4.4: Mezní kmitočet pro HP

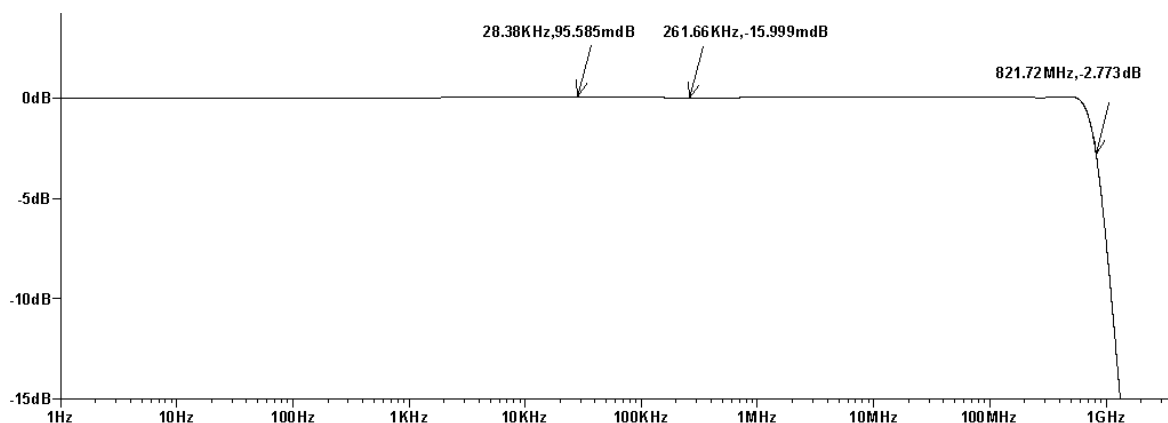
Filtr DP má mezní kmitočet 370 kHz. Pro NF cestu jsem použil operační zesilovač TLC072. Důležité parametry pro správnou funkci v NF cestě jsou nízké rušení zesilovače a nízký vstupní napěťový offset, protože u dvoucestné sondy není obvod pro nastavení offsetu. Tento OZ je zapojen za filtrem DP jako neinvertující zesilovač se zesílením 2. Zesílení je nutné, protože na výstupním přizpůsobení  $50 \Omega$  dojde opět k zeslabení signálu o polovinu. Celkový dělicí poměr NF cesty je 10:1. Mezní frekvence pro filtr DP určená v simulačním programu LT-Spice je na obrázku 4.5. Průběh frekvenční charakteristiky je měřen na vstupu OZ TLC072, tedy na kondenzátoru  $C_5$ .



Obrázek 4.5: Mezní kmitočet pro DP

Druhé zapojení v NF cestě je all-pass filtr. Toto zapojení je tvořené operačním zesilovačem TLC072, má přenos signálu 1, ale otáčí fázi podle nastaveného filtru u neinvertujícího vstupu. Zapojení all-pass filtr jsem přidal z důvodu, abych srovnal fázi mezi VF a NF cestou, protože ve VF cestě dochází ke změně fáze při průchodu vazebními kondenzátory. Na konci NF cesty je opět  $50\ \Omega$  přizpůsobení tvořené z odporů  $R_{12}$  a  $R_{11}$ . Mezi těmito odpory je cívka k omezení průchodu VF signálu do výstupu OZ TLC072 v all-pass filtru.

Cívka  $L_1$  s vazebními kondenzátory  $C_8$  a  $C_9$  tvoří diplexer, který funguje jako frekvenční výhybka a slouží také ke sloučení signálů. K návrhu diplexeru jsem použil stejnojmenný program DiplexerDesign. Použití je především v akustice k rozdělení na více cest nebo ke sloučení signálu do jedné cesty. Zapojení tedy funguje obousměrně.



Obrázek 4.6: AC Analýza dvoucestné sondy

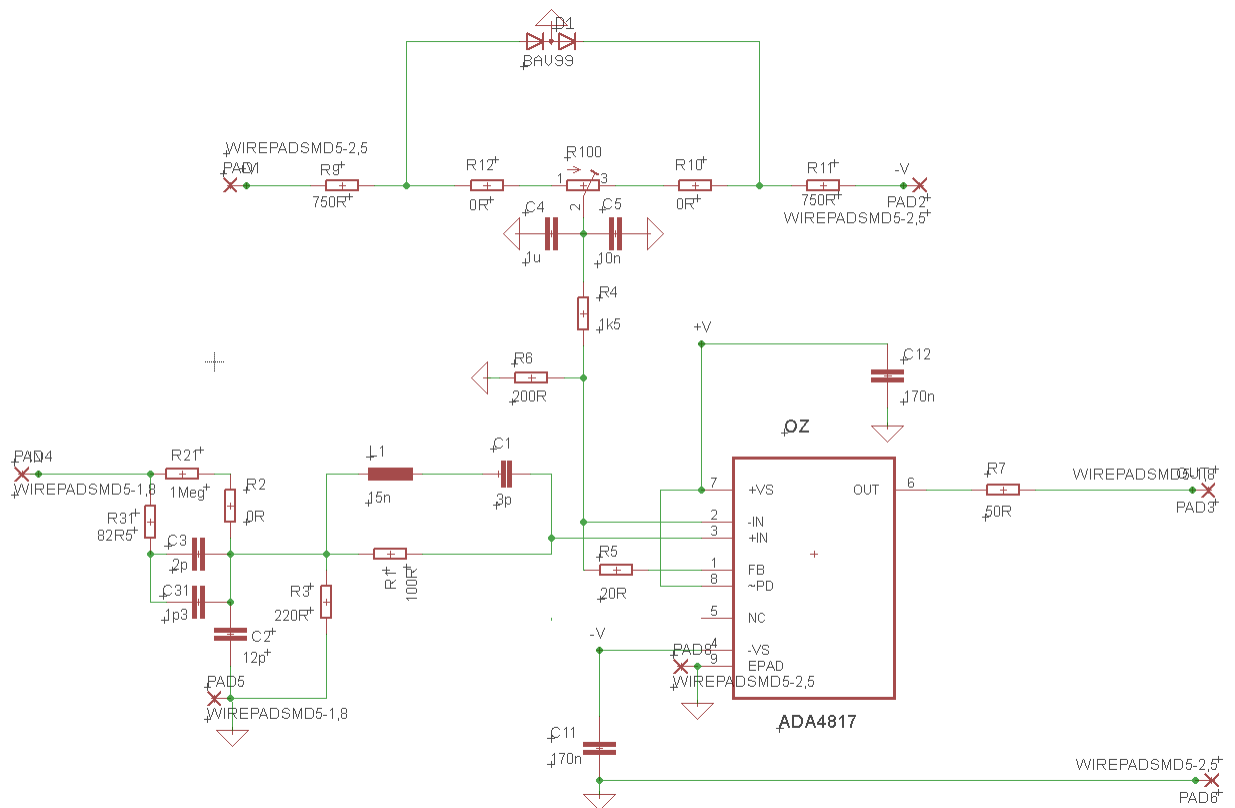
Na obrázku 4.6 je frekvenční charakteristika měřená na výstupu sondy. Rozdíl mezi maximálním a minimálním vychýlením v oblasti napojení horní a dolní propusti je přibližně 0,1 dB. Tuto hodnotu jsem považoval za uspokojivou. Maximální šířka pásma, tedy při poklesu o 3 dB, je necelých 830 MHz. Hodnota je o trochu vyšší než u jednocestné sondy. Také u této varianty nelze dosáhnout maximální šířky pásma při amplitudě 8 V na vstupu.

## 4.2 Tvorba layoutu a realizace

Po ukončení simulace s docílením vyhovující charakteristiky bylo nutné vytvořit layout. Pro návrh layoutu jsem použil program Eagle. S tímto programem jsem měl zkušenost již z bakalářského studia a výhodou je i stažení free verze pro jednoduchá schémata.

### 4.2.1 Schéma a layout jednocestné varianty

Schéma v simulátoru LT-Spice je v návrhovém prostředí Eagle trochu odlišné. Do schématu jsem přidal navíc 6 součástek, jedná se o odpory  $R_{21}$ ,  $R_{31}$  a o kondenzátory  $C_{31}$ ,  $C_{10}$ ,  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ . Přidané součástky ve vstupním děliči jsou k dosažení přesné hodnoty při použití reálných součástek,  $C_{11}$  a  $C_{12}$  jsou blokovací kondenzátory u napájení. Během testování pak bylo nutné změnit některé hodnoty součástek. Ve schématu na obrázku 4.7 jsou osazené hodnoty součástek, s kterými prošla sonda celým testováním.



Obrázek 4.7: Schéma jednocestné varianty

Rozmístění na DPS jsem realizoval podle několika pravidel:

- spoje mezi součástkami v signálové cestě musí být co nejkratší
- součástky jsou osazené z jedné strany, z druhé je zemní plocha
- blokovací kondenzátory jsou co nejbližší k napájecím pinům součástky

Výsledný layout, který byl odeslán k výrobě firmě PragoBoard s.r.o. je v příloze 1. Rozměry destičky jsou 44 x 17 mm. PAD4 je ploška pro vstupní hrot, PAD5 je ploška k uzemnění vstupu do měřeného obvodu, PAD2 je pro napájecí kontakt -5 V, PAD1 je napájecí kontakt +5 V, PAD8 je uzemnění od napájení, PAD3 je výstup

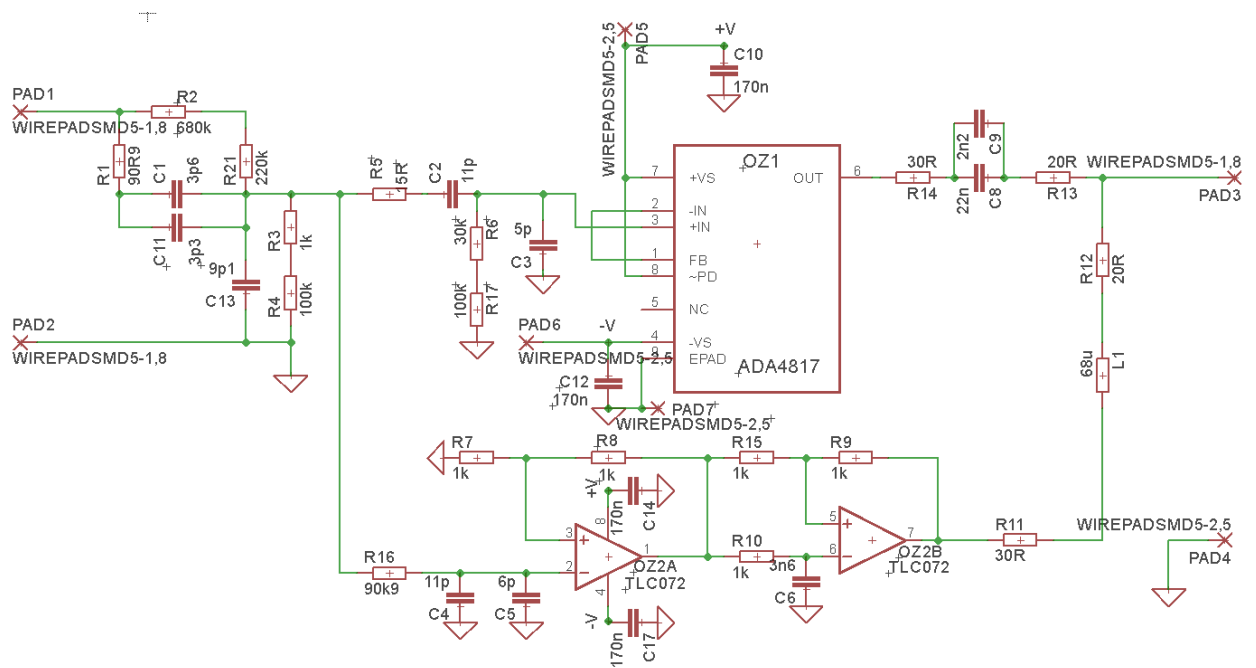


signálu, tedy ploška pro zapájení středového vodiče v koaxiálním kabelu zakončeným konektorem BNC a PAD6 je k připájení stínění v koaxiálním kabelu. Vyvrtané otvory na pravé straně desky jsou k uchycení kabelů k destičce.

Layout je dvouvrstvý, z jedné strany jsou cesty s osazenými součástkami, z celé druhé strany je rozlitaná zem. V horní vrstvě TOP je zem rozlitaná pouze na okraji, s vrstvou BOTTOM je spojená prokovy.

#### 4.2.2 Schéma a layout dvoucestné varianty

Také u dvoucestné varianty jsem musel přidat do layoutu několik součástek. Ve vstupu jsem přidal odpory  $R_4$  a  $R_{17}$  a kondenzátor  $C_{11}$ , aby bylo možné dosáhnout přesných hodnot při osazování DPS. Ke kontaktům napájení jsem přidal blokovací kondenzátory  $C_{10}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{14}$  a  $C_{17}$ . Do výstupu jsem přidal plošky pro kondenzátor  $C_7$ , pokud by bylo nutné udělat s cívkou  $L_1$  diplexer druhého řádu, jinak se osazovat nebude. Na obrázku 4.8 jsou opět uvedeny hodnoty součástek, s kterými sonda absolvovala všechny testy k ověření parametrů.



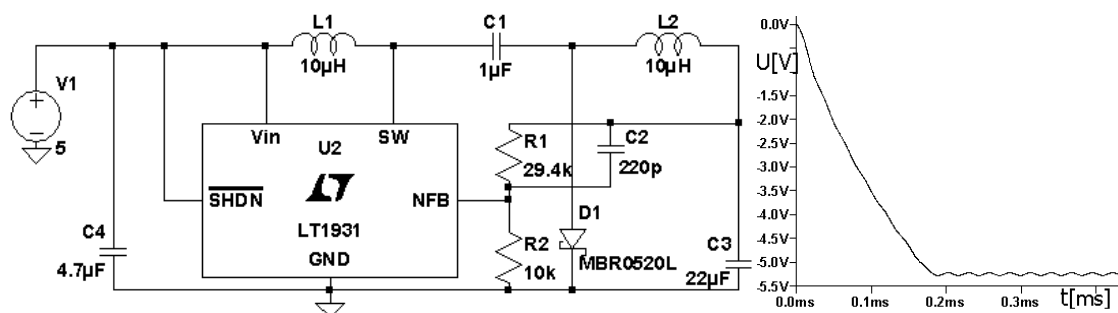
Obrázek 4.8: Schéma dvoucestné varianty

Rozmístění součástek na DPS je podle stejných pravidel jako u jednocestné varianty, jen napájecí plošky a cesty k napájecím kontaktům OZ jsem vedl ve vrstvě BOTTOM. Napájecí cesty jsou mimo VF vstupní část, aby nedocházelo k ovlivňování

VF signálu. Rozměry DPS jsou 46 x 19 mm. Obrázek layoutu z programu Eagle je v příloze 1.

### 4.2.3 Napájení $\pm 5$ V z USB

Sondy během testování byly napájeny ze zdroje napětí  $\pm 5$ V. Napájecí napětí 5V bylo zvoleno při návrhu proto, aby bylo možné použít napájení z USB, které má většina osciloskopů. Jelikož je možné použít z USB jen +5V a GND, k vytvoření záporného napětí -5 V jsem našel a nasimuloval obvod s použitím součástky LT1931. Tento obvod je doporučené zapojení v datovém listě součástky.



Obrázek 4.9: Schéma zapojení a graf výstupního napětí

## 4.3 Testování sond

Před samotným měřením jsem musel DPS nejdříve osadit součástkami, měřicími hroty a připojit napájecí a koaxiální kabel. U obou sond byly zjištěny ve srovnání se simulací podobné nedostatky, bylo nutné donastavit vstupní dělič a nelineární zesílení na frekvenční charakteristice ve VF části. Zhotovené DPS jednocestné sondy i dvoucestné sondy jsou na obrázcích v příloze 2. Seznamy součástek jsou v příloze 3.

### 4.3.1 Příslušenství potřebné k měření

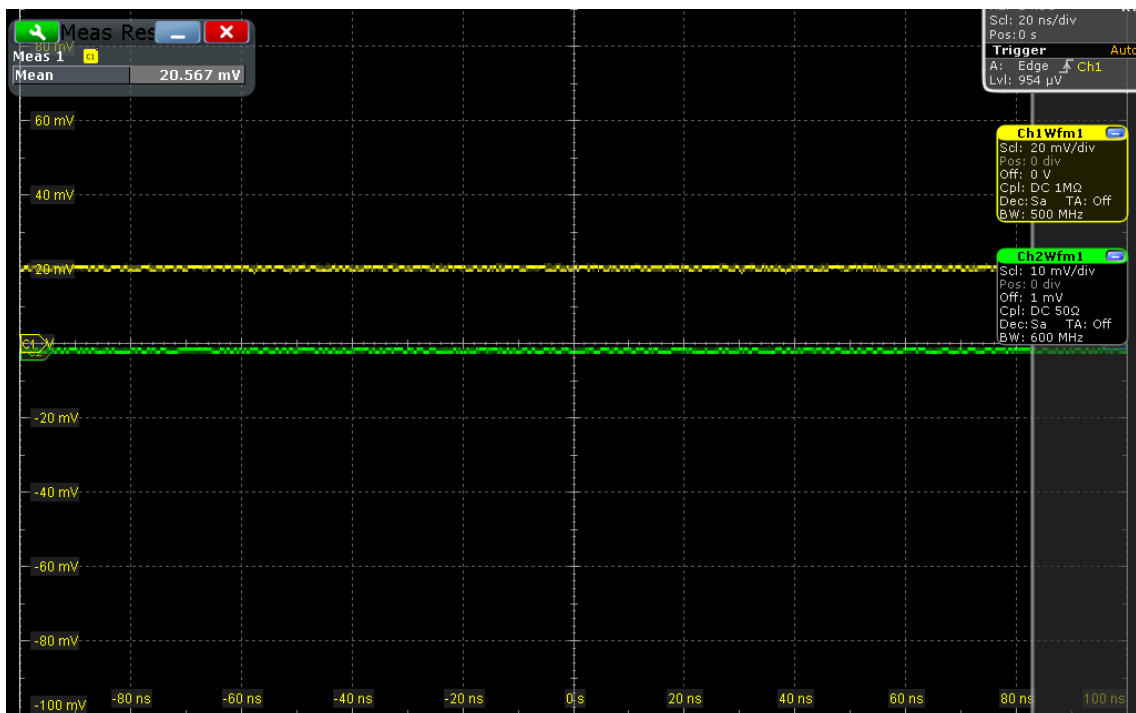
K připojení sondy na vstup generátoru s minimální parazitní indukčností bylo nutné vyrobit přípravek složený z BNC konektoru a dvoupinové dutinky s roztečí 2,56 mm. Pro správné přizpůsobení 50-ti ohmového výstupu generátoru je nutné použít průchozí zakončovací 50-ti ohmový článek. Ten je připojen mezi výstup generátoru a vyrobenou přechodku k připojení vstupu sondy.



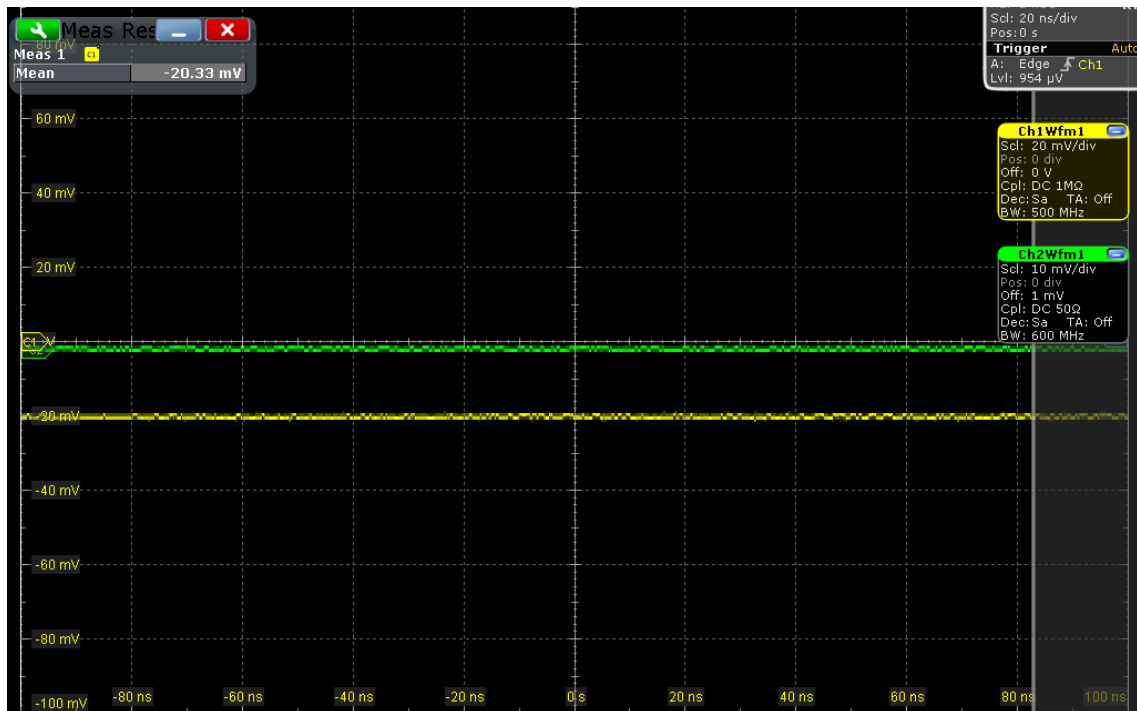
Obrázek 4.10: Připojení sondy na výstup generátoru

### 4.3.2 Nastavitelný DC offset u jednocestné sondy

U jednocestné varianty je část obvodu k nastavení DC offsetu operačního zesilovače. Pomocí osciloskopu R&S<sup>®</sup> RTO1014 jsem ověřil funkčnost tohoto obvodu otáčením nastavitelného trimru. Výsledkem je možnost nastavit offset přibližně o  $\pm 20$  mV. Přesné výsledky z osciloskopu jsou na obrázku 4.11 a obrázku 4.12.



Obrázek 4.11: Maximální nastavení kladného napětí

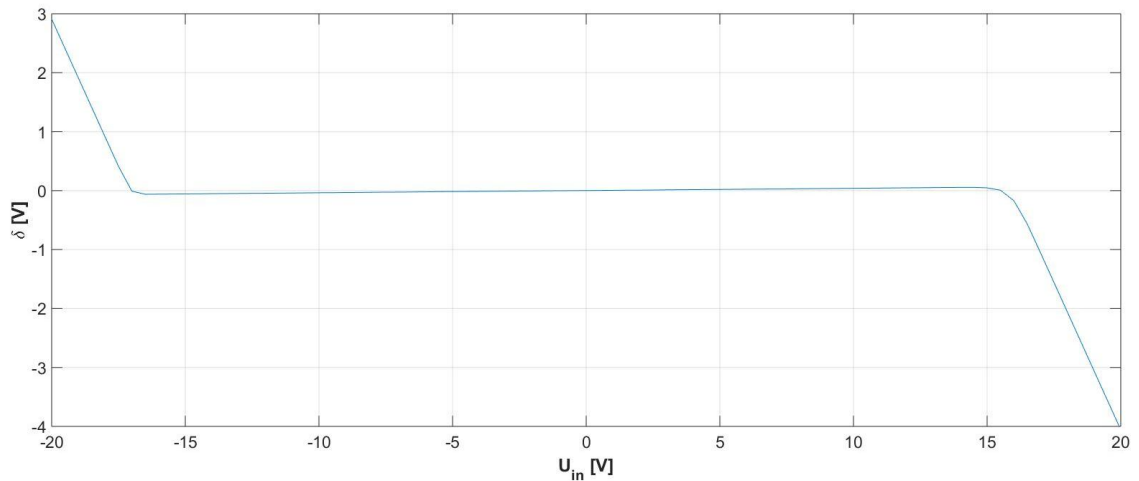


Obrázek 4.12: Maximální nastavení záporného napětí

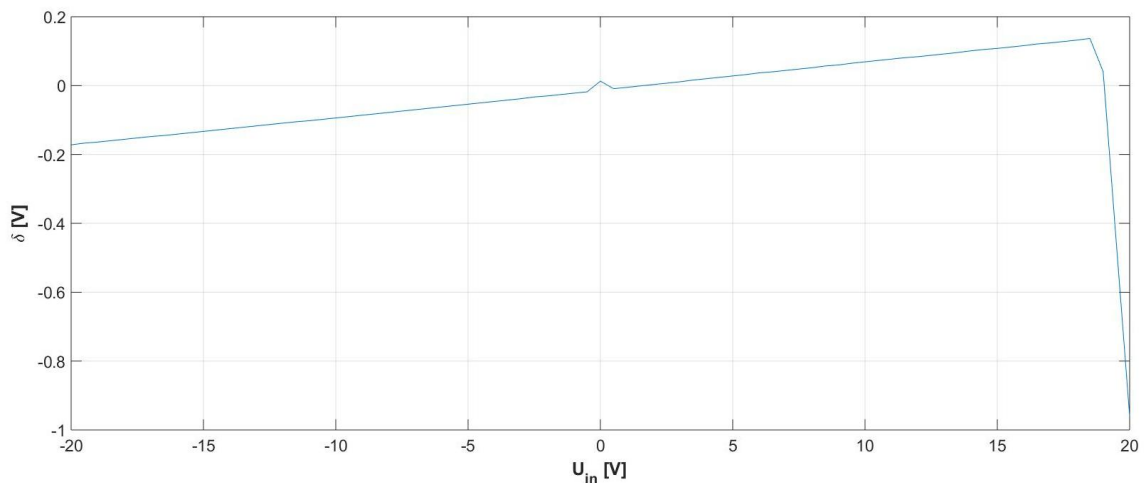
### 4.3.3 Linearita DC napětí

Po nastavení offsetu na 0 V u jednocestné sondy jsem ověřil linearitu pro různé úrovně napětí u obou sond. K měření jsem použil zdroj HMP4040 a dva DMM Keysight 34470A. S jedním DMM jsem ověřoval nastavené napětí, s druhým jsem měřil výstupní napětí ze sondy. V grafu je na vodorovné ose vynesena hodnota nastaveného napětí a na svislé ose je zobrazena delta  $\delta$ , která představuje rozdíl nastaveného  $U_{in}$  a změřeného napětí  $U_{meas}$  ve voltech podle rovnice 4.9. Nulové napětí jsem měřil propojením zemnicího a signálového hrotu.

$$\delta = (10 * U_{meas}) - U_{in} \quad (4.9)$$



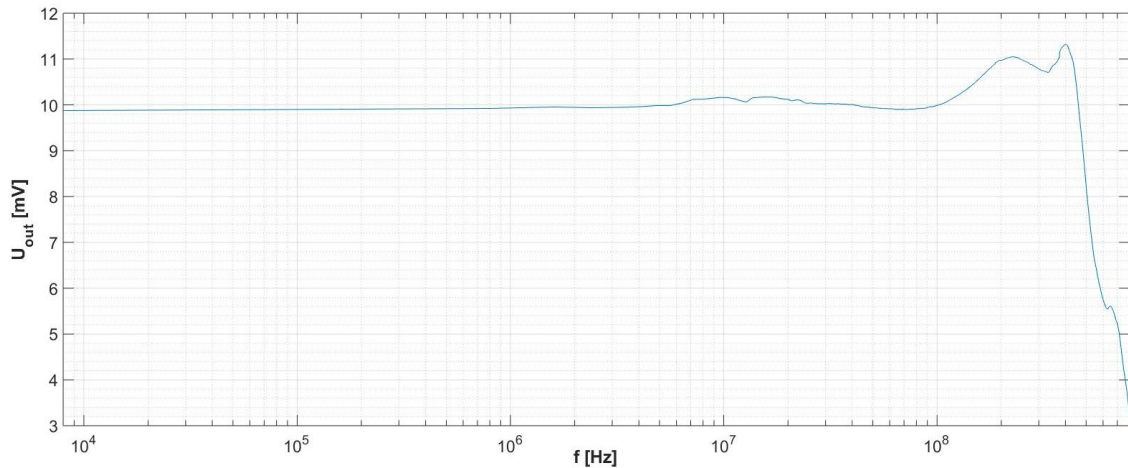
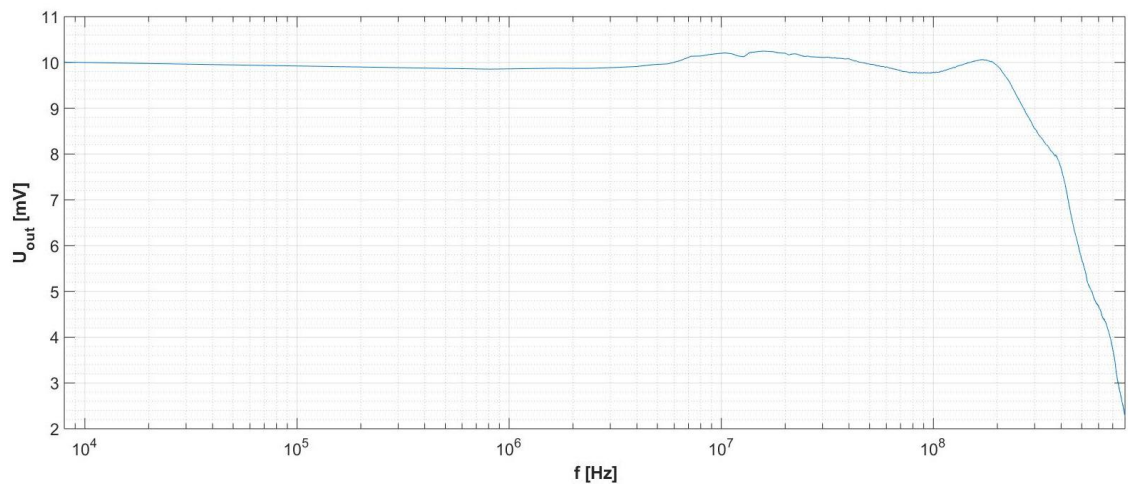
Obrázek 4.13: Delta napětí u jednocestné sondy



Obrázek 4.14: Delta napětí u dvoucestné sondy

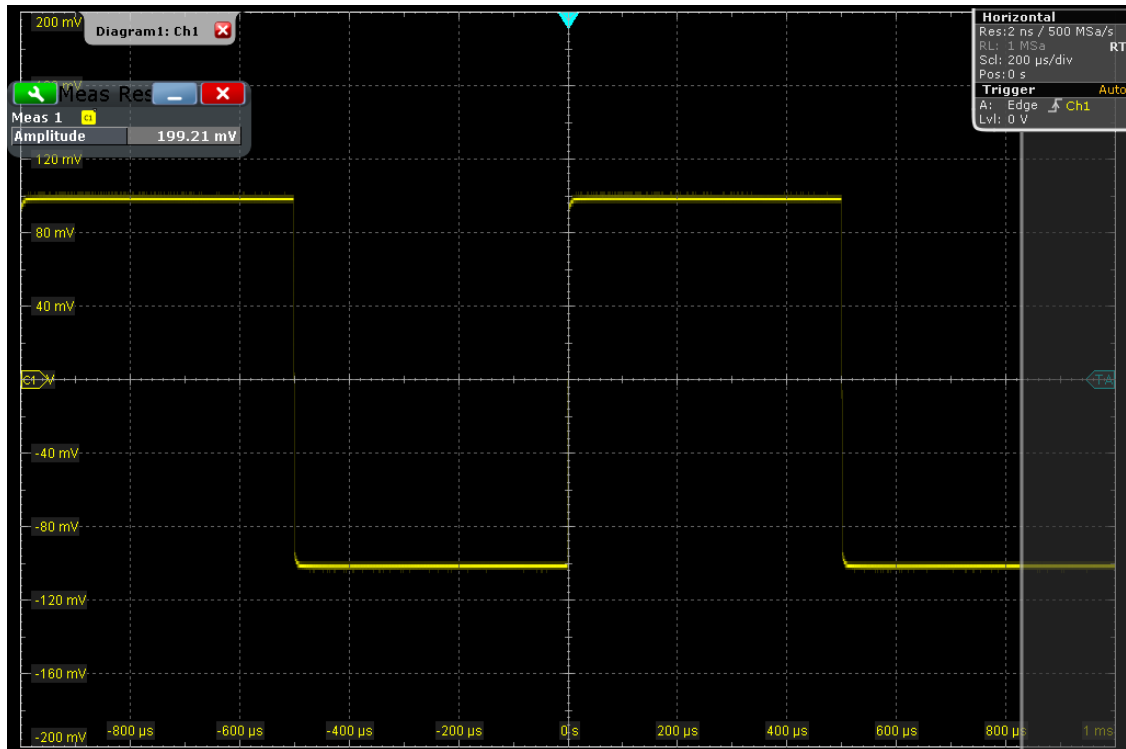
#### 4.3.4 Frekvenční charakteristika

Další měření je ověření frekvenční charakteristiky. Aby byl změřen dostatečný počet bodů na frekvenční charakteristice, bylo nutné měření automatizovat přes program Matlab. Zdrojový kód v Matlabu je přiložen v příloze 4. K měření jsem použil generátor R&S<sup>®</sup> SMB100A s příslušenstvím pro sondu a osciloskop R&S<sup>®</sup> RTO1014 k měření výstupního napětí sondy. V grafu je na vodorovné ose zobrazena frekvence signálu, na svislé ose je výstupní napětí  $U_{out}$  v milivoltech.

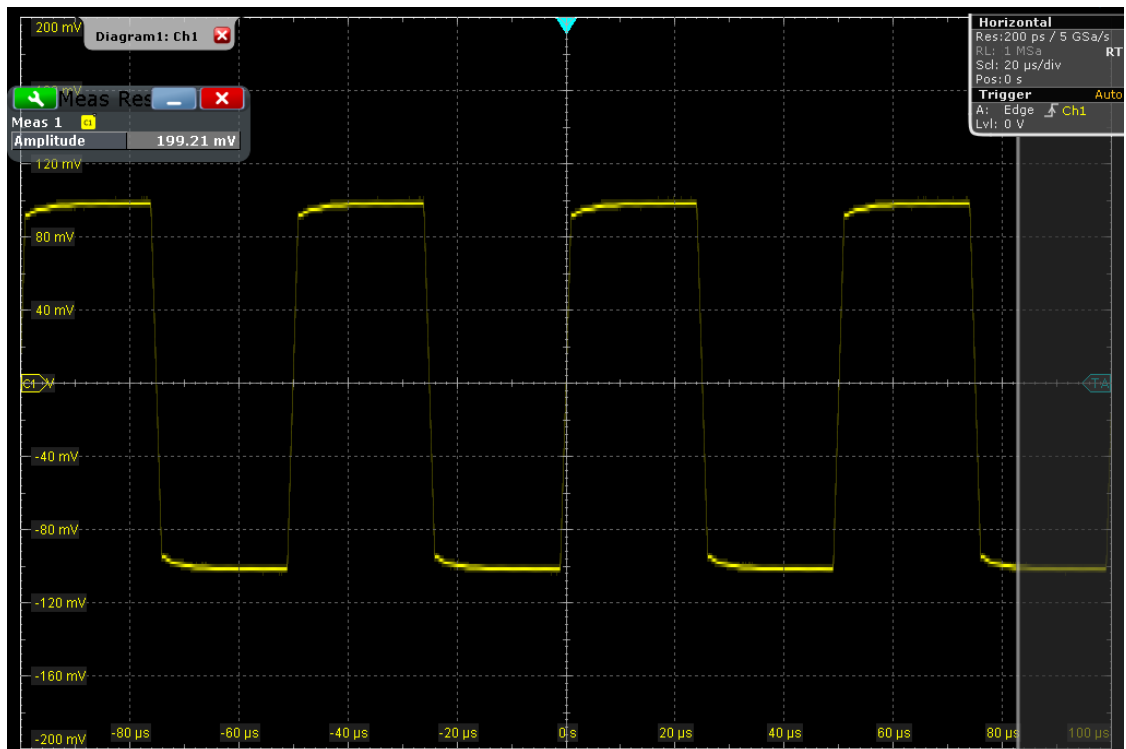
**Obrázek 4.15:** Frekvenční charakteristika jednocestné sondy**Obrázek 4.16:** Frekvenční charakteristika dvoucestné sondy

### 4.3.5 Přenos obdélníkového signálu

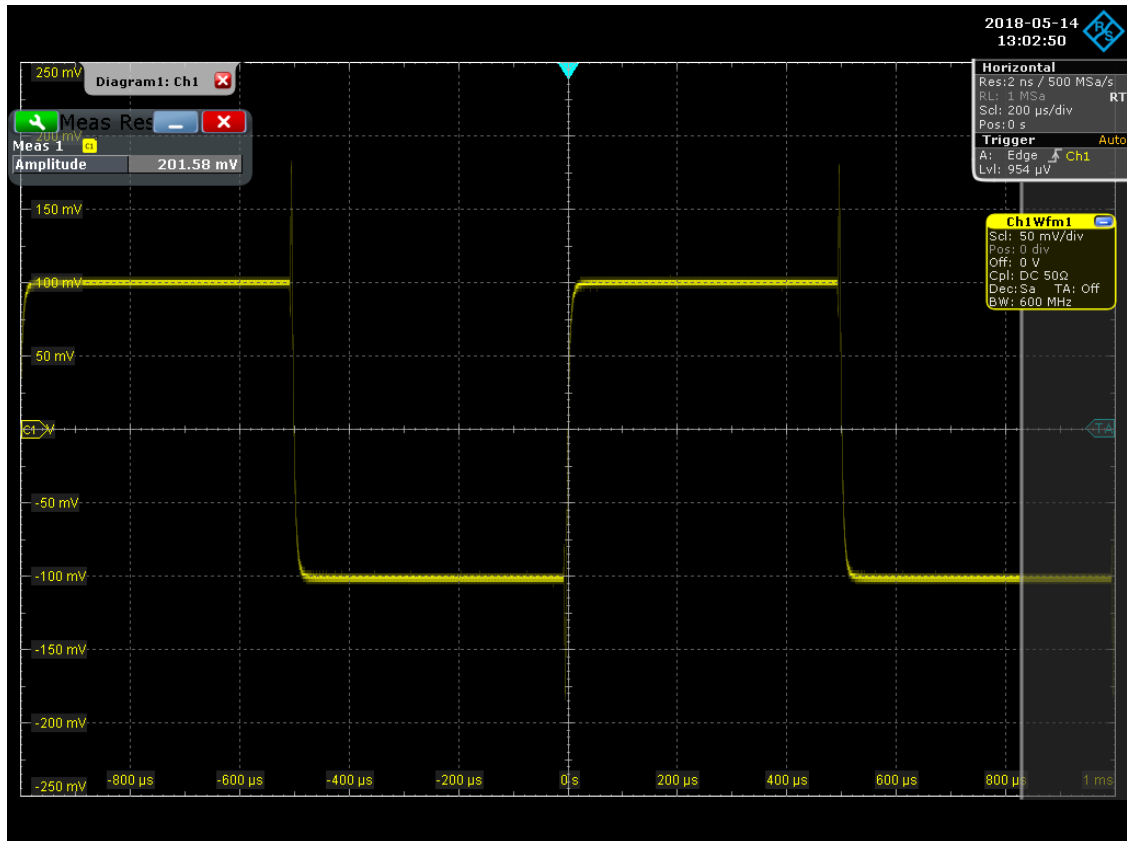
Pomocí generátoru R&S<sup>®</sup>SMB100A jsem ověřil přenos obdélníkového signálu. Ten bylo možné sledovat pouze do maximální výstupní frekvence generátoru 20kHz. Výstupní signál ze sondy byl opět měřen osciloskopem R&S<sup>®</sup>RTO1014.



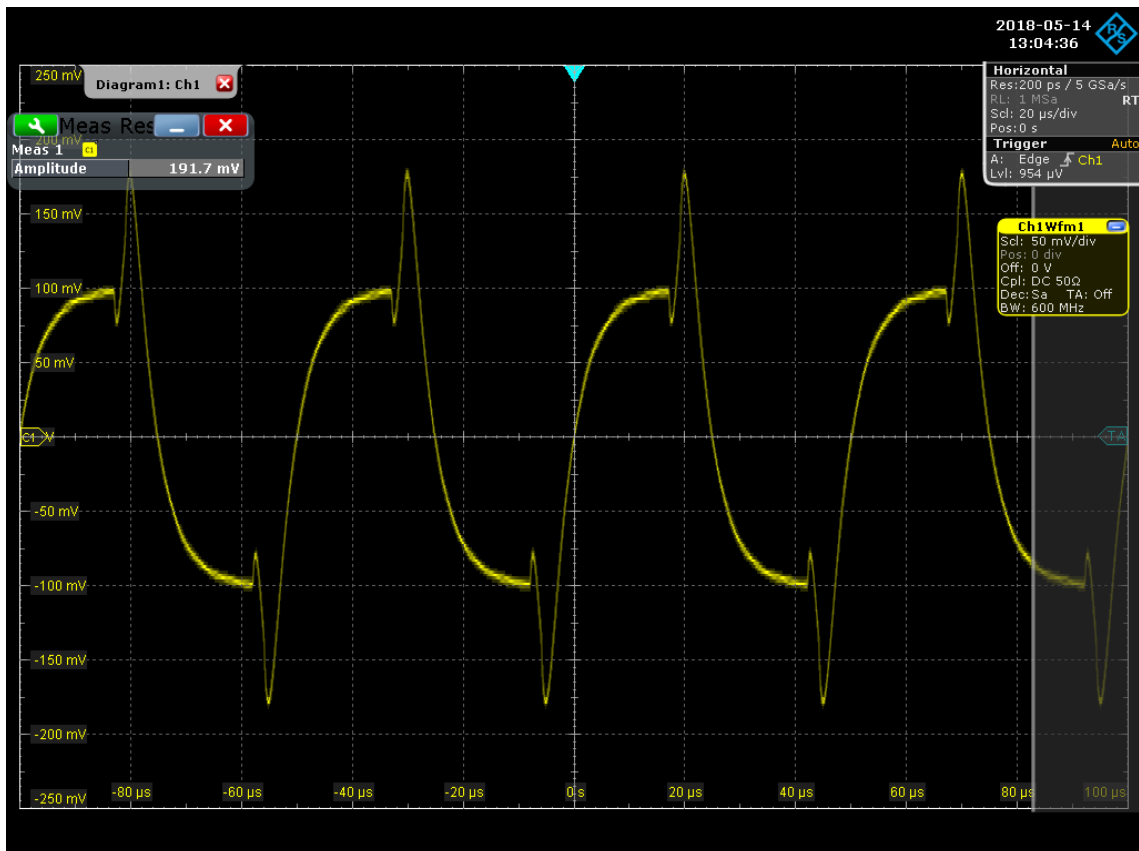
Obrázek 4.17: Zobrazení obdélníkového signálu 1 V 1 kHz u jednocestné sondy



Obrázek 4.18: Zobrazení obdélníkového signálu 1 V 20 kHz u jednocestné sondy



Obrázek 4.19: Zobrazení obdélníkového signálu 1 V 1 kHz u dvoucestné sondy

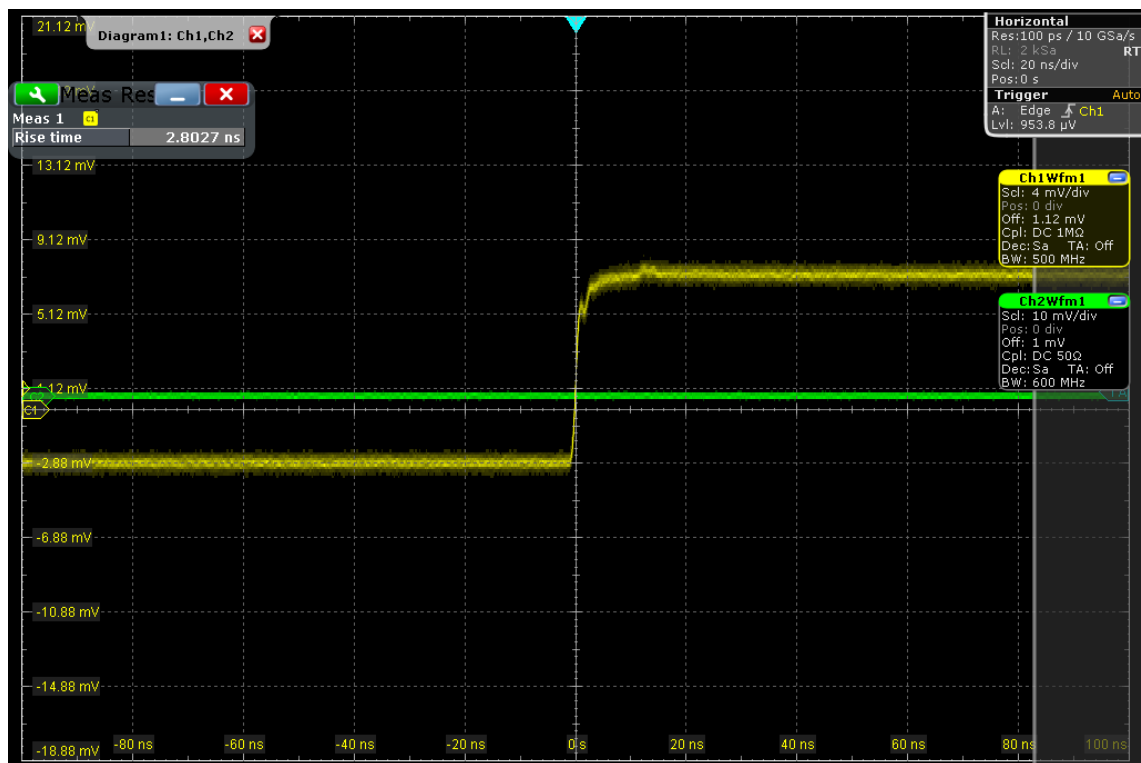


Obrázek 4.20: Zobrazení obdélníkového signálu 1 V 20 kHz u dvoucestné sondy

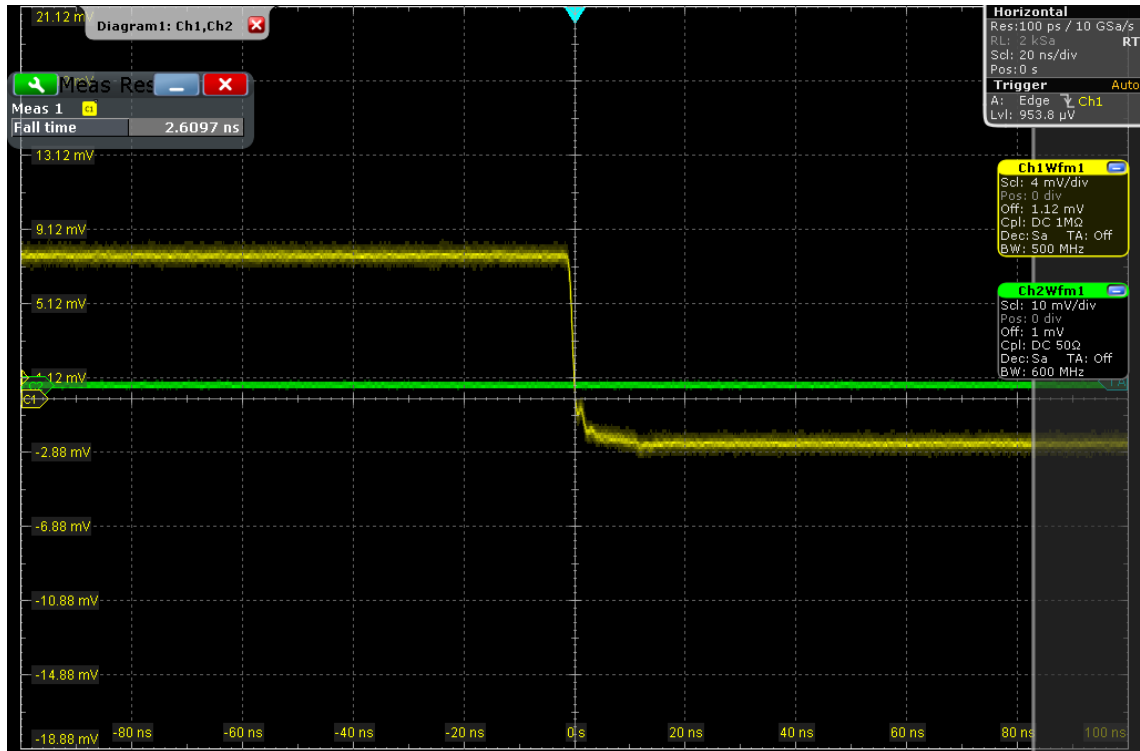


### 4.3.6 Doba vzestupné a sestupné hrany

Poslední měření je doba vzestupné a sestupné hrany velmi rychlých obdélníkových průběhů. Z přenosu obdélníků v bodě 4.3.5 je vidět, že měření je možné realizovat pouze u jednocestné sondy. Na tvorbu velmi rychlých obdélníků jsem použil generátor Hameg HZ620, k měření osciloskop R&S® RTO1014.



Obrázek 4.21: Čas vzestupné hrany



Obrázek 4.22: Čas sestupné hrany

## 5 Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout aktivní sondu k osciloskopu podle zadaných parametrů, následně realizovat a ověřit parametry měřením. Během simulace v programu LT-Spice byly vytvořeny dvě varianty obvodového řešení. První varianta je aktivní sonda s nastavitelným offsetem, tzv. jednocestná sonda. Druhá varianta je aktivní sonda s dvěma operačními zesilovači, tzv. dvoucestná sonda. U obou variant byla provedena simulace průběhů a poté také realizace. Postupný průběh návrhu je popsán v kapitolách 4.2 a 4.3 této diplomové práce.

Během ožívování sond nevznikly žádné potíže, pouze u dvoucestné sondy došlo k záměně vstupů při nevhodně zvoleném výběru pouzdra operačního zesilovače v návrhovém prostředí Eagle. Tím došlo k nesprávnému propojení pinů u LTC072 na DPS. Problém byl vyřešen přemostěním cesty vodičem od kondenzátoru  $C_5$  ke třetímu pinu, pak od kondenzátoru  $C_6$  k pátému pinu a přeříznutím stávajících cest. Tato úprava nezpůsobila žádný vliv na naměřené výsledky, jelikož operační zesilovač LTC072 je v cestě pouze pro nízké frekvence.

V průběhu praktického testování obou sond bylo provedeno měření napěťové DC linearity sondy, frekvenční charakteristiky a přenosu obdélníkových pulzů. Testování regulace offsetu a doby vzestupné a sestupné hrany byly změřeny pouze u jednocestné varianty, protože u dvoucestné sondy tato měření nebyla možná.

Regulace offsetu jednocestné sondy byla při simulaci vyšetřována přibližně na  $\pm 5$  mV. Podle měření v kapitole 4.3.2 bylo zjištěno, že je možné regulaci offsetu provést v rozsahu až  $\pm 20$  mV. Zvětšený rozsah regulace sondy nezpůsobuje problémy při praktickém nastavení offsetu, proto nejsou nutné žádné úpravy obvodového provedení sondy.

Minimální vstupní rozsah napětí sondy byl v úvodu praktické části stanoven na  $\pm 8$  V. Z grafů na obrázcích 4.13 a 4.14 v kapitole 4.3.3 plyne, že sondy umožňují zpracovat vstupní signály ve větším rozsahu, než vznikne zkreslení zkoumaného signálu vlivem saturace. U jednocestné sondy je to přibližně  $\pm 16$  V. U dvoucestné sondy je to přibližně  $\pm 19$  V. Z obrázku 4.14 plyne, že vstupní DC signál ovlivňuje také DC offset sondy, který je způsoben specifickými vlastnostmi použitého operačního zesilovače TLC072.

Frekvenční rozsah sondy byl v úvodu praktické části stanoven od DC do 100 MHz. Splnění požadovaného parametru je popsáno v kapitole 4.3.4, na obrázcích 4.15 a 4.16. Frekvenční charakteristiky byly změřeny od 8 kHz výše z důvodu dostupné měřicí techniky. Jednocestná sonda má pro hodnotu vstupního napětí 100 mV lineární kmitočtovou charakteristiku do 400 MHz se zvlněním  $\pm 1$  dB. Dvoucestná sonda má pro hodnotu vstupního napětí 100 mV lineární kmitočtovou charakteristiku do 400 MHz při poklesu o -3 dB. Přenos v oblasti DC signálu byl ověřen již v kapitole 4.3.3 a má stejné vlastnosti jako charakteristika ve středu kmitočtového rozsahu u obou sond.

Přenos obdélníkových průběhů je u dvoucestné varianty při 20 kHz ovlivněn velkým zkreslením. To může být způsobeno nastavením diplexeru. Diplexer je nastaven přibližně na 200 kHz, ale správná hodnota by měla být mezi mezními frekvencemi horní propusti a dolní propusti, tedy mezi 260 kHz a 370 kHz. Na hodnotu 200 kHz byl diplexer nastaven proto, že hodnoty součástek vycházející ze simulace nejsou běžně u dodavatelů sehnatelné. Z tohoto důvodu bylo možné doby vzestupné a sestupné hrany měřit pouze u jednocestné varianty.

Praktická kontrola sond prokázala shodu s výsledky simulace obvodového řešení. Z uvedeného závěru vyplývá, že oba typy sond splňují zadání diplomové práce v plném rozsahu.

## Seznam literatury

- [1] SEIBT, Artur. *Osciloskopy od A do Z: technika obvodů, měřicí praxe, údržba*. Ostrava: HEL, 2000. ISBN 80-86167-11-9.
- [2] Poor man's 500mhz active fet probe with opa659. In: *Welecw2000a* [online]. 2011 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: [http://welecw2000a.sourceforge.net/docs/Hardware/Aktiver\\_Tastkopf\\_mit\\_OPA659.pdf](http://welecw2000a.sourceforge.net/docs/Hardware/Aktiver_Tastkopf_mit_OPA659.pdf)
- [3] HAVLÍK, Ladislav. *Osciloskopy a jejich použití*. Praha: Sdělovací technika, 2002. ISBN 80-901936-8-4.
- [4] Podklady k přednáškám EM2, 5.část. In: *Portal* [online]. 2011 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=57894>
- [5] Tastköpfe und Zubehör Digitale Oszilloskope von Rohde & Schwarz. In: *Rohde & Schwarz* [online]. 2017 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: [schwarz.com/pws/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_brochures\\_and\\_datasheet\\_s/pdf\\_1/Tastkoepfe\\_Zubehoer\\_Digitale\\_Oszilloskope\\_bro\\_de\\_3606-8866-11\\_v1000.pdf](http://schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheet_s/pdf_1/Tastkoepfe_Zubehoer_Digitale_Oszilloskope_bro_de_3606-8866-11_v1000.pdf)
- [6] Vysokofrekvenční a širokopásmové zesilovače. In: *Spsoa-ub* [online]. 2013 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://int.spsoa-ub.cz/projekty/ob21/OP/EL/ZEL/OB21-OP-EL-ZEL-JANC-L-3-040.pps>
- [7] Přednáška8 „Unipolární tranzistory“. In: *Portal* [online]. 2015 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=114031>
- [8] FROHN, Manfred. *Elektronika: polovodičové součástky a základní zapojení*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-123-3.
- [9] Tektronix P6201 manual. In: *Tektronix* [online]. 2002 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: [http://w140.com/tek\\_p6201.pdf](http://w140.com/tek_p6201.pdf)
- [10] Osciloskopické sondy. In: *Coptkm* [online]. 2009 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=5482>
- [11] High Bandwidth Probes Specifications. In: *Rohde & Schwarz* [online]. 2017 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: [https://www.butterfly.com/PDF/rohde-schwarz/probes/RT-Zxx\\_High\\_bandwidth\\_dat-sw\\_en\\_3607-3868-22\\_v2200.pdf](https://www.butterfly.com/PDF/rohde-schwarz/probes/RT-Zxx_High_bandwidth_dat-sw_en_3607-3868-22_v2200.pdf)

- [12] Eigenbautastköpfe. *Mikrocontroller* [online]. 2010 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.mikrocontroller.net/topic/188227>
- [13] Oscilloscope Probes: Theory and Practice. *Syscompdesign* [online]. 2007 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.syscompdesign.com/assets/images/appnotes/probes.pdf>
- [14] DataSheet ADA4817. In: *Analog Devices* [online]. 2018 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: [http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADA4817-1\\_4817-2.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADA4817-1_4817-2.pdf)
- [15] DataSheet TLC072. In: *Texas Instruments* [online]. 2011 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.ti.com/product/TLC072>
- [16] Diplexer design notes. In: *N6rk* [online]. 2002 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.n6rk.com/diplexer/diplexer.pdf>
- [17] VRBA, Kamil. *Konstrukce elektronických zařízení - návrh plošných spojů*. Brno, 2002. Scripta. VUT Brno.
- [18] DOSTÁL, Tomáš. *Elektrické filtry*. Brno, 2002. Scripta. VUT Brno.
- [19] Datasheet LT1931. In: *Linear* [online]. 2017 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/1931fa.pdf>

## Seznam obrázků

|  |    |
|--|----|
| Obrázek 2.1: Přímé připojení.....  | 11 |
| Obrázek 2.2: Pasivní vysokoimpedanční sonda 10:1.....                              | 13 |
| Obrázek 2.3: Pasivní nízkoimpedanční sonda 10:1 .....                              | 14 |
| Obrázek 2.4: Proudová sonda s odporovým převodníkem .....                          | 14 |
| Obrázek 2.5: Proudová sonda s transformátorem .....                                | 15 |
| Obrázek 2.6 : Proudová aktivní sonda s Hallovým generátorem .....                  | 16 |
| Obrázek 2.7: Schéma aktivní napěťové sondy .....                                   | 19 |
| Obrázek 2.8: Schéma aktivní rozdílové sondy .....                                  | 21 |
| Obrázek 3.1: MOSFET s vodivým kanálem .....  | 23 |
| Obrázek 3.2: MOSFET s indukovaným kanálem .....                                    | 23 |
| Obrázek 3.3: Mosfet se dvěma hradly.....   | 23 |
| Obrázek 3.4: Tranzistor JFET s kanálem n s převodní charakteristikou .....         | 23 |
| Obrázek 3.5: Bloková struktura a značka operačního zesilovače.....                 | 24 |
| Obrázek 4.1: Schéma jednocestné sondy.....   | 27 |
| Obrázek 4.2: AC Analýza jednocestné sondy.....                                     | 27 |
| Obrázek 4.3: Schéma dvoucestné sondy.....  | 28 |
| Obrázek 4.4: Mezní kmitočty pro HP.....  | 29 |
| Obrázek 4.5: Mezní kmitočty pro DP.....  | 29 |
| Obrázek 4.6: AC Analýza dvoucestné sondy.....                                      | 30 |
| Obrázek 4.7: Schéma jednocestné varianty .....                                     | 31 |
| Obrázek 4.8: Schéma dvoucestné varianty .....                                      | 32 |
| Obrázek 4.9: Schéma zapojení a graf výstupního napětí .....                        | 33 |
| Obrázek 4.10: Připojení sondy na výstup generátoru .....                           | 34 |
| Obrázek 4.11: Maximální nastavení kladného napětí .....                            | 34 |
| Obrázek 4.12: Maximální nastavení záporného napětí.....                            | 35 |
| Obrázek 4.13: Delta napětí u jednocestné sondy.....                                | 36 |
| Obrázek 4.14: Delta napětí u dvoucestné sondy.....                                 | 36 |
| Obrázek 4.15: Frekvenční charakteristika jednocestné sondy.....                    | 37 |
| Obrázek 4.16: Frekvenční charakteristika dvoucestné sondy .....                    | 37 |
| Obrázek 4.17: Zobrazení obdélníkového signálu 1 V 1 kHz u jednocestné sondy .....  | 38 |
| Obrázek 4.18: Zobrazení obdélníkového signálu 1 V 20 kHz u jednocestné sondy ..... | 38 |
| Obrázek 4.19: Zobrazení obdélníkového signálu 1 V 1 kHz u dvoucestné sondy.....    | 39 |

|  |    |
|--|----|
| Obrázek 4.20: Zobrazení obdélníkového signálu 1 V 20 kHz u dvoucestné sondy..... | 39 |
| Obrázek 4.21: Čas vzestupné hrany .....  | 40 |
| Obrázek 4.22: Čas sestupné hrany .....   | 41 |
| Obrázek 5.1: Layout DPS jednocestné varianty.....                                | 48 |
| Obrázek 5.2: Layout DPS dvoucestné varianty.....                                 | 48 |
| Obrázek 5.3: Fotografie jednocestné sondy.....                                   | 49 |
| Obrázek 5.4: Fotografie dvoucestné sondy.....                                    | 50 |

## Seznam tabulek

|   |    |
|---|----|
| Tabulka 2.1: Přehled aktivních napěťových sond .....  | 18 |
| Tabulka 2.2: Přehled aktivních rozdílových sond ..... | 20 |
| Tabulka 5.1: Seznam součástek jednocestné sondy.....  | 51 |
| Tabulka 5.2: Seznam součástek dvoucestné sondy.....   | 52 |

## Seznam příloh

Příloha 1: Layout DPS v programu Eagle

Příloha 2: Obrázky osazených sond před vložením do plechového obalu

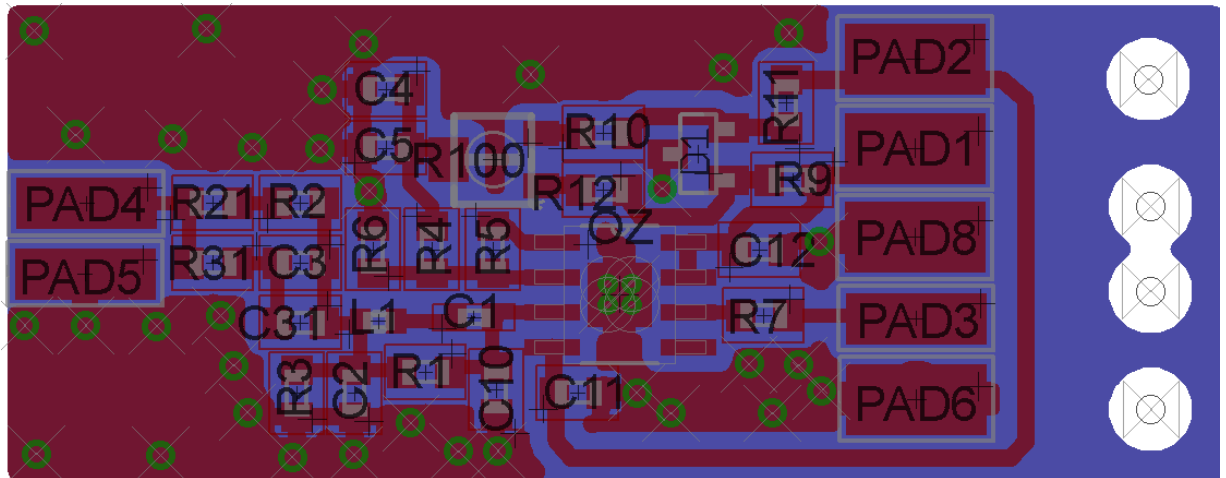
Příloha 3: Seznamy součástek

Příloha 4: Zdrojový kód pro automatizaci měření frekvenční charakteristiky



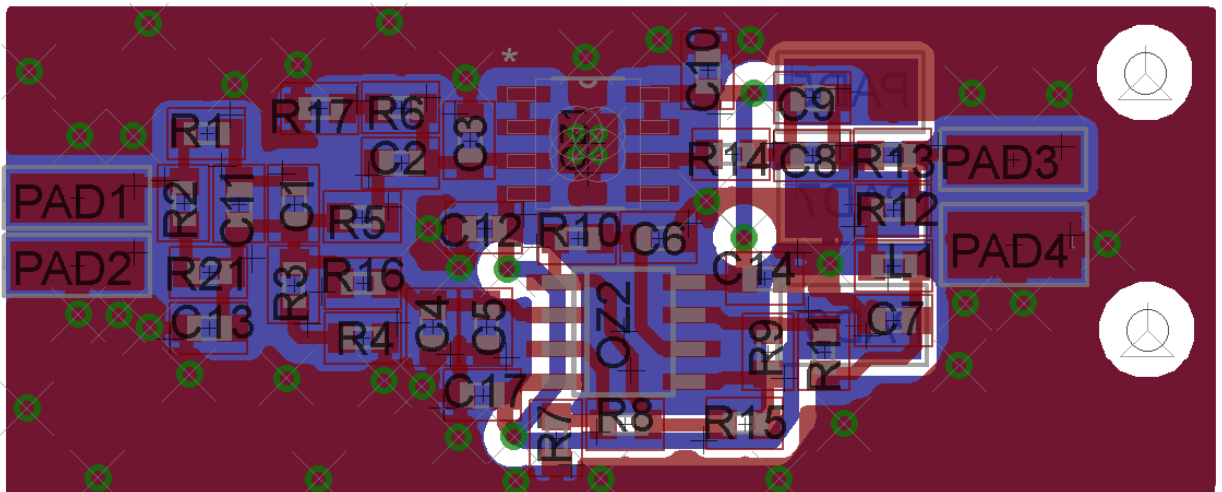
## Přílohy

**Příloha 1/1:** Layout DPS v programu Eagle – jednocestná varianta



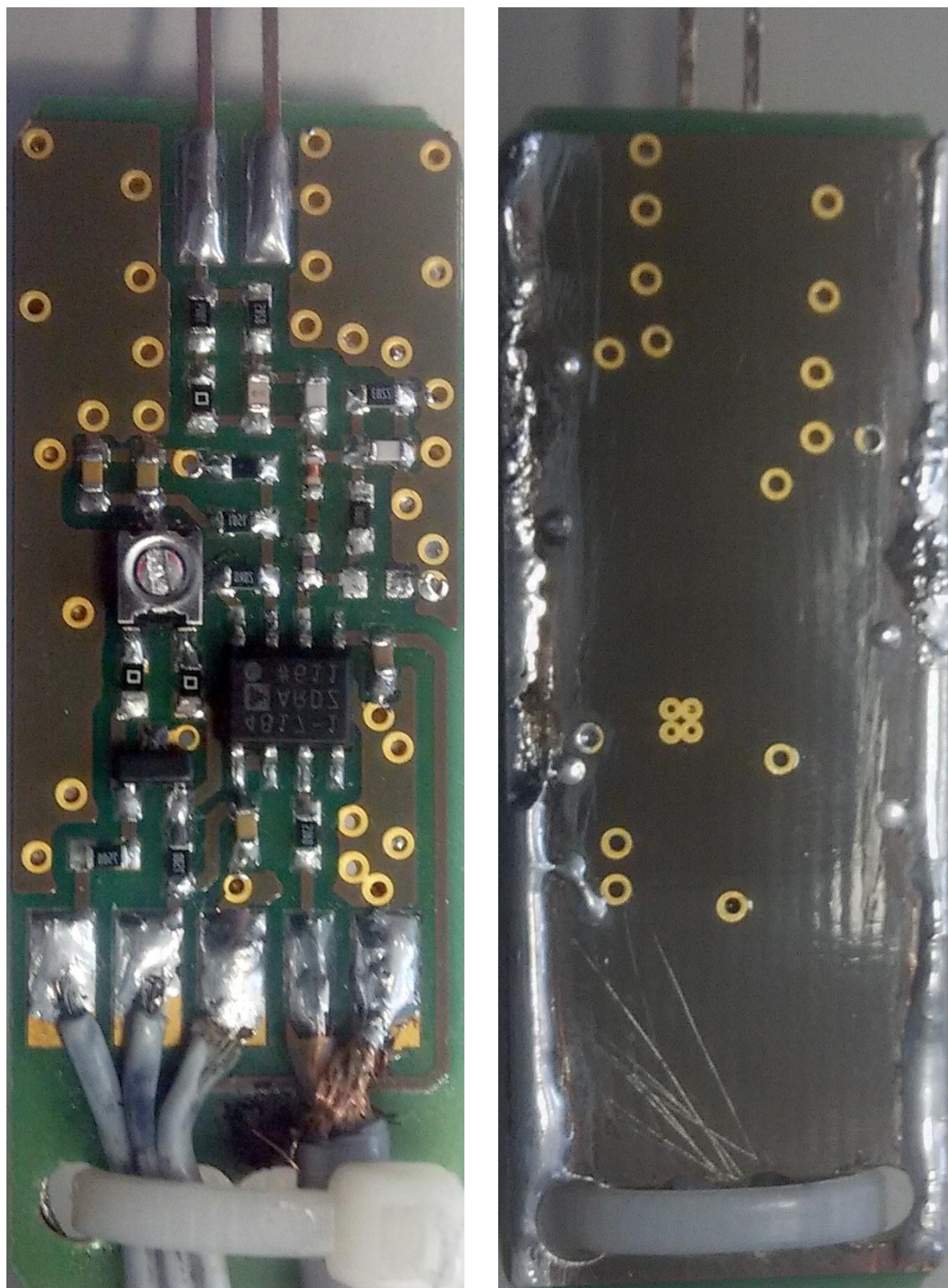
**Obrázek 5.1:** Layout DPS jednocestné varianty

**Příloha 1/2:** Layout DPS v programu Eagle – dvoucestná varianta



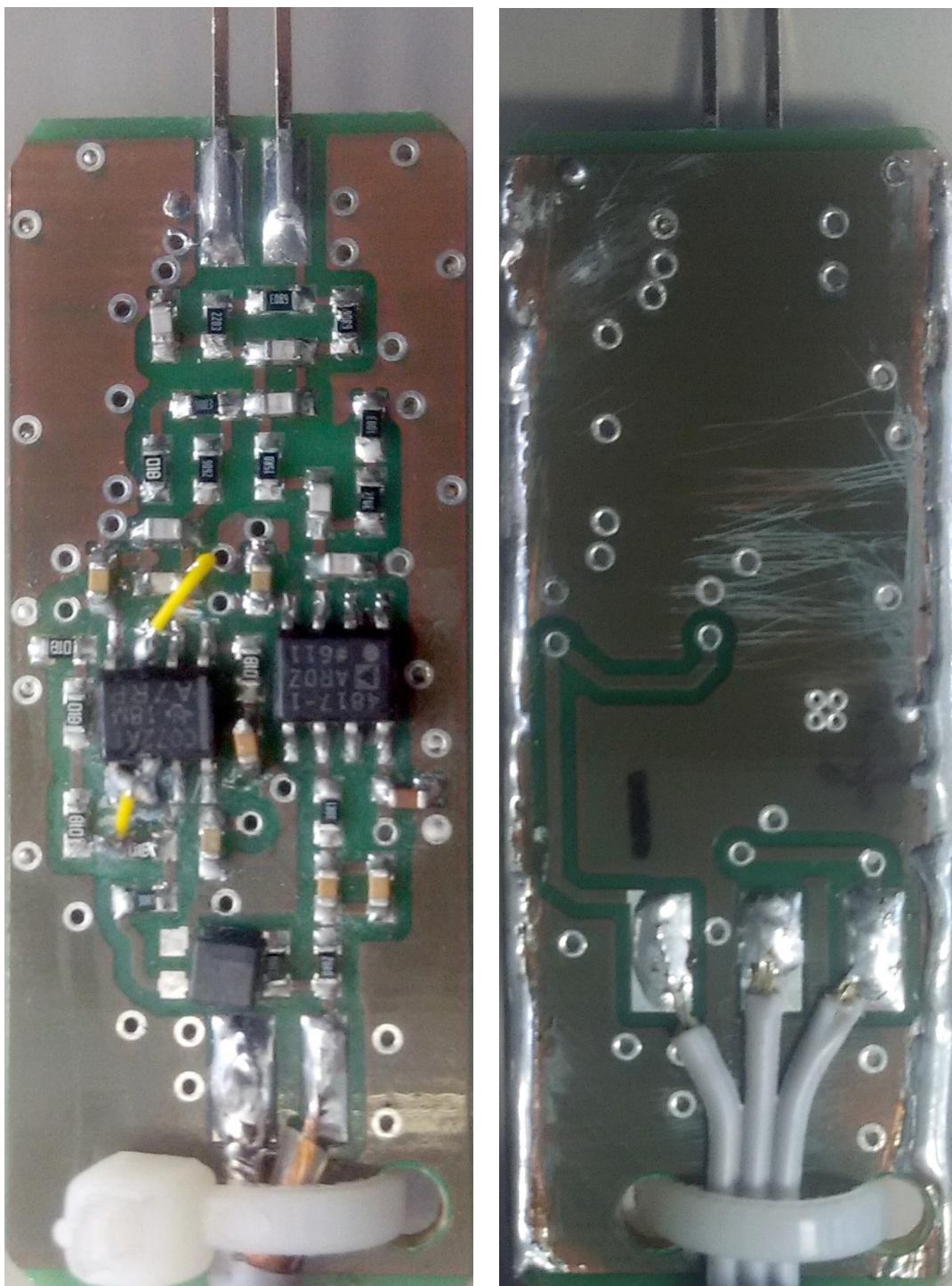
**Obrázek 5.2:** Layout DPS dvoucestné varianty

**Příloha 2/1:** Obrázek DPS jednocestné sondy před vložením do plechového obalu



**Obrázek 5.3:** Fotografie jednocestné sondy

**Příloha 3/2:** Obrázek DPS dvoucestné sondy před vložením do plechového obalu



**Obrázek 5.4:** Fotografie dvoucestné sondy

**Příloha 3/1:** Seznam součástek jednocestné sondy

| <b>Označení</b> | <b>Hodnota</b> | <b>Typ</b>    | <b>Pouzdro</b> |
|-----------------|----------------|---------------|----------------|
| C1              | 3 pF           | C-EUC0402     | C0402          |
| C2              | 12 pF          | C_SMDC0603    | R0603          |
| C3              | 2 pF           | C_SMDC0603    | R0603          |
| C4              | 1 uF           | C_SMDC0603    | R0603          |
| C5              | 10 nF          | C_SMDC0603    | R0603          |
| C11             | 170 nF         | C_SMDC0603    | R0603          |
| C12             | 170 nF         | C_SMDC0603    | R0603          |
| C31             | 1p3 F          | C_SMDC0603    | R0603          |
| D1              | -              | BAV99         | SOT23          |
| L1              | 15 nH          | L_EU1         | L0402          |
| OZ              | -              | ADA4817-1ARDZ | SOIC127        |
| R1              | 100 R          | R_SMDR0603    | R0603          |
| R2              | 0 R            | R_SMDR0603    | R0603          |
| R3              | 220 R          | R_SMDR0603    | R0603          |
| R4              | 1k5            | R_SMDR0603    | R0603          |
| R5              | 20 R           | R_SMDR0603    | R0603          |
| R6              | 200 R          | R_SMDR0603    | R0603          |
| R7              | 50 R           | R_SMDR0603    | R0603          |
| R9              | 750 R          | R_SMDR0603    | R0603          |
| R10             | 0 R            | R_SMDR0603    | R0603          |
| R11             | 750 R          | R_SMDR0603    | R0603          |
| R12             | 0 R            | R_SMDR0603    | R0603          |
| R21             | 1 Meg          | R_SMDR0603    | R0603          |
| R31             | 82R5           | R_SMDR0603    | R0603          |
| R100            | 1 k            | R-TRIMM3202   | RTRIM3202      |

**Tabulka 5.1:** Seznam součástek jednocestné sondy

## Příloha 3/2: Seznam součástek dvoucestné sondy

| Označení | Hodnota | Typ           | Pouzdro |
|----------|---------|---------------|---------|
| C1       | 3p6 F   | C-EUC0603     | C0603   |
| C2       | 11 p F  | C-EUC0603     | C0603   |
| C3       | 5 pF    | C-EUC0603     | C0603   |
| C4       | 11 pF   | C-EUC0603     | C0603   |
| C5       | 6 pF    | C-EUC0603     | C0603   |
| C6       | 3n6 F   | C-EUC0603     | C0603   |
| C8       | 22 nF   | C-EUC0603     | C0603   |
| C9       | 2n2 F   | C-EUC0603     | C0603   |
| C10      | 170 nF  | C-EUC0603     | C0603   |
| C11      | 3p3 F   | C-EUC0603     | C0603   |
| C12      | 170 nF  | C-EUC0603     | C0603   |
| C13      | 9p1 F   | C-EUC0603     | C0603   |
| C14      | 170 nF  | C-EUC0603     | C0603   |
| C17      | 170 nF  | C-EUC0603     | C0603   |
| L1       | 68 uH   | EU_L0603      | L0603   |
| OZ1      | -       | ADA4817-1ARDZ | SOIC127 |
| OZ2      | -       | TL072D        | SO08    |
| R1       | 90R9    | R-EU_R0603    | R0603   |
| R2       | 680 k   | R-EU_R0603    | R0603   |
| R3       | 1 k     | R-EU_R0603    | R0603   |
| R4       | 100 k   | R-EU_R0603    | R0603   |
| R5       | 15 R    | R-EU_R0603    | R0603   |
| R6       | 30k     | R-EU_R0603    | R0603   |
| R7       | 1 k     | R-EU_R0603    | R0603   |
| R8       | 1 k     | R-EU_R0603    | R0603   |
| R9       | 1 k     | R-EU_R0603    | R0603   |
| R10      | 1 k     | R-EU_R0603    | R0603   |
| R11      | 30 R    | R-EU_R0603    | R0603   |
| R12      | 20 R    | R-EU_R0603    | R0603   |
| R13      | 20 R    | R-EU_R0603    | R0603   |
| R14      | 30 R    | R-EU_R0603    | R0603   |
| R15      | 1 k     | R-EU_R0603    | R0603   |
| R16      | 90k9    | R-EU_R0603    | R0603   |
| R17      | 100 k   | R-EU_R0603    | R0603   |
| R21      | 220 k   | R-EU_R0603    | R0603   |

Tabulka 5.2: Seznam součástek dvoucestné sondy

**Příloha 4:** Zdrojový kód pro automatizaci měření frekvenční charakteristiky

```

clear all
close all

%% nastaveni
osci_ip_addr = '172.31.11.226'; %IP adresa osci
gen_ip_addr = '172.31.11.61'; %IP adresa gen
f_min = 9000; % min 9000
f_max = 900000000; % max dle osci
n_points = 1001;
level = 100;
level_unit = 'mV';

%% inicializace
osci = tcpip(osci_ip_addr, 5025);
gen = tcpip(gen_ip_addr, 5025);

fopen(osci);
fprintf(osci, '*RST');
fprintf(osci, '*CLS');
fprintf(osci, '*IDN?');
idn_osci = fscanff(osci, '%s');

fprintf(osci, 'CHANnel1:COUPling DC');
fprintf(osci, ['CHANnel1:SCALe ' num2str(level/10/1000)]);
fprintf(osci, 'TIMEbase:SCALe 50e-6');
fprintf(osci, 'MEASurement1:ENABle ON');
fprintf(osci, 'MEASurement1:SOURce C1W1');
fprintf(osci, 'MEASurement1:MAIN RMS');

fopen(gen);
fprintf(gen, '*RST');
fprintf(gen, '*CLS');
fprintf(gen, '*IDN?');
idn_gen = fscanff(gen, '%s');

fprintf(gen, ['SOUR:POW ' num2str(level) ' ' level_unit]);
fprintf(gen, 'OUTPut ON');

%% mereni
f = f_min:(f_max-f_min)/n_points:f_max;
freq_resp = zeros(1,length(f));

for i = 1:length(f)
    fprintf(gen, ['SOUR:FREQ ' num2str(f(i)) ' Hz']);
    pause(0.5);
    fprintf(osci, 'MEAS1:RES:ACT?');
    freq_resp(i) = 1000*str2double(fscanff(osci, '%s'));
end

```

```
%% graf
figure(1)
plot(f,freq_resp)
grid on
grid minor

%% uzavření komunikace
fclose(osci);
fclose(gen);
```