

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra mikroelektroniky

Přípravek na měření parametrů kondenzátorů

Martin Masáček

Vedoucí: Ing. Jan Novák, Ph.D.
Květen 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Masáček** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **499158**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Přípravek na měření parametrů kondenzátorů

Název bakalářské práce anglicky:

Capacitor Parameters Measurement Device

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s metodami měření základních parametrů reálného kondenzátoru.
- 2) Prostudujte možnost využití metody vektorvoltmetru pro analýzu parametrů kondenzátoru.
- 3) Navrhněte laboratorní přípravek pro měření kondenzátorů v rozsahu kapacit 1 nF - 100 nF. Přípravek bude měřit ztrátový činitel a parametry náhradního modelu Cs a Rs.
- 4) Zapojení realizujte ve formě funkčního vzorku.
- 5) Měření ověřte funkcí přípravku a stanovte míru nejistoty měření kapacity kondenzátorů.
- 6) Zhodnoťte dosažené výsledky a navrhněte případná rozšíření.

Seznam doporučené literatury:

- [1] HAASZ, V. a kolektiv, Elektrická měření. Přístroje a metody, ČVUT 2018, 3. vydání, ISBN 978-80-01-06412-2.
[2] HOROWITZ, P.; HILL, W., The Art of Electronics, Cambridge University Press, 3. vydání, 2015, ISBN 978-0-521-80926-9
[3] Impedance Measurement Handbook. Keysight Technologies, [Online]
<http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5950-3000.pdf>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Novák, Ph.D. katedra mikroelektroniky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **13.02.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **22.09.2024**

Ing. Jan Novák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu práce za cenné rady a připomínky během tvorby této práce. Dále děkuji své rodině, která mi vždy byla oporou a umožnila mi vypracovat tuto práci.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu.

V Praze, 19. Května 2023

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem funkčního vzorku vektor voltmetru pro měření kapacity kondenzátorů v rozmezí 1 nF až 100 nF a měření ztrátového činitele. Vektor voltmetr pracuje na frekvencích 1 kHz a 10 kHz. V práci jsou podrobně popsány součásti vektor voltmetru a jejich simulace a realizace. Součástí je také porovnání výsledků z vektor voltmetru s profesionálním RLC metrem s následným stanovením nejistot. V práci jsou také stručně vysvětleny další metody pro měření parametrů kondenzátorů.

Klíčová slova: kapacita kondenzátoru, vektor voltmetr, ztrátový činitel

Vedoucí: Ing. Jan Novák, Ph.D.

Abstract

This thesis deals with the design of a functional sample vector voltmeter, for measuring the capacity of capacitors in the range of 1 nF to 100 nF, and for measuring the dissipation factor. The vector voltmeter works at frequencies of 1 kHz and 10 kHz. This work describes in detail the components of the vector voltmeter, their simulation, and their implementation. It also includes a comparison of the results from the vector voltmeter with a professional RLC meter, followed by the determination of uncertainties. Other methods for measuring capacitor parameters are also briefly explained.

Keywords: capacitor capacity, vector voltmeter, dissipation factor

Title translation: Capacitor Parameters Measurement Device

Obsah

1 Úvod	1	8 Závěr	27
1.1 Náhradní model kondenzátoru . . .	2	Seznam použitých zkratk	29
2 Jiné metody na měření parametrů kondenzátorů	3	Literatura	31
2.1 Metoda S-parametrů	3	A Zdrojový kód	33
2.2 Pomocí obdelníkového signálu . . .	4	B Osazené DPS	37
2.3 RLC metr	5	C Průběhy signálů změřené na osciloskopu	39
3 Metoda vektor voltmetru	7	D Hotový vektor voltmetr	41
3.1 Princip vektor voltmetru	7		
3.1.1 Řízený usměrňovač	9		
4 Realizace metody vektor voltmetru	11		
4.1 Měřený filtr	11		
4.2 Diferenční zesilovač	13		
4.3 Vektor voltmetr	14		
4.3.1 Řízený usměrňovač	14		
4.3.2 Tvarovač a fázový posouvač .	14		
4.3.3 Přepínač pro měření reálné nebo imaginární složky napětí . . .	16		
4.4 Sumátor na výstupu vektor voltmetru	16		
4.5 A/D převodník	17		
4.6 Vstupní generátor průběhů	17		
4.7 Napájení	18		
4.8 Procesor	18		
4.8.1 Použité typy komunikace	18		
5 Simulace vektor voltmetru v programu LTspice	21		
6 Návrh DPS	23		
6.1 Rozlitá měď	23		
6.2 Blokové kondenzátory	23		
7 Ověření funkce a stanovení nejistot	25		
7.1 Vyhodnocení výsledků	26		
7.2 Možná vylepšení	26		

Obrázky

1.1 Náhradní model reálného kondenzátoru a ztrátový činitel [1] .	2	B.2 Osazené DPS diferenčního zesilovače s napěťovými sledovači .	37
2.1 Možné zapojení kondenzátoru k VNA [2]	3	C.1 Průběh signálu za řízeným usměrňovačem pro měření reálné složky při měření kondenzátoru s kapacitou 68 nF	39
2.2 Zapojení metody pro měření pomocí obdelníkového signálu [3] ..	4	C.2 Průběh signálu za řízeným usměrňovačem pro měření imaginární složky při měření kondenzátoru s kapacitou 68 nF	39
2.3 Metoda pomocí obdelníkového signálu na osciloskopu [3]	4	D.1 Vektor voltmetr z boku	41
3.1 Blokové schéma přípravku pro měření kondenzátorů	7	D.2 Vektor voltmetr víko.....	41
3.2 Blokové schéma vektor voltmetru a jeho průběhy signálů [4]	8		
3.3 Blokové schéma řízeného usměrňovače [4].....	9		
4.1 De Sautyho můstek [5]	11		
4.2 Frekvenční charakteristika De Sautyho můstku pro měření kapacity s průběhy různých kapacit	12		
4.3 De Sautyho můstek v závislosti na změně měřené kapacity	12		
4.4 De Sautyho můstek v závislosti na změně měřeného ESR	13		
4.5 Schéma rozdílového zesilovače s operačním zesilovačem [7]	13		
4.6 Blokové schéma analogového multiplexoru ADG419 [9]	14		
4.7 Zapojení komparátorů bez hystereze	15		
4.8 Zapojení napěťového děliče s diodou	15		
4.9 Zapojení fázového posouvače [11]	16		
4.10 Zapojení sumátoru s operačním zesilovačem	17		
4.11 Schéma LC filtru [16].....	18		
4.12 Zapojení SPI komunikace [17] .	19		
5.1 Schéma VV v programu LTspice	21		
5.2 Výstup signálů VV pro různé kapacity měřeného kondenzátoru .	21		
6.1 Navržené DPS vektor voltmetru v programu KiCad.....	24		
B.1 Osazené DPS vektor voltmetru .	37		

Tabulky

4.1 Parametry součástek fázového posouvače pro dvě různé frekvence	16
4.2 Popis signálu SPI komunikace ..	19
4.3 Popis signálu I ² C komunikace ..	19
5.1 Změřené a vypočtené hodnoty ze simulace v programu LTspice	22
7.1 Hodnoty kondenzátorů udávané výrobcem	25
7.2 Hodnoty kondenzátorů změřené RLC metrem	25
7.3 Hodnoty kondenzátorů změřené vektor voltmetrem	25
7.4 Rozdíl hodnot kapacity měřené RLC metrem a vektor voltmetrem	26



Kapitola 1

Úvod

Kondenzátor je součástka, která je pro elektroniku nezbytná a používaná v téměř všech elektronických zařízeních. Je to součástka, která se skládá ze dvou elektrod, mezi kterými je umístěná izolační vrstva nebo-li dielektrikum. Parametry takového kondenzátoru jsou zásadní pro správné fungování součástek, zařízení, přístrojů. Nejdůležitějším parametrem kondenzátorů je kapacita, která může mít za úkol uchovávat elektrickou energii nebo mít jiné využití ve střídavých soustavách, jako je například kompenzace účinníku nebo návrh frekvenčních filtrů a podobně. Dalším důležitým parametrem kondenzátorů je ztrátový činitel, který vyjadřuje kvalitu a ztráty na kondenzátoru. Samotné rozměry, cena, velikost kapacity a ztrátového činitele záleží na druhu daného kondenzátoru. Mezi takové druhy kondenzátorů například patří elektrolytické, keramické, fóliové, které se liší hlavně materiálem dielektrika.

Zařízení měřící ztrátový činitel většinou pracují na vysokých frekvencích. Vektor voltmetr na takových frekvencích pracovat neumí, ale lze použít pro zjištění vadného kondenzátoru.

1.1 Náhradní model kondenzátoru

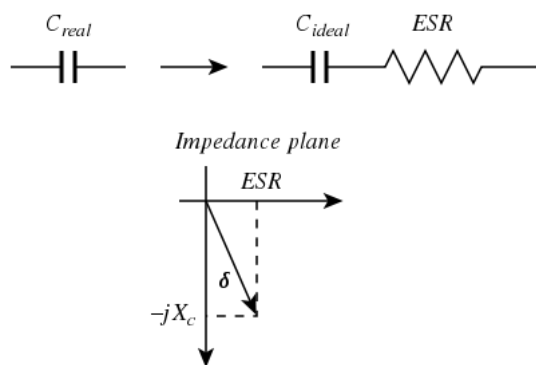
Reálný kondenzátor se dá vyjádřit jeho sériovým náhradním modelem, který zahrnuje reálné parametry. Na obrázku 1.1 je rezistor ESR celým názvem ekvivalentní sériový rezistor, který představuje parazitní rezistor. [1] Výrobce kondenzátorů většinou neudává ESR, ale ztrátový činitel $\tan \delta$, který vychází ze vztahu

$$\tan \delta = \frac{ESR}{X_c}, \quad (1.1)$$

kde

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C}. \quad (1.2)$$

Ze vztahu 1.2 je zřejmé, že ztrátový činitel $\tan \delta$ je frekvenčně závislý. Většinou výrobce udává ztrátový činitel při frekvenci 10 kHz.

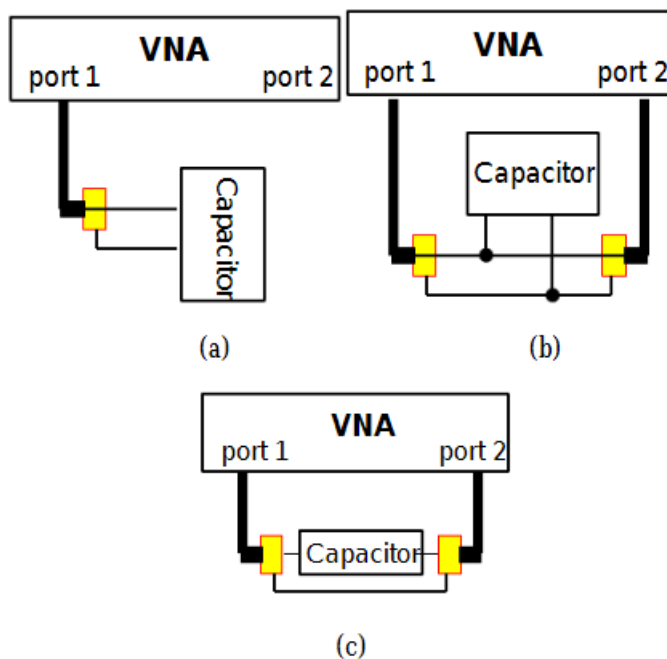


Obrázek 1.1: Náhradní model reálného kondenzátoru a ztrátový činitel [1]

Kapitola 2

Jiné metody na měření parametrů kondenzátorů

2.1 Metoda S-parametrů



Obrázek 2.1: Možné zapojení kondenzátoru k VNA [2]

Tato metoda spočívá ve vysokofrekvenčním měření S-parametrů [2]. K měření s-parametrů se používá vektorový obvodový analyzátor nyní jako VNA, který je velmi drahý. S-parametry popisují vlastnosti součástky nebo lineárního obvodu, jako jsou odraz a přenos vysokofrekvenční vlny. Tyto parametry se využívají hlavně v telekomunikaci pro přenosové linky, ale dají se použít i pro měření pasivních prvků.

Pokud změříme S-parametry reálného kondenzátoru v některém ze zapojení 2.1. Zpětně se dokážeme dopočítat parametry náhradního zapojení konden-

zátoru s velkou přesností. Tato metoda vyžaduje vybavení a kalibraci, aby zanikly vlivy měřicího kabelu a dalších možných chyb, proto je toto měření velmi nákladné a složité, nicméně opravdu velmi přesné. [2]

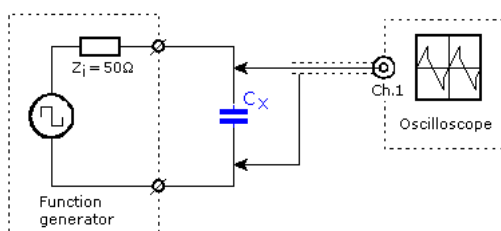
2.2 Pomocí obdelníkového signálu

Metoda založená na deformaci obdelníkového signálu RC členem, který představuje reálný kondenzátor. Změřením hodnot signálu na tomto kondenzátoru dokážeme s celkem vysokou přesností určit kapacitu a ESR měřeného kondenzátoru.

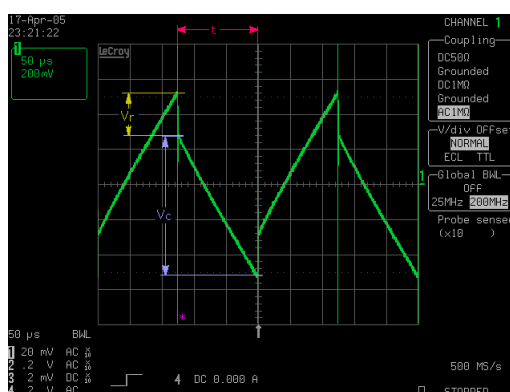
Obdelníkový signál s amplitudou V_g je podle schématu 2.2 zapojen na kondenzátor měřený C_x . K měření je potřeba osciloskop, který se musí zapojit nejbližší ke kondenzátoru. Obdelníkový signál je kondenzátorem deformován tak, jak je zobrazeno na osciloskopu 2.3. Z takového signálu lze odečíst hodnoty a pomocí vztahů

$$I = \frac{V_g}{Z_i}, \quad C_x = \frac{It}{V_c}, \quad ESR = \frac{V_r}{2I}, \quad (2.1)$$

je možné dopočítat parametry kondenzátoru. [3]



Obrázek 2.2: Zapojení metody pro měření pomocí obdelníkového signálu [3]



Obrázek 2.3: Metoda pomocí obdelníkového signálu na osciloskopu [3]

■ 2.3 RLC metr

RLC metr je zařízení pro měření elektronických obvodů a součástek obsahující rezistory, cívky, kondenzátory. RLC měří jejich vlastnosti, jako je odpor, indukčnost, kapacita, kvalita, impedance.

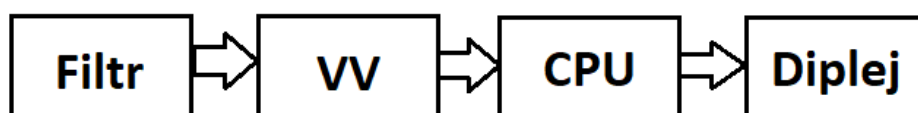
RLC metr většinou pracuje aplikací signálu na měřený obvod a následně podle změřené odezvy vypočte a zobrazí žádané parametry. Existuje několik typů RLC metrů a mohou být použity pro měření telekomunikací, průmyslové automatizace, elektrotechniky.

Samotný RLC metr je velmi přesné zařízení a podle toho se pohybuje i jeho cena, která je vysoká. Pomocí RLC metru je možné měřit i kvalitu kondenzátorů podle změřeného ESR a kapacity.

Kapitola 3

Metoda vektor voltmetru

Vektor voltmetr (nyní jako VV) je měřicí přístroj pro měření reálné a imaginární složky napětí [4]. Pokud před VV předřadíme filtr s měřeným kondenzátorem, pak se ze změřených hodnot napětí dokážeme zpětně dopočítat parametrů kondenzátoru. Dopočet se provede v procesoru a následně se zobrazí na displeji 3.1.



Obrázek 3.1: Blokové schéma přípravku pro měření kondenzátorů

3.1 Princip vektor voltmetru

Na obrázku 3.2 je vyobrazeno blokové schéma VV a jeho jednotlivé průběhy signálů. Základní součástí VV je řízený usměrňovač, který je vysvětlen v sekci 3.1.1. Výstupem VV je stejnosměrná složka, která lze přepočítat na imaginární nebo reálnou složku napětí vstupního signálu $u_1(t)$, podle vztahu, který lze přepočítat z obecně známého vzorce pro výpočet střední hodnoty signálu.

$$U_{2,0} = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{T/2+t_0} u_1(t) dt, \quad (3.1)$$

kde t_0 představuje časové zpoždění mezi signály $u_{ref}(t)$ a $u_1(t)$. t_0 lze přepočítat na fázový posun φ pomocí vztahu

$$\varphi = 2\pi f t_0. \quad (3.2)$$

pokud do vztahu 3.1 za vstupní signál $u_1(t)$ dosadíme $U_m \cos(2\pi f t)$ a podle vztahu 3.2 zaměníme časové zpoždění t_0 za fázový posun φ , výsledkem integrálu je

$$U_{2,0} = \frac{2}{\pi} U_m \cos(\varphi), \quad (3.3)$$

kde $U_m \cos(\varphi)$ je reálná složka vstupního napětí. Po dosazení a úpravě

$$\operatorname{Re}(\mathbf{U}_1) = \frac{\pi}{2} U_{2,0}. \quad (3.4)$$

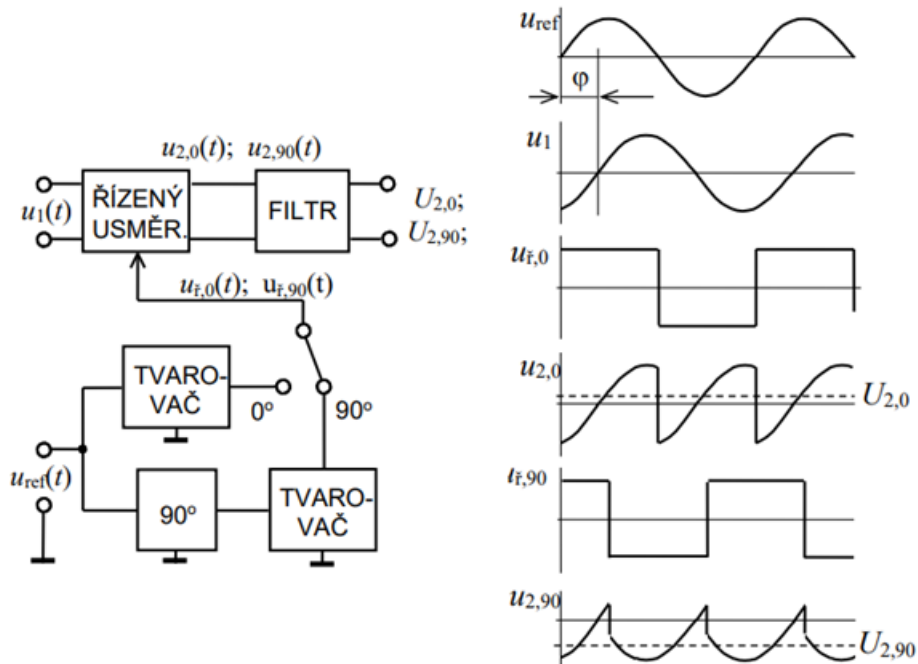
Pokud ve vztahu 3.3 k fázovému posunu φ přičteme $\pi/2$ radiánu vznikne

$$U_{2,90} = \frac{2}{\pi} U_m \cos(\varphi + \pi/2) = \frac{2}{\pi} U_m \sin(\varphi), \quad (3.5)$$

kde $U_m \sin(\varphi)$ je imaginární složka vstupního napětí. Po dosazení a úpravě

$$\operatorname{Im}(\mathbf{U}_1) = \frac{\pi}{2} U_{2,90}. \quad (3.6)$$

Pomocí vztahů 3.4 a 3.6 jsme schopni z výstupu VV vypočítat reálnou a imaginární složku vstupního napětí. [4]

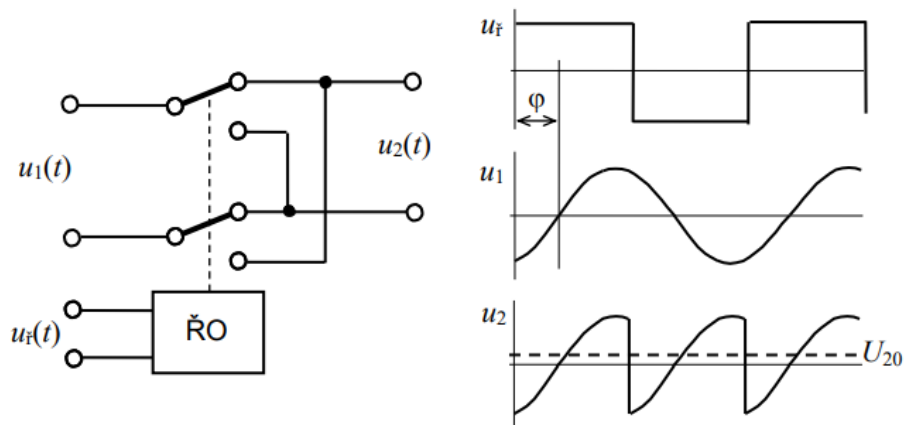


Obrázek 3.2: Blokové schéma vektor voltmetru a jeho průběhy signálů [4]

Ostatní bloky blokového schéma 3.2 jsou tvarovač, fázový posouvač o 90° a filtr. Tvarovač slouží k přeměně sinusového signálu na signál obdelníkový. Fázový posouvač posouvá sinusový signál o 90° nebo o $\pi/2$ radiánu. Filtr odstraňuje střídavou složku vstupního signálu, aby na výstupu zbyla jen složka stejnosměrná. [4]

■ 3.1.1 Řízený usměrňovač

Řízený usměrňovač střídavě každou půlperiodu vstupního signálu mění orientaci vstupního signálu na výstupu pomocí řídicího obvodu (ŘO). Výsledkem je signál se střední hodnotou U_{20} , který je přímo úměrný fázovému posunu φ . Blokové schéma a jeho signály jsou vyobrazeny na obrázku 3.3.



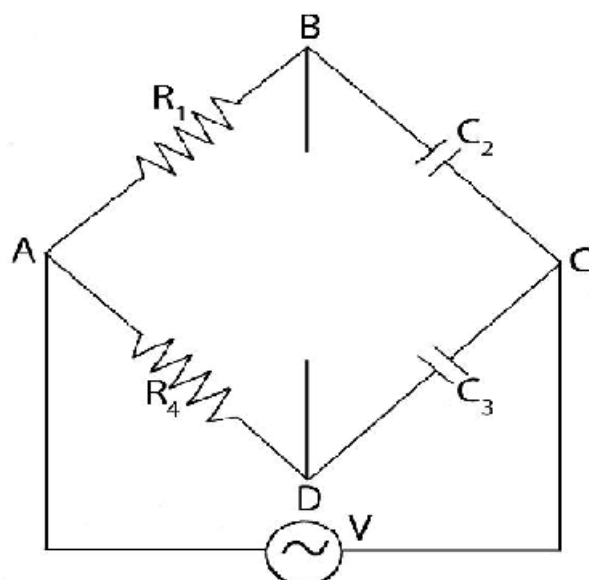
Obrázek 3.3: Blokové schéma řízeného usměrňovače [4]

Kapitola 4

Realizace metody vektor voltmetru

4.1 Měřený filtr

Měřený filtr vyobrazený jako blok na obrázku 3.1, je realizován jako De Sautyho můstek 4.1, kde C_2 je měřený kondenzátor. [6] Pro měření



Obrázek 4.1: De Sautyho můstek [5]

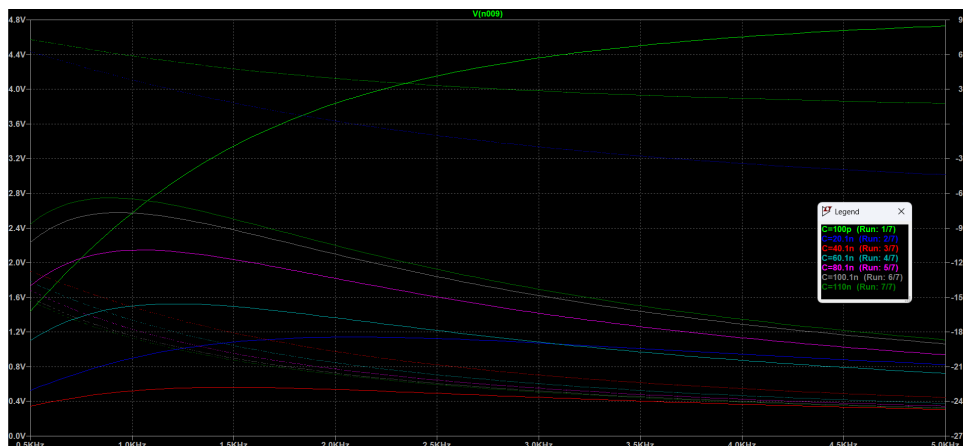
kapacity kondenzátoru budou rezistory R_1 a R_4 nést hodnoty $3\text{k}\Omega$ a kondenzátor C_3 hodnotu 32 nF . Podle grafu vytvořeném v simulačním programu LTspice 4.2 je vhodné použít frekvenci 1 kHz , kvůli vysokým změnám fáze a amplitudy na výstupu filtru.

Výstupní složky napětí \mathbf{U}_2 mezi svorkami B a D lze vyjádřit vztahy

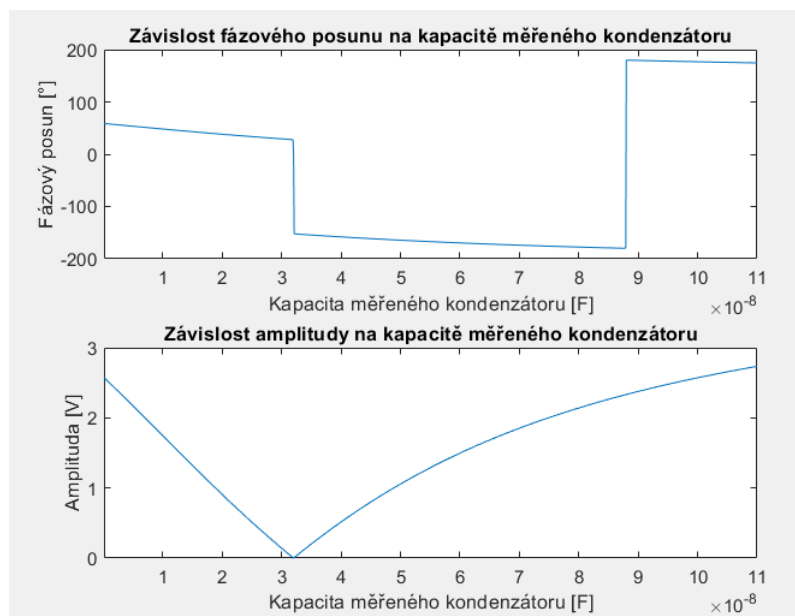
$$\text{Re}(\mathbf{U}_2) = U_1 \left(\frac{X_{c2}^2 + R * ESR_2 + ESR_2^2}{(R + ESR_2)^2 + X_{c2}^2} - \frac{X_{c3}^2 + R * ESR_3 + ESR_3^2}{(R + ESR_3)^2 + X_{c3}^2} \right), \quad (4.1)$$

$$\text{Im}(\mathbf{U}_2) = U_1 \left(\frac{X_{c3}R}{(R + ESR_3)^2 + X_{c3}^2} - \frac{X_{c2}R}{(R + ESR_2)^2 + X_{c2}^2} \right), \quad (4.2)$$

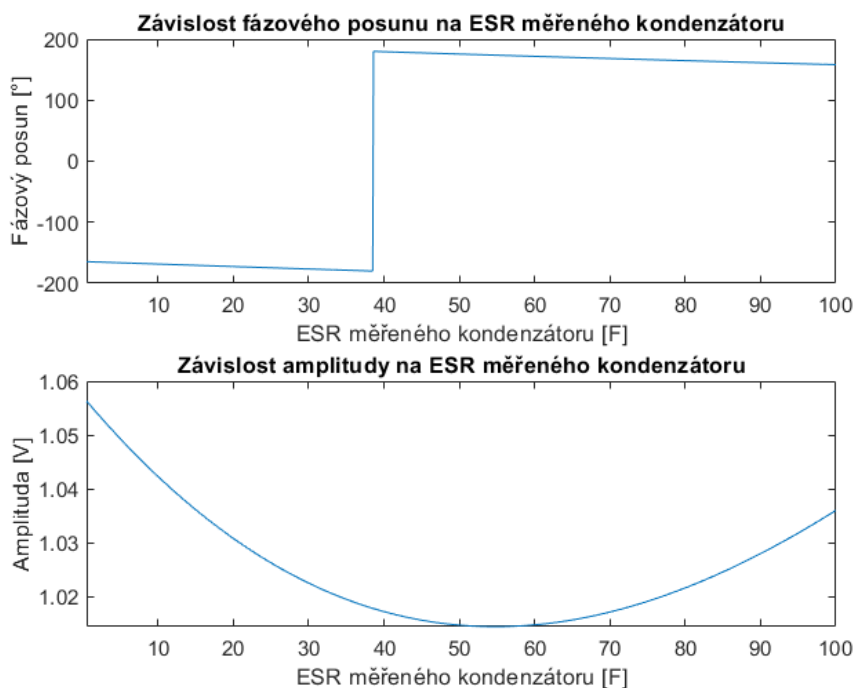
kde U_1 reprezentuje vstupní napětí filtru, ESR ekvivalentní sériové odpory obou kondenzátorů a R rezistory R_1 a R_4 , které mají stejnou hodnotu odporu. Pomocí předchozích vztahů je možné vytvořit grafy v závislosti na kapacitě měřeného kondenzátoru 4.3 a jeho ESR 4.4. Grafy byly vytvořeny v prostředí matlab. V grafu 4.4 není závislost amplitudy na ESR příliš velká, ale pro fázový posun dostatečná pro hrubé určení ESR. Pro závislost 4.4 je potřeba na vstupu filtru frekvence 10 kHz, aby se potlačila reaktance kondenzátorů a zmenšit hodnoty rezistorů R na 300Ω , aby hodnoty napětí na výstupu filtru nebyli příliš malé.



Obrázek 4.2: Frekvenční charakteristika De Sautyho můstku pro měření kapacity s průběhy různých kapacit



Obrázek 4.3: De Sautyho můstek v závislosti na změně měřené kapacity

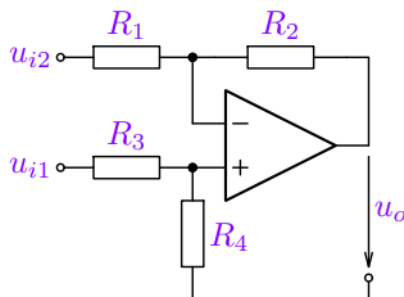


Obrázek 4.4: De Sautyho můstek v závislosti na změně měřeného ESR

4.2 Diferenční zesilovač

Na výstupu vstupního filtru vznikla plovoucí zem. Aby se plovoucí zem odstranila, na výstupu vstupního filtru je zapojený diferenční zesilovač.

Vstup diferenčního zesilovače tvoří dva napěťové sledovače, které zabraňují vzniku zkreslení vstupního signálu. Za napěťovými sledovači je zapojený rozdílový zesilovač, který dokáže plovoucí zem odstranit. [7] Napěťové sledovače a rozdílový zesilovač jsou tvořeny operačními zesilovači LM319 s vysokým parametrem SR. [8] Pokud je $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, pak $u_o = u_{i1} - u_{i2}$. [7]



Obrázek 4.5: Schéma rozdílového zesilovače s operačním zesilovačem [7]

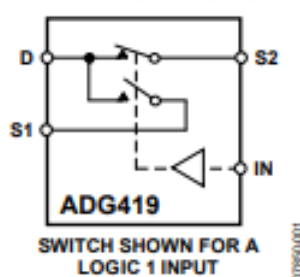
4.3 Vektor voltmetr

V této sekci jsou realizovány jednotlivé bloky blokového schéma VV 3.2.

4.3.1 Řízený usměrňovač

Zásadní parametr, který bude určovat samotnou přesnost VV, je velikost přenosového zpoždění řízeného usměrňovače. Pokud bude toto zpoždění příliš velké, pak měření při frekvenci 10 kHz nebude dostatečně přesné. Dostatečně malé přenosové zpoždění dosahuje analogový multiplexor ADG419, u kterého výrobce zaručuje maximální přenosové zpoždění 160 ns. [9] Sa-

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



Obrázek 4.6: Blokové schéma analogového multiplexoru ADG419 [9]

motný řízený usměrňovač přepíná na výstup D vstup S1 nebo S2 podle úrovně na řídicím vstupu IN. K tomu, aby se analogový multiplexor choval jako řízený usměrňovač, musí být jeden ze vstupů fázově posunutý o 180° . K tomu je na vstup S2 připojený invertující operační zesilovač, který má na vstupu připojený napěťový sledovač, který má za úkol zvýšit vstupní odpor invertujícího zesilovače. V takovéto konfiguraci se dvěma operačními zesilovači se analogový multiplexor chová jako řízený usměrňovač. Vstup S1 a vstup napěťového sledovače jsou spojeny a je na ně přiveden výsledný signál z diferenčního zesilovače.

■ Výstupní filtr

K tomu, aby jsme oddělili nežádoucí střídavou složku signálu od stejnosměrné, na výstupu řízeného usměrňovače je umístěn filtr typu dolní propust s hodnotou kapacity kondenzátoru $22\mu\text{F}$ a hodnotou odporu rezistoru $10\text{k}\Omega$.

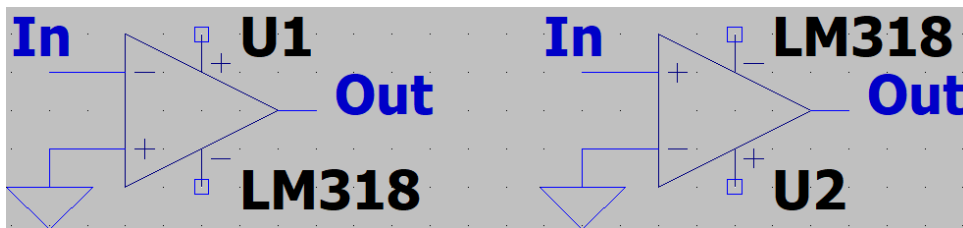
■ 4.3.2 Tvarovač a fázový posouvač

Tvarovač i fázový posouvač budou realizovány operačními zesilovači, u kterých je vyžadován vysoký parametr slew rate (nyní jako SR), který má zásadní vliv na strmost obdelníkových signálů a tím i na rychlost spínání řízeného usměrňovače. U operačního zesilovače LM318 výrobce zaručuje minimální SR $50\text{ V}/\mu\text{s}$. [8]

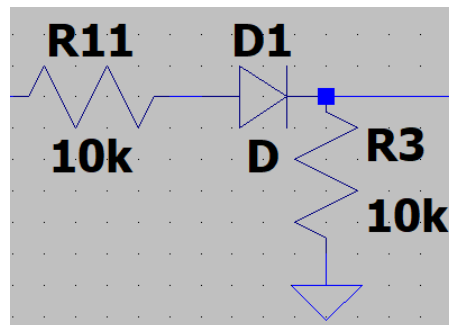
■ Tvarovač

Tvarovač se realizuje operačním zesilovačem v zapojení komparátoru bez hystereze. [7] Na obrázku 4.7 je vlevo schéma invertujícího komparátoru a vpravo neinvertujícího komparátoru.

Nevýhodou tohoto zapojení je, že amplituda výstupního signálu je větší, než požadovaných 5V a signál má i nežádoucí záporné hodnoty, proto se na výstup musí dát napěťový dělič s diodou 4.8. Výstupní napětí děliče půjde nastavit trimrem místo rezistoru R3. Od diody požadujeme malou dobu zotavení, proto je zvolena dioda EGL 1G, která má dobu zotavení menší než 50ns. [10]



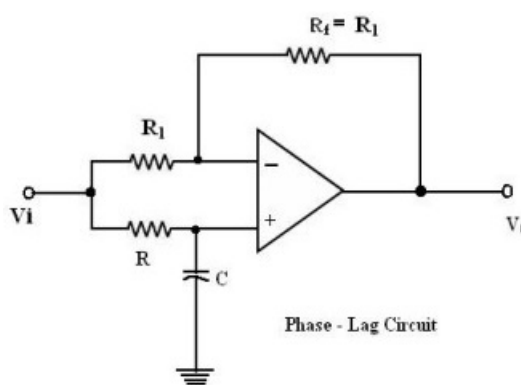
Obrázek 4.7: Zapojení komparátorů bez hystereze



Obrázek 4.8: Zapojení napěťového děliče s diodou

■ Fázový posouvač

Fázový posun výstupu zapojení fázového posouvače s operačním zesilovačem 4.9 je frekvenčně závislý a pro každou frekvenci je potřeba změnit kapacitu kondenzátoru C nebo odpor rezistoru R. [11] V našem případě je potřeba fázově posouvat sinusové signály o frekvenci 1 kHz a 10 kHz o 90°. Proto zde bude relé, které bude přepínat součástky podle potřeby měření s parametry podle tabulky 4.1. K tomu, aby výstup fázového posouvače byl posunutý přesně o 90°, bude rezistor R trimovací. Přepínání součástek fázového posouvače obstará relé modul ovládaný procesorem.



Obrázek 4.9: Zapojení fázového posouvače [11]

f [kHz]	1	10
C [nF]	150	15
R [kΩ]	1	1

Tabulka 4.1: Parametry součástek fázového posouvače pro dvě různé frekvence

4.3.3 Přepínač pro měření reálné nebo imaginární složky napětí

Vektor voltmetr nedokáže měřit reálnou i imaginární složku najednou, proto je na řídicím vstupu analogového multiplexoru umístěn digitální multiplexor, který přepíná řídicí signály $u_{\check{r},0}(t)$ a $u_{\check{r},90}(t)$ z blokového schéma 3.2. Digitální multiplexor je realizován pomocí součástky 74153 a je řízen signálem z CPU. Samotná součástka 74153 se skládá z několika multiplexorů, které jsou v této aplikaci zbytečné, proto se nepoužité piny součástky připojí pevně k GND nebo +5 V.

4.4 Sumátor na výstupu vektor voltmetru

Na výstupu VV můžou vznikat hodnoty od $-U_{ss}$ do $+U_{ss}$, kde U_{ss} představuje aritmetickou střední hodnotu signálu $u_1(t)$ z blokového schéma 3.2. Aritmetická střední hodnota se vypočte ze vztahu

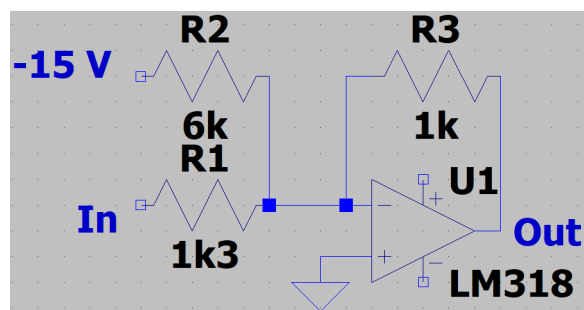
$$U_{ss} = \frac{2}{\pi} U_m, \quad (4.3)$$

kde U_m představuje amplitudu signálu $u_1(t)$. V našem případě je tato amplituda 5 V. Ze vztahu 4.3 můžou být na výstupu VV hodnoty v rozsahu od -3,18 V do 3,18 V. K tomu, aby převodník popsany sekci 4.5 správně převáděl je potřeba tento rozsah přetransformovat na 0 V až 5 V. K tomu využijeme operační zesilovač LM318 v zapojení sumátoru 4.10. [7]

Výstup sumátoru lze vypočítat vztahem

$$U_{Out} = 15 \frac{R_3}{R_2} - U_{In} \frac{R_3}{R_1}. \quad (4.4)$$

Pokud do vztahu 4.4 dosadíme hodnoty uvedené ve schéma 4.10 a za U_{In} maximum a minimum napětí na výstupu VV. Vyjde, že na výstupu sumátoru mohou vznikat hodnoty od 0,04 V do 4,96 V. To znamená, že lze zapojit mezi vstup A/D převodníku a výstup VV. Aby vstupní odpor sumátoru s ope-



Obrázek 4.10: Zapojení sumátoru s operačním zesilovačem

račním zesilovačem neovlivnil výstup výstupního filtru VV, musí se na vstup sumátoru připojit napěťový sledovač.

4.5 A/D převodník

Aby CPU dokázalo přečíst hodnoty na výstupu sčítacího zesilovače, musí se výsledný signál digitalizovat. K dosažení dostatečné přesnosti čtení je požadován minimálně dvanácti bitový A/D převodník.

Převodník MCP3201 je dvanácti bitový a dokáže předat informaci CPU o velikosti napětí na analogovém vstupu digitálně pomocí SPI komunikace. Na vstupu dokáže číst napětí od 0 do 5 V s přesností na 1,2 mV. [12]

4.6 Vstupní generátor průběhů

Samotné blokové schéma VV 3.2 vyžaduje vnější buzení sinusovým signálem. Požadavky jsou, aby generátor průběhů dokázal měnit frekvence sinusového signálu 1 kHz a 10 kHz a byl digitálně nastavitelný.

Programovatelný generátor průběhů AD9833 podporuje SPI komunikaci. Dokáže na výstupu nejen sinusový signál. A frekvence signálu jsou nastavitelné od 0,1 Hz do 25 MHz. Samotný generátor má malé maximální výstupní napětí 0,65 V. [13] Na výstup je tedy nutné umístit operační zesilovač NE5534, v zapojení neinvertujícího zesilovače, který nejen zvýší amplitudu sinusového signálu na požadovaných 5 V, ale zároveň zvýší maximální výstupní proud. Proto, aby vstupní napěťová asymetrie operačního zesilovače neovlivnila střední hodnotu sinusového signálu na výstupu, musí se zesilovač vybalancovat trimrem. [14]

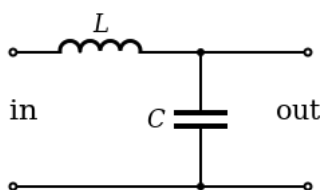
Mezi operační zesilovač a generátor je také zapojená horní propust, aby odstranila stejnosměrnou složku sinusového průběhu.

4.7 Napájení

Většina součástek vyžaduje napájení ze symetrického zdroje ± 15 V. Zbytek součástek vyžaduje napájení $+5$ V. Pro symetrické napájení ± 15 V je zvolen pulzní zdroj PD-2515 s maximálním doporučeným výstupním proudem 0,8 A, který je v našem případě dostatečný. [15] Na výstup pulzního zdroje je zapojen step-down měnič s řídicím čipem LM2596, který je nastaven tak, aby na výstupu měniče bylo $+5$ V.

Samotný pulzní zdroj generuje na výstupu silné rušení, které by mělo za následek chybné fungování součástek a nepřesné měření na výstupu VV. Proto se na vstup napájení DPS musí umístit LC filtr 4.11, který odstraní rušivé vysokofrekvenční části vstupního napájecího signálu. K tomu, aby nevznikla rezonance musí mít cívka vysokou indukčnost a kondenzátor vysokou kapacitu, v tomto případě volíme indukčnost $1 \mu\text{H}$ a kapacitu $100 \mu\text{F}$ [16]

Další element rušení pulzního zdroje je elektromagnetické rušení přenášené vzduchem. Aby jsme předešli problémům s rušením, pulzní zdroj je vložen do plechové krabičky s otvory na odvod tepla.



Obrázek 4.11: Schéma LC filtru [16]

4.8 Procesor

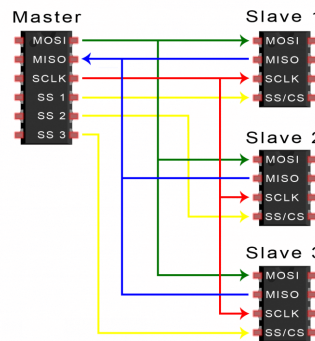
Jako procesor je používána deska Arduino UNO s mikrokontrolerem ATmega328P, kvůli jeho nízké ceně, dostupnosti, vysokému výkonu, velkému počtu digitálních a analogových vstupů a výstupů, možnosti využití komunikace SPI a I2C a jeho celkové univerzálnosti.

4.8.1 Použité typy komunikace

SPI

Sériová komunikace použitá pro komunikaci mezi CPU a A/D převodníkem 4.5 nebo generátorem průběhů 4.6.

Tato komunikace funguje na principu Master/Slave, kde zařízení master, v našem případě CPU, ovládá celou komunikaci. Komunikace probíhá pouze mezi dvěma zařízeními najednou, kde jedno ze zařízení je vždy master. Master určuje signály SS, se kterým zařízením slave bude právě komunikovat. Během komunikace může master upravovat nebo číst registr zařízení slave.



Obrázek 4.12: Zapojení SPI komunikace [17]

MOSI	Výstup dat pro zařízení master a vstup dat pro zařízení slave
MISO	Vstup dat pro zařízení master a výstup dat pro zařízení slave
SCLK	Hodinový signál
SS X	Výběr zařízení slave pro komunikaci s zařízením master

Tabulka 4.2: Popis signálu SPI komunikace

■ I²C

Sériová komunikace použitá pro komunikaci mezi CPU a displejem. Samotný displej nedokáže komunikovat přes I²C komunikaci proto je mezi CPU a displejem zapojeno LCD sériové rozhraní 1602, které umožňuje komunikovat s displejem přes I²C komunikaci. Důvodem použití tohoto rozhraní je snížení počtu připojených vodičů od displeje do CPU, které se omezí ze 16 na 4 vodiče popsané v tabulce 4.3. I²C se používá pro nízkorychlostní periferie a je možné připojit až 128 zařízení. Napájecí vodič musí být skrze pull-up rezistory připojen k signálům SCL a SDA. [18]

Vdd	Napájení
GND	Zemnění
SCL	Hodinový signál
SDA	Datový signál

Tabulka 4.3: Popis signálu I²C komunikace

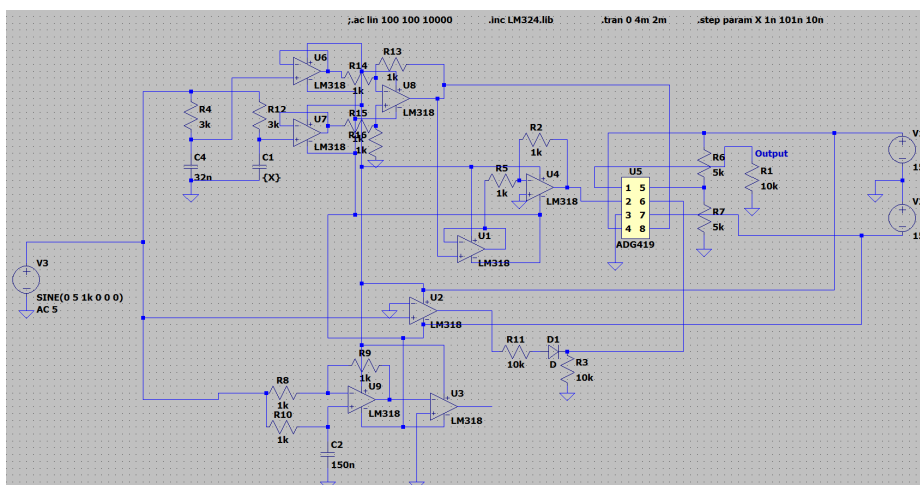
■ USB

USB je sériová sběrnice pro zapojování periférií k počítači pomocí dvou datových vodičů a napájecích vodičů. Deska Arduino UNO ji také využívá. USB má maximální vzdálenost 5 m a maximální počet připojených zařízení 128. Existují různé standardy USB s různými přenosovými rychlostmi. [19]

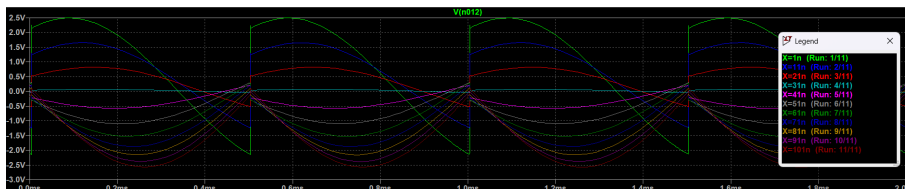
Kapitola 5

Simulace vektor voltmetru v programu LTspice

Ve schéma 5.1 je nakreslený VV s měřeným filtrem a diferenčním zesilovačem v programu LTspice. Pomocí simulace se vytvořil graf 5.2, na kterém je vidět změna výstupního signálu v závislosti na kapacitě a zejména i změna střední hodnoty, ze které lze podle vztahu 4.1 vypočítat reálná složka vstupního signálu VV. Pokud z hodnot simulace vypočteme kapacitu a ESR měřeného kondenzátoru vyjdou hodnoty uvedené v tabulce 5.1.



Obrázek 5.1: Schéma VV v programu LTspice



Obrázek 5.2: Výstup signálů VV pro různé kapacity měřeného kondenzátoru

Zadané hodnoty		Změřené hodnoty a vypočtená kapacita pro $f=1$ kHz a $R=3$ k Ω			Změřené hodnoty a vypočtené ESR pro $f=10$ kHz a $R=300$ Ω		
C [nF]	ESR [Ω]	$U_{2,0}$ [V]	$U_{2,90}$ [V]	C [nF]	$U_{2,0}$ [V]	$U_{2,90}$ [V]	ESR [Ω]
1	40	0,81	1,32	1,78	0,62	1,37	3757
25	40	0,26	0,18	25,2	0,18	0,25	57
50	40	-0,64	-1,14	49,8	-0,64	0,02	43
75	40	-1,26	-0,02	75,6	-1,18	0,11	34
100	40	-1,62	0,17	102,4	-1,48	0,28	32,1

Tabulka 5.1: Změřené a vypočtené hodnoty ze simulace v programu LTspice

V tabulce 5.1 jsou kapacity měřeného kondenzátoru, vypočtené z výstupu simulovaného VV, srovnatelné se zadanou hodnotou měřeného kondenzátoru, avšak ESR měřeného kondenzátoru lze určit pouze s velkou nepřesností, zejména pro kapacitu 1 nF, kde výsledné ESR je naprosto nesmyslné a nelze s nejmenší přesností porovnat s reálnou hodnotou. To je způsobeno vysokou reaktancí kondenzátoru při frekvenci 10 kHz a pro přesnější měření je zapotřebí vyšší frekvence, která je v této realizaci VV nemožná.

Pro výpočet reálné složky vstupního napětí VV z výstupního napětí VV $U_{2,0}$ byl využit vztah 3.4 a pro imaginární z výstupního napětí VV $U_{2,90}$ vztah 3.6. Pomocí prostředí MATLAB byly vztahy 4.1 a 4.2 upraveny tak, aby se z nich daly vypočítat reaktance a ESR měřeného kondenzátoru, výsledné vztahy jsou natolik dlouhé, že se do tohoto dokumentu nevešly.

Kapitola 6

Návrh DPS

Návrh DPS probíhal v programu KiCad. Samotná práce je rozdělena do čtyřech desek a to do vektor voltmetru se všemi komponenty uvedené v sekci 4.3, diferenčního zesilovače 4.2 a dvou De Sautenovo můstků 4.1 s jinými hodnotami rezistorů.

Výhodou DPS jsou jejich malé rozměry a možnost umístění velkého množství součástek na poměrně malou plochu. Při návrhu DPS se řídíme podle návrhových pravidel.

6.1 Rozlitá měď

Napájení a zem by měli v DPS vést vedle sebe, aby nevznikali proudové smyčky, které mají za následek, že se vytvoří malá anténa, která může způsobovat rušení. Zamezení vzniku těchto proudových smyček také napomáhá rozlitá měď. Rozlitá měď je vyplnění nepoužité plochy DPS mědí, která je napojena většinou na zem, ale může být rozlitých zemí více a každá z nich může být napojena i na napájecí větev. Pokud je DPS složena z více vrstev a dvě sousední vrstvy jsou zem a napájení vzniká kondenzátor deskový, který může napomáhat nárazovým odběrům součástek. [20]

Na návrhu DPS vektor voltmetru 6.1 jsou rozlité mědi tři. První je zem přes celou jednu vrstvu. Druhá +5 V okolo digitálních součástek a třetí +15 V přes celý zbytek druhé vrstvy.

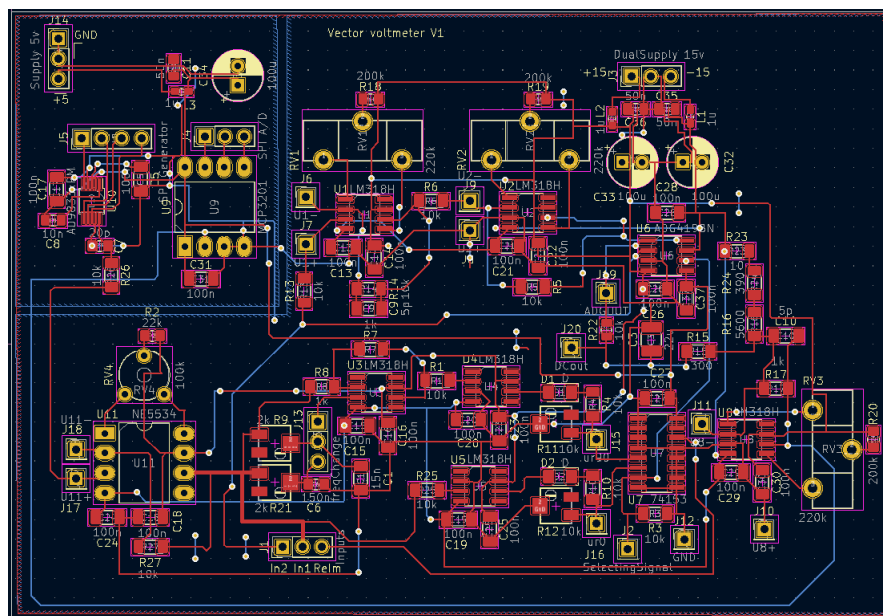
6.2 Blokovací kondenzátory

K součástkám, které vyžadují napájení se mezi napájecí pin součástky a zem zapojují blokovací kondenzátory nejčastěji keramické s hodnotou kapacity 100 nF, tyto kondenzátory musí být zapojeny nejbližší k dané součástce.

Další blokovací kondenzátory se zapojují paralelně přímo na vstup napájení DPS, kde jeden z nich je elektrolytický a druhý keramický, elektrolytický má zpravidla o dost větší kapacitu než keramický v našem případě 100 μF a keramický 50 nF.

Důvod těchto blokovacích kondenzátorů jsou nárazové odběry součástek, na které zdroj pomalu reaguje a bez blokovacích kondenzátorů by součástky

při nárazovém odběru měly slabý vstupní proud do napájení. Dalším důvodem zpomalení náběhu napájecího proudu jsou indukčnosti napájecích cest DPS. [20]



Obrázek 6.1: Navržené DPS vektor voltmetru v programu KiCad

Kapitola 7

Ověření funkce a stanovení nejistot

V této kapitole se porovnávají výsledky vektor voltmetru s výsledky RLC metru R&S®HM8118 s následným stanovením nejistoty samotného vektor voltmetru v měření kapacity. Měření se provádí na pěti kondenzátorech s různými hodnotami kapacity. Kondenzátory jsou foliové a od výrobců WIMA a TDK. Oba výrobci udávají maximální ztrátový činitel 0,015.

C [nF]	$\tan \delta$ [-]	ESR [Ω]
1	<0,015	<238,73
10	<0,015	<23,87
22	<0,015	<10,90
68	<0,015	<3,51
100	<0,015	<2,39

Tabulka 7.1: Hodnoty kondenzátorů udávané výrobcem

C [nF]	$\tan \delta$ [-]	ESR [Ω]
0,99	0,009	144,68
10,23	0,009	14,00
20,84	0,009	6,87
69,72	0,009	2,05
103,49	0,010	1,54

Tabulka 7.2: Hodnoty kondenzátorů změřené RLC metrem

C [nF]	$\tan \delta$ [-]	ESR [Ω]
3,11	0,99	5065
11,8	0,053	71,2
21,2	0,0059	4,4
68,5	0,0164	3,8
107,7	0,0216	3,19

Tabulka 7.3: Hodnoty kondenzátorů změřené vektor voltmetrem

ΔC [nF]	2,12	1,57	0,36	1,22	4,21
-----------------	------	------	------	------	------

Tabulka 7.4: Rozdíl hodnot kapacity měřené RLC metrem a vektor voltmetrem

7.1 Vyhodnocení výsledků

Z tabulky 7.4 se dá přibližně určit nejistota měření kapacity vektor voltmetrem, která je přibližně ± 5 nF. Z tabulky 7.3 a 7.4 je zřejmé, že vektor voltmetr nejhůře měří na koncích rozmezí kapacit 1-100 nF. Hodnoty ESR kondenzátorů změřené vektor voltmetrem jsou v prvním a druhém měření naprosto chybné, avšak hodnoty ESR ostatních měřených kondenzátorů jsou srovnatelné s hodnotami změřenými RLC metrem. Chybovost měření ztrátového činitele vektor voltmetrem způsobila, že bychom mohli prohlásit většinu měřených kondenzátorů za vadné i když by vadné nebyli.

7.2 Možná vylepšení

Optimalizace vektor voltmetru pro měření na vyšších frekvencích by zmenšilo reaktanci měřeného kondenzátoru a měření ESR a ztrátového činitele by bylo dosažitelnější. K tomu, aby jsme dosáhli takové frekvence je zapotřebí optimalizovat řízený usměrňovač ve vektor voltmetru nebo vytvořit vektor voltmetr fungující na jiném principu než je použit v této práci.

Vytvořením frekvenčně nezávislého fazového posouvače o 90° by se rozšířila možnost použití více frekvencí na kterých se může měřit.

Přidáním možnosti změny amplitudy napětí sinusového signálu z generátoru vektor voltmetru by se přidala možnost přesnějšího měření pro kondenzátory určené na vyšší výkony.

S více měřenými filtry s jinými parametry určené pro menší rozsahy kapacit by se dosáhlo větší přesnosti v měření kapacity.



Kapitola 8

Závěr

V této práci byl zkonstruován vektor voltmetr s účelem měřit kapacitu a ztrátový činitel kondenzátorů. Vektor voltmetr dokáže měřit kapacitu v rozsahu 1 nF až 100 nF s přesností ± 5 nF, avšak k měření ztrátového činitele je zapotřebí optimalizace. Oproti ostatním metodám na měření parametrů kondenzátoru je metoda s vektor voltmetrem levnější a méně přesná metoda, avšak po optimalizaci je velká pravděpodobnost, že vektor voltmetr by dokázal minimálně odhalit vadné kondenzátory s vyšším ztrátovým činitelem než udává výrobce. Vektor voltmetr má širokou škálu využití pro měření lineárních obvodů nejen kondenzátorů.

V dalším vývoji je nutné věnovat se optimalizací na vyšší frekvence a zvýšit tím přesnost měření ztrátového činitele. Dále optimalizovat DPS vektor voltmetru a tím více omezit proudové smyčky.



Seznam použitých zkratk

VV	vektor voltmetr
DPS	deska plošných spojů
CPU	central processing unit
ŘO	řídící obvod
SR	slew rate
VNA	vector network analyzer
SPI	serial peripheral interface
GND	ground
A/D	analogově digitální
ESR	equivalent series resistance
MOSI	master out slave in
MISO	master in slave out
(S)CL(K)	(synchronous) clock
I²C	inter-integrated circuit
SDA	synchronous data
SS	slave select
USB	universal serial bus



Literatura

1. *Dissipation factor* [online]. Wikimedia Foundation, 2022 [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Dissipation_factor.
2. STEPINS, Deniss; Gundars ASMANIS; Aivis AŠMANIS. Measuring Capacitor Parameters Using Vector Network Analyzers. *Electronics*. 2014, roč. 18, s. 29–38. Dostupné z DOI: 10.7251/ELS1418029S.
3. *Measuring capacitance & ESR* [online]. 2014. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://meettechniek.info/passive/capacitance.html>.
4. HAASZ, Vladimír a Miloš SEDLÁČEK. *Elektrická měření: přístroje a metody*. Sv. 2. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-02731-7.
5. *De Sautys Bridge Experiment Setup* [online]. Steadyrun, [b.r.] [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://www.steadyrun.com/de-sautys-bridge-experiment-setup>.
6. LAUGHTON, M.A.; D.F. WARNE. *Electrical Engineer's Reference Book*. Elsevier Science, 2002. ISBN 9780080523545. Dostupné také z: <https://books.google.cz/books?id=5j0blzV5eZ8C>.
7. HOSPODKA, Jiří. *Elektronické obvody*. Praha, 2023. Dostupné také z: <https://hippo.feld.cvut.cz/vyuka/soubory/ElektronickeObvody.pdf>.
8. *LM118-N/lm218-N/LM318-N Operational Amplifiers* [online]. Texas Instruments, [b.r.] [cit. 2023-03-27]. Č. LM318. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm318-n.pdf>. Rev. 1.
9. *LC2 MOS Precision Mini-DIP Analog Switch* [online]. Analog Devices, [b.r.] [cit. 2023-03-27]. Č. ADG419. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adg419.pdf>. Rev. B.
10. *EGL 1A ... EGL 1G* [online]. Diotec Semiconductor, [b.r.] [cit. 2023-03-27]. Č. EGL 1A. Dostupné z: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/81570/DIOTEC/EGL1G.html>. Rev. 1.
11. *Phase Shift Circuits* [online]. BrainKart, [b.r.] [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: https://www.brainkart.com/article/Phase-Shift-Circuits_36000/.

12. *2.7V 12-Bit A/D Converter with SPI Serial Interface* [online]. Microchip, [b.r.]. [cit. 2023-04-04]. Č. MCP3201. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/21290f.pdf>. Rev. F.
13. *Low Power, 12.65 mW, 2.3 V to 5.5 V, Programmable Waveform Generator* [online]. Analog Devices, [b.r.]. [cit. 2023-04-04]. Č. AD9833. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad9833.pdf>. Rev. G.
14. *NE5534x, SA5534x Low-Noise Operational Amplifiers* [online]. Texas Instruments, [b.r.]. [cit. 2023-04-04]. Č. NE5534. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ne5534.pdf>. Rev. D.
15. *25W Dual Output Switching Power Supply* [online]. Mean Well, [b.r.]. [cit. 2023-04-03]. Č. PD-25. Dostupné z: <https://www.meanwell-web.com/content/files/pdfs/productPdfs/MW/PD-25/PD-25-spec.pdf>.
16. *LC Filter for Power Supply Design Tips* [online]. [B.r.]. [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: <https://resources.pcb.cadence.com/blog/lc-filter-for-power-supply-design-tips>.
17. *BASICS OF THE SPI COMMUNICATION PROTOCOL* [online]. Circuit Basics, 2016 [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://www.circuitbasics.com/basics-of-the-spi-communication-protocol/>.
18. *I²C* [online]. Wikimedia Foundation, 2022 [cit. 2023-04-18]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/I%C2%B2C>.
19. *USB* [online]. Wikimedia Foundation, 2023 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/USB>.
20. ZÁHLAVA, V. *Metodika návrhu plošných spojů*. České vysoké učení technické, 2000. ISBN 9788001021934. Dostupné také z: <https://books.google.cz/books?id=4fVPYgEACAAJ>.

Příloha A

Zdrojový kód

```
#include <SPI.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <AD9833.h>
#include <math.h>
AD9833 gen(10);
long fg=31250;
unsigned int reading;
double voltage;
double Re, Im;

const byte CLOCKOUT = 9;
const byte DAT = 12;
const byte CLK = 13;
const byte CS = 7;
const byte f1f2 = 6;
const byte ReIm = 5;

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

double spiread(){
    digitalWrite(CS,LOW);
    reading = SPI.transfer16(0x0000);
    digitalWrite(CS,HIGH);
    reading = reading << 3;
    reading = reading >> 4;
    return (double(reading) * 5 / 4096);
}

void setup() {
    pinMode (CLOCKOUT, OUTPUT);
    pinMode (ReIm, OUTPUT);
    pinMode (f1f2 , OUTPUT);
    TCCR1A = bit (COM1A0);
    TCCR1B = bit (WGM12) | bit (CS10);
    OCR1A = 0;
```

```

delay(500);
gen.Begin();
gen.ApplySignal(SINE_WAVE, REG0, fg);
gen.EnableOutput(true);

Serial.begin(9600);
SPI.beginTransaction(SPISettings(1500000, MSBFIRST, SPI_MODE0));
SPI.begin();

pinMode(DAT,INPUT);
pinMode(CS,OUTPUT);

digitalWrite(CS,LOW);
digitalWrite(CS,HIGH);

digitalWrite(CLK,LOW);

lcd.init();
lcd.backlight();

}

void loop() {
digitalWrite(f1f2,LOW);
digitalWrite(ReIm,LOW);
delay(2000);
Serial.println(1.3*(2.5 - spiread()));
Re=-M_PI/2*1.3*(2.5 - spiread());
digitalWrite(ReIm,HIGH);
delay(2000);
Serial.println(1.3*(2.5 - spiread()));
Im=-M_PI/2*1.3*(2.5 - spiread());

/*b=-(R*U1*(Im*square(R) + 2*Im*R*R3 - U1*R*Xc1 + Im*square(R3) + Im*s
a=(square(Im)*square(R) + 2*square(Im)*R*R3 + square(Im)*square(R3) +
Xc=b/a;
C1=1/(2*M_PI*f*Xc)*1000000000;*/

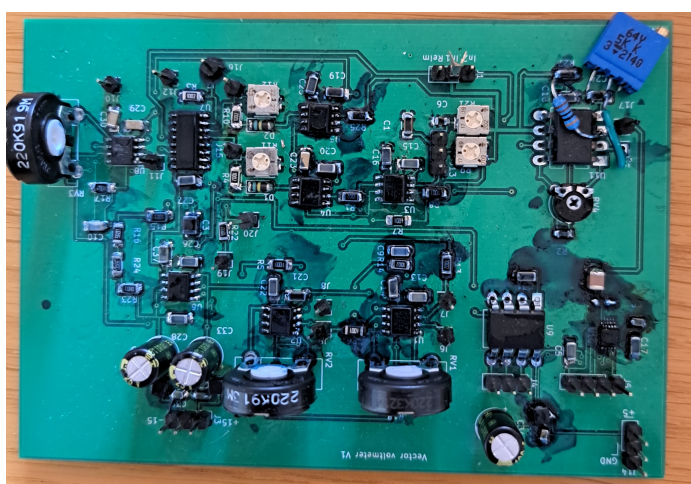
lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Re=");
lcd.print(Re);
/*lcd.setCursor(8,0);
lcd.print(C1);*/

```

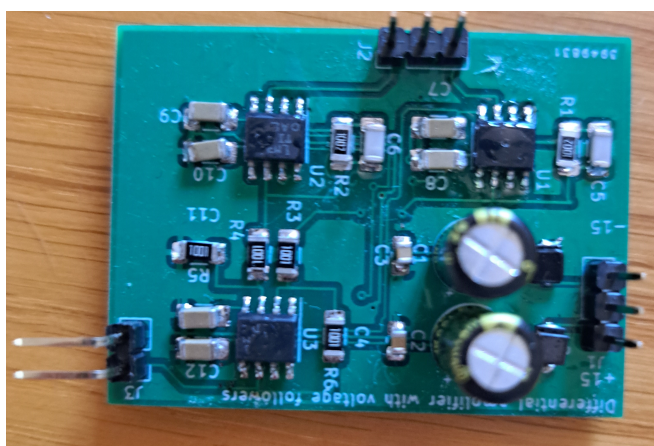
```
lcd.setCursor(0,1);  
lcd.print("Im=");  
lcd.print(Im);  
delay(250);  
  
}
```


Příloha B

Osazené DPS



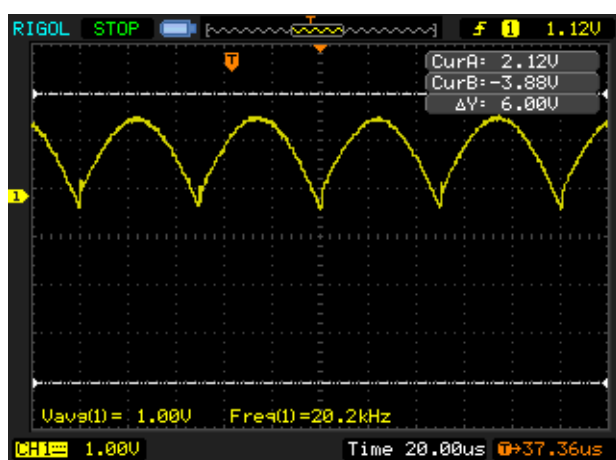
Obrázek B.1: Osazené DPS vektor voltmetru



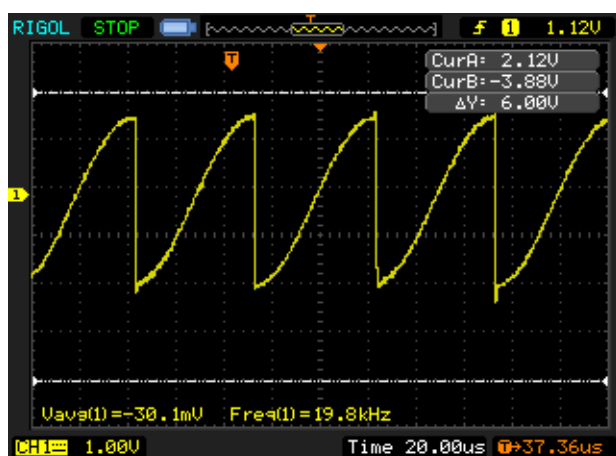
Obrázek B.2: Osazené DPS diferenčního zesilovače s napětovými sledovači

Příloha C

Průběhy signálů změřené na osciloskopu



Obrázek C.1: Průběh signálu za řízeným usměrňovačem pro měření reálné složky při měření kondenzátoru s kapacitou 68 nF



Obrázek C.2: Průběh signálu za řízeným usměrňovačem pro měření imaginární složky při měření kondenzátoru s kapacitou 68 nF

Příloha D

Hotový vektor voltmetr



Obrázek D.1: Vektor voltmetr z boku



Obrázek D.2: Vektor voltmetr víko