

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2023

Bc. František Rusnák



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

PROGRAMOVATELNÁ ODPOROVÁ ZÁTĚŽ

PROGRAMMABLE RESISTANCE DECADE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. František

Rusnák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Kunz, Ph.D.

BRNO 2023

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. František Rusnák

ID: 203595

Ročník: 2

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Programovatelná odporová zátěž

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je vytvořit programovatelnou odporovou zátěž pro testování energy harvesterů. Hodnota zátěže bude nastavitelná z PC pomocí SCPI příkazů v rozsahu alespoň od 100 Ω do 10 M Ω . Zadáání lze shrnout do následujících bodů:

1. Proveďte rešerši dostupných komerčních odporových dekád, shrňte jejich vlastnosti a sepište požadavky, co má vaše řešení umět.
2. Navrhněte různá řešení realizace vlastní programovatelné odporové dekády a diskutejte jejich výhody a nevýhody.
3. Vyberte vhodné součástky, navrhněte schéma a DPS. Použijte procesor z rodiny STM32.
4. Vámi vytvořenou dekádu oživte a otestujte funkčnost komunikace.
5. Proměřte parametry vámi realizované dekády.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

KESLER, Walt. Practical design techniques for sensor signal conditioning. Norwood, Mass: Analog Devices, 1999, s. 4.7 - 4.9. ISBN 0916550206.

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 17.5.2023

Vedoucí práce: Ing. Jan Kunz, Ph.D.

doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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

Předmětem práce je návrh programovatelné odporové dekády řízené mikroprocesorem z rodiny STM32. Návrh odporové dekády je zaměřen na budoucí využití při testování energy harvesterů. Teoretická část se zabývá průzkumem trhu, kde jsou uvedeny některé příklady běžně dostupných odporových dekád. Dále je vytvořen hrubý návrh odporové dekády, který může být založen na několika principech. Standardní princip realizace odporové dekády je použití odporové řady spínané relátkou. Práce se věnuje i řešením, která jsou založena nahrazení komplexních odporových dekád elektronickými aktivními prvky. Pro výsledné zapojení byl vybrán aktivní princip realizace odporové dekády, který byl odsimulován a realizován jako zapojení na desce plošných spojů. V závěrečné části této práce bylo zapojení změřeno pro celý rozsah nastavitelných hodnot výstupního odporu. Hotová dekáda generuje odpor v rozsahu od 100 Ohmů až po 10 mega-Ohmů. Díky komunikaci pomocí příkazů SCPI je zařízení vhodné pro aplikaci v automatizovaném měření.

KLÍČOVÁ SLOVA

Programovatelná odporová zátěž, Odporová dekáda, STM32, Elektronické řízení odporové dekády, Energy harvester

ABSTRACT

Goal of this work is design of programmable resistance decade controlled by microprocessor from the family STM32. The resistance decade will be used for testing energy harvesters. The theoretical parts deals with market research of commonly available resistor decades. The first designs of resistance decade were created. The principles of working can be multiple. The standard principle of working resistance decade is based on resistor rows switched by relays. The work also deals with solutions where is complex resistor rows replaced by electronics active components. In the practical part of this thesis, active design was designed builded and measured for all its range. Resistor decade can generate resistance from 100 Ohms to 10 mega-Ohms. Protocol SCPI allows to use this device in automated measurement.

KEYWORDS

Programmable resistive load, Resistive decade, STM32, Electronic control of resistive decade, Energy harvester

RUSNÁK, František. *Programovatelná odporová zátěž*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2023, 69 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Jan Kunz, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Bc. František Rusnák
VUT ID autora: 203595
Typ práce: Diplomová práce
Akademický rok: 2022/23
Téma závěrečné práce: Programovatelná odporová zátěž

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

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

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Janu Kunzovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	13
1 Energy Harvestery	14
2 Průzkum trhu stávajících řešení odporových dekád	15
2.1 Manuální odporové dekády s pasivními rezistory	15
2.2 Elektronické odporové dekády s pasivními rezistory	18
2.3 Elektronické zátěže s aktivními prvky	20
2.4 Kapesní odporové dekády	21
3 Návrh pasivní odporové dekády	24
3.1 Návrh pasivní sériové odporové dekády	24
3.2 Návrh pasivní odporové dekády pomocí strojového učení	26
3.3 Limitace pasivního principu	29
4 Teoretické zpracování návrhu aktivní odporové dekády	32
4.1 Návrhy principiálních schémat	32
4.1.1 Zpětnovazební zesilovač	32
4.1.2 Řízení podle Ohmova zákona	34
4.2 Návrh vedlejších obvodů aktivních dekád	36
4.2.1 Obvod pro maximální napěťový rozkmit	36
4.2.2 Obvody nastavení zesílení	38
4.3 Limitace Aktivního principu	39
5 Simulace a ověření zapojení	41
5.1 Ověření zapojení pomocí simulace	41
5.2 Praktické ověření	44
5.2.1 Průzkum trhu zkušebních komponentů	44
5.2.2 Měření Principiálních schémat na nepájivém poli	45
6 Návrh aktivní odporové dekády	51
6.1 Návrh Zapojení aktivní odporové dekády	51
6.1.1 Reálné schéma zapojení se zpětnovazebním zesilovačem	51
6.1.2 Reálné schéma zapojení řízení podle Ohmova zákona	51
6.2 Měření parametrů funkčního zapojení	52
7 Realizace návrhu	56
7.1 Návrh desky plošného spoje	56
7.2 Měření vlastností konečného zařízení	56

Závěr	62
Literatura	63
Seznam symbolů a zkratk	64
A Fotodokumentace	65
B Obsah elektronické přílohy	69

Seznam obrázků

2.1	Odporová dekáda GENRAD 1433 [2]	16
2.2	Principiální schéma kódování v dekadické soustavě	16
2.3	Principiální schéma binárního kódování	16
2.4	Odporová dekáda Global Specialities - RDB-10 [8]	17
2.5	Odporová dekáda na plošném spoji [3]	18
2.6	Laboratorní přístroj Meatest M632 [7]	19
2.7	Přístroj Agilent 6060B [4]	21
2.8	Přístroj IET Labs OS-260 [5]	22
3.1	Principiální schéma elektronicky řízené dekády s kódováním v desítkové soustavě	24
3.2	Principiální schéma optimalizované elektronicky řízené dekády	25
3.3	Graf výstupního odporu optimalizovaného paralelního spojení	26
3.4	Maticе seřazené řady odporů	27
3.5	Typy bloků B v Matici	28
3.6	Výsledné schéma zapojení podle dat vygenerovaných skriptem	30
3.7	Graf průběhu odporu odporové matice	31
4.1	Řízení proudu rezistorem pomocí regulovatelného zdroje U_D	33
4.2	Principiální funkce zpětnovazebního řízení	33
4.3	Principiální funkce řízení podle Ohmova zákona	35
4.4	Principiální zapojení nahrazení středového vodiče	37
4.5	Principiální zapojení nahrazení středového vodiče	37
4.6	Odporový dělič a potenciometr	38
4.7	Parazitní vlastnosti vstupní svorky	40
5.1	Simulační model základního principu Zpětnovazebního zesilovače	41
5.2	Simulační model základního principu Zpětnovazebního zesilovače	42
5.3	Simulační model pro maximální napěťový rozsah	42
5.4	Naměřený průběh napětí v simulaci	43
5.5	Simulace celkového zapojení pro jeden potenciometr	43
5.6	Simulace celkového zapojení pro dva potenciometry	44
5.7	Měření samotného trimru při nastavené hodnotě $8k\Omega$	46
5.8	Schéma zapojení měření zpětnovazebního zesilovače	46
5.9	Měření zapojení zpětnovazebního zesilovače při zesílení $A_u=-1$	47
5.10	Měření zapojení zpětnovazebního zesilovače při zesílení $A_u=0$	47
5.11	Měření zapojení zpětnovazebního zesilovače při zesílení $A_u=0,5$	48
5.12	Měření zapojení zpětnovazebního zesilovače při zesílení $A_u=0,9$	48
5.13	Měření zapojení zpětnovazebního zesilovače při zesílení $A_u=0,99$	49
5.14	Měření zapojení řízení podle Ohmova zákona	49

5.15	Měření fázového posunu v zapojení řízení podle Ohmova zákona . . .	50
6.1	Principiální schéma zpětnovazebního zesilovače pro maximální napě- ťový rozsah	51
6.2	Řízení podle Ohmovy metody s regulací kolem středu	52
6.3	Praktické zapojení řízení podle Ohmovy metody s regulací kolem středu	53
6.4	Graf přesnosti funkčního zapojení v závislosti na frekvenci	53
6.5	Graf přesnosti funkčního zapojení v závislosti na frekvenci	54
6.6	Graf přesnosti funkčního zapojení v závislosti na frekvenci	54
6.7	Graf přesnosti funkčního zapojení v závislosti na frekvenci	55
7.1	Graf přesnosti odporové dekády v závislosti na frekvenci	57
7.2	Graf přesnosti odporové dekády v závislosti na frekvenci	57
7.3	Graf přesnosti odporové dekády v závislosti na frekvenci	58
7.4	Graf přesnosti odporové dekády v závislosti na frekvenci	58
7.5	Graf přesnosti odporové dekády v závislosti na frekvenci	59
7.6	Graf přesnosti odporové dekády v závislosti na frekvenci	59
7.7	Graf maximální frekvence v závislosti na nastavené hodnotě odporu .	60
7.8	Graf přesnosti odporové dekády v závislosti na nastavené hodnotě odporu při stejnosměrném proudu	61
A.1	Měření zapojení na nepájivém poli	65
A.2	Měření zapojení na univerzální desce plošných spojů	66
A.3	Model desky plošných spojů - horní strana	66
A.4	Model desky plošných spojů - spodní strana	67
A.5	Hotová deska plošných spojů - horní strana	67
A.6	Hotová deska plošných spojů - spodní strana	68

Seznam tabulek

1.1	Definované parametry energy harvesteru	14
2.1	Porovnání pasivních odporových dekád s manuálním přepínáním . . .	19
2.2	Typická frekvenční odezva přístroje M632 [7]	20
2.3	Porovnání elektronických odporových dekád	20
2.4	Porovnání elektronických zátěží	21
2.5	Porovnání kapesních odporových dekád	23
3.1	Data definující odporovou matici	29
5.1	Tabulka naměřených hodnot pro mezní polohy potenciometrů	44
5.2	Seznam operačních zesilovačů	45
5.3	Seznam relé	45

Úvod

Odporová zátěž je nedílnou součástí laboratorního vybavení. Na trhu existuje velice široká škála přístrojů realizující rezistor o nastavitelné hodnotě. Dostupné jsou jednoduché pasivní přípravky, které jsou sice atraktivní z finančního hlediska, avšak nenabízejí výhody, jako jsou přesnost, spolehlivost a jednoduchost pro uživatelské ovládání. Jsou zde přístroje, které uspokojí i velmi vysoké požadavky na přesnost, opakovatelnost, spolehlivost a přívětivé ovládání, jak přes uživatelské rozhraní, tak pomocí komunikace pomocí protokolu SCPI.

Tato práce se zabývá návrhem a realizací programovatelné odporové dekády určené pro testování energy harvesterů. Plánované použití přístroje je zamýšleno do zapojení celé soustavy měřících přístrojů. V soustavě více měřících přístrojů je vhodné automatizovat celý proces měření, proto je podmínkou SCPI komunikace, která umožní ovládání bez obsluhy.

V kapitole 2 byl proveden průzkum trhu odporových dekád, kde je popsána široká škála existujících přístrojů. Tato práce popisuje dvě možné cesty návrhu odporové dekády. V kapitole 3 je popsána optimalizace již existujícího zapojení odporové dekády se skutečnými rezistory a návrh zapojení pomocí strojového učení. V kapitole 4 jsou popsána možná principiální zapojení odporové dekády založené na aktivním principu.

Na základě provedených teoretických návrhů jsou následně v kapitole 5 ověřeny zapojení pomocí simulací a fyzických zapojení. Na základě pořízených dat je vybrán nejlepší návrh zapojení, který je nakonec realizován na DPS.

1 Energy Harvestery

Na elektronická zařízení jsou s postupující dobou kladeny stále přísnější požadavky, jako jsou minimalizace, univerzálnost, mobilita a nízké energetické nároky. Miniaturní elektronika s vlastním zdrojem napájení je závislá převážně na bateriích, které mají limitovanou životnost. Řada elektronických zařízení jako jsou, bezdrátové senzory, přenosná elektronika, nositelné zařízení a biomedicínské zařízení se vyskytují v prostředí, které je potenciálně vhodné pro sběr okolní energie, jako jsou mechanické vibrace, tepelná energie, proudění kapalin, elektromagnetické záření které je ve formě světla, nebo radiových vln. Elektro-chemické baterie sebou přinášejí řadu nevýhod. Svoji velikostí a hmotností často dominují samotnému elektronickému obvodu a navíc jejich omezená životnost vyžaduje výměny, které mohou představovat zdroj problémů například u bio-medicínských zařízení [1].

Komponenty, které by mohly být pro realizované zařízení potenciálně použity jsou natolik malé, že by konečný přístroj mohl být znatelně menší, v porovnání s běžnými stolními laboratorními přístroji. Této myšlence napomáhá navíc fakt, že je požadována relativně malá přesnost přístroje. Je tedy velká šance, že přístroj bude kapesních, nebo alespoň kompaktních rozměrů a bude velice jednoduché s ním manipulovat a přenášet jej.

Pro testování energy harvesterů byly definovány parametry vypsané v tabulce 1.1 pro odporovou dekádu, která bude sloužit jako zátěž při měření energy harvesterů.

Tab. 1.1: Definované parametry energy harvesteru

Maximální napěťový rozkmit	$\pm 35\text{V}$
Nominální frekvence	300Hz
Maximální frekvence	1kHz
Vnitřní odpor harvesteru	10k – 300k Ω
Maximální výkon harvesteru	3mW

2 Průzkum trhu stávajících řešení odporových dekád

Pro získání detailnějšího přehledu dostupných možností, byl proveden průzkum trhu zaměřený na široké spektrum odporových dekád. Pro přehlednost byly dekády rozděleny do tří základních kategorií, které jsou popsány v kapitole 2.1 až 2.3. Speciální kategorií jsou malé přenosné přístroje popsané v kapitole 2.4.

Významnou roli na trhu představují přesné laboratorní přístroje, které ovšem nemusí být vhodným řešením kvůli své nákladnosti. Velice levné řešení představují jednoduché odporové řady osazené na plošném spoji, kde je přepínání jednotlivých odporů realizováno pomocí jumperů. Takové odporové dekády mohou být použity pro projekty, kde přesnost a stabilita nejsou stěžejními požadavky.

Na trhu lze nalézt mnoho produktů od různých výrobců. Při průzkumu trhu pro porovnání odporových dekád byla věnována pozornost několika výrobcům jako například Agilent, Meatest, IET a několika dalším.

2.1 Manuální odporové dekády s pasivními rezistory

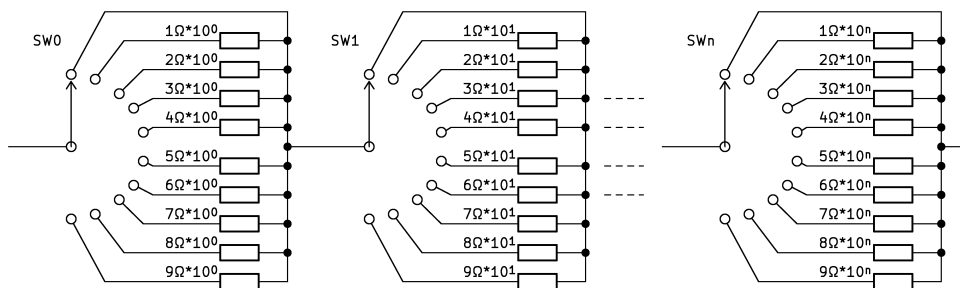
Manuální odporové dekády jsou založené na principu přepínání rezistorů pomocí manuálních přepínačů, které jsou ovládány přímo uživatelem. Co se týče uživatelského komfortu, jsou tyto dekády vybaveny různými formami číselníků v desítkové či binární soustavě, jejichž hodnota je přímo dána polohou přepínačů.

Pro kódování v desítkové soustavě jsou používány přepínače, které realizují funkci výběru jedné z deseti a dochází tak k sepnutí vždy jednoho odporu. Sériovým spojením několika takovýchto přepínacích modulů, lze docílit uživatelsky přehledné nastavení odporu. Principiální schéma je zobrazeno na obrázku 2.2. Výhodou zapojení je, že proud prochází vždy přes konstantní počet spínačů, a to je takový, jaký je počet dekád. Lze tedy počítat s relativně nízkým celkovým přechodovým odporem spínačů, kde je velikou výhodou to, že tento odpor bude konstantní. Uživatelsky přívětivým faktorem je přehledný číselník. Tato konfigurace je mimo jiné používána pro velice přesné dekády, které jsou dedikovány i pro kalibrační účely. Dokumentace velice přesných přístrojů udávají vysokou stabilitu okolo 10 ppm/yr a 10 ppm/°C. Pro příklad dekadicky kódované dekády je na obrázku 2.1 vyobrazen přístroj GENRAD 1433 vyrobený firmou IET Labs, Inc.

Další často používanou metodou kódování žádaného odporu je pomocí dvupolohových přepínačů, kterými jsou voleny jednotlivé odpory v sériovém zapojení. Obvodové zapojení je realizováno jako sériové spojení všech odporů, přičemž ke každému odporu je paralelně přiřazen jeden spínač, který tento odpor zkratuje. Princip

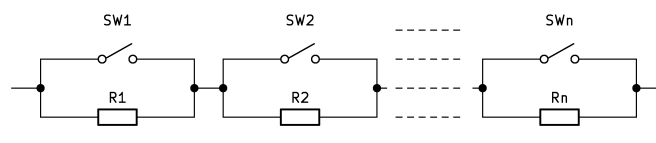


Obr. 2.1: Odporová dekáda GENRAD 1433 [2]



Obr. 2.2: Principiální schéma kódování v dekadické soustavě

takového zapojení je znázorněn na obrázku 2.3 a pro příklad je na obrázku 2.4 zobrazen přístroj RDB-10 vyrobený firmou Global Specialities. Nevýhoda této metody však spočívá v průchodu proudu přes řadu spínačů, které zapojení ovlivňují vlastním přechodovým odporem, což se nejvíce projeví při nízkých hodnotách odporu. Nevýhodou je, že počet spínačů přes které teče proud, není pro různé navolení výsledného odporu konstantní.



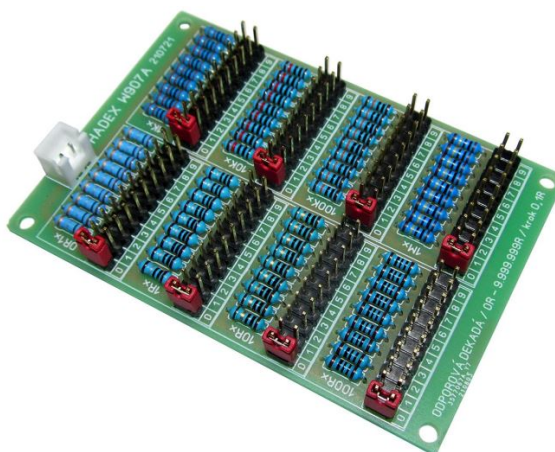
Obr. 2.3: Principiální schéma binárního kódování



Obr. 2.4: Odporová dekáda Global Specialities - RDB-10 [8]

Neméně významnou skupinou odporových dekád na trhu jsou přípravky v podobě jednoduchých plošných spojů. Obvykle se pro volbu žádaného odporu používají párové piny, které jsou propojovány svorkami. Kvůli uživatelsky náročnému programování hodnoty žádaného odporu, mohou být tyto odporové dekády výhodné spíše pro aplikace, kde se nepředpokládá nutnost časté změny nastavení. Velikou nevýhodou jsou obnažené piny, které mohou představovat bezpečnostní riziko pro aplikace, které mohou způsobit úraz elektrickým proudem. V neposlední řadě navíc hrozí degradace obnažených pinů, které nemusí být určeny pro dostatečné množství cyklů a v nehostinných podmínkách jim hrozí koroze a oxidace. Na druhou stranu se jedná o ekonomicky nejméně náročné řešení, jehož cena může být až o tři řády nižší v porovnání s přesnými laboratorními přístroji. Další významné benefity mohou být rozměry a váha, díky nimž se odporová dekáda ve formě plošného spoje může dobře uplatnit pro návrh a vývoj drobné elektroniky, kde nejsou kladeny vysoké nároky na přesnost a stabilitu. Příklad běžně dostupné odporové dekády je zobrazen na obrázku 2.5.

Díky jednoduchosti zapojení se přesnost manuálních odporových dekád odvíjí pouze od přesnosti samotných rezistorů a přechodového odporu přepínačů. Manuální dekády se obvykle vyznačují velice širokým rozsahem a dostatečnou přesností, díky které jsou některé odporové dekády nabízeny na trhu jako kalibrační zařízení. Výhodou může být i poměrně vysoké napětí, které je možné přivést na svorky de-



Obr. 2.5: Odporová dekáda na plošném spoji [3]

kády. Maximální napětí se může pohybovat až kolem 500V. Výkonová zatížitelnost se pohybuje do jednoho Wattu. V tabulce 2.1 jsou porovnány příklady odporových dekád na trhu. Kvůli nepřehlednému množství přístrojů na trhu byly data vybírány namátkově. Z dat tabulky vyplývá, že manuální odporové dekády pokrývají velice široký rozsah jak v cenové kategorii, tak v přesnosti. Odporové dekády založené na pasivních komponentech jsou tedy široce uplatnitelné a nabízí optimální řešení pro široké spektrum projektů. Zadání této práce ovšem vyžaduje komunikaci pomocí *Standard Commands for Programmable Instruments* (SCPI) protokolu pro plnou automatizaci bez zásahu uživatele během měření. Proto se použití pasivních odporových dekád s manuálním nastavením zcela vylučuje i navzdory jejich kladným vlastnostem a širokému výběru.

2.2 Elektronické odporové dekády s pasivními rezistory

Jádrem přesných elektronických dekád jsou přesné řady odporů s nízkou teplotní závislostí spínané pomocí relé, která jsou elektronicky řízena. Dekády kombinují dobré vlastnosti manuálních odporových dekád a možnosti elektronického řízení, které nabízí vysokou funkcionalitu a přehledné uživatelské rozhraní. Tyto dekády jsou určeny pro nízké výkony do několika jednotek Wattů, a však při průzkumu byla nalezena dekáda s reálnými odpory, která je schopna obstát výkon 3000 W. Pro příklad elektronicky řízených dekád je na obrázku 2.6 vyobrazena odporová dekáda M632 od firmy Meatest. I když je jádro přístroje založeno čistě na pasivních komponentech, je nutné uvažovat všudypřítomnou parazitní kapacitu, která se projevuje snížením přesnosti přístroje v závislosti na kombinaci frekvence vstupního signálu a nastaveného odporu. Strmého poklesu přesnosti si lze všimnout v tabulce 2.2, která

Tab. 2.2: Typická frekvenční odezva přístroje M632 [7]

R	100Hz	1kHz	10kHz
1Ω	0,01 %	0,02 %	0,20 %
10Ω	0,01 %	0,01 %	0,04 %
100Ω	0,01 %	0,05 %	0,50 %
1kΩ	0,05 %	0,50 %	5,00 %
10kΩ	0,50 %	5,00 %	
100kΩ	5,00 %		

Tab. 2.3: Porovnání elektronických odporových dekád

Název	Rozsah [Ω]	Přesnost [%]	Stálost [±ppm]	W_{MAX} [W]
Meatest M632	1-1,2M	0,01	20	0,25
Meatest M642	0,1-22M	0,05-0,2	200	5
Meatest M194	10k-100G	0,1-1	1000	-
Transmille 2090	0,1-100k	0,1	-	1
Sonel SRP-10G0-10T0	10G-10T	1	-	-
Sonel SRP-50k0-10G0	50k-10G	0,1	-	-
Meatest M192A	15-4,7k	0,1	1000	3000

2.3 Elektronické zátěže s aktivními prvky

Pro vyšší výkony je výhodnější použití zapojení založeném na elektronickém principu, kdy jsou pasivní rezistory v odporové dekádě nahrazeny polovodičovými prvky, jako je například tranzistor. Na rozdíl od neměnných hodnot odporů, lze tranzistor řídit plynule, a tak lze pouze jedním výkonovým prvkem nahradit celou řadu odporů, které je nutné přepínat pro změnu požadovaného odporu. Při použití menšího počtu výkonových komponentů, se sníží objemnost celkového zapojení.

Každý komponent, který musí obstát vyšší výkony je nutné správně a robustně dimenzovat. S vyššími ztrátovými výkony se zvyšuje objemnost jak komponentu samotného, tak i okolních dodatečných komponentů, jako jsou chladiče, ventilátory a dostatečné mezery kvůli odvodu tepla. U dekád s přepínatelnými odpory by bylo nutné dimenzovat každý jednotlivý odpor na vyšší výkon, protože přes každý odpor může trvale téct proud.

Většinou se lze na trhu setkat s přístroji pro stejnosměrný proud. Vynikají ovšem svojí funkcionalitou a řadou režimů. Zátěže mohou pracovat v režimu konstantního

proudu, napětí, odporu, nebo výkonu. Přesnost elektronických zátěží se pohybuje okolo 0,1%. Elektronický princip ovšem přináší řadu nevýhod. Čistě pasivní od-



Obr. 2.7: Přístroj Agilent 6060B [4]

porová řada a spínače jsou nahrazeny polovodičovými prvky, a to způsobuje, že se nežádoucí vlastnosti polovodičů projevují na celkové vlastnosti přístroje. Za nežádoucí vlastnosti mohou být považovány nízká přesnost přístroje, relativně nízké maximální napětí a šum, který je v různých intenzitách častou parazitní vlastností polovodičů. Vzhledem k relativně nízké přesnosti a vysoké výkonové zatížitelnosti, lze tyto přístroje označovat spíše jako balastní zátěže. Na trhu se vyskytují přístroje schopny pracovat s výkony až do stovek Wattů, jako je to například u přístroje Agilent 6060B [6], který je zobrazen na obrázku 2.7. Pro přehled jsou v tabulce 2.4

Tab. 2.4: Porovnání elektronických zátěží

Název	U_{MAX} [V]	I_{NOM} [I]	W_{MAX} [W]	Cena [Kč]
B&K Precision 8540	60	30	150	15935
Agilent 6060B	60	60	300	31460
Keysight EL34143A	150	60	350	62626
GW Instek PEL-3031E	150	60	300	69299
Keysight N3303A	240	10	250	83154
B&K Precision 8526	500	120	5000	329565
EA Elektro Automatik EL 9080	80	170	1500	456299

2.4 Kapesní odporové dekády

Malé odporové dekády v kapesním provedení představují kompromis mezi přesnějšími laboratorními přístroji a zařízením o velikosti multimetru, které vyniká v možnostech snadné manipulace a jednoduchosti ovládání. Díky displeji a klávesnici je pro uživatele velice jednoduché nastavení požadované hodnoty a přehlednost

při práci s přístrojem. Navzdory malým rozměrům se na trhu vyskytují i relativně přesné dekády. Vybírat lze z širší cenové nabídky.

Od přístroje menších rozměrů nelze očekávat vysokou přesnost a širokou funkcionalitu, kterou vynikají laboratorní zařízení. Benefitem ovšem může být nižší nákladnost a kompaktní rozměry zařízení.

Pro příklad odporové dekády v kapesním provedení je na obrázku 2.8 vyobrazen přístroj OS-260. Přesnost přístroje je uváděna až 0.1% a rozsah napětového rozkmitu je až 200V.



Obr. 2.8: Přístroj IET Labs OS-260 [5]

Pro svoje kladné vlastnosti a dostačující parametry, mohou být odporové dekády v kapesním provedení vhodné jako zátěž při měření energy harvesterů.

Přístroje v této kategorii se jeví jako nejvhodnější vzhledem k zadání této práce.

Některé přístroje jsou vybaveny USB konektorem pro připojení k počítači. Komunikace s dekádami firmy Mikromarx je možná pomocí sériového portu a výrobce v dokumentacích uvádí i možnost implementace dekády v LabView.

Tab. 2.5: Porovnání kapesních odporových dekád

Název	Rozsah [Ω]	Přesnost [%]	W_{MAX} [W]	Cena [Kč]
Mikromarz BASIC FULL ST	10-100M	1	0,4-2	3371
Mikromarz PROFI FULL XW	10-2M	0,3	1,5-3	6297
IET Labs OS-260	1-24M	0,1-0,5	1	29817
IET Labs OS-270	1-1,5M	0,01-0,1	1	34646

3 Návrh pasivní odporové dekády

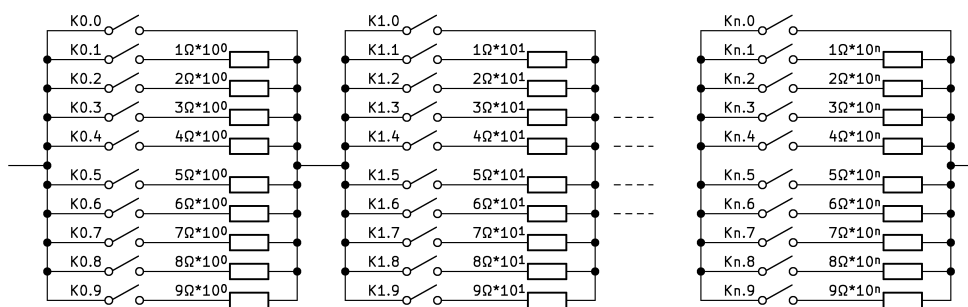
Pasivní princip obsahuje odpory na jejichž parametrech závisí celková přesnost odporové dekády. Lze říci, že ze základního principu fungování takových odporových dekád mají parametry rezistorů přímý a snadno intuitivně zjistitelný vliv na přesnost.

Běžné zapojení odporové dekády je realizováno pomocí přepínání jednotlivých rezistorů o různých hodnotách. Hlavními komponenty jsou zde přesné rezistory a relátka zajišťující funkci přepínačů. Základní myšlenka je velice jednoduchá.

Odporové dekády na principu přepínání rezistorů poskytují nespojitý výběr odporu. Uživatel je omezen na výběr odporu jen z určitým krokem. Při použití přesných a kvalitních součástek však lze očekávat vysokou opakovatelnost. Pokud krok u odporové dekády nepředstavuje problém pro aplikaci, lze pro dodatečné zpřesnění výsledků získat přesnou hodnotu nastaveného odporu a zpětně tuto hodnotu započítat.

3.1 Návrh pasivní sériové odporové dekády

V kapitole 2.1 jsou zmíněny základní zapojení manuálních odporových dekád. Princip dekadického kódování, podle principiálního schématu 2.2 má výhodu především v tom, že proud teče pouze přes takový počet spínatelných kontaktů, kolik obsahuje odporová dekáda dekád, což je žádoucí vzhledem k nezanedbatelnému přechodovému odporu spínačů v sepnutém stavu. V zapojení, které má být řízeno elektronicky je nutné manuální přepínač nahradit relátko. Běžně dostupná relátka spínají jeden kontakt, nebo přepínají mezi dvěma kontakty. Proto musí být jeden SP10T přepínač nahrazen deseti SPST relátko, jak je vyobrazeno na obrázku 3.1.

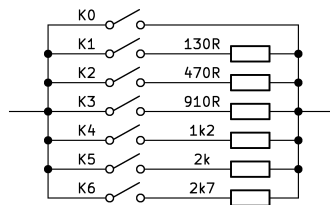


Obr. 3.1: Principiální schéma elektronicky řízené dekády s kódováním v desítkové soustavě

Navolení požadovaného odporu lze ovšem dosáhnout také pomocí paralelního spojení přepínatelných odporů a jejich libovolných kombinací sepnutí. Výsledná hodnota dvou, nebo více paralelně spojených odporů však není ani zdaleka tak intuitivní, jako je to u sériového spojení. Při řízení relátek mikropočítačem problém s čitelností nastavené hodnoty ovšem zaniká, protože veškeré výpočty související se správnou kombinací sepnutí relé a výsledným odporem je řešen pomocí programu mikropočítače.

V případě, že je každé relé řízeno samostatně, se nabízí možnost více kombinací sepnutí, než pouze jednoho relé v ten samý čas. Sepnutím více relé a tedy více rezistorů v paralelní kombinaci, je možné touto kombinací dosáhnout mnohem více nastavitelných hodnot na jeden blok dekády. Výsledkem by mohlo být snížení počtu potřebných relé pro realizaci jednoho bloku dekády a tím i parazitních vlastností, především parazitní kapacity.

V programu Matlab byl vytvořen skript, který hrubou výpočetní silou hledá ideální řešení paralelní kombinace spínaných odporů při minimálním počtu použitých relé. Cílem algoritmu je najít takovou kombinaci rezistorů, která by nahradila jeden blok sériové dekády. Algoritmus byl spuštěn pro hledání nejlepší kombinace z milionu náhodných kombinací a byla nalezena kombinace odporů pro jeden blok odporové dekády, který je zobrazen na obrázku 3.2 a seřazený průběh výstupního odporu je vykreslen na obrázku 3.3. Násobek bloku dekády je určen podle vzorce 3.1, kde

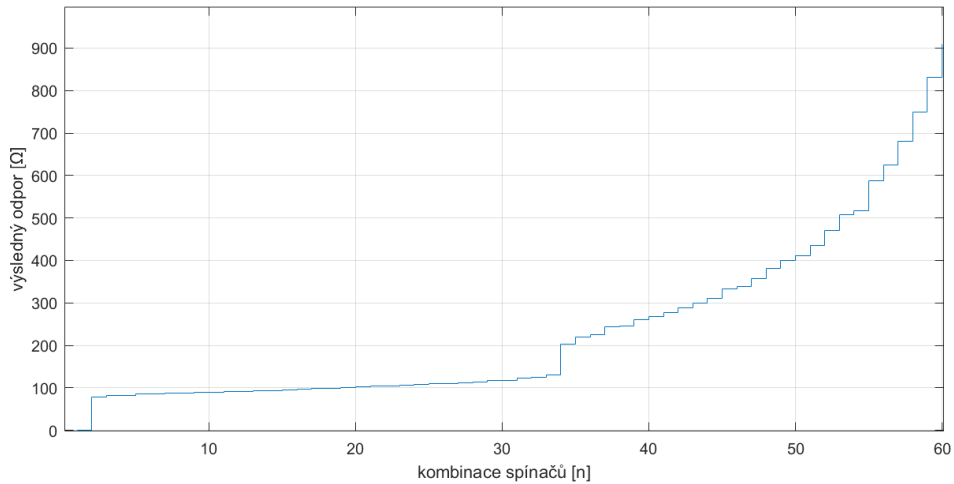


Obr. 3.2: Principiální schéma optimalizované elektronicky řízené dekády

R_D je maximální uvažovaná hodnota bloku dekády a ΔR je rozdíl dvou sousedních hodnot celkového odporu. Násobek pro navrženou kombinaci je roven $N_R = 11, 11$. To znamená, že pro realizaci celé odporové dekády, bude zapojení obsahovat sériové spojení bloků z obrázku 3.2, kde hodnoty rezistorů každého dalšího bloku budou násobky konstanty $N_R = 11, 11$. V tomto případě je ovšem výhodnější použít konstantu $N_R = 10$, protože při tomto násobení vždy vyjde hodnota odporu, která bude patřit do odporové řady E24.

$$N_R = \frac{R_D}{\text{Max}(\Delta R)} \quad (3.1)$$

Při nižším počtu odporů, než 7 nebylo nalezeno řešení, které by mělo rozlišení vhodné pro kódování v desítkové soustavě. Paralelní kombinací rezistorů byly tedy ušetřeny 3 rezistory se spínači.



Obr. 3.3: Graf výstupního odporu optimalizovaného paralelního spojení

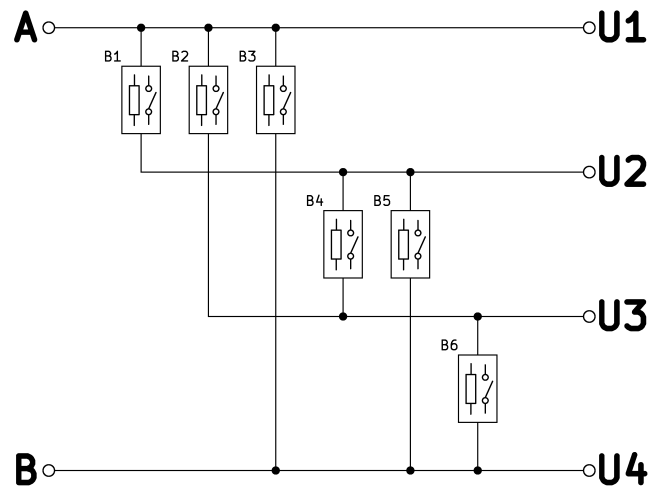
3.2 Návrh pasivní odporové dekády pomocí strojového učení

Způsob kódování odporových dekád umožňuje po jednotlivých krocích lineární průběh nastaveného odporu. Takové kódování ovšem vytváří různý relativní krok při různých hodnotách nastaveného odporu. Například pokud je u dekády s krokem jednoho ohmu nastaven odpor o velikosti jednoho ohmu, tak další krok, tedy přepnutí hodnoty odporu na dva ohmy, způsobí změnu o 200%. Naopak při nastavení odporu v řádu stovek ohmů je krok jednoho ohmu zanedbatelný. Jinými slovy lineární průběh nastaveného odporu způsobuje neefektivní využití kombinací přepínačů, kde na jedné straně je krok příliš veliký a na straně druhé dochází k plýtvání v důsledku příliš malému kroku.

Nevylučuje se, že pro některé aplikace může být lineární způsob kódování žádoucí, avšak v konkrétní aplikaci odporové dekády pro měření energy harvesterů je logaritmický průběh nastavitelných odporových hodnot optimální řešení. Kvůli proměnnému kroku logaritmické stupnice lze obsáhnout větší rozsah hodnot při provedení menšího počtu kroků, tedy kombinací.

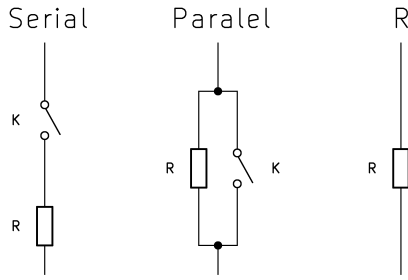
Vyvstává ovšem otázka, jaké vnitřní uspořádání odporů a relé uvnitř zapojení odporové dekády bude poskytovat co nejhustější pokrytí nastavitelných hodnot výstupního odporu pro široký rozsah přes několik dekád, a to při co nejmenší počtu použitých relé. Odpovědí na tuto otázku může být komplexní sériově-paralelní uspořádání rezistorů a relé. K nalezení takového zapojení byl navržen a použit skript v programu Matlab, který využívá metodu strojového učení.

Algoritmus pro výpočet jakéhokoli sériově-paralelního uspořádání odporových bloků, využívá seřazenou matici řady bloků B , jaká je vyobrazena na obrázku 3.4. Matice obsahuje spojení U , které představují napětové uzly. Typy bloků B jsou vyobrazeny na obrázku 3.5 a jsou použity tři typy. Bloky mohou být v sériovém a paralelním spojení spínače a rezistoru, případně samotného odporu. Bloky B vyjadřují proměnnou odporovou hodnotu, která je závislá na sepnutí spínače. Pro danou kombinaci sepnutí spínačů jsou vypočteny hodnoty odporu každého bloku B a následně je vypočten celkový odpor celé matice zapojení. Výsledný odpor je



Obr. 3.4: Matice seřazené řady odporů

uvažován mezi spojeními A a B na obrázku 3.4, což je také první a poslední uzel U . Metoda zjednodušování sériového a paralelního spojení zde není možná, proto je nutné celkový odpor matice vypočítat nepřímou, pomocí soustavy lineárních rovnic. Výpočet celkového odporu matice je řešen pomocí soustavy rovnic 3.2. Rovnice využívají prvního Kirchhoffova zákona, tedy že proud přitékající do uzlu je roven



Obr. 3.5: Typy bloků B v Matici

proudu vytékajícímu.

$$\begin{aligned}
 0 &= -\frac{U_1 - U_2}{B_1} - \frac{U_1 - U_3}{B_2} - \frac{U_1 - U_4}{B_3} \\
 0 &= \frac{U_1 - U_2}{B_1} - \frac{U_2 - U_3}{B_4} - \frac{U_2 - U_4}{B_5} \\
 0 &= \frac{U_1 - U_3}{B_2} + \frac{U_2 - U_3}{B_4} - \frac{U_3 - U_4}{B_6} \\
 0 &= \frac{U_1 - U_4}{B_3} + \frac{U_2 - U_4}{B_5} + \frac{U_3 - U_4}{B_6}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Pro výpočet celkového odporu jsou nejdříve definovány napěťové úrovně podle rovnice 3.3.

$$\begin{aligned}
 U_1 &= 1 \\
 U_4 &= 0
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Poté je řešena soustava rovnic 3.2, kde jsou získány ostatní napěťové úrovně. Poté, co jsou známy hodnoty všech napětí, lze vypočítat hodnotu proudu podle vzorce 3.4 a následně je podle vzorce 3.5 vypočten celkový odpor.

$$I = \frac{U_1 - U_2}{B_1} + \frac{U_1 - U_3}{B_2} + \frac{U_1 - U_4}{B_3} = \frac{1 - U_2}{B_1} + \frac{1 - U_3}{B_2} + \frac{1 - U_4}{B_3} \tag{3.4}$$

$$R = \frac{U_1}{I} = \frac{1}{I} \tag{3.5}$$

Matice vyobrazená na obrázku 3.4 může obsahovat libovolný počet a libovolné uspořádání bloků B . S počtem spínaných bloků B však prudce narůstají nároky na výpočetní výkon.

Pro nalezení optimálního zapojení odporové dekády byly paralelně spuštěny čtyři skripty, které byly ukončeny po pěti dnech. Řešení bylo hledáno pro 15 bloků B a 10 napěťových uzlů. Rozsah hledání byl nastaven od 100Ω do $1M\Omega$. Tabulka 3.1 obsahuje data, která kódují rozložení bloků nalezeného řešení. První dva sloupce definují propojení bloku B s napěťovými uzly. Třetí sloupec definuje typ bloku B .

Čtvrtý sloupec obsahuje indexy, které propojují jednotlivé bloky s generátorem kombinací sepnutí relé. Tyto indexy jsou ovšem bezvýznamné pro zapojení s typem relé *Kontakt typu single pole single throw* (SPST). Poslední sloupec obsahuje hodnoty odporů použitých v jednotlivých blocích B .

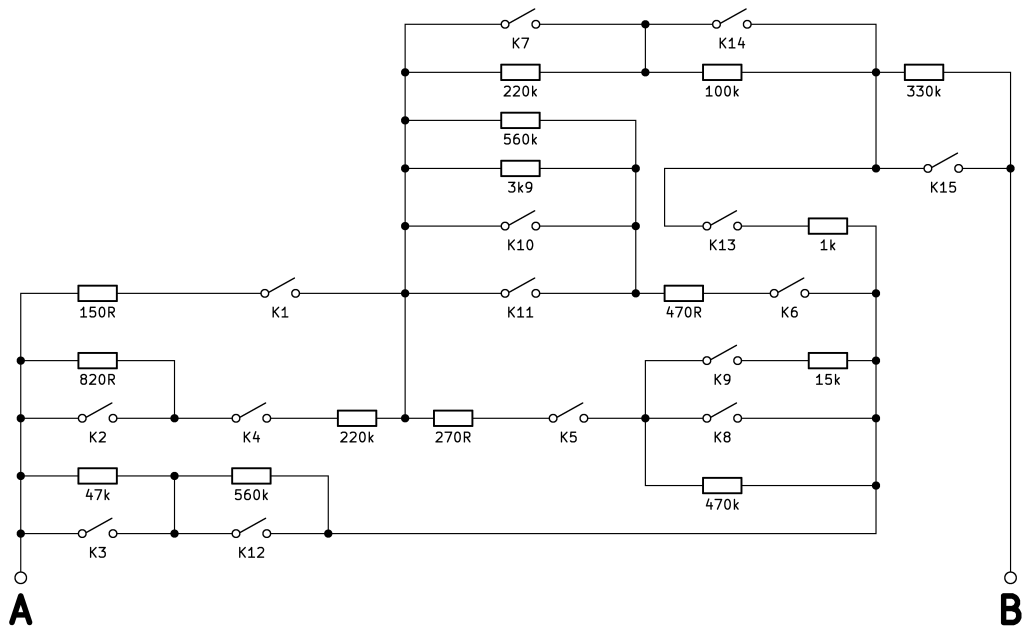
Tab. 3.1: Data definující odporovou matici

U_{i1}	U_{i2}	Zapojení	index	Odpor [Ω]
1	2	sériové	-	150
1	3	paralelní	-	820
1	6	paralelní	-	47 k
2	3	sériové	-	220 k
2	4	sériové	-	270
2	5	sériové	-	470
2	8	paralelní	-	22k
4	7	paralelní	-	470k
4	7	sériové	-	15k
5	7	paralelní	-	560k
5	7	paralelní	-	3k9
6	7	paralelní	-	560k
7	9	sériové	-	1k
8	9	paralelní	-	100k
9	10	paralelní	-	330k

Data z tabulky 3.1 byla překreslena do schématu zobrazeném na obrázku 3.7. V grafu na obrázku 3.7 je vykreslen průběh výsledného odporu nalezeného zapojení odporové dekády. Za použití patnácti relé a odporů byl pokryt rozsah nastavitelného odporu přes 4 dekády. V porovnání s manuální odporovou dekádou s binárním kódováním, by bylo použito 16 relé a odporů. Hlavním benefitem zapojení odporové dekády nalezené pomocí strojového učení je tedy relativní krok nastavitelného odporu.

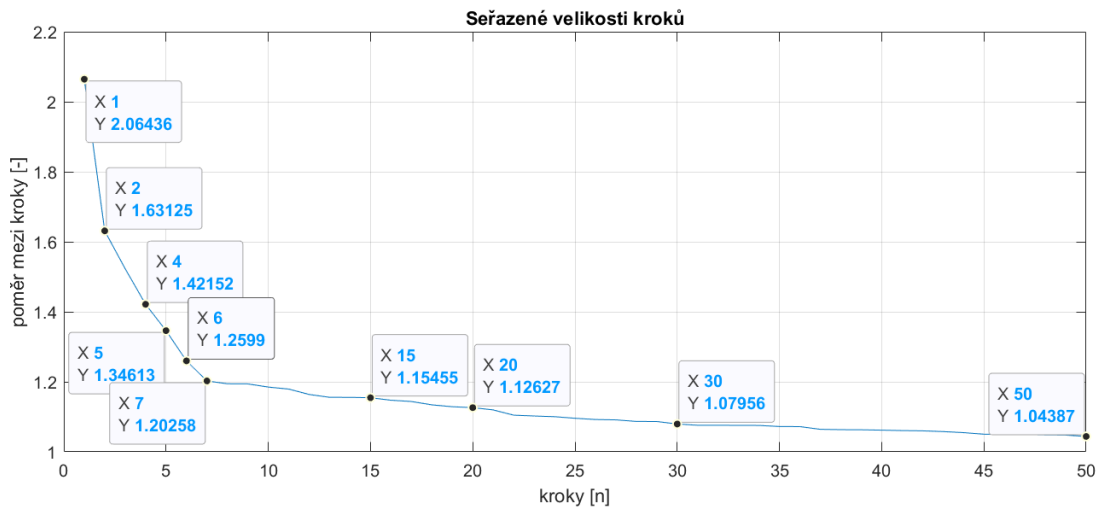
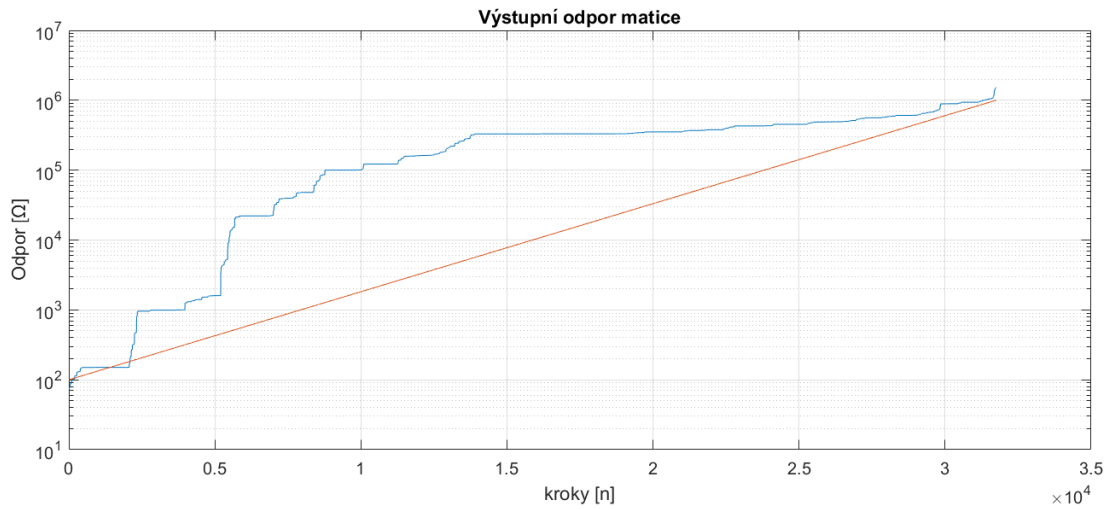
3.3 Limitace pasivního principu

Pasivní princip spoléhá především na parametry rezistoru, které se přímo promítají na celkovou výstupní impedanci. Musí být tedy použity přesné rezistory, které navíc musí být vhodně dimenzovány pro výkon.



Obr. 3.6: Výsledné schéma zapojení podle dat vygenerovaných skriptem

Odporová dekáda sestává z mnoha rezistorů a přepínačů. Řádově to mohou být až desítky komponentů, přičemž jsou vyžadovány adekvátní vlastnosti každého komponentu. U rezistorů je stěžejní jejich přesnost a teplotní nezávislost. Zejména u odporů s vysokými hodnotami je kritická jejich frekvenční závislost. Na přepínače jsou rovněž kladeny nároky na přijatelný odpor v sepnutém a rozepnutém stavu. Toto řešení je tedy náročnější z pohledu finančního hlediska i na prostor.



Obr. 3.7: Graf průběhu odporu odporové matice

4 Teoretické zpracování návrhu aktivní odporové dekády

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.3 Elektronické zátěže s aktivními prvky, na trhu existuje řada přístrojů, které využívají aktivní součástky pro realizaci zátěže resistivního charakteru. Tyto zátěže jsou určeny pouze pro větší výkony, avšak díky možnostem, které nabízejí elektronické aktivní součástky jako jsou novodobé operační zesilovače, vznikla otázka, zda existuje elektrické zapojení, které by plnilo funkci proměnného odporu a využívalo by tyto součástky. Dnešní trh nabízí jednotlivé čipy operačních zesilovačů s parazitními vlastnostmi, jako je únikový proud, nebo parazitní kapacita vstupních svorek natolik malými, že by tyto parazitní vlastnosti nemusely představovat problém. Při použití operačních zesilovačů, nebo tranzistorů namísto mechanických přepínačů, by navíc bylo ušetřeno nezanedbatelné množství místa. Benefitem navíc může být spojitě nastavení odporu, na rozdíl od pasivních dekád, kde je krok nastavení odporu pevný kvůli přepínání odporů s konstantními parametry.

4.1 Návrhy principiálních schémat

V kapitolách 4.1.1 a 4.1.2 jsou uvedeny dva principy dekád s aktivními součástkami. Principy mají hlavní společnou vlastnost, kterou se odlišují od odporových dekád s relátkou. Jak již bylo naznačeno, nastavení odporu zde není dosaženo pomocí fyzické součástky rezistoru, nýbrž pomocí akčního zásahu prováděného aktivními prvky. Jádro problému spočívá v získání znalosti o velikosti napětí, nebo proudu a následný vhodný akční zásah, kterým jsou upraveny hodnoty napětí, nebo proudu tak, aby mezi těmito veličinami platila rovnice Ohmova zákona, kde veličina odporu je konstanta definovaná uživatelem. Cílem regulace a akčního zásahu realizovaného aktivním prvkem je tedy simulovat vlastnosti odporu.

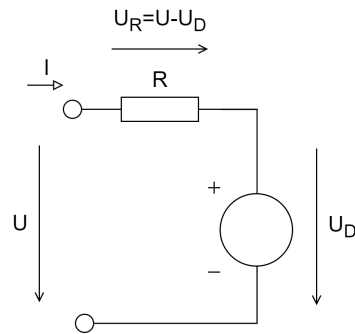
4.1.1 Zpětnovazební zesilovač

Koncepce tohoto zapojení využívá vlastnosti rezistoru, který převádí napětí na proud. Po přivedení napětí na svorky rezistoru, rezistorem začne procházet proud, který vychází z rovnice Ohmova zákona 4.1.

$$I = \frac{U}{R} \quad (4.1)$$

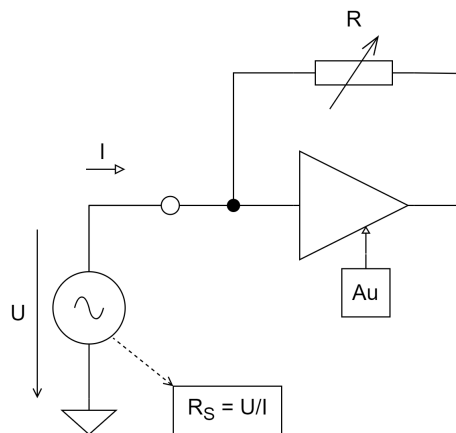
V tomto případě je uvažováno přímé zapojení rezistoru na zdroj napětí. Napětí na rezistoru je tedy stejné jako napětí zdroje. Pokud by do zapojení byl sériově zařazen

řízený zdroj U_D , který by propojil nulový potenciál a svorku rezistoru, získali bychom možnost ovlivnění proudu rezistorem jak je znázorněno na obrázku 4.1. Jako řízený



Obr. 4.1: Řízení proudu rezistorem pomocí regulovatelného zdroje U_D

zdroj napětí lze použít operační zesilovač s proměnným zesílením. Na obrázku ?? je znázorněno principiální schéma se zpětnovazebním řízením, které je možné prakticky realizovat díky jednoduchému zapojení s operačním zesilovačem. Poté by rovnice



Obr. 4.2: Principiální funkce zpětnovazebního řízení

proudu rezistorem byla ve tvaru 4.2.

$$I = \frac{(U - U_D)}{R} \quad (4.2)$$

Proud rezistorem je tedy závislý na rozdílu vstupního napětí U a řízeného napětí U_D . Když je dále zavedena vazba, podle které je napětí U_D řízeno v závislosti na vstupním napětím U podle vztahu 4.3, po dosazení do rovnice 4.2 dostáváme vztah 4.4 vyjadřující proud rezistorem, který je roven proudu odebíranému ze vstupu U .

$$U_D = AuU \quad (4.3)$$

$$I = \frac{(U - AuU)}{R} \quad (4.4)$$

Pro vstupní napětí U se odporová, i řízená zátěž jeví stejně a platí vztah 4.5.

$$R_S = \frac{U}{I} \quad (4.5)$$

Po dosazení rovnice proudu dostáváme konečný vztah 4.6 závislosti odporu na nastavitelné konstantě Au , kde se výsledná hodnota odporu R_S jeví jako odporová zátěž závislá na zesílení operačního zesilovače.

$$R_S = \frac{U}{\frac{(U - AuU)}{R}} \Rightarrow R_S = \frac{R}{1 - Au} \quad (4.6)$$

Známa hodnota je ovšem hodnota odporu, který je zadaný uživatelem. Po upravení vztahu 4.6 dostáváme konečnou rovnici 4.7, díky které je známo zesílení, které je potřeba nastavit na operačním zesilovači pro dosažení žádaného odporu.

$$Au = 1 - \frac{R}{R_S} \quad (4.7)$$

Limitace tohoto principu je krok výsledného odporu, který dramaticky vzroste, když se zesílení Au blíží k hodnotě 1. Poté se velice výrazně projevuje ofsetová chyba operačního zesilovače a nepřesnost nastavení zesílení Au . V bodě, kdy zapojení vykazuje nedostatečnou přesnost je žádané přepnutí pracovního rozsahu, které může být provedeno změnou odporu R . Hodnota zesílení Au může být také záporná. Pro záporné Au je princip limitován napájecím napětím, proto by Au nemělo být menší než -1. Kladné i záporné zesílení může být realizováno jenom tehdy, pokud je k dispozici invertovaný signál vstupního signálu kladné vstupní svorky.

4.1.2 Řízení podle Ohmova zákona

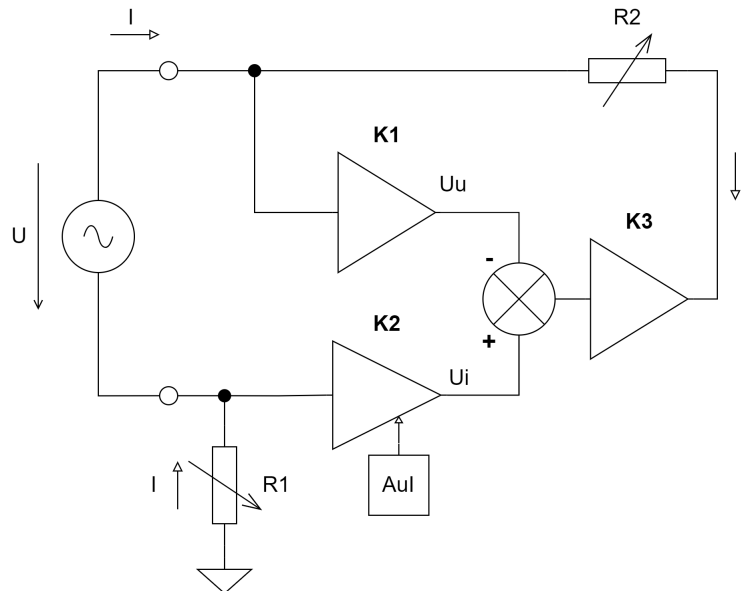
Princip řízení podle Ohmova zákona vyžaduje navíc k hodnotě měřeného napětí i hodnotu proudu. Pro měření hodnot napětí a proudu slouží zesilovače $K1$ a $K2$ v principiálním schématu zobrazeném na obrázku 4.3. Tyto zesilovače impedančně oddělují připojený zdroj napětí U od zbytku obvodového zapojení. Kvůli zvýšení přesnosti zapojení je důležité, aby do jejich vstupů tekla co nejmenší proud.

Na základě změřených hodnot napětí a proudu je možné určit odpor díky rovnici Ohmova zákona.

$$R = \frac{u}{i} \quad (4.8)$$

Výpočtem rovnice 4.8 lze získat aktuální odpor, tedy měřenou veličinu. Pokud je známa měřená veličina odporu a hodnota odporu nastavená uživatelem, lze na základě rozdílu těchto hodnot provést řízení, které reguluje rozdíl na nulovou ustálenou odchylku. Pro provedení výpočtu rovnice 4.8 je ovšem nutné realizovat operaci

podílu dvou proměnných. V případě analogového zapojení je takováto operace obtížným úkolem. Jiným řešením by mohlo být použití výpočetní síly mikropočítače, kde je ovšem zapotřebí dvojího analogově-digitálního a jednoho digitálně-analogového převodu, který by do obvodu zanesl chybu převodníků a fázové zpoždění.



Obr. 4.3: Principiální funkce řízení podle Ohmova zákona

Nejjednodušším řešením se jeví nahrazení operace dělení dvou proměnných jednoduššími operacemi, jako jsou násobení konstantou a operace sčítání a odečítání, které jsou proveditelné pomocí operačních zesilovačů. Rovnici 4.8 je nutné upravit do tvaru, který eliminuje operaci dělení. Rovnice 4.9 upravuje výraz do tvaru, který obsahuje pouze operace sčítání a násobení konstantou. Následně jsou v rovnici 4.10 substituovány proměnné, kde $R1$ je hodnota bočníku pro měření proudu a Au_I je zesílení zesilovače, kterým lze plynule nastavovat hodnotu odporu.

$$R \cdot i = u \Rightarrow 0 = u - i \cdot R \quad (4.9)$$

$$0 = u_U - u_I \Rightarrow 0 = u_U - Au_I \cdot R1 \cdot i \quad (4.10)$$

Pravá strana rovnice 4.10 obsahuje operaci rozdíl dvou napětí, která je realizovatelná operačním zesilovačem $K3$, jehož výstup je zapojen do záporné zpětné vazby, čímž je zajištěna záporná zpětná vazba pro regulaci. Při velikém zesílení zesilovače $K3$ je obvod vyregulován s malou odchylkou. Výstup operačního zesilovače $K3$ se chová jako řízený napěťový zdroj, proto je mezi něj a svorku napěťového zdroje U připojen odpor $R2$, který převádí rozdíl napětí na proud I , čímž je realizována záporná zpětná vazba.

Pomocí rovnice 4.11 je známo zesílení Au_I , které závisí na zadané hodnotě R a hodnotě proudového bočníku $R1$.

$$i \cdot Au_I \cdot R1 = i \cdot R \Rightarrow Au_I = \frac{R}{R1} \quad (4.11)$$

4.2 Návrh vedlejších obvodů aktivních dekád

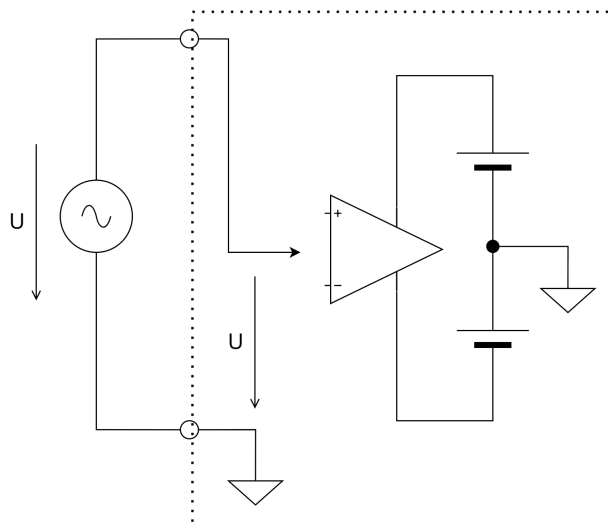
4.2.1 Obvod pro maximální napěťový rozkmit

Důležitým parametrem pro navrhovanou aktivní dekádu je napěťový rozkmit na vstupních svorkách. Pro správnou funkci operačních zesilovačů v zapojení je důležité udržovat napěťovou úroveň na vstupních svorkách operačního zesilovače mezi úrovněmi napájení. Pokud by napětí na vstupní svorce přesáhlo napájecí napětí, výstup *operační zesilovač* (OZ) by mohl přejít do saturace a v důsledku vyšších proudů do vstupních svorek, by mohlo dojít k trvalému poškození.

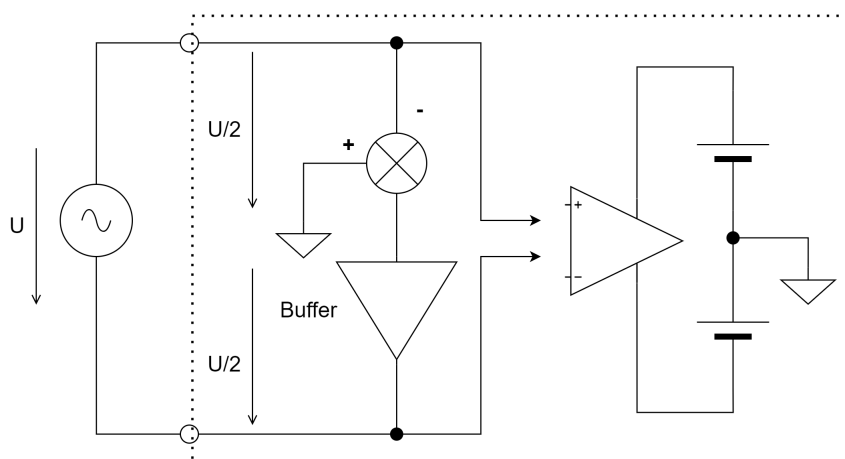
Limitace maximálním napájecím napětím představuje veliké omezení. Kvůli střídavému signálu, je nutné operační zesilovač napájet symetrickým napětím jak je vyobrazen na obrázku 4.4, čímž se napěťový rozsah vstupu zmenší na polovinu. Obecně můžeme uvažovat maximálním napájecím napětím operačního zesilovače $50V$. Při rozdělení tohoto napětí dostáváme maximální symetrické napájení $\pm 25V$, které nevyhovuje požadavkům dle zadání. Za použití nesymetrického napájecího napětí dosáhneme rozsahu $\pm 50V$, který vyhovuje požadavkům dle zadání na maximální rozkmit napětí harvesteru. Je ovšem zapotřebí rozpojit harvester od nulové svorky a tuto svorku harvesteru řídit elektronicky tak, aby se obě napětí na svorkách harvesteru pohybovala v napájecím napěťovém rozsahu elektronických obvodů odporové dekády. Toto řešení však sebou přináší zvýšení komplexnosti zapojení se kterou je spojené i snížení přesnosti.

Aby bylo možné použít zapojení v praktických podmínkách, musí být brán zřetel na výstupní parametry signálu generovaného harvesterem. Kvůli limitacím aktivních principů musely být návrhy pozmeněny tak, aby bylo možné pracovat s takovým signálem.

Problém lze vyřešit zavedením pomyslného vyvedení středního vodiče harvesteru. Takže napětí z obou svorek harvesteru se bude symetricky pohybovat kolem tohoto středu. Tohoto efektu je dosaženo pomocí řízení jedné svorky harvesteru operačním zesilovačem jak je znázorněno na obrázku 4.5. Ten zajišťuje, aby odchylka řízeného napětí od středu byla stejně velká jako odchylka sledovaného napětí od středu. Odchylka řízeného napětí má opačné znaménko, než sledovaná odchylka. Tímto způsobem je dosaženo pomyslného vyvedení středu. Napětí harvesteru se tedy pohybuje nejbližší polovině napájecího napětí vnitřních obvodů odporové dekády.



Obr. 4.4: Principiální zapojení nahrazení středového vodiče



Obr. 4.5: Principiální zapojení nahrazení středového vodiče

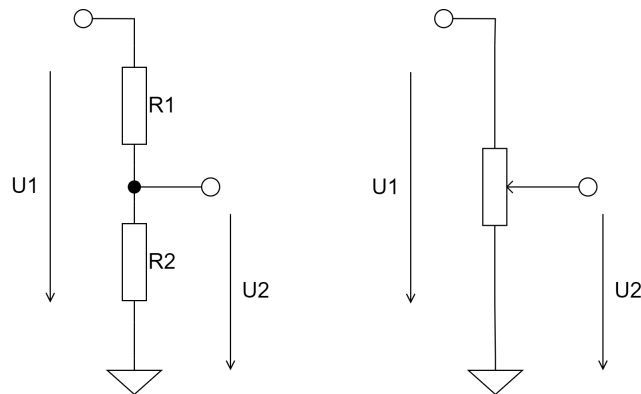
Tento princip je nezbytné použít při realizaci odporové dekády s aktivními součástkami. Takto lze zdvojnásobit pracovní napětí harvesteru v porovnání zapojení se symetrickým napájením.

Princip řízení kolem středu má ovšem potenciálně velkou nevýhodu. Jako v případě symetrického napájení lze měřit napětí pouze na jedné svorce. Toto měření poskytuje úplnou informaci o průběhu napětí na harvesteru. V případě vyvedení pomyslného středního vodiče je nutné měřit napětí na obou svorkách harvesteru, kde ani jedna svorka není připojená na zem. Je tedy zapotřebí mezi měřeními napětovými úrovněmi vypočíst rozdíl. Tento požadavek přispívá ke zesložitění návrhu.

4.2.2 Obvody nastavení zesílení

Pro princip zpětnovazebního zesilovače i řízení podle Ohmova zákona je stěžejní nastavení zesílení operačního zesilovače, které určuje hodnotu výstupního odporu dekády. Možností přesné změny zesílení disponují přístrojové zesilovače, kde je žádané zesílení nastaveno pomocí externího odporu. Další možností nastavení zesílení je zapojení operačního zesilovače se zápornou zpětnou vazbou odporového děliče.

Odporový dělič jako takový lze také použít pro utlumení signálu. Na obrázku 4.6 je základní schéma odporového děliče a potenciometru. Polohou jezdce potenciometru lze plynule regulovat zesílení napěťového signálu od hodnoty 0 až po hodnotu zesílení 1. Vztah 4.12 udává napětí za odporovým děličem v závislosti na hodno-



Obr. 4.6: Odporový dělič a potenciometr

tách odporu. V případě potenciometru jsou hodnoty obou odporů proměnné díky zavedení proměnné w , která definuje polohu jezdce v rozmezí hodnot 0 až 1. Součet obou hodnot odporů R je konstantní. Výstupní napětí U_2 je potom definováno vztahem 4.13 a zesílení je závislé pouze na poloze jezdce potenciometru.

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (4.12)$$

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{R \cdot w}{R \cdot (1 - w) + R \cdot w} = U_1 \cdot w \quad (4.13)$$

Nežádoucí vlastností u zapojení zpětnovazebního zesilovače je nelineární odezva nastaveného zesílení OZ na výstupní odpor. Pro potlačení této nelinearity je nutné nalézt správné zapojení, které by tuto nelinearitu potlačilo.

Pro elektronické ovládání zesílení je nezbytné použití elektronických potenciometrů, nebo proměnných odporů. Jedná se o elektronickou součástku obsahující řadu spínaných odporů, která plní funkci odporové dekády spínané aktivními prvky. Počet kroků odporu, nebo pozic nastavení jezdce elektronického potenciometru je běžně 256, nebo 1024.

Realizace proměnného nastavení zesílení je možná i pomocí elektronické násobičky. Další analogový obvod by do cesty signálu ovšem zanesl vyšší nepřesnost a šum. Také by byl nutný zdroj analogového signálu určující koeficient násobení, a to by vyžadovalo další obvod digitálně-analogového převodníku. Varianta násobení signálu v analogové formě pomocí elektronické násobičky tedy není vhodná pro dané zpracování signálu.

Určité benefity ovšem může přinést zpracování signálu v digitální formě. Zapojení již obsahuje mikropočítač, který by zajišťoval výpočetní sílu pro zpracovávání signálu. Výhodou je snadná implementace diskrétních filtrů, které potenciálně mohou kompenzovat dynamické vlastnosti analogových obvodů. Změna parametrů filtrů a celkového zesílení je v digitální formě mnohem snazší na realizaci, než změna parametrů fyzického zapojení.

Limitací je ovšem analogově-digitální a digitálně-analogový převod signálu. Při použití například v zapojení zpětnovazebního zesilovače je velice kritickým parametrem rozlišení obou převodníků.

4.3 Limitace Aktivního principu

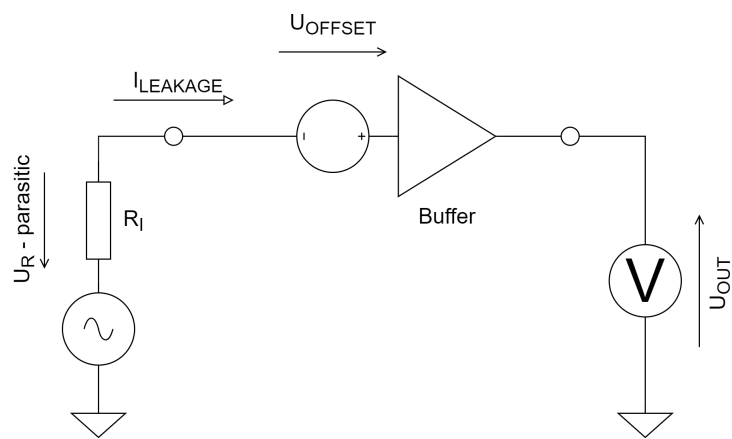
Pro většinu aplikací mohou být parazitní vlastnosti polovodičových komponentů zanedbatelné. Při přísných požadavcích na velice nízký proud do vstupu operačního zesilovače a malé ofsetové napětí se rychle zužuje nabídka komponentů na trhu.

Stěžejní je zde použití komponentů s velice dobrými parametry. Jedná se o komponenty ve vyšší cenové kategorii od kterých se očekává maximální poměr potlačení parazitních parametrů ku ceně.

Zásadní limitace návrhu jsou maximální napájecí napětí a únik proudu ze vstupních svorek, který způsobuje zkreslení měření a tudíž má vliv na přesnost zařízení.

Únik proudu ze vstupních svorek může způsobit nezanedbatelnou chybu. Vnitřní impedance harvesteru se pohybuje v řádu stovek $k\Omega$. V důsledku i malého protékajícího proudu takovouto impedancí může vzniknout výrazný úbytek napětí. Proto musí být kladen veliký důraz na minimalizaci únikového proudu. Pro návrh byly voleny operační zesilovače, sloužící jako buffer, s velmi malým únikovým proudem v řádu desítek pA . Na obrázku 4.7 je znázorněn vliv proudu unikajícího ze svorek přístroje na chybu představující úbytek napětí na vnitřním odporu harvesteru.

Realizace aktivního principu odporové dekadý sebou přináší řadu komplikací. Hlavní limitace vznikají za použití složitějších analogových zapojení, kde má více součástí vliv na celkovou chybu. Navíc jsou parametry zapojení vždy ovládnány digitální hodnotou, která je převáděna na analogovou, což způsobuje chybu v důsledku napěťového kvantizačního kroku.



Obr. 4.7: Parazitní vlastnosti vstupní svorky

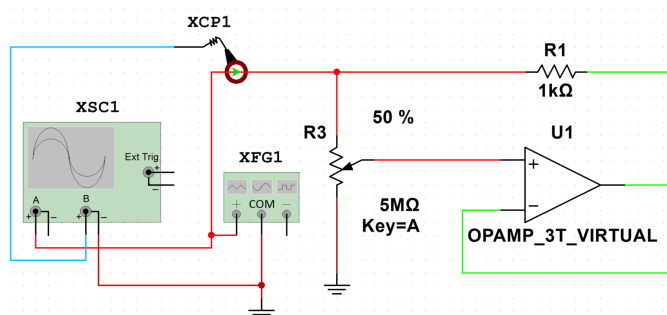
5 Simulace a ověření zapojení

V kapitole 4.1 jsou popsány základní principy fungování aktivní odporové dekády. Jedná se o teoretické návrhy, jejichž fungování je potřeba ověřit simulacemi a měřeními praktických zapojení. Při měření energy harvesteru, který má veliký vnitřní odpor, jsou důležité parazitní vlastnosti OZ. Proto bylo na trhu vybráno několik čipů operačních zesilovačů, které byly porovnávány měřeními.

5.1 Ověření zapojení pomocí simulace

Schémata byla testována v programu Multisim. Cílem je ověření základní funkčnosti zapojení.

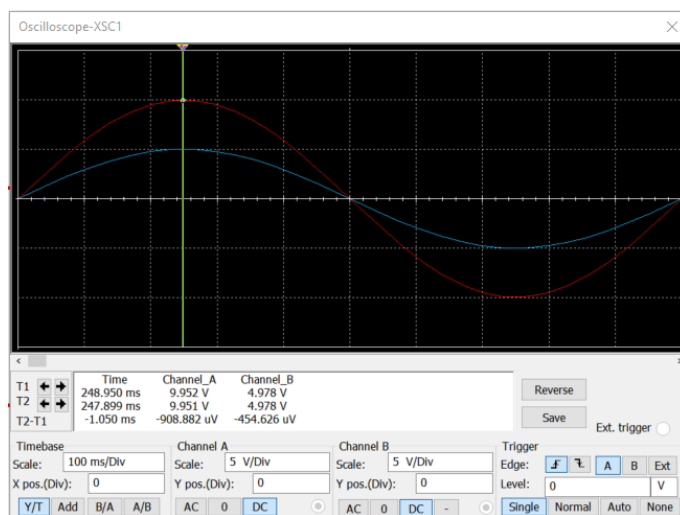
Na obrázku 5.1 je schéma modelu základního principu zpětnovazebního zesilovače, na kterém byla ověřena teoretická funkčnost zapojení. Na grafu 5.1 lze pozorovat průběh napětí a proudu generátoru. V závislosti na nastavení potenciometru $R3$ se mění zesílení zapojení OZ se zpětnou vazbou a tím je měněn i proud odebíraný ze zdroje. Principiální schéma bylo odsimulováno a ověřena jeho funkčnost.



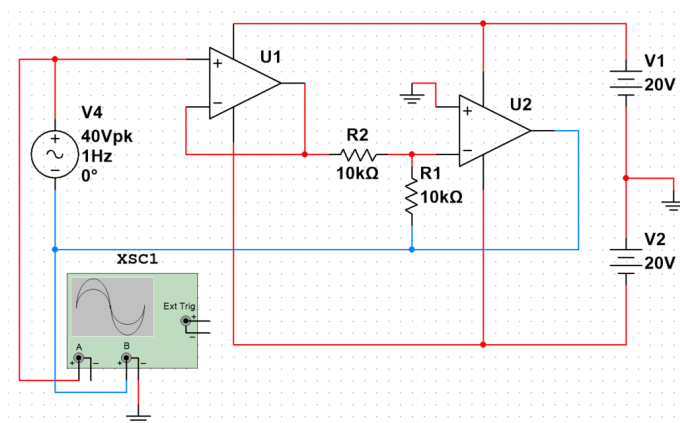
Obr. 5.1: Simulační model základního principu Zpětnovazebního zesilovače

Důležitým obvodem pro realizaci finálního zapojení je zapojení, které řídí zápornou svorku pro dosažení maximálního napětového rozsahu, které je zobrazeno na obrázku 5.3. Z průběhu hodnot na obrázku 5.4 je vidět, že na výstupu OZ $U2$ je záporná hodnota napětí o stejné velikosti jako hodnota napětí, které vstupuje do OZ1. Součet obou napětí je vždy nulový. Dochází tedy k řízení zdroje kolem nulového potenciálu a touto simulací je potvrzena funkčnost zapojení pro maximální napětový rozsah.

Po spojení dvou předchozích simulací dohromady, bylo navrženo schéma zobrazené na obrázku 5.5, které realizuje spojení zapojení zpětnovazebního zesilovače a řízení pro maximální napětový rozsah. Velikým benefitem je přítomnost symetrického napětového signálu, který je výstupem operačních zesilovačů $U1$ a $U2$.



Obr. 5.2: Simulační model základního principu Zpětnovazebního zesilovače

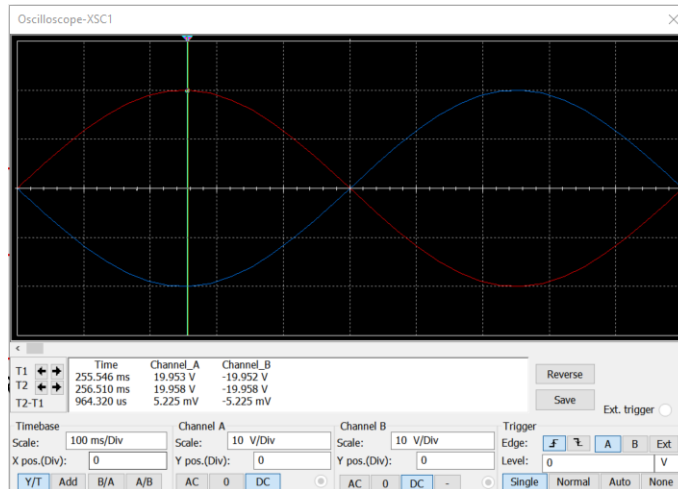


Obr. 5.3: Simulační model pro maximální napěťový rozsah

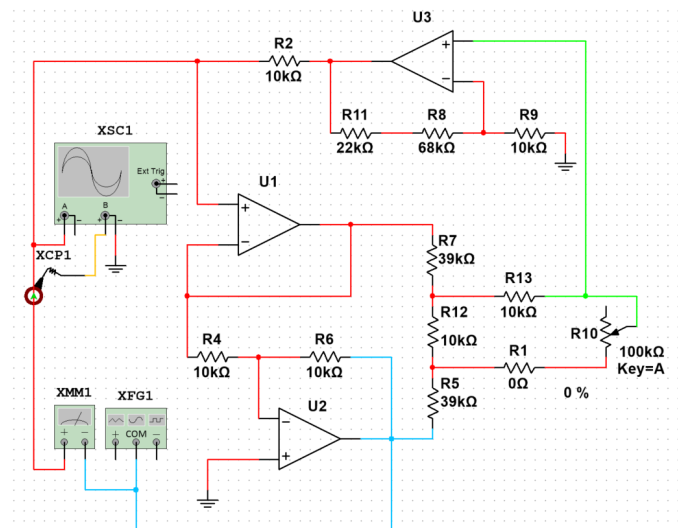
Díky tomu lze pomocí potenciometru velice jednoduše realizovat zesílení zapojení zpětnovazebního zesilovače i v záporných hodnotách, což rozšíří nastavitelný odpor zapojení.

V zapojení si lze povšimnout napěťového děliče složeného z odporů $R7$, $R12$ a $R5$, který výrazně snižuje napětí. Následně je malý signál zesílen pomocí zapojení OZ $U3$. Pro realizaci tohoto zapojení je nutné uvažovat použití elektronických potenciometrů, které běžně pracují s napětím do pěti voltů. Proto je nutné napětí nejdříve snížit pro tyto potenciometry a následně zesílit pro dosažení původních úrovní.

Na obrázku 5.6 je zobrazeno zapojení, které obsahuje dva potenciometry pro jemnější krok nastavitelného odporu. Pro zapojení se dvěma potenciometry byly v simulaci změřeny hodnoty odporů pro mezní hodnoty poloh potenciometrů. Hodnoty

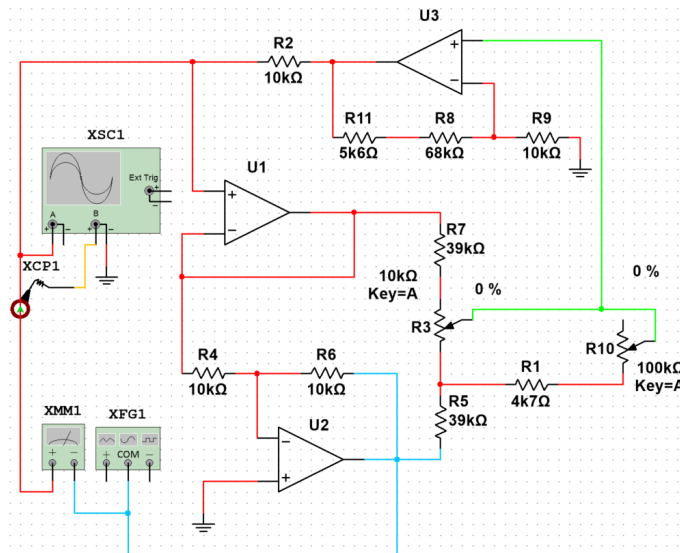


Obr. 5.4: Naměřený průběh napětí v simulaci



Obr. 5.5: Simulace celkového zapojení pro jeden potenciometr

jsou zaznamenány v tabulce 5.1. Minimální odpor zapojení je při nastavení obou potenciometrů na nulovou hodnotu. Při poloze potenciometru R_3 na maximální hodnotu byl změřen odpor zapojení v přechodu. Až po nastavení potenciometru R_3 na maximální hodnotu je možné měnit nastavení potenciometru R_{10} . Pro nastavení obou potenciometrů na maximální hodnotu byl změřen maximální odpor zapojení.



Obr. 5.6: Simulace celkového zapojení pro dva potenciometry

Tab. 5.1: Tabulka naměřených hodnot pro mezní polohy potenciometrů

Minimální odpor	10,257 kΩ
Odpor v přechodu	29,816 kΩ
Maximální odpor	161,093 kΩ

5.2 Praktické ověření

Pro ověření aktivního zapojení v reálných podmínkách byly na nepájivém poli postaveny zkušební zapojení, na kterých byla ověřována funkčnost pro tři vybrané operační zesilovače.

5.2.1 Průzkum trhu zkušebních komponentů

Pro ověření principiálních schémat popsaných v kapitole 4 ve fyzickém zapojení je nutné nejdříve provést průzkum trhu. Aby tato řešení mohla konkurovat pasivním odporovým dekádám, je nutné vybrat komponenty s velice nízkými parazitními vlastnostmi, které by mohly být potenciálně použity pro realizaci řešení.

Společnost Mouser Electronics, Inc. zajišťuje prodej široké škály elektronických komponentů. Díky přehlednosti a vyhledávacím algoritmům na webových stránkách společnosti byla tato společnost vybrána pro nákup vhodných součástek k testování. Testovány budou zapojení s použitím operačních zesilovačů z tabulky 5.2. V tabulce

5.3 jsou elektronická a mechanická relé pro realizaci odporové dekády a pro použití v aktivním zapojení pro přepínání rozsahů.

Tab. 5.2: Seznam operačních zesilovačů

Označení	n	V_{os} [uV]	I_b [pA]	cena [Kč]
MCP6V54	4	15	60	120
ADA4522	2	0,7	50	158
LTC2057HV	1	0,5	30	178

Tab. 5.3: Seznam relé

Označení	typ	R_{ON} [Ω]	R_{OFF} [$G\Omega$]	I_{OFF} [pA]	cena [Kč]
TMUX7213PWR	4xSPST	2,5	-	50	166
DG333ALDW	4xSPDT	45	-	250	173
ADG5233BRUZ	3xSPDT	200	-	100	178
9007-05-00	1xSPST NO	0,2	10	-	48
8L01-05-001	1xSPST NO	0,15	10	-	114

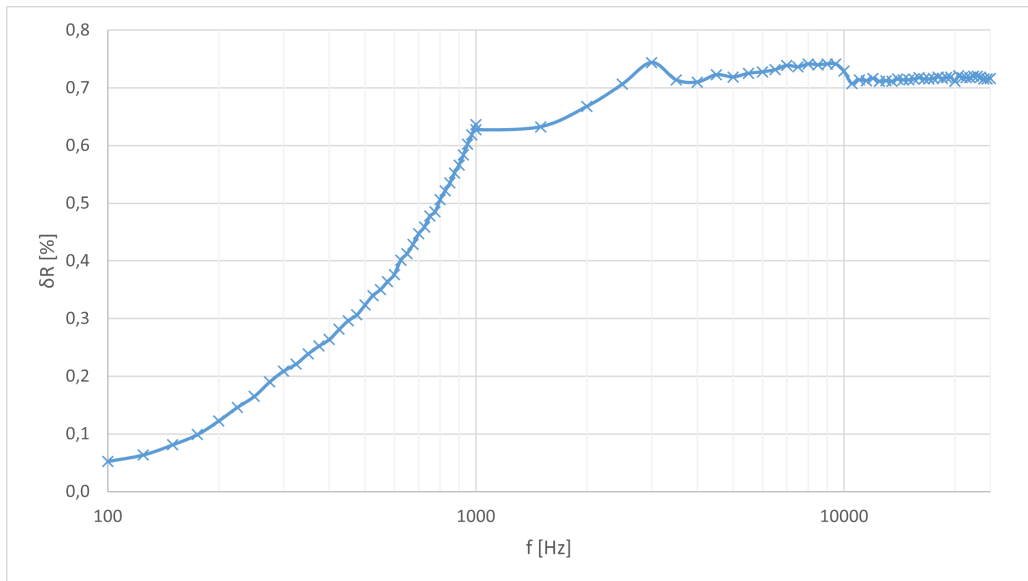
5.2.2 Měření Principiálních schémat na nepájivém poli

V kapitole 5.1 jsou popsána schémata pro simulaci základních obvodů, které realizují funkci aktivní odporové dekády. V simulacích byly ovšem použity ideální součástky. Pro získání informací o tom, jaký vliv budou mít parazitní vlastnosti součástek v reálném zapojení, bylo provedeno měření. V kapitole 5.2.1 byl proveden průzkum trhu různých OZ, které budou měřeny v zapojeních. Z charakteristik je poté možné rozhodnout, který operační zesilovač je vhodné použít pro návrh konečného zapojení.

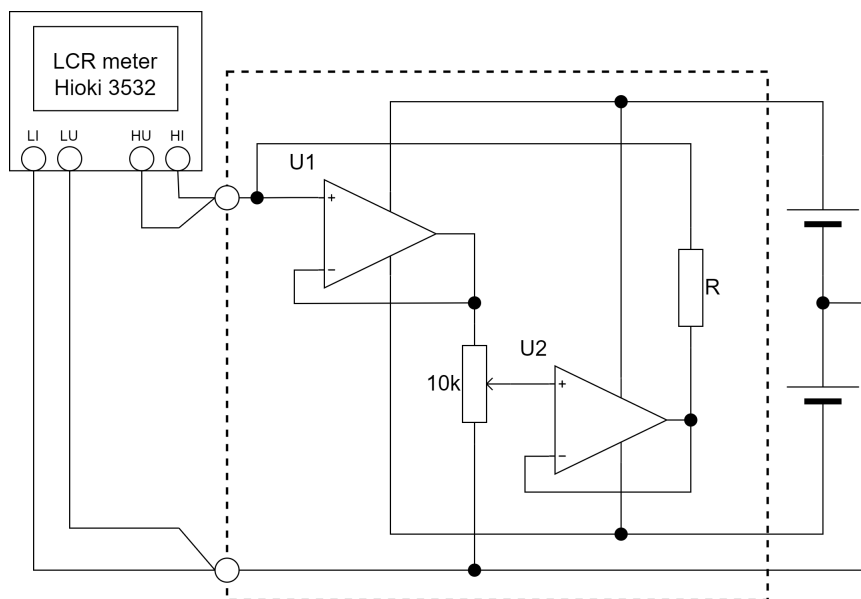
Na obrázku 5.7 je průběh měření samostatného trimru používaného pro nastavování hodnot měřeného zapojení. Trimr byl nastaven na hodnotu 8k \cdot . Z charakteristiky je zřejmé, jaký vliv má zapojení v nepájivém poli na přesnost. Pro měření všech frekvenčních závislostí byl použit LCR tester Hioki 3532.

Měření zapojení zpětnovazebního zesilovače

Měření bylo realizováno na jednoduchém zapojení zpětnovazebního zesilovače. Svorky LCR testeru byly připojeny na výstupní svorky zapojení. Principiální schéma je vyobrazeno na obrázku 5.8.

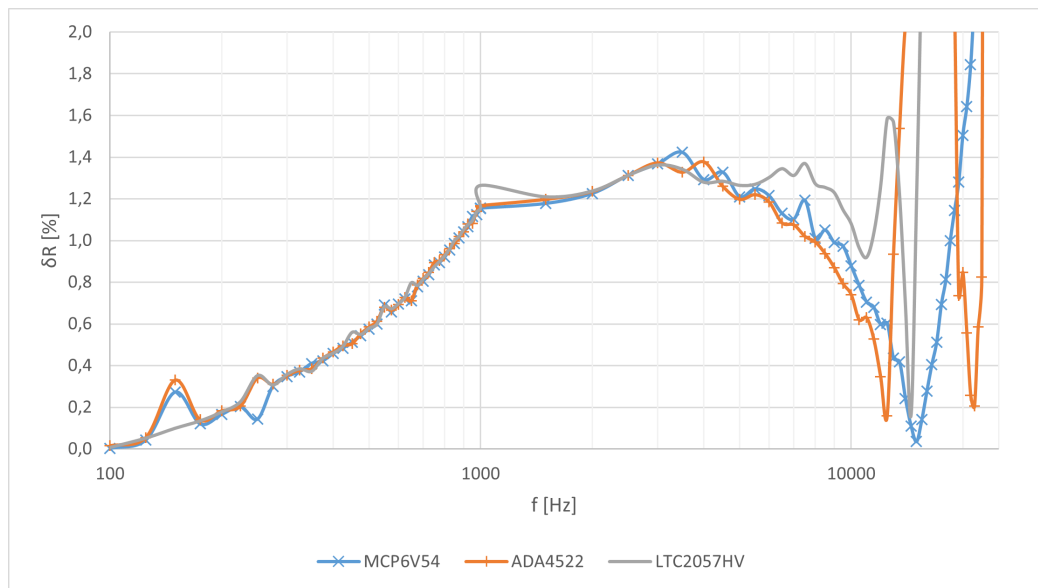


Obr. 5.7: Měření samotného trimru při nastavené hodnotě $8k\Omega$

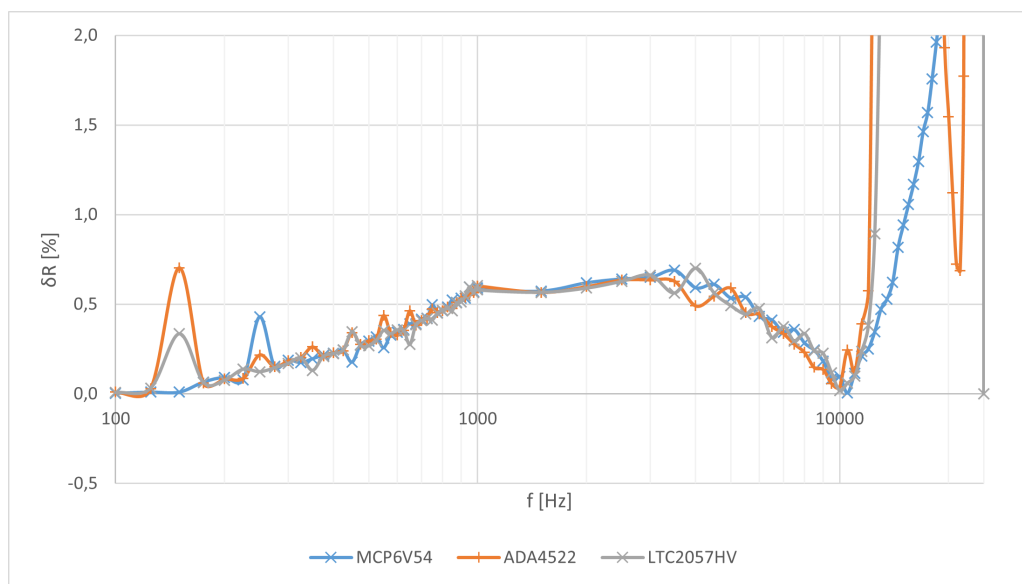


Obr. 5.8: Schéma zapojení měření zpětnovazebního zesilovače

V jednotlivých grafech 5.9 až 5.13 jsou zaznamenány výsledky měření pro různě nastavená zesílení. Porovnávají jsou vždy tři zapojení s různými operačními zesilovači. Ve všech grafech si lze povšimnout, že zapojení s operačním zesilovačem MCP6V54 má vždy větší frekvenční rozsah. Průběhy zapojení jsou ovšem téměř srovnatelné. Na grafech se objevuje zlom okolo $1kHz$. Ten je způsoben rozdělením měření, kde první měření probíhalo pro rozsah $100Hz$ až $1kHz$ po kroku $25Hz$ a

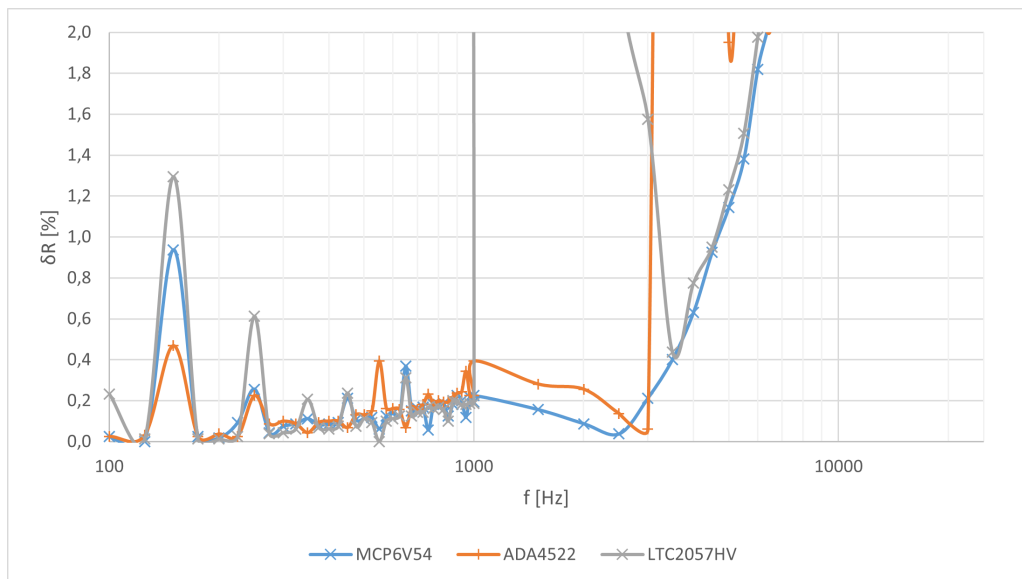


Obr. 5.9: Měření zapojení zpětnovazebního zesilovače při zesílení $A_u=-1$

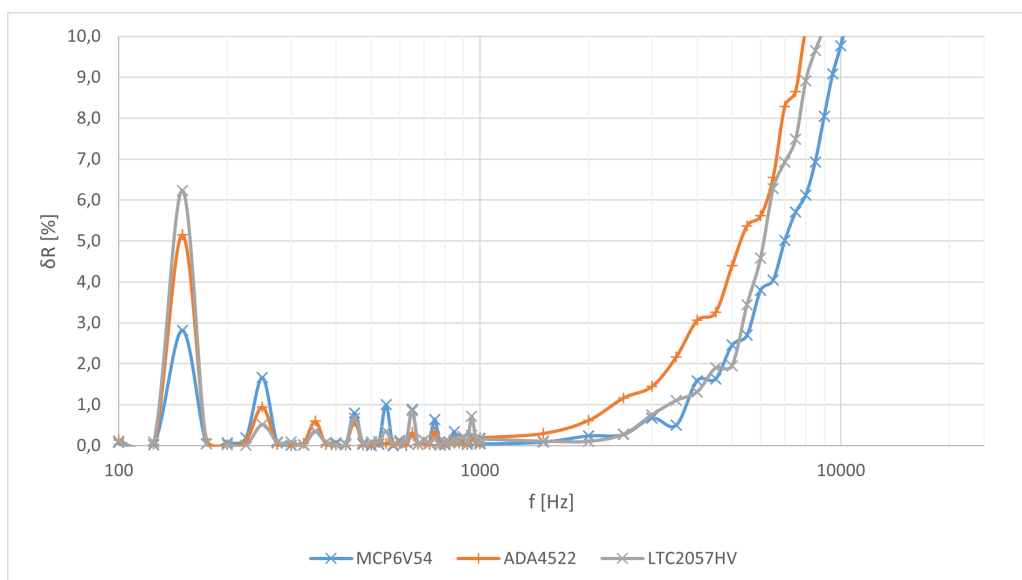


Obr. 5.10: Měření zapojení zpětnovazebního zesilovače při zesílení $A_u=0$

druhé měření probíhalo pro rozsah 1kHz až 25kHz po kroku 500Hz . Užitečné průběhy lze nalézt na obrázku 5.12, kde je zřetelný rozdíl mezi dynamikami jednotlivých zapojení. Zapojení s operačním zesilovačem MCP6V54 dosahuje přesnosti 1% až do necelých 4kHz . Na obrázku 5.13 jsou průběhy zcela zkresleny. Měření při zesílení 0,99 je příliš zatíženo šumem a nepřesností zapojení na nepájivém poli. Na obrázku 5.9 je navzdory předpokladům zaznamenána větší chyba než 1% v aktivním rozsahu.



Obr. 5.11: Měření zapojení zpětnovazebního zesilovače při zesílení $A_u=0,5$

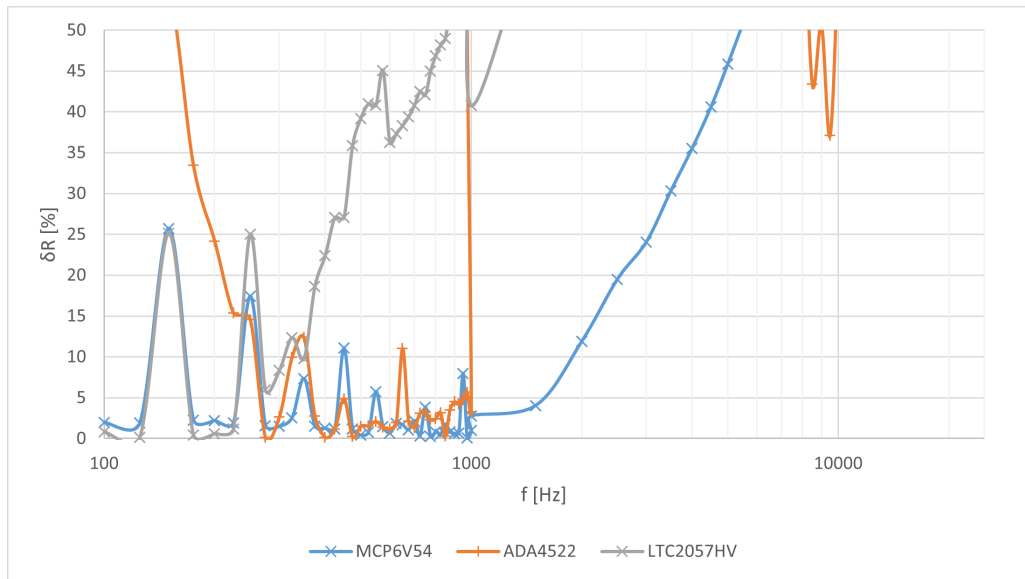


Obr. 5.12: Měření zapojení zpětnovazebního zesilovače při zesílení $A_u=0,9$

Chyba může být způsobena nepřesností nastavení zapojení za daných podmínek.

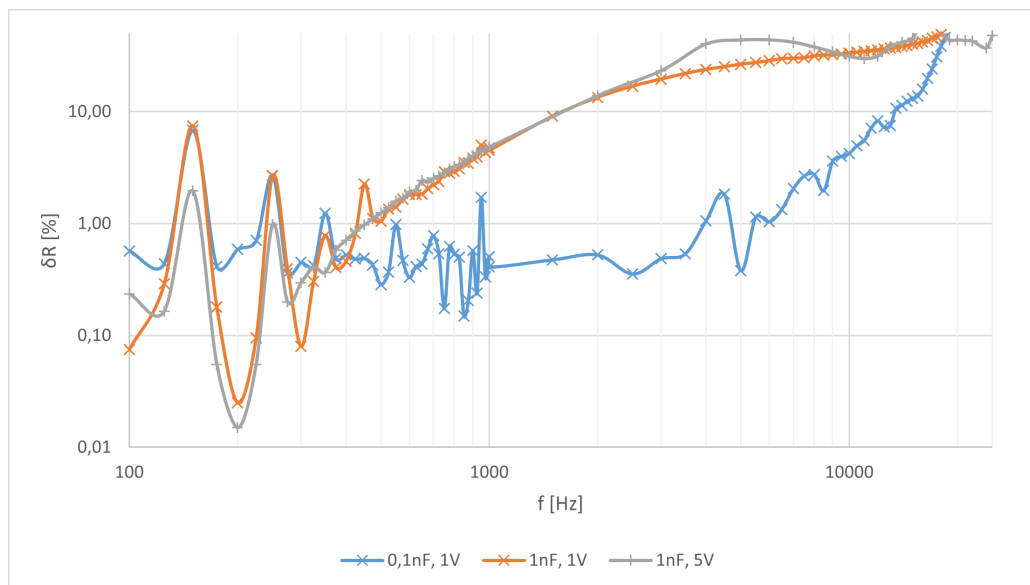
Měření zapojení řízení podle Ohmova zákona

Díky poznatkům z předchozího měření, byl vybrán operační zesilovač MCP6V54 pro použití v tomto zapojení. Na obrázku 5.14 a 5.15 jsou zaznamenány frekvenční průběhy pro tři nastavení měření. Kvůli použití více operačních zesilovačů v zapojení



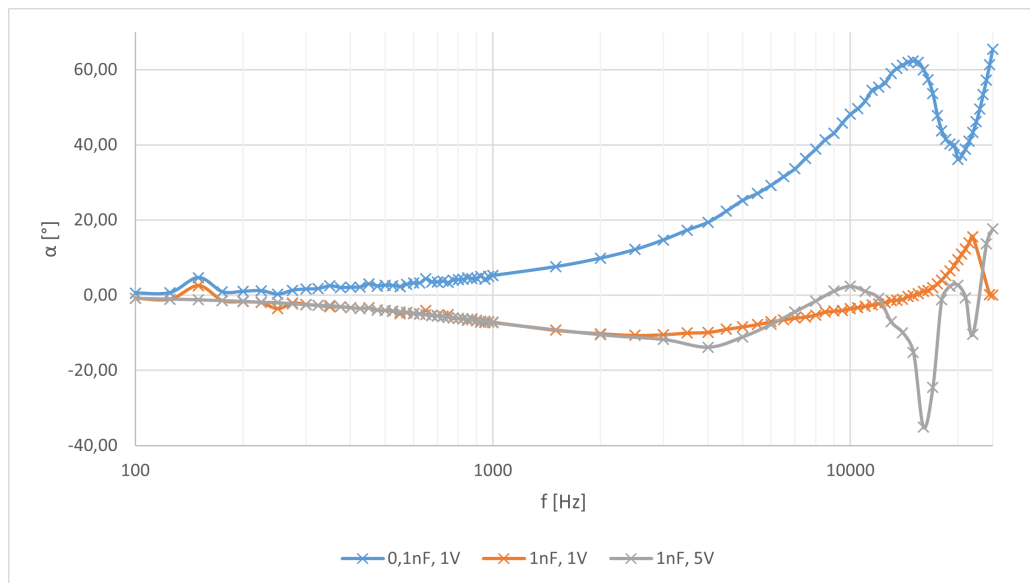
Obr. 5.13: Měření zapojení zpětnovazebního zesilovače při zesílení $A_u=0,99$

řazených za sebou, může být zapojení nestabilní ve zpětné vazbě. Proto byl použit kompenzační kondenzátor zapojený s výstupním operačním zesilovačem. Zapojení tvoří integrační článek, který zpomaluje celkovou odezvu systému a potlačuje šum. Měření bylo realizováno pro zapojení s dvěma různými kondenzátory.



Obr. 5.14: Měření zapojení řízení podle Ohmova zákona

Zapojení pro měření bylo sestaveno na nepájivém poli. Zapojení tedy bylo silně zatíženo parazitními vlastnostmi nepájivého pole. Výsledky měření lze ovšem použít



Obr. 5.15: Měření fázového posunu v zapojení řízení podle Ohmova zákona

ke zhodnocení jednotlivých operačních zesilovačů mezi sebou.

Nejvýhodnější pro použití v dalším postupu návrhu je použití čipu MCP6V54, který v jednom pouzdře obsahuje čtyři operační zesilovače a jeho parametry jsou dostačující. Z naměřených dat v grafech 5.9 až 5.13 vykazoval nejrychlejší frekvenční odezvu.

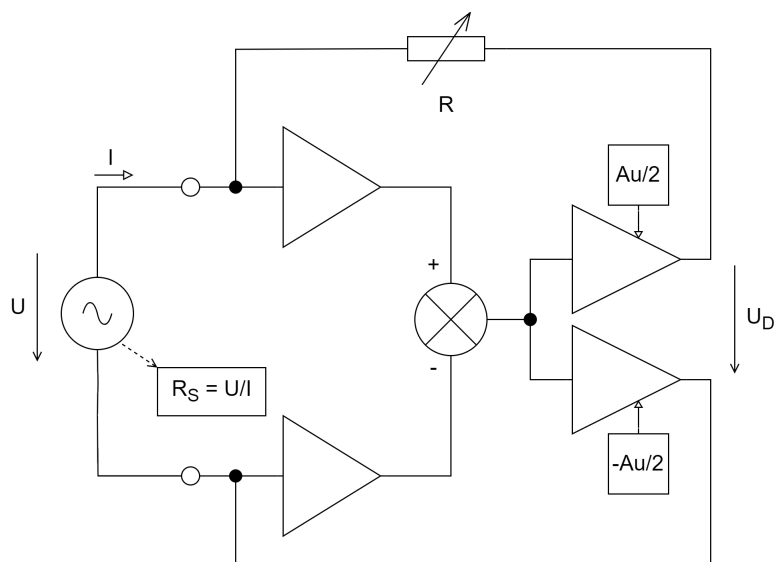
6 Návrh aktivní odporové dekády

6.1 Návrh Zapojení aktivní odporové dekády

Pro optimální fungování aktivní odporové dekády byl vybrán návrh zapojení, kde je počet operačních zesilovačů ve schématu co nejvíce redukován, aby se co nejvíce snížila chyba způsobená nedokonalostmi reálných součástek.

6.1.1 Reálné schéma zapojení se zpětnovazebním zesilovačem

Symetrický způsob napájení s vyvedenou nulou je nahrazen obvodem, který řídí obě svorky harvesteru kolem pomyslného středu nesymetrického napájení. Tímto způsobem zapojení je možné dosáhnout požadovaného rozsahu. Podmínkou je, aby maximální výchylka napětí harvesteru nepřesahovala napájecí napětí obvodů aktivní odporové dekády. Na obrázku 6.1 je principiální zapojení principu zpětnovazebního zesilovače v zapojení řízení kolem středu.

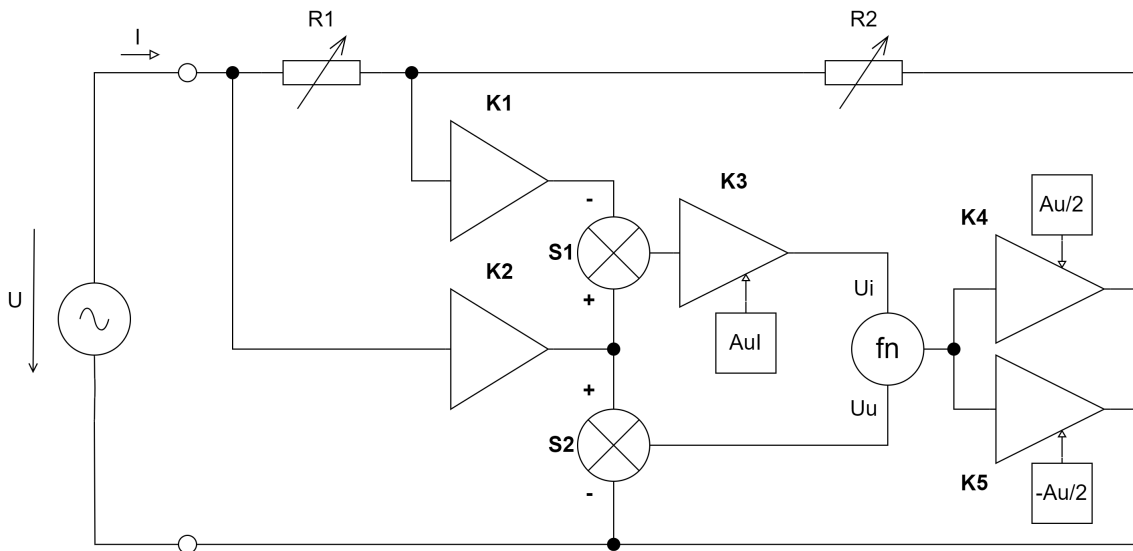


Obr. 6.1: Principiální schéma zpětnovazebního zesilovače pro maximální napěťový rozsah

Návrh zapojení, který byl již simulován na obrázku 5.6 je vhodným řešením pro praktickou realizaci.

6.1.2 Reálné schéma zapojení řízení podle Ohmova zákona

U tohoto principu je rovněž nezbytné použít obvod pro řízení kolem středu. Měření proudu, které je nezbytné pro tento princip, však vyžaduje použití zapojení přístro-

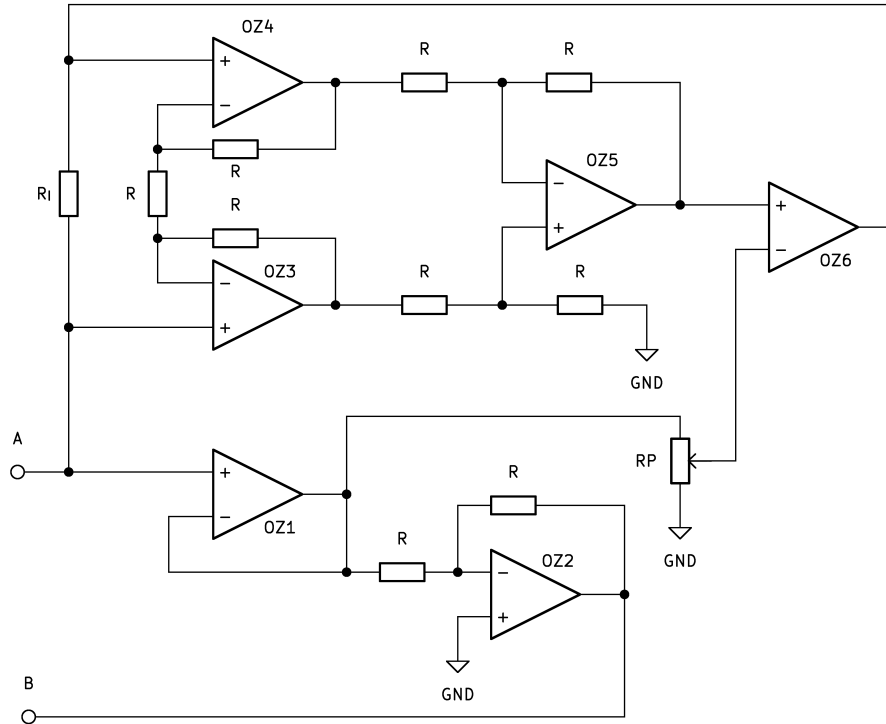


Obr. 6.2: Řízení podle Ohmovy metody s regulací kolem středu

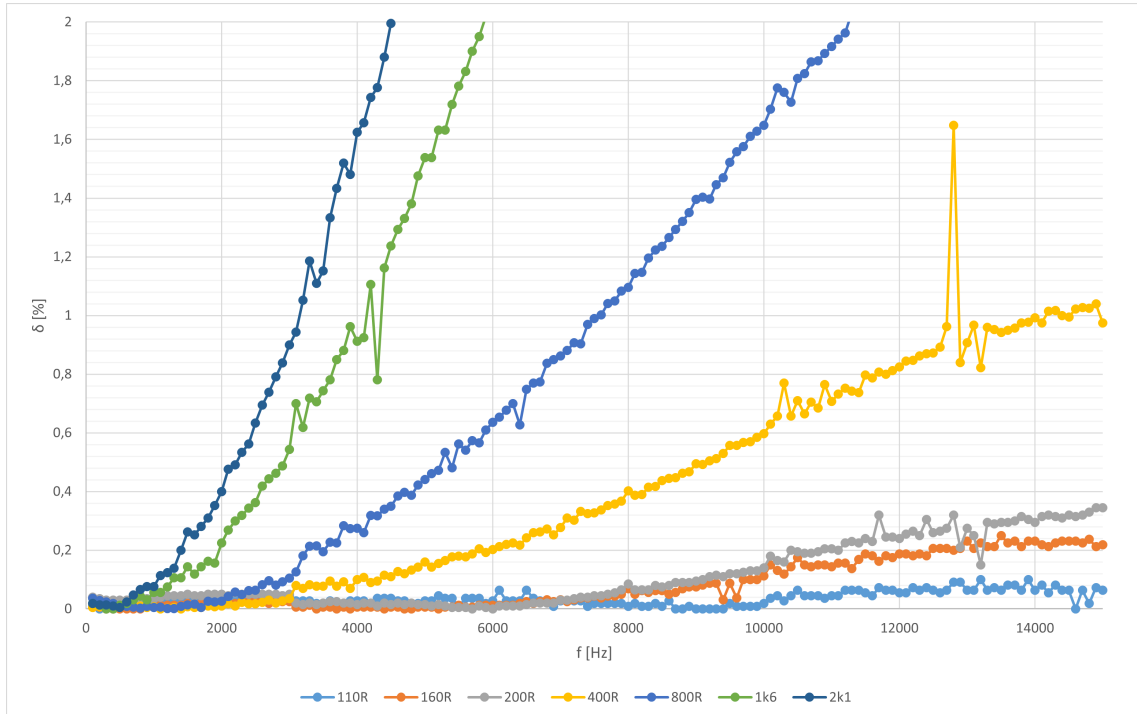
ového zesilovače, kvůli měření dvou rozdílových napětí, kde ani jedno není připojeno na stabilní napětovou referenci. Takto je zapotřebí měřit dvě napětí na odporovém bočníku, ze kterých je zesilován rozdíl pro konečný výpočet proudu. Principiální zapojení na obrázku 6.2 je náročné na praktickou realizaci. Na obrázku 6.3 je přibližná podoba reálného zapojení, které obsahuje 6 operačních zesilovačů. Podle výsledků měření z kapitoly 5.2.2 má schéma navíc problémy se stabilitou a je ji nutné kompenzovat dalšími součástkami.

6.2 Měření parametrů funkčního zapojení

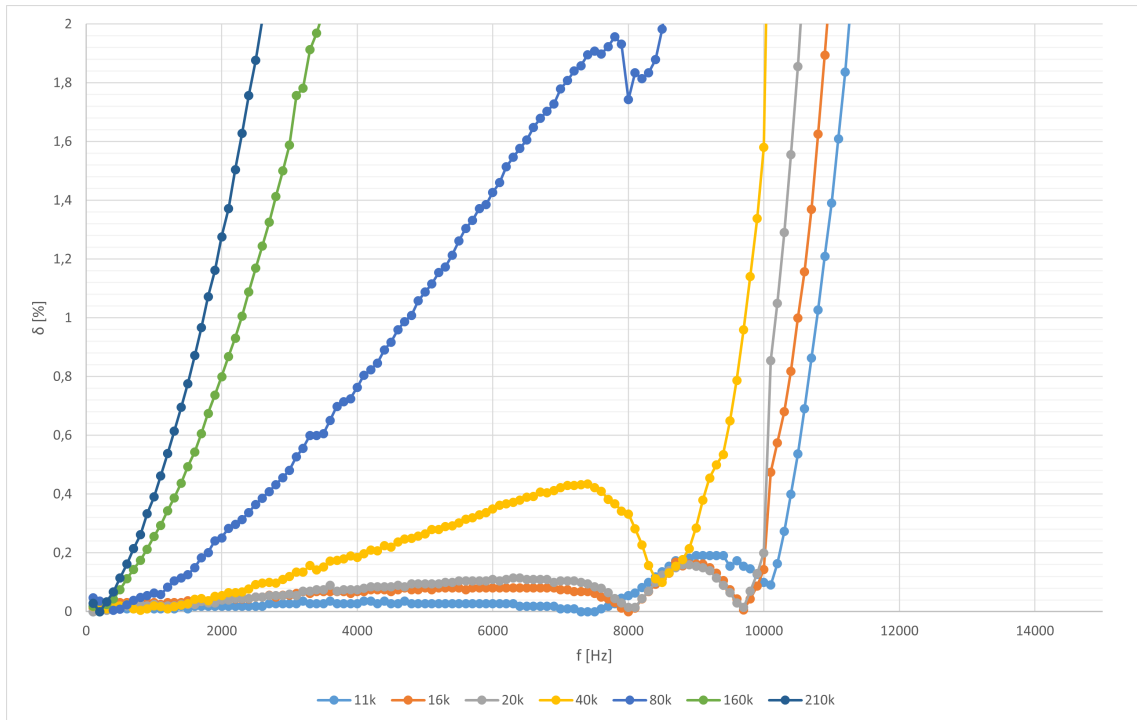
Pro ověření funkčnosti a změření vlastností funkčního zapojení byla realizováno zapojení s operačním zesilovačem na universální desce plošných spojů. Pro realizaci konečného zapojení a měření bylo vybráno zapojení zpětnovazebního zesilovače s řízením pro maximální napěťový rozsah. Proměnné odpory pro nastavení požadovaného odporu byly realizovány ve formě více otáčkových trimrů. Na obrázku 6.4 je graf přesnosti v závislosti na frekvenci, při použitím odporu $R = 100\Omega$. Na obrázku 6.5 je graf přesnosti v závislosti na frekvenci, při použitím odporu $R = 10k\Omega$. Na obrázku 6.6 je graf přesnosti v závislosti na frekvenci, při použitím odporu $R = 1M\Omega$. Pořízená data byla následně zpracována do grafu na obrázku 6.7, kde jsou vyneseny křivky závislosti maximální frekvence při chybě 1% nastavené hodnoty odporu pro zapojení jednotlivých rezistorů R . Data pro nastavený odpor $R = 1k\Omega$ a $R = 100k\Omega$ v měření chybí. Pro hrubou představu chování zapojení odporové dekády byla data pro tyto hodnoty převzata a vynesena do grafu pro frekvence o jeden řád vyšší.



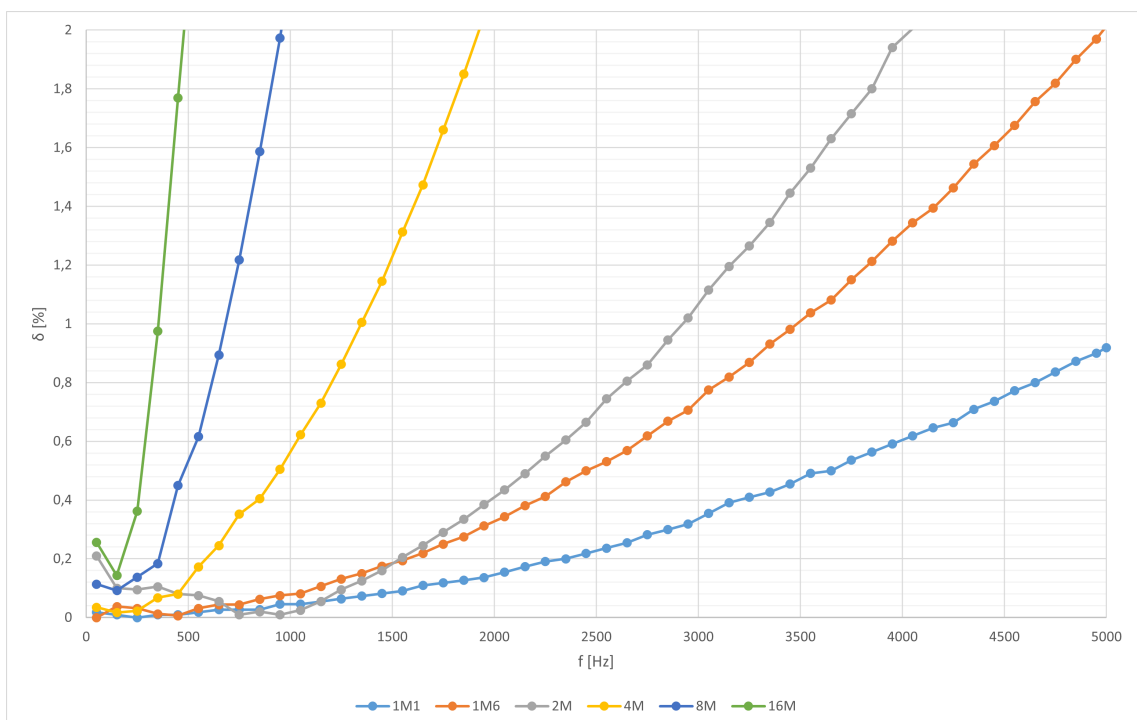
Obr. 6.3: Praktické zapojení řízení podle Ohmovy metody s regulací kolem středu



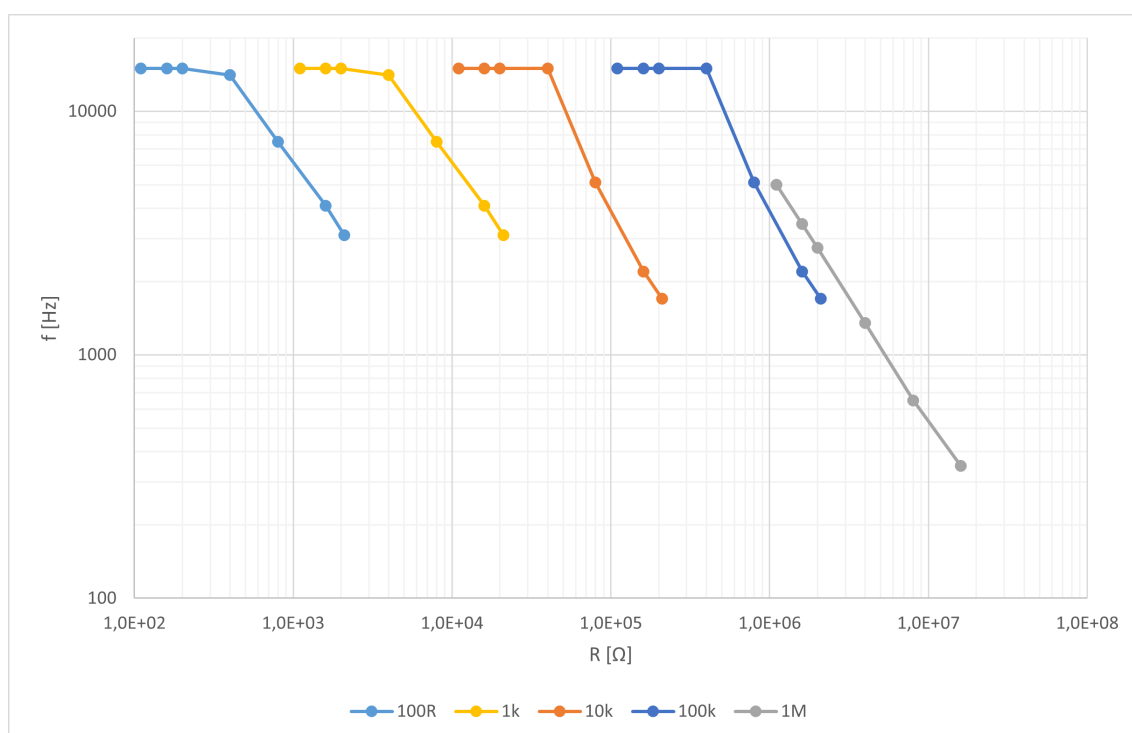
Obr. 6.4: Graf přesnosti funkčního zapojení v závislosti na frekvenci



Obr. 6.5: Graf přesnosti funkčního zapojení v závislosti na frekvenci



Obr. 6.6: Graf přesnosti funkčního zapojení v závislosti na frekvenci



Obr. 6.7: Graf přesnosti funkčního zapojení v závislosti na frekvenci

7 Realizace návrhu

7.1 Návrh desky plošného spoje

Pro zvolený typ zapojení aktivního principu je žádoucí oddělit digitální zemi od analogové. Digitální zem řídicí desky je propojena USB kabelem s připojeným počítačem, který může být spojen se zemí. Další dlouhé propojení nulového potenciálu navíc zvyšuje parazitní kapacitu zapojení. Pro analogové zapojení je nutné napájecí napětí $\pm 20V$. Jako galvanicky oddělené zdroje takového napětí byly použity dva spínané zdroje muRata MTU2, které zajišťují v zapojení napájecí napětí $\pm 24V$. Pro regulaci na požadované napětí $\pm 20V$ byly použity nastavitelné regulátory LT3065 pro kladný potenciál a LT3090 pro záporný potenciál. Díky nastavitelnosti napětí regulátorů byla stejná dvojice použita i pro zajištění napěťového potenciálu $\pm 2,5V$, kterým jsou napájeny elektronické potenciometry. Kladným napětím $2,5V$ je napájen i datový galvanický oddělovač, který zajišťuje přenos komunikace SCPI pro komunikaci řídicího obvodu s elektronickými potenciometry.

Zapojení bylo navrženo pro dva elektronické potenciometry. Při ožívování desky plošných spojů byl kvůli komplikacím s čipem AD5141BCP osazen pouze jeden elektronický potenciometr AD5270BRM s rozlišením 2^{10} kroků. Deska je osazena podle zapojení na obrázku 5.5.

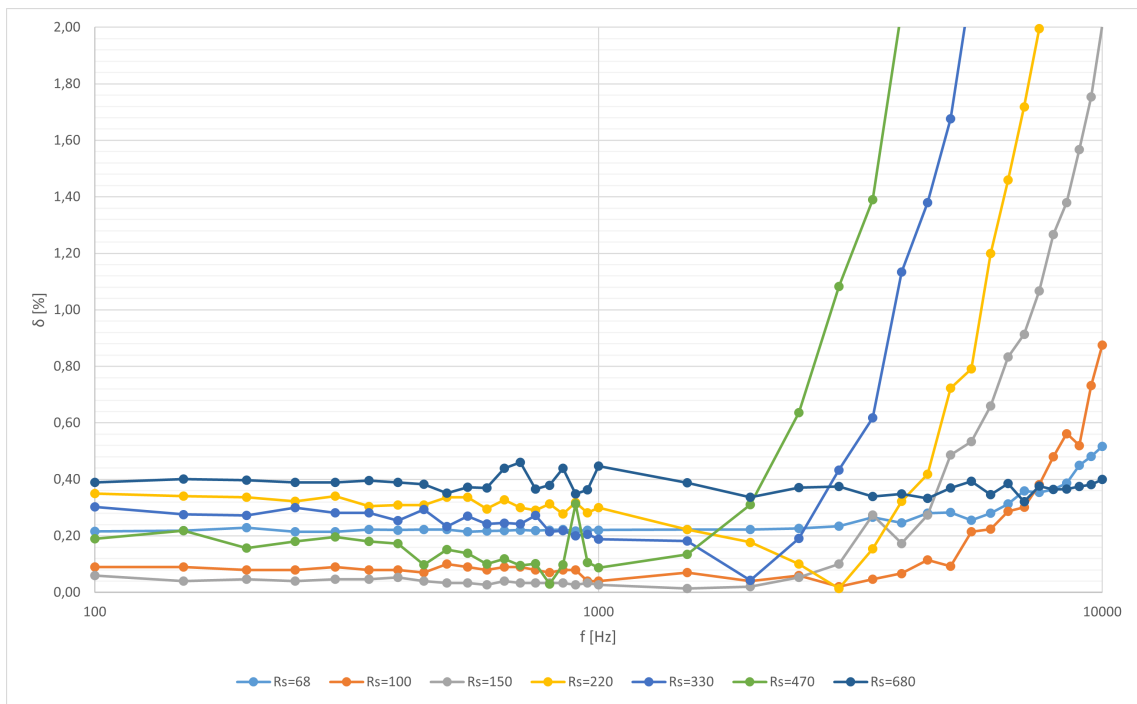
Komunikaci pomocí protokolu SCPI je možné inicializovat zařízení po startu. Poté lze pomocí jednoduchého příkazu nastavovat požadovaný odpor. Kvůli kroku digitálního potenciometru nelze nastavovat libovolnou hodnotu odporu mezi těmito kroky. Pro zpřesnění výpočtů v nadřazeném měřícím systému, odporová dekáda zpětně přepočítává hodnotu aktuálního nastaveného odporu v krocích a přepočtenou hodnotu přeposílá zpět.

Jako oddělovací znak komunikace slouží mezera, nebo středník. Pro příkaz nastavení požadovaného odporu je poslán příkaz začínající znakem "r" a následuje hodnota odporu v Ohmech.

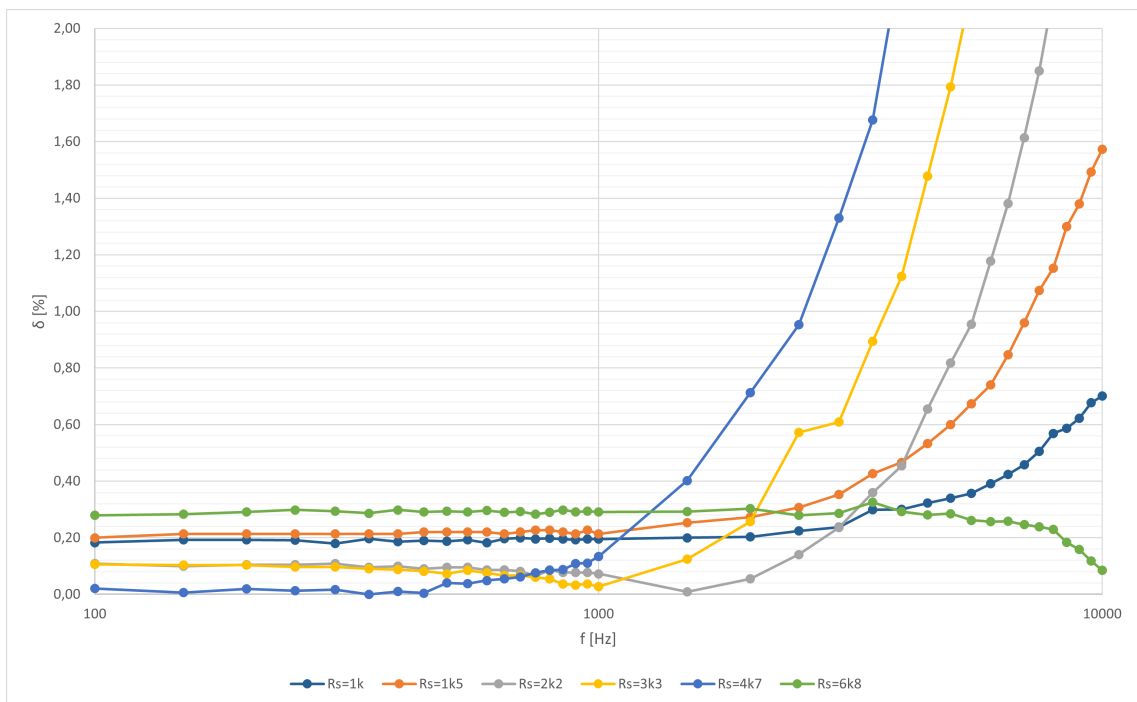
7.2 Měření vlastností konečného zařízení

Odporová dekáda byla proměřena pro frekvenční závislost přístrojem Hioki 3532. V grafech 7.1 až 7.6 jsou vyneseny odchylky od požadovaných hodnot nastaveného odporu na frekvenci. Pro určení parametrů konečného zapojení je vypovídající graf na obrázku 7.8, kde je vynesena frekvenční závislost pro požadovaný limit odchylky 1% a navíc i pro odchylku 0,5%.

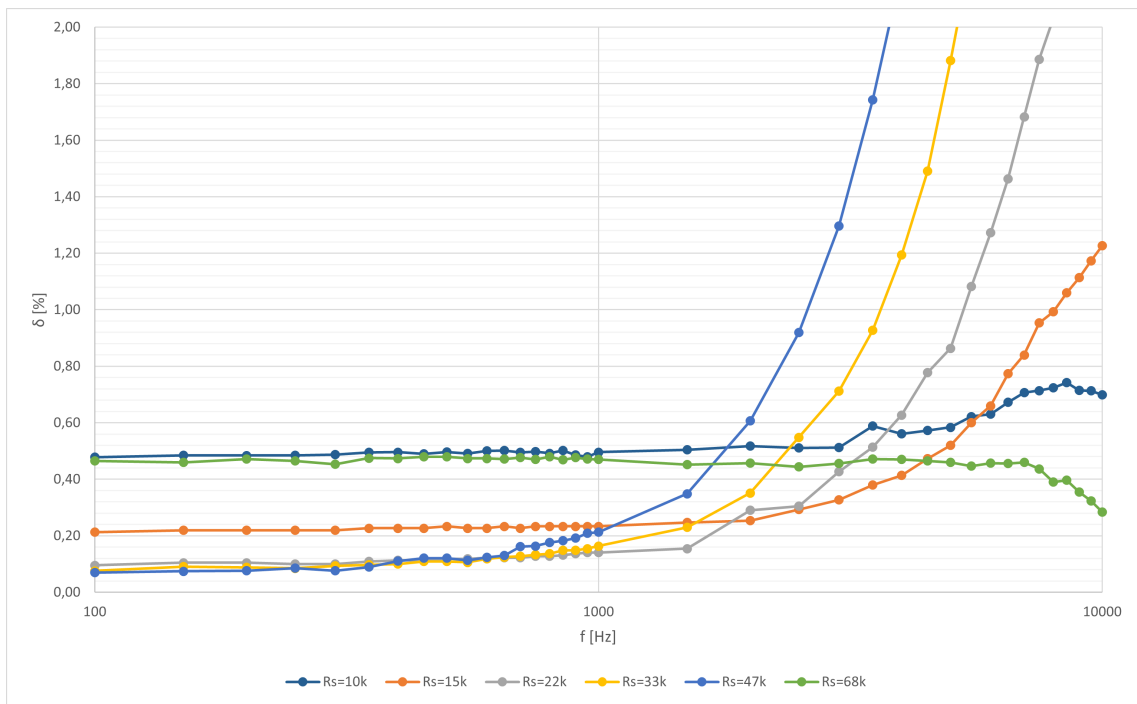
V grafu 7.8 je vynesena odchylka odporové dekády v závislosti na požadovaném odporu a na skutečném odporu, který je dopočítáván odporovou dekádou. Svislé



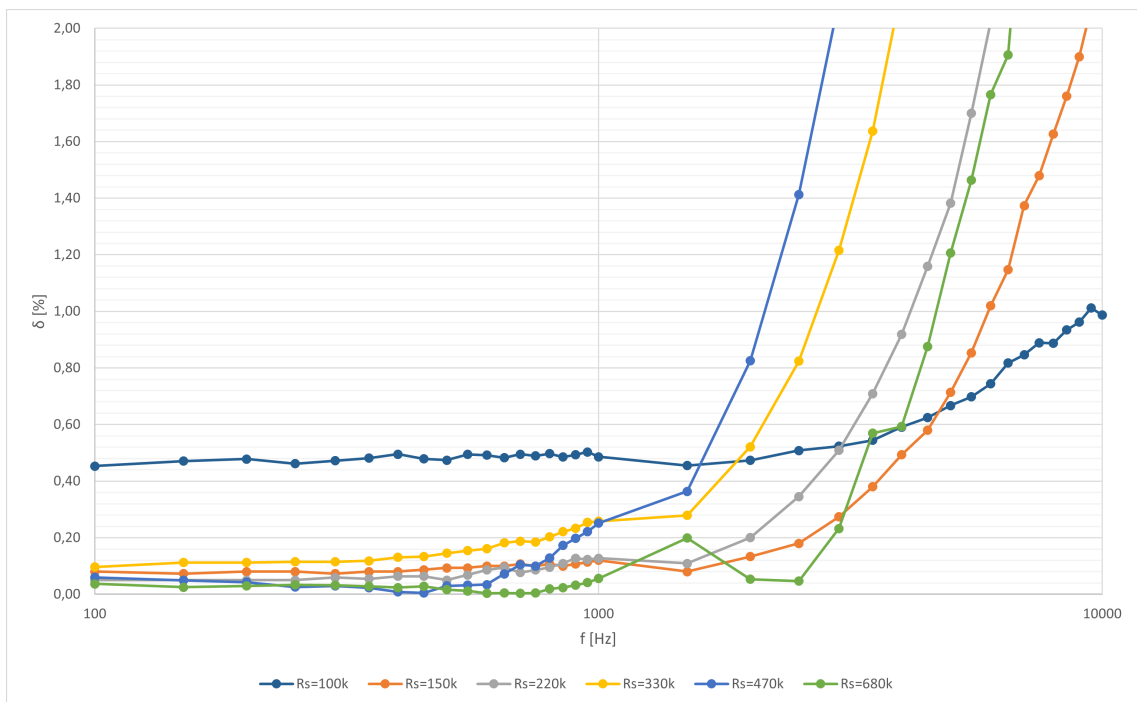
Obr. 7.1: Graf přesnosti odporové dekády v závislosti na frekvenci



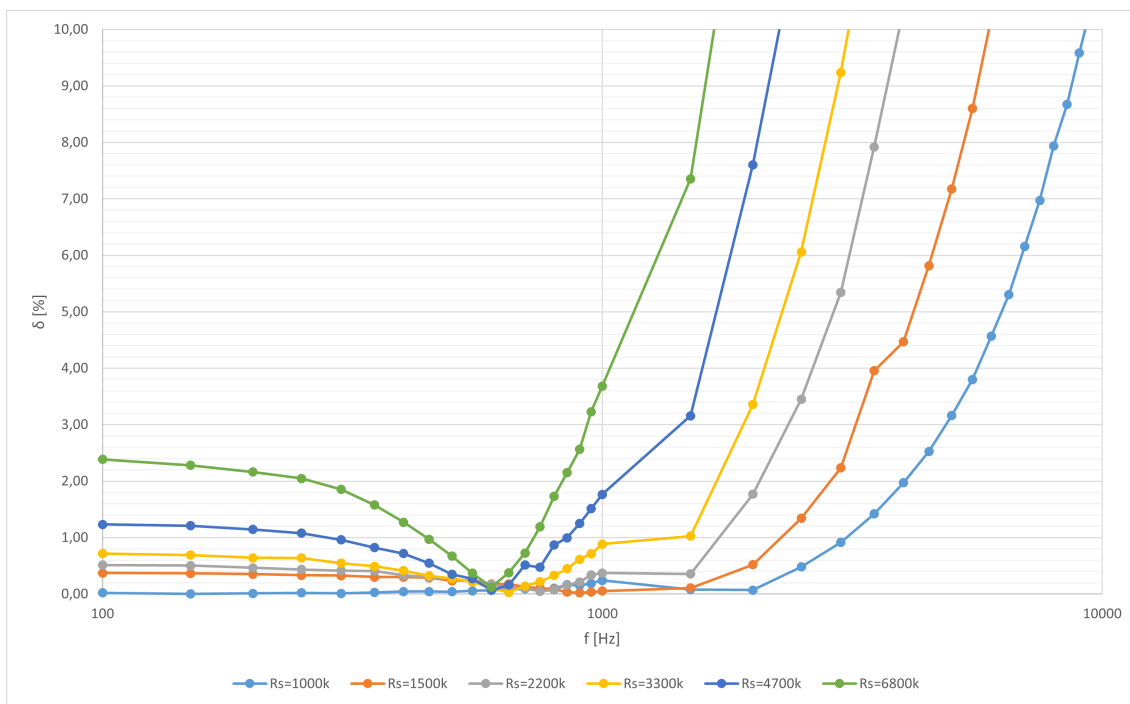
Obr. 7.2: Graf přesnosti odporové dekády v závislosti na frekvenci



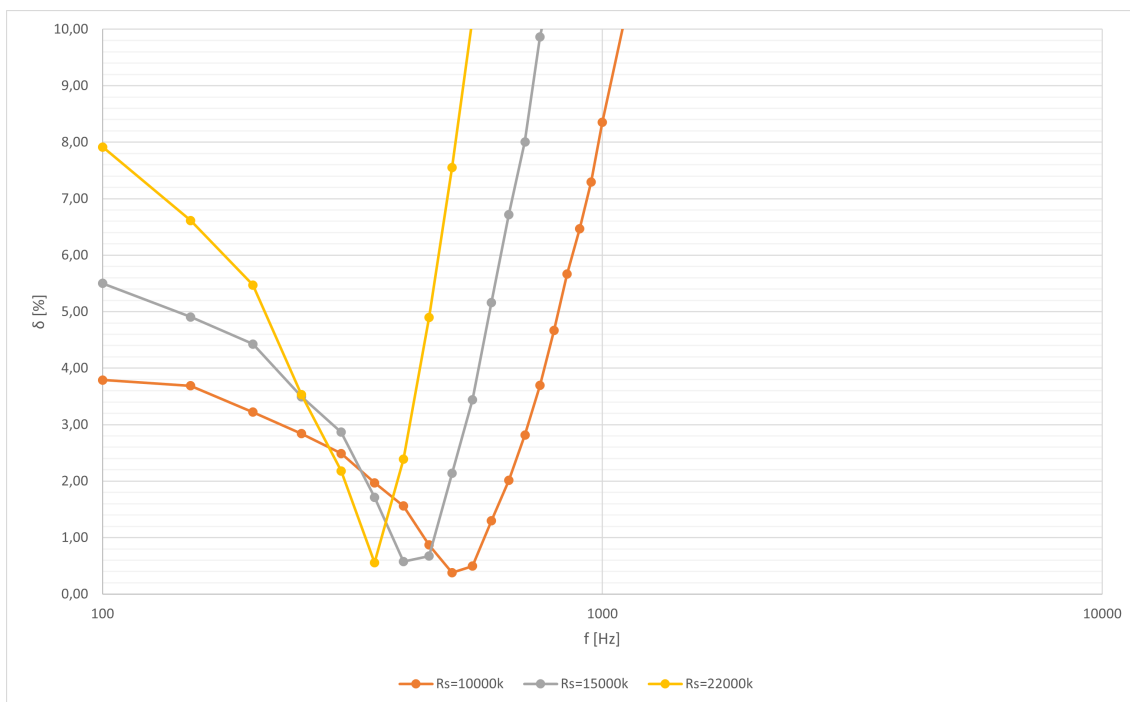
Obr. 7.3: Graf přesnosti odporové dekády v závislosti na frekvenci



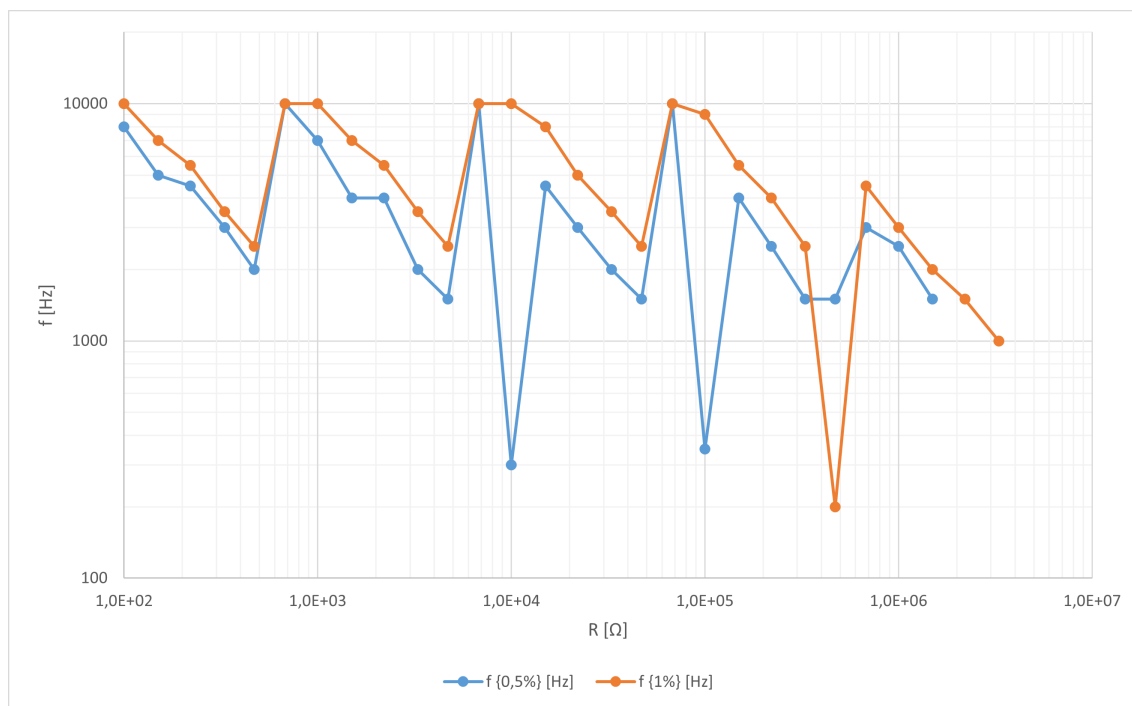
Obr. 7.4: Graf přesnosti odporové dekády v závislosti na frekvenci



Obr. 7.5: Graf přesnosti odporové dekády v závislosti na frekvenci

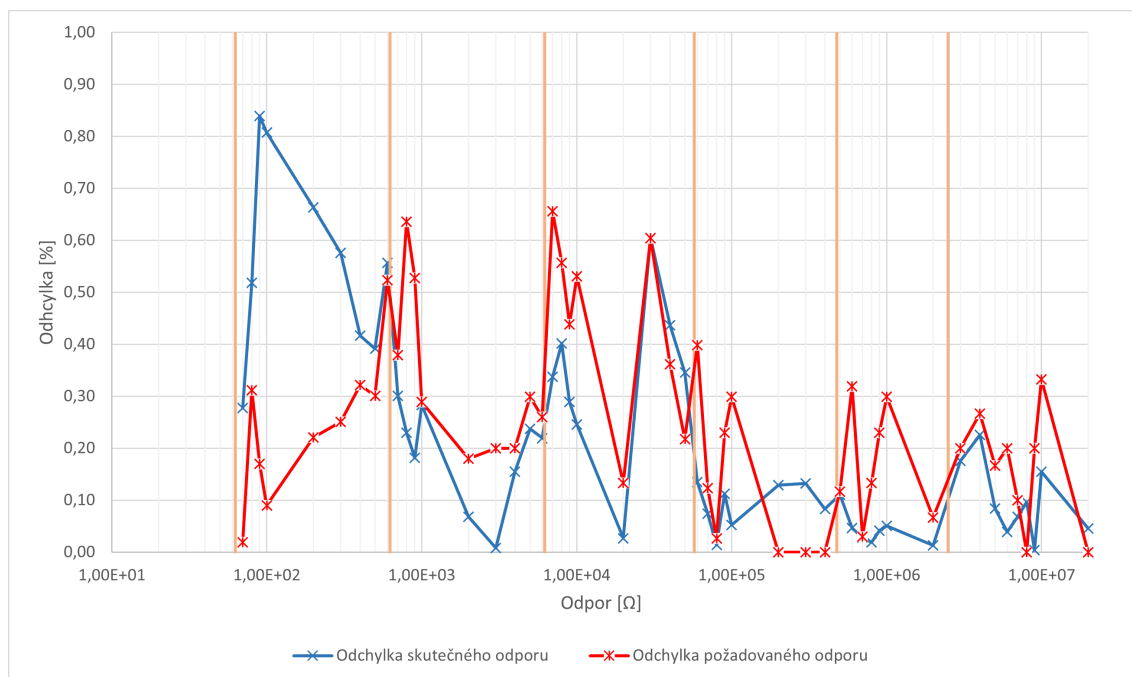


Obr. 7.6: Graf přesnosti odporové dekády v závislosti na frekvenci



Obr. 7.7: Graf maximální frekvence v závislosti na nastavené hodnotě odporu

oranžové čáry značí přechod mezi rozsahy dekády.



Obr. 7.8: Graf přesnosti odporové dekády v závislosti na nastavené hodnotě odporu při stejnosměrném proudu

Závěr

Cílem práce bylo navrhnout a realizovat programovatelnou odporovou dekádu určenou pro testování energy harvesterů. Přesnější parametry byly definovány v tabulce 1.1.

Pro porovnání dosavadních přístrojů dostupných na trhu byl v kapitole 2 proveden průzkum trhu. Byly popsány základní principy fungování dekád. V kapitole 2.4 byl popsán typ kapesních odporových dekád, který potenciálně nejlépe vyhovuje požadavkům. Přístroj navržený v této práci lze podle popisu zařadit do této kategorie.

Kapitoly 3 a 4 popisují možná řešení zapojení jak dekád se skutečnými rezistory, tak dekád pracujících na aktivním principu. Tyto prvotní návrhy zapojení byly otestovány v simulačním programu Simulink a také v reálném zapojení, kde byly změřeny jejich frekvenční parametry.

Na základě získaných dat z měření bylo vybráno zapojení s nejlepšími parametry a v kapitole 6 byl popsán postup, který vedl ke konečnému zapojení odporové dekády. Následně bylo vytvořeno schéma zapojení v programu KiCad, kde byl navržen i plošný spoj. Vlastnosti navrženého zapojení byly změřeny pro stejnosměrný signál a pro střídavý signál byla přístrojem HIOKI 3532 změřena frekvenční závislost, která je vykreslena na grafu 7.7. Výsledná přesnost pro celý rozsah odporové dekády při stejnosměrném proudu je vykreslena na grafu 7.8.

Výsledkem práce je deska plošného spoje, která realizuje funkci odporové dekády využívající aktivní princip. Zapojení je schopno zpracovávat střídavé signály do zadaného napěťového rozmezí $\pm 35V$. Pro stejnosměrný proud bez frekvenčních složek, odporová dekáda splňuje zadanou přesnost nastavené odporové hodnoty 1% pro celý rozsah. Pro střídavé signály dekáda splňuje přesnost 1% do nastaveného odporu $3,3M\Omega$ při frekvenci $1kHz$. Detailnější údaje jsou vykresleny v grafu 7.7.

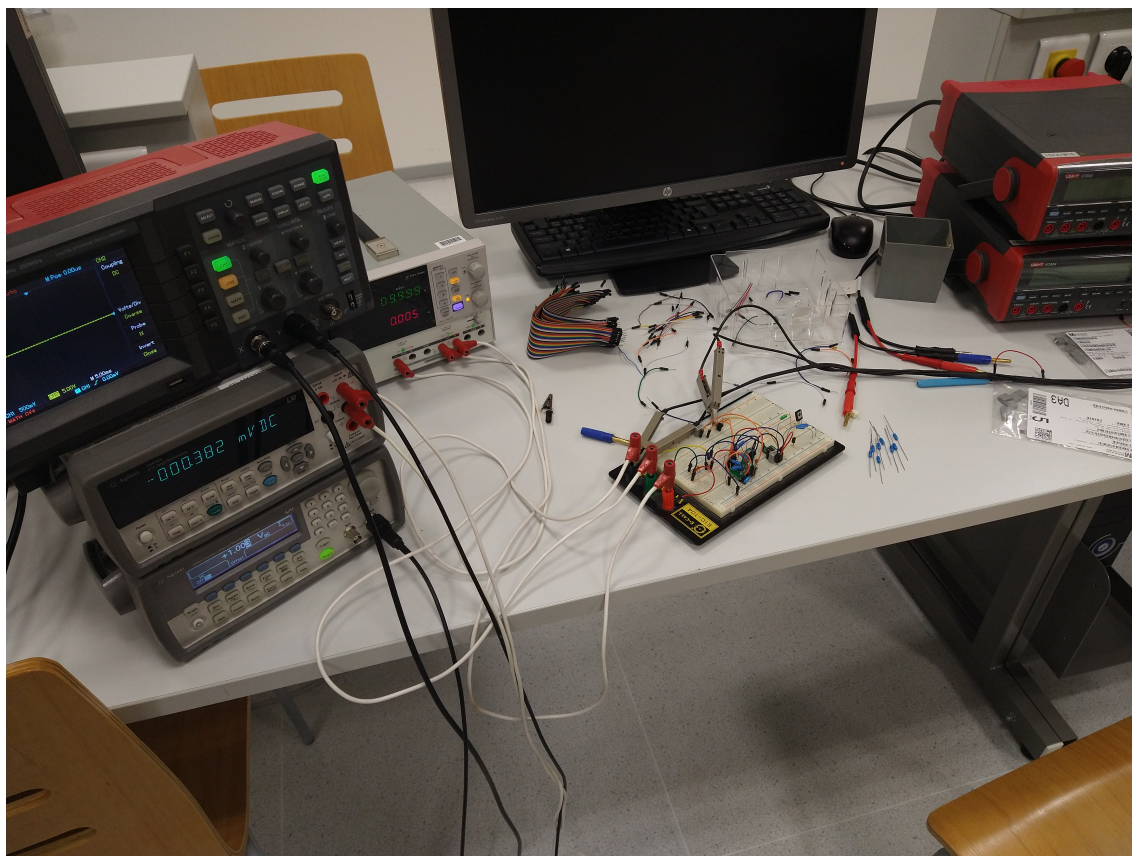
Literatura

- [1] Nurettin Sezer, Muammer Koç, A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting, *Nano Energy*, Volume 80, 2021, 105567, ISSN 2211-2855, <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105567>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285520311411>)
- [2] [Www.ietlabs.com](http://www.ietlabs.com). In: [Www.ietlabs.com](http://www.ietlabs.com) [online]. [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://www.ietlabs.com/1433.html>
- [3] [Www.hadex.cz](http://www.hadex.cz). In: [Www.hadex.cz](http://www.hadex.cz) [online]. [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://www.hadex.cz/img/zbozi/w907a.jpg>
- [4] Agilent 6060B. In: [Www.bellnw.com](http://www.bellnw.com) [online]. [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://www.bellnw.com/products/keysight-6063b>
- [5] OS-260, OS-270 Resistance Decade Boxes / RTD Simulator. [Www.ietlabs.com](http://www.ietlabs.com) [online]. [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://www.ietlabs.com/ohmsource.html>
- [6] 6060B and 6063B Single-Input 250 to 300 W Electronic Loads, GPIB. [Www.keysight.com](http://www.keysight.com) [online]. USA: © Keysight Technologies, 2019, 22. listopad 2019 [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-03205/data-sheets/5990-9308.pdf>
- [7] M632 Přesná odporová dekáda: Uživatelská příručka [online]. Brno, 2020, 2020, 73 [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://www.meatest.com/pages/File.aspx?id=2345ce2a-1d65-4cdd-bdb4-bf6b7eba05a5>
- [8] RDB-10. In: Digi-Key Electronics [online]. [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://www.digikey.cz/cs/products/detail/global-specialties/RDB-10/5231338>

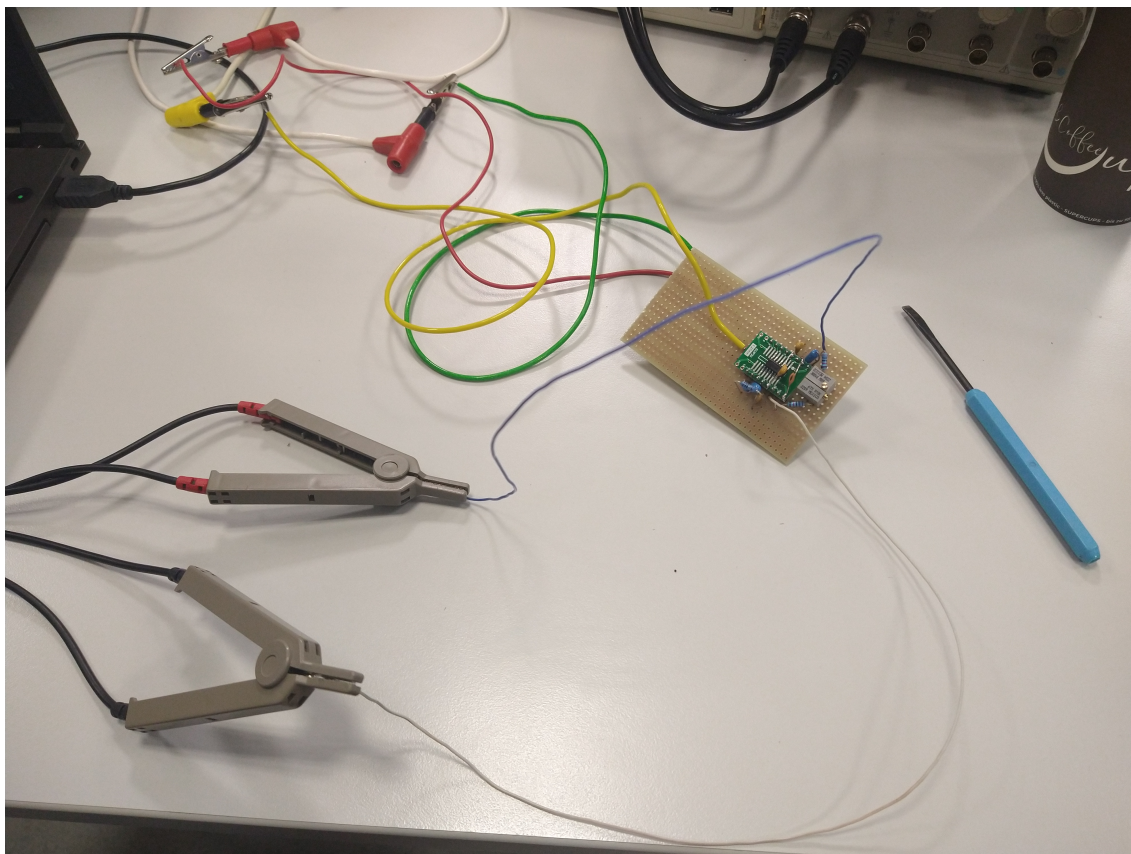
Seznam symbolů a zkratek

V_{os}	ofsetové napětí
I_b	nenulový proud do báze
R_{ON}	odpor v sepnutém stavu
R_{OFF}	odpor v rozepnutém stavu
I_{OFF}	únikový proud v rozepnutém stavu
SCPI	Standard Commands for Programmable Instruments
DPS	deska plošných spojů
OZ	operační zesilovač
E24	hodnoty odporové řady
SPST	Kontakt typu single pole single throw
USB	Universal serial bus

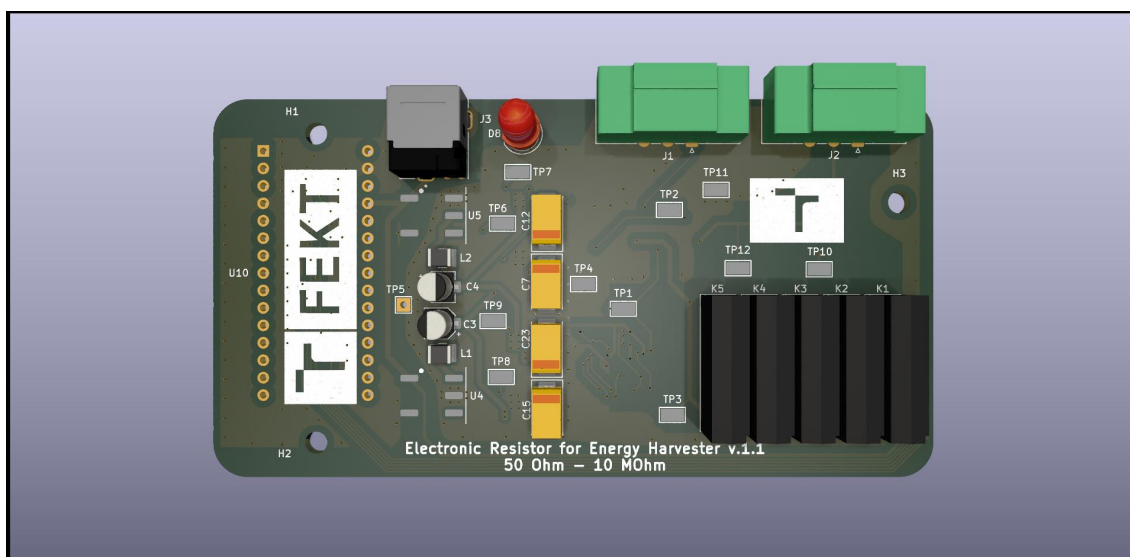
A Fotodokumentace



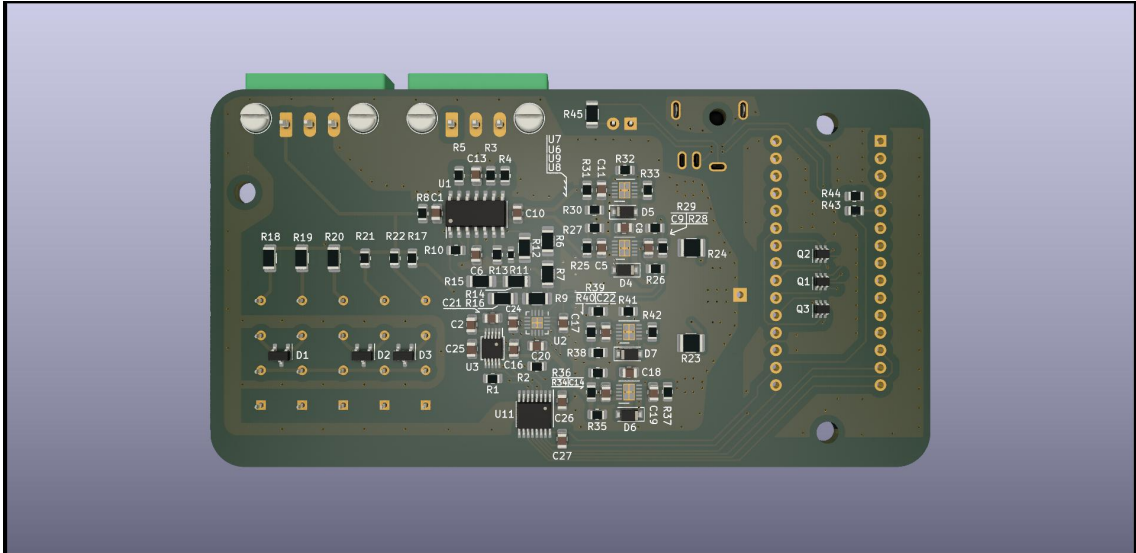
Obr. A.1: Měření zapojení na nepájivém poli



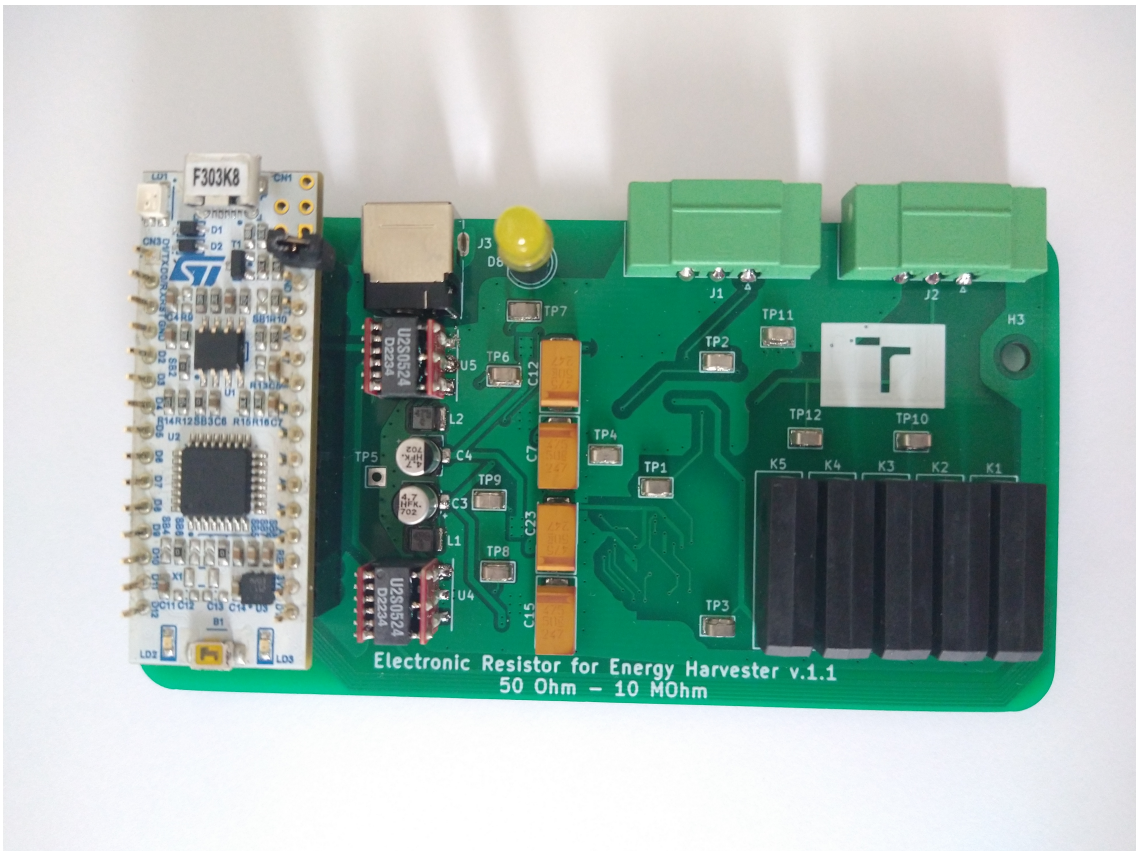
Obr. A.2: Měření zapojení na univerzální desce plošných spojů



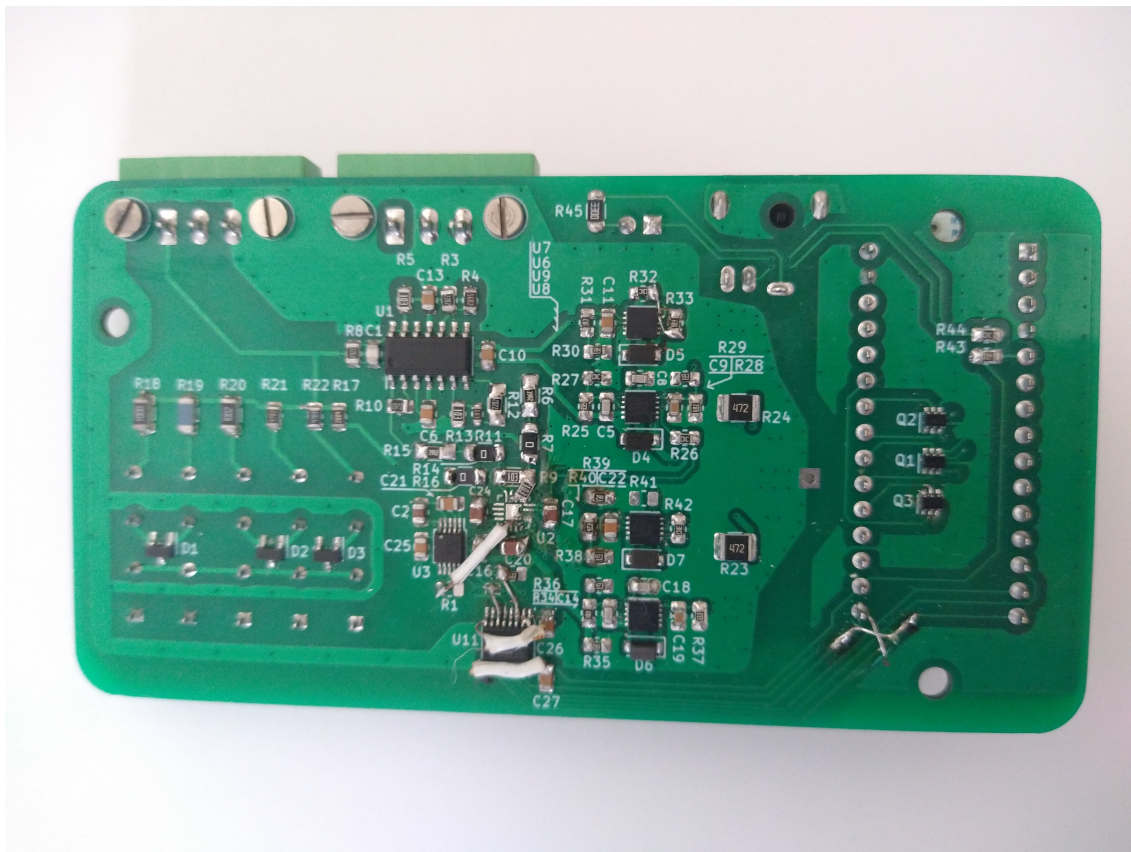
Obr. A.3: Model desky plošných spojů - horní strana



Obr. A.4: Model desky plošných spojů - spodní strana



Obr. A.5: Hotová deska plošných spojů - horní strana



Obr. A.6: Hotová deska plošných spojů - spodní strana

B Obsah elektronické přílohy

Electronic_Resistor_1_1.pdf	Schémata zapojení odporové zátěže
ParalelniNavrh.m	Skript pro navržení bloku sériové dekády
Start_design.m	Skript pro navržení odporové dekády pomocí strojového učení
Define_parameters.m	Definování parametrů pro skript strojového učení
Calculations_1pot.m	Skript s výpočty rovnic zapojení z.z. pro jeden potenciometr
Calculations_2pot.m	Skript s výpočty rovnic zapojení z.z. pro dva potenciometry
MěřeníNepajiveZZ.xlsx	Měření na nepájivém poli
MěřeníNepajive0hm.xlsx	Měření na nepájivém poli
MereniPajivePoleZZ.xlsx	Měření na pájivém poli
MereniFinalni.xlsx	Finální měření
Electronic_Resistor_1_1.zip	Projekt návrhu DPS (KiCad)