



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

### ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## NÁVRH MĚŘIČE IMPEDANCE

DESIGN OF AN IMPEDANCE METER

## SEMESTRÁLNÍ PRÁCE

SEMESTRAL THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Glombíček

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Alexandr Otáhal, Ph.D.

BRNO 2025





# Semestrální práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

**Student:** Vojtěch Glombíček

**ID:** 256636

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2025/26

**NÁZEV TÉMATU:**

**Návrh měřiče impedance**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Nastudujte principy měření impedance elektrických součástek a dostupné metody realizace měřicích přístrojů v oblasti nízkých a středních frekvencí. Zaměřte se na způsoby buzení měřeného prvku, zpracování signálu a vyhodnocení výsledků.

Na základě rešerše navrhněte schéma přístroje pro měření impedance v pásmu nastavitelných frekvencí do 100 kHz. Přístroj by měl umožňovat charakterizaci pasivních součástek, zejména cívek a kondenzátorů.

Výsledky zpracujte v semestrálním projektu.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Podle pokynů vedoucího závěreční práce.

**Termín zadání:** 15.9.2025

**Termín odevzdání:** 6.1.2026

**Vedoucí práce:** Ing. Alexandr Otáhal, Ph.D.

**doc. Ing. et Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.**

předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

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



## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem, konstrukcí a testováním digitálního měřiče impedance (LCR metru). Cílem práce bylo vytvořit cenově dostupné zařízení, které se svými parametry přibližuje komerčním laboratorním přístrojům a umožňuje snadnou komunikaci s osobním počítačem. Navržené řešení využívá metodu samo-vyvažovacího můstku a operuje ve frekvenčním rozsahu 10 Hz až 100 kHz. Práce popisuje kompletní hardwarový návrh analogové i digitální části, včetně digitalizace signálu, a následnou implementaci ovládacího softwaru. Výsledkem práce je funkční prototyp měřiče propojitelný přes rozhraní USB. Provedená ověřovací měření na sadě referenčních součástek potvrdila, že zařízení dosahuje požadované přesnosti měření do 1 % v celém pracovním rozsahu.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Měřič impedance, LCR metr, samo-vyvažovací můstek, měření RLC, měřící zařízení, zkušební instrumentace

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with the design, construction, and testing of a digital impedance meter (LCR meter). The aim of the thesis was to create a cost-effective device with parameters comparable to commercial laboratory instruments, featuring easy connectivity with a personal computer. The proposed solution utilizes the auto-balancing bridge method and operates within a frequency range of 10 Hz to 100 kHz. The thesis describes the complete hardware design of both the analog and digital sections, including signal digitization, as well as the implementation of the control software. The result is a functional prototype connected via a USB interface. Verification measurements performed on reference components confirmed that the device achieves the required measurement accuracy of 1 % across the entire operating range.

## **KEYWORDS**

Impedance meter, LCR meter, auto-balancing bridge, RLC measurement, measuring device, test equipment



GLOMBÍČEK, Vojtěch. *Návrh měřiče impedance*. Semestrální práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2026. Vedoucí práce: Ing. Alexandr Otáhal, Ph.D.



## **Prohlášení autora o původnosti díla**

Jméno a příjmení autora: Vojtěch Glombíček

VUT ID autora: 256636

## **Typ práce:** Semestrální práce

Akademický rok: 2025/26

## Téma závěrečné práce: Návrh měřiče impedance

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. V souvislosti s vytvořením závěrečné práce jsem neporušil zásady a doporučení VUT k využívání generativní umělé inteligence.

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

Brno .....  
..... podpis autora\*

\*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.



## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské/diplomové/disertační práce panu Ing. Ale-  
xandru Otáhalovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy  
k práci.



# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>19</b>
<b>1 Teoretická část</b>	<b>21</b>
1.1 Impedance . . . . .	21
1.2 Metody měření impedance . . . . .	21
1.2.1 Můstková metoda . . . . .	21
1.2.2 Rezonanční metoda . . . . .	22
1.2.3 Metoda měření proudu a napětí . . . . .	22
1.2.4 Samo-vyvažovací můstek . . . . .	22
1.3 Měřiče impedance dostupné na trhu . . . . .	22
1.3.1 Univerzální tester komponent . . . . .	23
1.3.2 Ruční LCR měřiče . . . . .	23
1.3.3 Stolní LCR měřiče . . . . .	23
<b>2 Implementace samo-vyvažovacího můstku</b>	<b>27</b>
2.1 Zdroj měřícího signálu . . . . .	27
2.1.1 Přímá digitální syntéza (DDS) . . . . .	27
2.1.2 Úprava amplitudy a stejnosměrné složky signálu . . . . .	27
<b>3 Digitalizace a zpracování signálů</b>	<b>31</b>
3.1 Metoda převodu na stejnosměrná napětí . . . . .	31
3.1.1 Špičkový detektor . . . . .	31
3.1.2 Fázový detektor . . . . .	32
3.2 Metoda vzorkování a digitálního zpracování . . . . .	34
<b>4 Praktická část</b>	<b>35</b>
<b>Závěr</b>	<b>37</b>
<b>Literatura</b>	<b>39</b>
<b>Seznam symbolů a zkratek</b>	<b>41</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>43</b>
<b>A Některé příkazy balíčku thesis</b>	<b>45</b>
A.1 Příkazy pro sazbu veličin a jednotek . . . . .	45
A.2 Příkazy pro sazbu symbolů . . . . .	45

<b>B Druhá příloha</b>	<b>47</b>
<b>C Příklad sazby zdrojových kódů</b>	<b>49</b>
C.1 Balíček <code>listings</code> . . . . .	49
<b>D Algoritmy</b>	<b>53</b>
<b>E Obsah elektronické přílohy</b>	<b>55</b>

# Seznam obrázků

1.1	Schéma měřícího můstku . . . . .	21
1.2	Schéma samo-vyvažovacího můstku . . . . .	22
1.3	Univerzální tester komponent LCR-T4 [2] . . . . .	23
1.4	Ruční měřič LCR Keysight U1732C [5] . . . . .	24
1.5	Stolní měřič Rhode&Schwarz LCX200 [6] . . . . .	24
2.1	Ilustrace principu DDS . . . . .	28
2.2	Schéma obvodu pro nastavení amplitudy signálu. . . . .	28
3.1	Schéma špičkového detektoru . . . . .	31
3.2	Graf vstupního a výstupního napětí šp. detektoru s demonstrací efektu šumu . . . . .	32
3.3	Schéma XOR fázového detektoru. [3] . . . . .	33
3.4	Graf napětí XOR fázového detektoru. . . . .	33
3.5	Graf částí zašuměných sinusových signálů s vyznačenými průchody nulou . . . . .	34



# **Seznam tabulek**

1.1	Porovnání LCR metrů [6] [5]	25
A.1	Přehled příkazů	45



# Úvod

Měřiče impedance, často označované jako LCR metry, představují klíčové vybavení jak pro vývojové laboratoře, tak pro výrobní linky. Jejich primárním účelem je precizní měření impedance a odvozených veličin, jako jsou ztrátový činitel, ESR či činitel kvality.

Tato bakalářská práce se zabývá komplexním návrhem, konstrukcí a otestováním funkčního prototypu měřiče impedance. Hlavní motivací pro vznik tohoto zařízení byla absence cenově dostupného řešení na trhu, které by zároveň nabízelo dostatečnou přesnost a možnost snadné integrace s počítačem.

Na základě rešerše komerčně dostupných přístrojů a analýzy požadavků na měření byly stanoveny klíčové parametry navrhovaného zařízení. Cílem je vytvořit přístroj, který se svými vlastnostmi přiblíží profesionálním řešením, avšak s výrazně nižšími pořizovacími náklady.

Specifikace navrženého zařízení:

- Frekvenční rozsah: 10 Hz – 100 kHz
- Rozsah měření indukčnosti: 100 nH – 10 H
- Rozsah měření kapacity: 100 pF – 10 mF
- Cílová přesnost: 1%
- Amplituda měřicího signálu: 0,1 – 2 V
- Stejnosměrná složka (Bias): 0 – 2 V
- Konektivita: Komunikace s PC a napájení přes USB

Text práce je logicky členěn do několika částí. První kapitola shrnuje teoretická východiska týkající se impedance. Druhá kapitola se zaměřuje na princip a implementaci metody samo-vyvažovacího můstku. Třetí část rozebírá problematiku digitalizace a zpracování signálu. Čtvrtá a pátá kapitola detailně popisují samotný hardwarový návrh a související softwarové vybavení. Závěrečná kapitola je věnována verifikaci prototypu a prezentaci naměřených výsledků, které demonstруjí dosaženou přesnost zařízení.



# 1 Teoretická část

## 1.1 Impedance

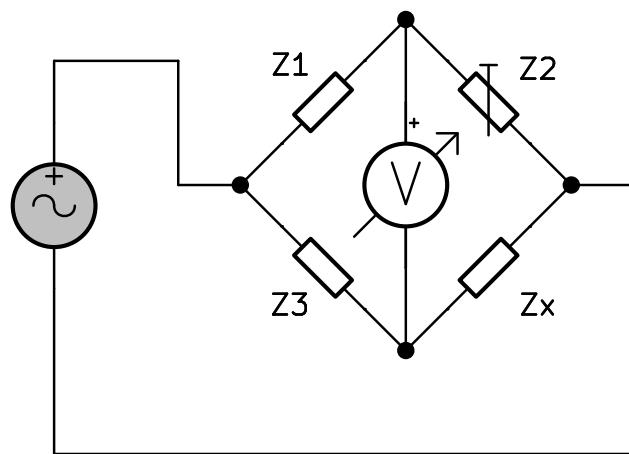
Impedance  $Z$  je fyzikální veličina, která popisuje celkový odpor elektrického obvodu vůči střídavému proudu o dané frekvenci. Vyjadřuje se komplexním číslem, kdy reálná část odpovídá odporu  $R$  a imaginární část reprezentuje reaktanci  $X$ .

V některých případech je výhodné použít obrácenou hodnotu impedance  $Y = \frac{1}{Z}$ , zvanou admitance. [4]

## 1.2 Metody měření impedance

### 1.2.1 Můstková metoda

Měření pomocí můstku je jednoduché a přesné, avšak velmi nepraktické. Princip metody spočívá v tom, že pokud jsou impedance obou větví ( $Z_2$  a  $Z_x$ ) stejné, pak musí být napětí mezi větvemi nulové. Schéma můstku je zobrazeno v obr. 1.1. [4]



Obr. 1.1: Schéma měřícího můstku

Když se  $Z_2$  nastaví tak, aby mezi větvemi bylo naměřeno nulové napětí, pak je měřená impedance  $Z_x = \frac{Z_1}{Z_3} \cdot Z_2$

Problém této metody spočívá v tom, že je nutno znát nastavenou hodnotu  $Z_2$ . Protože nastavitelné kondenzátory a cívky nejsou praktické, používá se tato metoda zejména pro měření malých změn v odporu např. tenzometru.

## 1.2.2 Rezonanční metoda

## 1.2.3 Metoda měření proudu a napětí

Princip této metody je výpočet hodnoty neznámé impedance z naměřených hodnot napětí a proudu podle ohmova zákona. [4] V praxi se proud měří pomocí měření napětí na bočníku.

$$|Z| = \frac{U_1}{I} = \frac{U_1}{U_2} \cdot R$$

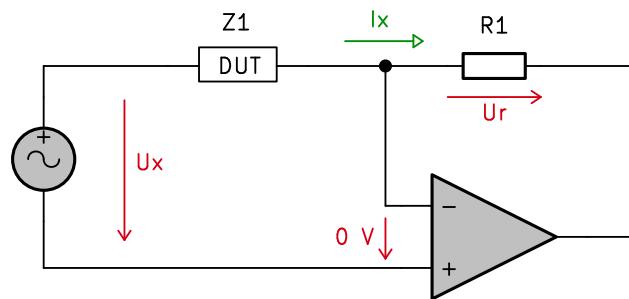
Takovým měřením však získáme pouze modul komplexní impedance, z čehož nelze určit, zda je charakter impedance rezistivní nebo reaktivní. Proto je nutné měřit také fázový posun  $U_1$  a  $U_2$ , který je roven argumentu  $\varphi$ .

$$Z = |Z| \angle \varphi$$

## 1.2.4 Samo-vyvažovací můstek

V praxi se metoda měření proudu a napětí často implementuje pomocí tzv. samo-vyvažovacího můstku, což je operační zesilovač, který vytváří virtuální zem (viz obr. ??). [4]

Výhoda takového uspořádání je, že jak měřená impedance tak bočník jsou připojeny k zemi, je tedy možné na nich jednoduše měřit napětí vzhledem k zemi.



Obr. 1.2: Schéma samo-vyvažovacího můstku

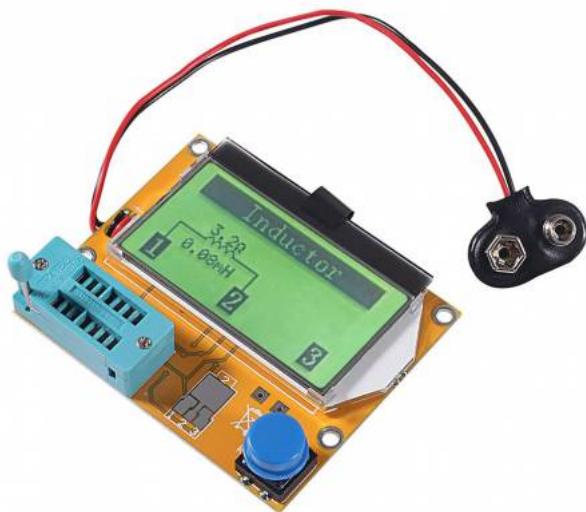
## 1.3 Měřiče impedance dostupné na trhu

Na trhu je mnoho dostupných zařízení pro měření impedance. Pro ukázku byly vybrány tři, každé ze samostatné cenové kategorie.

### 1.3.1 Univerzální tester komponent

Jako zástupce nejlevnější třídy byl vybrán tester LCR-T4 (viz obr. 1.3). Tento přístroj neměří přímo impedanci, ale měří hodnoty odporu, kapacity a indukčnosti. Jako doplněk má také funkci rozpoznání tranzistorů.

Pro měření využívá metodu časové konstanty, kdy se měří čas nabití kondenzátoru přes známý odpor.



Obr. 1.3: Univerzální tester komponent LCR-T4 [2]

Přesnost měření není udávána, přístroj totiž slouží pouze pro hrubou identifikaci součástek. Cena se pohybuje okolo 350 Kč[2].

### 1.3.2 Ruční LCR měřiče

Pokročilejší přístroje jsou ruční měřiče LCR ve formě podobné multimetru. Pro příklad byl vybrán měřič Keysight U1732C (viz obr. 1.4).

Ruční měřiče jsou vhodné pro rychlou identifikaci cívek a kondenzátorů, nabízejí specifikovanou přesnost a možnost nastavit parametry měření jako frekvenci měřícího signálu. [5]

### 1.3.3 Stolní LCR měřiče

Pro nejpřesnější měření je nutno použít špičkové stolní LCR měřiče. Jako zástupce byl vybrán přístroj LCX200 od firmy Rhode&Schwarz (viz obr. 1.5).



Obr. 1.4: Ruční měřič LCR Keysight U1732C [5]

Tyto přístroje podporují čtyřbodovou metodu měření, která eliminuje parazitní indukčnost měřících sond. Narozdíl od ručních měřičů se zde používají stíněné koaxiální sondy, které jsou méně náchylné k rušení.

Výrobce standardně dodává několik různých fixtur k připojení měřeného vzorku, typicky SMD součástky.

Většina stolních měřičů také podporuje připojení do sítě LAN a automatizaci měření. [6]



Obr. 1.5: Stolní měřič Rhode&Schwarz LCX200 [6]

V tabulce 1.1 jsou porovnány přístroje Keysight U1732C a Rohde & Schwarz LCX200. Stolní přístroj je výrazně přesnější a nabízí pokročilejší možnosti měření,

je ale i násobně dražší.

Tab. 1.1: Porovnání LCR metrů [6] [5]

Parametr	Keysight U1732C	Rohde & Schwarz LCX200
<b>Konstrukce</b>	Ruční	Stolní
<b>Cena</b>	cca 13 000 – 15 000 Kč	cca 120 000 – 300 000 Kč+
<b>Frekvenční rozsah</b>	Pevné body: 100 Hz, 120Hz, 1 kHz, 10 kHz	Spojitý: 4 Hz až 10 MHz
<b>Základní přesnost</b>	0,2 %	0,05 %
<b>Amplituda test. signálu</b>	Pevná (typicky 0,74 Vrms)	Nastavitelná: 10 mV až 10 V
<b>DC Bias (Předpětí)</b>	Není k dispozici	Interní 0–10 V (Externí až 40 V)
<b>Rychlosť měření</b>	~ 1–2 měření/s	až 250 měření/s
<b>Konektivita</b>	IR-to-USB	USB, LAN, Digital I/O, GPIB



## 2 Implementace samo-vyvažovacího můstku

### 2.1 Zdroj měřícího signálu

Pro účely měření impedance je nezbytné vybudit měřenou komponentu adekvátním napětím a proudem.

Specifikace návrhových požadavků definují, že budicí zdroj musí generovat harmonické střídavé napětí s plně nastavitelnými parametry, zahrnujícími frekvenci, amplitudu a superponovanou stejnosměrnou složku (DC offset).

#### 2.1.1 Přímá digitální syntéza (DDS)

V moderních měřičích impedance se téměř výhradně používá pro generování sinusoidního signálu metoda DDS. Historicky nebyly digitální integrované obvody dostatečně výkonné, proto se využívaly různé analogové oscilátory a harmonické tvarovače. Takové obvody byly však složité, dnes se již implementují jen zřídka.

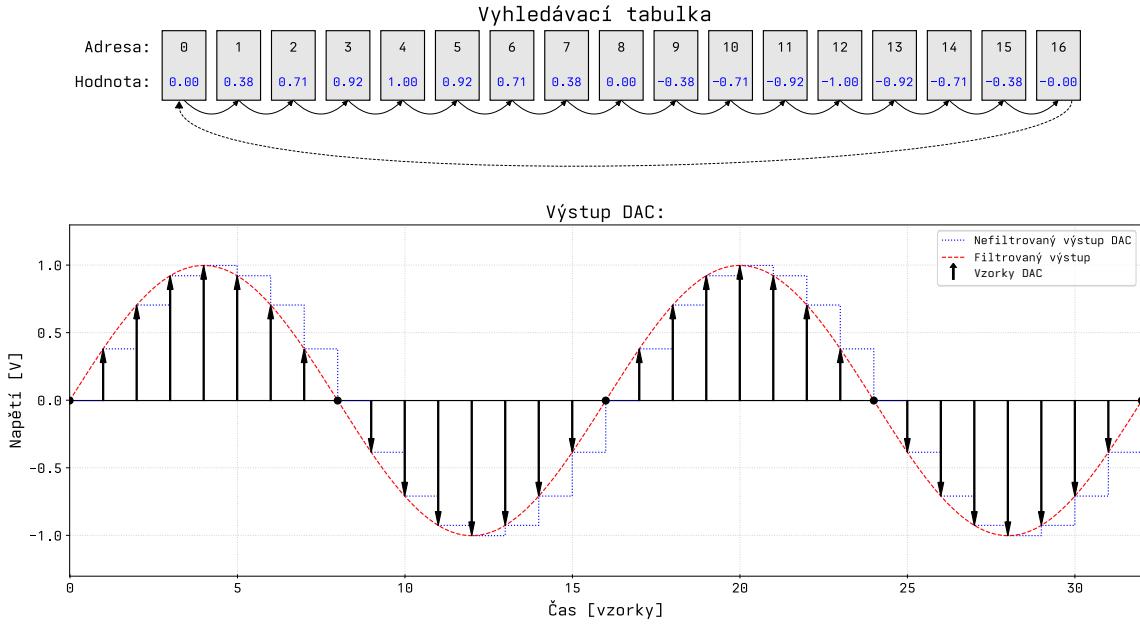
Metoda DDS spočívá v generování sinusového průběhu D/A převodníkem, do kterého jsou z paměti načítány předvypočítané hodnoty funkce  $\sin(t)$ . Tyto hodnoty se nazývají „(vyhledávací tabulka), nebo anglicky „(lookup table) (LUT). Frekvence výsledného signálu je závislá na prodlevě mezi načítáním jednotlivých hodnot. [3] Signál z převodníku je následně filtrován dolní propustí o adekvátní mezní frekvenci, která odstraní vyšší harmonické složky vzniklé z diskrétních digitálních kroků. Princip funkce DDS je ilustrován na obr. 2.1

#### 2.1.2 Úprava amplitudy a stejnosměrné složky signálu

Jednoduché integrované obvody DDS typicky nepodporují nastavení amplitudy nebo stejnosměrné složky signálu, tuto úpravu je tedy nutno provést externě.

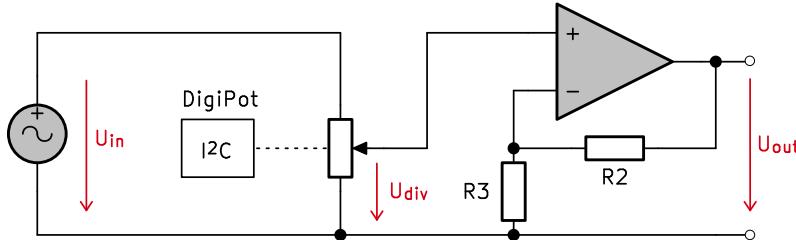
Digitálního řízení amplitudy lze docílit několika způsoby, například:

- Zapojit sinusový signál jako referenci D/A převodníku, který pak bude fungovat jako digitálně ovládaný dělič.
- Použít zesilovač s programovatelným zesílením (PGA). Tyto zesilovače většinou mají málo úrovní zesílení.
- Použít operační zesilovač s digitálním potenciometrem ve zpětné vazbě. Takové zapojení je limitováno minimálním zesílením  $A = 1$ .
- Operačním zesilovačem zesílit amplitudu na maximální hodnotu a následně ji snížit digitálním potenciometrem zapojeným jako odporový dělič.
- Nejdříve zeslabit signál digitálním potenciometrem – děličem a poté jej zesílit operačním zesilovačem s fixním zesílením. Oproti předchozímu zapojení se tím ušetří jeden sledovač, protože výstup operačního zesilovače je nízkoimpedanční.



Obr. 2.1: Ilustrace principu DDS

Z těchto metod se jako nejvhodnější jeví poslední jmenovaná. Její schéma je zobrazeno na obr. 2.2.



Obr. 2.2: Schéma obvodu pro nastavení amplitudy signálu.

Fixní zesílení operačního zesilovače se řídí vztahem 2.1.

$$A = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_2}{R_3} \quad (2.1)$$

Vstupní amplituda je dána  $U_{in} = 0,6$  V, požadovaná maximální amplituda signálu je  $U_{out} = 3$  V. Dosazením (rovnice 2.2) získáme poměr rezistorů  $R_2$  a  $R_3$ .

$$A = \frac{3}{0,6} = 5 = 1 + \frac{4}{1} \quad (2.2)$$

Prakticky můžeme použít např.  $R_3 = 10\text{ k}\Omega$ ;  $R_2 = 4 \times 10\text{ k}\Omega$  v sérii.

Celková amplituda výstupního signálu  $U_{out}$  vychází z rovnice 2.3. Digitální hodnotu potenciometru pro konkrétní amplitudu  $U_{out}$  vypočítáme ze vztahu 2.4.

$$U_{\text{out}} = U_{\text{in}} \cdot \frac{X}{2^n} \cdot A \quad (2.3)$$

$$X = \frac{2^n \cdot U_{\text{out}}}{A \cdot U_{\text{in}}} \quad (2.4)$$

kde  $n$  je bitové rozlišení digitálního potenciometru



### 3 Digitalizace a zpracování signálů

Výstupem samo-vyvažovacího můstku jsou dva harmonické signály reprezentující napětí a proud na měřeném obvodu. Tyto signály je potřeba zdigitalizovat a následně zpracovat tak, aby bylo následně možné vypočítat impedanci obvodu.

Pro výpočet komplexní impedance je potřeba znát amplitudy (nebo efektivní hodnoty) a fázový posun mezi oběma signály. Dále je v tomto případě cílem měřit i střední hodnotu napětí, protože signály mohou mít stejnosměrnou složku.

Nezáleží, zda je měřena amplituda nebo efektivní hodnota napětí, protože důležité nejsou absolutní hodnoty napětí, ale jejich poměr.

#### 3.1 Metoda převodu na stejnosměrná napětí

Jako nejjednodušší řešení se nabízí vytvořit obvod, který jednotlivé veličiny převeď na stejnosměrné napětí, které je následně změřeno A/D převodníkem (ADC).

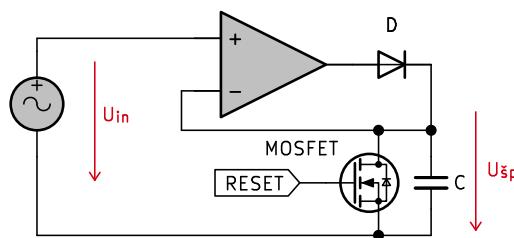
Výhodou takového přístupu je nízký nárok na vzorkovací rychlosť ADC, které proto může být velmi precizní. S tím se spojuje i jednoduchost zpracování v mikrokontroléru, který počítá pouze s několika vzorky.

Zásadním problémem je však náchylnost na šum, což se zejména projevuje při vyšších frekvencích. Z toho důvodu se tato metoda v komerčních zařízeních nepoužívá.

##### 3.1.1 Špičkový detektor

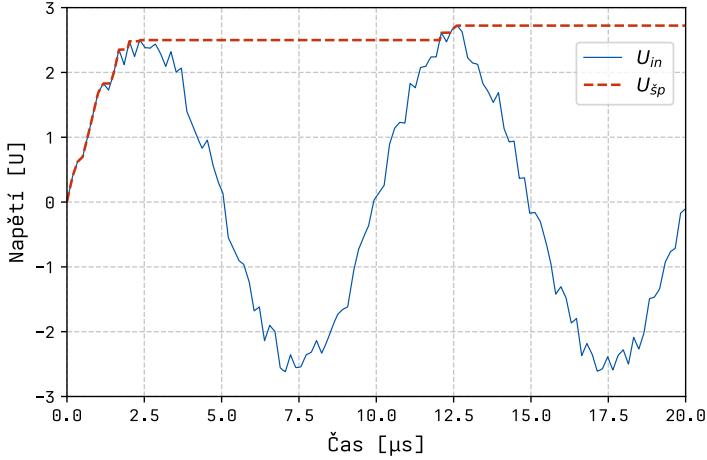
Pro měření amplitudy střídavého signálu lze použít špičkový detektor, který je realizován kondenzátorem nabíjeným přes diodu, která brání vybíjení v závěrném směru.

Jak je ukázáno na schématu v obr. 3.1, operační zesilovač v zapojení „sledovač“ se zpětnou vazbou zapojenou za diodu kompenzuje její propustné napětí. Po odečtení hodnoty je špičkový detektor resetován tranzistorem, který zkratem vybije kondenzátor. Poté je detektor připraven na další měření. [1]



Obr. 3.1: Schéma špičkového detektoru

Špičkový detektor je citlivý na šum a jiné nežádoucí napěťové špičky v signálu, které mohou posunout naměřenou hodnotu výše, než je pravá hodnota signálu bez šumu. Tento jev je ukázán na grafu v obr. 3.2. Čím delší je doba měření, tím větší je pravděpodobná nepřesnost.



Obr. 3.2: Graf vstupního a výstupního napětí špičkového detektoru s demonstrací efektu šumu

### 3.1.2 Fázový detektor

Fázový posun signálů může být měřen fázovými detektory fungujícími na principu průchodu nulou. Jednoduchá implementace takového detektoru je založena na logickém hradle XOR, do kterého vstupují pulzní signály z komparátorů, které indikují momentální polaritu signálu (viz obr. 3.3).

Pokud mají signály stejnou fazu, mají v každý okamžik i stejnou polaritu, tudíž výstup XOR hradla nebude nikdy aktivní. V případě opačné fáze signálů ( $\varphi = 180^\circ$ ) je jejich polarita vždy opačná, výstup XOR tedy bude aktivní 100% času.

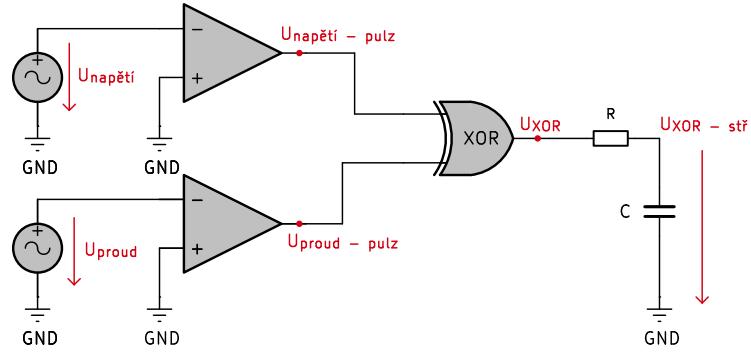
Při fázových posunech mezi těmito extrémy  $\varphi \in (0^\circ; 180^\circ)$  je střída výstupu XOR přímo úměrná fázovému posunu. Pro získání stejnosměrného napětí se použije RC filtr dolní propust, který ze signálu získá střední hodnotu (viz obr. 3.4). [3]

Fázový posun se ze střední hodnoty vypočítá následovně:

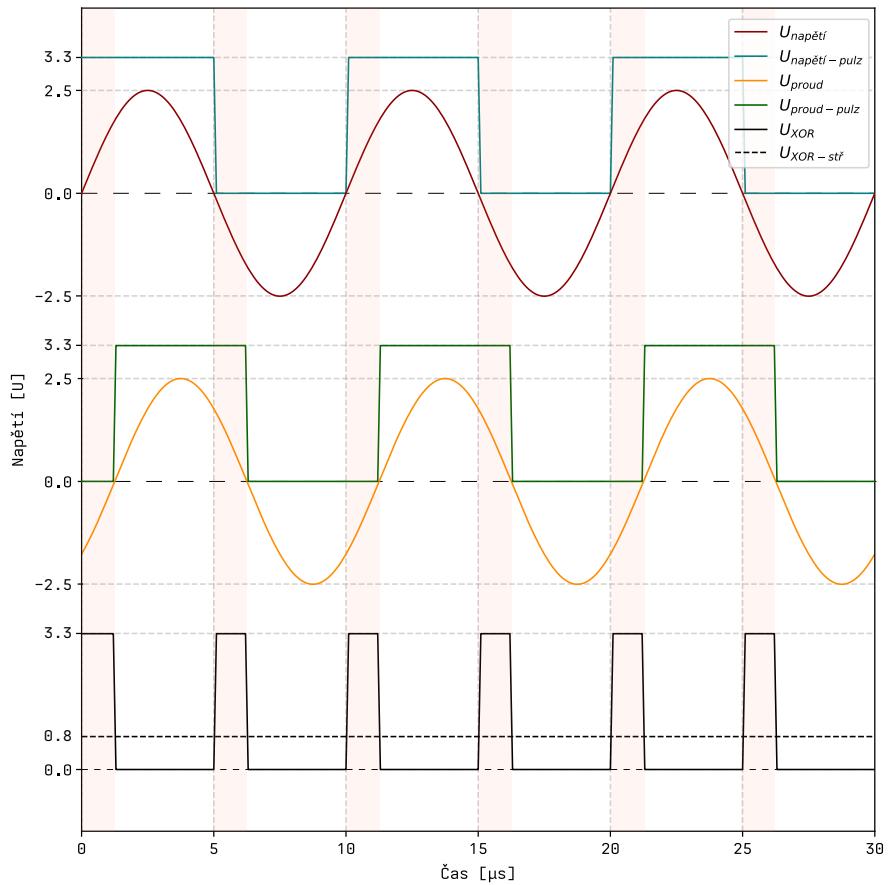
$$k = \frac{180}{U_{log}}$$

$$\varphi = k \cdot U_{XOR-stř} \quad [^\circ]$$

Měření fáze podle průchodu nulou je sice jednoduché, ale má nedostatky, které brání použití pro přesné měřiče.



Obr. 3.3: Schéma XOR fázového detektoru. [3]

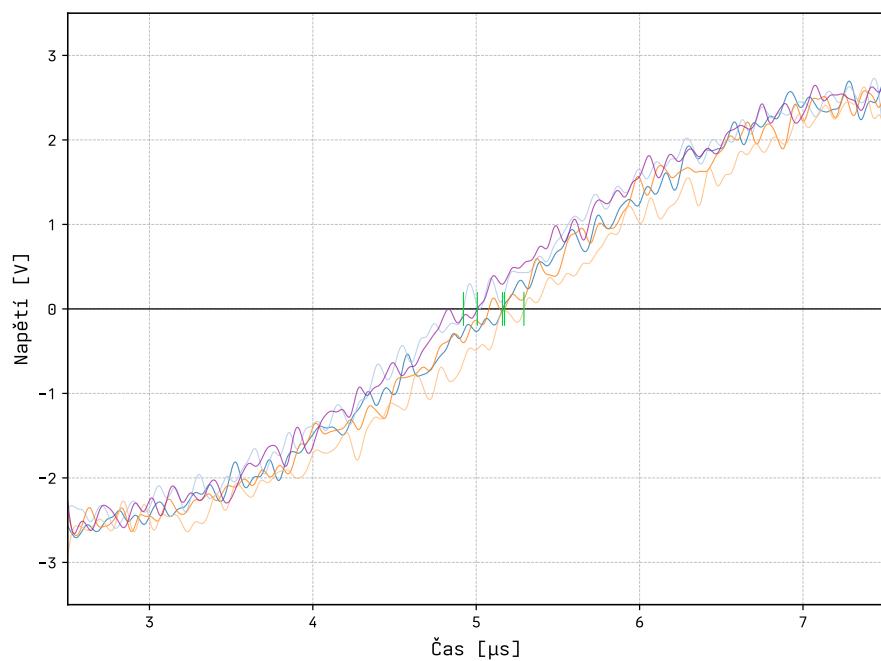


Obr. 3.4: Graf napětí XOR fázového detektoru.

Jelikož logické hradlo XOR pracuje na logických úrovních, není zaručeno, že se jeho výstupní napětí bude pohybovat mezi napájecím napětím a nulou. Odchylky ve výstupním napětí ovlivní výslednou vyfiltrovanou střední hodnotu.

Další problém je zapříčiněn možnou přítomností šumu na měřeném signálu. Může se tedy stát, že v jedné půlperiodě signál projde nulou vícekrát, nebo že bude průchod nulou časově posunutý důsledkem fázového šumu na měřeném signálu. Graficky je

tento fenomén zobrazen na obr. 3.5.



Obr. 3.5: Graf částí zašuměných sinusových signálů s vyznačenými průchody nulou

## 3.2 Metoda vzorkování a digitálního zpracování

lorem ipsum

## **4 Praktická část**

lorem ipsum



# **Závěr**

Shrnutí studentské práce.



# Literatura

- [1] Elliott, R.: AN014 - Peak Detection Circuits. <https://sound-au.com/appnotes/an014.htm>, 2017, page Created: 29 March 2017; Accessed: 8 December 2025.
- [2] HADEX, spol. s r.o.: Univerzální tester součástek LCR-T4. <https://www.hadex.cz/r098-univerzalni-tester-soucastek-lcr-t4/>, December 2025.
- [3] Horowitz, P.; Hill, W.: *The Art of Electronics*. Cambridge University Press, třetí vydání, 2015, ISBN 978-0521809269.
- [4] Keysight Technologies: *Impedance Measurement Handbook: A Guide to Measurement Technology and Techniques*. Keysight Technologies, 6 vydání, July 2020, application Note 5950-3000.  
URL <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-06840/application-notes/5950-3000.pdf>
- [5] Keysight Technologies, Santa Rosa, CA, USA: *U1730C Series Handheld LCR Meters: Data Sheet*. 2021, lit. No. 5990-7778EN.  
URL <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-02950/data-sheets/5990-7778.pdf>
- [6] Rohde & Schwarz, Munich, Germany: *R&S LCX LCR Meters: Data Sheet*. 2022, verze 03.00, Dok. č. 3609.8309.32.  
URL [https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl\\_downloads/pdm/cl\\_brochures\\_and\\_datasheets/data\\_sheet/3609\\_8309\\_32/LCX\\_dat\\_en\\_3609-8309-32\\_v0300.pdf](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/pdm/cl_brochures_and_datasheets/data_sheet/3609_8309_32/LCX_dat_en_3609-8309-32_v0300.pdf)



# Seznam symbolů a zkratek

<b>LCR</b>	induktivita, kapacita, odpor
<b>ESR</b>	equivalent series resistance (ekvivalentní sériový odpor)
<b>DUT</b>	device under test (měřené zařízení)
<b>DUT</b>	device under test (měřené zařízení)
<b>A/D</b>	analogově–digitální
<b>DDS</b>	direct digital synthesis
<b>LUT</b>	lookup table
<b>D/A</b>	digitálně–analogový
<b>PGA</b>	programmable gain amplifier
<b>ADC</b>	analog-digital converter (analogově-digitální převodník)
<b>SAR</b>	successive approximation register (registr postupné approximace)
$f_{vz}$	vzorkovací kmitočet



# **Seznam příloh**

<b>A Některé příkazy balíčku thesis</b>	<b>45</b>
A.1 Příkazy pro sazbu veličin a jednotek . . . . .	45
A.2 Příkazy pro sazbu symbolů . . . . .	45
<b>B Druhá příloha</b>	<b>47</b>
<b>C Příklad sazby zdrojových kódů</b>	<b>49</b>
C.1 Balíček listings . . . . .	49
<b>D Algoritmy</b>	<b>53</b>
<b>E Obsah elektronické přílohy</b>	<b>55</b>



# A Některé příkazy balíčku thesis

## A.1 Příkazy pro sazbu veličin a jednotek

Tab. A.1: Přehled příkazů pro matematické prostředí

Příkaz	Příklad	Zdroj příkladu	Význam
<code>\textind{...}</code>	$\beta_{\max}$	$\$\\beta_{\\textind{max}}$$	textový index
<code>\const{...}</code>	$U_{\text{in}}$	$\$\\const{U}_{\\textind{in}}$$	konstantní veličina
<code>\var{...}</code>	$u_{\text{in}}$	$\$\\var{u}_{\\textind{in}}$$	proměnná veličina
<code>\complex{...}</code>	$u_{\text{in}}$	$\$\\complex{u}_{\\textind{in}}$$	komplexní veličina
<code>\vect{...}</code>	$\mathbf{y}$	$\$\\vect{y}$$	vektor
<code>\mat{...}</code>	$\mathbf{Z}$	$\$\\mat{Z}$$	matice
<code>\unit{...}</code>	kV	$\$\\unit{kV}$ či \unit{kV}$	jednotka

## A.2 Příkazy pro sazbu symbolů

- `\E`, `\eul` – sazba Eulerova čísla: e,
- `\J`, `\jmag`, `\I`, `\imag` – sazba imaginární jednotky: j, i,
- `\dif` – sazba diferenciálu: d,
- `\sinc` – sazba funkce: sinc,
- `\mikro` – sazba symbolu mikro stojatým písmem<sup>1</sup>: μ,
- `\uppi` – sazba symbolu π (stojaté řecké pí, na rozdíl od `\pi`, což sází π).

Všechny symboly jsou určeny pro matematický mód, vyjma `\mikro`, jenž je použitelný rovněž v textovém módu.

---

<sup>1</sup>znak pochází z balíčku `textcomp`



## **B Druhá příloha**

Pro sazbu vektorových obrázků přímo v L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>Xu je možné doporučit balíček **TikZ**. Příklady sazby je možné najít na **TEXample**. Pro vyzkoušení je možné použít programy **QTikz** nebo **TikzEdt**.



# C Příklad sazby zdrojových kódů

## C.1 Balíček `listings`

Pro vysázení zdrojových souborů je možné použít balíček `listings`. Balíček zavádí nové prostředí `lstlisting` pro sazbu zdrojových kódů, jako například:

```
\section{Balíček lstlisting}
Pro vysázení zdrojových souborů je možné použít
    balíček \href{https://www.ctan.org/pkg/listings}%
    {\texttt{listings}}.
Balíček zavádí nové prostředí \texttt{lstlisting} pro
    sazbu zdrojových kódů.
```

Podporuje množství programovacích jazyků. Kód k vysázení může být načítán přímo ze zdrojových souborů. Umožňuje vkládat čísla řádků nebo vypisovat jen vybrané úseky kódu. Např.:

Zkratky jsou sázeny v prostředí `acronym`:

6 `\begin{acronym}[KolikMista]`

Šířka textu volitelného parametru `KolikMista` udává šířku prvního sloupce se zkratkami. Proto by měla být zadávána nejdélší zkratka nebo symbol. Příklad definice zkratky  $f_{vz}$  je na výpisu C.1.

Výpis C.1: Ukázka sazby zkratky

```
31  \acro{symfvz}          % název
32  [\ensuremath{f_{\text{\tiny \texttt{vz}}}}] % symbol
33  {vzorkovací kmitočet}      % popis
```

Ukončení seznamu je provedeno ukončením prostředí:

26 `\acro{ADC}`

### Poznámka k výpisům s použitím volby jazyka `czech` nebo `slovak`:

Pokud Váš zdrojový kód obsahuje znak spojovníku `-`, pak překlad může skončit chybou. Ta je způsobena tím, že znak `-` je v českém nebo slovenském nastavení balíčku `babel` tzv. aktivním znakem. Přepněte znak `-` na neaktivní příkazem `\shorthandoff{-}` těsně před výpisem a hned za ním jej vratte na aktivní příkazem `\shorthandon{-}`. Podobně jako to je ukázáno ve zdrojovém kódu `šablony`.

Na výpisu C.2 naleznete příklad kódu pro Matlab, na výpisu C.3 zase pro jazyk C.

Výpis C.2: Příklad Schur-Cohnova testu stability v prostředí Matlab.

```
1 %% Priklad testovani stability filtru
2
3 % koeficienty polynomu ve jmenovateli
4 a = [ 5, 11.2, 5.44, -0.384, -2.3552, -1.2288];
5 disp( 'Polynom:' ); disp(poly2str( a, 'z' ))
6
7 disp('Kontrola pomocí korenů polynomu:');
8 zx = roots( a );
9 if( all( abs( zx ) < 1 ))
10     disp('System je stabilní')
11 else
12     disp('System je nestabilní nebo na mezi stability');
13 end
14
15 disp(''); disp('Kontrola pomocí Schur-Cohn:');
16 ma = zeros( length(a)-1, length(a));
17 ma(1,:) = a/a(1);
18 for( k = 1:length(a)-2 )
19     aa = ma(k,1:end-k+1);
20     bb = fliplr( aa );
21     ma(k+1,1:end-k+1) = (aa-aa(end)*bb)/(1-aa(end)^2);
22 end
23
24 if( all( abs( diag( ma.' ))))
25     disp('System je stabilní')
26 else
27     disp('System je nestabilní nebo na mezi stability');
28 end
```

Výpis C.3: Příklad implementace první kanonické formy v jazyce C.

```
// první kanonická forma
short fxdf2t( short coef[][][5], short sample)
{
    static int v1[SECTIONS] = {0,0}, v2[SECTIONS] = {0,0};
    int x, y, accu;
    short k;

    x = sample;
    for( k = 0; k < SECTIONS; k++){
        accu = v1[k] >> 1;
        y = _sadd( accu, _smpy( coef[k][0], x));
        y = _ssh1(y, 1) >> 16;

        accu = v2[k] >> 1;
        accu = _sadd( accu, _smpy( coef[k][1], x));
        accu = _sadd( accu, _smpy( coef[k][2], y));
        v1[k] = _ssh1( accu, 1);

        accu = _smpy( coef[k][3], x);
        accu = _sadd( accu, _smpy( coef[k][4], y));
        v2[k] = _ssh1( accu, 1);

        x = y;
    }
    return( y);
}
```



## D Algoritmy

Pro sazbu algoritmů/pseudokódu je možné využít balíček `algorithm2e` nabízející bohaté možnosti sazby. Na algoritmy je možno se klasicky odkazovat křížovými odkazy, jako zde: viz alg. 1.

---

**Algoritmus 1:** B-PHADQ

---

```
Zvol parametry  $\tau, \sigma, > 0, \rho \in [0, 1]$ 
Inicializuj  $x^{(0)}, p^{(0)}, q^{(0)}$  a  $\omega_s$ 
for  $i = 0, 1, \dots$  do
     $q^{(i+1)} = \text{clip}_\lambda(q^{(i)} + \sigma D R_{\omega_s} G_g x)$ 
     $u = p^{(i)} - \tau G_g^* R_{\omega_s}^* D^* q^{(i+1)}$  % pomocné
     $p^{(i+1)} = \frac{1}{\tau+1}(\tau \text{proj}_\Gamma(u) + u)$ 
     $x^{(i+1)} = p^{(i+1)} + \rho(p^{(i+1)} - p^{(i)})$ 
end
return  $p^{(i+1)}$ 
```

---



## E Obsah elektronické přílohy

Elektronická příloha je často nedílnou součástí semestrální nebo závěrečné práce. Vkládá se do informačního systému VUT v Brně ve vhodném formátu (ZIP, PDF ...).

Nezapomeňte uvést, co čtenář v této příloze najde. Je vhodné komentovat obsah každého adresáře, specifikovat, který soubor obsahuje důležitá nastavení, který soubor je určen ke spuštění, uvést nastavení kompilátoru atd. Také je dobré napsat, v jaké verzi software byl kód testován (např. Matlab 2018b). Pokud bylo cílem práce vytvořit hardware zařízení, musí elektronická příloha obsahovat veškeré podklady pro výrobu (např. soubory s návrhem DPS v Eagle).

Pokud je souborů hodně a jsou organizovány ve více složkách, je možné pro výpis adresářové struktury použít balíček `dirtree`.

```
/..... kořenový adresář přiloženého archivu
  logo ..... loga školy a fakulty
    BUT_abbreviation_color_PANTONE_EN.pdf
    BUT_color_PANTONE_EN.pdf
    FEEC_abbreviation_color_PANTONE_EN.pdf
    FEKT_zkratka_barevne_PANTONE_CZ.pdf
    UTKO_color_PANTONE_CZ.pdf
    UTKO_color_PANTONE_EN.pdf
    VUT_barevne_PANTONE_CZ.pdf
    VUT_symbol_barevne_PANTONE_CZ.pdf
    VUT_zkratka_barevne_PANTONE_CZ.pdf
  obrazky ..... ostatní obrázky
    soucastky.png
    spoje.png
    ZlepseWilsonovoZrcadloNPN.png
    ZlepseWilsonovoZrcadloPNP.png
  pdf ..... pdf stránky generované informačním systémem
    student-desky.pdf
    student-titulka.pdf
    student-zadani.pdf
  text ..... zdrojové textové soubory
    literatura.tex
    prilohy.tex
    reseni.tex
    uvod.tex
    vysledky.tex
    zaver.tex
    zkratky.tex
  sablona-obhaj.tex ..... hlavní soubor pro sazbu prezentace k obhajobě
  sablona-prace.tex ..... hlavní soubor pro sazbu kvalifikační práce
  thesis.sty ..... balíček pro sazbu kvalifikačních prací
```