



**Bakalářská práce**

## **Návrh integračního obvodu pro Rogowského snímače proudu**

*Studijní program:*

B0714A270001 Mechatronika

*Autor práce:*

**Tomáš Malík**

*Vedoucí práce:*

Ing. Miroslav Novák, Ph.D.

MTI

Liberec 12. října 2022



## Zadání bakalářské práce

# Návrh integračního obvodu pro Rogowského snímače proudu

*Jméno a příjmení:*

**Tomáš Malík**

*Osobní číslo:*

M20000126

*Studijní program:*

B0714A270001 Mechatronika

*Studijní obor (specializace):*

Ústav mechatroniky a technické informatiky

*Zadávací katedra:*

MTI

*Akademický rok:*

12. října 2022/15. května 2024

### Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši na téma integrační zesilovače pro Rogowského senzory proudu. Předpokládáme použití aktivního analogového integrátoru s operačním zesilovačem, případně kombinaci pasivního a aktivního integrátoru. Zmapujte topologie používané u komerčních senzorů a v odborných člancích.
2. Vyberte vhodné topologie a vytvořte jejich popis obvodovými rovnicemi. Popis použijte k vyhledání optimálních hodnot součástek pro dosažení vyrovnané frekvenční a fázové charakteristiky. Předpokládáme použít SW balíku Matlab a optimalizačního toolboxu.
3. Proveďte návrh nezbytných částí celého obvodového řešení: napájení operačního zesilovače, výstupní driver, filtrace šumu atp.
4. Nejlepší navrženou variantu realizujte a proveďte měření frekvenční charakteristiky.

*Rozsah grafických prací:* Dle potřeby dokumentace  
*Rozsah pracovní zprávy:* 30–40 stran  
*Forma zpracování práce:* Tištěná/elektronická  
*Jazyk práce:* Čeština

**Seznam odborné literatury:**

- [1] MING, Lei, Zhen XIN, Changqing YIN, Manxin CHEN a Poh Cheang LOH, 2019. Integrator Desing of the Rogowski Current Sensor for Detecting Fast Switch Current of SiC Devices. In : *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* [online]. s. 4551-4557. ISSN 2329-3748. Dostupné z: doi:10.1109/ECCE.2019.8911874
- [2] SHI, Yafei, Zhen XIN, Poh Chiang LOH a Frede BLAABJERG, 2020. A Review of Traditional Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics* [online]. **35**(11), 12207-12222. ISSN 1941-0107. Dostupné z: doi:10.1109/TPEL.2020.2984055
- [3] VOTZI, Helmut L, Markus VOGELBERGER a Hans ERTL, 2011. Low-Cost Current Sensor for Power Capacitors Based on a PCB Rogowski-Coil. In: *PCIM Europe*. s. 6.

*Vedoucí práce:* Ing. Miroslav Novák, Ph.D.  
MTI

*Datum zadání práce:* 12. října 2022  
*Předpokládaný termín odevzdání:* 15. května 2024

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.  
děkan

L.S.

doc. Ing. Josef Černožorský, Ph.D.  
vedoucí ústavu

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

8. listopadu 2023

Tomáš Malík

# Návrh integračního obvodu pro Rogowského snímače proudu

## Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá nalezením optimálních hodnot součástek pomocí optimalizačního programu a následnou realizací prototypu Rogowského senzoru proudu. Práce začíná úvodem, který představuje Rogowského senzor, jeho výhody a související problémy. V teoretické části jsou uvedeny základní informace o operačním zesilovači a jeho parazitních parametrech, které jsou důležité pro návrh prototypu. Dále je zde detailní popis Rogowského senzoru proudu a různé návrhy vylepšení jeho vlastností. Poté následuje část o analýze komerčních senzorů a jejich obvodů integrátorů pomocí reverse engineeringu. Na tuto část navazuje popis topologií obvodů integrátorů z literatury. Z těchto topologií je jedna vybrána pro realizaci. V praktické části se prezentuje optimalizační program, který je určený na hledání optimálních hodnot součástek pro zvolenou topologii. Řeší se zde úprava programu, jelikož byl program napsán pro jinou topologii. Následně je představen výsledek optimalizačního programu. V části realizace jsou získané hodnoty součástek použity na výrobu prototypu. Pro ověření správnosti teoretického návrhu je prototyp změřen a následně jsou popsány výsledky měření. Nakonec je zde uvedena menší kapitola o programu Tina-TI, který byl při této práci také využit.

## Klíčová slova

Rogowského senzor proudu, Optimalizační program, Offset, Šum

# Design of an integration circuit for Rogowski current sensors

## Abstract

This bachelor thesis deals with finding the optimal values of the components using an optimization program and the subsequent implementation of a prototype Rogowski current sensor. The thesis starts with an introduction that introduces the Rogowski sensor, its advantages and related problems. In the theoretical part, basic information about the operational amplifier and its parasitic parameters, which are important for the design of the prototype, is presented. Then, a detailed description of the Rogowski current sensor and various suggestions for improving its characteristics are presented. This is followed by a section on the analysis of commercial sensors and their integrator circuits using reverse engineering. This section is followed by a description of integrator circuit topologies from the literature. From these topologies, one is selected for implementation. In the practical part, an optimization program is presented to find the optimal component values for the selected topology. The modification of the program is addressed here, since the program was written for a different topology. Then the result of the optimization program is presented. In the implementation part, the obtained component values are used to produce a prototype. To verify the correctness of the theoretical design, the prototype is measured and then the measurement results are described. Finally, there is small chapter on the Tina-TI program, which was also used in this work.

## Keywords

Rogowski current sensor, Optimization program, Offset, Noise

## Poděkování

Rád bych vyjádřil upřímnou vděčnost všem, kteří mi poskytli podporu během psaní této bakalářské práce. Nejprve bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Miroslavu Novákovi, Ph.D. za jeho cenné rady, odborné vedení a trpělivost během celého procesu tvoření této práce. Dále bych chtěl vyjádřit díky své rodině a přátelům za jejich neustálou podporu a motivaci.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>12</b>
	<b>Teoretická část</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>Operační zesilovač</b>	<b>13</b>
2.1	Vnější struktura OZ	13
2.2	Vnitřní struktura OZ	14
2.3	Vlastnosti ideálního a reálného OZ	14
2.4	Hlavní parazitní parametry	14
<b>3</b>	<b>Rogowského senzor proudu</b>	<b>15</b>
3.1	Rogowského cívka s aktivním integrátorem	16
3.2	Šum	16
3.3	Nízká mezní frekvence	16
3.4	Offset operačního zesilovače	17
3.5	Fázový posun	18
3.6	Kalibrace	19
<b>4</b>	<b>Analýza komerčních Rogowského senzorů proudu</b>	<b>19</b>
4.1	Flir TA72	19
4.2	Chauvin Arnoux MA200	20
4.3	WAGO 857-552	21
4.4	AI-PMUL	21
4.5	Fluke ic2000 flex	22
4.6	Přehled Rogowského senzorů proudu na trhu	22
4.7	Přehled integrátorů pro Rogowského cívky	23
4.8	Přehled topologií z literatury	23
<b>5</b>	<b>Topologie obvodů integrátorů pro Rogowského cívky</b>	<b>25</b>
5.1	Topologie č. 1, základní zapojení Millerova integrátoru	25
5.2	Topologie č. 2 s vybíjecím rezistorem	25
5.3	Topologie č. 3 s kompenzačním T-článkem	26
5.4	Topologie č. 4 s předřazenou horní propustí	27
5.5	Topologie č. 5, neinvertující zapojení s dolní propustí	27
5.6	Topologie č. 6, neinvertující zapojení s vybíjecím rezistorem	28
	<b>Praktická část</b>	<b>28</b>
<b>6</b>	<b>Optimalizační program</b>	<b>28</b>
6.1	Popis skriptů	29
6.1.1	prenos_integrator_optim.m	29
6.1.2	order.m	30
6.1.3	physicsPrint.m	31



6.1.4	putComponetValueIntoTheRow.m.....	32
6.1.5	Optim_integ.m.....	33
6.2	Požadovaný přenos.....	34
6.3	Hodnotící kritérium.....	34
6.4	Úprava optimalizačního programu.....	35
6.5	Výsledek optimalizačního programu.....	36
<b>7</b>	<b>Realizace.....</b>	<b>37</b>
7.1	Výroba testovacího senzoru.....	37
7.2	Měření testovacího senzoru.....	38
7.3	Výsledky měření.....	39
7.3.1	Měření varianty součástek č. 1.....	40
7.3.2	Měření varianty součástek č. 2.....	41
7.3.3	Měření varianty součástek č. 3.....	43
7.3.4	Měření varianty součástek č. 4.....	44
<b>8</b>	<b>Simulace v programu Tina-TI.....</b>	<b>45</b>
<b>9</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>46</b>
	<b>Použitá literatura.....</b>	<b>48</b>
	<b>Přílohy.....</b>	<b>50</b>

## Seznam obrázků

Obr. 2.1: Vnější struktura OZ.....	13
Obr. 2.2: Vnitřní struktura OZ.....	14
Obr. 3.1: Základní uspořádání Rogowského cívky [10].....	15
Obr. 3.2: Náhradní obvod Rogowského cívky .....	16
Obr. 3.3: Základní zapojení integrátoru .....	17
Obr. 3.4: Integrátor s definovaným statickým ziskem .....	17
Obr. 3.5: Integrátor s kompenzačním stupněm pro automatické potlačení offsetu [11] .....	18
Obr. 3.6: Integrátor doplněný o kapacitní filtr na výstupu [11] .....	18
Obr. 3.7: Horní propust na vstupu a potlačení offsetu s kompenzací fáze ve zpětné vazbě [11].....	18
Obr. 4.1: Proudová sonda Flir TA72 .....	20
Obr. 4.2: Proudové kleště Chauvin Arnoux MA200.....	20
Obr. 4.3: Měřicí převodník pro Rogowského cívky WAGO 857-552 .....	21
Obr. 4.4: Integrátor pro Rogowského cívky AI-PMUL .....	21
Obr. 4.5: Proudové kleště Fluke ic2000 flex.....	22
Obr. 5.1: Topologie č. 1 s charakteristikou zisku [7] .....	25
Obr. 5.2: Topologie č. 2 s charakteristikou zisku [7] .....	26
Obr. 5.3: Topologie č. 3 s charakteristikou zisku [7] .....	26
Obr. 5.4: Topologie č. 4 s charakteristikou zisku [7] .....	27
Obr. 5.5: Topologie č. 5 s charakteristikou zisku [7] .....	27
Obr. 5.6: Topologie č. 6 s charakteristikou zisku [7] .....	28
Obr. 6.1: Vývojový diagram optimalizačního programu (prenos_integrator_optim.m) .....	30
Obr. 6.2: Vývojový diagram order.m .....	31
Obr. 6.3: Vývojový diagram physicsPrint.m.....	32
Obr. 6.4: Vývojový diagram putComponetValueIntoTheRow.m .....	33
Obr. 6.5: Vývojový diagram Optim_integ.m .....	34
Obr. 6.6: Vývojový diagram penalizace.....	36
Obr. 7.1: DPS s napájenými součástkami (vlevo bez stínění, vpravo se stíněním).....	37
Obr. 7.2: Schéma DPS.....	38
Obr. 7.3: Blokové schéma měření .....	38
Obr. 7.4: Fotografie z měření .....	39
Obr. 8.1: Simulace topologie č. 3 v Tina-TI.....	46

## Seznam grafů

Graf 2.1: Doba přeběhu.....	15
Graf 3.1: Běžný průběh Rogowského senzoru [11] .....	17
Graf 3.2: Charakteristika fáze bez korekce a s korekcí [11] .....	19
Graf 6.1: Nejlepší výsledek optimalizačního programu.....	36
Graf 7.1: Výsledek měření č. 1 (Amplituda, fáze, THD, SNR v závislosti na frekvenci) .....	40
Graf 7.2: Měření č. 1, primární proud a výstup senzoru v čase, spektrum senzoru .....	40
Graf 7.3: Výsledek měření č. 2 (Amplituda, fáze, THD, SNR v závislosti na frekvenci) .....	41
Graf 7.4: Měření č. 2, primární proud a výstup senzoru v čase, spektrum senzoru .....	42
Graf 7.5: Výsledek měření č. 3 (Amplituda, fáze, THD, SNR v závislosti na frekvenci) .....	43
Graf 7.6: Měření č. 3, primární proud a výstup senzoru v čase, spektrum senzoru .....	43
Graf 7.7: Výsledek měření č. 4 (Amplituda, fáze, THD, SNR v závislosti na frekvenci) .....	44
Graf 7.8: Měření č. 4, primární proud a výstup senzoru v čase, spektrum senzoru .....	45

## Seznam tabulek

Tabulka 4.1: Přehled Rogowského senzorů proudu na trhu.....	22
Tabulka 4.2: Přehled integrátorů pro Rogowského cívky .....	23
Tabulka 4.3: Přehled topologií z literatury.....	24

## Seznam zkratek

ADC	Analog to Digital Converter (Analogově-digitální převodník)
AFE	Analog Front-End (Analogový front-end)
BS	Budicí Stupeň
DC	Direct Current (Stejnoseměrný proud)
DP	Dolní Propust
DPS	Deska Plošných Spojů
DZ	Diferenční Zesilovač
EMI	Electromagnetic Interference (Elektromagnetické rušení)
FFT	Fast Fourier transform (Rychlá Fourierova transformace)
GBW	Gain Bandwidth Product (Šířka pásma zisku)
GND	Ground (Uzemnění)
HP	Horní Propust
KS	Koncový Stupeň
OZ	Operační Zesilovač
SCPI	Standard Commands for Programmable Instruments (Standardní příkazy pro programovatelné přístroje)
SNR	Signal to Noise Ratio (Poměr signálu a šumu)
THD	Total Harmonic Distortion (Celkové harmonické zkreslení)
ZKP	Zdroj Konstantního Proudu

# 1 Úvod

Práce se zabývá jedním z principů měření elektrického proudu. Jde o Rogowského senzor, který pracuje na základě nepřímého měření proudu pomocí magnetického pole, které vzniká kolem vodiče, jímž prochází proud. Magnetický tok je poté převeden snímací cívkou na derivaci napětí. Pro získání úplného obrazu proudu je nezbytné integrovat tento napěťový signál. Tímto způsobem se však ovlivňují vlastnosti celého senzoru, včetně frekvenčního a fázového přenosu.

Přesné měření proudu má zásadní význam v různých oblastech, jako je řízení a regulace elektrických obvodů, a zejména pro správné měření a účtování dodávek elektrické energie. Při účtování se obvykle sleduje činná dodaná energie, což je časový integrál elektrického výkonu. Pro získání správných hodnot výkonu je nezbytné měřit proud. I malá fázová chyba proudu ve střídavých systémech v řádu desítek úhlových minut, může způsobit značné chyby v hodnotě činného výkonu v řádu procent. Chyba v amplitudě proudu se přímo promítá do výsledné hodnoty výkonu.

V současné době roste význam měření a hodnocení kvality dodávky elektrické energie. Pro účely hodnocení kvality je nezbytné přesné měření proudu nejenom při základní harmonické frekvenci 50 Hz, ale i v širším frekvenčním pásmu. Rogowského senzory proudu vynikají v přesnosti na vyšších frekvencích [1]. Díky podstatě indukčního zákona mají nízký poměr signál-šum při nižší frekvenci. To představuje technickou výzvu hlavně v oblasti 50 Hz.

Vzhledem k tlaku na nízkou cenu se v průmyslu často uvažuje o alternativních řešeních. Jednou z těchto možností je nahrazení vinuté snímací cívky deskou plošných spojů. Tento přístup sice snižuje výrobní náklady, avšak senzor pak vykazuje 20 až 50krát nižší citlivost než jeho vinutá verze. Tato snížená citlivost představuje další omezující faktor při návrhu a implementaci těchto senzorů.

Rogowského senzory mají dlouhou historii v průmyslu a jsou používány desítky let. Trh nabízí širokou škálu výrobců a řešení, která jsou víceméně ustálená, jak dokumentují různé katalogové listy [2], [3], [4], [5], [6]. Stejně tak i řešení integračních obvodů se opírá o několik základních topologií, jak ukazují zdroje [1], [7]. Nicméně přístup jednotlivých výrobců k návrhu a realizaci těchto obvodů se může v detailech lišit.

Cílem této práce je optimalizace návrhu integračního obvodu pro senzor s cívkou vyrobenou jako plošný spoj, především jeho frekvenčního a fázového přenosu. Nejprve bude proveden důkladný průzkum, který nezahrne pouze analýzu dostupné literatury, ale také detailní rozbor několika zakoupených komerčních senzorů. Tento krok je důležitý pro porozumění různým technickým řešením v oblasti integračních obvodů. Dále bude zhodnocena různá zapojení integrátorů z hlediska jejich přenosových charakteristik a dalších funkčních vlastností. Na základě této analýzy se vybere optimální topologie integrátoru pro realizaci. Bude využita metoda strojové optimalizace návrhu součástek s cílem dosáhnout optimálních parametrů. Další krok bude realizace prototypu na základě zvoleného návrhu. Proveďte se ověření navrženého integračního obvodu pomocí měření prototypu. To umožní posoudit jeho funkčnost a přesnost v reálném prostředí.

Bakalářská práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části je popsán operační zesilovač a některé jeho parazitní vlastnosti, které jsou důležité pro řešení aplikaci. Následuje popis principu Rogowského senzoru proudu. Dále použití senzoru v praxi včetně nutných kalibrací. Následně je uveden rozbor několika komerčních senzorů proudu. Přehled topologií uváděných v literatuře a jejich popis s uvedením jejich přenosu.

V praktické části je popsán optimalizační program, který byl následně upraven pro vybranou topologii. Následně je uveden výsledek optimalizačního programu a jeho popis. Na konec je provedena realizace, která obsahuje výrobu prototypu. Dále jeho měření a analýzu výsledků měření.

## Teoretická část

Integrační obvod Rogowského senzoru se může realizovat s pasivními součástkami nebo jako aktivní varianta s použitím operačního zesilovače. U senzorů pro měření na napájecí síti, kde je požadována přesnost na 50 Hz je zpravidla zvolena varianta aktivní. U senzorů pro měření vysokých frekvencí (až do desítek MHz) jsou vhodné integrátory pasivní. Důvodem je snižující se citlivost senzoru s frekvencí a omezená šířka pásma operačních zesilovačů. Proto je práce zaměřena nejdříve na popis operačních zesilovačů, následně vysvětlením principu Rogowského senzoru proudu a přehledem nepoužívanějších topologií integrátorů.

## 2 Operační zesilovač

Operační zesilovač (často psané zkráceně jako „OZ“) je elektronická součástka. Používá se v obvodech souvisejících se zpracováním spojitých analogových signálů. Obvykle se používají rozdílové (diferenciální) operační zesilovače. Je navržen tak, aby zesiloval rozdíl napětí  $U_d$  mezi dvěma vstupy  $U_+$  a  $U_-$ . Platí vztah [8]

$$U_d = U_+ - U_- . \quad (1)$$

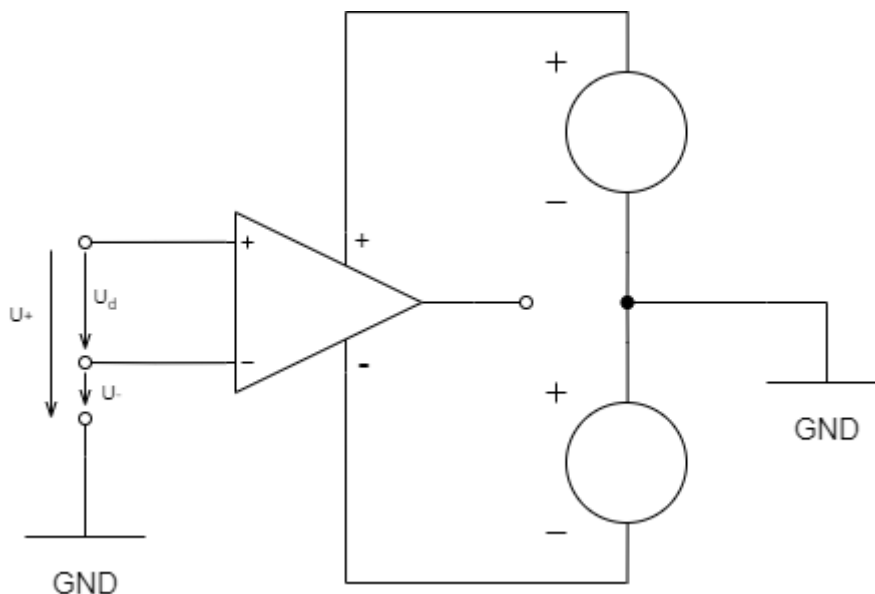
Pro výstupní napětí platí [8]

$$U_{out} = A_u * U_d , \quad (2)$$

kde  $A_u$  je zesílení operačního zesilovače. V tomto případě bez zpětné vazby.

### 2.1 Vnější struktura OZ

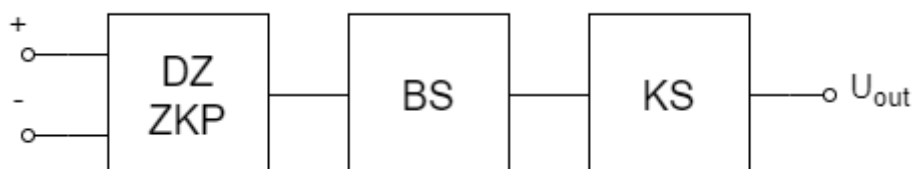
Běžný operační zesilovač má dva vstupy a jeden výstup. K němu se připojuje zátěž obvykle proti společné zemi GND. Vstup, který je na schématické značce na obr. 2.1 označen kladným znamínkem plus se nazývá neinvertující. Vstup se záporným znamínkem mínus se nazývá invertující. Napájení operačního zesilovače se nejčastěji provádí z dvojitého symetrického zdroje napětí (ve schématech se tento zdroj obvykle nekreslí). [8]



Obr. 2.1: Vnější struktura OZ

## 2.2 Vnitřní struktura OZ

Vnitřní obvod operačního zesilovače je zobrazen na jednoduchém blokovém schématu (obr. 2.2). Invertující a neinvertující vstup je přiveden na báze tranzistorů diferenčního zesilovače (DZ) v můstkovém zapojení. Zdroj konstantního proudu (ZKP) zajišťuje konstantní proud nezávisle na napájecím napětí. Dále je zde budicí stupeň (BS) často v Darlingtonově zapojení (zapojení dvou NPN tranzistorů s velkým proudovým zesílením) a koncový stupeň (KS) ve třídě AB. [9]



Obr. 2.2: Vnitřní struktura OZ

## 2.3 Vlastnosti ideálního a reálného OZ

Ideální operační zesilovač má nekonečně velké zesílení  $A_u$ , nekonečně velký vstupní odpor, nulový vstupní proud, nulový výstupní odpor a frekvenční nezávislost (tzn. dokáže zesilovat od nulové do nekonečné frekvence). Ve skutečnosti tyto vlastnosti v reálném operačním zesilovači neplatí a jen se k ideálu přibližují.

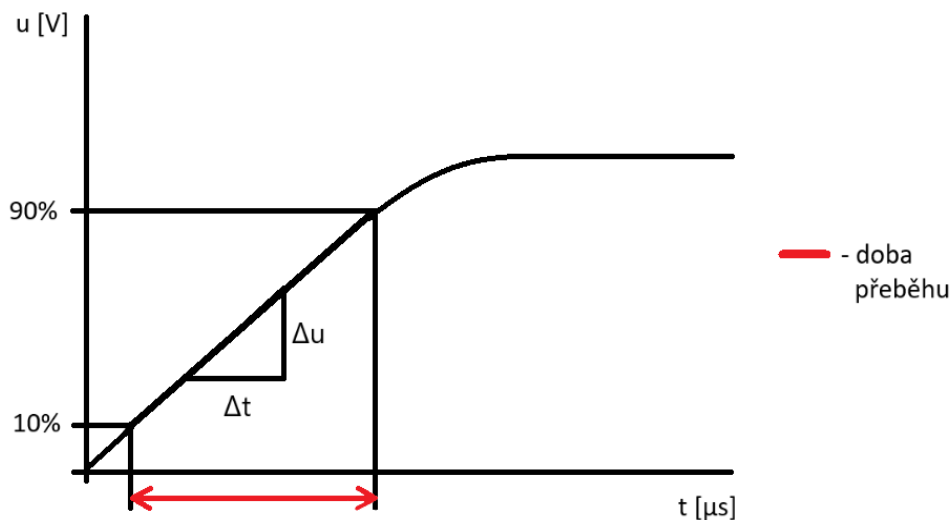
## 2.4 Hlavní parazitní parametry

Reálný operační zesilovač má vstupní napěťovou nesymetrii  $U_{IO}$  (input offset voltage). Jedná se o napětí, které se musí přivést na vstup, aby na výstupu bylo napětí 0 V. Napěťová nesymetrie je způsobena tranzistory v diferenčním zesilovači, jelikož nejsou identické. Většinou má hodnota vstupní napěťové nesymetrie maximálně jednotky mV. [8]

Operační zesilovač má také vstupní proudovou nesymetrii  $I_{IO}$  (input offset current). Je to rozdíl vstupních proudů tak, aby bylo výstupní napětí nulové.

Po přivedení nuceneho rozdílového napětí na vstupy operačního zesilovače se na výstupu objeví maximální záporné nebo kladné napětí (saturační napětí). Tomuto jevu se dá předejít pomocí záporné zpětné vazby, která zajistí, aby mezi vstupy bylo nulové napětí. Saturační napětí často nedosahuje úrovně napětí napájecího zdroje, ale je nižší o saturační úbytek tranzistoru koncového stupně. [8]

Frekvenční pásmo bývá omezeno shora konečnou rychlostí tranzistorů vnitřní struktury OZ. Tu udává rychlost přeběhu výstupu OZ (Slew rate) ve  $V/\mu s$  (graf 2.1). Obdobou tohoto parametru je mezní tranzientní kmitočet GBW (gain bandwidth). Ten udává frekvenci, při které poklesne zesílení OZ k jedničce  $A_u > 1$ . [8]



Graf 2.1: Doba přeběhu

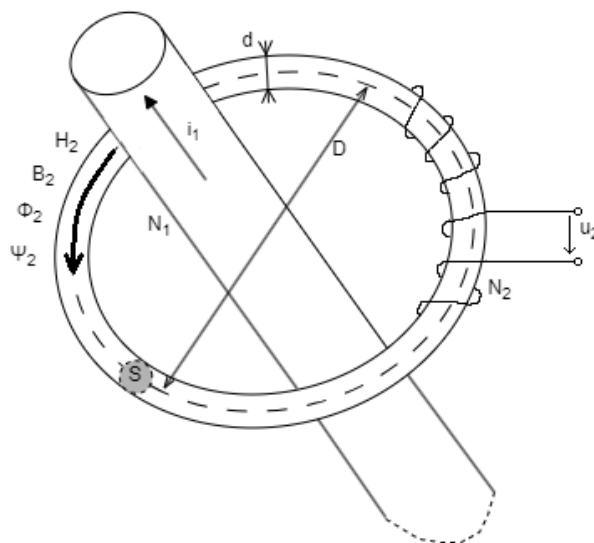
### 3 Rogowského senzor proudu

Rogowského senzor proudu (také Rogowského cívka) je senzor pro měření střídavého proudu. Na trhu se nejčastěji vyskytuje v ohebném provedení, kdy je vzduchová cívka navinuta na toroidním ne-magnetickém jádře (obr. 3.1). Pro měření proudu se musí cívka obepnout okolo vodiče s měřeným proudem. Procházející střídavý proud ve vodiči vytváří ve svém okolí magnetické pole, které indukuje v Rogowského senzoru napětí. Platí vztah

$$u(t) = \frac{M * di(t)}{dt}, \quad (3)$$

kde  $M$  je vzájemná indukčnost cívky s primárním vodičem a  $\frac{di(t)}{dt}$  je rychlost změny proudu ve vodiči.

Pro měření je nezbytné za cívku zapojit pasivní nebo aktivní integrátor. Na jeho výstupu je napěťový signál úměrný měřenému proudu (obr. 3.2).



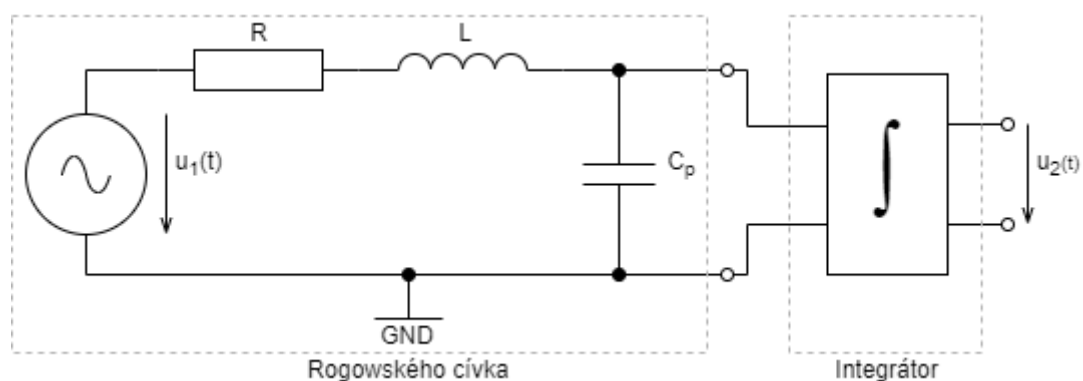
Obr. 3.1: Základní uspořádání Rogowského cívky [10]

V dnešní době se na trhu objevuje Rogowského cívka integrovaná do desky plošných spojů (DPS). To zlepšuje některé vlastnosti, jako je například zmenšení velikosti, snížení rozptylové reaktance, omezení parazitních kapacit a rozšíření šířky pásma. [10]

Hlavní výhodou bez ohledu na typu Rogowského cívky je absence přesycení magnetického obvodu. Činitel přetížení senzoru je díky tomu velký a je omezen v podstatě pouze připojeným integrátorem. Proto může lépe detekovat nadproudy, např. zkratový proud. Další výhodou je vyšší citlivost pro rychlejší signály. [10]

Rogowského senzory jsou výhodné pro měření vysokofrekvenčního střídavého proudu. Tato výhoda se dá využít pro snímání proudu u spínaných napájecích zdrojů a měničů.

Rogowského senzor proudu je při používání vystaven okolním elektromagnetickým interferencím (parazitní kapacita a indukčnost). Výskyt elektromagnetických interferencí se dá omezit změnou designu vinutí cívky a uzavření do stínícího obalu, který dokáže ochránit před rušivými jevy. [1]



Obr. 3.2: Náhradní obvod Rogowského cívky

### 3.1 Rogowského cívka s aktivním integrátorem

Pro dosažení malého dolního mezního kmitočtu je potřeba použití aktivního integrátoru. Aktivní integrátor na rozdíl od pasivního může být použit pro menší proudy a nízké frekvence. Jedná se o integrační zesilovač v invertujícím zapojení na obr. 3.3 nebo neinvertujícím zapojení. Integraci lze také provést digitálně po navzorkování signálu.

Integrátor je velice důležitá součást Rogowského senzoru proudu a způsob, jakým je integrátor realizován má dopad na parametry senzoru. [11]

### 3.2 Šum

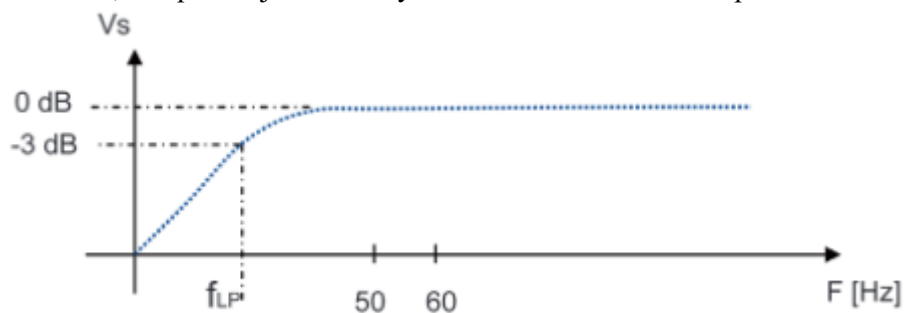
Při měření velmi nízkých signálů je nutné optimalizovat poměr signál/šum (SNR). Například tím, že deska plošných spojů se navrhuje tak, aby měla co nejmenší povrch. Případně se ještě může zastínit vstupní zesilovací stupeň (sníží se tím citlivost na vnější vlivy). Při realizaci pomocí operačního zesilovače vybíráme typy s co nejmenším vstupním šumem. Pro senzory na 50 Hz je vhodné porovnat oblast  $1/f$  růžového šumu. Některé operační zesilovače vykazují nárůst  $1/f$  šumu pod 1 kHz lepšího typu i pod 10 Hz. Nevhodná volba může značně zhoršit SNR. [11]

### 3.3 Nízká mezní frekvence

Dále je nutné vzít v úvahu, jak se chová Rogowského cívka s integrátorem. Chovají se totiž jako horní propust, a tedy nepropouštějí velmi nízké frekvence. Pro optimalizaci se musí definovat mezní kmitočet při měření nominálních hodnot frekvence a zároveň zanechat co nejlepší možnou odezvu. U senzorů určených pro měření 50/60 Hz sítě jde o značný problém. Pokles zisku filtrů je pozvolný. Návrh potřebujeme provést tak, aby v okolí nominální frekvence byla charakteristika vyrovnaná. Z důvodu potlačení offsetu OZ, viz níže, potřebujeme co nejnižší zisk na nulové frekvenci. A značné



potlačení na frekvencích desetin až jednotek Hz. Pro realizaci zlomové oblasti filtru máme tedy k dispozici pouze jednu dekádu. Návrh spodní části přenosu filtru je proto problematický, a to především ve fázové oblasti, kde požadujeme také vyrovnanou charakteristiku v pracovní oblasti. [11]

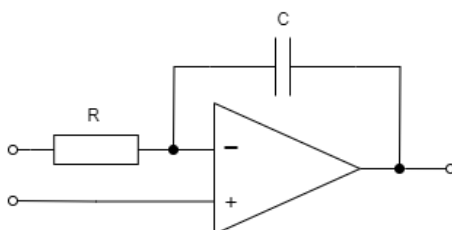


Graf 3.1: Běžný průběh Rogowského senzoru [11]

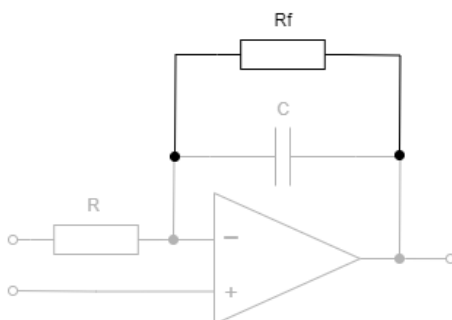
### 3.4 Offset operačního zesilovače

Hlavní problém obyčejného integrátoru je integrace sebemenšího parazitního offsetu. To má za následek nestabilní výstup, který se dříve či později dostane do saturace. Proto vybíráme OZ s nízkou hodnotou offsetu. Mezní použitelná hodnota offsetu závisí na zisku integrátoru a velikosti saturačního napětí výstupu. [11]

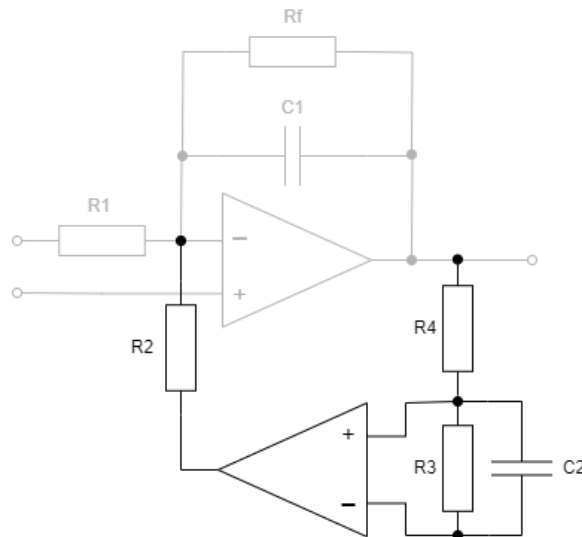
Použití statického zisku, viz obr. 3.4, nebo kompenzačního stupně, tzv. automatické korekce offsetu na obr. 3.5, se dá tato nežádaná vlastnost omezit. Na trhu jsou OZ s vestavěnou korekcí offsetu, které rovněž potlačují  $1/f$  šum [11]. Za integrátor se také dá přidat kapacitní filtr, viz obr. 3.6, který eliminuje zbytkový offset, ale neřeší problém saturace vlastního integrátoru.



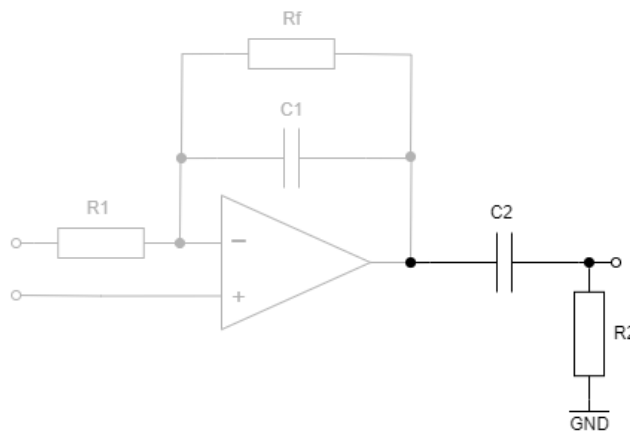
Obr. 3.3: Základní zapojení integrátoru



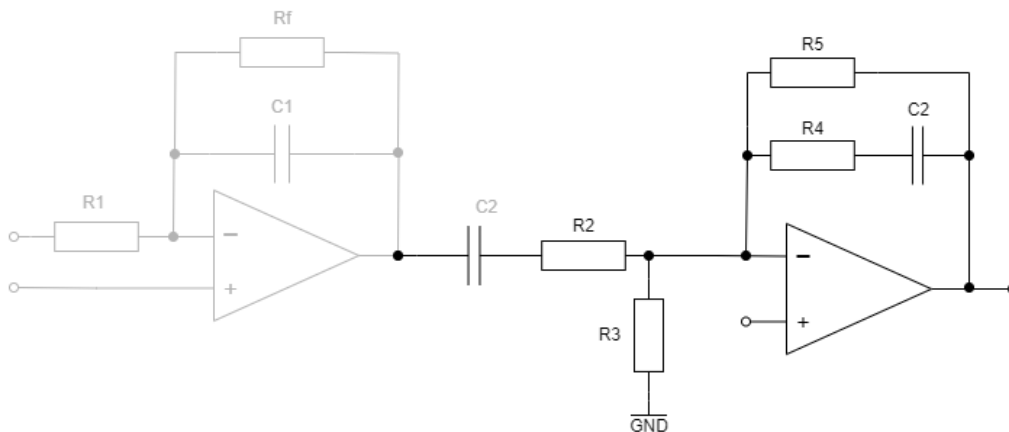
Obr. 3.4: Integrátor s definovaným statickým ziskem



Obr. 3.5: Integrátor s kompenzačním stupněm pro automatické potlačení offsetu [11]



Obr. 3.6: Integrátor doplněný o kapacitní filtr na výstupu [11]

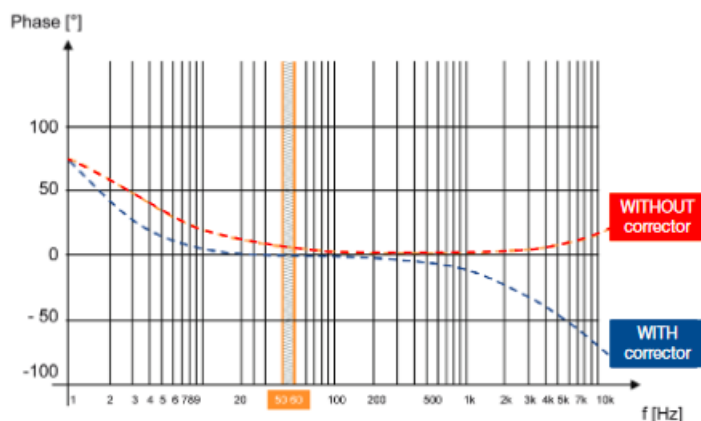


Obr. 3.7: Horní propust na vstupu a potlačení offsetu s kompenzací fáze ve zpětné vazbě [11]

### 3.5 Fázový posun

Tyto metody potlačení offsetu vytvoří několika stupňové chyby ve fázi, což představuje problém pro měření výkonu. Je proto nutné přidat kompenzaci fázového posunu, viz obr. 3.7, která se obecně skládá z dolní propusti. Bohužel tato kompenzace není stálá, ale závisí na frekvenci. To znamená, že je

potřeba optimalizovat návrh obvodu integrátoru tak, aby se minimalizoval fázový rozdíl u základních hodnotách frekvencí (většinou 50, 60, 400 Hz). [11]



Graf 3.2: Charakteristika fáze bez korekce a s korekcí [11]

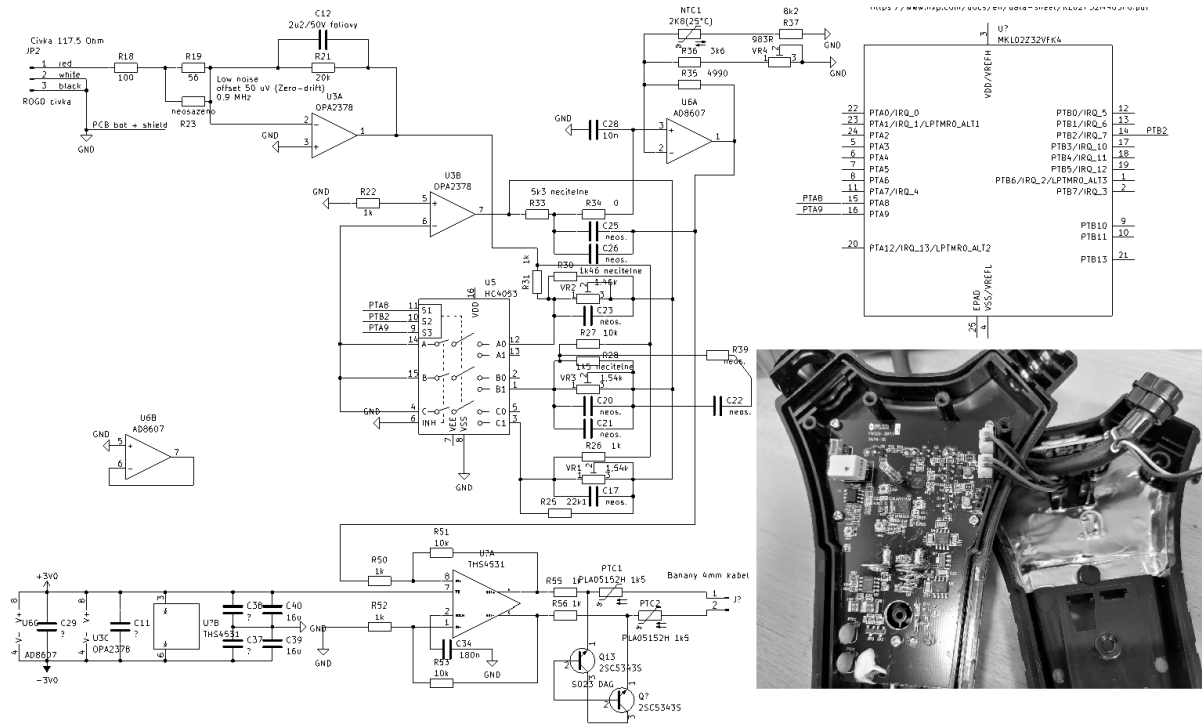
### 3.6 Kalibrace

Vlastní sensor a integrační obvod se skládají z mnoha komponent a výrobci často nezaručují absolutně přesný převod fáze. Proto je potřeba zpravidla každý kus senzoru po zapojení kalibrovat. Díky tomu se dosáhne deklarované přesnosti. Tento postup je dán i ČSN EN 61869 [22]. Deklarovaná přesnost a fázová chyba senzoru v katalogových listech je uváděna až po kalibraci. [11]

## 4 Analýza komerčních Rogowského senzorů proudu

### 4.1 Flir TA72

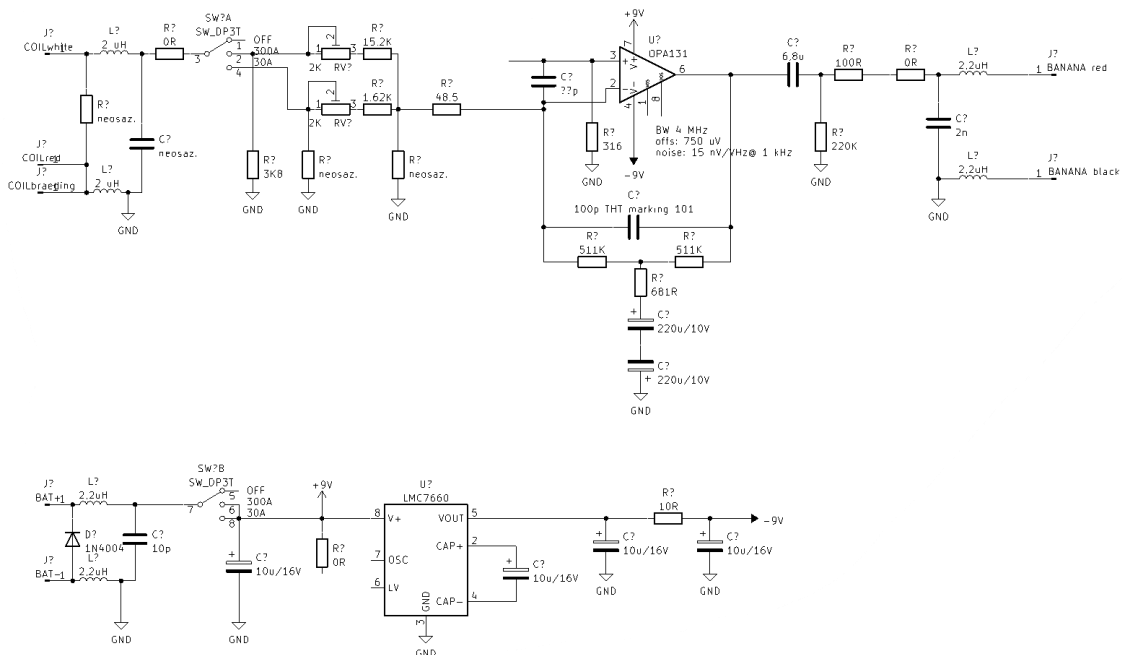
Jedná se o flexibilní proudový sensor (obr. 4.1). Cívka je přivedena na invertující integrátor OPA2378 s paralelním odporem pro potlačení nízkofrekvenčního zisku. Dále je zde přepínač rozsahů pro měření proudu 30 A, 300 A, 3000 A. Přepínač je řešen jako invertující zesilovač s přepínáním rezistorů ve zpětné vazbě pomocí analogového multiplexoru HC4053. Následuje zesilovač pro teplotní kompenzaci AD8607 a výstupní symetrický budič THS4551 dodávající signál na banánkové konektory 4 mm. Napájení je pomocí 2 x 1,5 V baterií AAA a je zde vytvořeno symetrické napájení (+-3 V) pro operační zesilovač. Přepínání rozsahů, automatické vypnutí a kontrolní LED řídí mikrokontroler.



Obr. 4.1: Proudová sonda Flir TA72

## 4.2 Chauvin Arnoux MA200

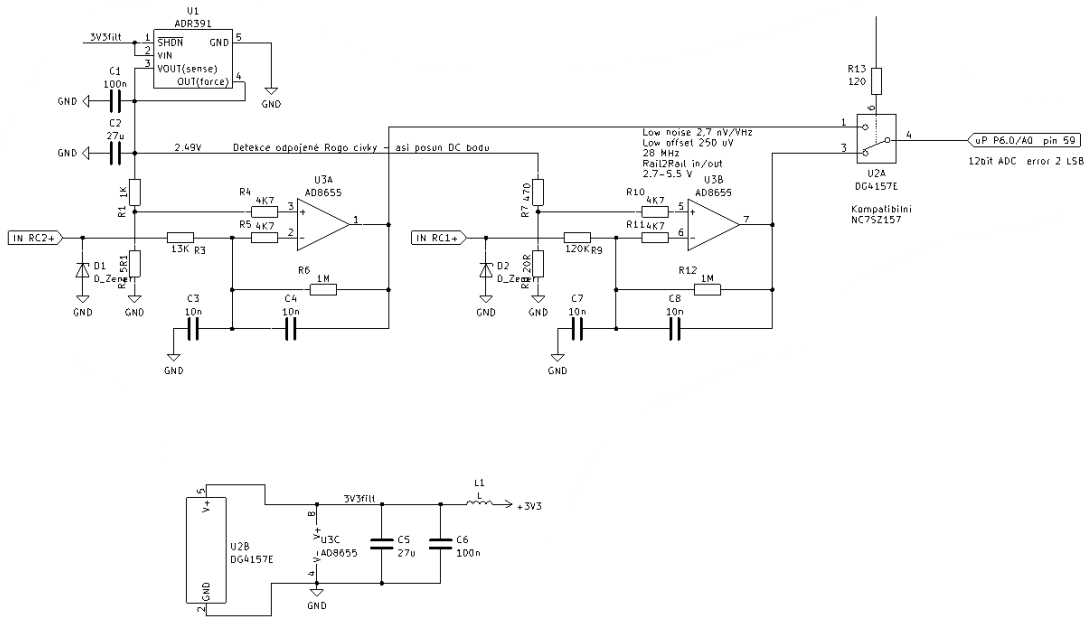
Na vstupu je přepínač rozsahů měření (30 A, 300 A). Přepínání je řešeno změnou zátěže cívky senzoru a volbou hodnoty vstupního rezistoru integračního zesilovače (obr. 4.2). Dále je zde použit invertující operační zesilovač OPA131 s kompenzací fáze T článkem a paralelně zapojenou integrační kapacitou. Na výstupu je pasivní horní propust následovaná dolní propustí. Napájení operačního zesilovače je symetrické (+ 9 V). Záporné napájení se tvoří nábojovou pumpou LMC7660.



Obr. 4.2: Proudové kleště Chauvin Arnoux MA200

### 4.3 WAGO 857-552

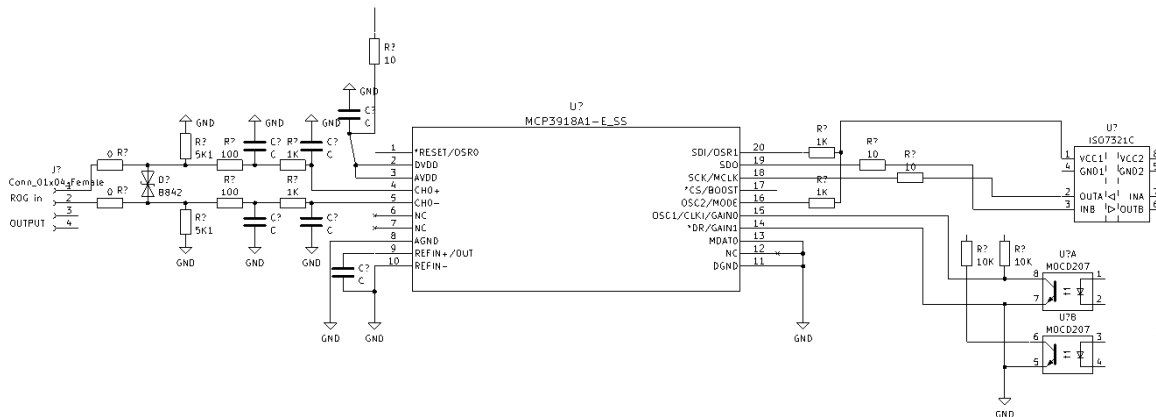
Integrátor má dva oddělené vstupy RC1 a RC2 pro měření proudu dvou různých rozsahů (500 A na RC1 a 2000 A na RC2). Vstupy jsou chráněny Zenerovou diodou (obr. 4.3). Na obou vstupech je použit pasivní integrátor R3/C3, respektive R7/C7 následovaný aktivním invertujícím integrátorem s operačním zesilovačem AD8655 s paralelně zapojenou integrační kapacitou a odporem C4/R6, respektive C8/R12. Zajímavostí je, že časová konstanta pasivního a aktivního integrátoru je díky zapojení stejná. Výstup z operačního zesilovače je přiveden na analogový přepínač. Je zde použito symetrické napájení  $\pm 3\text{ V}$  pro OZ. Stejnoseměrný pracovní bod OZ je nastaven děličem R1/R2, respektive R7/R8 z napětíové reference ADR391.



Obr. 4.3: Měřicí převodník pro Rogowského cívky WAGO 857-552

### 4.4 AI-PMUL

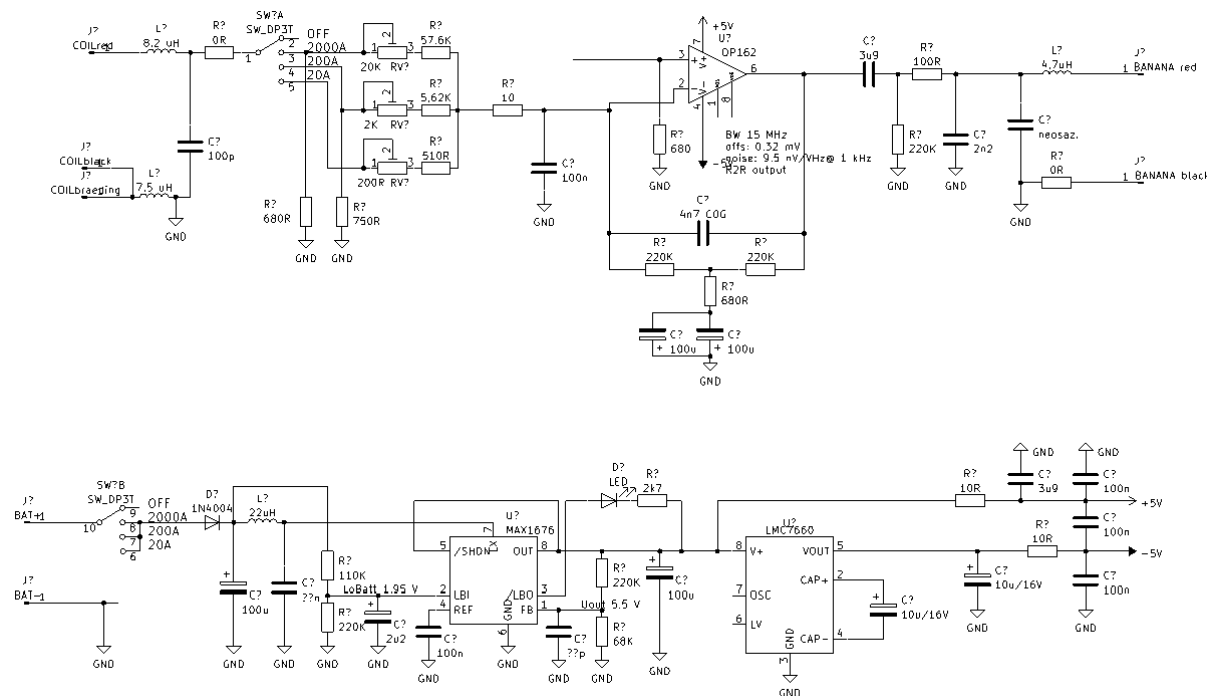
Vstup integrátoru je chráněn proti přetížení pomocí transilu (dvou antisériových Zenerových diod). Na vstupu je také dolní propust a následně je vstup přiveden do jednorázového AFE (analog front end), který obsahuje programovatelný zesilovač a ADC převodník MCP3918A1 (obr. 4.4). Integrace probíhá digitálně.



Obr. 4.4: Integrátor pro Rogowského cívky AI-PMUL

## 4.5 Fluke ic2000 flex

Na vstupu integrátoru je filtr dolní propust LC (obr. 4.5). Následuje přepínač pro vybrání měřeného rozsahu proudu (20 A, 200 A, 2000 A). Je použita kombinace změny zátěže cívky senzoru a změna velikosti rezistoru aktivního integrátoru. Operační zesilovač je zapojen jako invertující integrátor s T článkem pro kompenzaci fáze. Výstup OZ obsahuje pasivní horní propust následovanou dolní propustí. Napájení je tvořeno pomocí 2 x AA/MN 1500/LR6 baterií. Napájení pro OZ je symetrické  $\pm 5$  V. Záporná větev napájení se vyrábí nábojovou pumpou LMC7660.



Obr. 4.5: Proudové kleště Fluke ic2000 flex

## 4.6 Přehled Rogowského senzorů proudu na trhu

Následující tabulka uvádí přehled parametrů několika senzorů dostupných na trhu. Zde jsou uvedeny kombinované přístroje, které obsahují snímací cívku a integrátor jako jeden celek. Obvyklé je přepínání rozsahů. Velké rozdíly jsou ve frekvenčním rozsahu, především v jeho horní části.

Deklarovaná přesnost bývá v katalogovém listu upřesněna, často platí pouze v ideální poloze primárního vodiče ve středu snímací cívky.

Tabulka 4.1: Přehled Rogowského senzorů proudu na trhu

výrobce	typ	rozsahy	frekvenční rozsah	přesnost	převod	cena
Fluke	i200 flex	1-20 A, 2-200 A, 30-2000 A	10 Hz-20 kHz	1 %	100 mV/A, 10 mV/A, 1 mV/A	10777,00 Kč
RS PRO	RS-3208	0.3-30 A, 30-300 A, 300-3000 A	50-400 Hz	3 % + 5 mV	100 mV/A, 10 mV/A, 1 mV/A	1907,80 Kč
Sefram	A1587	30 A/300 A/3000 A	45-250 Hz	8 % + 5 digit	33,3 mV/A, 3,33 mV/A, 0,333 mV/A	8068,00 Kč
Chauvin Arnoux	MA200	30 A/300 A	5 Hz-1 MHz	1 %	100 mV/A, 10 mV/A	9830,00 Kč
Pico Technology	TA326	30 A/300 A/3000 A	10 Hz-20 KHz	1 %	100 mV/A, 10 mV/A, 1 mV/A	8997,06 Kč

## 4.7 Přehled integrátorů pro Rogowského cívky

Následující tabulka uvádí přehled některých integrátorů dostupných na trhu. Uvedeny jsou zde pouze oddělené integrátory bez snímací cívky. Většinou mají také přepínatelné rozsahy, tj. lze k nim připojit snímací cívky s různou citlivostí. Opět můžeme sledovat rozdíly ve frekvenční oblasti, ve které je deklarovaná přesnost.

Pro přesná měření je důležitá fázová chyba. Nejčastěji bývá uváděna chyba na 50/60 Hz. Pro použití je ale důležitý celkový průběh fázové chyby v celém frekvenčním pásmu.

Tabulka 4.2: Přehled integrátorů pro Rogowského cívky

Výrobce	typ	rozsahy	frek. rozsah	přesnost	fázová chyba	nejvyšší proud
Meatrol	S10.1 mini integrator	50/60/85/100/110/333/ 360 mV/kA	10 Hz-10 kHz	1 %	0,5°	6 kA
Meatrol	HF	50/60/85/100/110/333/ 360 mV/kA		2 %	0,5°	10 kA
LEM	AI-PMUL	22,5/70/80/85/100/ 120 mV/kA	10-1500 Hz	0,5 %	0,5°	5 kA
Algodue	RPS51	100 mV/kA	40-3200 Hz	1.5 %	0,1°-2°	5 kA
Rocoil	DIN-AC		40-10 kHz	flexibilní cív. 1%, pevné cív. 0,1 %		100 kA

## 4.8 Přehled topologií z literatury

Následující tabulka uvádí přehled topologií aktivních integrátorů nalezených při literární rešerši v odborných člancích. Shrnuty jsou základní vlastnosti zapojení. Prázdná pole znamenají, že dané obvodové řešení funkci neobsahuje. Pokud byly v článku dostupné konkrétní hodnoty jsou uvedeny přímo v tabulce. Některé články jsou pouze teoretické a neobsahují konkrétní hodnoty. V tom případě je v tabulce uvedena zkratka prvků odpovídající dané funkci.

Tabulka 4.3: Přehled topologií z literatury

zdroj	předzátěž cívky	vstupní pasivní filtr	OZ	vybíjecí rezistor	komp. T čl.	výstupní filtr HP	výstupní filtr DP	napájení
[12] obr. 10	$R_d = 680 \Omega$	DP R/C1+C3 6,8 k $\Omega$ /1nF + HP Ch/Rh 1 $\mu$ F/50 k $\Omega$	OPA209	R3 4,7 M $\Omega$				+ - 3,3 V
[13] obr. 19	$R_m$	DP R1/C1	LF411	$R_p$				symetrické
[14] obr. 5	$R_b = 100 \Omega$	R/C 2,2 k $\Omega$ /1 nF + předzesilovač OZ + HP 10 $\mu$ F/2,2 k $\Omega$ + DP 100 $\Omega$ /1 nF	LM833 neinv.	1 M $\Omega$	obsahuje			symetrické
[15] obr. 4			OP07CP	Rftot (R1 = 100 k $\Omega$ , R2 = 100 k $\Omega$ , R3 = 1 k $\Omega$ )	obsahuje			+ - 9 V
[16] obr. 4	$R_b$	DP R/C	INA188		obsahuje		R/C	symetrické
[17] obr. 5		HP 330 nF/100 k $\Omega$	OP249	2.2 M $\Omega$		330 nF/100 k $\Omega$		symetrické
[18] obr. 1		DP R3/C3 1 k $\Omega$ /10 nF	LTC6088	R7 2.2 M $\Omega$				+ - 5 V
[19] obr. 12		DP R1/C1 15 $\Omega$ /110 nF	neinv.	$R_p$ 1.5 M $\Omega$				symetrické
[20] obr. 5	$R_d$	DP R1/C1	inv.		DP			symetrické
[20] obr. 6			inv.		DP	C3/R3		symetrické
[7] obr. 7c		DP R0/C0	inv.	$R_f$		Ch/Rh		symetrické

Předzátěž cívky snižuje její výstupní napětí. Pokud je hodnota malá snímací cívka pracuje v proudovém režimu, tj. jako transformátor proudu. Pokud je hodnota zátěže velká, pracuje v režimu blízcím se transformátoru naprázdno. Jak plyne z kapitoly 4. předzátěž se u přepínatelných verzí často používá k přepínání rozsahu.

Vstupní pasivní filtr omezuje šířku pásma přicházejícího na aktivní integrátor s operačním zesilovačem tak, aby ho byl schopen zpracovat bez saturace, útlumu a jiného poškození signálu. Vybíjecím rezistorem je myšlen rezistor paralelní k integračním kondenzátoru ve zpětné vazbě OZ. Tento rezistor určuje přenos stejnosměrné hodnoty na nízkých kmitočtech. Paralelně k integračnímu kondenzátoru se zapojuje kompenzační T-článek, který snižuje fázovou chybu na nízkých frekvencích.



Výstupní filtr typu horní propust (HP) odstraňuje zbytkovou hodnotu stejnosměrného napětí ze signálu, jehož zdrojem je offset OZ.

Výstupní filtr typu dolní propust (DP) omezuje frekvenční rozsah shora. Jeho funkcí je často ochrana výstupního vodiče před EMI (elektromagnetická interference). Ve člancích často nebývá uváděn, jak plyne z tabulky. Při porovnání s reálnými zapojeními z kapitoly 4 zjistíme, že tam je použit vždy, když je signál odesílán výstupním vodičem.

## 5 Topologie obvodů integrátorů pro Rogowského cívky

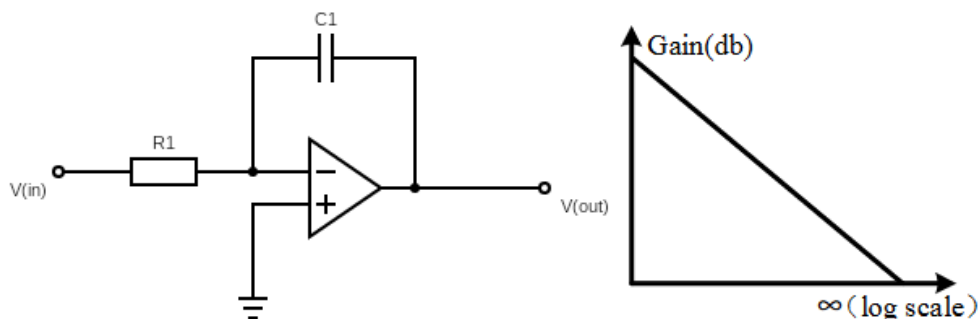
Tato kapitola popisuje používané varianty aktivních integračních obvodů. Jde o varianty Millerova integrátoru. U každého zapojení je uvedena přenosová funkce pomocí grafu a její matematický předpis.

### 5.1 Topologie č. 1, základní zapojení Millerova integrátoru

Základní obvod ideálního operačního zesilovače s integrátorem v invertujícím zapojení. Tento obvod by však se zvyšujícím nízkofrekvenčním ziskem integroval offset operačního zesilovače a v krátkém čase by se zesilovač dostal do saturace a přestal by fungovat (obr. 5.1). [7]

Rovnice přenosu:

$$T_{(s)} = -\frac{1}{sC_1R_1} \quad (4)$$



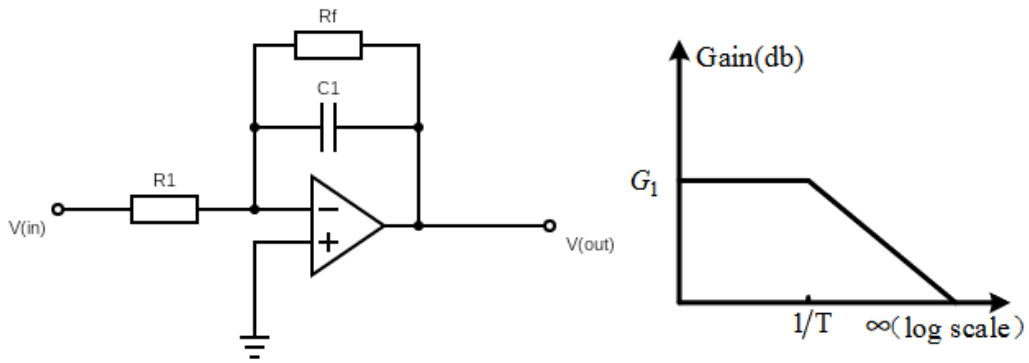
Obr. 5.1: Topologie č. 1 s charakteristikou zisku [7]

### 5.2 Topologie č. 2 s vybíjecím rezistorem

K základnímu obvodu operačního zesilovače s integrátorem je paralelně zapojen zpětnovazební rezistor  $R_f$ . Účelem rezistoru je omezení nízkofrekvenčního zisku a vyhnutí se saturaci po integrování vlastního offsetu OZ (obr. 5.2). [7]

Rovnice přenosu:

$$T_{(s)} = -\frac{R_f}{R_1 + sC_1R_1R_f} \quad (5)$$



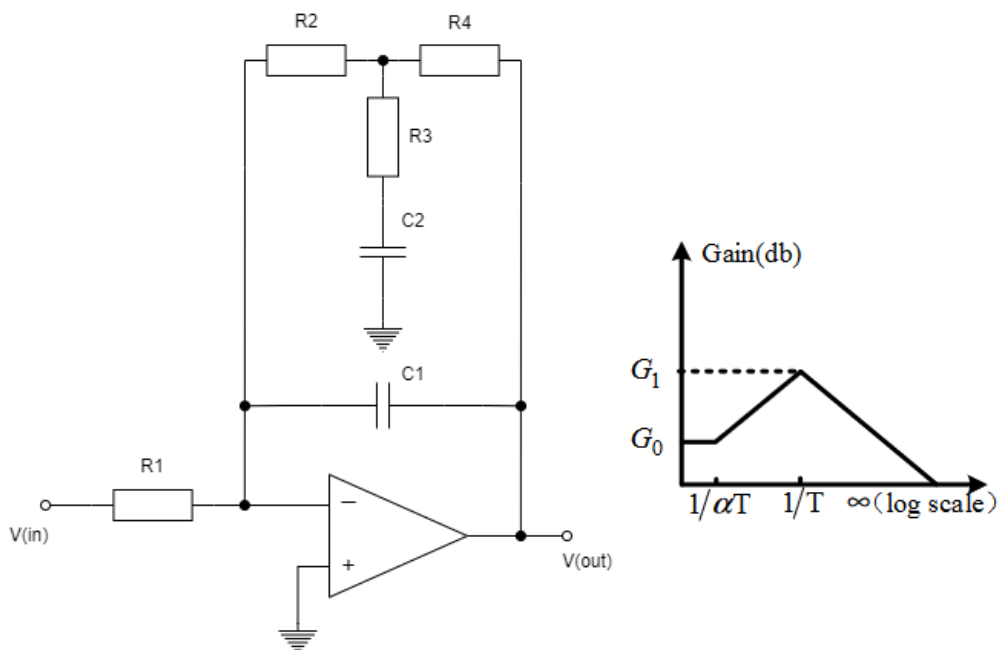
Obr. 5.2: Topologie č. 2 s charakteristikou zisku [7]

### 5.3 Topologie č. 3 s kompenzačním T-článkem

Jedná se o integrátor v invertujícím zapojení s dolní propustí ve zpětnovazební smyčce (obr. 5.3).

Rovnice přenosu:

$$T(s) = \frac{-R_2 - R_4 - sC_2R_2R_3 - sC_2R_2R_4 - sC_2R_3R_4}{R_1 + s^2C_1C_2R_1R_2R_3 + s^2C_1C_2R_1R_2R_4 + s^2C_1C_2R_1R_3R_4 + sC_1R_1R_2 + sC_2R_1R_3 + sC_1R_1R_4} \quad (6)$$



Obr. 5.3: Topologie č. 3 s charakteristikou zisku [7]

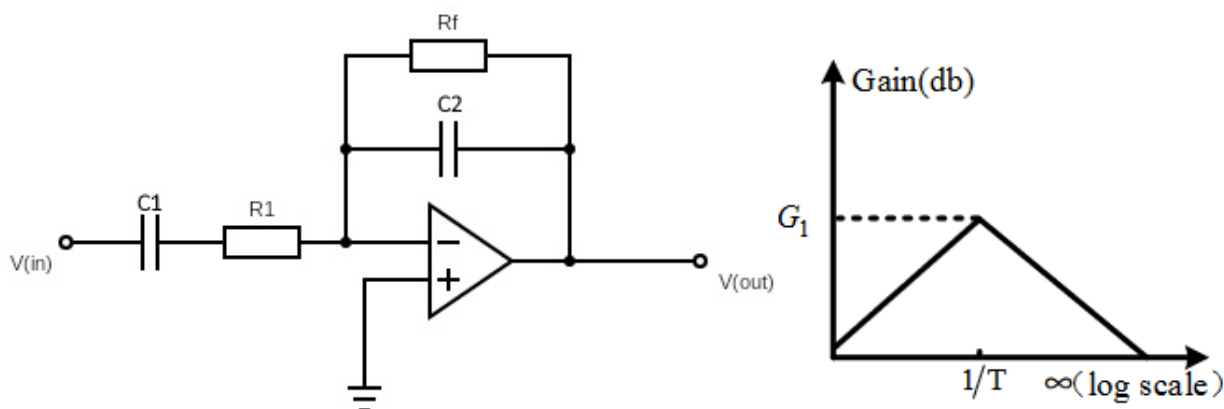
Jde o obdobu topologie č. 2, kde funkci rezistoru  $R_f$  (tj. nastavení/snížení DC zisku) zastupují rezistory  $R_2 + R_4$ . Navíc je v zapojení přidán filtr  $R_3 + C_2$ . Jeho funkcí je potlačení zisku na nízkých kmitočtech. Toto zapojení se používá v praktických realizacích nejčastěji, jak plyne z průzkumů trhu a literatury. [7]

## 5.4 Topologie č. 4 s předřazenou horní propustí

Invertující integrátor s horní propustí C1 v sérii s integračním odporem R1 a zpětnovazebním odporem Rf, který je paralelně zapojen s C2 (obr. 5.4). Horní propust na vstupu sice snižuje zisk na nízkých kmitočtech, ale pouze pro signály procházející integrátorem. Je tedy vhodná pro zapojení, kdy je před vlastním integrátorem zapojen předřazený zesilující stupeň, který může zavléct přídavný offset na vstup. Toto řešení není účinné proti vlastnímu offsetu použitého OZ. [7]

Rovnice přenosu:

$$T_{(s)} = \frac{sC_1R_f}{(1 + sC_2R_f)(1 + sC_1R_1)}. \quad (7)$$

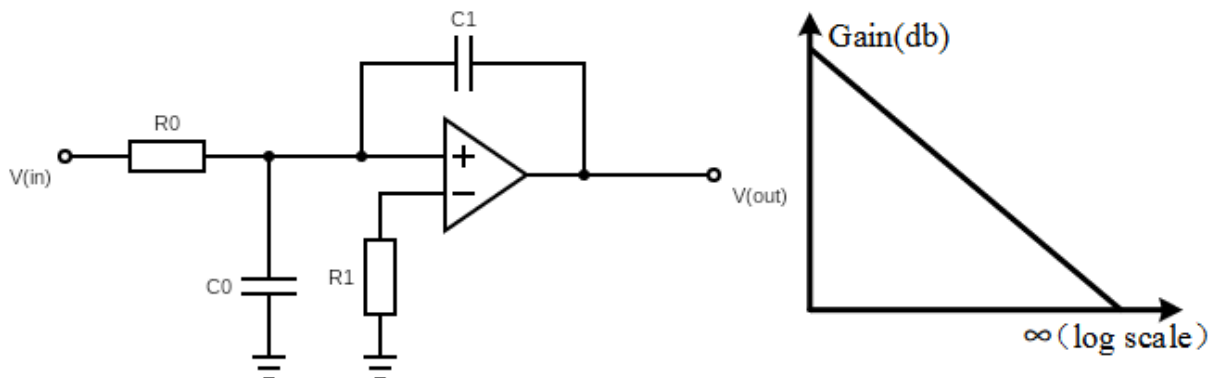


Obr. 5.4: Topologie č. 4 s charakteristikou zisku [7]

## 5.5 Topologie č. 5, neinvertující zapojení s dolní propustí

Integrační operační zesilovač v neinvertujícím zapojení s dolní propustí na vstupu (obr. 5.5). Jeho výhodou je potlačení přestřelení výstupu po intenzivním skoku signálu na vstupu integrátoru, ke kterému dochází u invertujících zapojení díky konečné rychlosti průchodu signálu OZ. [7]

Nevýhodou neinvertujícího zapojení je rozdělení integrace na dvě dvojice součástek \$R\_0+C\_0\$ a \$R\_1+C\_1\$. Pro získání rovnané přenosové funkce je potřeba zajistit shodnost časových konstant. Musíme tedy použít přesné součástky anebo naladit nastavení pomocí trimru. [7]



Obr. 5.5: Topologie č. 5 s charakteristikou zisku [7]

Rovnice přenosu:

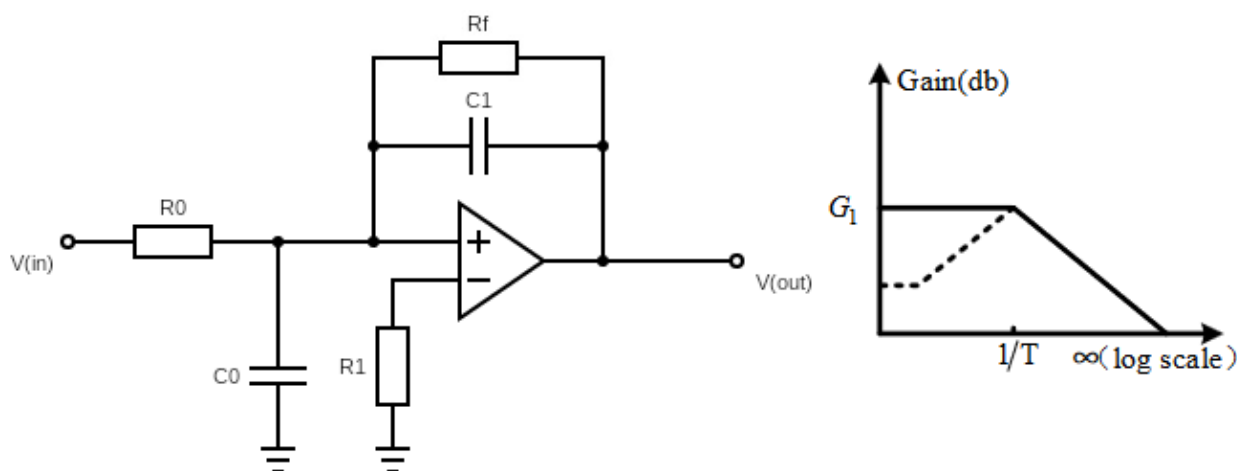
$$T(s) = \frac{1}{sC_0R_0 + 1} \frac{sC_1R_1 + 1}{sC_1R_1}. \quad (8)$$

Rovnice přenosu pro případ  $R_0C_0 = R_1C_1$ :

$$T(s) = \frac{1}{sC_1R_0}. \quad (9)$$

## 5.6 Topologie č. 6, neinvertující zapojení s vybíjecím rezistorem

Aktivní neinvertující integrátor se zpětnovazebním rezistorem  $R_f$  a dolní propustí na vstupu (obr. 5.6).



Obr. 5.6: Topologie č. 6 s charakteristikou zisku [7]

Rovnice přenosu:

$$T(s) = -\frac{R_f}{R_0 + sC_1R_0R_f}. \quad (10)$$

## Praktická část

Postupně jsou popsány skripty pro optimalizaci hodnot součástek integrátoru. Algoritmus je univerzální a byl naprogramován pro všechny varianty uvedené v kapitole 5. Výsledky jsou pro úsporu místa prezentovány pouze pro topologii 5.3. Realizace a měření byla také provedena pouze pro tuto topologii.

## 6 Optimalizační program

Jedná se o program, který hledá optimální hodnoty rezistorů a kondenzátorů pro integrační obvod. Cílem je najít hodnoty rezistorů a kondenzátorů tak, aby se vytvořené křivky (amplitudové a fázové) co nejvíce přiblížily k předdefinovaným ideálním křivkám integrátoru. Program byl vytvořen v prostředí Matlabu a skládá se z několika skriptů (`prenos_integrator_optim.m`, `Optim_integ`, `order.m`, `physicsPrint.m`, `putComponetValueIntoTheRow.m`). V programu se také nachází funkce `fminsearch()`, což je optimalizační algoritmus pro nalezení minima neomezené, více proměnné funkce. Pro zvýšení rychlosti výpočtu je použito paralelní vykonávání smyček pomocí `par-for`. To je funkce, která umožňuje rozdělení `for` na několik samostatných pracovních jednotek, které mohou pracovat současně na několika jádrech procesoru.

## 6.1 Popis skriptů

Následuje popis jednotlivých skriptů optimalizačního programu pro vyhledávání hodnot součástek k dosažení požadovaného přenosu integrátoru.

### 6.1.1 prenos\_integrator\_optim.m

Vývojový diagram viz obr. 6.1.

Nastavení parametrů a proměnných:

- vytvoření proměnných (rezistorů a kondenzátorů) a přenosové rovnice
- nastavení parametrů (zlomová frekvence, požadovaná fáze, váhová funkce kvadratického kritéria (zaměřuje se na oblast zájmu), iterací (počet opakování procesu))

Vytvoření ideálních křivek

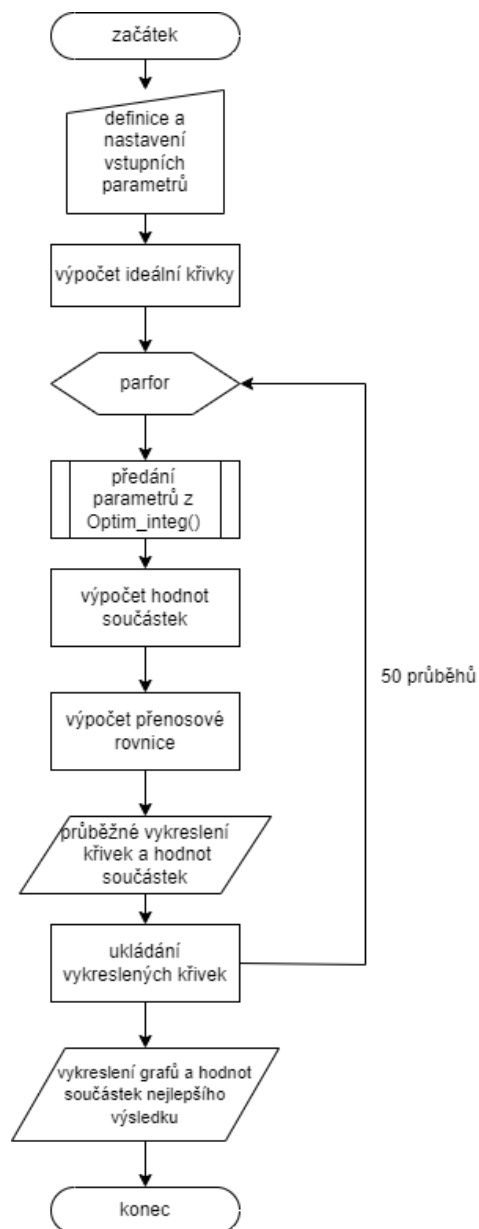
- vytvoření ideálních křivek zisku a fáze

Výpočet hodnot součástek

- během každé iterace jsou vypočteny rozdíly mezi skutečnými křivkami a ideálními
- vypsání vypočtených hodnot součástek a jejich ideálních hodnot
- výpočet přenosových funkcí
- vykreslení křivek zisku a fáze
- uložení výsledků grafů

Výstup

- výpis nejlepšího výsledku
- zobrazení grafů s nejlepšími hodnotami součástek



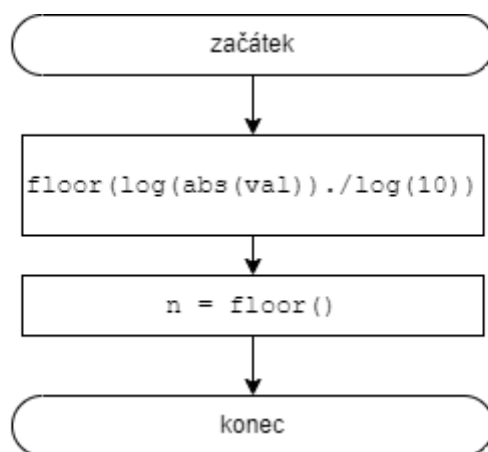
Obr. 6.1: Vývojový diagram optimalizačního programu (prenos\_integrator\_optim.m)

### 6.1.2 order.m

Slouží k určení řádu čísla `val`.

Vývojový diagram viz obr. 6.2.

- nejdříve se získá absolutní hodnota čísla `val` pomocí funkce `abs()`
- vypočítá se logaritmus absolutní hodnoty a následně se vydělí `log(10)`
- výsledek se zaokrouhlí směrem dolů a vrátí se vypočítané pořadí



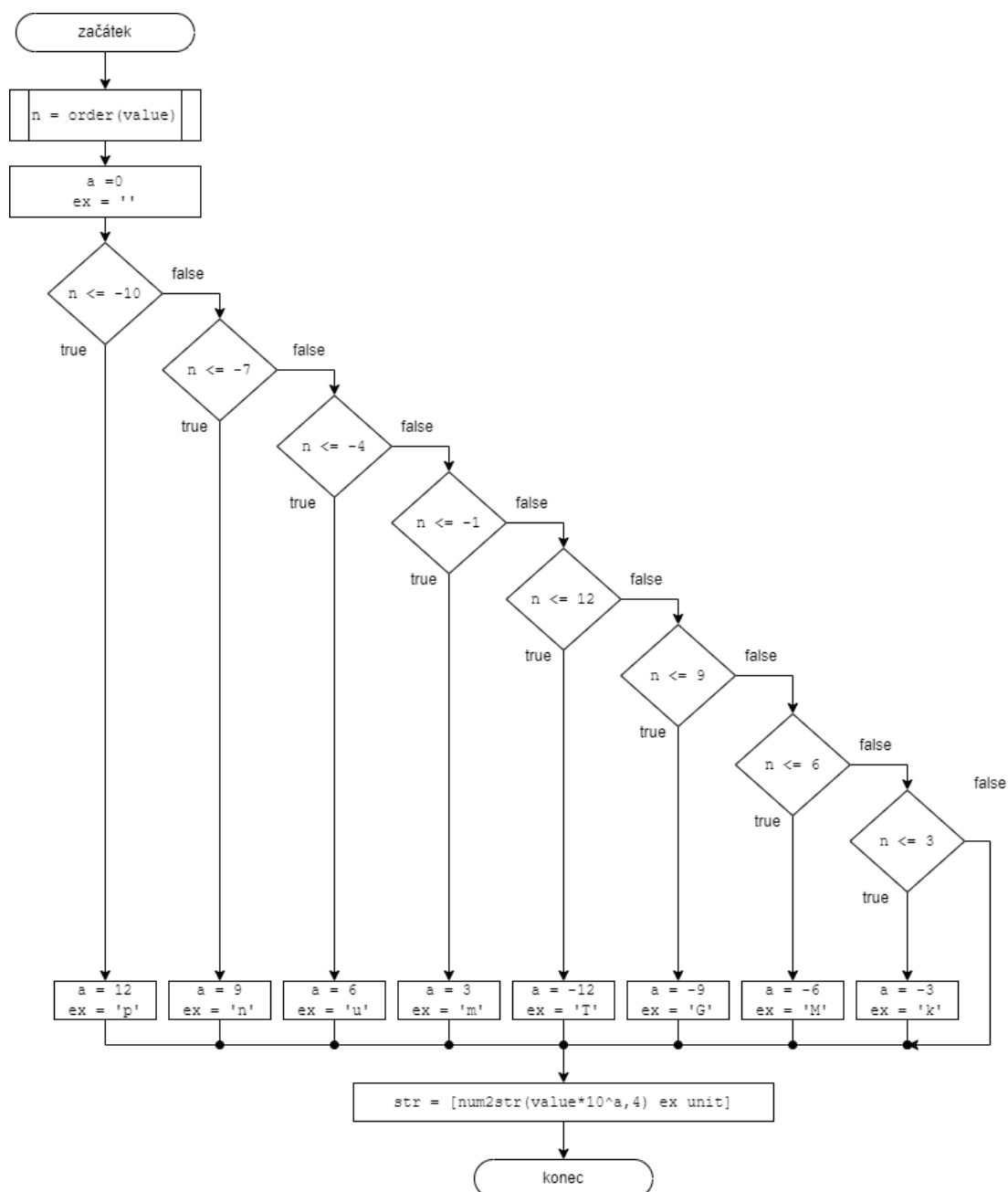
Obr. 6.2: Vývojový diagram order.m

### 6.1.3 physicsPrint.m

Slouží k formátování hodnoty součástky `value` s jednotkou `unit`.

Vývojový diagram viz obr. 6.3.

- nejdříve se zavolá funkce `order(value)` pro určení řádu čísla `value`
- podle řádu čísla se rozhoduje o vhodném exponentu (menší čísla mají větší exponenty a větší mají menší exponenty)
- na konci se sestavuje řetězec, který obsahuje formátované číslo s příslušným exponentem a jednotkou



Obr. 6.3: Vývojový diagram physicsPrint.m

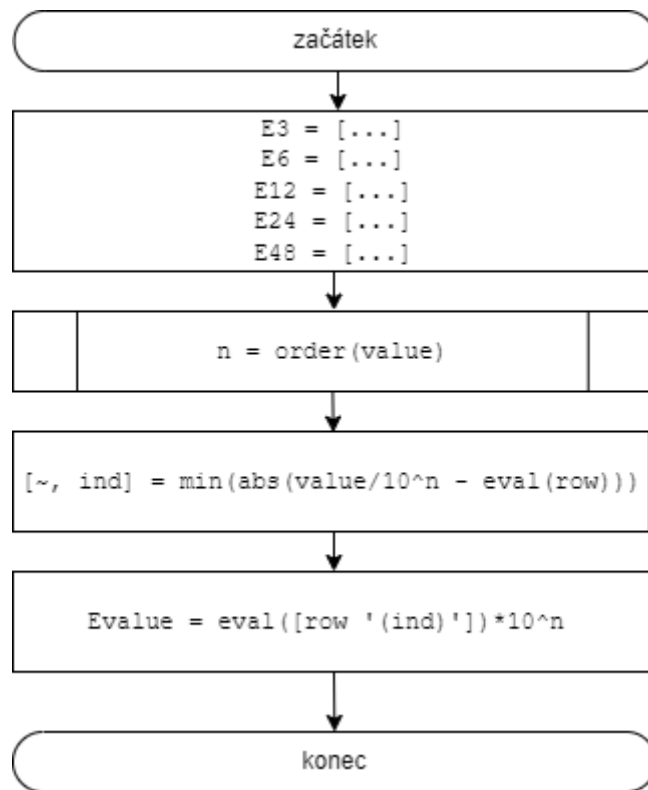
### 6.1.4 putComponetValueIntoTheRow.m

Slouží k nalezení nejbližší hodnoty z řady E3 – E48 a následnému přiřazení k danému číslu (value).

Vývojový diagram viz obr. 6.4.

- určí se řád hodnoty pomocí funkce `order(value)`
- nalezne se nejbližší hodnota ve zvolené řadě pomocí `abs()` a `min()`
- hodnota se následně přiřadí do proměnné `Evalue` a vynásobí se příslušným řádem





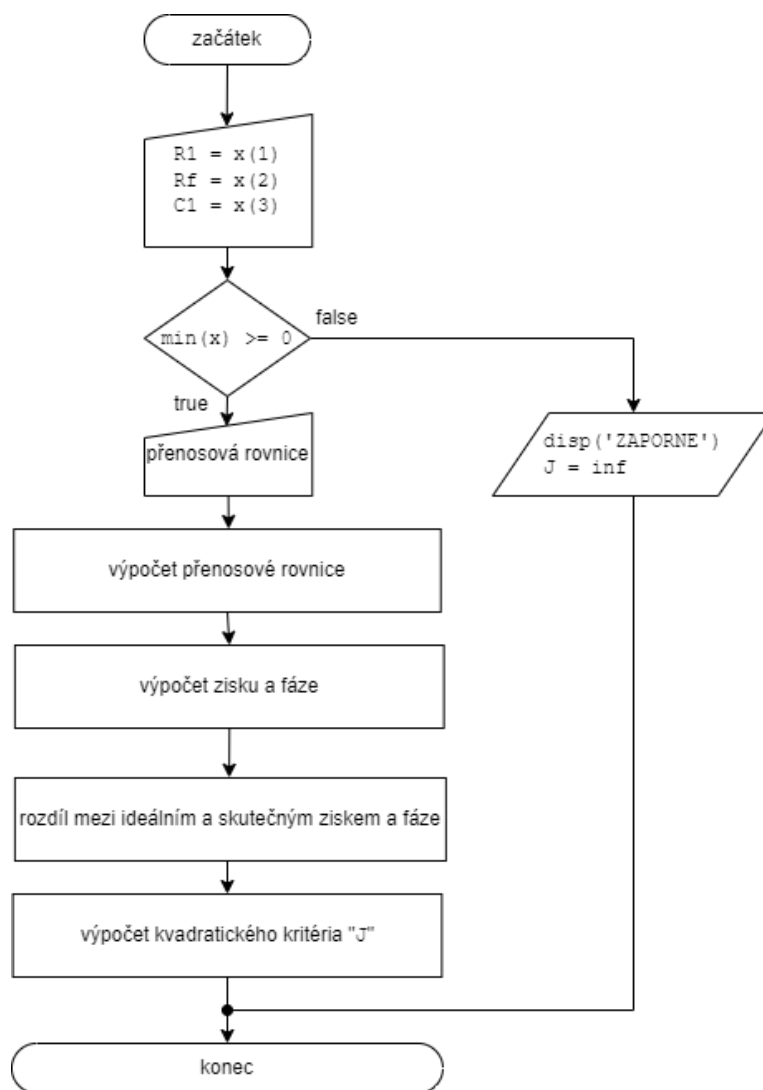
Obr. 6.4: Vývojový diagram putComponentValueIntoTheRow.m

### 6.1.5 Optim\_integ.m

Tento skript je pro optimalizační funkci `fminsearch()`.

Vývojový diagram viz obr. 6.5.

- nejdříve se získají hodnoty pro rezistory a kondenzátory z vektoru `x`
- pokud jsou hodnoty kladné vypočítá se:
  - přenos OZ
  - rozdíl mezi ideálním ziskem a skutečným ziskem
  - rozdíl mezi ideální fází a skutečnou fází
- aplikuje se váhová funkce na oba rozdíly
- následuje součet kvadratického kritéria pro zisk a fází (fázový součet se zvětšuje 5.2krát více kvůli vyšší důležitosti)
- pokud je některá z hodnot rezistorů nebo kondenzátorů záporná
  - nastaví se hodnota kritéria `J` na nekonečno a vypíše se varování: „ZÁPORNÉ“
- na konci se vrátí vypočítané kvadratické kritérium `J`



Obr. 6.5: Vývojový diagram Optim\_integ.m

## 6.2 Požadovaný přenos

Jde o volbu ideálních křivek zisku a fáze, ke kterým se bude snažit optimalizační proces přiblížit s frekvenční a fázovou charakteristikou obvodu. Je důležité si uvědomit, že topologie zapojení OZ umožňuje vždy jen určitý počet stupňů volnosti ve tvarování charakteristiky a zlomy typu dolní nebo horní propust, viz charakteristiky u jednotlivých zapojení v kapitole 5. Pokud by byl zvolen požadovaný přenos, který nerespektuje topologii obvodu, nebude optimalizace úspěšná a nalezené řešení bude mít velké odchylky.

V navrženém algoritmu se požadovaný přenos zisku a fáze zadává jako lomené čáry. Body zlomů se nastavují pomocí parametrů zlomová frekvence, zisk na zlomové frekvenci, strmota a požadovaná fáze

## 6.3 Hodnotící kritérium

Pro účinnou funkci gradientní optimalizace je nezbytné, aby vyhodnotila skupinu navrhovaných vstupních proměnných jediným číslem, které vyjadřuje kvalitu aproximace. Potřebná je nějaká metrika shrnující rozdíl mezi požadovaným přenosem a přenosem získaným danou variantou parametrů.

Zpravidla se používá kvadratického kritéria jako jedné z nejjednodušších metrik. Výhodou je, že mocnina přirozeně eliminuje možnost negativní vzájemné kompenzace kladných a záporných odchylek. K tomu je možné použít např. i absolutní hodnotu. Další výhodou kvadratického kritéria je, že s velikostí odchylky kvadraticky roste její váha. Optimalizace tedy upřednostňuje eliminaci velkých odchylek a malé výsledky ovlivňují minimálně.

Při optimalizaci přenosu OZ dochází k problému na zlomových frekvencích, protože reálný útlum nastává postupně. Požadovaný přenos je zadán lomenou čarou. V bodech zlomu jsou proto odchylky z podstaty velké. Proto je před výpočet kvadratického kritéria zařazena váhová funkce, která se tento problém snaží eliminovat.

Nastavení váhové funkce je provedeno tak, že v blízkém okolí zlomů požadovaného přenosu je rovna 0. Tedy části charakteristik v okolí zlomů nejsou hodnoceny.

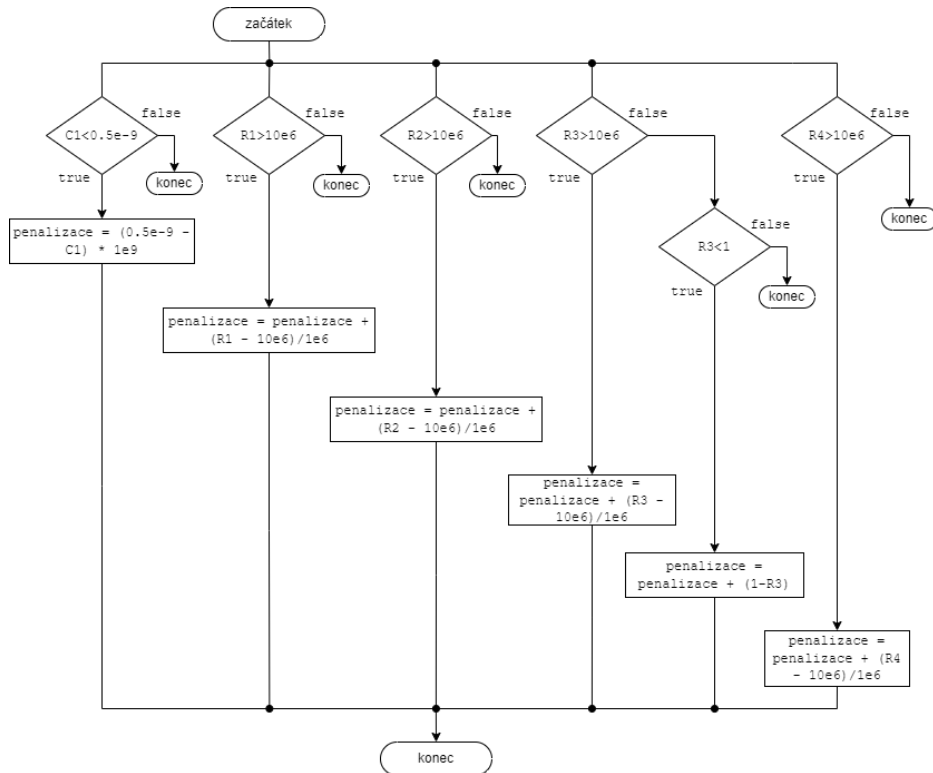
Navíc byla s pomocí váhové funkce zvýšena váha v oblasti hlavní části pracovní charakteristiky senzoru, tj. v jeho frekvenčním pásmu 50–2500 Hz. Tím je dosaženo zlepšení chování senzoru v jeho pracovní oblasti.

Hodnotící kritéria jsou počítána zvlášť pro amplitudu přenosu a zvlášť pro fázi. Na závěr výpočtu jsou hodnoty z obou částí sečteny.

## 6.4 Úprava optimalizačního programu

Pro nalezení nejlepších hodnot byl použit optimalizační program, jak je již zmíněno výše. Původně byl program napsán pro jednodušší schéma podobné topologie č. 2. Program bylo nutné upravit, aby se dal použít pro topologie schématu č. 3.

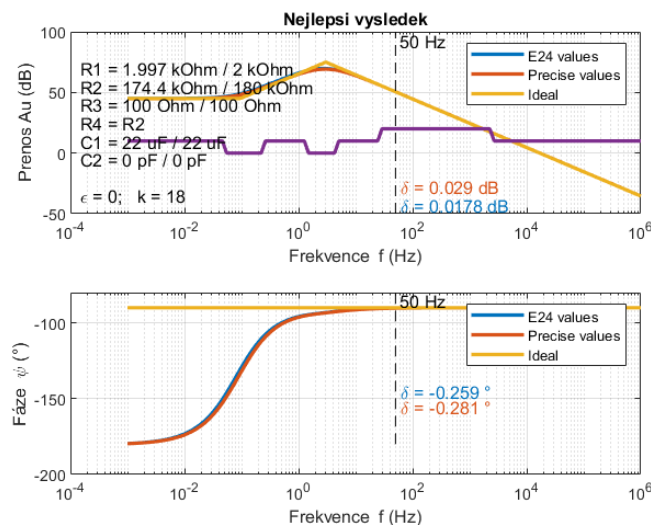
Byl změněn tvar ideální křivky, tak aby odpovídal křivce na obr. 5.3. Dále do programu byla vepsána rovnice přenosu odpovídající topologie č. 3. Do programu byl přidán penalizační koeficient. Původní program totiž dříve vracel zbytečně velké hodnoty odporů (více jak 10 M $\Omega$ ) a velice malé hodnoty kondenzátorů. Malé hodnoty kondenzátorů nejsou vhodné, protože spoje nebo vývody součástek na desce plošných spojů vytváří parazitní kondenzátory o velikosti až jednotky pF. To právě u malých hodnot kondenzátorů způsobuje velkou relativní chybu (pro hodnoty větší než 100 pF je chyba již pod 1 % a je přijatelná). Přidané penalizace jsou vyobrazeny pomocí vývojového diagramu na obr. 6.6. Pro zvýšení šance nalezení nejlepších hodnot se uloží předchozí výsledek a prvních 25 hodnot se použije příští výpočet.



Obr. 6.6: Vývojový diagram penalizace

## 6.5 Výsledek optimalizačního programu

Nejllepší výsledek, který byl použit i na výslednou realizaci je zobrazen níže (graf 6.1). Žlutě obarvená křivka znázorňuje ideální tvar, kterému se výsledek má co nejvíce podobat. Modrá křivka znázorňuje výsledek s E24 hodnotami součástek. Červená křivka znázorňuje výsledek s přesnými hodnotami součástek. Na grafu přenosu je vidět, že tvar výsledných křivek je velice blízko tvaru ideální křivky. Dále je vidět, že výsledné křivky na bodech zlomů nemají tak ostrý průběh jako ideální křivka, což bylo očekáváno. Na grafu je také zobrazena fialově váhová funkce. Tento výsledek tedy určil hodnoty  $R1 = 2 \text{ k}\Omega$ ,  $R2 = R4 = 180 \text{ k}\Omega$ ,  $R3 = 100 \Omega$ ,  $C1 = 4,7 \text{ nF}$ ,  $C2 = 22 \mu\text{F}$  (po napájení byla reálná hodnota  $24 \mu\text{F}$ ).



Graf 6.1: Nejlepší výsledek optimalizačního programu

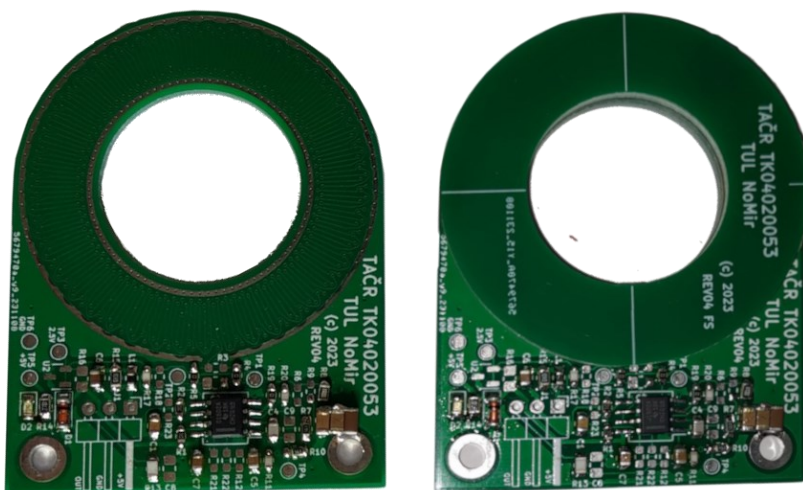
## 7 Realizace

Pro ověření teoretického návrhu bylo přistoupeno k realizaci nejlepšího optimalizovaného zapojení a jeho proměření v reálných podmínkách. Vlastní senzor a deska plošného spoje pocházejí od vedoucího práce. Snímací cívka má 172 závitů vytvořených na dvouvrstvé desce plošného spoje. Integrovaný obvod je univerzální. To umožňuje provést změnu osazení součástek vytvořit invertující, neinvertující integrátor s různými kompenzacemi, předfiltrem DP a výstupním HP, DP filtrem.

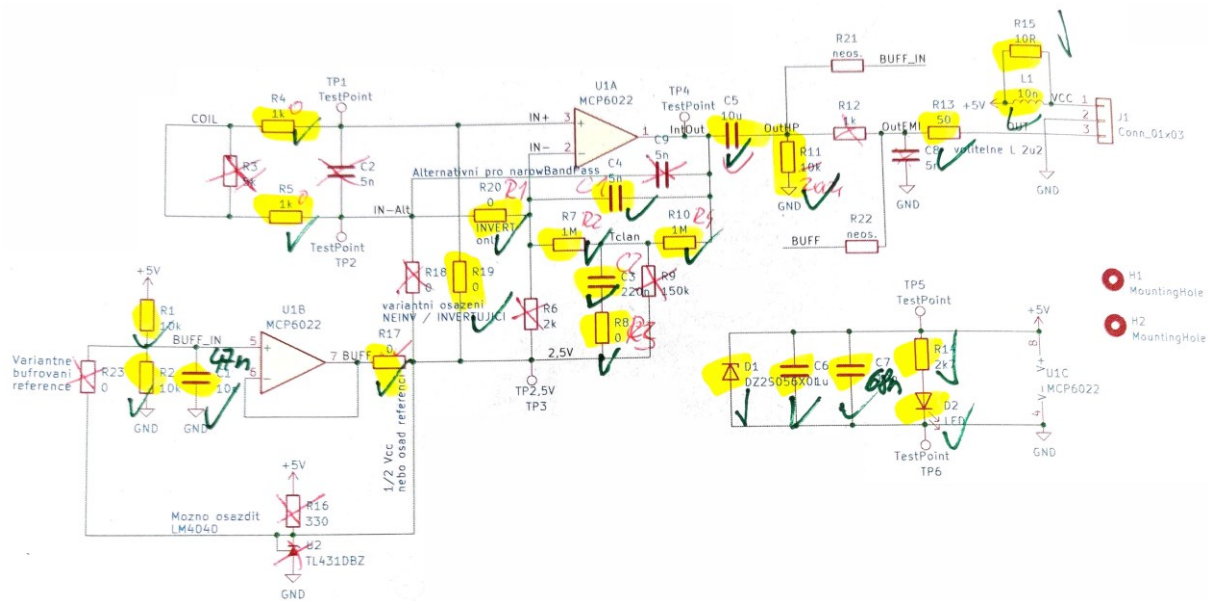
Napájení senzoru je unipolární. Referenční bod pro práci OZ je vytvářen děličem jako polovina napájecího napětí.

### 7.1 Výroba testovacího senzoru

Nejlepší hodnoty součástek, které vyšly z optimalizačního programu byly následně napájeny na již vytvořenou univerzální desku plošných spojů. Na obr. 7.1 vlevo jde vidět cívka, na kterou se následně připájelo stínění z obou stran cívky na obr. 7.1 vpravo. Stínění se skládá z měděné plochy jejíž tvar kopíruje tvar cívky. Jelikož byla deska vyrobena jako univerzální, bylo nutné vybrat jaké komponenty obvodu se použijí. K tomu bylo využito schéma této DPS (obr. 7.2). Pro lepší výsledek se na výstup přidala horní propust.



Obr. 7.1: DPS s napájenými součástkami (vlevo bez stínění, vpravo se stíněním)



Obr. 7.2: Schéma DPS

## 7.2 Měření testovacího senzoru

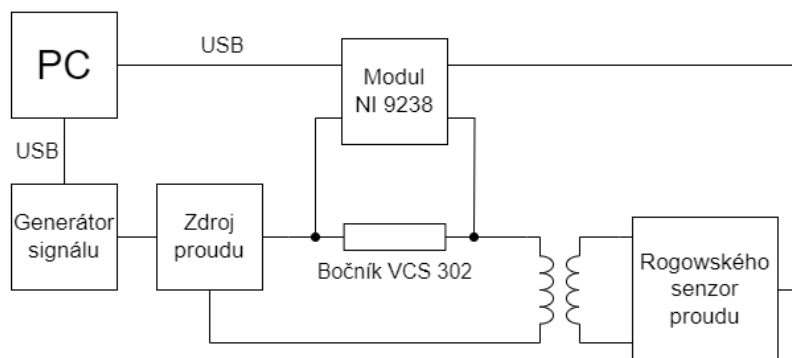
Pro měření byl na cívku navinut vodič tak, aby simuloval 100 A a dalo se provést měření. Pomocí optimalizačního programu se získaly nejlepší hodnoty součástek pro topologie č. 3. Při měření byly použity 4 varianty součástek. Jako operační zesilovač byl použit OPA 1602.

- 1)  $R_1 = 11 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = R_4 = 56 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 1 \text{ }\Omega$ ,  $C_1 = 4,7 \text{ nF}$ ,  $C_2 = 220 \text{ }\mu\text{F}$
- 2)  $R_1 = 11 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = R_4 = 56 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 51 \text{ }\Omega$ ,  $C_1 = 4,7 \text{ nF}$ ,  $C_2 = 220 \text{ }\mu\text{F}$
- 3)  $R_1 = 1,3 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = R_4 = 56 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 330 \text{ }\Omega$ ,  $C_1 = 4,7 \text{ nF}$ ,  $C_2 = 100 \text{ }\mu\text{F}$
- 4)  $R_1 = 2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = R_4 = 180 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 100 \text{ }\Omega$ ,  $C_1 = 4,7 \text{ nF}$ ,  $C_2 = 22 \text{ }\mu\text{F}$  (24  $\mu\text{F}$ )

Zdrojem signálu byl generátor Siglent SDG2042X ovládaný SCPI příkazy rozhraním USB. Signál byl převeden napětím řízeným zdrojem proudu (výkonovým zesilovačem s OPA549) na definovaný průběh proudu. Generovaný proud byl snímán bočníkem VCS302 0,1  $\Omega$  a měřen modulem NI 9238. Tento proud je brán jako referenční proudový signál.

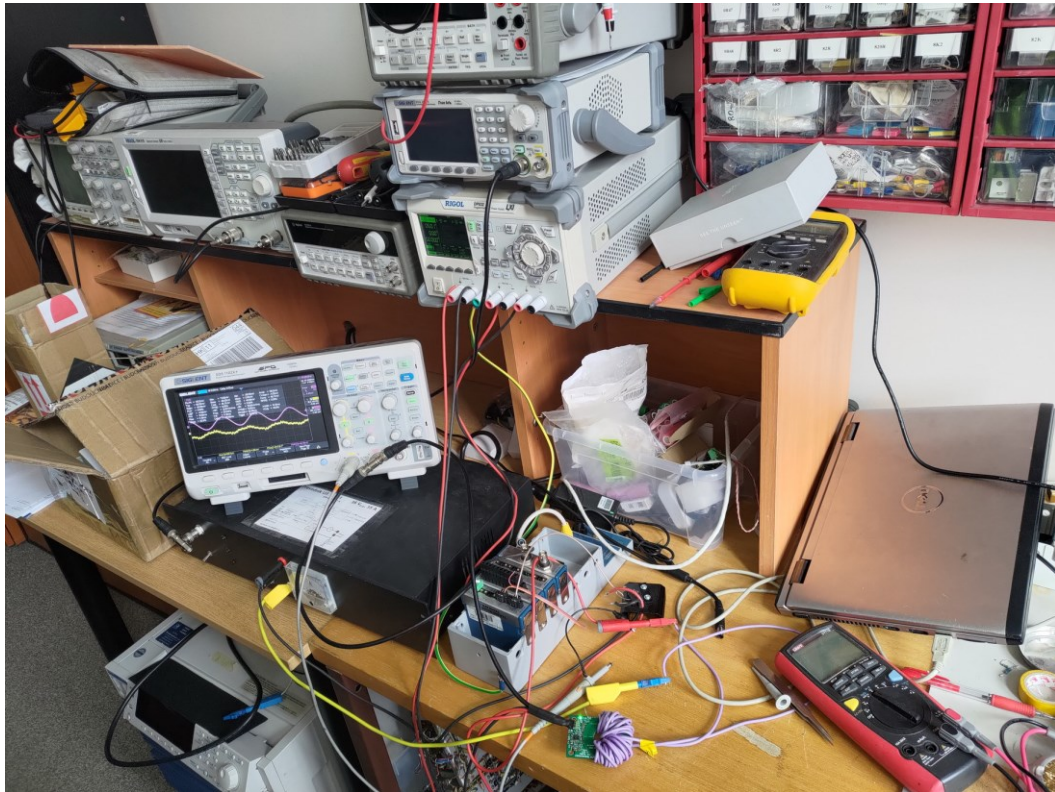
Výstup senzoru byl přiveden do analogově číslicového převodníku (modulu NI 9238) do Matlabu. Měření probíhalo po bodech s postupně se zvyšující frekvencí po krocích. Blokové schéma měření je zobrazeno na obr. 7.3.

Z navzorkovaných dat byla vytvořena pomocí FFT amplitudová a fázová charakteristika. Amplituda je do grafu vynesena jako přenos  $G = U_{\text{out}}/I_{\text{ref}}$ .



Obr. 7.3: Blokové schéma měření





Obr. 7.4: Fotografie z měření

### 7.3 Výsledky měření

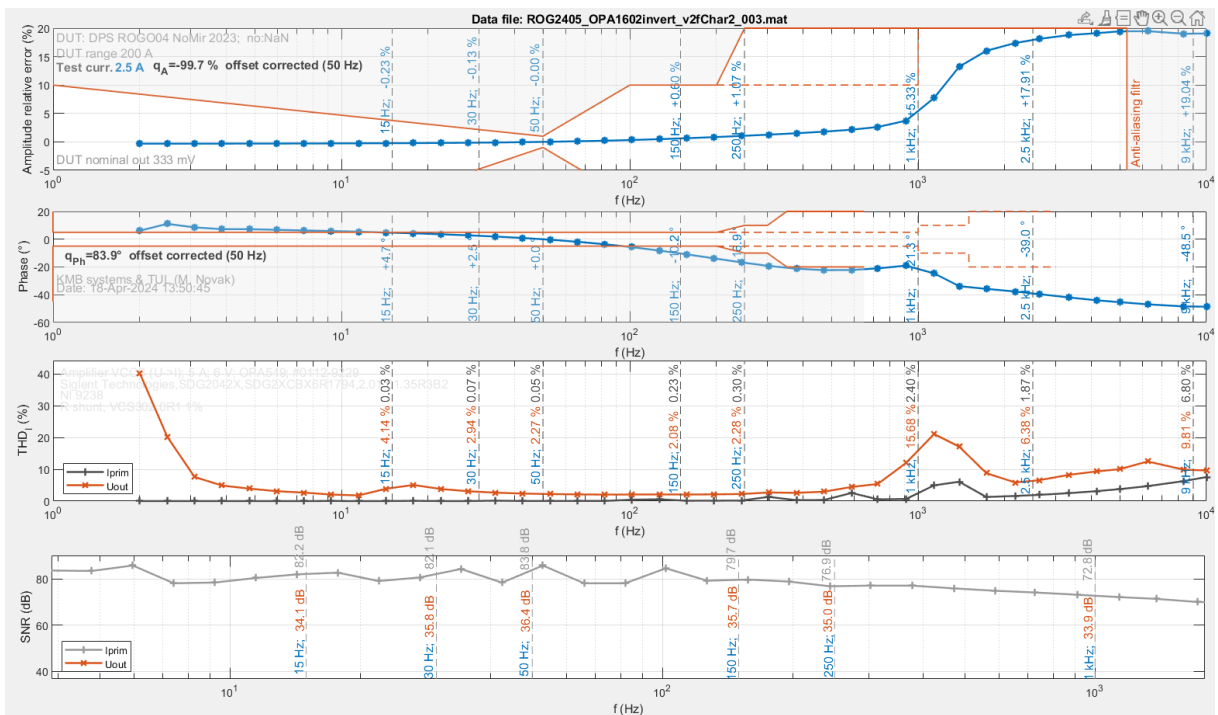
V grafu pro amplitudu a fázi je graficky znázorněna (oranžově) oblast, kde by se výsledná křivka měla pohybovat. Oblast je vytvořena podle tabulky 6A. 2. normy IEC 61869-6:2016 [21]. Norma je obecná pro měřicí transformátory proudu s nízkonapětovým výstupem. Komerční senzory mají překmit frekvenční charakteristiky mezi 1 až 13 Hz, což půjde vidět i na výsledných grafech níže. Jedná se o problém správného nastavení kompenzačního T-článku ve zpětné vazbě operačního zesilovače. Kompenzační T-článek totiž vyrovnává fázovou charakteristiku zejména při 50 Hz.

Jak lze vidět na výsledných grafech níže. Bude se objevovat propad ve fázové charakteristice nebo překmit v amplitudě na kompenzační frekvenci 1 až 13 Hz. Je tedy nutné zvolit kompromis. Přijatelnou chybu fáze a malý překmit v amplitudové charakteristice i za předpokladu, že bude překročena norma.

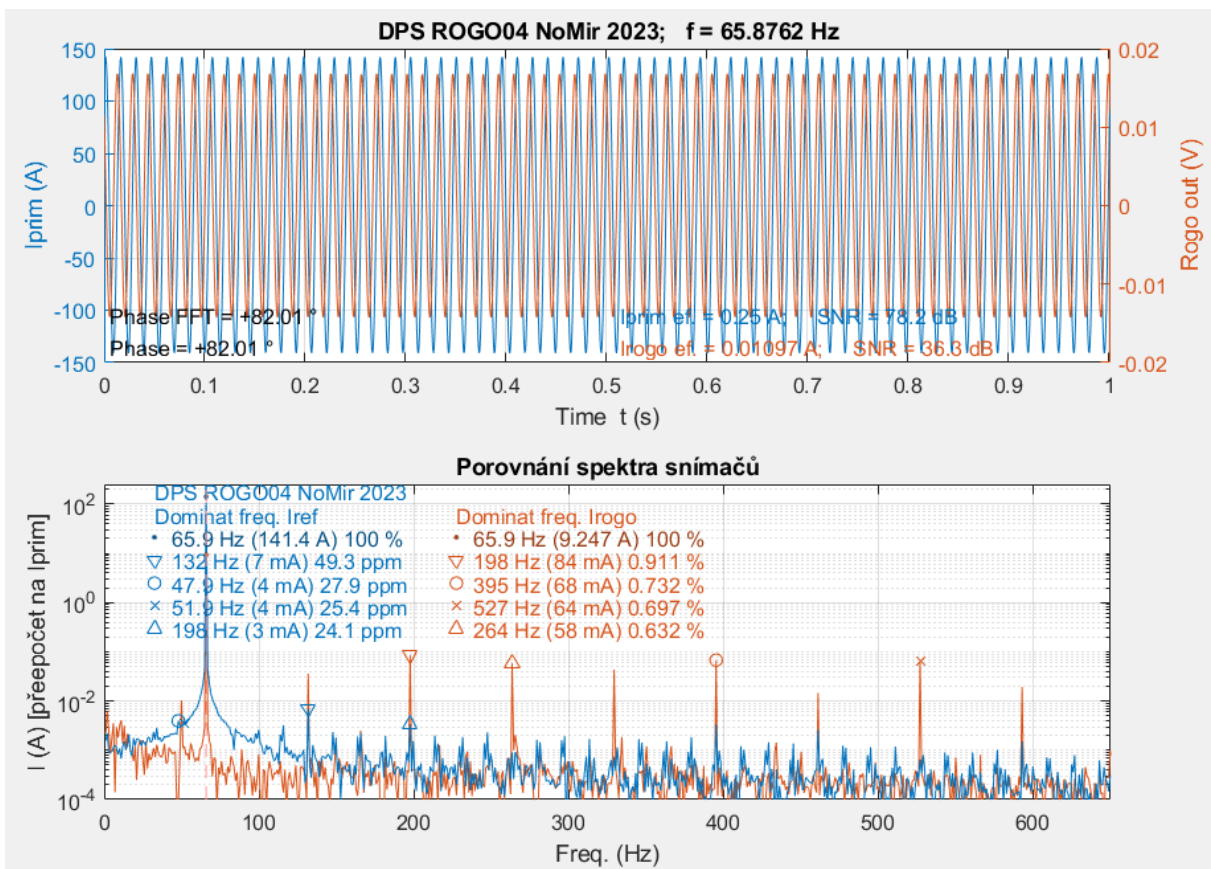
THD (Total Harmonic Distortion) neboli celkové harmonické zkreslení je procentuální odchylka od čisté sinusovky. Černě obarvený průběh ukazuje  $I_{prim}$ . Ten je pro kontrolu výkonového zesilovače a ověření, zda generuje čistý sinus nebo deformovaný průběh. Oranžový průběh představuje naměřenou hodnotu ze senzoru a ukazuje, jestli sensor nedeformuje signál (do deformace signálu je zahrnut i šum).

SNR (Signal to Noise Ratio) neboli odstup signálu od šumu udává kolik obsahuje signál šumu oproti užitečnému signálu.

### 7.3.1 Měření varianty součástek č. 1



Graf 7.1: Výsledek měření č. 1 (Amplituda, fáze, THD, SNR v závislosti na frekvenci)

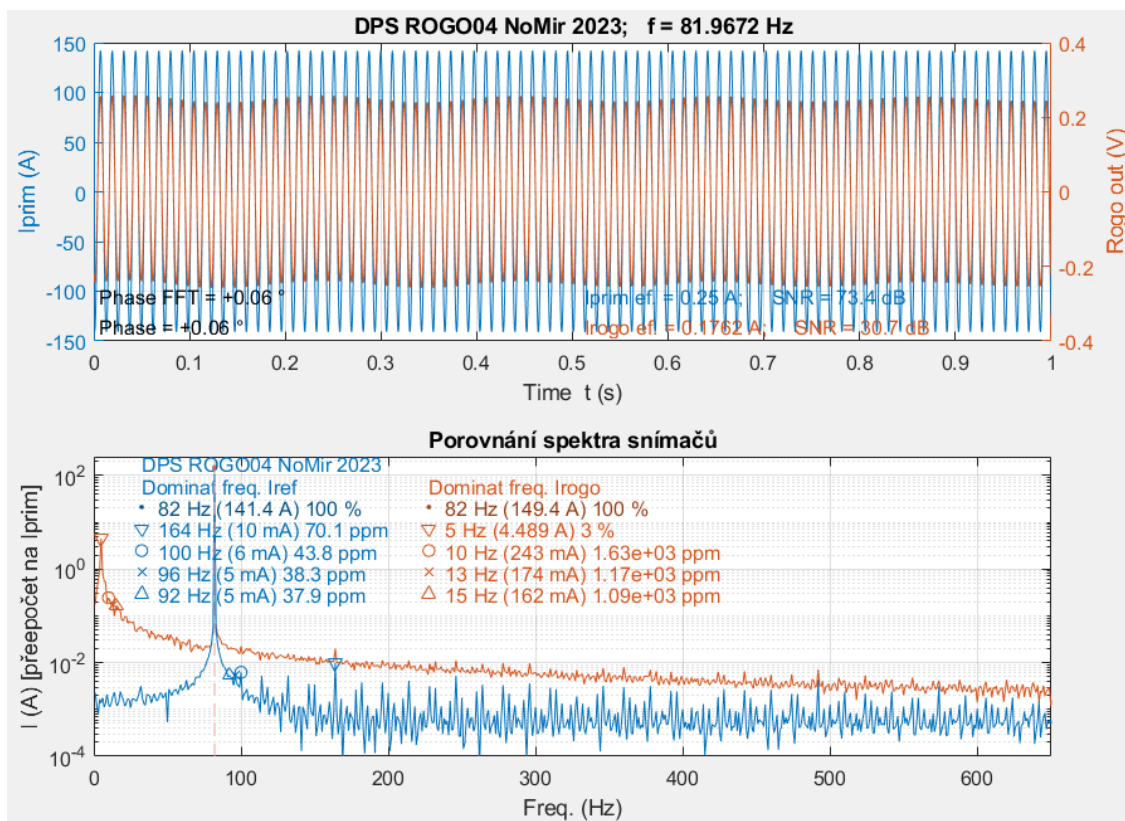


Graf 7.2: Měření č. 1, primární proud a výstup senzoru v čase, spektrum senzoru

Na prvním grafu je vidět, že průběh amplitudy nemá žádný překmit a splňuje oblast normy (graf 7.1). Ovšem průběh fáze má poměrně velkou chybu a nesplňuje normu ani na větších frekvencích.





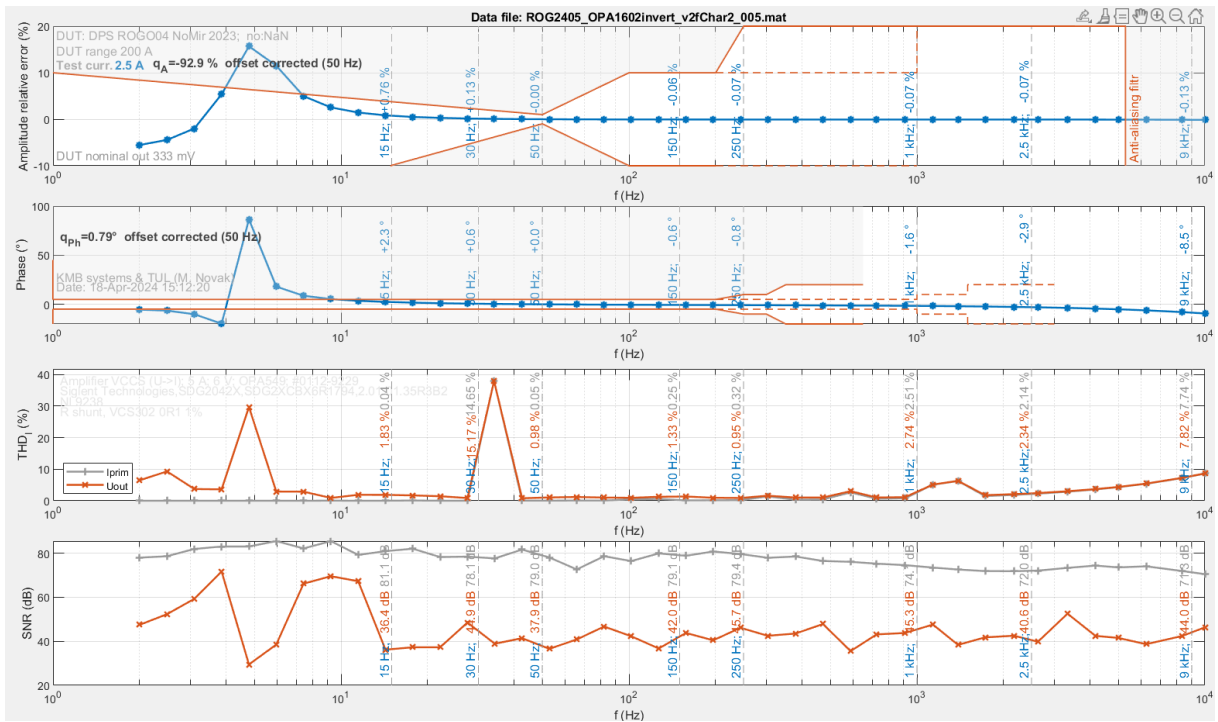


Graf 7.4: Měření č. 2, primární proud a výstup senzoru v čase, spektrum senzoru

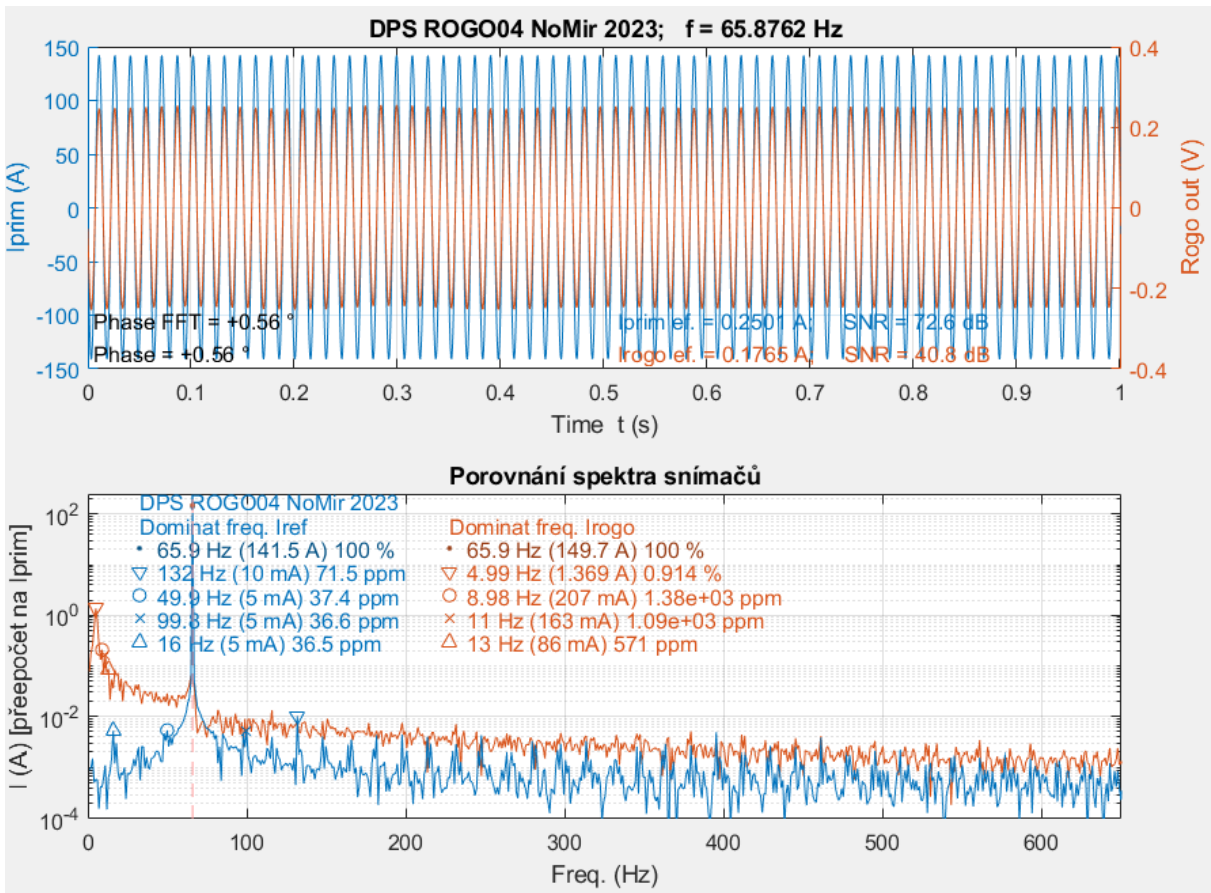
Průběh amplitudy (viz graf 7.3) má s porovnáním předchozího měření překmit na nízkých frekvencích (mezi 4 a 8 Hz a překračuje oblast normy. Tento překmit je malý. Je to přijatelná chyba, jak již bylo zmíněno výše. Průběh fáze má poměrně malou chybu a nepřesahuje oblast. Průběh grafu THD má celkem velikou odchylku mezi 14 a 15 Hz. Zřejmě způsobenou nahodilým rušením při měření. Ve zbylých frekvencích hodnota senzoru téměř kopíruje Iprim. Na nízkých frekvencích grafu SNR jdou vidět velice malé hodnoty odstupu signálu od šumu. To je způsobeno překmitem na zisku zapojení. Po 9 Hz se hodnota SNR zvětší i na 70 dB. Postupně však hodnota klesá s vyšší frekvencí pod 40 dB.

Graf 7.4 výstupu senzoru v čase je velice zvlněný. To je způsobeno velkým ziskem zapojení v dc a šumem  $1/f$  OZ, které je dané malou hodnotou R3, proto se při příštím měření použije větší hodnota. Průběh grafu spektra je oproti předchozímu měření má větší rušivou frekvenci, kde na 5 Hz je až 3 % hlavního signálu. Jde opět o zdůraznění  $1/f$  šumu kompenzačním T-článkem.

### 7.3.3 Měření varianty součástek č. 3



Graf 7.5: Výsledek měření č. 3 (Amplituda, fáze, THD, SNR v závislosti na frekvenci)

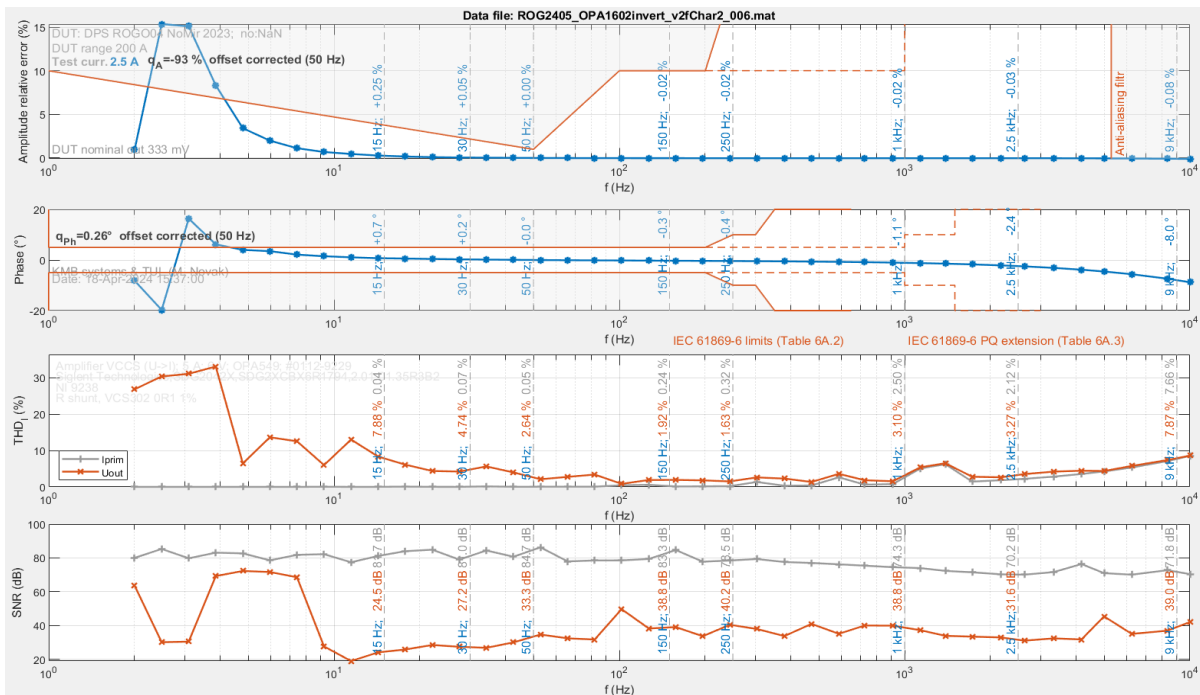


Graf 7.6: Měření č. 3, primární proud a výstup senzoru v čase, spektrum senzoru

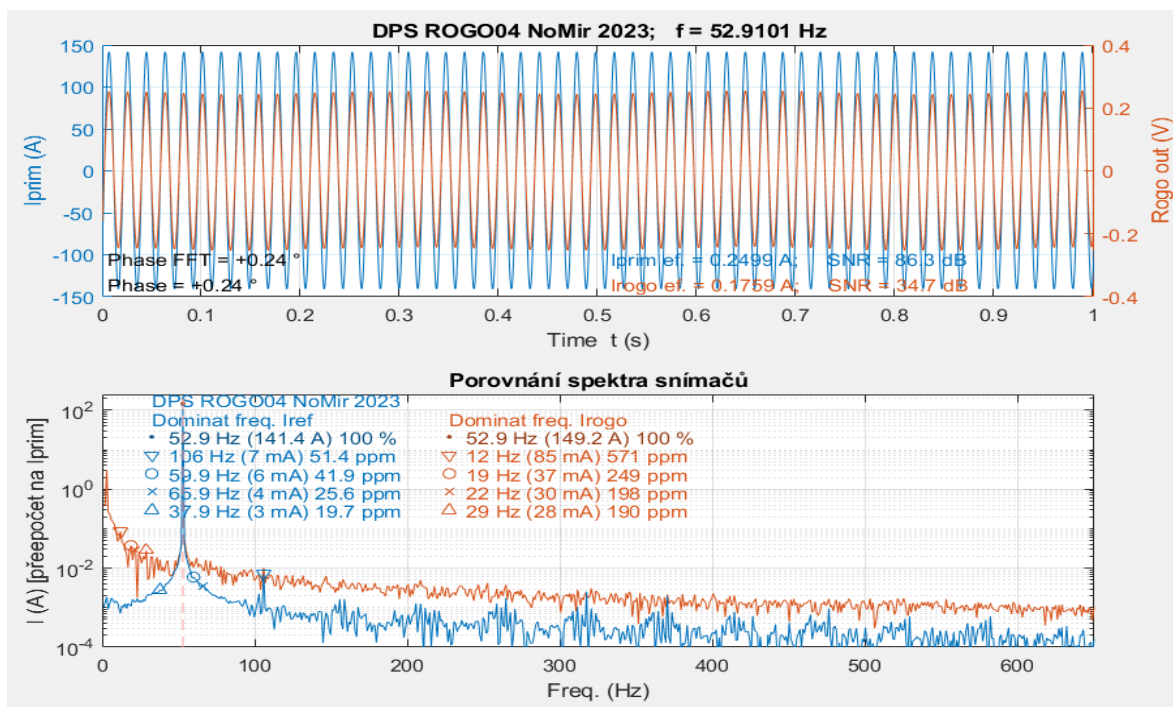
Po porovnání s předchozím měření je průběh amplitudy velice podobný (graf 7.5). Také má malý překmit mezi 4 a 8 Hz. Mezi 14 a 15 Hz již není takový propad.

Fáze má ovšem horší průběh a do oblasti normy se vrací až někde kolem 10 Hz. Na grafu THD hodnota senzoru kopíruje hodnotu Iprim a je v porovnání s přechozím grafem lepší. Hodnoty odstupů signálu od šumu jsou o 7 dB lepší než v předchozím měření a také se lehce zhoršují na větších frekvencích. Zvlnění výstupu je v porovnání s předchozím měření výrazně menší (graf 7.6). Na grafu spektra senzoru je opět vidět menší rušivá frekvence. Na 4,99 Hz je největší hodnota při momentální 65,9 Hz což je 0,914 % hlavního signálu. Jde o zesílení 1/f šumu operačního zesilovače kompenzačním T-článkem.

### 7.3.4 Měření varianty součástek č. 4



Graf 7.7: Výsledek měření č. 4 (Amplituda, fáze, THD, SNR v závislosti na frekvenci)

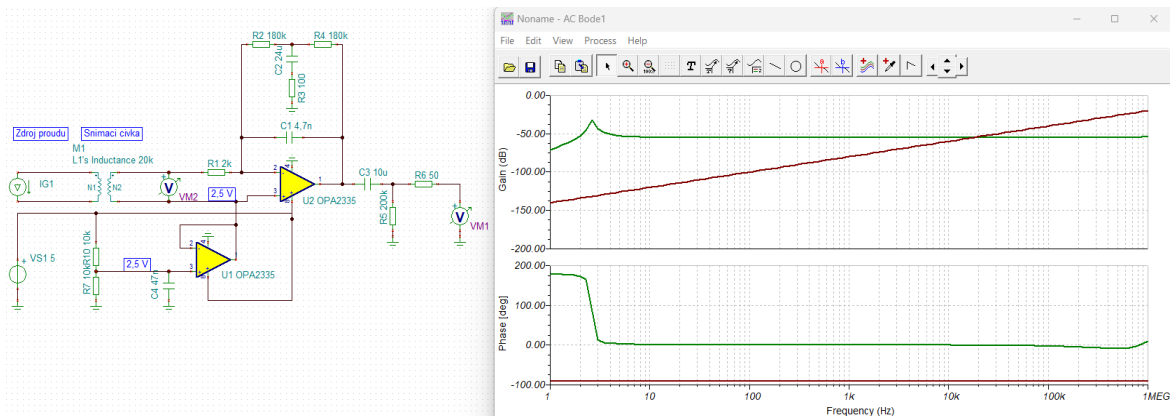


Graf 7.8: Měření č. 4, primární proud a výstup senzoru v čase, spektrum senzoru

Průběh amplitudy po porovnání s předchozím grafem má menší překmit a do oblasti se vrací okolo 3 Hz (graf 7.7). Zbytek průběhu je bez chyby. Průběh fáze je nejlepší ze všech předchozích měření. Graf THD má na nízkých frekvencích menší procentuální odchylky. Od 100 Hz jsou odchylky minimální. Hodnoty odstupu signálu od šumu jsou lepší díky překmitu na frekvencích (3–8 Hz). Graf 7.8 výstupu senzoru má minimální zvlnění. Na grafu spektra senzoru je největší rušivá frekvence Při momentální hodnotě 52,9 Hz je největší rušivá frekvence na 12 Hz což je 0,0571 % hlavního signálu. Ovšem oblast <5 Hz byla z hodnocení vyjmuta, protože je zasažená 1/f šumem OZ a je relativně daleko od frekvenčního rozsahu senzoru.

## 8 Simulace v programu Tina-TI

Pomocným nástrojem při návrhu prototypu byl program Tina-TI. Jedná se o prostředí, které umožňuje simulaci obvodů se základními součástkami (například odpory, kondenzátory, operační zesilovače atd.) a hlavně také dokáže simulovat, přechodové jevy, DC pracovní bod obvodu, frekvenční přenos atp. V případě téhle práce se hodila simulace frekvenčního zisku a fáze, které je zobrazeno na obr. 8.1. Schéma bylo sestaveno tak, aby co nejvíce odpovídalo reálnému zapojení. Program bohužel neobsahuje model operačního zesilovače, který byl použit na reálný prototyp, a proto byl vybrán model s co nejpodobnějšími parametry (OPA2335).



Obr. 8.1: Simulace topologie č. 3 v Tina-TI

Rogowského sensor byl nahrazen blokem vzájemné indukčnosti s hodnotami odpovídajícími skutečné cívice. Přenos senzoru se proto liší od přenosu vlastních integrátorů uvedených i teoretické části. Díky bloku cívky, který zanáší do signálové cesty derivaci získáme přenos senzoru jako celku.

Na výsledném grafu vidíme, že přenosová funkce je ve frekvenčním rozsahu senzoru vyrovnaná. Na 2,8 Hz je mírný překmit v amplitudě a mění se zde fázový úhel z  $-90^\circ$  na  $0^\circ$ . Dále jde vidět mírné zvlnění fázové charakteristiky v oblasti  $>10$  kHz. Tomu odpovídá i mírný nárůst amplitudy na 1 MHz. V této oblasti jsou výsledky odlišné od měření z předchozí kapitoly. Příčinou může být jiný typ operačního zesilovače použitý v simulaci.

V reálném zapojení by bylo vhodné na výstup doplnit dolní propust pro potlačení těchto jevů nad horní požadovanou frekvencí senzoru.

Shoda simulace s měřením je na velmi dobré úrovni. Nejdůležitější je, že přenos senzoru je v požadovaném frekvenčním rozsahu 40-2500 Hz vyrovnaný, a to včetně minimálních odchylek fázové charakteristiky.

## 9 Závěr

Cílem Bakalářské práce bylo nalezení optimálních hodnot součástek pomocí optimalizačního programu. Následně realizace prototypu Rogowského senzoru proudu a ověření teoretického návrhu. V úvodu byly představeny základní informace Rogowského senzoru, jeho výhody, ale také i problémy související s jeho návrhem.

V 2. kapitole práce byly sepsány základní informace o operačním zesilovači. Hlavně o jeho parazitních parametrech. Ty jsou velmi důležité na pochopení problematiky operačních zesilovačů a bylo s nimi nutno počítat při návrhu prototypu. Následující kapitola je o důkladnějším popisu a vlastnostech Rogowského senzoru proudu, bez kterých by se návrh neobešel. Například při měření velmi malých signálů je nutné optimalizovat poměr signál/šum nebo chování cívky senzoru s integrátozem. Byla zde probrána důležitá vlastnost a tou je offset operačního zesilovače. V kapitole jsou popsány různé topologie operačních zesilovačů, které dokáží dělat korekci offsetu a umí tuto nežádanou vlastnost omezit. V neposlední řadě je popsán problém fázového posunu, který se váže k metodám potlačení offsetu a kalibrace.

V kapitole č. 4 byla provedena analýza zakoupených komerčních senzorů. Na těchto senzorech bylo provedeno reverse engineering aby se zjistilo, jakým způsobem jsou obvody integrátorů řešeny. Poté byly zpracovány do tabulek parametry Rogowského senzoru a integrátoři pohybující se na trhu.



Kapitola 5 se zabývá topologiemi obvodů integrátorů pro Rogowského cívky a popisuje jejich vlastnosti. Po analýze vlastností byla vybrána topologie č. 3, která bude použita pro optimalizační program a konečnou realizaci.

V šesté kapitole je popsán optimalizační program, který hledá optimální hodnoty, pro již zvolenou topologii. Program bylo nejdříve nutno upravit, aby se docílilo správných výsledků.

V následující kapitole je popsána realizace. Nejdříve se napájely optimální součástky získané optimalizačním programem. Součástky byly napájeny na desku plošných spojů, která pochází od vedoucího práce. Prototyp byl následně změřen. Měření je popsáno v kapitole 7.2 a bylo provedeno 4krát. Je to z důvodu toho, že výsledek neodpovídal očekávání, a proto bylo nutné provést menší změny hodnot součástek. Výsledek měření se nakonec podařilo získat poměrně dobrý, a dokonce má i o něco lepší průběh než komerční senzory. Detaily výsledku jsou popsány v kapitole 7.3.

Cíle zadání se tak podařilo všechny splnit. V případném pokračování práce by bylo vhodné do optimalizace zahrnout parazitní jevy OZ, hlavně amplitudovou charakteristiku v otevřené vazbě, proudové omezení výstupu, zpoždění průchodu signálu atp. To by bylo možné udělat přepracováním rovnic přenosu, které by pak byly značně složité. Jinou možností je využít externí obvodový simulátor pro výpočet přenosu s danými hodnotami součástek. V tomto případě by bylo nutné vyřešit předávání dat do tohoto simulátoru.

## Použitá literatura

- [1] SHI, Yafei, Zhen XIN, Poh Chiang LOH a Frede BLAABJERG. A Review of Traditional Helical to Recent Miniaturized Printed Circuit Board Rogowski Coils for Power-Electronic Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics* [online]. 2020, **35**(11), 12207–12222. ISSN 0885-8993, 1941-0107. Dostupné z: doi:10.1109/TPEL.2020.2984055
- [2] *TF-SENSORS\_CATALOGUE* [online]. B.m.: SOCOMEC. nedatováno. Dostupné z: [https://www.socomec.us/sites/default/files/2022-01/TF-SENSORS\\_CATALOGUE---PAGES\\_2021-03\\_DCG-UL\\_CSA-ED3\\_EN-US.pdf](https://www.socomec.us/sites/default/files/2022-01/TF-SENSORS_CATALOGUE---PAGES_2021-03_DCG-UL_CSA-ED3_EN-US.pdf)
- [3] *ROGOWSKI COIL Standard Accuracy* [online]. B.m.: Automation Components, Inc. nedatováno. Dostupné z: <https://www.cochranesupply.com/media/assets/product/documents/ACI/RCT16-1000.pdf>
- [4] *Nemo SX – Multifunction Measuring module with closed Rogowski coils* [online]. Italy: IME. 2017. Dostupné z: [https://www.imeitaly.com/wp-content/uploads/technical-sheets/IDP000164EN\\_04.pdf](https://www.imeitaly.com/wp-content/uploads/technical-sheets/IDP000164EN_04.pdf)
- [5] *ART series*. B.m.: LEM. 2022.
- [6] *FASK – Flexibilní proudové senzory (Rogowského cívky) a přístroje ROI-3 a QE-485 pro integraci jejich výstupních signálů* [online]. Brno: GHV Trading, spol. s r.o. nedatováno. Dostupné z: [https://www.ghvtrading.cz/data/katalog/dokumenty/4134-mbs-katalogovy-list-proudovych-senzoru-fask\\_main.pdf](https://www.ghvtrading.cz/data/katalog/dokumenty/4134-mbs-katalogovy-list-proudovych-senzoru-fask_main.pdf)
- [7] MING, Lei, Zhen XIN, Changqing YIN, Manxin CHEN a Poh Chiang LOH. Integrator Design of the Rogowski Current Sensor for Detecting Fast Switch Current of SiC Devices. In: *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE): 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* [online]. 2019, s. 4551–4557. ISSN 2329-3748. Dostupné z: doi:10.1109/ECCE.2019.8911874
- [8] PUNČOCHÁŘ, Josef. *Operační zesilovače v elektronice*. 4. dopl. vyd. Praha: BEN - technická Literatura, 1999. ISBN 80-86056-37-6.
- [9] *Základní elektrotechnická zapojení v praxi* [online]. [vid. 2023-12-14]. Dostupné z: <https://www.souepl.cz/wp-content/ucitele/vit/projekt/zakl%20el%20zap%20v%20praxi.html>
- [10] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice*. 1. vyd. V Brně: VUTIUM, 2011. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [11] *Design of an integrator for the Rogowski coil* [online]. Plan-les-Ouates: LEM SA. nedatováno. Dostupné z: <https://www.lem.com/en/file/1871/download>
- [12] TAN, Qinghua, Wenbin ZHANG, Xiangyu TAN, Le YANG, Yanan REN a Yang HU. Design of Open-Ended Structure Wideband PCB Rogowski Coil Based on New Winding Method. *Electronics* [online]. 2022, **11**(3), 381. ISSN 2079-9292. Dostupné z: doi:10.3390/electronics11030381
- [13] PAOPHAN, Busayapol, Anantawat KUNAKORN, Peerawut YUTTHAGOWITH a Kazuo YAMAMOTO. Frequency Response Characteristics of Rogowski Coil with Active Integrator for Lightning Measurement. *ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications* [online]. 2020, **18**(1), 45–53. ISSN 1685-9545. Dostupné z: doi:10.37936/ecti-eec.2020181.218885
- [14] VOTZI, Helmut L, Markus VOGELBERGER a Hans ERTL. Low-Cost Current Sensor for Power Capacitors Based on a PCB Rogowski-Coil. In: *PCIM Europe*. 2011, s. 6. ISBN 978-3-8007-3344-6.



- [15] EYDAN, Anna, Babak SHIRANI, Yahya SADEGHI, Mohammad ALI ASGARIAN a Ehsanollah NOORI. Design and fabrication of an optimized Rogowski coil for plasma current sensing and the operation confidence of Alvand tokamak. *Nuclear Engineering and Technology* [online]. 2020, **52**(11), 2535–2542. ISSN 1738-5733. Dostupné z: doi:10.1016/j.net.2020.04.011
- [16] IYER, SRINIVASAN a MIROSLAV OLJACA. *High Accuracy AC Current Measurement Reference Design Using PCB Rogowski Coil Sensor* [online]. 2016. Dostupné z: [https://www.ti.com/lit/ug/tidubv4a/tidubv4a.pdf?ts=1620305018542&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ug/tidubv4a/tidubv4a.pdf?ts=1620305018542&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)
- [17] SCHULZ, Carl A., StÉphane DUCHESNE, Daniel ROGER a Jean-NoËl VINCENT. Short Circuit Current Measurements Between Transformer Sheets. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2010, **46**(2), 536–539. ISSN 0018-9464. Dostupné z: doi:10.1109/TMAG.2009.2032820
- [18] MAGNUSSON, Per. *AC Current Sensor | Axotron Blog* [online]. 5. prosinec 2015 [vid. 2024-02-02]. Dostupné z: <https://axotron.se/blog/ac-current-sensor/>
- [19] YUTTHAGOWITH, Peerawut. Rogowski coil with a non-inverting integrator used for impulse current measurement in high-voltage tests. *Electric Power Systems Research* [online]. 2016, **139**, Progress on Lightning Research and Protection Technologies, 101–108. ISSN 0378-7796. Dostupné z: doi:10.1016/j.epsr.2015.11.030
- [20] JIAO, Chaoqun, Juan ZHANG, Zhibin ZHAO, Zuoming ZHANG a Yuanliang FAN. Research on Small Square PCB Rogowski Coil Measuring Transient Current in the Power Electronics Devices. *Sensors* [online]. 2019, **19**(19), 4176. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s19194176
- [21] IEC 61869-6. *Instrument transformers - Part 6: Additional general requirements for low-power instrument transformers*. International Standard. B.m.: International Electrotechnical Committee. 27. duben 2016
- [22] ČSN EN 61869-1. *Přístrojové transformátory - Část 1: Všeobecné požadavky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010

# Přílohy

## Seznam příloh

### 1. Simulace Tina-TI

Jedná se o složku obsahující nakreslené schéma prototypu v programu Tina-TI.

### 2. Optimalizační program

V této složce se nachází optimalizační program upravený pro topologii č. 3 ale také skripty pro jiné topologie.

### 3. Měření

Obsahuje skripty, ve kterých je uloženo měření prototypu.