



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

TESTER KABELÁŽE

CABLE HARNESS TESTER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Stanislav Vlasák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. František Burian, Ph.D.

BRNO 2024



Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Stanislav Vlasák

ID: 230209

Ročník: 3

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Tester kabeláže

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Úkolem studenta bude navázat na předcházející práci Ing. Jakuba Valenty, charakterizovat hardware vytvořený v rámci jeho práce, případně navrhnout úpravy vedoucí ke zpřesnění měření.

1. Proveďte rešerši existujících testerů kabelových svazků, principů měření propojení a izolačního odporu.
2. Charakterizujte vlastnosti a dosažitelné přesnosti testeru vytvořeného ing. Jakubem Valentou
3. Identifikujte problémová místa v obvodu a navrhnete řešení, proveďte nutné výpočty které prokáží zlepšení.
4. Navrhnete opravu plošného spoje řídicí části implementující opravy, pokud možno s minimálními zásahy do desky spínačů.
5. Realizujte plošný spoj řídicí části a tento otestujte spolu s upraveným původním testovacím skriptem od Ing. Valenty.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

BI, Zhuming, Carlos POMALAZA-RÁEZ, Dustin HERSHBERGER, Jeremy DAWSON, Andrew LEHMAN, John YUREK a Jared BALL. Automation of Electrical Cable Harnesses Testing. Robotics. 2018, 7(1). DOI: 10.3390/robotics7010001. ISSN 2218-6581. Dostupné také z: <http://www.mdpi.com/2218-6581/7/1/1>

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 22.5.2024

Vedoucí práce: Ing. František Burian, Ph.D.

Ing. Miroslav Jirgl, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Práce se zabývá problematikou testování a zkoušení kabelů a kabelových svazků. Navazuje na diplomovou práci Ing. Jakuba Valenty [1]. Tato práce obsahuje rozbor předcházející diplomové práce a upozorňuje na její nedostatky. Rovněž popisuje vlastnosti vzniklého prototypu kabelového testeru. Určuje jeho přesnost a navrhuje lepší – přesnější měření vlastností kabelového svazku. Cílem práce je vytvořit funkční vzorek kabelového testeru na základech práce pana Valenty.

KLÍČOVÁ SLOVA

vodič, kabel, kabelový svazek, izolační odpor, propojení, kontinuita, test, zkouška, tester

ABSTRACT

This paper is focused on the problematics in testing of cables and wire harnesses. It follows up on a diploma thesis by Ing. Jakub Valenta. This paper consists of analysis of said diploma thesis and points out its shortcomings. Specifications of created prototype of cable tester are mentioned in this paper, including its accuracy and suggestions for more accurate measurement of cable harnesses. Goal of this paper is to create a functional sample of cable tester based on foundations of Ing. Valenta

KEYWORDS

Conductor, cable, cable harness, insulation resistance, connections, continuity, test, examination, tester

VLASÁK, Stanislav. *Tester Kabeláže*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2024, 96 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. František Burian, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Stanislav Vlasák
VUT ID autora: 230209
Typ práce: Bakalářská práce
Akademický rok: 2023/24
Téma závěrečné práce: Tester Kabeláže

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 bakalářské práce panu Ing. Františkovi Burianovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora

Obsah

Úvod	21
1 Testování kabelových svazků	23
1.1 Izolační odpor	23
1.1.1 Princip testu izolačního odporu	23
1.2 Dielektrická pevnost izolace	24
1.2.1 Princip testu dielektrické pevnosti	24
1.3 Správnost propojení konektorů	25
1.3.1 Princip testu správnosti propojení	25
1.4 Přechodový odpor	26
1.5 Požadavky na navrhovaný tester kabeláže	26
2 Analýza původního zapojení	27
2.1 Výpočet základního vztahu	27
2.2 Výpočet nejistot součástí	30
2.2.1 Odpory	30
2.2.2 Zdroj napětí	31
2.2.3 AD převodník	32
2.3 Výpočet celkové nejistoty obvodu	32
2.4 Vyhodnocení	33
3 Návrh vylepšení a jeho analýza	37
3.1 Návrh zapojení	37
3.2 Výpočet základního vztahu	37
3.3 Výpočet celkové nejistoty	40
3.4 Vyhodnocení	40
4 Realizace	43
4.1 Návrh zapojení	43
4.1.1 Napájení	43
4.1.2 Měřicí obvod	45
4.1.3 Komunikace	48
4.1.4 Uživatelské rozhraní	48
4.1.5 Konektory	50
4.2 Návrh desky plošného spoje	51
4.2.1 Rozdělení desky	52
4.2.2 Zamezení rušení	52
4.2.3 Izolační vzdálenost	52

4.2.4	Šířka vodivých cest	53
4.3	Návrh zapouzdření	54
5	Měření	55
5.1	Kontrolní odpory	55
5.1.1	Výpočet chyby nepřímého měření odporu	56
5.2	Oživování	57
5.2.1	Kontrola zdrojů	57
5.2.2	Kontrola AD převodníku	58
5.2.3	Kontrola měřícího obvodu	61
5.3	Měření bez přepínačové desky	63
5.4	Měření s přepínačovou deskou	66
5.5	Testovací skript	68
	Závěr	71
	Literatura	73
	Seznam příloh	77
	A Schéma zapojení	79
	B Návrh desky plošného spoje	81
	C Výkresy navržené krabičky	83
	D Měření testovacích odporů	87
	E Obsah elektronické přílohy	95

Seznam obrázků

1.1	Průřez kabelem s vyobrazeným unikajícím proudem	24
1.2	Vývojový diagram demonstrující průběh procesu zkoušky kontinuity .	26
2.1	Zapojení AD převodníku z práce Jakuba Valenty	27
2.2	Schéma zapojení pro výpočty	27
2.3	Simulace v MicroCapu pro $R_Z = 5 \Omega$	29
2.4	Simulace v MicroCapu pro $R_Z = 1000 \Omega$	29
2.5	Obdélníkové absolutní rozložení	30
2.6	Normální rozložení	31
2.7	Obdélníkové absolutní rozložení posunutý o systematickou chybu . . .	32
2.8	Celková nejistota při měření izolačního odporu	34
2.9	Relativní celková nejistota při měření izolačního odporu	35
2.10	Závislost izolačního odporu R_Z na napětí U_{A-B}	35
3.1	Schéma navrhovaného zapojení	37
3.2	Náhrada zapojení	38
3.3	Simulace v MicroCapu pro navrhované vylepšení	40
3.4	Celková nejistota při měření izolačního odporu	41
3.5	Relativní celková nejistota při měření izolačního odporu	41
4.1	Schéma zapojení variantního osazení spouštění 100V zdroje	45
4.2	Schéma zapojení první části měřícího obvodu	46
4.3	Schéma zapojení druhé části měřícího obvodu	46
4.4	Graf závislosti napětí na měřeném odporu podle zvoleného odporu R_9	47
4.5	Zapojení optočlenů z původní práce	48
4.6	Schéma zapojení uživatelského rozhraní	49
4.7	Schéma zapojení konektoru sloužícímu ke spojení se spínačovou deskou	50
4.8	Schéma zapojení externího konektoru	51
4.9	Náhled finálního produktu v programu FreeCAD	54
5.1	Schéma zapojení pro měření na přístroji KEITHLEY 2400	55
5.2	Měření zdrojů bez R_{pi} s proudovým omezením na laboratorním zdroji	57
5.3	Měření zdrojů bez R_{pi} bez proudového omezení na laboratorním zdroji	58
5.4	Měření zdrojů s Raspberry Pi	58
5.5	Zapojení při ověřování funkčního AD převodníku	59
5.6	Výpis konzole při zadání příkazu <code>i2cdetect</code>	59
5.7	Výpis konzole při používání příkazů <code>i2ctransfer</code>	60
5.8	Graf naměřených hodnot napětí měřícího obvodu	62
5.9	Graf vypočtených proudů z naměřených hodnot měřícího obvodu . . .	62
5.10	Graf proudů měřícího obvodu ze simulace	63
5.11	Graf závislosti napětí 100V zdroje na čase	64

5.12 Graf odečteného odporu na čase	65
5.13 Graf odečteného odporu na čase bez kompenzace napětí 100V zdroje	65
5.14 Graf odečteného odporu na čase s kompenzací svodového proudu . . .	66
5.15 Schéma zapojených testovacích odporů do odporové sítě	67

Seznam tabulek

2.1	Ověřování správnosti výsledného vztahu	29
2.2	Vypočtené nejistoty jednotlivých rezistorů	31
3.1	Ověřování správnosti výsledného vztahu	39
4.1	Izolační vzdálenosti pro jednotlivé skupiny vodivých cest	53
5.1	Přepočet hodnot získaných z AD převodníku	60
5.2	Naměřené hodnoty napětí k ověření funkčnosti zapojení	61
5.3	Naměřené hodnoty napětí přepočítané na hodnoty proudu	61
5.4	Naměřené hodnoty z automatického měření odporové sítě	67
5.5	Naměřené hodnoty z automatického měření odporové sítě po kalibraci	68
5.6	Relativní chyba při měření odporové sítě	68

Seznam výpisů

5.1	Výřez nastavení config.txt pro RaspberryPi	69
5.2	Načtení knihovny a nastavení vzorkovací frekvence pro devicetree . .	69
5.3	Příklad čtení hodnot pomocí devicetree	69
5.4	Výpočet hodnoty odporu	70
5.5	Výřez upraveného měřicího skriptu	70

Úvod

Kabely jsou nedílnou součástí elektrických zařízení. Jsou důležité pro napájení jednotlivých elektrických zařízení nebo k přenosu dat mezi nimi. V každém zařízení se pak může vyskytovat mnoho kabelů, a je žádoucí, aby byly v něm přehledně a jednoduše uspořádány. Pro tenhle účel se vyrábí kabelové svazky. Ovšem je důležité, aby každý tento svazek byl řádně kontrolován, před svojí aplikací. Tato kontrola může probíhat ručně, ovšem k množství kabelů to může být dost náročné a zdlouhavé. Je tak snaha celou tuhle rutinní činnost automatizovat, právě pomocí testeru kabeláže.

Tester kabeláže, kterým se tu budu zabývat, navazuje na dosažené výsledky z práce Ing. Jakuba Valenty. V první části je tak třeba se seznámit s principy pro měření kabelů a kabelových svazků. V návaznosti na tom je třeba se seznámit s prací Ing. Jakuba Valenty a charakterizovat problémové oblasti vedoucí k nepřesnému výsledku při měření. Pro zlepšení měření je třeba tyto problémy odstranit jiným řešením, které bude prokazatelně lepší. Tohle řešení je třeba řádně analyzovat a porovnat s předešlým řešením. Následně bude potřeba navrhnout a vyrobit nový plošný spoj, který bude obsahovat právě zmiňované změny. Tento plošný spoj bude osazen a oživen upraveným testovacím skriptem z práce Ing. Jakuba Valenty, čímž vznikne funkční tester kabeláže.

1 Testování kabelových svazků

Kabely se do kabelových svazků svazují především za účelem přehledného a jednoduchého uspořádání. Pokud ovšem takhle kabely svážeme do svazku, tak je třeba si uvědomit, že se jednotlivé kabely mohou ovlivňovat mezi sebou. Klade se tak důraz na to, aby izolace kabelů byla dostatečná, aby nedocházelo ke vzájemnému rušení. Z vlastností izolace nás nejvíce zajímá izolační odpor a dielektrická pevnost izolace.

Kabelové svazky jsou navíc nejčastěji zakončeny konektory pro snadnější připojení k zařízení. Je tak třeba i po výrobě kontrolovat správné propojení konektorů s kabelovým svazkem. U kabelů zakončených konektory vzniká taky jev nazývaným přechodový odpor.

Jednotlivé kontrolované vlastnosti jsou rozepsány v následujících podkapitolách.

Vzhledem k tomu, že by kontrola jednotlivých vlastností kabelového svazku trvala ručně příliš dlouho, lze tento čas značně ušetřit využitím přístroje, který celý svazek po jeho zapojení sám a velice rychle otestuje. [2]

1.1 Izolační odpor

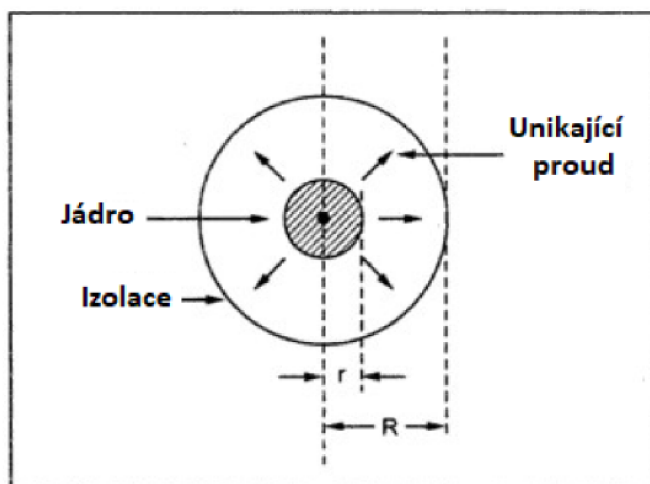
Aby nedocházelo k nežádoucím vlivům na okolí kolem kabelu, tak jsou všechny vodiče od okolí odděleny vrstvou elektrické izolace. Ta má za úkol zabránit úniku elektrického proudu. Jak je znázorněno na obrázku 1.1 [9], tak izolace kabelu slouží jako odpor vůči těmto unikajícím proudům. Vzhledem k tomu, že izolace je vyrobena z dielektrika, tak jí můžeme charakterizovat hodnotou elektrického odporu, který je právě nazýván jako *izolační odpor*.

1.1.1 Princip testu izolačního odporu

Při měření izolačního odporu se zjišťuje aktuální stav izolace mezi jednotlivými žilami kabelu, a vůči ostatním vodivým prvkům instalace nebo taky vůči zemi.

Měřič izolačního odporu zpravidla funguje stejně jako ohmmetr, jen musí být přizpůsoben pro měření zdaleka větších hodnot odporu, který se v případě izolací pohybuje v řádech desítek až stovek $M\Omega$. Některé technické normy ovšem uvádějí, že je dostačující i izolační odpor větší jak $1 M\Omega$ [27]

Při měření se používá stejnosměrného napětí, který je pro tyto případy v řádech od desítek voltů až kilovoltů. Toto napětí záleží na aplikaci daného kabelového svazku, kde se bude testovat podle příslušných normy. [29]



Obr. 1.1: Průřez kabelem s vyobrazeným unikajícím proudem.

Během měření nesmí klesnout měřící proud pod hodnotu 1 mA. Je také nutností, vzhledem na podmínkách okolí, při měření odečítat hodnoty až po jejich ustálení. [12][28]

1.2 Dielektrická pevnost izolace

Jak bylo již zmíněno, tak izolace odporu je zpravidla vyrobena z dielektrika. To je látka, která má schopnost polarizace, což je reakce na přiložené elektrické pole. Velikost polarizace je závislá na velikosti intenzity elektrického pole působící z vnějšku na dielektrikum. Při velmi vysokém působení elektrického pole na dielektrikum dojde k *dielektrickému průrazu*. Při něm může dojít k nevratnému poškození a úplné ztrátě funkčnosti.

Dielektrická pevnost je pak definována jako vlastnost dielektrika, kdy dojde k dielektrickému průrazu při určité hodnotě intenzity vnějšího elektrického pole působícího na dielektrikum. [10]

1.2.1 Princip testu dielektrické pevnosti

Jedná se o vysokonapěťovou zkoušku, při které se zjišťuje odolnost vůči průrazům dané izolace. Zkoumá se při ní elektrická pevnost, která se měří jako průrazné napětí. Jedná se o napětí, při kterém u dielektrik nejčastěji dojde k nevratnému poškození dielektrického materiálu.

Průrazné napětí se hledá postupným zvyšováním napětí převyšující mnohonásobek napětí při běžném provozu. Při testování tak izolace postoupí takovému vyso-

kému elektrickému napětí, při kterém by ještě nemělo nastat k trvalému poškození.

Když zjistíme hodnotu průrazného napětí, tak můžeme dielektrickou pevnost vypočítat pomocí následujícího vzorce (1.1).

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (1.1)$$

kde je: E_p dielektrická pevnost [V/m]
 U_p průrazné napětí [V]
 d tloušťka dielektrika [m]

Testování dielektrické pevnosti se může lišit na základě využití kabelového svazku podle příslušných norem [30].

1.3 Správnost propojení konektorů

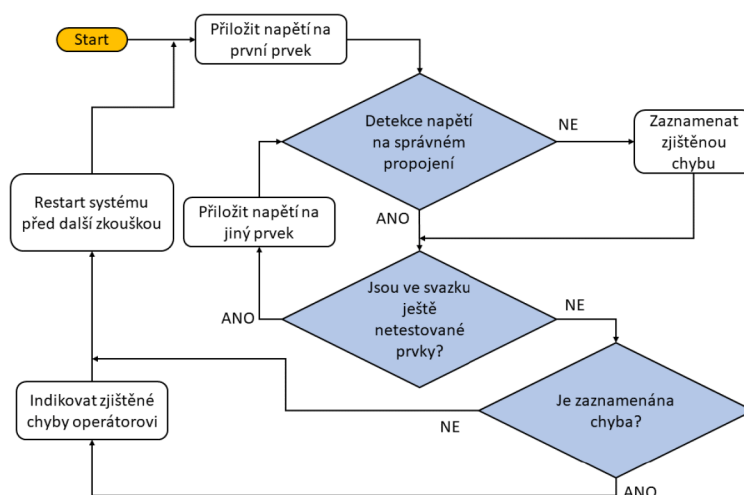
Spojením velkého množství kabelů do kabelového svazku si znemožňujeme snadnou vizuální kontrolu a jednoznačné rozlišení. Když se na konce kabelů přidělají konektory, tak je třeba vyzkoušet před prvním použitím správné připojení mezi těmito konektory. Jinak řečeno, že jsou správně oba dva konce pinů na konektoru kabelového svazku správně vodivě propojeny. Styl propojení se může u jednotlivých aplikací měnit, neboť některé aplikace vyžadují třeba křížení.

1.3.1 Princip testu správnosti propojení

Test správnosti propojení, jinak zvaný taky jako test continuity, je dělán pro ověření správné vodivosti všech žil kabelu v celé své délce. Tím se i ověří, že nedošlo k poškození uvnitř pláště. Pokud se jedná o kabelový svazek ukončen konektory, tak lze i zkontrolovat správné vodivé spojení mezi piny těchto konektorů.

Test je prováděn tak, že se na obou stranách kabelového svazku přikládá měřicí zařízení k jednotlivým žilám. Pokud jsou konce mezi sebou vodivě spojeny, začne uzavřeným obvodem protékat proud a tím je vyhodnoceno. U kabelového svazku jsou pak testovány všechny možné kombinace. Testem continuity projde kabel právě jenom v případě, kdy jsou vyhodnoceny vodivé propojení jen tehdy, kdy je to žádoucí.

Proces testování je vyobrazen na vývojovém diagramu na obrázku 1.2. Při tomhle testování je nejdůležitější, aby byl otestován každý jednotlivý prvek, tedy každá možná varianta propojení.



Obr. 1.2: Vývojový diagram demonstrující průběh procesu zkoušky kontinuity. [2]

1.4 Přechodový odpor

Tato vlastnost se především vyskytuje u kabelů opatřených konektory, nebo u kabelů upevněných ve svorkovnici. Zkrátka tam, kde se navzájem dotýkají dva vodiče, a tak tam vzniká elektrický kontakt. Přes tenhle kontakt pak teče proud z jednoho vodiče do druhého. Pokud je kontakt udělán správně, tak považujeme tento odpor za zanedbatelný. [11]

Pro špatně vytvořený kontakt pak platí, že velikost přechodového odporu v místě kontaktu prudce roste. To může mít za následek, že při větším průtoku elektrického proudu, nám vznikne na místě kontaktu větší úbytek napětí, a tím i spojené nadměrné zahřívání, které může vést až k požáru.

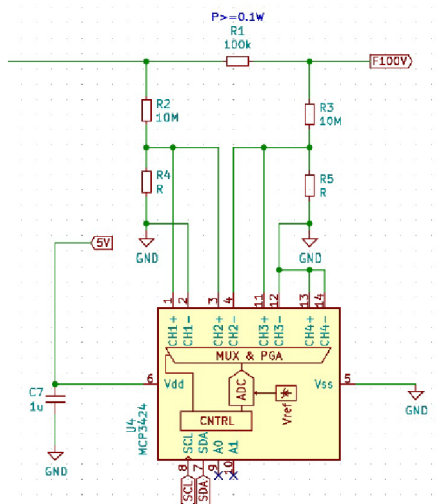
1.5 Požadavky na navrhovaný tester kabeláže

Bude požadováno, aby tester po zapojení testovaného kabelového svazku a jeho spuštění provedl přednastavený testovací program, kde bude porovnávat naměřené hodnoty s nastavenými prahovými hodnotami, a tak následně vyhodnotit, zda daný svazek prošel či neprošel testem.

Aby se zjednodušila problematika navrhovaného testeru kabeláže, tak se nebude testovat dielektrická pevnost a ani přechodový odpor. Budu se tak více zaměřovat na problematiku měření izolačního odporu a samozřejmě i správnost propojení konektorů. Pro měření izolačního odporu se bude používat bezpečné napětí 100 V. Vyšší napětí není pro tyto účely potřebné.

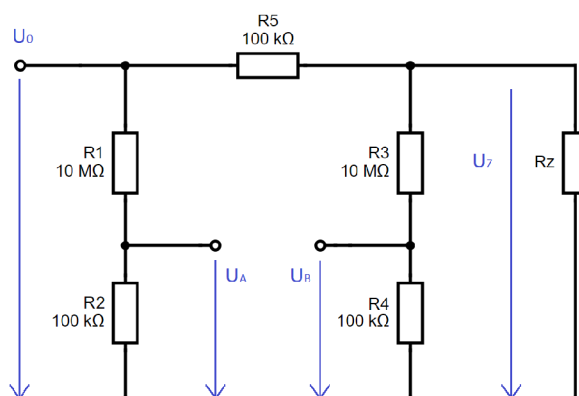
2 Analýza původního zapojení

2.1 Výpočet základního vztahu



Obr. 2.1: Zapojení AD převodníku k omezovacímu rezistoru R1 přes napěťový dělič z práce Jakuba Valenty. [1]

Pro analýzu jsem vzal zapojení (2.1) týkající se děličů napětí, ze kterých následně AD převodník odečítá úbytek napětí na omezovacím odporu. V analýze budu hlavně zjišťovat, jaký mají vliv tolerance odporů na výsledek pomocí citlivostní funkce (Jakobián). Pro svoje výpočty využívám svoje schéma s jiným číslováním odporů (2.2).



Obr. 2.2: Schéma zapojení pro výpočty.

Jednotlivé hodnoty odporů jsem vzal z fyzického zapojení zapájených odporů na desce. Zjistil jsem díky tomu i přibližné tolerance odporů (2.2.1) a jejich konkrétní hodnoty pomocí kódového označení.

Napětí U_A závisí jako dělič napětí přímo na napětí U_0 a odporech R_1 a R_2 podle následujícího vztahu. (2.1)

$$U_A = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_0 \quad (2.1)$$

Napětí U_B závisí jako dělič napětí na odporech R_3 a R_4 , ovšem díky úbytku napětí na omezovacím odporu R_5 závisí na napětí na zátěži U_Z podle následujícího vztahu. (2.2)

$$U_B = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot U_Z \quad (2.2)$$

Napětí na zátěži U_Z (2.2) lze poté zjednodušeně vyjádřit jako dělič napětí mezi odporem R_5 a sério-paralelní kombinací odporů R_Z , R_3 a R_4 v následujícím vztahu (2.3) značený jako R_{Z34} .

$$U_Z = \frac{R_{Z34}}{R_5 + R_{Z34}} \cdot U_0 \quad (2.3)$$

Poté si vyjádříme tuto sério-paralelní kombinaci odporů R_Z , R_3 a R_4 .

$$R_{Z34} = R_{Z34} || (R_3 + R_4) = \frac{R_Z \cdot (R_3 + R_4)}{R_Z + R_3 + R_4} \quad (2.4)$$

Po následném dosazení a zjednodušení dostaneme vztah pro U_B .

$$U_B = \frac{R_4 \cdot R_Z}{R_5 \cdot (R_Z + R_3 + R_4) + R_Z \cdot (R_3 + R_4)} \cdot U_0 \quad (2.5)$$

Teď stačí už jen vyjádřit rozdíl napětí U_{A-B} (2.6) mezi napětím U_A (2.1) a U_B (2.5).

$$U_{A-B} = U_A - U_B = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4 \cdot R_Z}{R_5 \cdot (R_Z + R_3 + R_4) + R_Z \cdot (R_3 + R_4)} \right) \cdot U_0 \quad (2.6)$$

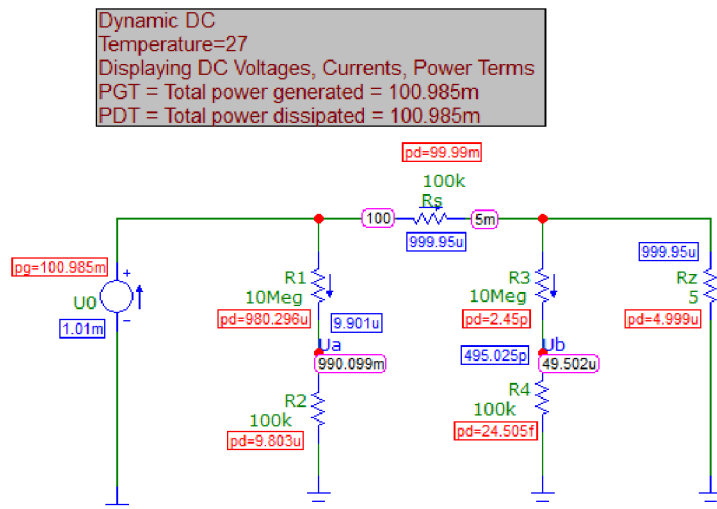
Tyto vztahy jsem si vložil do MatLabu a dosadil konkrétní hodnoty odporů a napětí. Dále jsem si vytvořil stejný obvod v simulačním programu MicroCap, kde jsem stejné hodnoty dosadil a výsledky jsem následně porovnal mezi sebou.

Z tabulky 2.1 jsou pak vidět dosazené a výsledné hodnoty z obou programů pro porovnání.

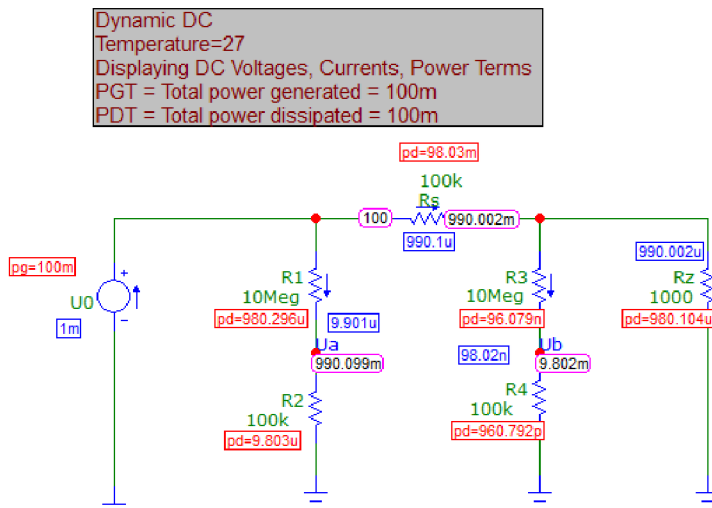
Je vidět, že se rozdíly hodnot týkají jenom v zaokrouhlování, takže můžeme předpokládat, že výsledný vztah je správný.

Z výsledného vztahu (2.6) tak vyjádřím odpor zátěže R_Z , který označím jako R_{ZV} . (2.7)

$$R_{ZV} = \frac{R_5 \cdot (R_3 + R_4) \cdot \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{U_{A-B}}{U_0} \right)}{R_4 - \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{U_{A-B}}{U_0} \right) \cdot (R_3 + R_4 + R_5)} \quad (2.7)$$



Obr. 2.3: Simulace v MicroCapu pro $R_Z = 5 \Omega$ [4]



Obr. 2.4: Simulace v MicroCapu pro $R_Z = 1000 \Omega$ [4]

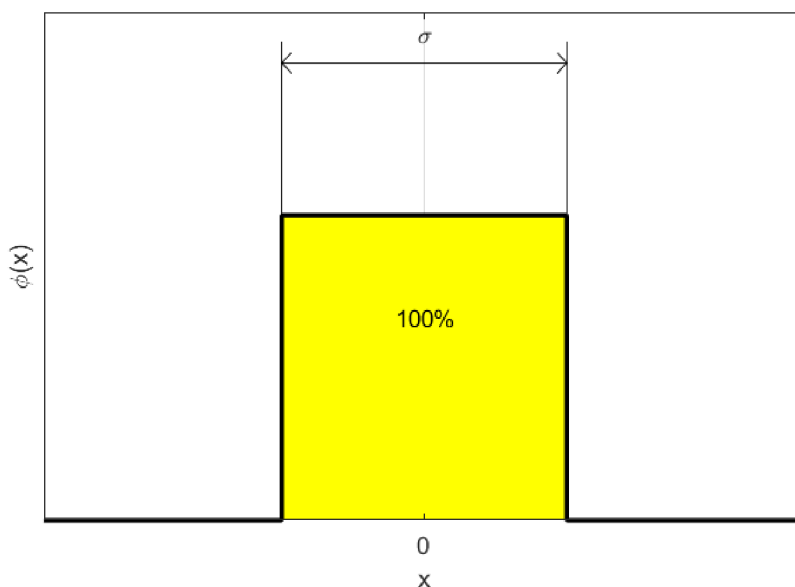
Tab. 2.1: Ověřování správnosti výsledného vztahu

Program	MatLab		MicroCap	
$R_Z [\Omega]$	1000	5	1000	5
$U_A [\text{mV}]$	990,1	990,1	990,099	990,099
$U_B [\mu\text{V}]$	980	49,502	980,2	49,502

2.2 Výpočet nejistot součástek

2.2.1 Odpory

Zapojeno je několik odporů o různých hodnotách a tolerancích. Hodnoty odporů a jejich tolerance beru podle toho, jaké jsou přímo zapájeny na desce. Odpory s čtyřmístným kódem jsou s 1% tolerancí, naopak odpory s třímístným kódem odpovídají 2% až 10% tolerancí. Budu proto u nich počítat s nejhůrší možnou variantou, tedy s tolerancí 10 %.



Obr. 2.5: Obdélíkové absolutní rozložení

Z velikosti odporu a jeho tolerance jsem schopný zjistit jeho rozptyl. U odporů platí, že distribuční funkce má pro ně obdélíkové absolutní rozdělení. Využijeme tedy vztah (2.9).

$$R_1 = x_1 \pm \delta x_1 \% \quad (2.8)$$

$$u^2 = \frac{a^2}{3} \quad (2.9)$$

Příklad výpočtu nejistoty (2.10) pro odpor R_1 z tabulky 2.2.

$$u^2 = \frac{\left(x \cdot \frac{\delta x}{100}\right)^2}{3} = \frac{\left(10 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{100}\right)^2}{3} = 3,3333 \cdot 10^9 \Omega^2 \quad (2.10)$$

Velikost odporu se přepočítává z kódového označení XYZ tak, že se vždy vezme poslední cifra, která se následně aplikuje ve vztahu $XY \cdot 10^Z$. [6]

Příklad výpočtu velikosti odporu (2.11) R_1 z tabulky 2.2.

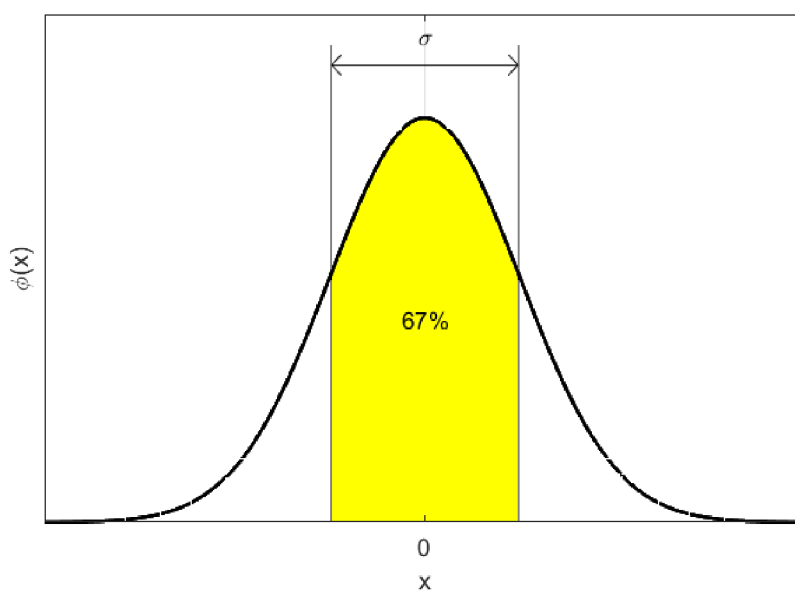
$$R_1 = XY \cdot 10^Z = 100 \cdot 10^5 = 10^7 = 10 \text{ M}\Omega \pm 10\% \quad (2.11)$$

Tab. 2.2: Vypočtené nejistoty jednotlivých rezistorů

Značení odporu	Značení odporu z práce Valenty	Kód	Velikost x	Tolerance δx	Nejistota u^2 [Ω^2]
R1	R2	1005	10 M Ω	1 %	3.3333e+09
R2	R4	104	100 k Ω	2÷10 %	3.3333e+07
R3	R3	1005	10 M Ω	1 %	3.3333e+09
R4	R5	104	100 k Ω	2÷10 %	3.3333e+07
R5	R1	1003	10 M Ω	1 %	3.3333e+05

2.2.2 Zdroj napětí

Jedná se o stejnosměrný zdroj napětí o velikosti napětí na výstupu 100 V s označením A01P-12. Podle datasheetu [7] dosahuje jeho chyba na výstupu k 5% od jmenovaného napětí. U zdroje napětí počítám s distribuční funkcí normálního rozdělení.



Obr. 2.6: Normální rozložení

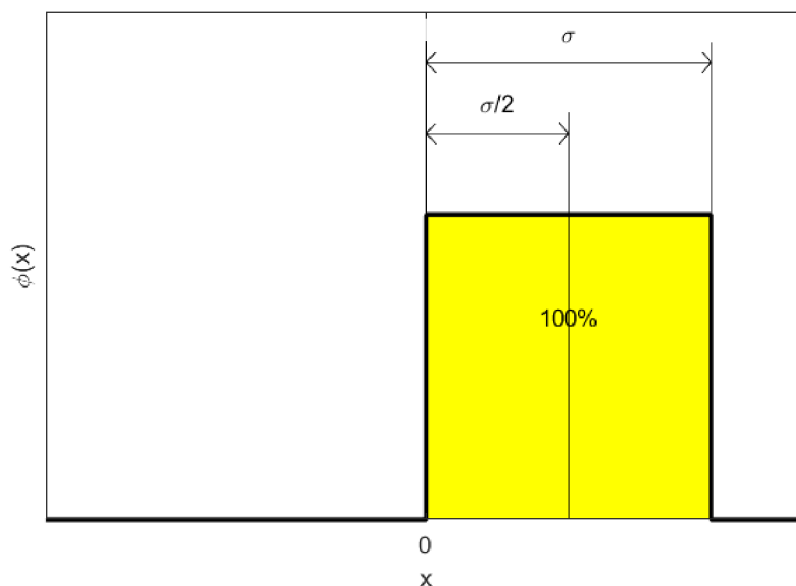
Jedná se o normální rozdělení s 95% konfidencí, platí tak vztah (2.12).

$$u^2 = \frac{a^2}{1,96} \quad (2.12)$$

$$u^2 = \frac{\left(U \cdot \frac{\delta U}{100}\right)^2}{1,96} = \frac{\left(100 \cdot \frac{5}{100}\right)^2}{1,96} = 12.7551 \text{ V}^2 \quad (2.13)$$

2.2.3 AD převodník

Je použit 18 bitový AD převodník s označením MCP3424-E/SL. Pro analogově digitální převodník platí, že rozptyl hodnot odpovídá rozlišovací schopnosti posledního bitu. Jedná se tak o obdélníkový absolutní rozdělení distribuční funkce posunutou o systematickou chybu měření. Tuhle systematickou chybu neberu v potaz, zajímají nás totiž jen nahodilé chyby.



Obr. 2.7: Obdélníkové absolutní rozložení posunutý o systematickou chybu

Pro absolutní obdélníkové rozdělení platí stejný vztah jako u odporů (2.9), neboť zanedbávám stejnosměrný posuv

$$u^2 = \frac{\left(\frac{U_{\text{ref}}}{2^{n-1}}\right)^2}{3} = \frac{\left(\frac{2,048}{2^{18-1}}\right)^2}{3} = 8,1380 \cdot 10^{-11} \text{ V}^2 \quad (2.14)$$

2.3 Výpočet celkové nejistoty obvodu

Potřebuju zjistit s jakou nejistotou tento obvod měří hodnoty odporu, proto budu vycházet ze vztahu pro nejistoty nepřímých měření (2.15).

$$u_c(\bar{y}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \cdot u(\bar{x}_i)\right)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^N J_i^2 \cdot u^2(\bar{x}_i)} \quad (2.15)$$

kde je: f funkční závislost pro výstupní veličinu Y
 $u(\bar{x}_i)$ nejistota odhadu vstupní veličiny X_i
 J_i citlivostní koeficient

Vztah (2.15) platí pouze, pokud jsou nejistoty nezávislé.

Tento vztah si upravím pro potřebu rychlejšího počítání v MatLabu do vztahu (2.16), kde sumu násobení citlivostních funkcí a nejistot odhadů sloučím do skalárního násobení dvou stejně velikých vektorů.

$$u_c = \sqrt{\mathbf{J}^2 \cdot \mathbf{u}^2} \quad (2.16)$$

kde je: u_c nejistota odhadu celého obvodu
 \mathbf{J} vektor parciálních derivací podle jednotlivých součástí (Jakobián)
 \mathbf{u} vektor nejistot součástí

Vzhledem k tomu, že vztah R_{ZV} (2.7), který používám pro výpočet citlivostního koeficientu, je závislý na vztahu U_{A-B} (2.6), a ten je závislý na neznámém odporu R_Z , bude i tento vztah (2.16) závislý na změně tohoto odporu.

Vznikne tak funkce, kterou můžu relativně vztahovat na jednotlivé odpory (2.17), pro zjištění nejlepšího rozsahu pro měření odporu.

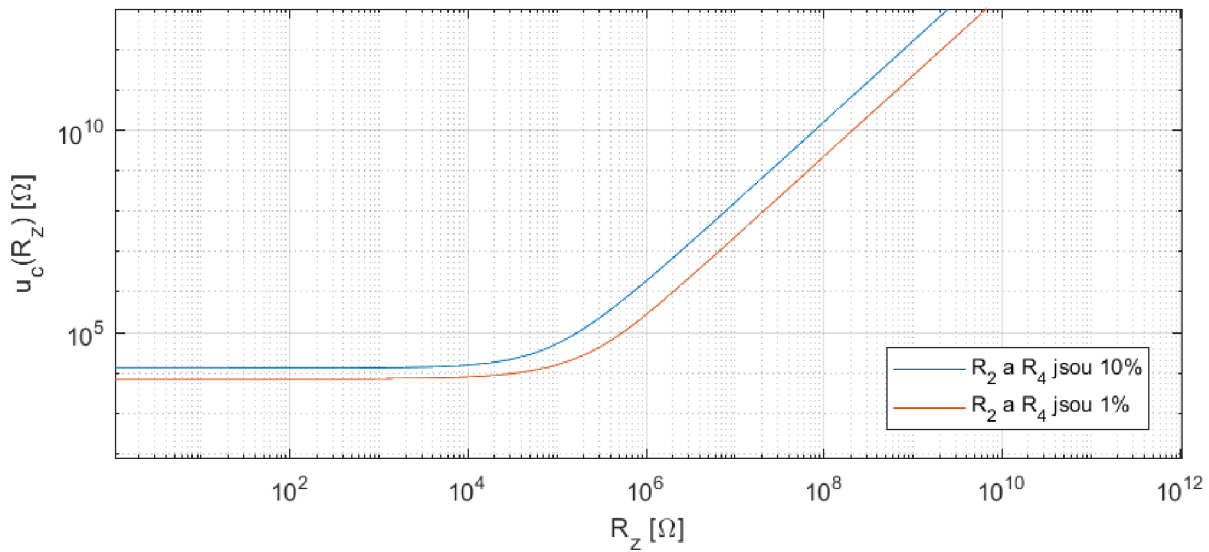
$$\delta_u = \frac{u_c}{R_Z} \quad (2.17)$$

kde je: δ_u odhad nejistoty relativně vztažený na odpor R_Z [%]
 u_c odhad nejistoty závislý na odporu R_Z [Ω]
 R_Z měřený odpor [Ω]

2.4 Vyhodnocení

Z prvního grafu (2.8) můžu vyčíst nejistoty při měření izolačního odporu. Zjistím tak, že když si zvolím hodnotu 10 M Ω , kterou si pan Valenta ve své práci zvolil jako prahovou hodnotu, tak vyjde hodnota získaného odporu s připočtenou nejistotou $R_z = 10 \pm 23$ M Ω . A to ještě v případě, kdyby byly odpory R_2 a R_4 osazeny jako 1%.

Pro hodnotu 10 M Ω tak vychází nejistota při měření okolo 230 %. Tuhle nejistotu relativně vztaženou na hodnotě R_Z jsem vynesl do dalšího grafu (2.9). Z ní lze pak snadno vyčíst, pro jaké hodnoty měření izolačního odporu je toto zapojení vhodné. Z grafu vyčtu, že nejistota měření klesne pod 20 % v intervalu hodnot od 60 k Ω do 650 k Ω . To je ovšem pro účely zadání nevhodné, neboť mě zajímají hodnoty izolačního odporu, které se pohybují v jednotkách, až desítkách M Ω .

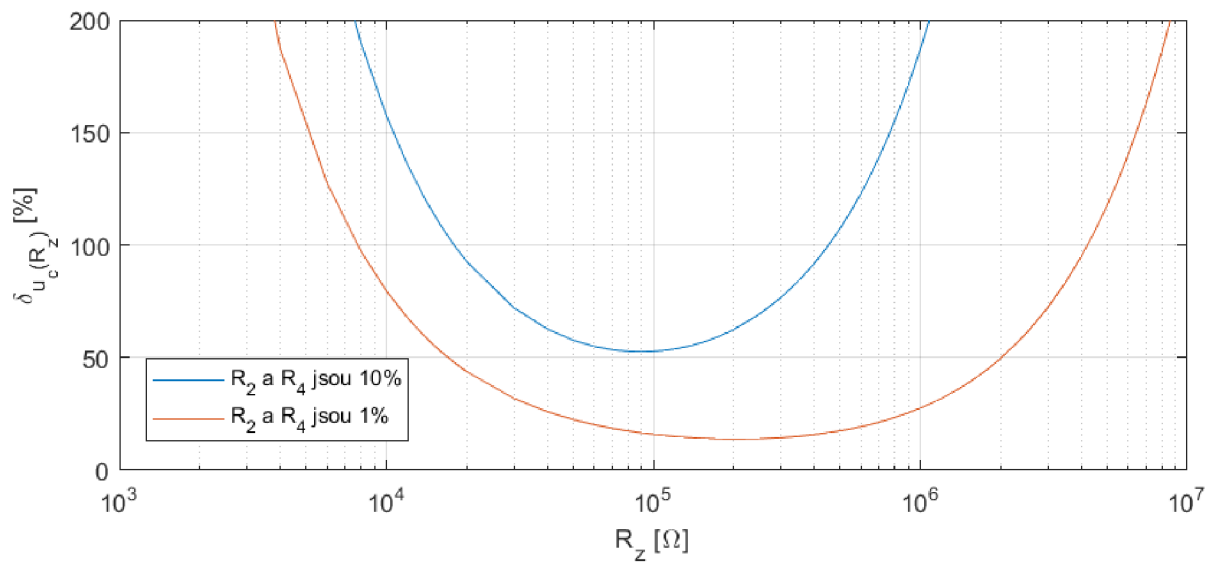


Obr. 2.8: Celková nejistota při měření izolačního odporu původního zapojení

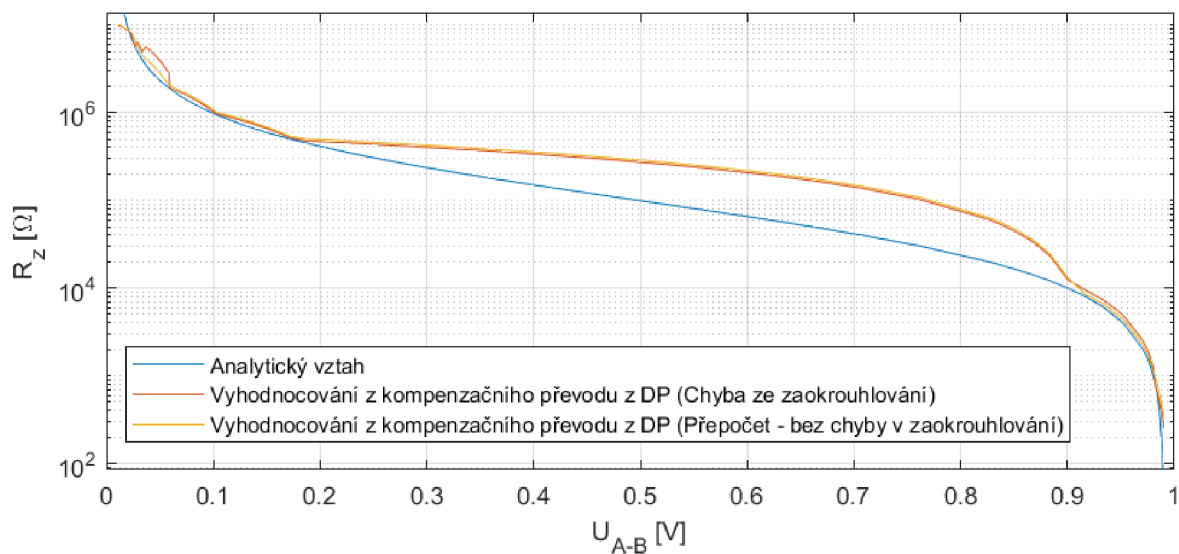
V třetím grafu (2.10) je pak vynesena závislost hodnota izolačního odporu R_Z na napětí na AD převodníku U_{A-B} . Z charakteristiky je pak patrné, že pro hodnoty odporu R_Z ležící na zmiňovaném intervalu reprezentovány velkou změnou napětí U_{A-B} , což dodává tomuto intervalu značnou citlivost. Pro hodnoty ležící mimo tento interval jsou pak hodnoty napětí nedokáže AD převodník rozeznat ani při velké změně odporu.

Vše je způsobené tím, že se tento obvod chová jako zatížený dělič, který má nejlepší přenos pro hodnotu odporu rovnající se hodnotě odporu samotného děliče.

Za zmínku také stojí chyba v zaokrouhlování, která je ve vyhodnocovacím skriptu v práci Ing. Jakuba Valenty. Ta ve výsledku způsobuje velké odchylky při měření velkých odporů, což nám způsobuje ještě větší chybu při měření izolačního odporu. Tato odchylka je znázorněná v grafu 2.10.



Obr. 2.9: Relativní celková nejistota při měření izolačního odporu původního zapojení



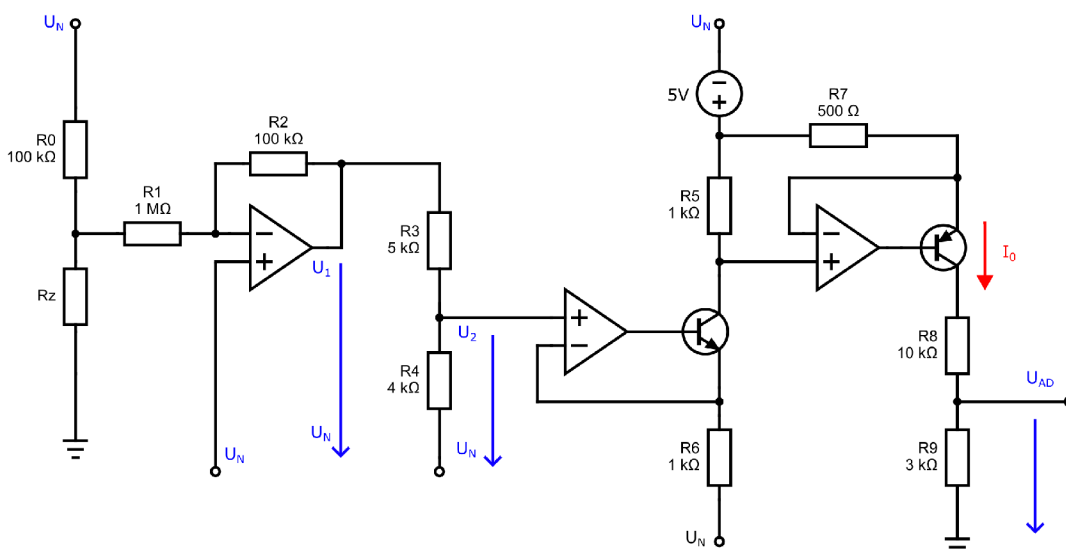
Obr. 2.10: Závislost izolačního odporu R_Z na napětí U_{A-B} původního zapojení

3 Návrh vylepšení a jeho analýza

3.1 Návrh zapojení

Navrhované zapojení lze rozdělit na několik částí. První část zapojení je invertující zesilovač, který zesílí tu část napětového rozsahu, pro kterou předpokládám hodnoty izolačního odporu. Upravené napětí jde následně do napětově řízeného zdroje proudu. Tento proud pak můžu snadno převést pomocí odporu na napětí, které budu měřit pomocí AD převodníku.

Pokud se bude měnit U_N , bude to mít vliv pouze na úbytek napětí na odporu R_8 , který ovšem nemá vliv na měření.



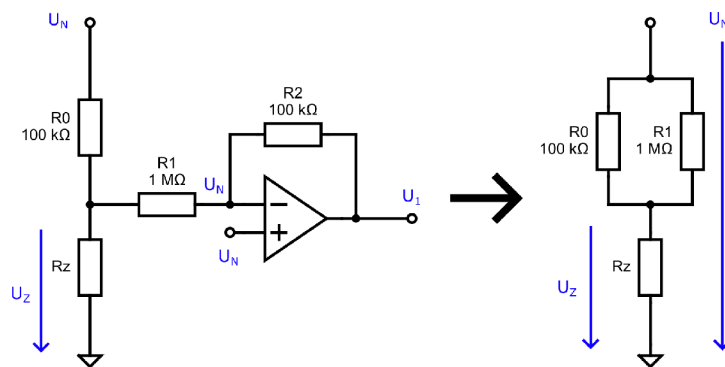
Obr. 3.1: Schéma navrhovaného zapojení.

Všechny zapojené operační zesilovače jsou napájeny z napájecího napětí U_N , posunutého o 5 V. Aby všechno dobře fungovalo, je třeba mít operační zesilovače umožňující dávat napětí na výstupu *rail-to-rail*.

3.2 Výpočet základního vztahu

Abych mohl provést analýzu tohoto obvodu stejným způsobem, jako v případě analýzy původního zapojení, tak je třeba si nejdříve tohle zapojení analyticky vyjádřit vztahem. Všechny výpočty se vztahují pro schéma zobrazené na obrázku 3.1.

V první řadě mě zajímá napětí na izolačním odporu U_Z . Jedná se zase o dělič napětí, ovšem musím brát na vědomí připojený operační zesilovač. Jedná se v mých výpočtech o ideální zesilovač zapojen do invertujícího zapojení. Pro toto zapojení platí, že na invertujícím vstupu se nachází stejné napětí, jako na neinvertujícím vstupu. Neinvertující vstup je zapojen na napětí zdroje U_N , takže se toto napětí nachází i na invertujícím vstupu.



Obr. 3.2: Náhrada zapojení.

Z hlediska zmiňovaného děliče to znamená, že se bude odpor R_1 chovat jako kdyby byl paralelně zapojen s odporem R_2 , jak je i ukázáno na obrázku 3.2. To znamená, že výsledné napětí U_Z vypočtu jako dělič napětí mezi odporem R_Z a paralelní kombinací odporů R_0 a R_1 (3.1).

$$U_Z = U_N \cdot \frac{R_Z}{R_Z + (R_0 || R_1)} = U_N \cdot \frac{R_Z}{R_Z + \frac{R_0 \cdot R_1}{R_0 + R_1}} \quad (3.1)$$

Musím brát ohled na posunutí napětí u všech zapojených operačních zesilovačů. Pro zjednodušení výpočtů si tak zavedu U'_Z (3.2), který bude o tohle napájecí napětí posunuto.

$$U'_Z = U_Z - U_N \quad (3.2)$$

Toto napětí je následně zesíleno přes invertující zesilovač. Vycházím tak ze vztahu pro tento zesilovač aplikovaný pro naše řešení (3.3).

$$U_1 = -U'_Z \cdot \frac{R_2}{R_1} \quad (3.3)$$

Výsledné napětí dávám přes dělič napětí (3.4) na vstup napětově řízeného zdroje proudu.

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (3.4)$$

Zapojení napětově řízeného zdroje proudu vychází z knihy *Operační zesilovače v elektrotechnice* [8], str. 237. Využijí tedy tento vztah pro výpočet proudu (3.5).

$$I_0 = \frac{U_2 \cdot R_5}{R_6 \cdot R_7} \quad (3.5)$$

Výstupní napětí U_{AD} (3.6) je potom závislé na úbytku napětí na rezistoru R_9 , kterým poteče proud I_0 .

$$U_{AD} = I_0 \cdot R_9 \quad (3.6)$$

Z těchto vztahů si pak vyjádřím závislost výstupního napětí U_{AD} (3.7) na izolačním odporu R_Z .

$$U_{AD} = \frac{R_0 R_2 R_4 R_5 R_9 U_N}{R_6 R_7 (R_3 + R_4) (R_0 R_1 + R_0 R_Z + R_1 R_Z)} \quad (3.7)$$

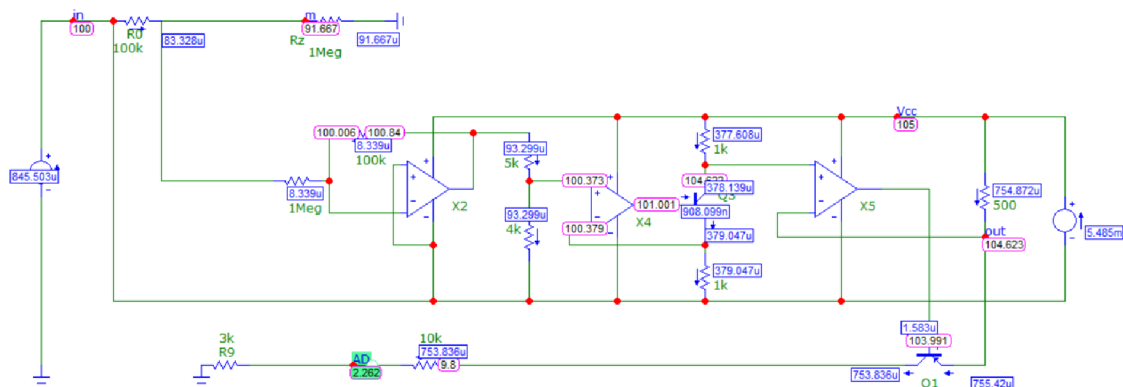
Tento výsledný vztah (3.7) jsem si vložil do MatLabu [3] a dosadil jsem konkrétní hodnoty odporů a napětí. Dále jsem vytvořil tento obvod v MicroCapu [4] (3.3), kde jsem dosadil stejné hodnoty a dosažené výsledky jsem následně porovnal mezi sebou v tabulce 3.1.

Z tabulky je patrné, že se od sebe výsledky nepatrně liší. To může být způsobeno tím, že simulační program pracuje s nelineárními modely operačních zesilovačů, přičemž pro výpočty jsem bral ideální model operačních zesilovačů. V MicroCapu byly použity modely zesilovačů *LMC660* a *LT1630*, které jsou *rail-to-rail*. Pro vyšší odpory se pak výsledky více liší, ovšem z podmínek na zařízení kladených v minulé kapitole nepředpokládám, že bych chtěl měřit odpor vyšší jak 10 M Ω .

Tab. 3.1: Ověřování správnosti výsledného vztahu

R_Z [Ω]	U_{AD} [V]	
	MatLab	MicroCap
100k	12,6984	12,682
300k	6,2016	6,222
1M	2,2222	2,262
3M	0,7843	0,8300
10M	0,2402	0,2960
30M	0,0805	0,1750

Beru v úvahu, že výsledný vztah (3.7) je správný, takže si z něho vyjádřím odpor zatěže R_Z , který si zase označím jako odpor R_{ZV} (3.8). Z tohoto vyjádřeného vztahu budu vycházet pro výpočet celkové nejistoty tohoto obvodu.



Obr. 3.3: Simulace v MicroCapu pro navrhované vylepšení

$$R_{ZV} = \frac{R_0 R_2 R_4 R_5 R_9 U_N}{R_6 R_7 U_{AD} (R_0 + R_1) (R_3 + R_4)} - \frac{R_0 R_1}{(R_0 + R_1)} \quad (3.8)$$

3.3 Výpočet celkové nejistoty

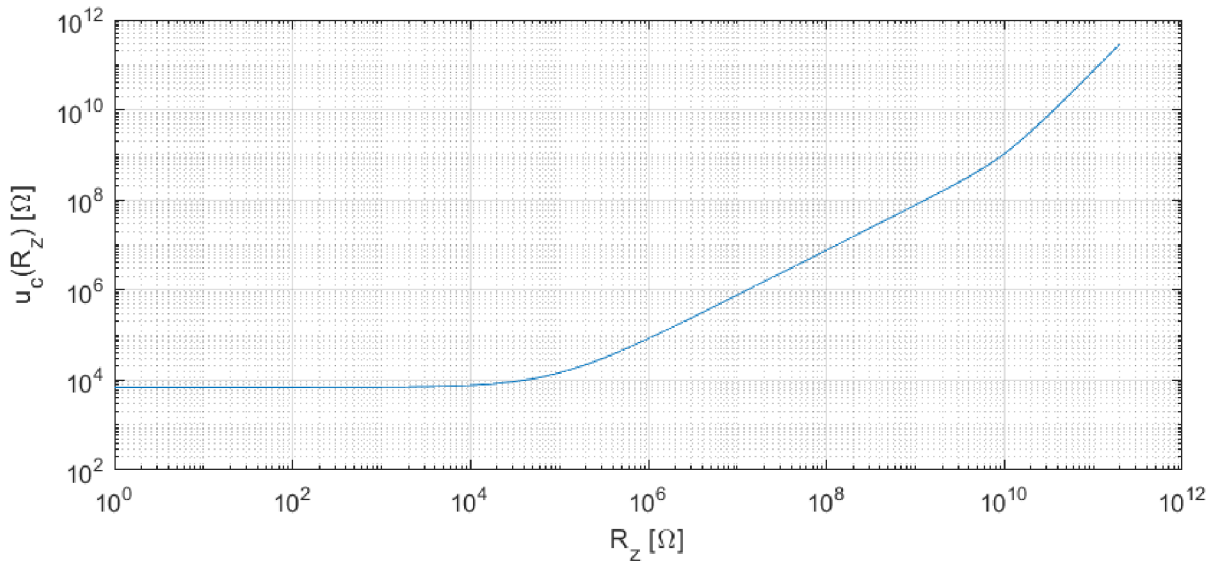
Pro výpočet celkové nejistoty nového zapojení budu brát v úvahu stejné součástky, jako byly využity v původním zapojení. Pro zjednodušení budu jen brát v úvahu, že všechny odpory budou osazeny s 1% tolerancí.

V tomto případě můžu využít nejistoty součástek stejně, jako jsem je vzal v kapitole 2.2. I postup bude podobný jako v kapitole 2.3, jen s tím rozdílem, že se bude počítat se vztahem (3.8).

3.4 Vyhodnocení

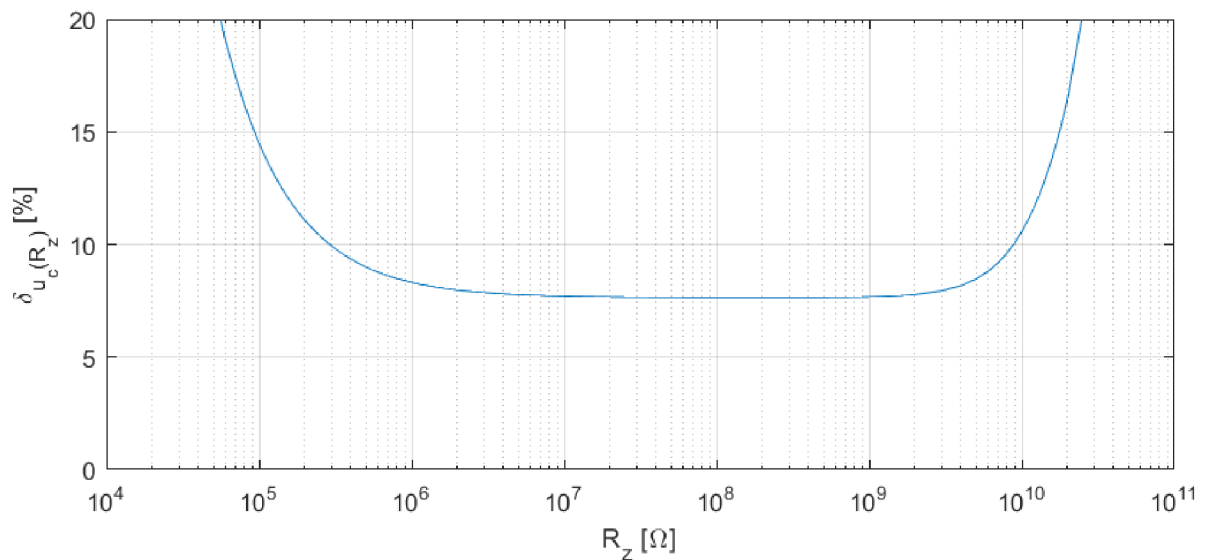
Z prvního grafu (3.4) můžu vyčíst nejistoty při měření izolačního odporu. Pro porovnání odečtu stejnou hodnotu jako v podkapitole 2.4, tedy 10 MΩ. Pro tuhle hodnotu mi vyjde hodnota získaného odporu s připočtenou nejistotou $R_z = 10,00 \pm 0,77 \text{ M}\Omega$.

Pro hodnotu 10 MΩ mi tak vychází relativní nejistota při měření něco málo pod 8 %, což je podstatně lepší výsledek, než byl získán z původního zapojení. Takhle nejistota relativně vztahovaná na hodnotě R_Z je vynesena v druhém grafu (3.5). Z tohoto grafu lze vyčíst, že relativní nejistota měření klesne pod 10 % v intervalu hodnot od 300 kΩ do 8 GΩ. To je pro moje účely měření izolačního odporu více než dostačující.



Obr. 3.4: Celková nejistota při měření izolačního odporu navržené opravy

Je ovšem nutné podotknout, že se pro tuhle analýzu počítá s použitím ideálních operačních zesilovačů. To může mít za následek drobné odchytky, které byly zjištěny již za použití simulačního programu MicroCap (3.1). Jedná se především u měření velmi vysokých odporů v řádech $G\Omega$. Takto vysoké odpory ovšem není požadování měřit. Bohatě si vystačím s rozsahem hodnot do desítek $M\Omega$



Obr. 3.5: Relativní celková nejistota při měření izolačního odporu navržené opravy

4 Realizace

V této kapitole se zaměřuji na samotnou realizaci a aplikaci navrhované úpravy řídicí desky. Není požadováno provádět změny na desce spínačů. Jako předlohu jsem využil zapojení z původní práce, ovšem se musí z velké části předělat.

Tato kapitola je rozdělena na několik částí, které se zaobírají samotným postupem realizace finálního výrobku.

4.1 Návrh zapojení

V této části jsou představeny jednotlivé části obvodu, které musí obsahovat samotná řídicí deska, aby dokázala plnit svoji funkci. Od samotného napájení jednotlivých komponent, po uživatelské rozhraní a periférie, až po samotné měření. Celkové schéma zapojení je pak k nahlédnutí v příloze.

4.1.1 Napájení

Stejně jako v původní práci je zvoleno stejnosměrné 12V napájecí napětí. Tím je totiž napájen 100V stejnosměrný zdroj *A01P-12*[13], který bude využit z původní řídicí desky, a bude nám zaručovat dostatečné testovací napětí. Dále bude využit 5V stejnosměrný zdroj s využitím *MP1584*[14], který bude napájet další komponenty obvodu, včetně galvanicky oddělených 5V zdrojů *AMS-0505SZ*[15]. Jeden bude vytvářet o 5 V posunutou úroveň napětí dolů od měřeného napětí pro optočleny a spínání tranzistorů na spínačové desce. Druhý bude vytvářet o 5 V posunutou úroveň napětí nahoru od 100V zdroje pro napájení operačních zesilovačů, díky kterým bude umožněno zpracovat měřené testovací napětí.

Všechny zdroje jsou doplněny CLC filtrem, aby byla docílena co nejlepší stejnosměrná úroveň napětí. Ty jsou realizovány 100 nF keramickými kondenzátory a feritovými jádérky. U některých zdrojů je to ještě doplněno velkým elektrolytickým kondenzátorem, aby případné výkyvy byly co nejmenší. Nejdůležitější je to tak u 5V napájení, které napájí většinu obvodu, včetně řídicí výpočetní jednotky *Raspberry Pi*. U zdroje 100 V nebylo možné využít elektrolytický kondenzátor, ale stabilizační funkci tam nahrazuje 100V Zenerova dioda.

U napájecího konektoru J1 je přidána ochrana proti přepólování v podobě Schottkyho diodě *SK26*. U všech zdrojů je následně přidána i indikační LED dioda, která bude znázorňovat zapnutí zdroje. Očekává se využití zelených nebo modrých LED SMD diod. Úbytek napětí na zelené LED očekávám kolem 2,6 V a na modré pak až 3,5 V. Dále je požadováno, aby LED řádně svítila, což lze docílit tím, že diodou poteče proud alespoň 1 mA, ale naopak nesmí diodou téct proud až moc velký.

Je tak třeba zvolit vhodný rezistor, aby tomu bylo docíleno. Hodnotu rezistoru lze vypočítat snadno pomocí vztahu (4.1). Poté jsem vybral rezistor o něco menší, aby diodou tekla o něco větší proud, ideálně k 2 mA. Přihlédl jsem taky k tomu, abych vybral rezistor stejné hodnoty, využitý již v jiné části obvodu.

$$R_{LED} = \frac{U_{zdroj} - U_d}{I_{LED}} \quad (4.1)$$

$$R_{39} = \frac{100 - 2,6}{0,001} = 97,4 \text{ k}\Omega \rightarrow 91 \text{ k}\Omega \quad (4.2)$$

$$R_{40} = R_{41} = R_{42} = \frac{5 - 3,5}{0,001} = 2,5 \text{ k}\Omega \rightarrow 1 \text{ k}\Omega \quad (4.3)$$

$$R_{43} = \frac{12 - 2,6}{0,001} = 9,4 \text{ k}\Omega \rightarrow 5 \text{ k}\Omega \quad (4.4)$$

Dále je i přidaná funkce pro zapínání 100V zdroje *A01P-12*. Ten je totiž umožněno ovládat *CTRL* pinem, na který když je připojeno napětí 12 V, tak je zdroj zapnutý, a když je na něj přivedena zem, tak se zdroj vypne. Ve schématu je hned bráno několik variant osazení, jak je vidět na obrázku 4.1, kde lze využít několik variant zapnutí zdroje.

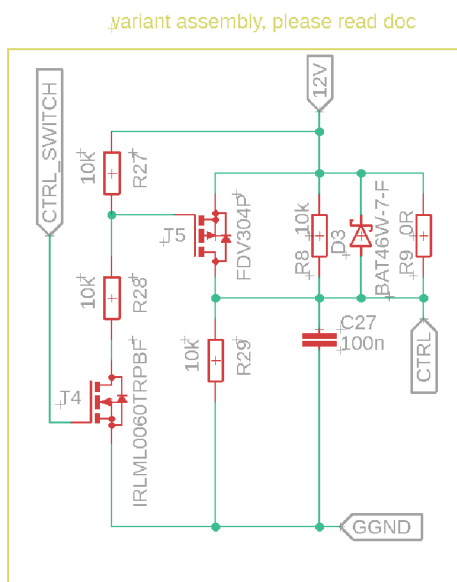
- Přímé zapnutí
 - Osadit stačí R9 nulovým odporem.
 - Po zapojení napájení se napětí 12 V přímo přenesou na *CTRL* pin 100V zdroje.
- Oddálený start
 - Osadit je třeba R8, C27 a D3.
 - Po zapojení napájení se začne nabíjet kondenzátor C27 přes odpor R8. Výsledná doba k zapnutí 100V zdroje je dána vztahem $\tau = R_8 \cdot C_{27}$.
 - Po vypnutí napájení se kondenzátor rychle vybije přes diodu D3.
- Zapnutí pomocí řídicí jednotky.
 - Osadit je nutno R27, R28, R29, T4 a T5.
 - Po zapojení napájení zůstane *CTRL* pin zapojen k zemi přes odpor R29, neboť bude napájení odděleno od *CTRL* pinu P-MOSFET tranzistorem (T5)[16], který bude uzavřen, neboť bude $V_{GS} = 0 \text{ V}$, neboť odpory R28 a R27 nepoteče žádný proud, kde by vznikl úbytek napětí, díky uzavřenému N-MOSFET tranzistoru (T4)[17].
 - Až potom, co nabojuje řídicí jednotka *Raspberry Pi*, tak bude možné pomocí *CTRL_SWITCH* sepnout tranzistor T4 do saturačního režimu. Následně poteče odpory R28 a R27 proud, a vznikne tak dělič napětí. Abych dostal tranzistor T5 do saturačního režimu, tak počítám s tím,

aby bylo $V_{GS} < -3 \text{ V} \rightarrow V_G - V_S < -3 \text{ V}$, a tak mi vznikne vztah (4.5), kde si mohu vyjádřit odpor R_{27} (4.6). Po dosazení vyjde odpor $R_{27} > 3333 \Omega$. Jelikož budu chtít využít co nejvíce stejných odporů, tak pro osazení využiji všechny odpory o hodnotě $10 \text{ k}\Omega$.

$$V_S \cdot \frac{R_{28}}{R_{27} + R_{28}} - V_S < -3 \text{ V} \quad (4.5)$$

$$R_{27} > \frac{3 \cdot R_{28}}{V_S - 3} \rightarrow R_{27} > \frac{3 \cdot 10000}{12 - 3} \Omega \quad (4.6)$$

Zapnutí pomocí řídicí jednotky je preferováno, neboť se tím znemožní výskyt 100V napětí v místech možným se stykem dřív, než bude tester kompletně připraven na testování.



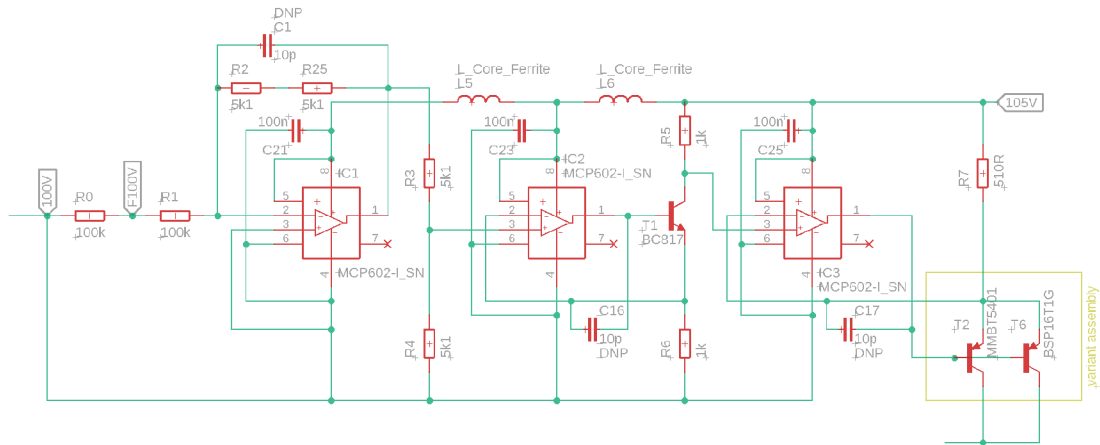
Obr. 4.1: Schéma zapojení variantního osazení spouštění 100V zdroje

4.1.2 Měřící obvod

Další částí je samotný měřící obvod, který lze sám o sobě rozdělit na dvě části.

Jednou částí je samotné zapojení s operačními zesilovači 4.2, který mají za úkol zpracovat měřené testovací napětí. Operační zesilovače jsou zapojeny tak, jak již bylo zmíněno a vysvětleno v předchozí kapitole.

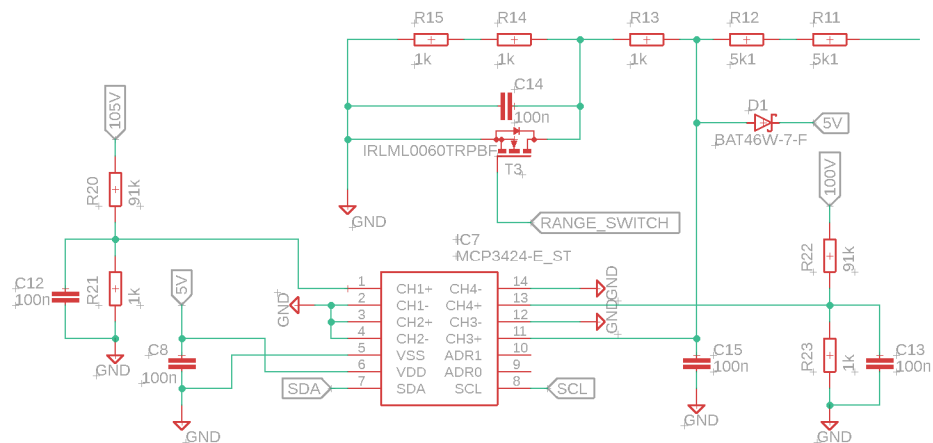
Jako operační zesilovače byly vybrány *MCP602-I-SN*. I když jsou v jednom pouzdru dva, tak jsem se rozhodl použít jen jeden, aby nedocházelo případně k vzájemnému ovlivňování. To znamená, že ze dvou potřebných integrovaných obvodů jsou



Obr. 4.2: Schéma zapojení první části měřícího obvodu

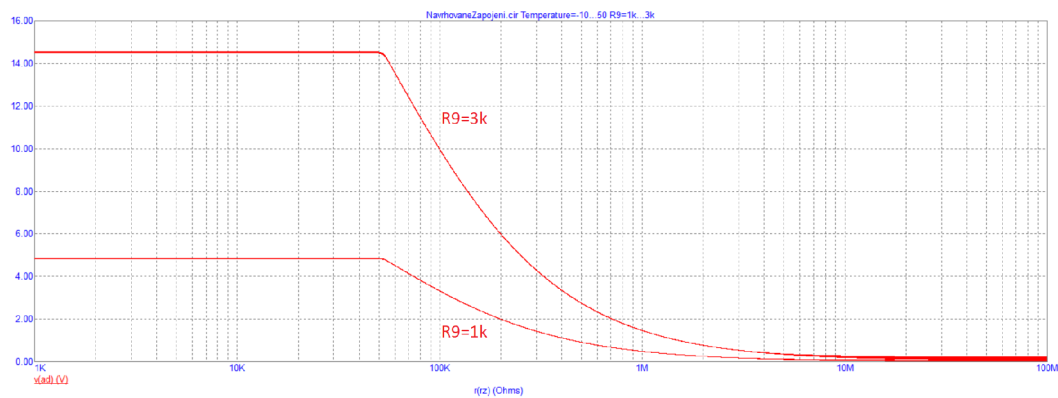
potřeba nyní tři, což až taková změna není. Je třeba ale zapojit nevyužívané operační zesilovače tak, aby měly jejich vstupy definovanou úroveň. Neinvertující vstupy tak byly zapojeny na napájení a invertující vstupy na zem. Jsou rail-to-rail, a tak může být jejich zem 100 V a napájeni budou pomocí zdroje U2 *AM1S-0505SZ*.

Výstupem této části je napětím řízený proud. Ten bude řízen PNP tranzistorem. Jedná se o velice součástku tohoto obvodu. Tento tranzistor musí vydržet napětí 105 V, proud 5 mA a výkon 250 mW. Nejdřív byl vybrán tranzistor *MMBT5401W*[18] v pouzdře SOT23, který je na hranici zmiňovaných parametrů. Lepší parametry, které potřebuji, má tranzistor *BSP16T1G*[19], který je v pouzdře SOT223. Proto bude při návrhu plošného spoje nutno počítat s oběma druhy tranzistoru.



Obr. 4.3: Schéma zapojení druhé části měřícího obvodu

Napětím řízený proud přechází do druhé části 4.3, kde ho můžu převést na měřitelné napětí. Jelikož dokáže AD převodník *MCP3424-E_ST*[20] měřit napětí do 2,048 V, tak je třeba vstupní napětí vhodně zvolit. V simulaci, kterou jsem dělal v minulé kapitole 3.3, to umožní odpor R9. Ten jsem si zvolil na takové hodnoty, aby mi byl umožněn přepínatelný rozsah, tedy na $R_g = 1 \text{ k}\Omega$ a $R_g = 3 \text{ k}\Omega$. Jak je vidět na grafu 4.4, tak budu schopen měřit napětí na $1 \text{ k}\Omega$ odporu od $200 \text{ k}\Omega$ do $800 \text{ k}\Omega$, kde ho následně vystřídá $3 \text{ k}\Omega$ odpor, který bude moct měřit až do hodnot vyšší jak $5 \text{ M}\Omega$. Ovšem vyšší hodnoty už mohou být zkresleny dalšími vlivy, jako je třeba teplota, která je i nasimulována.



Obr. 4.4: Graf závislosti napětí na měřeném odporu podle zvoleného odporu R9

Přepínání je realizováno pomocí N-MOSFET tranzistoru *IRLML0060TRPBF*[17], který svým sepnutím povede proud mimo odpory R14 a R15, a tak proud poteče jen odporem R13. Všechny zmiňované odpory jsou o hodnotě $1 \text{ k}\Omega$. Aby se zamezilo zavedení vyššího napětí na AD převodník, tak je tam i zavedena ochrana diodou D1 *BAT46W-7-F*, která zalimituje napětí na AD převodníku na 5 V . Dále je tam doplněn kondenzátor C15, který vyfiltruje rušivé vlivy ze stejnosměrného měření.

Dále se ještě bude měřit napětí 100 V a 105 V , jejichž výkyvy mohou mít vliv na samotný výsledek měření. Ty už budu měřit jednodušeji přes dělič napětí, kde jejich výsledné napětí vyjde dle vztahu (4.7) na $1,0870 \text{ V}$ a $1,1413 \text{ V}$, které již bez problému lze měřit AD převodníkem. Vzhledem k tomu, že každý odpor má svoji relativní chybu, bude třeba tyto referenční konstanty ještě kalibrovat.

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (4.7)$$

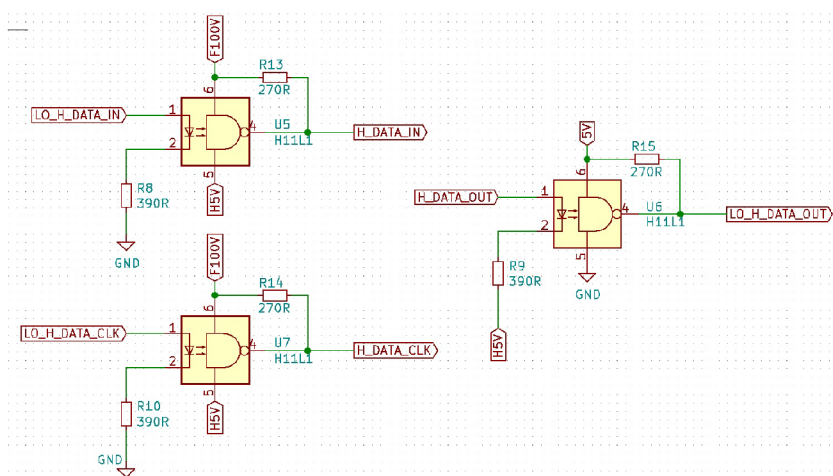
$$U_{\text{ref}(100\text{V})} = 100 \cdot \frac{1}{91 + 1} = 1,0870 \text{ V} \quad (4.8)$$

$$U_{\text{ref}(105\text{V})} = 105 \cdot \frac{1}{91 + 1} = 1,1413 \text{ V} \quad (4.9)$$

4.1.3 Komunikace

S AD převodníkem *MCP3424-E-ST* bude komunikovat *Raspberry Pi* pomocí *I2C* sběrnici. Hardwarově tak stačí propojit jen *SDA* a *SCL* piny. Samotná komunikace se pak bude muset řešit softwarově.

Vzhledem k tomu, že spínačová deska se nijak neupravovala, bude pro komunikaci použit *bit bang* stejným způsobem, jako v původní práci. Na spínačové desce se nachází čtyři 8-bitové posuvné registry *74HC164,152* [23], dva na *high* a dva na *low* úroveň zapojené za sebou tak, že dají dva dohromady 16-bitový převod. Pomocí hodinového signálu se tak budou postupně přepínat jednotlivé bity, které budou spínat jednotlivé tranzistory.

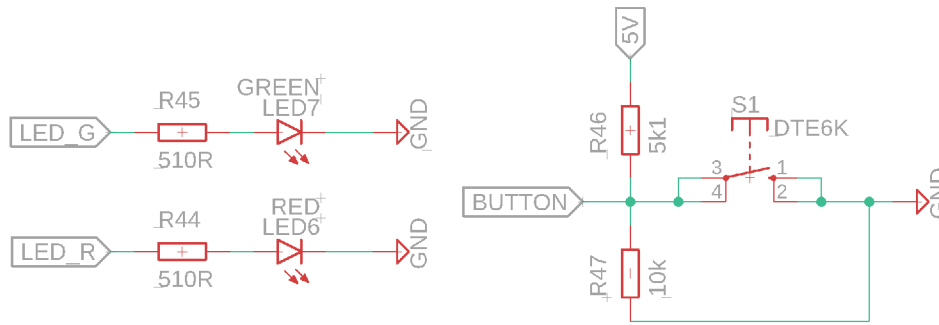


Obr. 4.5: Zapojení optočlenů z původní práce

Registry na *low* úrovni lze připojit přímo k řídicí jednotce. Jako ochrana je tam přidán jen malý odpor, aby v případě nechtěného zkratu to ochránilo řídicí jednotku. Registry na *high* úrovni musejí být na napěťové úrovni testovacího napětí. To docílím galvanickým oddělením optočleny. Při návrhu již počítám s použitím pullup rezistoru, který byl na původní desce přidán dodatečně. Celé zapojení optočlenů, které lze vidět na obrázku 4.5, tak přebírám z původní práce [1], neboť předpokládám, že by mělo být již plně funkční. Použité optočleny *H11L1M* jsou invertující, takže je pak třeba s tím počítat při psaní testovacího programu.

4.1.4 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní bude novou částí navrhovaného testeru. Toto uživatelské rozhraní umožní používat tester kabeláže i bez nutnosti připojení k počítači. Bude se jednat o dvě indikační LED a jedno tlačítko 4.6.



Obr. 4.6: Schéma zapojení uživatelského rozhraní

Indikační LED budou v červené a zelené barvě, a budou znázorňovat zda daný kabelový svazek prošel, či neprošel testem. Svítící zelená LED bude oznamovat, že testovaný svazek prošel. Naopak svítící červená LED bude oznamovat, že testovaný svazek neprošel. V tom, kde je následně chyba, bude potřeba již tester připojit k počítači, kde bude možné při testování si vypisovat naměřené hodnoty. Že měření je spuštěno, a stále probíhá, mohou znázorňovat blikající obě dvě LEDky.

Stejně jako u předchozích LEDek se bude muset vypočítat vhodný odpor, kterým bude poteče potřebný proud k rozsvícení LED. Úbytek napětí na zelené LED očekávám zase kolem 2,6 V a na červené LED pak jenom 2,0 V. Napětí logické úrovně v řídicí jednotce je 3,3 V. Postup výpočtů bude stejný jako v předchozí podkapitole. (4.1). Vyjde mi tak, že aby se vůbec diody rozsvítily, tak je třeba dát rezistory o hodnotách 0,7 k Ω k zelené diodě a 1,3 k Ω z červené diodě. Pokud dám k diodám menší rezistor o hodnotě 510 Ω , tak to bude jen znamenat, že zelenou diodou poteče proud 1,37 mA a červenou diodou pak 2,55 mA. To může mít jen za následek, že diody budou jen o něco víc svítit, což rozhodně vadit nebude.

$$R_{45} = \frac{3,3 - 2,6}{0,001} = 0,7 \text{ k}\Omega \rightarrow 510 \Omega \quad (4.10)$$

$$R_{44} = R_{42} = \frac{3,3 - 2}{0,001} = 1,3 \text{ k}\Omega \rightarrow 510 \Omega \quad (4.11)$$

Dále uživatelské rozhraní obsahuje tlačítko. To bude mít za úkol při jeho stisknutí spustit test. Tlačítko bude třeba držet sepnuté po celou dobu testu, jinak se test ukončí. Je to bezpečnostní ochrana, aby se zamezilo případnému kontaktu se živými částmi měřeného kabelového svazku, které budou během testu pod napětím.

K tlačítku je třeba připojit pullup. Vzhledem k tomu, že se nechci spoléhat na hardwarový pullup obsažený v *Raspberry Pi*, tak si vytvořím vlastní. Jelikož řídicí jednotka funguje na logické úrovni 3,3 V, tak je třeba získat toto napětí z 5 V. To mohu docílit pomocí děliče napětí. Vyjdu tak z rovnice pro dělič napětí

(4.7). Z něho pak vyplyne vztah (4.12), do kterého lze pak dosadit požadované hodnoty (4.13). Vyjde mi tak poměr mezi odpory děliče na 1,941. To znamená, že když využiji jako první odpor o hodnotě 5,1 k Ω , tak mi druhý odpor vyjde zhruba 10 k Ω . Pro kontrolu si to mohu dosadit do vztahu k děličí napětí (4.14). Vyjde mi tak napětí 3,311 V, které je jen o malinko vyšší než požadované, což je vyhovující.

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

$$R_{47} = R_{46} \cdot \frac{3,3}{5 - 3,3} = 1,941 \cdot R_{46} \quad (4.13)$$

$$5 \cdot \frac{10000}{10000 + 5100} = 3,311 \text{ V} \quad (4.14)$$

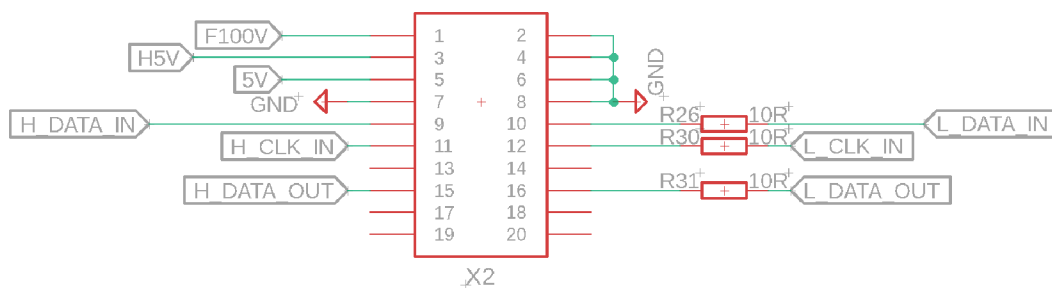
4.1.5 Konektory

Poslední část, kterou je třeba navrhnout jsou konektory a svorkovnice.

Na desce bude jedna svorkovnice **J1** pro připojení napájecího napětí. Dále zde budou celkem tři konektory.

Konektor **X1** bude sloužit se spojením této desky s řídicí deskou *Raspberry Pi*. Využije se tak dostupná nadefinovaná open source knihovna přímo ze stránek autodesk *raspberrypi_bastelstube_v13.lbr*. Připojí se na ni napájení 5 V, potřebné GPIO piny na ovládání a v neposlední řadě i *I2C* sběrnice s *SDA* a *SCL* vodiči.

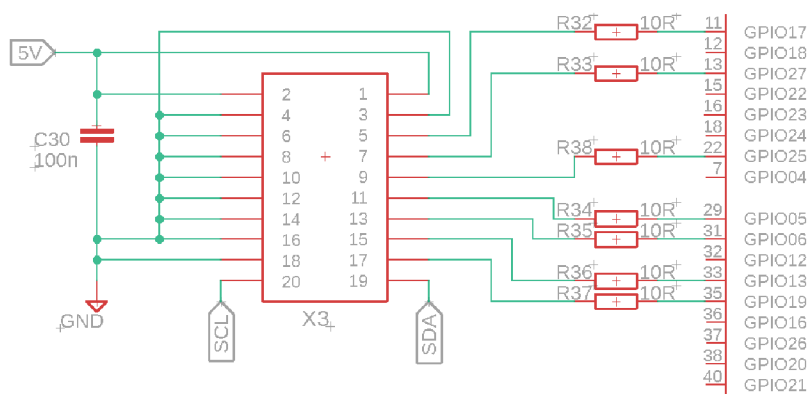
Konektor **X2** bude sloužit k propojení této desky s deskou se spínači. Vzhledem k tomu, že spínačová deska nebyla pozměněna, tak se zachovává zapojení z původní práce kvůli vzájemné kompatibilitě. Zapojení tohoto konektoru je detailněji na obrázku 4.7.



Obr. 4.7: Schéma zapojení konektoru sloužícímu ke spojení se spínačovou deskou

Poslední konektor **X3** bude sloužit k případnému rozšíření. Obsahuje vyvedené GPIO piny z řídicí desky, připojené přes malé odpory, které zamezí případnému nechtěnému zkratu a tak odpálení *Raspberry Pi*. Dále je tam vyvedeno napájecí

napětí 5 V a samozřejmě zem. Zapojení tohoto konektoru je detailněji na obrázku 4.8.



Obr. 4.8: Schéma zapojení externího konektoru

4.2 Návrh desky plošného spoje

Chtěl jsem vytvořit plošný spoj o takových rozměrech, jaké měla původní deska. Dále jsem se rozhodl vyrobit dvouvrstvou desku, i když je můj návrh komplikovanější, než ten původní. Výsledkem tak vzniklo, že nová deska je o kousek větší, než ta původní, ovšem takový rozdíl by neměl nijak zvlášť vadit.

Při návrhu plošného spoje bylo potřeba dodržet několik návrhových pravidel. Ty jsou popsány a vysvětleny v následujících podkapitolách.

Návrh desky je velice kreativní činnost, a je třeba ji dát čas. Nelze úplně dodržet všechna pravidla, která jsem uvedl, někdy je třeba zvolit vyhovující kompromis.

Při návrhu plošného spoje jsem nechal základní nastavení, což se bohužel projevovalo ve využitém gridu, který byl nastaven *mils*, jako i ostatní parametry. Uvědomil jsem si to až při dokončování plošného spoje, a aby mi případně nevyjízděly součástky z daného gridu, tak jsem se rozhodl dál využívat tuto jednotku, s tím, že jsem ji musel následně přepočítávat. V práci tak napíšu obě dvě jednotky, včetně přepočtu na milimetry.

Pro návrh desky plošného spoje jsem použil program Eagle od AutoDesku. Celá navržená deska plošného spoje je pak obsažena v příloze práce, stejně jako *Gerber* soubory pro výrobu.

4.2.1 Rozdělení desky

Obvod byl již rozdělen v minulé části o návrhu zapojení. Z tohoto rozdělení se bude vycházet i při návrhu plošného spoje.

Je třeba oddělit části s nízkou napětovou úrovní, kde veškeré napětí bude blízké zemi, a vysokou napětovou úrovní, kde dosažené napětí se budou pohybovat okolo 100 V. Vzniknou tak dvě napětové domény, které musí být od sebe odděleny a ideálně by se neměly nikde na desce mezi sebou křížit.

Je třeba umístit rozdělené části tak, aby to dávalo smysl a zmiňované domény se ideálně moc nepotkávaly.

Rozhodl jsem se tak napájecí část obvodu umístit hned vpravo nahoře. U každého jednotlivého zdroje je jeho indikační dioda v jeho blízkosti. Hned pod napájecí částí jsem dal uživatelské rozhraní s tlačítkem a indikačními diodami. Vpravo od napájecí části se nachází vysokonapětová doména. Konektor pro připojení spínačové desky se tak nachází vpravo a hned po ní je konektor sloužící pro případné rozšíření. Na dolní straně desky je pak umístěn konektor pro připojení řídicí jednotky *Raspberry Pi*.

4.2.2 Zamezení rušení

Vzájemnému rušení obvodu jsem se snažil zamezit několika způsoby.

- Zamezení křížení jednotlivých domén
 - Je třeba umístit optočleny tak, aby se jednotlivé domény vhodně rozdělily a moc se nepotkávaly.
 - Je třeba operační zesilovače tak, aby v jejich blízkosti neprocházela jiná doména. V okolí operačních zesilovačů tak vznikne prázdné místo.
- Zkracování vzdálenosti
 - Je třeba mít co nejmenší vzdálenost u cest, které mají z hlediska signálu nějakou impedanci vůči zemi.
- Vylití země
 - Pod AD převodníkem je vylitá zem, aby absorbovala veškeré signály, které by mohly rušit měření.
 - Tam kde jsou vylity dvě země na obou stranách desky, tak byly u rohů propojeny prokovy, aby se zamezilo případnému záření.

4.2.3 Izolační vzdálenost

Vzhledem k tomu, že jsou použity různé napětové úrovně, je třeba vhodně zvolit mezi nimi izolační vzdálenosti. Z norem vyplývá, že izolační vzdálenost povrchové cesty má být pro napětí do 150 V alespoň 0,5 mm [31][32]. Já jsem se rozhodl zde

použít 70 mils, to odpovídá 1,778 mm, což je dostačující. Jako základní izolační vzdálenost mezi jakýmikoliv spoji jsem si nastavil jako minimum 0,4 mm.

Pro realizaci těchto různých izolačních vzdáleností bylo třeba vytvořit skupiny zvláště pro cesty vysoké a nízké napěťové úrovně. Bylo i potřeba vytvořit zvláště skupiny, kde budou přecházet tyto úrovně mezi sebou, kde může být izolační vzdálenost o něco menší. Pro tyto skupiny se tak nastavily různá pravidla pro izolační vzdálenost. Ty jsou pak přehledně uvedeny v následující tabulce 4.1, kde HV (*High Voltage*) je skupina pro vysokou napěťovou úroveň, LV (*Low Voltage*) je skupina nízkou napěťovou úroveň a HV/LV je skupina pro samotný přechod mezi těmito úrovněmi.

Tab. 4.1: Izolační vzdálenosti pro jednotlivé skupiny vodivých cest

	HV	LV	HV/LV
HV	0,400 mm	1,778 mm	0,813 mm
LV	1,778 mm	0,400 mm	0,813 mm
HV/LV	0,813 mm	0,813 mm	0,400 mm

4.2.4 Šířka vodivých cest

Jako poslední je návrh šířky jednotlivých vodivých cest. Jednotlivé šířky se odvíjejí podle toho, jaká je velikost očekávaného proudu daným místem.

Nejmenší velikost je využita 0,4064 mm (16 mils), která je použita především u datových cest.

Nejširší velikost je pak 1,27 mm (50 mils), která je využita především u napájení obvodu. Podle vztahu (4.15) [33] vyjde maximální proudová zátěž takto širokým vodičem 2,36 A, což by mělo být dostačující.

$$I = k \cdot \Delta T^{0,44} \cdot A^{0,725} = 0,048 \cdot 20^{0,44} \cdot (50 \cdot 0,7)^{0,725} = 2,36 \text{ A} \quad (4.15)$$

kde je:	I	elektrický proud vodivou cestou	[A]
	$k = 0,048$	pro vnější vodivé cesty	[-]
	$k = 0,024$	pro vnitřní vodivé cesty	[-]
	ΔT	dovolený nárůst teploty	[°C]
	A	průřez vodivé cesty	[mils ²]

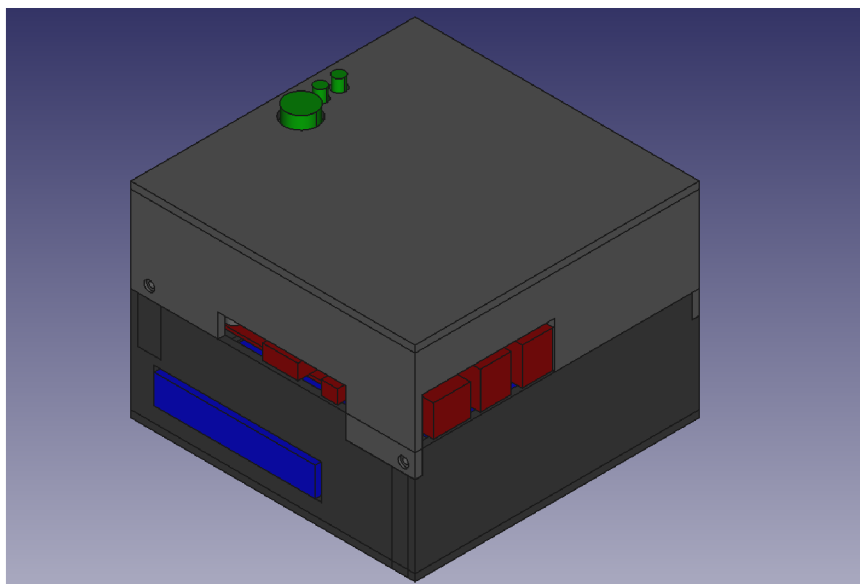
4.3 Návrh zapouzdření

V této podkapitole se věnuji návrhu krabičky, která vytvoří celkovou sestavu celého testeru kabeláže. Cílem tak je, aby jednotlivé části, jako hlavní měřicí deska, řídicí deska a přepínačová deska byly upevněny a navzájem propojeny.

Návrh jsem dělal ve volně dostupném programu FreeCAD [5]. Vymodeloval jsem si jednotlivé části plošných spojů, abych si lépe ucelil představu, jak bude finální krabička vypadat, a zamezil tak vzniku problémů, které by mohly vzniknout nedomyšleným rozmístěním jednotlivých částí.

Samotná krabička se skládá ze dvou částí. V horní části bude namontována hlavní měřicí deska s řídicí deskou, a do spodní části bude namontována přepínačová deska, která bude s hlavní deskou spojena kabelem tak, jak tomu bylo i v původním práci [1].

Náhled finální podoby produktu lze vidět na obrázku 4.9. Výkresy jsou pak k dispozici v příloze práce. Krabička byla následně vytisknuta na 3D tiskárně.



Obr. 4.9: Náhled finálního produktu v programu FreeCAD

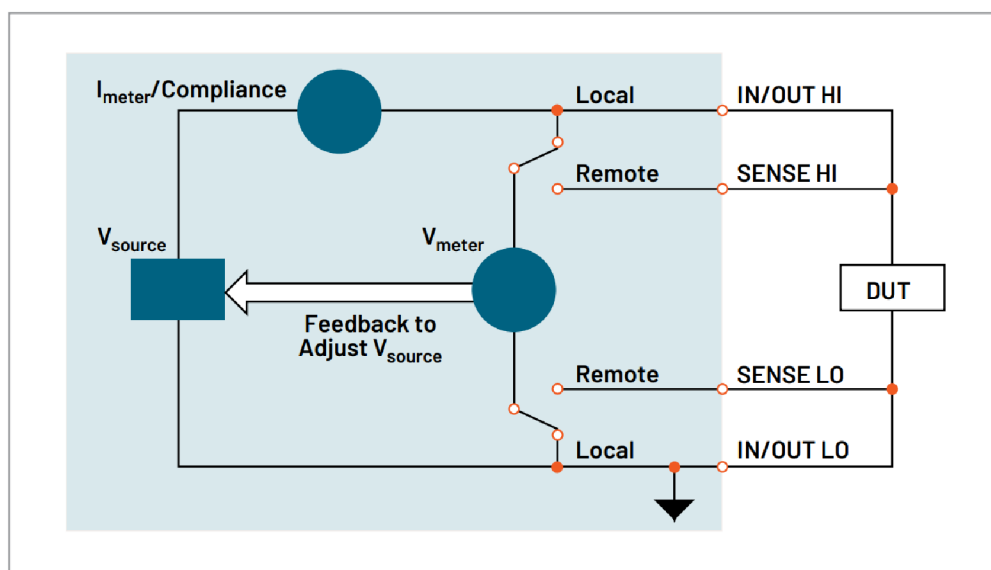
5 Měření

V této kapitole se již budu zaměřovat na zprovoznění zařízení. Od samotných kontrolních měření jednotlivých částí samotného výrobku, po automatické měření výrobku, které je samotným cílem této práce.

5.1 Kontrolní odpory

Aby bylo možné měření nějak srovnat s výsledkem, je třeba si tenhle výsledek nejdříve stanovit. K tomuto srovnání jsem si vybral sadu kontrolních odporů, které budou v tomto případě nahrazovat izolační odpor kabelů. A abych získal co nejpřesnější údaje, je třeba tyto odpory nejdříve změřit měřicím přístrojem, který bude mít daleko lepší přesnost, než se kterou počítám u svého testeru kabeláže.

Měření proběhlo na měřicím přístroji *KEITHLEY 2400 Standard Series SMU* [26], přes čtyřvodičové zapojení, které je znázorněno na obrázku níže 5.1. Proběhlo měření závislosti odporu na napětí, aby se odhalila případná nelinearita v závislosti na napětí při případném svodovém proudem okolo pouzdra samotného rezistoru.



Obr. 5.1: Schéma zapojení pro měření na přístroji KEITHLEY 2400

Naměřené a vypočtené hodnoty s grafem průběhu odporu na napětí jsou vzhledem k velikosti obsažené v příloze. Zde je uveden jen příklad výpočtu chyby nepřímého měření na odporu $383\text{ k}\Omega$ na napětí 100 V , kde naměřený proud je $261,22\text{ }\mu\text{A}$. Nelinearita nebyla prokázána z naměřených hodnot. Pro kalibrační měření testeru

kabeláže budu využívat především hodnoty odporů při napětí 100 V, neboť je tato hodnota s tímto napětí nejpřesnější.

5.1.1 Výpočet chyby nepřímého měření odporu

Měřicí přístroj *KEITHLEY 2400 Standard Series SMU*[26] má toleranci při zdroji napětí 0,02 % + 4 mV (5.1), a při měření proudu má toleranci 0,027 % + 60 nA pro rozsah 1 mA (5.2) a 0,035 % + 600 nA pro rozsah 10 mA.

$$\Delta U = \frac{\delta U}{100} \cdot U + U_{\text{amps}} = \frac{0,02}{100} \cdot 100 + 0,004 = 44 \text{ mV} \quad (5.1)$$

$$\Delta I = \frac{\delta I}{100} \cdot I + I_{\text{amps}} = \frac{0,027}{100} \cdot 261,22 \cdot 10^{-6} + 60 \cdot 10^{-9} = 130,53 \text{ nA} \quad (5.2)$$

Pro výpočet odporu se použije Ohmův zákon (5.3), kde jsou potřeba znát i jeho parciální derivace (5.4)(5.5) pro výpočet střední chyby (5.6) a maximální chyby (5.7) nepřímého měření, kde pak lze k nim vztáhnout relativní chyby (5.8)(5.9).

$$R = \frac{U}{I} = \frac{100}{261,22 \cdot 10^{-6}} = 382,82 \text{ k}\Omega \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial R}{\partial U} = \frac{1}{I} = 3828,19 \text{ }\Omega \cdot \text{V}^{-1} \quad (5.4)$$

$$\frac{\partial R}{\partial I} = -\frac{U}{I^2} = -1465504478 \text{ }\Omega \cdot \text{A}^{-1} \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned} \Delta R &= \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial U}\right)^2 \cdot \Delta U^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial I}\right)^2 \cdot \Delta I^2} \\ &= \sqrt{3828,19^2 \cdot 0,044^2 + (-1,465 \cdot 10^9)^2 \cdot (1,305 \cdot 10^{-7})^2} = 254,88 \text{ }\Omega \end{aligned} \quad (5.6)$$

$$\begin{aligned} \Delta R_{MAX} &= \left|\frac{\partial R}{\partial U}\right| \cdot |\Delta U| + \left|\frac{\partial R}{\partial I}\right| \cdot |\Delta I| \\ &= 3828,19 \cdot 0,044 + 1,465 \cdot 10^9 \cdot 1,305 \cdot 10^{-7} = 359,73 \text{ }\Omega \end{aligned} \quad (5.7)$$

$$\delta R = \frac{\Delta R}{R} \cdot 100 = \frac{254,88}{382820} \cdot 100 = 0,067 \% \quad (5.8)$$

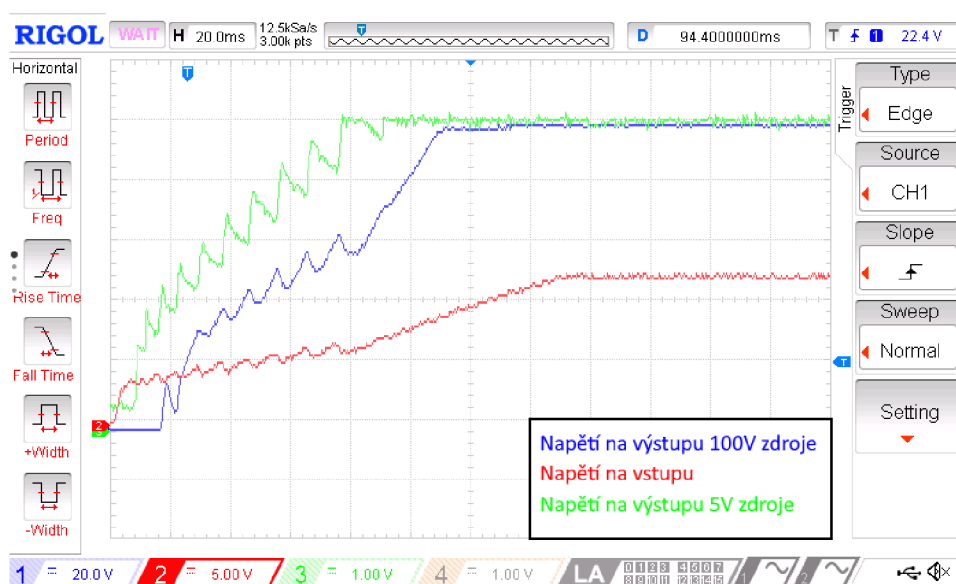
$$\delta R_{MAX} = \frac{\Delta R_{MAX}}{R} \cdot 100 = \frac{359,73}{382820} \cdot 100 = 0,094 \% \quad (5.9)$$

5.2 Oživování

V této podkapitole se zaměřuji na ověřování funkčnosti jednotlivých částí obvodu. Ověřuje se hlavně předpokládané chování se skutečným chováním. Propojí se teorie s praxí. Objeví se věci, které nebyly prvně očekávány a nebylo s nimi při návrhu počítáno.

5.2.1 Kontrola zdrojů

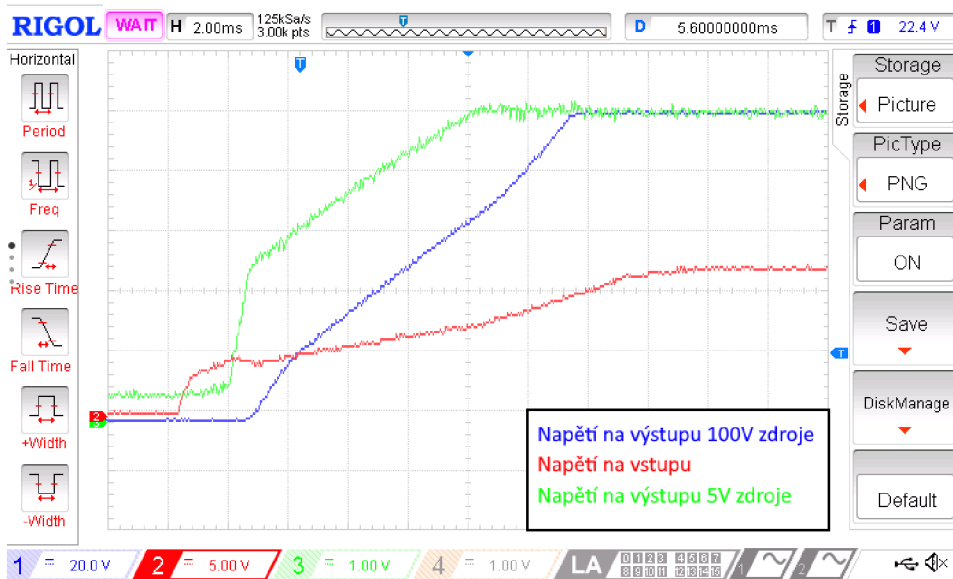
Jako první je třeba ještě před kompletním zapájením nastavit přes trimmer na 5V zdroji **U4 Mini MP1584 DC-DC 3A** na hodnotu výstupního napětí 5 V.



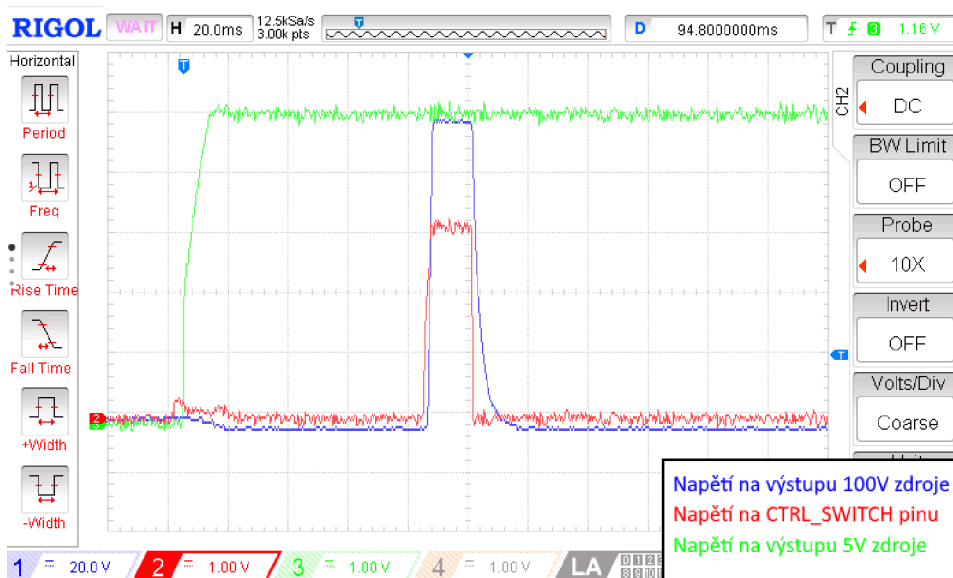
Obr. 5.2: Měření zdrojů bez R_{pi} s proudovým omezením na laboratorním zdroji

Po kompletním zapájení všech součástek se výstupy zdrojů zapojily do osciloskopu a vytvořily se následující snímky obrazovky. Na prvním 5.2 je vidět postupné nabíjení kondenzátorů za spínáními zdroji. To je způsobeno značným omezením proudu z laboratorního zdroje. Pro další 5.3 byl již maximální proud zdroje navýšen, a již nejsou znatelné takové skoky.

Po zapojení řídicí jednotky *Raspberry Pi* byl zjištěn krátký skok při zapínání *Raspberry Pi* na 100V zdroji, jak je vidět na obrázku 5.4. Tento skok je způsoben tím, že při bootu hýbe řídicí jednotka s pinem *GPIO18*, na který je přiveden *CTRL_SWITCH* signál, díky kterému se spíná 100V zdroj. O této vlastnosti jsem nevěděl při návrhu desky, a nenašel jsem způsob, jak by šla tato vlastnost vypnout.



Obr. 5.3: Měření zdrojů bez Rpi bez proudového omezení na laboratorním zdroji



Obr. 5.4: Měření zdrojů s Raspberry Pi

5.2.2 Kontrola AD převodníku

K ověření funkčnosti AD převodníku bylo potřeba připojit *Raspberry Pi* desku s hlavní deskou. Celé zapojení je vidět na obrázku 5.5. Pro ovládání *Raspberry Pi* byla do něj zapojena klávesnice, myš a monitor. V *boot* konfiguraci *Raspberry Pi* bylo třeba nastavit *I2C* sběrnici. Může se použít hardwarová sběrnice, která se volí odkomentováním řádku s `dtoverlay=i2c-arms=on`. Pro komplexnější používání

je ale doporučeno využívat softwarovou sběrnici, neboť na *Raspberry Pi* hardwarové sběrnici se vyskytuje takzvaný *clock-stretching bug* [24]. Ale vzhledem k tomu, že na *I2C* sběrnici je připojen jen AD převodník *MCP3424*, který nepoužívá *clock-stretching* [20], tak lze využít i hardwarovou verzi.



Obr. 5.5: Zapojení při ověřování funkčního AD převodníku

První krok k ověření funkčnosti převodníku je zjištění, co všechno vidí *Raspberry Pi* připojeno na *I2C* sběrnici. K tomu poslouží příkaz *i2cdetect*. Jak je vidět na výpisu z konzole na obrázku 5.6, tak vidí na adrese 0x68 připojené zařízení. Dle dokumentace [20] lze zjistit, že se jedná o výchozí adresu AD převodníku.

```
user@HVtester:~$ i2cdetect -y 1
    0  1  2  3  4  5  6  7  8  9  a  b  c  d  e  f
00:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
10:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
20:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
30:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
40:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
50:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
60:  --  --  --  --  --  --  --  --  68  --  --  --  --  --  --
70:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
```

Obr. 5.6: Výpis konzole při zadání příkazu *i2cdetect*

V dalším kroku lze komunikovat se zařízením na této adrese. Na dalším obrázku z výpisu z konzole 5.7 lze vidět, že přes příkaz *i2cset* se nastavuje, z jakého kanálu má AD převodník odečítat hodnotu, a přes příkaz *i2ctransfer* tu danou hodnotu z kanálu pošle. V tabulce jsou pak hodnoty zapsány a přepočítány do hodnot napětí z převodníku.

```

user@HVtester:~ S i2cset -y 1 0x68 0x78
user@HVtester:~ S i2ctransfer -y 1 r3@0x68
0xfd 0xa6 0x78
user@HVtester:~ S i2cset -y 1 0x68 0x58
user@HVtester:~ S i2ctransfer -y 1 r3@0x68
0x11 0xcb 0x58
user@HVtester:~ S i2cset -y 1 0x68 0x38
user@HVtester:~ S i2ctransfer -y 1 r3@0x68
0x00 0x00 0x38
user@HVtester:~ S i2cset -y 1 0x68 0x18
user@HVtester:~ S i2ctransfer -y 1 r3@0x68
0x01 0x5c 0x18

```

Obr. 5.7: Výpis konzole při používání příkazů *i2ctransfer*

Ze schématu 4.3 lze vidět, kde jaký kanál je připojen. Kanál CH2 je propojen zeměmi, takže správně ukazuje hodnotu 0 V. Kanály CH1 a CH4 jsou připojeny přes děliče napětí ke 100V úrovni. Při měření byl 100V zdroj vypnut. Hodnoty napětí lze zjistit ze vztahu děliče napětí (5.11). U výstupu 105V zdroje je naměřeno napětí 2,001 V (5.12) a u 100V zdroje je naměřeno napětí -3,462 V (5.13). Což se zdá zajímavé, ale jak je vidět z osciloskopu 5.4, tak je tam skutečně viditelné záporné napětí. U galvanicky odděleného zdroje je tak naměřeno rozdílné napětí 5,463 V, což je celkem očekávané. Lze tedy konstatovat, že AD převodník funguje, a správně odečítá hodnoty.

Tab. 5.1: Přepočet hodnot získaných z AD převodníku

Kanál	Adresa kanálu	Hodnota HEX	Hodnota DEC	Napětí na AD převodníku [mV]
CH1	0x18	0x015c	348	21,75
CH2	0x38	0x0000	0	0,00
CH3	0x58	0x11cb	4555	284,70
CH4	0x78	0xfda6	-602	-37,63

$$U_{AD} = \frac{DEC \cdot U_{ref}}{2^{16-1}} = \frac{348 \cdot 2,048}{2^{16-1}} = 21,75 \text{ mV} \quad (5.10)$$

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{R_{21}}{R_{20} + R_{21}} = U_1 \cdot \frac{1000}{92000} \quad (5.11)$$

$$U_{1(\text{CH1})} = U_{2(\text{CH1})} \cdot 92000 = 21,751 \cdot 92000 = 2,001 \text{ V} \quad (5.12)$$

$$U_{1(\text{CH4})} = U_{2(\text{CH4})} \cdot 92000 = -37,630 \cdot 92000 = -3,462 \text{ V} \quad (5.13)$$

5.2.3 Kontrola měřicího obvodu

Bylo provedeno kontrolní měření orientačního charakteru, kde byly proměřeny jednotlivé části obvodu. Měření probíhalo při teplotě 25 °C, tlaku 1020 hPa a na osciloskopu RIGOL MSO1074 8bit převodu.

Tab. 5.2: Naměřené hodnoty napětí k ověření funkčnosti zapojení

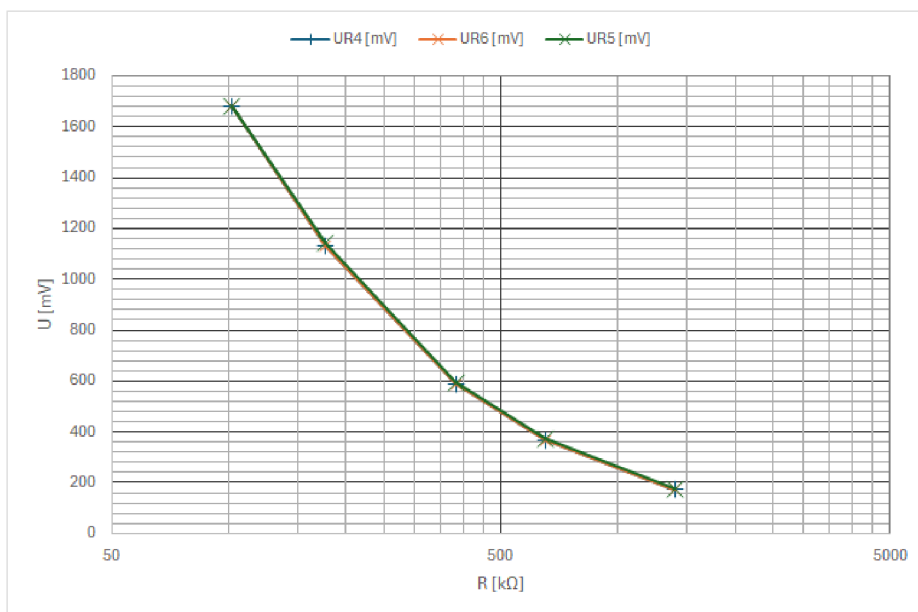
$R_z[\text{k}\Omega]$	$U_{R4}[\text{mV}]$	$U_{R6}[\text{mV}]$	$U_{R5}[\text{mV}]$
75	1680	1680	1680
102	1130	1130	1140
177	590	590	596
383	368	367	373
649	173	172	176

Tab. 5.3: Naměřené hodnoty napětí přepočítané na hodnoty proudu

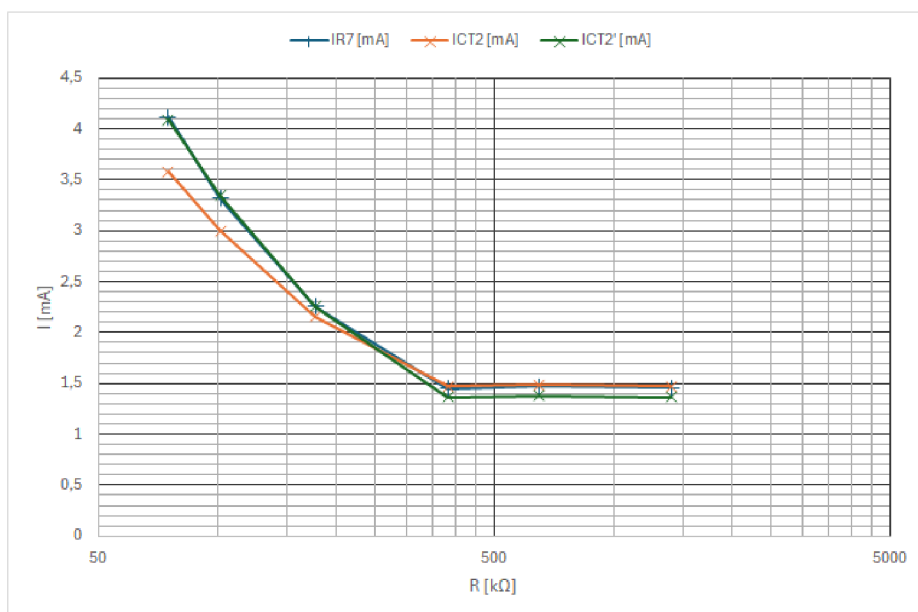
$R_z[\text{k}\Omega]$	$U_{R7}[\text{mV}]$	$U_{CT2}[\text{V}]$	$I_{R7}[\text{mA}]$	$I_{CT2}[\text{mA}]$	$I'_{CT2}[\text{mA}]$
75	2100	47,2	4,118	3,576	4,088
102	1690	39,6	3,314	3,000	3,343
177	1150	28,5	2,255	2,159	2,255
383	740	19,4	1,451	1,470	1,363
649	751	19,6	1,473	1,485	1,382
1400	744	19,4	1,459	1,470	1,363

$$I_{R7} = \frac{U_{R7}}{R_7} = \frac{2100}{510} = 4,118 \text{ mA} \quad (5.14)$$

$$I_{CT2} = \frac{U_{CT2}}{R_{11} + R_{12} + R_{13} + R_{14} + R_{15}} = \frac{47,2}{13200} = 3,576 \text{ mA} \quad (5.15)$$



Obr. 5.8: Graf naměřených hodnot napětí měřícího obvodu

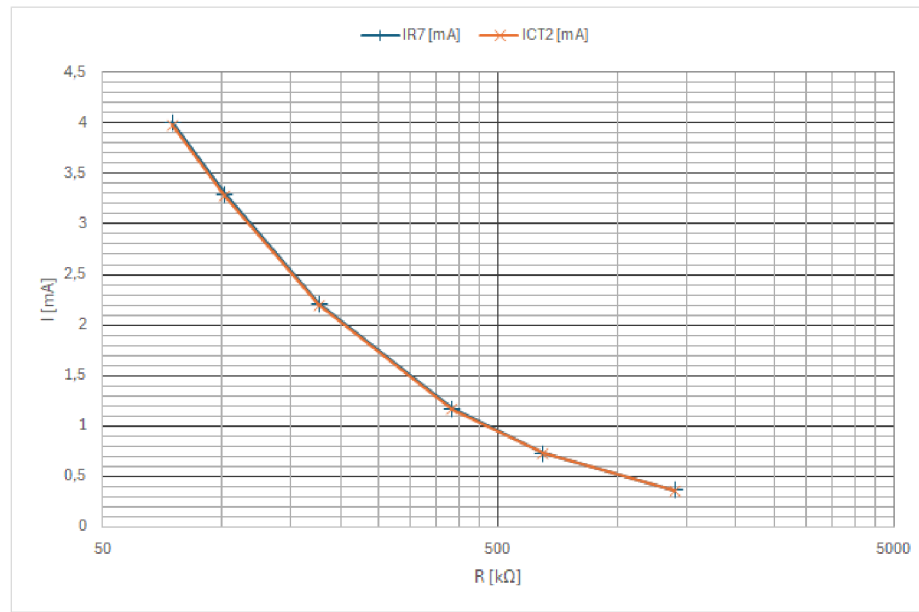


Obr. 5.9: Graf vypočtených proudů z naměřených hodnot měřícího obvodu

$$I'_{CT2} = \frac{U_{CT2} - U_{5V} - U_{D1}}{R_{11} + R_{12}} = \frac{47,2 - 5,5}{10200} = 4,088 \text{ mA} \quad (5.16)$$

Závěrem orientačního měření je, že dochází k saturování výstupu, kdy nedokáže operační zesilovač IC3 dostatečně uzavřít PNP tranzistor. Operační zesilovač MCP602[21] nedokáže totiž pracovat úplně až k napájecímu napětí na vstupu. Proto

byl tento jeden operační zesilovač nahrazen operačním zesilovačem OPA2376 [22], který dokáže už pracovat k napájecímu napětí na vstupu.

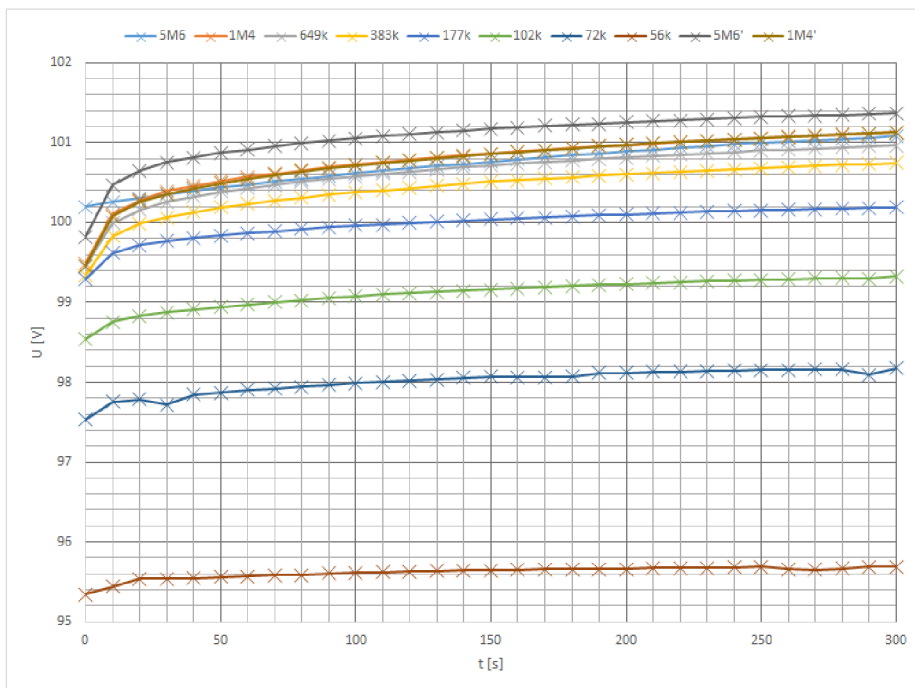


Obr. 5.10: Graf proudů měřícího obvodu ze simulace

5.3 Měření bez přepínačové desky

Při tomto měření byly postupně k hlavní desce připojeny, přímo ke konektoru na desce, testovací odpory ze sady. Proběhlo dlouhodobé měření, kdy byl jeden odpor měřen v intervalu 10 vteřin po dobu 5 minut. Pomocí měřícího skriptu, který je v příloze práce, bylo odečítáno napětí 100V zdroje, napětí 105V zdroje a napětí z měřícího obvodu.

Při prvním zkušebním měření se zjistilo, že napětí ze 100V zdroje teplotně driftuje. To bylo způsobeno tím, že se zdroj chová spíše jako zdroj proudu, a ten proud prochází přes 100V transil, který se tímto zahřívá a napětí na něm roste. To jsem opravil tím, že se na výstup zdroje připojily paralelně dva 56kΩ odpory, který pomohou odebírat nadbytečný proud. To ovšem mělo za následek změkčení zdroje, a při větší zátěži již nebyl schopen generovat dostatečné napětí. Měřícím obvodem teče více proudu úměrně k větší zátěži, což celý problém zhoršuje. Využil jsem ale toho, že jsem nahradil odpor R_7 na hodnotu 1 kΩ, kde jsem rozsah měření přiblížil k hodnotám testovacích odporů, a zároveň zmenšil proud měřícím obvodem na polovinu. Po této změně jsem provedl další měření.



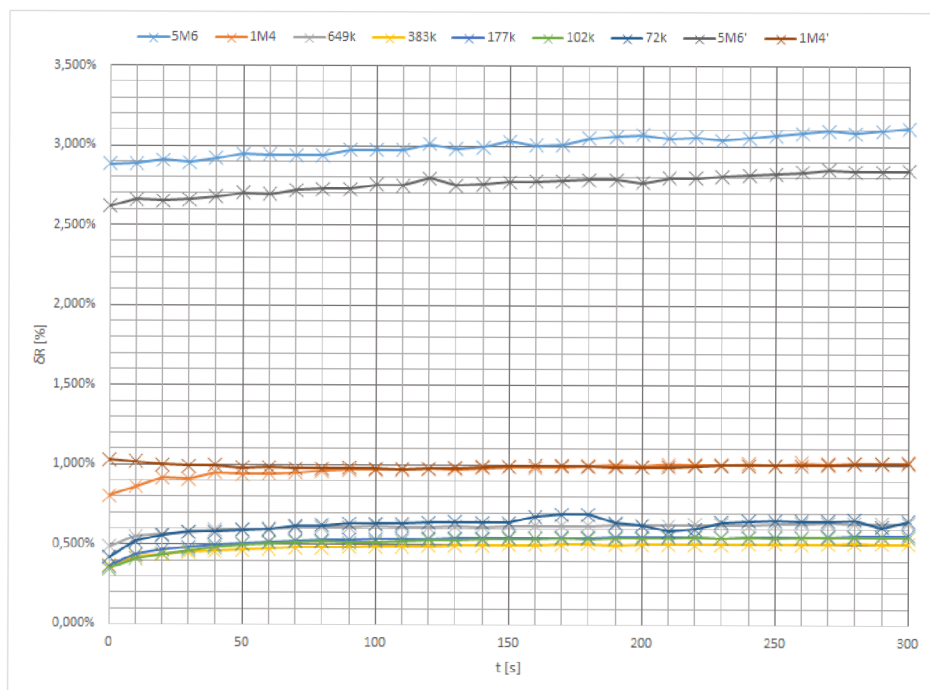
Obr. 5.11: Graf závislosti napětí 100V zdroje na čase

Při dosažení konstantních hodnot odporu ze vztahu (3.8) vznikne vztah (5.17), kde pomocí měření napětí 100V zdroje U_N , měřením napětím U_{AD} na R_9 v měřícím obvodu, lze vypočítat hodnotu odporu připojeném na desku.

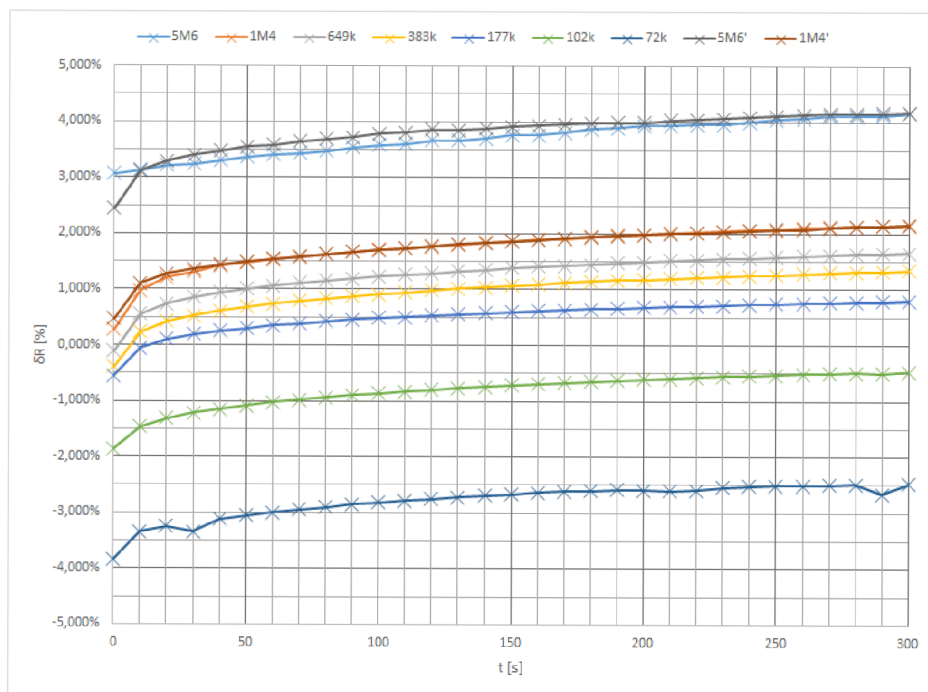
$$R_Z = 2,55 \cdot \frac{R_9 \cdot U_N}{U_{AD}} - 50000 \quad (5.17)$$

Na obrázku 5.11 je vidět graf odečítaného napětí ze 100V zdroje na čase. Změnou v čase je vidět tepelný drift. Znatelnější je tento drift u vyšších odporů v zátěži, neboť teče více proudu přes transil, který zahříváním zvyšuje na sobě svoje napětí. U nižších odporů v zátěži se projevuje měkkost zdroje. Na grafu 5.12 je vynesena relativní chyba z odečtených hodnot podle vztahu (5.17) na čase. Nejhorší relativní chyba se vyskytuje okolo 3 %. Pro porovnání lze vidět na grafu 5.13, kde není zavedena kompenzace dle naměřeného napětí zdroje, a je tak tam dosazena hodnota 100 V. Je tam znát větší relativní chyba okolo 5 %. Vyšší hodnoty uvedené s apostrofem jsou měřené na lepším rozsahu, kde je hodnota odporu R_9 přepnuta na 3 k Ω

Zvýšená chyba u měření vyšších odporů může být způsobena zkreslením z měření, kde se i měří svodový proud samotné desky, tudíž i její izolační odpor. Tento vliv bývá nelineární, ale vzhledem k tomu, že měření probíhá přibližně na stejných hodnotách napětí, tak si tento vliv lze linearizovat odporem, který se připočte tak,



Obr. 5.12: Graf odečteného odporu na čase

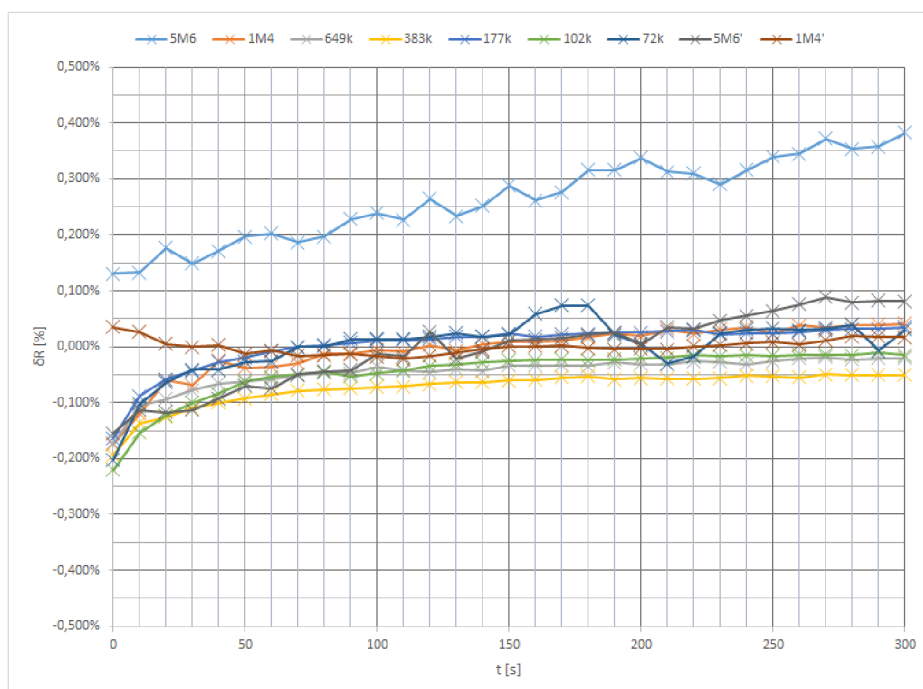


Obr. 5.13: Graf odečteného odporu na čase bez kompenzace napětí 100V zdroje

jako by byl paralelně zařazen k měřenému odporu, dle vztahu (5.18), kde R_Z je skutečná hodnota měřeného odporu, R_X je odečtená hodnota a R_i je odhadnutá hod-

nota izolačního odporu samotné desky. Izolační hodnota samotné desky byla potom odhadnuta na $230 \text{ M}\Omega$ a zároveň byly hodnoty přepínacích odporů R_9 na rozsahu pozměněny na $1003,5 \text{ }\Omega$ a $3011 \text{ }\Omega$, aby se výsledky více přiblížily skutečným hodnotám. Výsledkem je pak graf 5.14, kde je nehorší chyba k $0,5 \%$, a to ještě na rozsahu, který není určen k měření vyšších odporů.

$$R_Z = \frac{R_i \cdot R_X}{R_i - R_X} \quad (5.18)$$



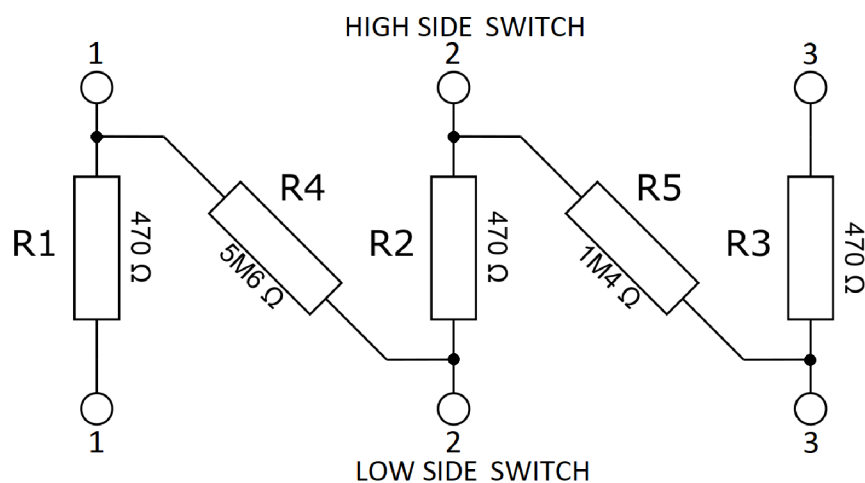
Obr. 5.14: Graf odečteného odporu na čase s kompenzací svodového proudu

5.4 Měření s přepínačovou deskou

Jako poslední je třeba otestovat správnou funkci celkové sestavy. Komunikace se spínačovou deskou bude probíhat stejně, jako v původní práci [1]. Skript je jen upraven o odečet napětí a výpočet odporu. Celý skript včetně získaných hodnot z měření jsou k dispozici v příloze práce.

Při zapojení přepínačové desky se zjistilo, že se při použití plochých kabelů obrátily přední a zadní strany zapojené ke konektoru X2. Bylo tak třeba otočit sudé a liché páry plochého kabelu. Pro případný další návrh desky bude tak zapotřebí zapojení tohoto konektoru zrcadlově otočit, aby nebylo třeba tuto dodatečnou úpravu provádět. Případně stačí osadit konektor na druhou stranu plošného spoje.

Pro otestování je na výstupní konektor přepínačové desky zapojena odporová síť 5.15 tak, aby se napodobilo zapojení kabelového svazku. Nechtěl jsem zpočátku síť nějak zatěžovat nižšími odpory, tak jsem zvolil nejdříve odpory o hodnotách $470\ \Omega$, které jsou stejně mimo měřitelný rozsah, neboť se zde zabývám měřením izolačního odporu. Po testu vznikla tabulka 5.4, kde je vidět, že test nám proběhl celkově úspěšně. Tento test byl spuštěn bez kalibrace z předcházejí podkapitoly, neboť se izolační odpor soustavy stejně zmenšil zapojením spínačové desky. Je třeba tak znovu proměřit izolační odpor celé soustavy. Dále je i vidět odečítání nesprávné hodnoty na hlavní diagonále matice. To je způsobeno již zmíněnému měření za hraničí rozsahu, kde už jsou operační zesilovače v měřícím obvodu saturevané.



Obr. 5.15: Schéma zapojených testovacích odporů do odporové sítě

Tab. 5.4: Naměřené hodnoty z automatického měření odporové sítě

	1	2	3
1	58,7 k Ω	5,5 M Ω	6,9 M Ω
2	5,5 M Ω	59,0 k Ω	1,4 M Ω
3	6,9 M Ω	1,4 M Ω	59,1 k Ω

Pro kalibraci, tedy zjištění izolačního odporu samotné měřící soustavy, jsem připojil sadu testovacích odporů na výstupní konektor, a pomocí skriptu spustil měření. Skript jsem si ještě upravil tak, aby mi zapisoval celé hodnoty pod sebe do samostatného souboru, pro lepší zpracování. Pro výpočty ve skriptu jsem využil stejné hodnoty odporu R_0 získané z předchozí podkapitoly, neboť by se tyto hodnoty neměly měnit, a měly by být přesnější. Naměřené hodnoty odporu ze všech měření

jsou obsaženy v příloze práce. Po několika pokusech měření mi vyšlo, že se izolační odpor celé soustavy zmenšil podle očekávání, a to na hodnotu 162 MΩ.

Následně jsem pro kontrolu použil stejné zapojení odporové sítě 5.15, kde jedinou změnou bylo nahrazení odporů 470 Ω na hodnoty 1,2 Ω, které by nějak neměly ovlivnit měření. Výsledkem spuštěného testu je tabulka 5.5, kde je vidět, že se dosáhlo daleko přesnějšímu měření sady testovacích odporů.

Tab. 5.5: Naměřené hodnoty z automatického měření odporové sítě po kalibraci

	1	2	3
1	58,5002 kΩ	5,6857 MΩ	7,1275 MΩ
2	5,6888 MΩ	59,7788 kΩ	1,4307 MΩ
3	7,1241 MΩ	1,4304 MΩ	58,8615 kΩ

Tab. 5.6: Relativní chyba při měření odporové sítě

R [Ω]	$R_{m\check{e}r}$ [Ω]	δ_R [%]
1431230	1430700	0,037 %
	1430400	0,058 %
5673600	5685700	-0,213 %
	5688800	-0,268 %
7104830	7124100	-0,271 %
	7127500	-0,319 %

$$\delta_R = \frac{R - R_{m\check{e}r}}{R} \cdot 100 = \frac{1431230 - 1430700}{1431230} \cdot 100 = 0,037 \% \quad (5.19)$$

Z dosažených výsledků lze vyvodit, že relativní chyba měření je v nejhorším případě okolo 0,3 %. To je lepší výsledek, než bylo předpokládáno. Je to především dosaženo samotnou kalibrací a započítáním izolačního odporu samotné soustavy, díky čemu se povedlo dosáhnout přesnějšímu měření.

5.5 Testovací skript

Tuhle podkapitolu jsem se rozhodl udělat proto, abych se mohl zvlášť věnovat samotnému softwaru, který byl třeba dodělat pro dokončení této práce. Bylo tak třeba upravit testovací skript z předchozí práce [1] tak, aby bylo možné měřit s upraveným hardwarem.

Jako první je třeba nastavit konfiguraci samotného *RaspberryPi*. Celá konfigurace je obsažen v elektronické příloze, zde je jen výřez 5.1 samotného nastavení, kde nastavuji I2C sběrnici a následný *devicetree*[25] čipu *MCP3424* pro tuto sběrnici. Jak již jsem v jedné z předchozích podkapitol zmínil, tak pro hardwarovou I2C sběrnici se vyskytuje takzvaný *clock-stretching bug*[24], který ovšem neovlivňuje čip *MCP3424*[20], neboť nepoužívá *clock-stretching*. Proto jsem si dovolil pro toto využití použít hardwarovou sběrnici.

Devicetree[25] je datová struktura popisující hardwarovou komponentu, v tomto případě čip *MCP3424*, díky tomu dokáže jádro operačního systému tuto komponentu používat a spravovat.

Výpis 5.1: Výřez nastavení config.txt pro RaspberryPi

```
# Uncomment some or all of these to enable the optional hardware interfaces
dtparam=i2c_arm=on
#dtparam=i2s=on
#dtparam=spi=on

#Enable devicetree for MCP3424
dtoverlay=mcp342x,adr=0x68,mcp3424
```

Dále je potřeba nastavit vzorkovací frekvenci (*sampling frequency*), neboť ve výchozím nastavení je nastaveno na 240 SPS (12 bits). Ovšem pro měřicí účely není vhodné používat rychlejší a nepřesný převod, ale spíše naopak pomalejší a přesnější převod. Proto je třeba nastavit nejlépe 3,75 SPS (18 bits) zapsáním trojky do nastavení *devicetree*, jak je ukázáno ve výpisu 5.2.

Výpis 5.2: Načtení knihovny a nastavení vzorkovací frekvence pro devicetree

```
sudo modprobe mcp3422
sudo sh -c "echo 3.75 >> /sys/class/i2c-adapter/i2c-1/1-0068/iio\:device0/in_voltage_sampling_frequency"
```

Pomocí *devicetree* se dá velice snadno odečíst hodnota naměřeného napětí z čipu. Není tak třeba si psát vlastní dekódování z I2C sběrnice, jak tomu bylo v předcházející práci [1]. Příklad odečítání naměřené hodnoty napětí je uveden ve výpisu 5.3.

Výpis 5.3: Příklad čtení hodnot pomocí devicetree

```
measure_u() {
#Ctení hodnot pomocí device tree
RAW='cat /sys/bus/i2c/devices/1-0068/iio\:device0/in_voltage2_raw'
SCALE='cat /sys/bus/i2c/devices/1-0068/iio\:device0/in_voltage2_scale'
V_meas=$(echo "$RAW*_$SCALE" | bc)
...
}
```

Ve výpisu 5.4 je vidět nejdůležitější úprava, a to implementace vztahů 5.17 a 5.18, které jsou přesně vypočítány k danému hardwaru. Díky těmto vztahům se vypočítá měřený izolační odpor z odměřených hodnot napětí.

Pro úspornější zápis do souborů jsem tam ponechal zápis s jednotkami z předchozí práce.

Výpis 5.4: Výpočet hodnoty odporu

```
convert_r() {
voltage="$1"
R9="$2"
#Vypocet odporu z napeti dle daneho vzorce
R_x=$(echo "scale=2;((2.55*_R9*_V_100)/_voltage)_-50000" | bc)
#Zapocetni izolacniho odporu samotneho mericiho zarizeni
R_isol=$(echo "scale=2;((162000000*_R_x)/_(162000000_-_R_x))" | bc)
#Hodnote se da jednotka pro uspornejši zapis do souboru
if [ $(echo "$R_isol" '>=' "1000000" | bc -l) -eq 1 ];
then
R_OUT=$(echo "$R_isol"/1000000 | bc -l)
order="M"
elif [ $(echo "$R_isol" '>=' "1000" | bc -l) -eq 1 ];
then
R_OUT=$(echo "$R_isol"/1000 | bc -l)
order="k"
else
R_OUT="$R_isol"
order="R"
fi
}
```

Jako poslední úpravou znázorněném ve výpisu 5.5 je přidání přepínání rozsahu v průběhu cyklu testování kabelového svazku. Nejdříve je v daném cyklu hodnota odečtena na rozsahu pro menší odpory, při kterých dochází k větším úbytkům napětí na odporu R_9 , jak je znázorněno na obrázku 4.4.

Pokud je měřené napětí dostatečně malé, v tomto případě pod hodnotou 0,5 V, tak dochází k přepnutí rozsahu pro větší hodnoty izolačního odporu. Ten je realizován zavřením tranzistoru, tím se přidá větší odpor, na kterém pak vzniká větší úbytek napětí, a tím i vyšší přesnost z odečítání tohoto napětí na AD převodníku.

Výpis 5.5: Výřez upraveného měřicího skriptu

```
#nastaveni rozsahu měření na vyšší hodnoty
RANGE_SWITCH "1"
#pri tom je pocitano s odporem R9-1k
R9="1003.5"
sleep 0.5
#odmeri danou hodnotu
measure_u
cmp_result=$(echo "$V_meas<_0.5" | bc -l)
#kontrola, zda je mereni v danem rozsahu spravne
if [ "$cmp_result" -eq "1" ]
then
#pokud ne, prepne se rozsah na mereni mensich odporu
RANGE_SWITCH "0"
#pri tom je pocitano s odporem R9-3k
R9="3011"
sleep 0.5
measure_u
fi
#odmerene napeti se prepocete na hodnotu odporu
convert_r "$V_meas" "$R9"
```

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo navázat na předcházející dosažené výsledky z práce Ing. Jakuba Valenty na téma testeru kabeláže. V jeho realizaci se vyskytuje část obvodu, která zhoršuje přesnost měření, a tak jeho tester vyhodnocuje chybně svoje výsledky. Cílem této práce tak bylo vylepšit tuto část, aby dosažené výsledky byly podstatně lepší.

Jedná se o část obvodu u AD převodníku, která měří úbytek napětí na omezovacím odporu. V původním zapojení je tato část řešena pomocí děličů napětí. Tohle zapojení má nejlepší přenos pro hodnotu měřeného odporu v okolí hodnoty odporu samotného děliče. Ten je ovšem pro účely měření izolačního odporu velmi nízký. Při měření izolačního odporu tak dochází k velmi velké nejistotě měření. I při měření odporů blízkých k odporu děliče je nejistota tohoto měření okolo 20 %.

Navrhované vylepšení je složeno z invertujícího zesilovače, který zesílí část napětového rozsahu pro předpokládané hodnoty izolačního odporu. To pak navazuje na další část, kterou je napětově řízený zdroj proudu. Tento proud lze pak snadno upravit podle potřeb AD převodníku. Analýzou tohoto řešení jsem se dostal k podstatně lepším nejistotám měření v okolí hodnot předpokládaného izolačního odporu, a to pod 10 %.

Dalším postupem práce bylo tenhle vylepšený obvod prakticky realizovat. Bylo tak zapotřebí navrhnout novou desku plošného spoje, která obsahuje dané úpravy. Tuto desku bylo třeba zapojit spolu s řídicí deskou a přepínacovou deskou a ověřit její funkčnost.

Po prvních měření bylo potřeba vyměnit jeden operační zesilovač, který nedokázal dosáhnout k napájecímu napětí na vstupu, a tak docházelo ke zkreslování. Dále bylo třeba přidat ke 100V zdroji odpory odebírající přebytečný proud k zamezení teplotního driftu na transilu. A jako poslední bylo třeba upravit rozsah měření, aby bylo možné měření ověřit na dostupné testovací sadě odporů.

Při postupném měření testovacích odporů se ukázalo, že dochází u větších odporů ke zkreslování jejich hodnot. Měření je totiž ovlivněno samotným izolačním odporem měřící soustavy. Po započítání tohoto odporu je relativní chyba měření v nejhorsím případě okolo 0,3 %. To je lepší výsledek, než se kterým se počítalo, a rozhodně se jedná o přesnější měření, než které bylo dosaženo v práci Ing. Jakuba Valenty. Povedlo se tak splnit cíl této práce.

Literatura

- [1] VALENTA, J. *Tester Kabeláže*, Brno, 2021. Diplomová práce (Ing.). Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky.
- [2] BI, Zhuming, Carlos POMALAZA-RÁEZ, Dustin HERSHBERGER, Jeremy DAWSON, Andrew LEHMAN, John YUREK a Jared BALL. *Automation of Electrical Cable Harnesses Testing. Robotics*. 2018, 7(1). DOI: 10.3390/robotics7010001. ISSN 2218-6581. Dostupné z URL: [<https://www.mathworks.com/>](https://www.mathworks.com/).
- [3] MATHWORKS *MatLab* [online]. Dostupné z URL: [<https://www.mathworks.com/>](https://www.mathworks.com/).
- [4] SPECTRUM SOFTWARE *Micro-Cap* [online]. Dostupné z URL: [<http://www.spectrum-soft.com/>](http://www.spectrum-soft.com/).
- [5] The FreeCAD Team *FreeCAD* [online]. Dostupné z URL: [<https://www.freecad.org/>](https://www.freecad.org/).
- [6] ELECTRICIANEXP *ELECTRICIANEXP* [online]. Dostupné z URL: [_1001_1002_2001>](https://electricianexp.com/41/cs/equipment/electronic-components/rasshifrovka-cifrovoj-i-bukvennoj-markirovki-smd-rezist_1001_1002_2001).
- [7] DC-HVDC CONVERTER *XP Power* [online]. Dostupné z URL: [_1001_1002_2001>](https://www.xppower.com/portals/0/pdfs/SF_A_Series.pdf).
- [8] PUNČOCHÁŘ, J. *OPERAČNÍ ZESILOVAČE v elektrotechnice* BEN technická literatura, 2002, 5. vydání., str. 237 - 238.
- [9] SAINI, A.: Insulation Resistance of a Cable. online, květen 2017 Dostupné z URL: [_1001_1002_2001>](https://eeebooks4u.wordpress.com/2021/06/06/insulation-resistance-of-a-cable/).
- [10] PIONTECK, J.; WYPYCH, G.: Typical Methods of Quality Control of Antistatics. In *Handbook of Antistatics*, ChemTec Publishing, 2. vydání, 2016, ISBN 978-1-895198-95-9, s. 39 – 63.
- [11] HOMEPRO, E.: What is transition contact resistance and how to deal with it. Dostupné z URL:

<<https://i.electricianexp.com/en/main/school/449-perehodnoe-kontaktnoe-soprotivlenie.html>>.

- [12] VOKÁLEK, P.: *Problematika zaměrování poruch na kabelech*. České Budějovice, 2014. Diplomová práce (Ing.), Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Dostupné z URL:

<https://theses.cz/id/bqpurd/DP_Vokalek.pdf>.

- [13] XP Power: *A Series DC - HVDC Converter*. listopad 2023, datasheet. [online]. Dostupné z URL:

<https://www.xppower.com/portals/0/pdfs/SF_A_Series.pdf>.

- [14] HAOYU STAR Electronics: *MP1584 Buck / Step Down 3A Adjustable Regulator Module*. listopad 2023, datasheet. [online]. Dostupné z URL:

<<https://www.hotmcu.com/mp1584-buck-step-down-3a-adjustable-regulator-module-p-8.html>>.

- [15] aimtec: *Series AM1S-Z*. listopad 2023, datasheet. [online]. Dostupné z URL:

<<https://www.tme.eu/Document/7c8397475470cad706e63d15d1f66689/AM1S-Z.pdf>>.

- [16] onsemi: *Digital FET, P-Channel FDV304P, FDV304P-F169*. únor 2022 - Rev. 6, datasheet. [online]. Dostupné z URL:

<https://cz.mouser.com/datasheet/2/308/1/FDV304P_D-2313231.pdf>.

- [17] Infineon: *IRLML0060TRPbF*. prosinec 2016, datasheet. [online]. Dostupné z URL:

<https://cz.mouser.com/datasheet/2/196/Infineon_IRLML0060_DS_v01_01_EN-3363443.pdf>.

- [18] onsemi: *MMBT5401W - High Voltage Transistor*. prosinec 2017 - Rev. 3, datasheet. [online]. Dostupné z URL:

<https://cz.mouser.com/datasheet/2/308/1/MMBT5401W_D-2316299.pdf>.

- [19] onsemi: *BSP16T1G - High Voltage Transistors*. září 2010 - Rev. 7, datasheet. [online]. Dostupné z URL:

<https://cz.mouser.com/datasheet/2/308/1/BSP16T1_D-2310251.pdf>.

- [20] Microchip Technology Inc: *18-Bit, Multi-Channel DeltaSigma Analog-to-Digital Converter with I2C Interface and On-Board Reference*. 2009, datasheet. [online]. Dostupné z URL:

<<https://cz.mouser.com/datasheet/2/268/22088c-3136953.pdf>>.

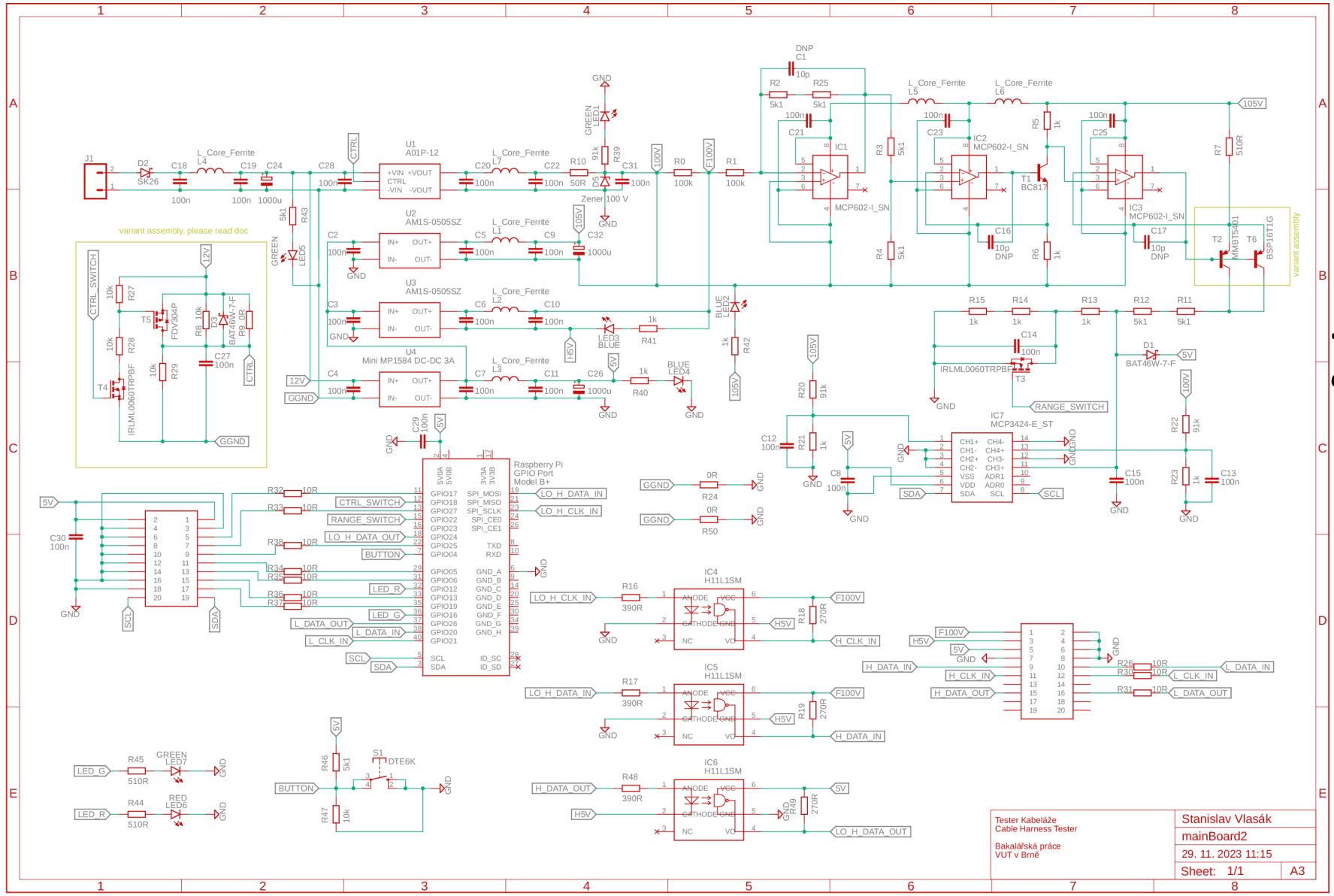
- [21] Microchip Technology Inc: *MCP601/1R/2/3/4, 2.7V to 6.0V Single Supply CMOS Op Amps*. 2007, datasheet. [online]. Dostupné z URL: <<https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21314g.pdf>>.
- [22] Texas Instruments: *OPA376 Low-Noise, Low Quiescent Current, Precision Operational Amplifier e-trim Series*. 2015, datasheet. [online]. Dostupné z URL: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa2376.pdf>>.
- [23] Toshiba Corporation : *CMOS Digital Integrated Circuits Silicon Monolithic 74HC164D*. červenec 2017 Rev. 3.0, datasheet. [online]. Dostupné z URL: <<https://cz.mouser.com/datasheet/2/268/22088c-3136953.pdf>>.
- [24] GitHub: *2C clock-stretching bug #4884*. únor 2022. [online]. Dostupné z URL: <<https://github.com/raspberrypi/linux/issues/4884>>.
- [25] GitHub: *Firmware boot overlays README*. květen 2024. [online]. Dostupné z URL: <<https://github.com/raspberrypi/firmware/blob/master/boot/overlays/README>>
- [26] TEKTRONIX: *Keithley 2400 Standard Series SMU*. březen 2024. [online]. Dostupné z URL: <<https://www.tek.com/en/products/keithley/source-measure-units/2400-standard-series-sourcemeter>>.
- [27] ČSN 33 2000-6 ed. 2: *Elektrické instalace nízkého napětí - Část 6: Revize*. technická norma, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, březen 2017.
- [28] ČSN 34 7010-82 ed. 2: *Elektrické kabely - Doplňující zkušební metody*. technická norma, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 2020.
- [29] ČSN EN 50395: *Elektrické zkušební metody kabelů a vodičů pro nízká napětí*. technická norma, Český normalizační institut, Praha, 2006.
- [30] ČSN EN 60243-1 ed. 2: *Elektrická pevnost izolačních materiálů - Zkušební metody - Část 1: Zkoušky při průmyslových kmitočtech*. technická norma, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 2014.
- [31] ČSN EN 61010-1 ed. 2 *Bezpečnostní požadavky na elektrická měřicí, řídicí a laboratorní zařízení - Část 1: Všeobecné požadavky*. technická norma, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 2011.

- [32] ČSN EN IEC 62368-1 ed. 2+A11 *Zařízení audio/video, informační a komunikační technologie - Část 1: Bezpečnostní požadavky*. technická norma, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 2021.
- [33] IPC-2221A *Generic Standard on Printed Board Design*. A standard developed by IPC, Sanders Road, Northbrook, 2003.

Seznam příloh

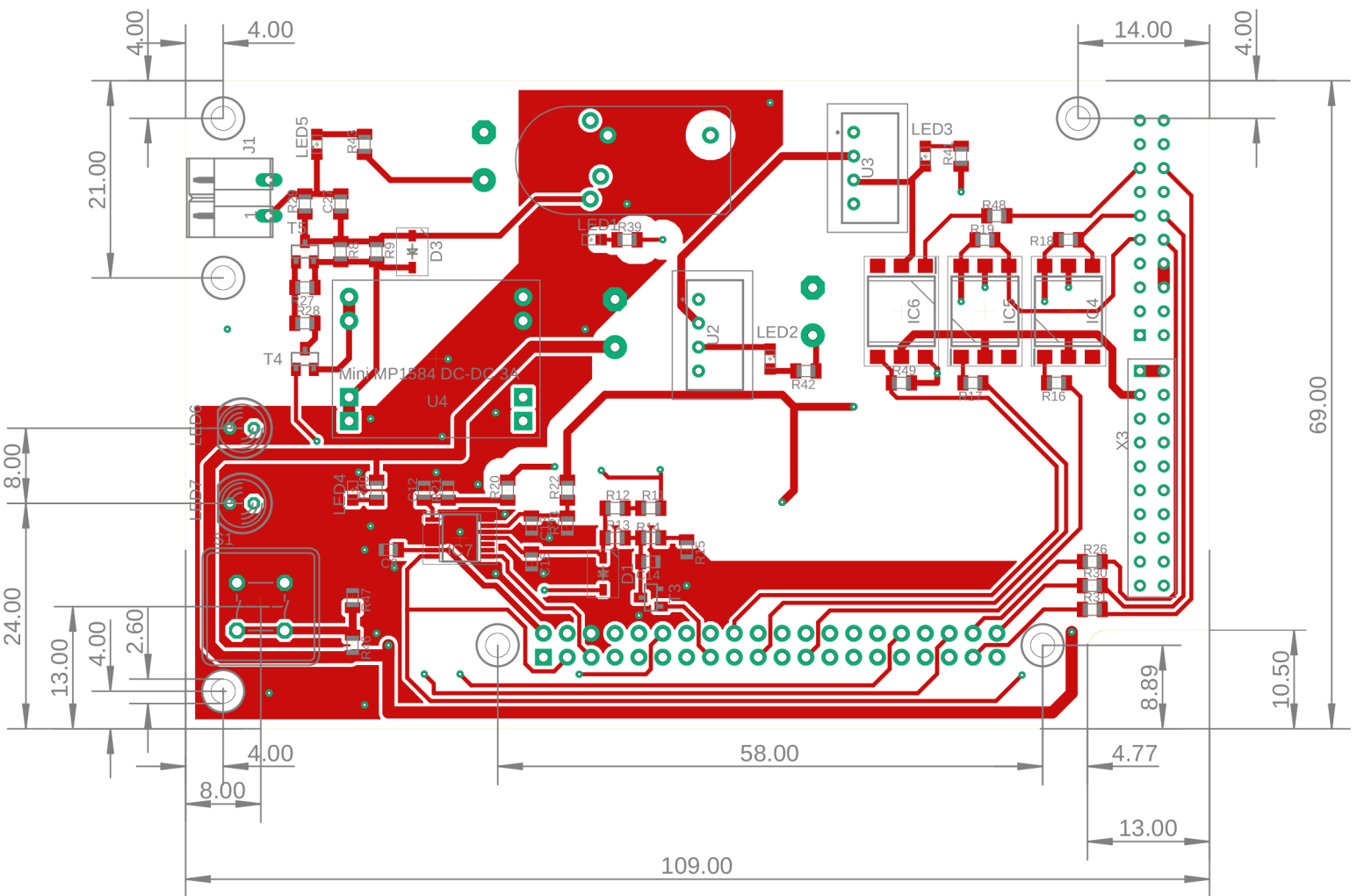
A Schéma zapojení	79
B Návrh desky plošného spoje	81
C Výkresy navržené krabičky	83
D Měření testovacích odporů	87
E Obsah elektronické přílohy	95

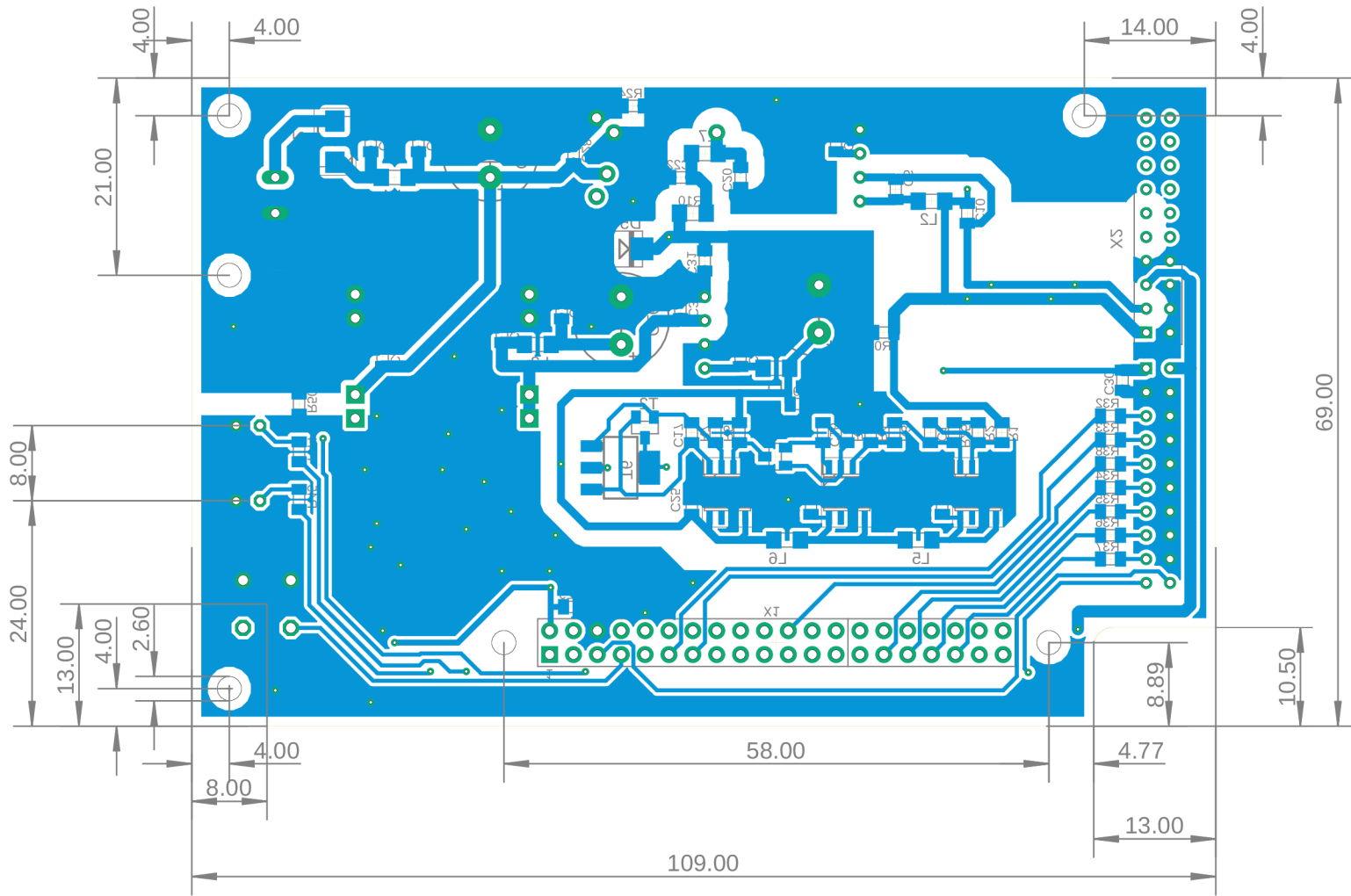
A Schéma zapojení

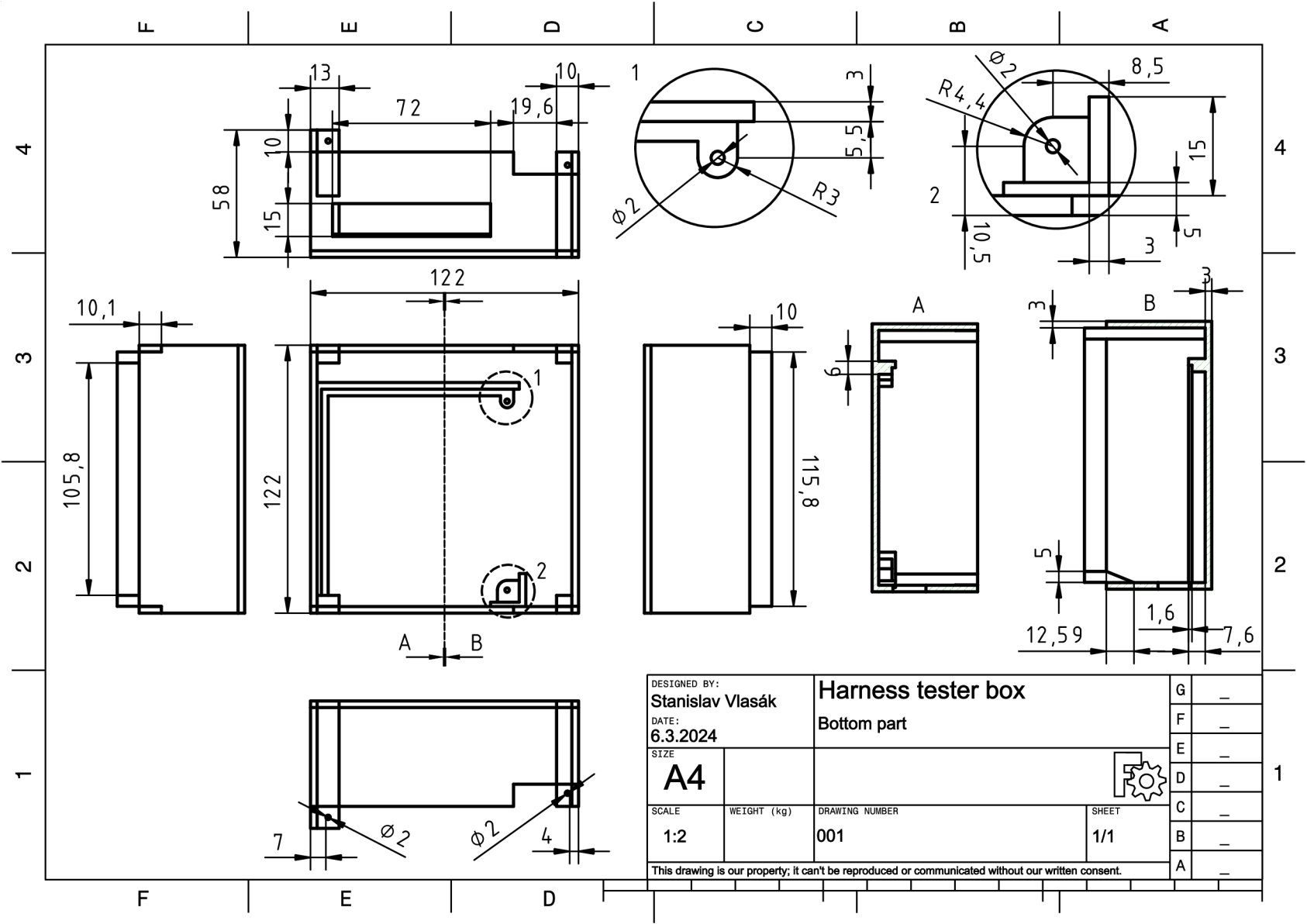


Tester Kabeláže Cable Harness Tester	Stanislav Vlasák
Bakalářská práce VUT v Brně	mainBoard2
	29. 11. 2023 11:15
	Sheet: 1/1
	A3

B Návrh desky plošného spoje

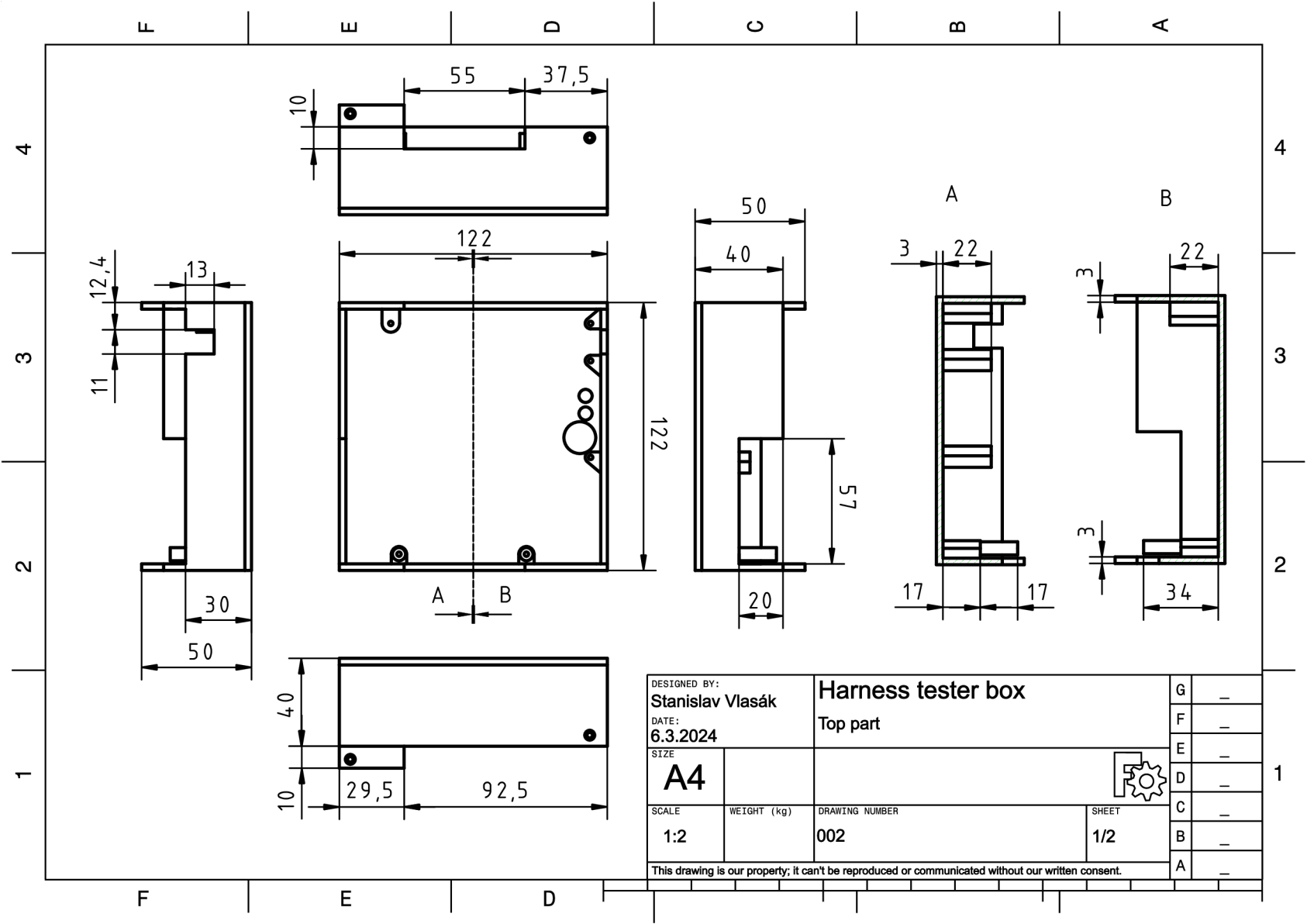







C Výkresy navržené krabičky

DESIGNED BY: Stanislav Vlasák		Harness tester box		G	-
DATE: 6.3.2024		Bottom part		F	-
SIZE: A4				E	-
SCALE		WEIGHT (kg)	DRAWING NUMBER	SHEET	
1:2			001	1/1	
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written consent.					
				D	-
				C	-
				B	-
				A	-



DESIGNED BY: Stanislav Vlasák		Harness tester box		G	-
DATE: 6.3.2024		Top part		F	-
SIZE: A4				E	-
SCALE		WEIGHT (kg)	DRAWING NUMBER		
1:2			002		
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written consent.					

1

D Měření testovacích odporů

Měření testovacích odporů

Měřil **Stanislav Vlasák**

Dohlížel **Ing. František Burian, Ph.Dr.**

Dne 11.3.2024

Měřicí přístroj

KEITHLEY SMU 2400 S.N. 0707096

Tolerance ampérmetru
0,027 % + 60 nA pro rozsah 1 mA
0,035 % + 600 nA pro rozsah 10 mA

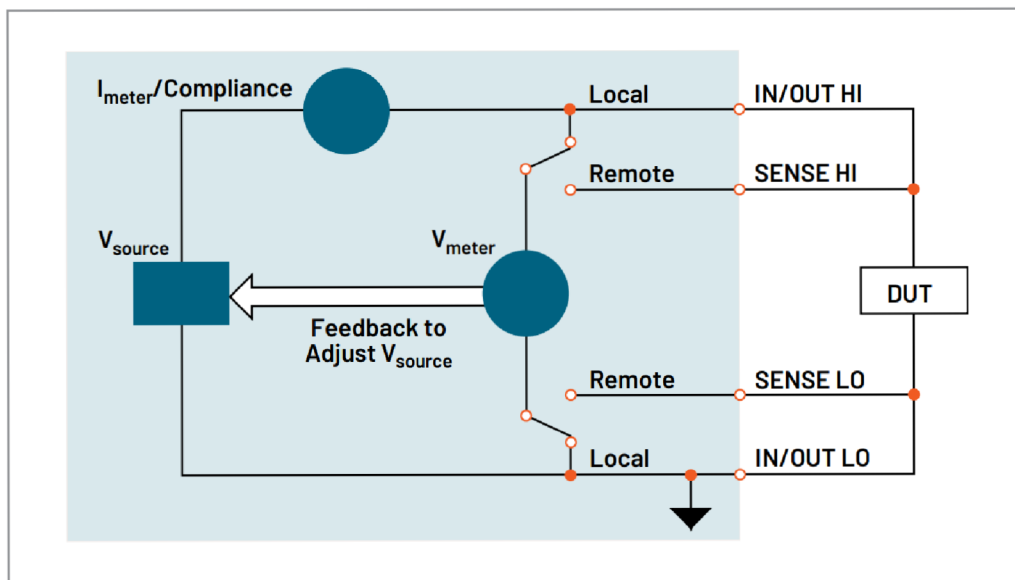
Tolerance zdroje napětí
0,02 % + 24 mV pro rozsah 200 V

Podmínky měření

Teplota 24,8 °C

Tlak 1010 hPa

Schéma zapojení

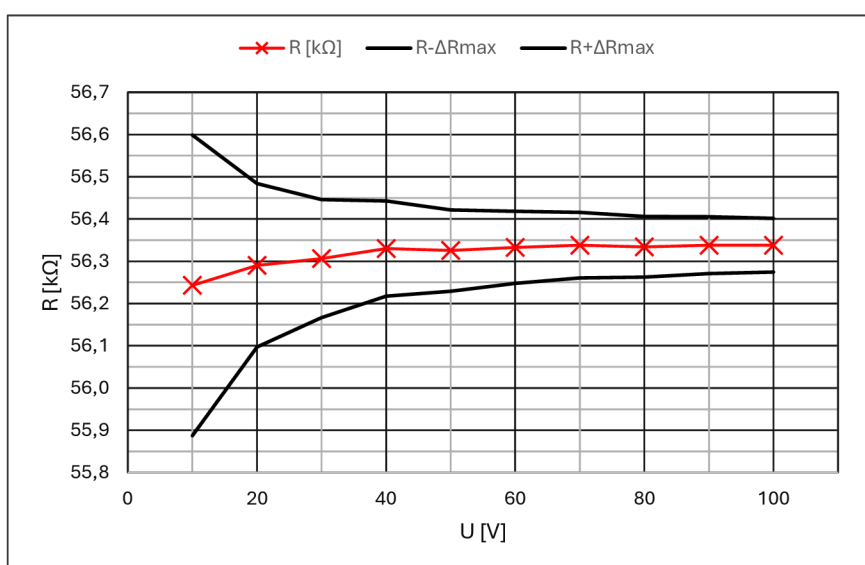


Zdroj: <https://www.tek.com/en/products/keithley/source-measure-units/2400-standard-series-sourcemeater>

Měření odporu o hodnotě 56 kΩ

$R_{\text{MĚŘ}} = 56 \text{ k}\Omega$								
U [V]	ΔU [mV]	I [mA]	ΔI [μA]	R [kΩ]	ΔR [kΩ]	δR [%]	ΔR_{MAX} [kΩ]	δR_{MAX} [%]
10	26	0,178	0,662	56,243	0,255	0,45%	0,356	0,63%
20	28	0,355	0,724	56,290	0,139	0,25%	0,194	0,34%
30	30	0,533	0,786	56,306	0,100	0,18%	0,139	0,25%
40	32	0,710	0,849	56,330	0,081	0,14%	0,112	0,20%
50	34	0,888	0,911	56,325	0,069	0,12%	0,096	0,17%
60	36	1,065	0,973	56,333	0,062	0,11%	0,085	0,15%
70	38	1,243	1,035	56,338	0,056	0,10%	0,078	0,14%
80	40	1,420	1,097	56,334	0,052	0,09%	0,072	0,13%
90	42	1,598	1,159	56,338	0,049	0,09%	0,067	0,12%
100	44	1,775	1,221	56,338	0,046	0,08%	0,064	0,11%

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot nepřímého měření 56kΩ odporu

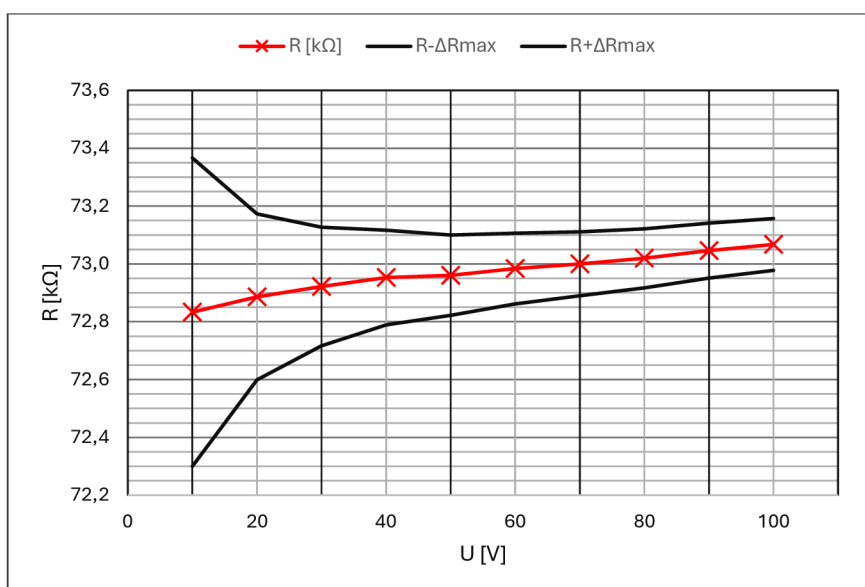


Graf závislosti nepřímo měřeného 56kΩ odporu s obálkou maximální chyby měření na napájecím napětí

Měření odporu o hodnotě 75 kΩ

$R_{\text{MĚŘ}} = 75 \text{ k}\Omega$								
U [V]	ΔU [mV]	I [mA]	ΔI [μA]	R [kΩ]	ΔR [kΩ]	δR [%]	ΔR_{MAX} [kΩ]	δR_{MAX} [%]
10	26	0,137	0,648	72,833	0,392	0,54%	0,533	0,73%
20	28	0,274	0,696	72,886	0,211	0,29%	0,287	0,39%
30	30	0,411	0,744	72,922	0,151	0,21%	0,205	0,28%
40	32	0,548	0,792	72,953	0,120	0,17%	0,164	0,22%
50	34	0,685	0,840	72,961	0,102	0,14%	0,139	0,19%
60	36	0,822	0,888	72,984	0,090	0,12%	0,123	0,17%
70	38	0,959	0,936	73,000	0,082	0,11%	0,111	0,15%
80	40	1,096	0,983	73,019	0,075	0,10%	0,102	0,14%
90	42	1,232	1,031	73,046	0,070	0,10%	0,095	0,13%
100	44	1,369	1,079	73,067	0,066	0,09%	0,090	0,12%

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot nepřímého měření 75kΩ odporu

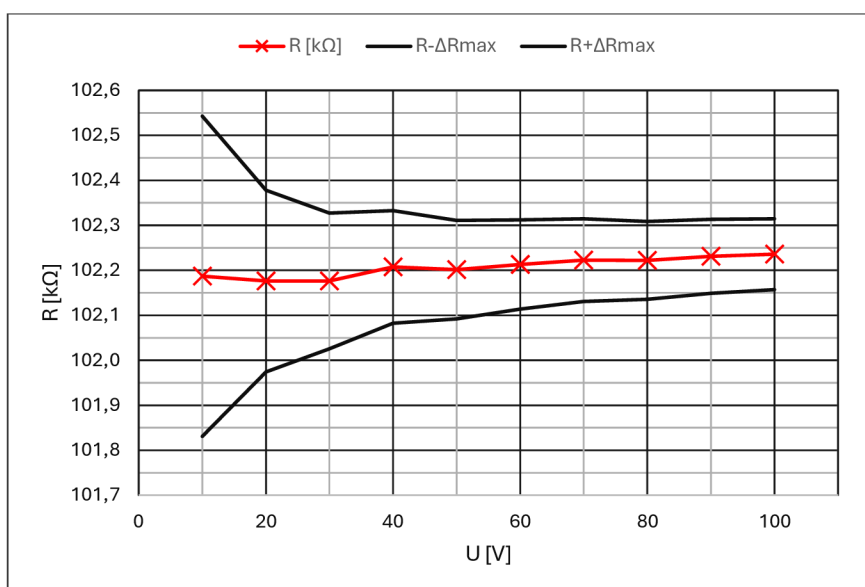


Graf závislosti nepřímo měřeného 75kΩ odporu s obálkou maximální chyby měření na napájecím napětí

Měření odporu o hodnotě 102 kΩ

R _{MĚŘ} = 102 kΩ								
U [V]	ΔU [mV]	I [mA]	ΔI [μA]	R [kΩ]	ΔR [kΩ]	δR [%]	ΔR _{MAX} [kΩ]	δR _{MAX} [%]
10	26	0,098	0,086	102,187	0,281	0,27%	0,356	0,35%
20	28	0,196	0,113	102,176	0,155	0,15%	0,202	0,20%
30	30	0,294	0,139	102,176	0,113	0,11%	0,151	0,15%
40	32	0,391	0,166	102,208	0,093	0,09%	0,125	0,12%
50	34	0,489	0,192	102,201	0,080	0,08%	0,110	0,11%
60	36	0,587	0,218	102,213	0,072	0,07%	0,099	0,10%
70	38	0,685	0,245	102,223	0,066	0,07%	0,092	0,09%
80	40	0,783	0,271	102,222	0,062	0,06%	0,087	0,08%
90	42	0,880	0,298	102,231	0,059	0,06%	0,082	0,08%
100	44	0,978	0,324	102,236	0,056	0,06%	0,079	0,08%

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot nepřímého měření 102kΩ odporu

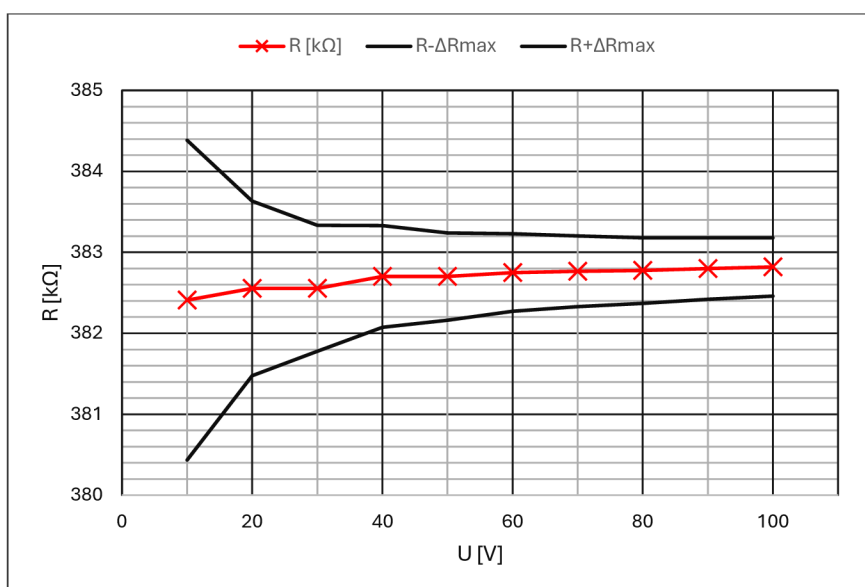


Graf závislosti nepřímo měřeného 102kΩ odporu s obálkou maximální chyby měření na napájecím napětí

Měření odporu o hodnotě 383 kΩ

R _{MĚŘ} = 383 kΩ								
U [V]	ΔU [mV]	I [mA]	ΔI [μA]	R [kΩ]	ΔR [kΩ]	δR [%]	ΔR _{MAX} [kΩ]	δR _{MAX} [%]
10	26	0,026	0,067	382,409	1,397	0,37%	1,975	0,52%
20	28	0,052	0,074	382,555	0,762	0,20%	1,078	0,28%
30	30	0,078	0,081	382,555	0,551	0,14%	0,779	0,20%
40	32	0,105	0,088	382,702	0,445	0,12%	0,629	0,16%
50	34	0,131	0,095	382,702	0,382	0,10%	0,539	0,14%
60	36	0,157	0,102	382,751	0,339	0,09%	0,479	0,13%
70	38	0,183	0,109	382,765	0,309	0,08%	0,437	0,11%
80	40	0,209	0,116	382,775	0,287	0,07%	0,405	0,11%
90	42	0,235	0,123	382,800	0,269	0,07%	0,380	0,10%
100	44	0,261	0,131	382,819	0,255	0,07%	0,360	0,09%

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot nepřímého měření 383kΩ odporu

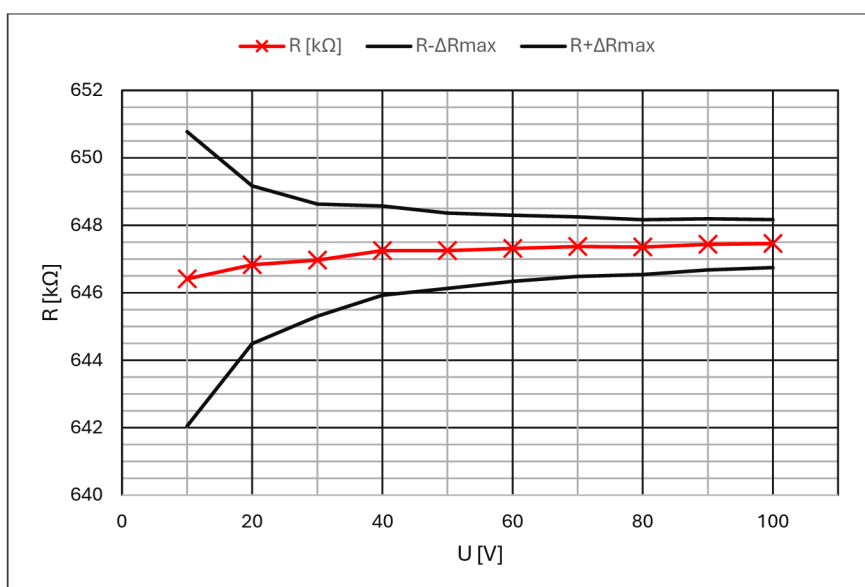


Graf závislosti nepřímo měřeného 383kΩ odporu s obálkou maximální chyby měření na napájecím napětí

Měření odporu o hodnotě 649 k Ω

R _{MĚŘ} = 649 k Ω								
U [V]	ΔU [mV]	I [mA]	ΔI [μ A]	R [k Ω]	ΔR [k Ω]	δR [%]	ΔR_{MAX} [k Ω]	δR_{MAX} [%]
10	26	0,015	0,064	646,412	3,165	0,49%	4,362	0,67%
20	28	0,031	0,068	646,831	1,692	0,26%	2,335	0,36%
30	30	0,046	0,073	646,970	1,201	0,19%	1,659	0,26%
40	32	0,062	0,077	647,249	0,956	0,15%	1,321	0,20%
50	34	0,077	0,081	647,249	0,808	0,12%	1,118	0,17%
60	36	0,093	0,085	647,319	0,710	0,11%	0,982	0,15%
70	38	0,108	0,089	647,369	0,639	0,10%	0,885	0,14%
80	40	0,124	0,093	647,354	0,586	0,09%	0,813	0,13%
90	42	0,139	0,098	647,435	0,546	0,08%	0,756	0,12%
100	44	0,154	0,102	647,459	0,513	0,08%	0,711	0,11%

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot nepřímého měření 649k Ω odporu

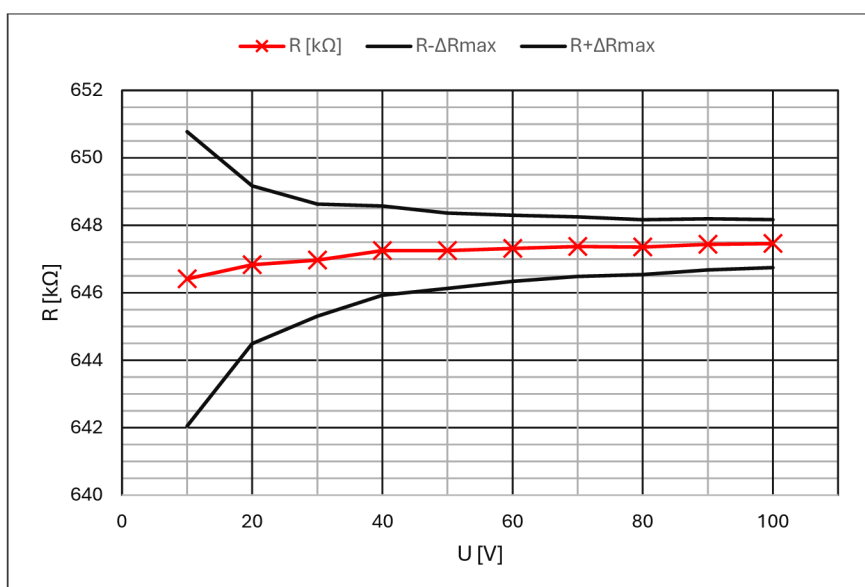


Graf závislosti nepřímo měřeného 649k Ω odporu s obálkou maximální chyby měření na napájecím napětí

Měření odporu o hodnotě 1,4 MΩ

R _{MĚŘ} = 1,4 MΩ								
U [V]	ΔU [mV]	I [mA]	ΔI [μA]	R [kΩ]	ΔR [kΩ]	δR [%]	ΔR _{MAX} [kΩ]	δR _{MAX} [%]
10	26	0,007	0,062	1424,501	13,095	0,92%	16,264	1,14%
20	28	0,014	0,064	1428,571	6,809	0,48%	8,508	0,60%
30	30	0,021	0,066	1429,252	4,694	0,33%	5,901	0,41%
40	32	0,028	0,068	1430,615	3,641	0,25%	4,601	0,32%
50	34	0,035	0,069	1430,615	3,004	0,21%	3,815	0,27%
60	36	0,042	0,071	1430,956	2,581	0,18%	3,293	0,23%
70	38	0,049	0,073	1431,200	2,279	0,16%	2,919	0,20%
80	40	0,056	0,075	1431,127	2,051	0,14%	2,638	0,18%
90	42	0,063	0,077	1431,298	1,875	0,13%	2,420	0,17%
100	44	0,070	0,079	1431,229	1,734	0,12%	2,245	0,16%

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot nepřímého měření 1M4Ω odporu



Graf závislosti nepřímo měřeného 1M4Ω odporu s obálkou maximální chyby měření na napájecím napětí

E Obsah elektronické přílohy

Obsah přiložené elektronické přílohy odevzdaný do informačního systému VUT v Brně ve formátu .zip.

```
/.....kořenový adresář přiloženého archivu
├── TesterKabelaze.pdf ..... elektronická verze práce
├── MatLab
│   ├── analyza.m ..... výpočet analýzy původního zapojení
│   ├── analyzaNavrhu.m ..... výpočet analýzy navrhovaného zapojení
│   ├── ilustrace.m ..... vytvoření ilustračních obrázků funkcí rozložení
│   ├── prevod.m ..... kompenzační převod s chybou v zaokrouhlování
│   ├── prevod2.m ..... kompenzační převod bez chyby v zaokrouhlování
│   └── Grafy ..... složka s grafy získaných z MatLabu
├── MicroCap
│   ├── NavrhovaneZapojeni.cir ..... obvod pro simulaci navrhovaného zapojení
│   ├── NavrhovaneZapojeni_cir.inx
│   ├── PuvodniZapojeni.cir ..... obvod pro simulaci původního zapojení
│   └── PuvodniZapojeni_cir.inx
├── Oziveni
│   ├── ZapojeniPriOzivovani.png ..... vyfocené zapojení při oživování
│   ├── KomunikacePresI2C.png ..... výpis z konzole při komunikaci přes I2C
│   ├── DS1Z_QuickPrint1-6.png ..... snímky obrazovky z osciloskopu
│   ├── Oziveni.txt ..... poznámky k snímkům obrazovky
│   ├── Odpory.docx ..... protokol k měření testovacích odporů
│   └── Proudys&Odpory.xlsx ..... naměřené a vypočtené hodnoty
├── Mereni
│   ├── Mereni.xlsx ..... naměřené a vypočtené hodnoty
│   ├── R7_510Ohm ..... složka s měřením při osazeném odporu  $R_7$  o velikosti  $510\Omega$ 
│   │   ├── measure2.sh ..... testovací skript
│   │   └── R_XXX_XkR9 ..... naměřené veškeré hodnoty pro daný odpor
│   ├── R7_1k0hm ..... složka s měřením při osazeném odporu  $R_7$  o velikosti  $1k\Omega$ 
│   │   ├── measure2.sh ..... testovací skript
│   │   └── R_XXX_XkR9 ..... naměřené veškeré hodnoty pro daný odpor
│   ├── Measure1-7 ..... složka s jednotlivými testy měření
│   │   ├── measure2.sh ..... testovací skript
│   │   ├── test.txt ..... konfigurace testovacího skriptu
│   │   ├── output ..... výstup - výsledek testu
│   │   ├── output.txt.expected ..... očekávaný výstup
│   │   ├── results.txt ..... hodnoty z měření, výsledky zapsané do tabulky
│   │   └── results2.txt ..... hodnoty z měření, výsledky zapsané do řádků
│   └── config.txt ..... boot config pro RaspberryPi
├── FreeCAD
│   ├── Harness_tester_box_bottom/top_1/2.pdf ..... výkresy navržené krabičky
│   ├── Meshed_bootom/top.stl ..... soubory pro tisk krabičky
│   └── Projekt.FCStd
```

Eagle	
├ mainBoard2.pdf	schéma zapojení
├ mainBoard2_bottom/top.pdf	návrh desky plošného spoje
├ mainBoard2-kusovník.csv	kusovník
├ mainBoard2.sch	
├ mainBoard2.brd	
├ parts	kusovník
├ libraries.zip	použité knihovny
└ mainBoard2_2023-11-15_ProVyrobu.zip	gerber soubory pro výrobu