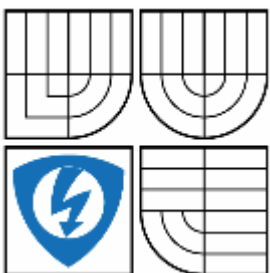




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

KOMPENZACE ODPORU VEDENÍ U ODPOROVÝCH SNÍMAČŮ

COMPENSATION LINE RESISTANCE WITH RESISTANCE SENSORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

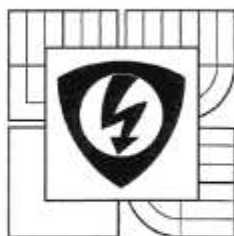
VOJTĚCH KUČÍREK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. LUDVÍK BEJČEK, CSc.

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Vojtěch Kučírek

Ročník: 3

ID: 164320

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Kompensace odporu vedení u odporových snímačů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Dokončete podrobný návrh přípravku umožňující praktické ověření a vyhodnocení všech parametrů majících vliv na chybu měření u odporových snímačů při změnách (statických i dynamických) odporu přívodů a obvyklých vyhodnocovacích metodách a zapojeních.
2. Realizujte funkční vzorek přípravku a experimentálně ověřte všechny jeho možnosti (parametry). Systém koncipujte jako otevřený.
3. Seznamte se i s netradičními metodami kompenzace změn odporů přívodů a pokuste se o jejich implantaci do experimentálního laboratorního přípravku.
4. Zabývejte se použitím výpočetní techniky jak pro vlastní měření (nastavování parametrů, variant zapojení a parametrů použitých komponent), různých způsobů kompenzace, tak i přehledným (názorným) vyhodnocením.
5. Dbejte pokynů vedoucího a připomínek pracovníků z laboratorů BMFV a MSNV.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

ĎAŘO, S.-KREIDL, M.: Senzory a měřicí obvody. ČVUT 1996

ZEHNULA, K.: Převodníky fyzikálních veličin. VUT FEI Brno, 1990

Podle vlastního literárního průzkumu

Termín zadání: 8. 2. 2016

Termín odevzdání: 23. 5. 2016

Vedoucí práce: doc. Ing. Ludvík Bejček, CSc.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

předseda oborové rady

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

Bakalářská práce pojednává o problematice kompenzace odporu vedení u odporových snímačů. V práci je popsán návrh laboratorního přípravku, který slouží k názorné demonstraci nejčastěji používaných metod kompenzace odporu vedení, souhrnně nazývaných jako vícevodičová zapojení. Přípravek zahrnuje i netradiční metodu známou pod názvem Andersonova smyčka. Součástí práce je praktické ověření vytvořeného laboratorního přípravku a zhodnocení dosažených výsledků měření. V rámci práce byla dále vytvořena aplikace v programovém prostředí NI LabVIEW sloužící k simulaci vícevodičových zapojení a Andersonovy smyčky.

Klíčová slova

Odporový snímač, kompenzace odporu vedení, dvouvodičové zapojení, třívodičové zapojení, čtyřvodičové zapojení, Andersonova smyčka, Wheatstoneův můstek

Abstract

Bachelor's thesis deals with problematic of line resistance compensation. Thesis describes design of a laboratory tool, which is used to demonstrate the most commonly used methods of line resistance compensation called multiple wire connections. The tool contains moreover an unconventional method known as Anderson loop. Part of the thesis is practical verification of the created laboratory tool and evaluation of achieved measurement results. In the thesis was also created application in software environment NI LabVIEW, which could be used to simulate multiple wire connections and Anderson loop.

Keywords

Resistance sensor, line resistance compensation, two-wire connection, three-wire connection, four-wire connection, Anderson loop, Wheatstone bridge

Bibliografická citace:

KUČÍREK, V. *Kompenzace odporu vedení u odporových snímačů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 41 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ludvík Bejček, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Kompenzace odporu vedení u odporových snímačů“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si 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.

V Brně dne: 20. května 2016

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Ludvíku Bejčkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 20. května 2016

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod	8
2	Teoretický rozbor	9
2.1	Odporové snímače.....	9
2.2	Vlastnosti připojovacího vedení	9
2.3	Kovové odporové snímače teploty.....	11
2.4	Wheatstoneův můstek.....	12
2.5	Metody kompenzace odporu vedení	12
2.5.1	Statická kompenzace	12
2.5.2	Dynamická kompenzace.....	13
3	Laboratorní přípravek	14
3.1	Návrh laboratorního přípravku	14
3.1.1	Wheatstoneův můstek	14
3.1.2	Snímač	14
3.1.3	Andersonova smyčka	15
3.2	Realizace a vzhled laboratorního přípravku	16
4	Ověření laboratorního přípravku	18
4.1	Převedení změny odporu vedení na změnu okolní teploty.....	18
4.2	Ověření vícevodičových zapojení	18
4.2.1	Měření pro dvouvodičové zapojení snímače	20
4.2.2	Měření pro třívodičové zapojení snímače	21
4.2.3	Měření pro čtyřvodičové zapojení snímače.....	23
4.3	Ověření Andersonovy smyčky.....	25
4.4	Porovnání výsledků jednotlivých kompenzačních metod	28
5	Simulace metod v LabVIEW	30
5.1	Programovací prostředí LabVIEW	30
5.2	Simulace vícevodičových zapojení	30
5.3	Simulace Andersonovy smyčky.....	32
6	Úkoly pro laboratorní měření.....	34
6.1	Zadání úkolů pro laboratorní cvičení	34
7	Závěr	36

1 ÚVOD

O odporové snímače jsou používány k měření různých fyzikálních veličin, například teploty, mechanického napětí, hmotnosti a mnohých dalších. Aby se u odporových snímačů neprojevoval vliv parazitního odporu připojovacího vedení, používají se u nich různé metody kompenzace odporu vedení. Bakalářská práce se zabývá problematikou kompenzace odporu vedení u kovových odporových snímačů teploty.

V první části práce je proveden teoretický rozbor zkoumané problematiky. Dále je v práci popsán návrh laboratorního přípravku sloužícího k porovnání metod kompenzace odporu vedení, jimiž jsou dvouvodičové, třívodičové a čtyřvodičové zapojení a Andersonova smyčka.

V rámci bakalářské práce byl sestaven navržený laboratorní přípravek a experimentálně byla ověřena jeho funkčnost. Bylo provedeno porovnání dosažených výsledků měření pro jednotlivé metody kompenzace odporu vedení.

Součástí práce je rovněž vytvoření aplikace sloužící k simulaci jednotlivých metod kompenzace odporu vedení. Aplikace byla vytvořena v programovém prostředí National Instruments LabVIEW. Vytvořená aplikace slouží k ověření správnosti měření na laboratorním přípravku.

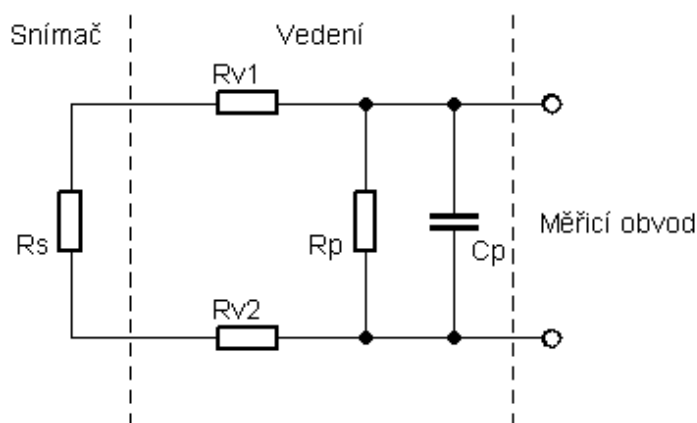
Na základě vlastností vytvořeného laboratorního přípravku a provedených experimentálních měření bylo vytvořeno rámcové zadání pro měření v laboratorním cvičení.

2 TEORETICKÝ ROZBOR

2.1 Odporové snímače

Odporové snímače řadíme do kategorie pasivních snímačů. Zapojujeme je do obvodů s pomocným napětím nebo proudem. Tento typ snímačů se uplatňuje v široké škále měření fyzikálních veličin, např. odporové snímače teploty (RTD = resistive temperature detectors), snímače mechanického napětí, síly a hmotnosti (odporové tenzometry) a další.

Snímač spojujeme s měřicím obvodem pomocí připojovacího vedení. Je žádoucí, aby vlastnosti připojovacího vedení co nejméně ovlivnily vlastnosti snímače a přesnost samotného měření. Na obrázku 2.1 je znázorněno náhradní elektrické schéma odporového snímače s připojovacím vedením.



Obrázek 2.1: Náhradní schéma odporového snímače s připojovacím vedením [8]

2.2 Vlastnosti připojovacího vedení

Nejvýznamnějším parametrem připojovacího vedení je odpor vedení R_V , pro který platí základní fyzikální vztah [9]:

$$R_V = \rho \frac{l}{S} \quad (2.1)$$

kde: R_V – odpor vedení [Ω]
 ρ – měrný elektrický odpor (rezistivita) materiálu vedení [$\Omega \cdot m$]
 l – délka připojovacího vedení [m]
 S – průřez vodiče [m^2]

Z tohoto vztahu je patrné, že odpor vedení R_V roste přímo úměrně s délkou vedení l a nepřímo úměrně s průřezem vodiče S .

Rovněž nesmíme opomenout teplotní závislost odporu vedení, kterou lze fyzikálně popsat pomocí vztahu [6]:

$$R_V = R_0(1 + \alpha \Delta t) \quad (2.2)$$

ve kterém: R_V – odpor vedení [Ω]
 R_0 – odpor vedení při normální teplotě t_0 (obvykle 0 °C) [Ω]
 α – teplotní součinitel elektrického odporu [K^{-1}]
 Δt – rozdíl teplot t_0 a t [K]

K připojování odporových snímačů se používá měděné připojovací vedení o průměru vodiče od 0,25 do 1,5 mm. Odpor připojovacího vedení se vypočítá podle vztahu (2.1), kdy pro měrný elektrický odpor mědi platí $\rho_{Cu} = 0,0169 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$ [9]. Průřez vodiče má kruhový tvar, a tudíž pro plochu průřezu vodiče S platí vztah:

$$S = \pi r^2 = \pi \frac{d^2}{4} \quad (2.3)$$

ve kterém: S – plocha průřezu vodiče [m^2]
 r – poloměr vodiče [m]
 d – průměr vodiče [m]

V tabulce 2.1 jsou vypočítané hodnoty odporu vedení pro nejčastěji používané průměry vodiče v závislosti na délce po 5 m do 40 m. Graf 2.1 pak graficky znázorňuje závislost odporu vedení na jeho délce pro čtyři nejčastěji používané průměry vodiče.

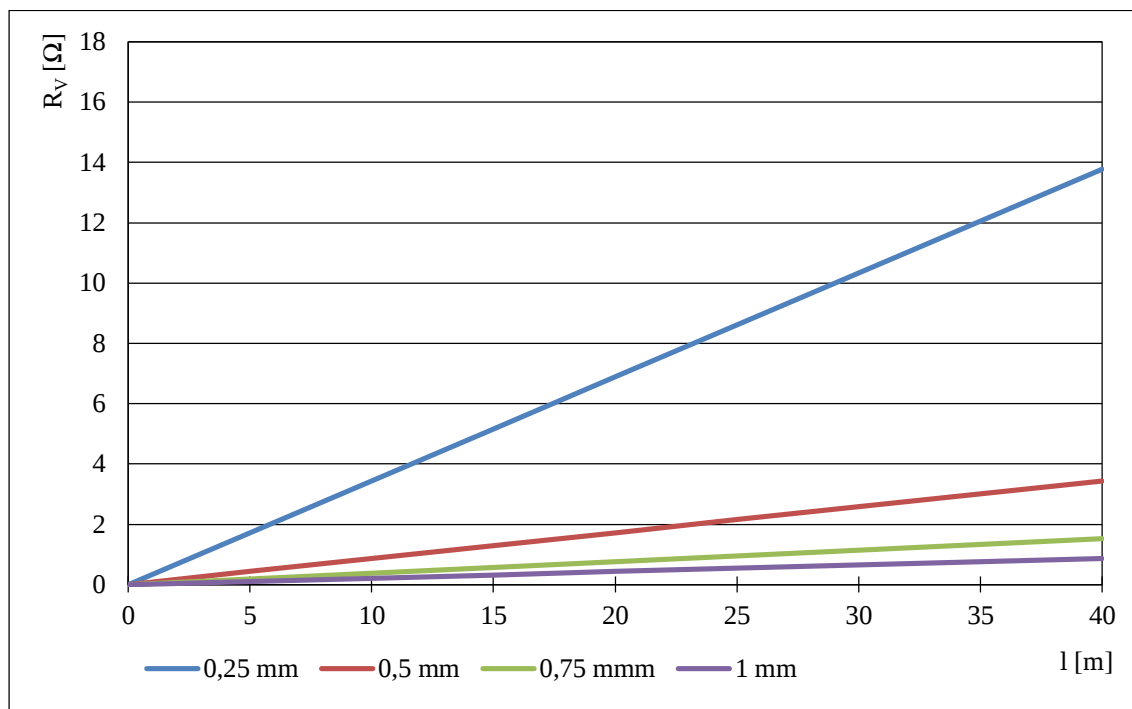
Tabulka 2.1: Hodnoty odporu vedení v závislosti na délce vedení a průřezu vodiče

l [m]/ d [mm]	0	5	10	15	20	25	30	35	40
0,25	0,00	1,72	3,44	5,16	6,89	8,61	10,33	12,05	13,77
0,50	0,00	0,43	0,86	1,29	1,72	2,15	2,58	3,01	3,44
0,75	0,00	0,19	0,38	0,57	0,77	0,96	1,15	1,34	1,53
1,00	0,00	0,11	0,22	0,32	0,43	0,54	0,65	0,75	0,86

Z grafu 2.1 i tabulky 2.1 je patrné, že odpor vedení narůstá lineárně s jeho délkou a změna průměru vodiče na dvojnásobek způsobí čtyřnásobný pokles odporu vedení, což je způsobeno kvadratickou závislostí plochy kruhového průřezu vodiče na průměru vodiče (viz. vztah 2.3).

Vzhledem ke všem výše uvedeným a popsaným vlastnostem připojovacího vedení zavádíme různé metody kompenzace parazitního odporu připojovacího vedení, k jejichž názorné demonstraci slouží navržený laboratorní přípravek.

Graf 2.1: Závislost odporu vedení na jeho délce pro různé průměry vodiče



2.3 Kovové odporové snímače teploty

V průmyslové praxi jsou často k měření teploty používány kovové odporové snímače. Konstrukčním materiálem těchto snímačů je platina nebo nikl. Pro teplotní závislost odporu snímače platí stejný vztah (2.2) jako pro teplotní závislost odporu připojovacího vedení.

Kovové odporové snímače se vyrábí v řadě 100, 200, 500, 1000 a 2000 Ω . Tato hodnota určuje nominální odpor snímače při teplotě 0 °C označovaný R_0 . Niklové snímače se používají k měření teplot v rozsahu od -80 °C do 180 °C. Teplotní součinitel odporu pro niklový snímač je $\alpha_{Ni} = 0,618 \text{ } \Omega \cdot K^{-1}$.

Platinové snímače se dle mezinárodního doporučení IEC vyrábí ve dvou konstrukčních tolerančních třídách nazvaných A a B. Pro třídu A je stanovena chyba měření teploty při 0 °C jako $\pm 0,125 \text{ } ^\circ\text{C}$, tj. $\pm 0,06 \text{ } \Omega$; třída B má definovanou chybu měření teploty při 0 °C jako dvojnásobek chyby pro třídu A, tj. $\pm 0,25 \text{ } ^\circ\text{C}$ ($\pm 0,12 \text{ } \Omega$).

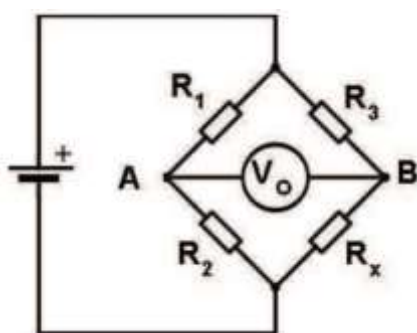
Snímače třídy A slouží k měření teplot v rozsahu od -200 °C do 650 °C, třída B má stanovena rozsah teplot od -200 °C do 850 °C. Teplotní součinitel odporu pro platinový snímač je $\alpha_{Pt} = 0,385 \text{ } \Omega \cdot K^{-1}$ [6].

2.4 Wheatstoneův můstek

K vyhodnocování změn odporu u odporových snímačů velice často používáme můstkových metod. Nejrozšířenějším typem můstkových metod je tzv. Wheatstoneův můstek, jehož elektrické schéma je na obrázku 2.2.

Můstek je napájen stejnosměrným napětím. Je tvořen dvěma větvemi R_1 , R_2 a R_3 , R_x , kde R_x představuje odpor snímače. Jednotlivé větve můstku tvoří děliče napětí. Pokud jsou poměry odporů R_1/R_2 a R_3/R_x stejné, je mezi body A a B stejný potenciál a voltmetr ukazuje nulovou výchylku. Takovýto můstek označujeme jako vyvážený.

Hlavní nevýhodou Wheatstoneova můstku je nelineární změna výstupního napětí v závislosti na lineární změně odporu snímače R_x .



Obrázek 2.2: Elektrické schéma Wheatstoneova můstku [4]

2.5 Metody kompenzace odporu vedení

Rozlišujeme dva druhy kompenzace odporu vedení. Kompenzací statickou (tj. při stálé teplotě okolí spojovacího vedení) a kompenzací dynamickou (při měnící se teplotě okolí).

2.5.1 Statická kompenzace

Metodu statické kompenzace odporu spojovacího vedení lze použít pouze za předpokladu stálé, tj. časově neměnné teploty okolí spojovacího vedení. Při stálé teplotě bude podle vztahu (2.2) odpor vedení konstantní.

Odpor spojovacího vedení pak lze stanovit buď ze známé délky vedení a tabulkové hodnoty odporu jednoho metru vodiče, nebo jej můžeme určit experimentálně. Pokud známe hodnotu odporu vedení, jsme schopni provést korekci o tento odpor, tzv. statickou kompenzací.

Když používáme k měření Wheatstoneova můstku (viz. kapitola 2.2), můžeme statickou kompenzací provést zapojením kompenzačního odporu o hodnotě odporu vedení do série s odporem R_2 . V praxi často provádíme korekci odporu jednoho vodiče spojovacího vedení na hodnotu $20\ \Omega$ pomocí teplotně nezávislého odporu R_j , takzvaného justačního odporu.

2.5.2 Dynamická kompenzace

Ve většině případů nejsme schopni zajistit stálou teplotu okolí spojovacího vedení a navíc požadujeme přesné a ničím neovlivněné měření snímané veličiny. V těchto případech pak zavádíme různé metody tzv. dynamické kompenzace odporu spojovacího vedení.

Metody dynamické kompenzace můžeme rozdělit na metody tradiční (často používané) a netradiční (méně známé a tudíž i méně používané).

Tradiční metody kompenzace odporu vedení obecně označujeme jako vícevodičová zapojení, mezi něž řadíme třívodičové zapojení, třívodičové zapojení s aktivním můstkem, čtyřvodičové zapojení a šestivodičové zapojení.

Mezi netradiční metody kompenzace odporu vedení řadíme například Andersonovu smyčku.

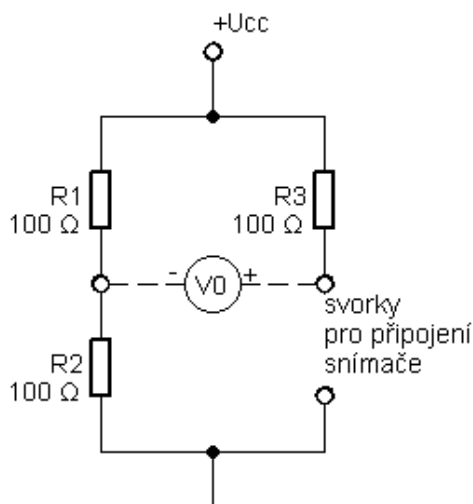
3 LABORATORNÍ PŘÍPRAVEK

3.1 Návrh laboratorního přípravku

Laboratorní přípravek byl v rámci návrhu rozdělen na několik částí, kterými jsou Wheatstoneův můstek, snímač a referenční odpor pro Andersonovu smyčku.

3.1.1 Wheatstoneův můstek

Wheatstoneův můstek je tvořen odpory R_1 , R_2 , R_3 o nominální hodnotě $R = 100 \Omega$. Tato hodnota byla zvolena pro demonstraci na reálném snímači teploty Pt100. Uprostřed můstku se nacházejí svorky pro připojení voltmetru V_0 sloužícího k měření výstupního napětí můstku. Odpor R_4 v pravé větvi byl nahrazen svorkami, které slouží k připojení snímače. Elektrické schéma Wheatstoneova můstku je na obrázku 3.1.



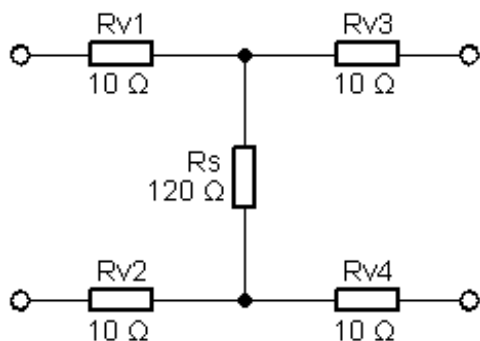
Obrázek 3.1: Elektrické schéma navrhovaného Wheatstoneova můstku

3.1.2 Snímač

Navržený snímač bude v laboratorním přípravku tvořen odporem R_S o hodnotě 120Ω . Tato hodnota odporu odpovídá u platinového snímače teploty Pt100 přibližně teplotě 52°C .

Připojovací vedení snímače je tvořeno čtyřmi odpory $R_{V1} - R_{V4}$ o nominální hodnotě odporu 10Ω , tato hodnota odpovídá přibližně 30 metrům měděného připojovacího vedení o průměru vodiče $0,25 \text{ mm}$. Změnu odporu vedení lze simulovat pomocí odporové dekády, kterou zapojíme do série s příslušným odporem vedení R_V .

Konce jednotlivých připojovacích vedení jsou zakončeny svorkami, které umožní připojení snímače k Wheatstoneovu můstku. Elektrické schéma navrhovaného snímače je na obrázku 3.2.



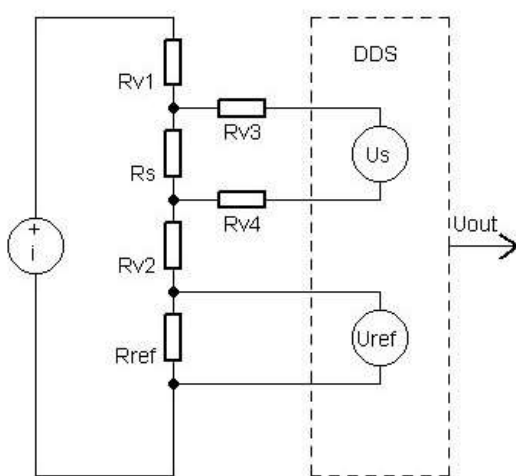
Obrázek 3.2: Elektrické schéma navrženého snímače

Zvolená topologie snímače umožňuje proměřit závislost výstupního napětí můstku na změně odporu vedení při klasickém dvou vodičovém zapojení snímače a rovněž při třívodičovém zapojení, u kterého je výstupní napětí Wheatstoneova můstku nižší přesně o úbytek napětí na jednom připojovacím vodiči.

Snímač můžeme k můstku připojit také čtyřvodičově, kdy k určení jeho odporu vycházíme z principu Ohmovy metody pro měření malých odporů. Voltmetrem V_0 měříme výstupní napětí můstku a pomocí dalšího voltmetru V_S připojeného vodiči R_{V3} a R_{V4} napětí na snímači R_S . Ze znalosti hodnot odporů v můstku, napájecího napětí U_{cc} a těchto dvou napětí pak určíme přesnou hodnotu odporu snímače, která by neměla být závislá na změně odporu vedení.

3.1.3 Andersonova smyčka

Andersonova smyčka bývá často srovnávána s Wheatstoneovým můstkem. Metoda využívající Andersonovy smyčky ke kompenzaci odporu přívodních vodičů byla vyvinuta v NASA za účelem zvýšení přesnosti měření teplot na vzdálených místech. Na výstupu Andersonovy smyčky je rozdíl dvou vstupních signálů – napětí na snímači U_S a napětí na referenčním odporu U_{ref} . Základní elektrické schéma Andersonovy smyčky je na obrázku 3.3.



Obrázek 3.3: Základní elektrické schéma Andersonovy smyčky

Blok DDS ve schématu představuje dvojitou diferenciální odčítačku, jedná se o zkratku vytvořenou z anglického názvu *dual-differential subtractor*. Dvojitá odčítačka je prakticky tvořena zapojením několika operačních zesilovačů. Pro výstupní napětí U_{out} dvojité odčítačky platí vztah:

$$U_{out} = A_1 U_1 - A_2 U_{ref} \quad (3.1)$$

ve kterém: A_1 – zesílení vstupního signálu (nastavené výrobcem) [-]
 A_2 – zesílení referenčního signálu (nastavené výrobcem) [-]
 U_1 – vstupní napětí [V]
 U_{ref} – referenční (porovnávací) napětí [V]

Smyčka předpokládá napájení zdrojem stejnosměrného konstantního proudu i . Odporů $R_{V1} - R_{V4}$ představují odpor přívodních vodičů snímače. Odpor R_s představuje odpor snímače a odpor R_{ref} referenční (porovnávací odpor).

Úbytky napětí na přívodních vodičích R_{V1} a R_{V2} neovlivní samotné měření, protože jsou snímána pouze napětí U_s na snímači R_s a U_{ref} na referenčním odporu R_{ref} . Úbytek napětí na přívodech R_{V3} a R_{V4} lze vzhledem k velkému vstupnímu odporu operačního zesilovače zanedbat. Hodnotu referenčního odporu R_{ref} volíme jako nominální hodnotu odporu snímače.

Hlavní výhodou Andersonovy smyčky oproti Wheatstoneovu můstku je lineární změna výstupního napětí v závislosti na lineární změně odporu snímače.

V rámci laboratorního přípravku je k vytvoření Andersonovy smyčky použit navržený snímač (kapitola 3.1.2), referenční odpor je tvořen odporem o hodnotě $R_{ref} = 100 \Omega$ s připojovacími svorkami. Diferenciální odčítačka je realizována pomocí přístrojového zesilovače. Použité zapojení přístrojového zesilovače je popsáno v kapitole 4.3.

3.2 Realizace a vzhled laboratorního přípravku

K realizaci jednotlivých částí laboratorního přípravku jsem použil přesné metalizované rezistory od výrobce HITANO s tolerancí odporu $\pm 0,1 \%$, jmenovitým výkonovým zatížením $P_Z = 0,6 \text{ W}$, teplotním součinitelem odporu $T_K = 25 \text{ ppm/K}$ uložené v pouzdře typu 0207.

Dále jsem ke konstrukci použil panelové přístrojové zdířky, sloužící k vzájemnému propojení jednotlivých částí přípravku a k připojení napájecího zdroje a voltmetrů. Barvu zdířek jsem volil tak, aby byla rozlišena polarita při zapojování přípravku. K propojení rezistorů se zdířkami jsem použil pájecí očka.

Jednotlivé části laboratorního přípravku jsem umístil do černých plastových konstrukčních krabiček o rozměrech 69x69x32 mm. Těla rezistorů se nacházejí vně na povrchu krabiček, kvůli názornosti laboratorního přípravku a také z důvodu zamezení jejich přehřívání.

Vzhled Wheatstoneova můstku je na obrázku 3.4, vzhled snímače na obrázku 3.5 a vzhled referenčního odporu pro Andersonovu smyčku na obrázku 3.6.



Obrázek 3.4: Vzhled Wheatstoneova můstku



Obrázek 3.5: Vzhled snímače



Obrázek 3.6: Vzhled referenčního odporu pro Andersonovu smyčku

4 OVĚŘENÍ LABORATORNÍHO PŘÍPRAVKU

4.1 Převedení změny odporu vedení na změnu okolní teploty

V rámci ověření laboratorního přípravku jsem proměřil závislost naměřeného odporu snímače na změně jednotlivých odporů vedení $R_{V1} - R_{V4}$.

Změna odporu vedení bývá v praxi obvykle způsobena změnou okolní teploty vedení, kdy například na vedení umístěné ve vnějším prostředí začne svítit slunce. Výsledný odpor vedení pak lze určit podle vztahu (2.2), z kterého lze vyjádřit i hodnotu změny odporu vedení.

Pro měděný vodič je hodnota teplotního součinitele odporu $\alpha = 4,0 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot K^{-1}$. Použitá odporová dekáda umožňuje změnu odporu po 1Ω , a proto potřebujeme určit, jakou u 10Ω připojovacího vedení představuje 1Ω změnu okolní teploty vedení. Vyjdeme ze vztahu (2.2):

$$R_V = R_0(1 + \alpha \Delta t) \Rightarrow \Delta R_V = R_0 \alpha \Delta t \Rightarrow \Delta t = \frac{\Delta R_V}{R_0 \alpha} = \frac{1}{10 * 4,0 * 10^{-3}} = 25 \text{ } ^\circ C$$

Výpočtem vychází, že změna odporu použitého připojovacího vedení o 1Ω odpovídá změně okolní teploty vedení o $25 \text{ } ^\circ C$.

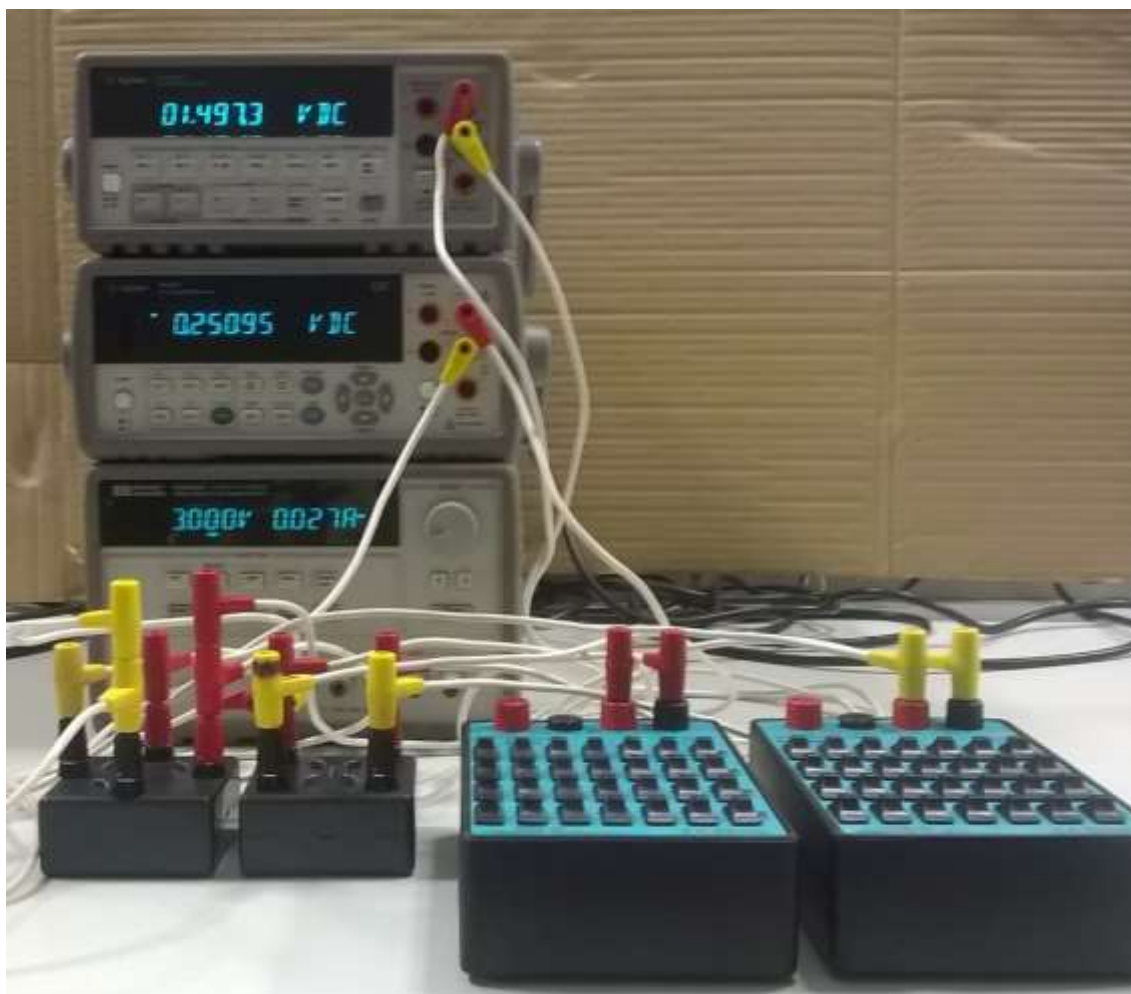
4.2 Ověření vícevodičových zapojení

K ověření laboratorního přípravku sloužícího k demonstraci vícevodičových zapojení jsem provedl několik měření na sestaveném laboratorním přípravku. Měření jsem provedl pro dvouvodičové, třívodičové i čtyřvodičové zapojení snímače.

Pro jednotlivá měření jsem vypočítal absolutní (vztah (4.1)) i relativní odchylku (vztah (4.2)), vztaženou k hodnotě naměřené pro normálně připojený snímač, tj. snímač pouze s připojovacím vedením.

K napájení Wheatstoneova můstku jsem použil stejnosměrné napětí $U_{cc} = 3 \text{ V}$, abych zamezil zbytečným výkonovým ztrátám a samoohřevu odporů v můstku a snímači.

Na obrázku 4.1 je vidět celkový vzhled měřicího pracoviště zapojeného v topologii čtyřvodičového zapojení snímače. Horní multimetr ukazuje úbytek napětí na snímači, dolní multimetr výstupní napětí můstku ΔU . Pod multimetry je umístěn napájecí zdroj s nastavenou hodnotou napájecího napětí $U_{cc} = 3 \text{ V}$. V dolní řadě pak je zleva Wheatstoneův můstek, snímač s připojovacím vedením (odpory), odporová dekáda simulující změnu odporu R_{V1} a odporová dekáda simulující změnu odporu R_{V2} . Seznam konkrétních použitých přístrojů s výrobními čísly je uveden v tabulce 4.1.



Obrázek 4.1: Celkový vzhled měřicího pracoviště pro ověření vícevodičových zapojení

Tabulka 4.1: Seznam použitých přístrojů pro ověření vícevodičových zapojení

Název přístroje	Výrobní číslo
Multimetr Agilent 34401A	MY41022606
Multimetr Agilent 34410A	MY47001116
Odporová mini-dekáda COSINUS R1-3000, tolerance $\pm 1 \%$	016635, 016655
Stejnoseměrný zdroj Hewlett Packard E3631A	KR70906265

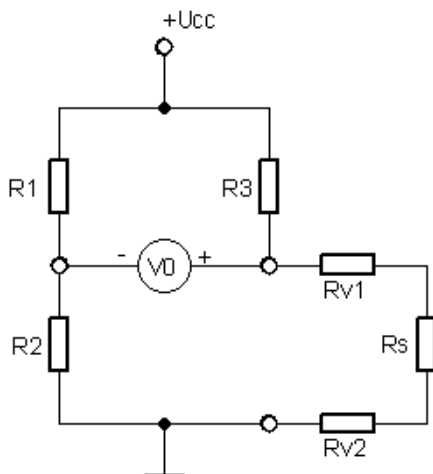
Vztahy pro výpočet absolutní a relativní odchylky měření – společné pro všechna zapojení:

$$\Delta R = R_S - R_{S \text{ norm.}} [\Omega] \quad (4.1)$$

$$\delta R = 100 * \frac{\Delta R}{R_{S \text{ norm}}} [\%] \quad (4.2)$$

4.2.1 Měření pro dvou vodičové zapojení snímače

Schéma dvou vodičového zapojení snímače je na obrázku 4.2. V tomto zapojení je na prostředních svorkách Wheatstoneova můstku pomocí voltmetru V_0 měřeno výstupní napětí můstku ΔU , ze kterého je podle vztahu (4.3) vypočten odpor snímače R_s .



Obrázek 4.2: Schéma dvou vodičového zapojení

Tabulka 4.2: Naměřené a vypočtené hodnoty pro dvou vodičové zapojení snímače

Připojení snímače	t [°C]	ΔU [V]	R_s [Ω]	ΔR [Ω]	δR [%]
normální připojení	25	0,25091	140,17	-	-
$R_{v1} + 1 \Omega$	50	0,25607	141,17	1,00	0,71
$R_{v1} + 2 \Omega$	75	0,26119	142,17	1,99	1,42
$R_{v1} + 3 \Omega$	100	0,26629	143,17	2,99	2,14
$R_{v2} + 1 \Omega$	50	0,25604	141,17	0,99	0,71
$R_{v2} + 2 \Omega$	75	0,26119	142,17	1,99	1,42
$R_{v2} + 3 \Omega$	100	0,26626	143,16	2,99	2,13
$R_{v1}, R_{v2} + 1 \Omega$	50	0,26124	142,18	2,00	1,43
$R_{v1}, R_{v2} + 2 \Omega$	75	0,27139	144,18	4,00	2,86
$R_{v1}, R_{v2} + 3 \Omega$	100	0,28136	146,18	6,00	4,28

t – okolní teplota připojovacího vedení (pouze fiktivní hodnota)

ΔU – výstupní napětí můstku

R_s – vypočtený odpor snímače

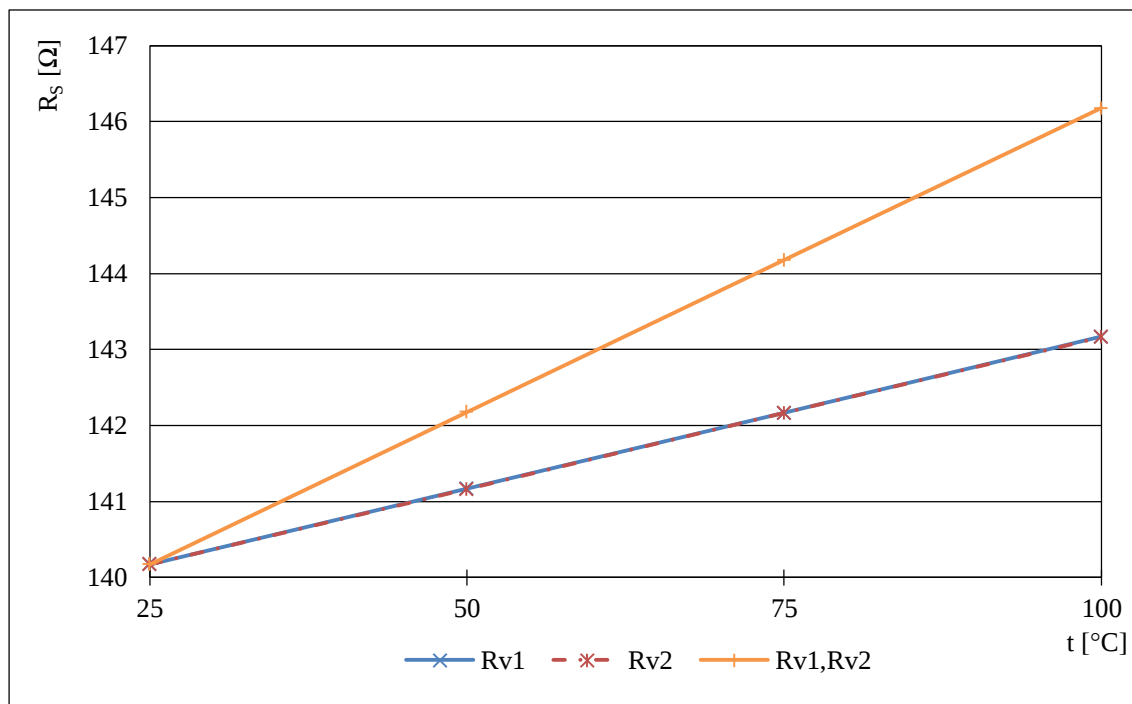
ΔR – absolutní chyba měření vztažená k hodnotě při normálním připojení snímače

δR – relativní chyba měření v %

Výpočet odporu snímače:

$$R_S = R_3 \frac{\frac{U_{cc}}{2} + \Delta U}{\frac{U_{cc}}{2} - \Delta U} = 100 * \frac{1,5 + \Delta U}{1,5 - \Delta U} [\Omega] \quad (4.3)$$

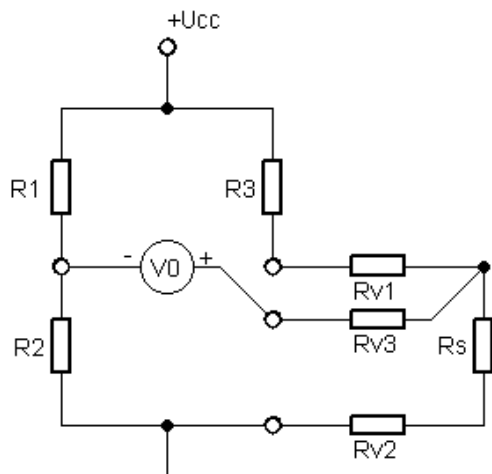
Graf 4.1: Závislost naměřeného odporu snímače v dvou vodičovém zapojení na změně odporu vedení způsobené změnou okolní teploty vedení



4.2.2 Měření pro třívodičové zapojení snímače

Schéma třívodičového zapojení snímače je na obrázku 4.3. V tomto zapojení je výstupní napětí můstku ΔU měřeno voltmetrem V_0 připojeným ke snímači pomocí třetího připojovacího vodiče o odporu R_{V3} . Tímto vodičem protéká v ideálním případě nulový proud, tudíž změna odporu R_{V3} neovlivní naměřenou hodnotu odporu snímače R_S (viz. graf 4.2).

Odpor snímače R_S je vypočten podle vztahu (4.4), u kterého vycházíme ze znalosti odporu R_3 a odporu vedení R_{V1} , což znamená, že jakákoli změna odporu R_{V1} způsobí odchylku v naměřené hodnotě odporu snímače R_S (viz. graf 4.2).



Obrázek 4.3: Schéma třívodičového zapojení

Tabulka 4.3: Naměřené a vypočtené hodnoty pro třívodičové zapojení snímače

Připojení snímače	t [°C]	ΔU [V]	R_s [Ω]	ΔR [Ω]	δR [%]
normální připojení	25	0,12555	130,10	-	-
Rv1 + 1 Ω	50	0,11884	128,93	-1,17	-0,90
Rv1 + 2 Ω	75	0,11217	127,78	-2,31	-1,78
Rv1 + 3 Ω	100	0,10554	126,65	-3,45	-2,65
Rv2 + 1 Ω	50	0,13123	131,09	1,00	0,77
Rv2 + 2 Ω	75	0,13690	132,10	2,00	1,54
Rv2 + 3 Ω	100	0,14248	133,09	2,99	2,30
Rv1,Rv2 + 1 Ω	50	0,12452	129,92	-0,18	-0,14
Rv1,Rv2 + 2 Ω	75	0,12352	129,74	-0,35	-0,27
Rv1,Rv2 + 3 Ω	100	0,12249	129,56	-0,53	-0,41
Rv3 + 1 Ω	50	0,12557	130,10	0,00	0,00
Rv3 + 2 Ω	75	0,12557	130,10	0,00	0,00
Rv3 + 3 Ω	100	0,12557	130,10	0,00	0,00

t – okolní teplota připojovacího vedení (pouze fiktivní hodnota)

ΔU – výstupní napětí můstku při třívodičovém připojení snímače

R_s – vypočtený odpor snímače

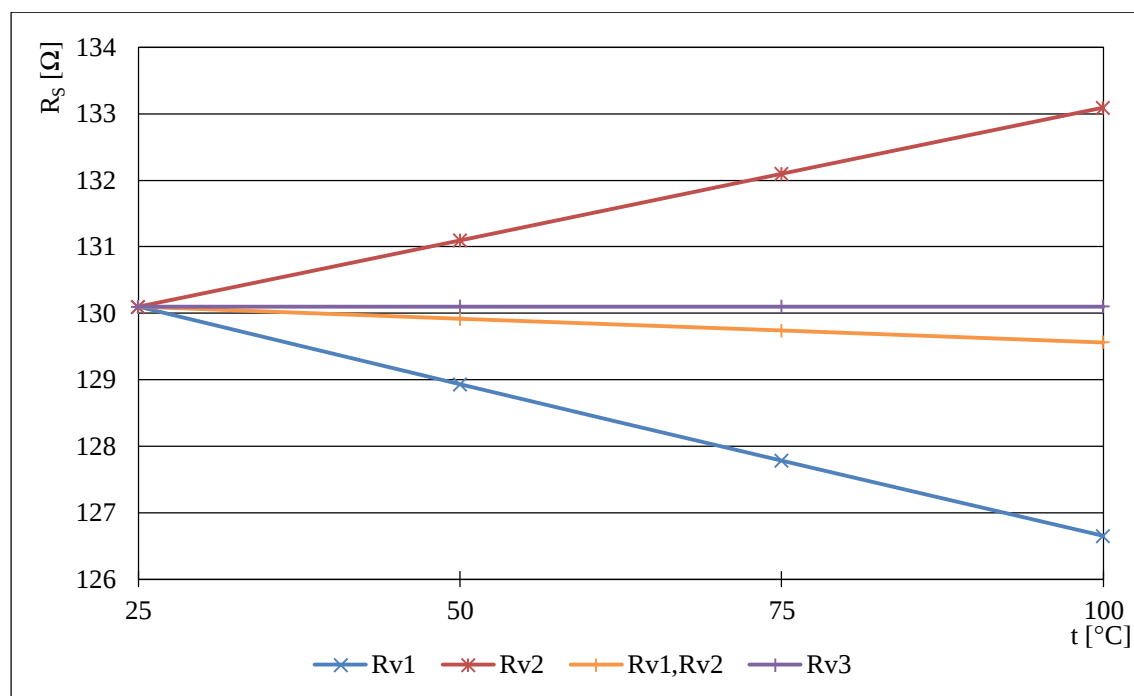
ΔR – absolutní chyba měření vztažená k hodnotě při normálním připojení snímače

δR – relativní chyba měření v %

Výpočet odporu snímače:

$$R_s = (R_3 + R_{v1}) \frac{\frac{U_{cc}}{2} + \Delta U}{\frac{U_{cc}}{2} - \Delta U} = (100 + 10) * \frac{1,5 + \Delta U}{1,5 - \Delta U} = 110 * \frac{1,5 + \Delta U}{1,5 - \Delta U} [\Omega] \quad (4.4)$$

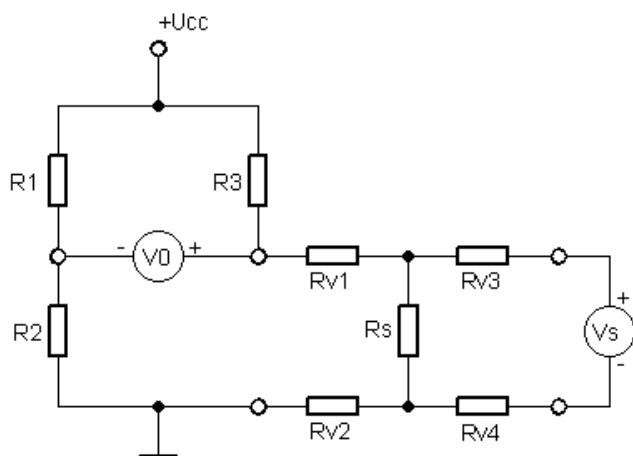
Graf 4.2: Závislost naměřeného odporu snímače v třívodičovém zapojení na změně odporu vedení způsobené změnou okolní teploty vedení



4.2.3 Měření pro čtyřvodičové zapojení snímače

Schéma čtyřvodičového zapojení snímače je na obrázku 4.4. U tohoto zapojení jsem vycházel z principu Ohmovy metody pro měření malých odporů. Pomocí voltmetru V_0 je měřeno výstupní napětí můstku ΔU , voltmetrem V_S pak úbytek napětí na snímači.

Podle vztahu (4.5) je vypočteno napětí na odporu R_3 . Odpor snímače R_S je pak dán vztahem (4.6), kdy vycházíme ze znalosti odporu R_3 , napětí na něm (U_{R3}) a úbytku napětí na snímači (U_{R_S}).



Obrázek 4.4: Schéma čtyřvodičového zapojení

Tabulka 4.4: Naměřené a vypočtené hodnoty pro čtyřvodičové zapojení snímače

Připojení snímače	t [°C]	U _{Rs} [V]	ΔU [V]	U _{R3} [V]	R _s [Ω]	ΔR [Ω]	δR [%]
normální připojení	25	1,4978	0,25099	1,2490	119,92	-	-
Rv1 + 1 Ω	50	1,4916	0,25616	1,2438	119,92	0,00	0,00
Rv1 + 2 Ω	75	1,4854	0,26129	1,2387	119,92	0,00	0,00
Rv1 + 3 Ω	100	1,4793	0,26639	1,2336	119,92	0,00	0,00
Rv2 + 1 Ω	50	1,4916	0,25615	1,2439	119,92	0,00	0,00
Rv2 + 2 Ω	75	1,4854	0,26129	1,2387	119,92	0,00	0,00
Rv2 + 3 Ω	100	1,4793	0,26637	1,2336	119,91	0,00	0,00
Rv1,Rv2 + 1 Ω	50	1,4854	0,26127	1,2387	119,91	-0,01	0,00
Rv1,Rv2 + 2 Ω	75	1,4733	0,27142	1,2286	119,92	0,00	0,00
Rv1,Rv2 + 3 Ω	100	1,4613	0,28139	1,2186	119,92	0,00	0,00
Rv3,Rv4 + 0 Ω	25	1,4983	0,25051	1,2495	119,91	-	-
Rv3,Rv4 + 1 Ω	50	1,4983	0,25052	1,2495	119,91	0,00	0,00
Rv3,Rv4 + 2 Ω	75	1,4983	0,25051	1,2495	119,91	0,00	0,00
Rv3,Rv4 + 3 Ω	100	1,4983	0,25052	1,2495	119,91	0,00	0,00

t – okolní teplota připojovacího vedení (pouze fiktivní hodnota)

U_{Rs} – napětí na snímači

ΔU – výstupní napětí můstku

U_{R3} – vypočtené napětí na odporu R₃

R_s – vypočtený odpor snímače

ΔR – absolutní chyba měření vztažená k hodnotě při normálním připojení snímače

δR – relativní chyba měření v %

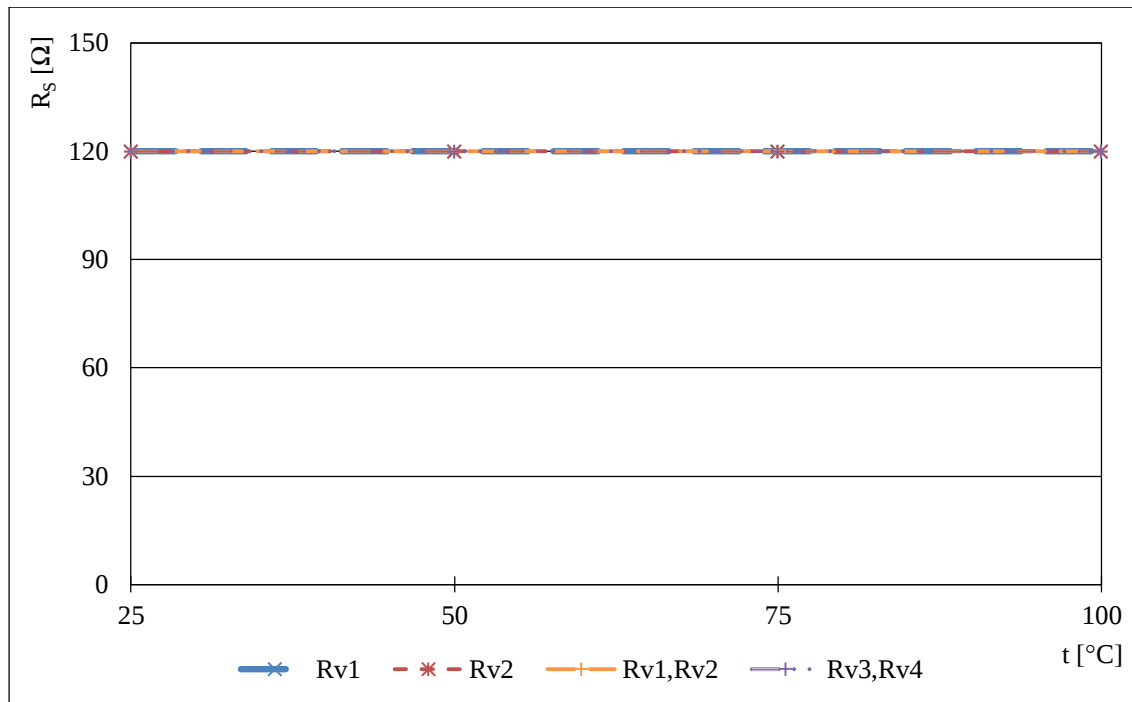
Výpočet odporu snímače:

$$U_{R3} = \frac{U_{cc}}{2} - \Delta U = 1,5 - \Delta U [V] \quad (4.5)$$

$$R_s = R_3 \frac{U_{Rs}}{U_{R3}} = 100 * \frac{U_{Rs}}{U_{R3}} [\Omega] \quad (4.6)$$

Z grafu 4.3 je patrné, že čtyřvodičové zapojení snímače se jeví jako nejlepší možnost kompenzace odporu vedení. Zapojení nám umožňuje určit přesnou hodnotu odporu snímače, v tomto případě 120 Ω a je naprosto nezávislé na jakékoli změně odporu vedení (naměřené závislosti naměřeného odporu snímače se pro změny odporu jednotlivých vodičů v grafu překrývají).

Graf 4.3: Závislost naměřeného odporu snímače v čtyřvodičovém zapojení na změně odporu vedení způsobené změnou okolní teploty vedení



4.3 Ověření Andersonovy smyčky

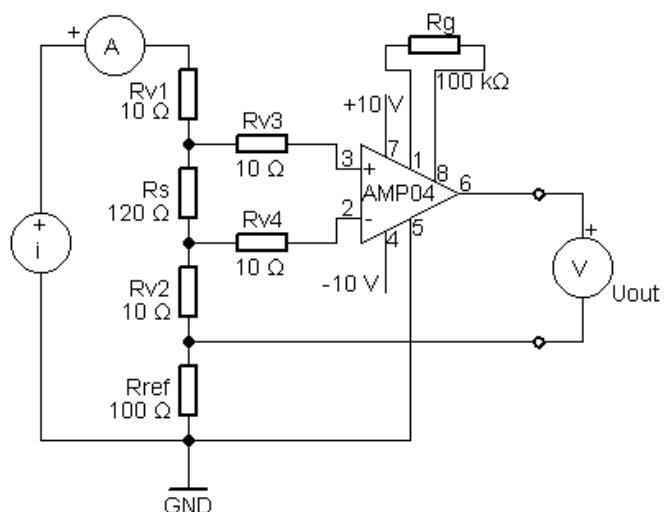
Elektrické schéma použité topologie Andersonovy smyčky je na obrázku 4.5. K vytvoření diferenciální odčítačky jsem použil přístrojového zesilovače AMP04 s jednotkovým zesílením, nastaveným pomocí odporu $R_g = 100 \text{ k}\Omega$. K napájení přístrojového zesilovače jsem použil symetrického napětí $\pm 10 \text{ V}$ ze zdroje HP E3631A.

Na vstupní svorky přístrojového zesilovače je přivedeno napětí ze snímače, referenční vstup přístrojového zesilovače je uzemněn. Na výstupu zesilovače pak je proti zemi přesně úbytek napětí na snímáči a proti kladné svorce referenčního odporu R_{ref} pak výstupní napětí Andersonovy smyčky U_{out} dané vztahem (3.1).

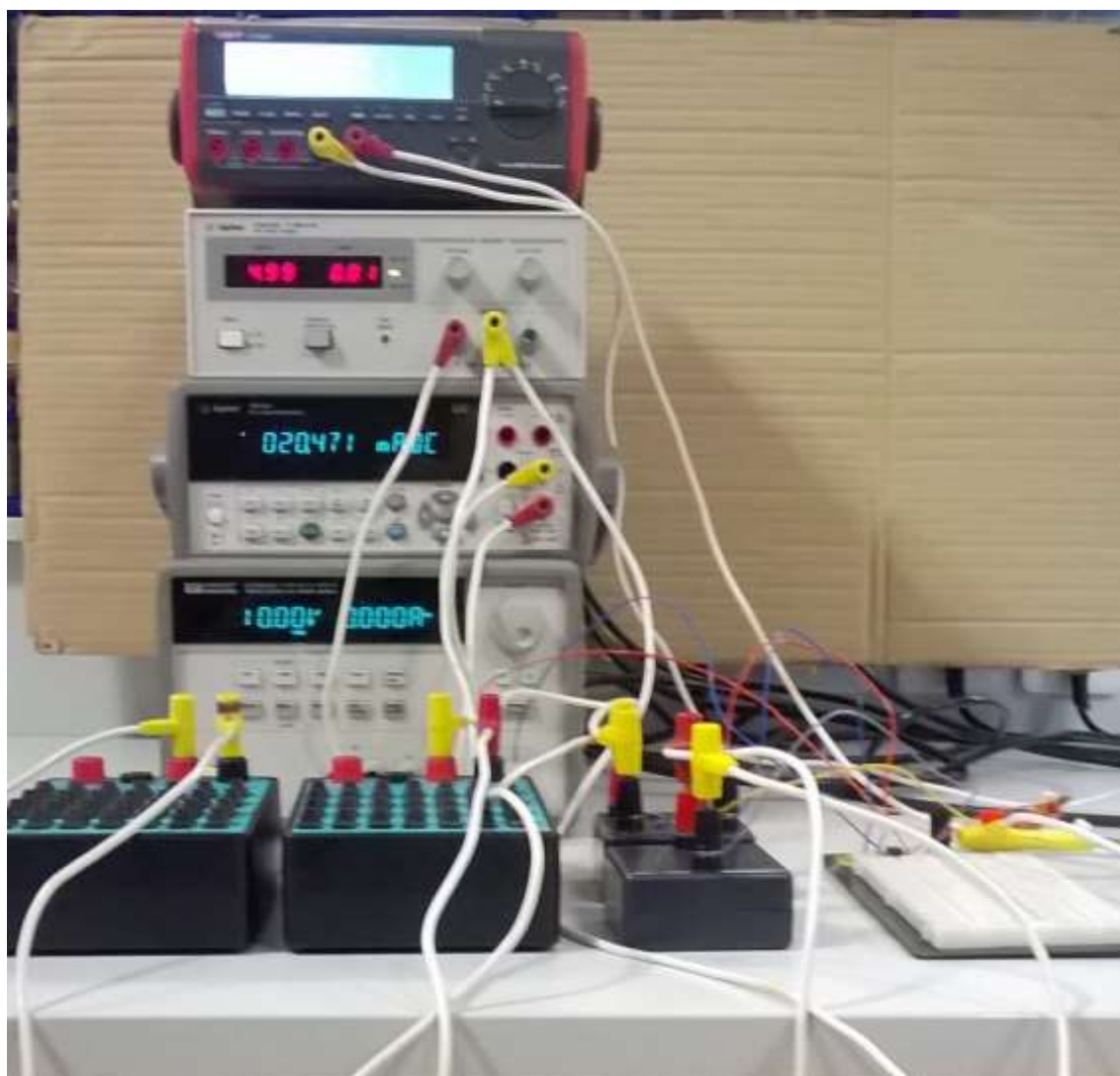
Ze znalosti napájecího proudu smyčky i a výstupního napětí U_{out} lze podle vztahu (4.7) vypočítat přírůstek odporu snímače ΔR vztažený k hodnotě odporu snímače při $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Hodnota odporu snímače při $0 \text{ }^\circ\text{C}$ odpovídá hodnotě referenčního odporu R_{ref} .

$$\text{Vztah pro výpočet přírůstku odporu snímače:} \quad \Delta R = \frac{U_{out}}{i} [\Omega] \quad (4.7)$$

K napájení smyčky jsem použil stejnosměrný zdroj Agilent E3615A v proudovém režimu (CC – constant current) nastavený na napájecí proud Andersonovy smyčky $i = 20 \text{ mA}$. Tento proud jsem navíc ověřoval pomocí do série zapojeného ampérmetru a do tabulky zaznamenával jeho přesnou hodnotu, ze které jsem pak vypočítal přírůstek odporu snímače ΔR .



Obrázek 4.5: Elektrické schéma použité topologie Andersonovy smyčky



Obrázek 4.6: Vzhled měřicího pracoviště k ověření Andersonovy smyčky

Na obrázku 4.6 je vidět celkový vzhled měřicího pracoviště sloužícího k ověření Andersonovy smyčky. Horní multimetr slouží k měření výstupního napětí Andersonovy smyčky U_{out} . Pod ním se nachází zdroj k napájení Andersonovy smyčky spolu s multimetrem sloužícím ke kontrole napájecího proudu smyčky. Úplně dole je pak zdroj symetrického napětí pro přístrojový zesilovač zapojený na nepájivém poli.

V dolní řadě zleva se pak nachází odporová dekáda simulující změnu odporu R_{V1} , odporová dekáda simulující změnu odporu R_{V2} , snímač s připojovacím vedením (odpory), referenční odpor a nepájivé pole s přístrojovým zesilovačem a odporem R_g . Seznam konkrétních použitých přístrojů spolu s výrobními čísly je uveden v tabulce 4.5.

Tabulka 4.5: Seznam použitých přístrojů pro ověření Andersonovy smyčky

Název přístroje	Výrobní číslo
Multimetr UNI-T UT804 (voltmetr)	6100019200
Multimetr Agilent 34410A (ampérmetr)	MY47001116
Odporová mini-dekáda COSINUS R1-3000, tolerance $\pm 1 \%$	016635, 016655
Stejnoseměrný zdroj Hewlett Packard E3631A	KR70906265
Stejnoseměrný zdroj Agilent E3615A	Inv. č. 1S66/014

Pro Andersonovu smyčku jsem proměřil závislost naměřeného odporu snímače na změně odporu vedení R_{V1} , R_{V2} a současně změně odporu vedení R_{V1} i R_{V2} . Změny odporů R_{V3} a R_{V4} na naměřenou hodnotu nemají vliv, neboť přístrojový zesilovač má ideálně nekonečný vstupní odpor. Naměřené a vypočtené hodnoty jsou v tabulce 4.6.

Tabulka 4.6: Naměřené a vypočtené hodnoty pro Andersonovu smyčku

Připojení snímače	Okolní teplota vedení [$^{\circ}\text{C}$]	I [mA]	U_{out} [V]	ΔR [Ω]	R_s [Ω]
normální připojení	25	20,11	0,3991	19,85	119,85
$R_{V1} + 1 \Omega$	50	20,12	0,3994	19,85	119,85
$R_{V1} + 2 \Omega$	75	20,11	0,3993	19,86	119,86
$R_{V1} + 3 \Omega$	100	20,12	0,3993	19,85	119,85
$R_{V2} + 1 \Omega$	50	20,10	0,3985	19,83	119,83
$R_{V2} + 2 \Omega$	75	20,09	0,3982	19,82	119,82
$R_{V2} + 3 \Omega$	100	20,09	0,3981	19,82	119,82
$R_{V1}, R_{V2} + 1 \Omega$	50	20,08	0,3980	19,82	119,82
$R_{V1}, R_{V2} + 2 \Omega$	75	20,08	0,3980	19,82	119,82
$R_{V1}, R_{V2} + 3 \Omega$	100	20,09	0,3981	19,82	119,82

Odpor snímače R_s určíme jako součet přírůstku odporu snímače ΔR a nominálního odporu snímače R_0 (vztah 4.8).

$$R_s = \Delta R + R_0 = \Delta R + 100 [\Omega] \quad (4.8)$$

4.4 Porovnání výsledků jednotlivých kompenzačních metod

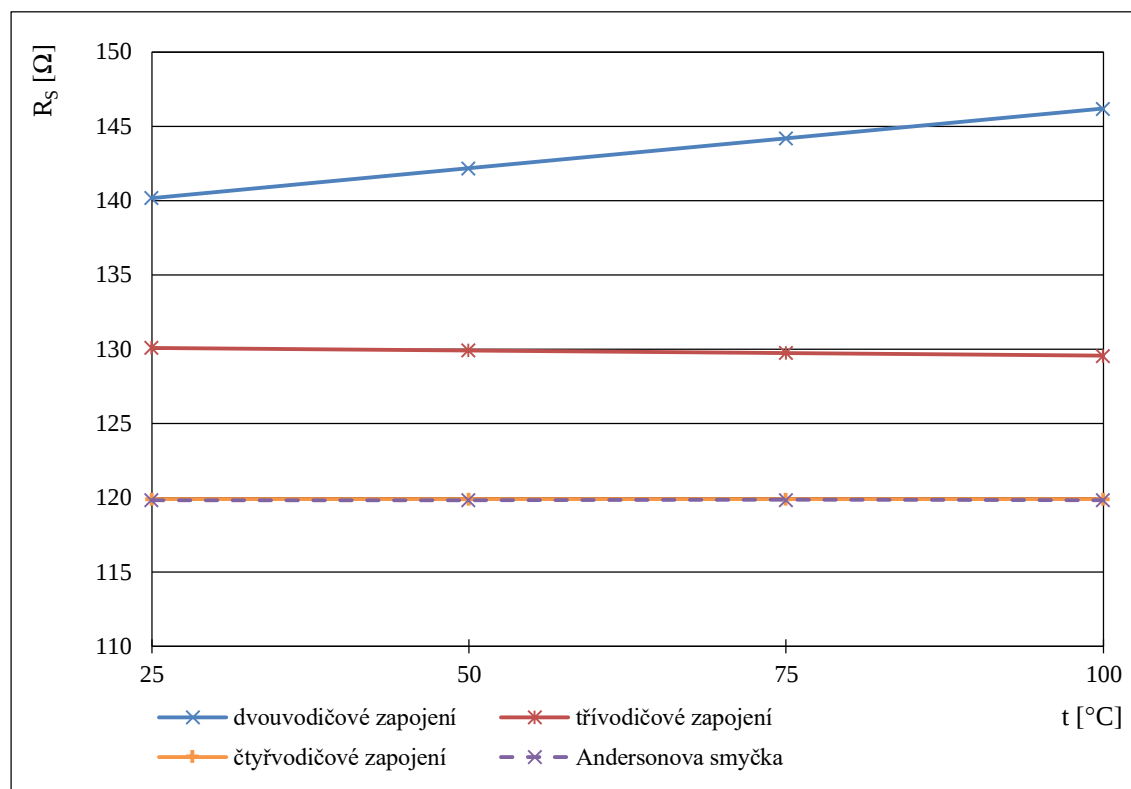
Do tabulky 4.6 byly přepsány naměřené hodnoty odporu snímače v závislosti na současné změně odporu vedení R_{V1} i R_{V2} , která může být způsobena například změnou okolní teploty připojovacího vedení, podrobně popsanou v kapitole 4.1.

Tyto hodnoty slouží k porovnání dosažených výsledků pro jednotlivé metody kompenzace odporu vedení – vícevodičové zapojení a Andersonovu smyčku ve srovnání s dvouvodičovým zapojením. Na základě experimentálně získaných hodnot byl sestaven graf 4.4.

Tabulka 4.7: Naměřené hodnoty odporu snímače pro jednotlivé kompenzační metody

		dvouvodičové zapojení	třívodičové zapojení	čtyřvodičové zapojení	Andersonova smyčka
$\Delta R_{V1}, R_{V2}$	$t [^{\circ}\text{C}]$	$R_s [\Omega]$	$R_s [\Omega]$	$R_s [\Omega]$	$R_s [\Omega]$
0 Ω	25	140,17	130,10	119,92	119,85
1 Ω	50	142,18	129,92	119,91	119,86
2 Ω	75	144,18	129,74	119,92	119,85
3 Ω	100	146,18	129,56	119,92	119,85

Graf 4.4: Porovnání naměřených závislostí naměřeného odporu snímače v závislosti na okolní teplotě připojovacího vedení pro různé kompenzační metody



Z grafu 4.4 je patrné, že nejlepšího výsledku měření odporu snímače lze dosáhnout u čtyřvodičového zapojení snímače a Andersonovy smyčky. Naměřené hodnoty odporu snímače pro čtyřvodičové zapojení a Andersonovu smyčku jsou téměř shodné a naprosto nezávislé na jakékoli změně odporu vedení.

Andersonova smyčka má oproti čtyřvodičovému zapojení snímače ve Wheatstoneovu můstku tu výhodu, že lineární změna odporu snímače u ní způsobí lineární změnu výstupního napětí.

U dvouvodičového zapojení je naměřený odpor snímače dán součtem odporu R_s a odporů vedení R_{V1} a R_{V2} . Jakákoli změna odporu vedení se u něj přímo projevuje na naměřené hodnotě odporu snímače. Proto se také u dvouvodičového zapojení provádí statická kompenzace odporu vedení popsaná v kapitole 2.5.1.

U třívodičového zapojení je naměřená hodnota odporu snímače nižší přesně o odpor jednoho vodiče připojovacího vedení, zapojení je ale rovněž citlivé na změnu odporu vedení (vztah 4.4).

5 SIMULACE METOD V LABVIEW

5.1 Programovací prostředí LabVIEW

„Programovací a vývojové prostředí LabVIEW (z anglického Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench) čili „laboratorní pracoviště virtuálních přístrojů“, někdy též LV, je produktem americké firmy National Instruments (NI), která je průkopníkem a největším výrobcem v oblasti virtuální instrumentace, technické disciplíny, která zažívá veliký rozvoj v oblasti vývoje, výzkumu, školství a průmyslu.

Prostředí LabVIEW, někdy nazývané též jako G-jazyk (tedy „grafický“ jazyk), je vhodné nejen k programování systémů pro měření a analýzu signálů, řízení a vizualizaci technologických procesů, ale také k programování složitých systémů.“ [7]

Z důvodu všech výše popsaných vlastností a výhod programovacího prostředí LabVIEW jsem se rozhodl vytvořit simulaci metod kompenzace odporu vedení právě v tomto prostředí.

Program v LabVIEW můžeme rozdělit na dvě dílčí části, jimiž jsou *Front Panel* a *Block Diagram*. *Front Panel* (česky přední panel) vytváří komunikaci s uživatelem a slouží k zadávání hodnot a zobrazování výsledků simulace. Lze o něm říci, že odpovídá přednímu panelu na kterémkoli měřicím přístroji. *Block Diagram* (česky blokový diagram) pak tvoří samotný kód programu.

5.2 Simulace vícevodičových zapojení

Vzhled předního panelu vytvořené aplikace sloužící k simulaci vícevodičových zapojení je na obrázku 5.1. Aplikace je koncipována pro vícevodičové metody kompenzace odporu vedení při měření teploty odporovými kovovými snímači. Pro přehlednost je na pravou část předního panelu vloženo schéma zapojení.

Uživatel vybere materiál použitého snímače – nikl nebo platinu a dále hodnotu odporu snímače při teplotě 0 °C. Zde vybírá z průmyslové řady 100, 200, 500, 1000 nebo 2000 Ω. Dále uživatel zadává skutečnou hodnotu odporu snímače R_S – může ji buď zadat z klávesnice, případně nastavit pomocí myši kliknutím na šipky nahoru/dolů.

Obdobným způsobem uživatel zadá nominální hodnotu odporu vedení R_V a případnou změnu odporu daného vodiče připojovacího vedení $R_{V1} - R_{V4}$. Jak bylo vypočteno v kapitole 4.1, u 10 Ω připojovacího vedení představuje změna odporu o 1 Ω změnu okolní teploty vedení o 25 °C. Toto tvrzení můžeme zobecnit tak, že změna okolní teploty o 25 °C způsobí změnu odporu vedení o 10 %.

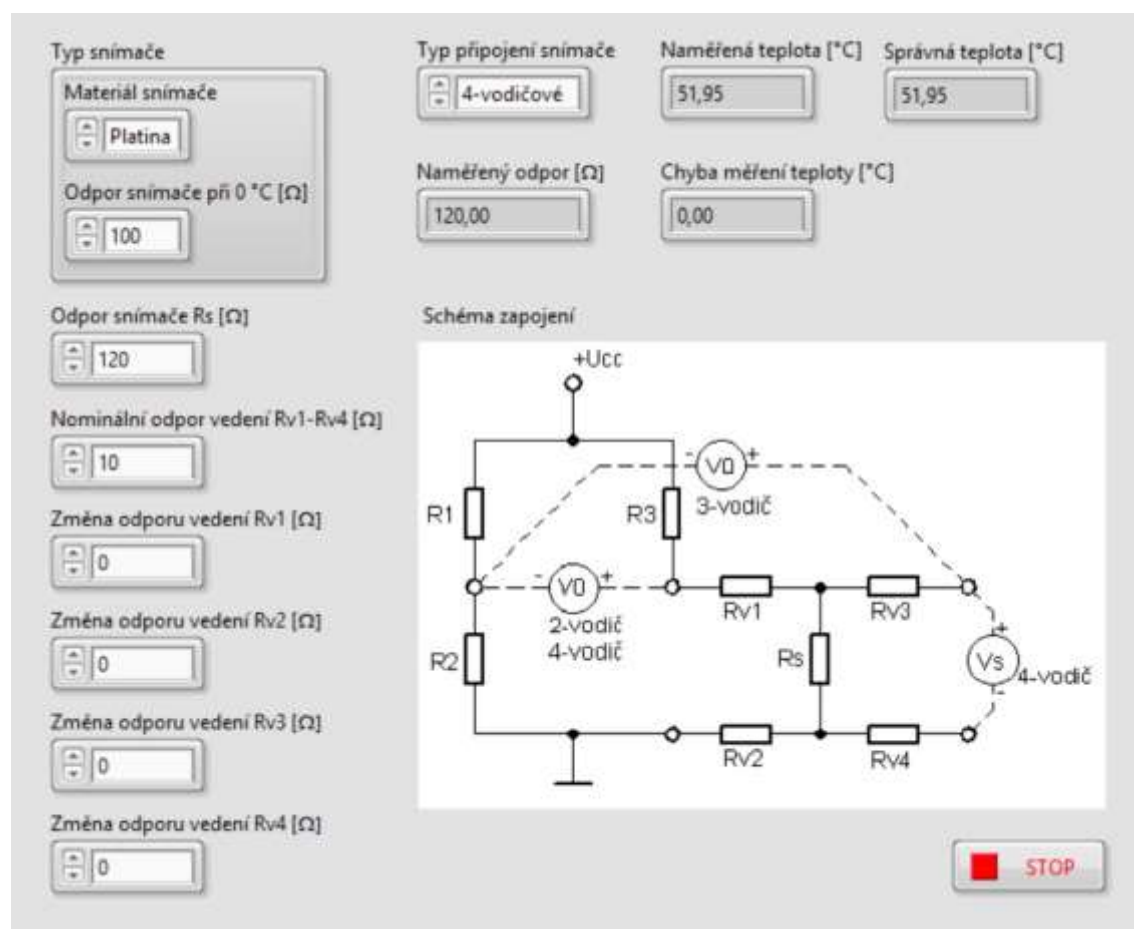
Uživatel dále volí příslušnou metodu kompenzace odporu vedení – třívodičové nebo čtyřvodičové zapojení. Pro srovnání je v aplikaci rovněž možnost zvolit základní dvouvodičové zapojení.

Aplikace uživateli zobrazí naměřenou hodnotu odporu snímače, jejíž výpočet vychází z experimentálně ověřených vztahů uvedených v kapitole 4. Aplikace dále

provádí přepočet naměřené hodnoty odporu snímače na odpovídající hodnotu teploty ve stupních Celsia – tato hodnota je nazvána Naměřená teplota. Ze zadaného odporu snímače R_s je pak vypočtena hodnota nazvaná jako Správná teplota. Je vypočten rozdíl naměřené a správné teploty a uživateli zobrazen jako Chyba měření teploty.

Aplikace dále hlídá překročení teplotního rozsahu příslušného snímače, který je pro platinový snímač -200 až 850 °C a pro niklový snímač -80 až 180 °C. Pokud uživatel zadá příliš malou nebo naopak příliš velkou hodnotu odporu snímače, je na to upozorněn v dialogovém okně a po potvrzení tohoto okna je hodnota odporu snímače vynulována a uživatel může zadat hodnotu novou.

Ukončení aplikace lze provést kliknutím na červené tlačítko STOP umístěné v pravé dolní části předního panelu.



Obrázek 5.1: Vzhled předního panelu aplikace sloužící k simulaci vícevodičových zapojení

5.3 Simulace Andersonovy smyčky

Vzhled předního panelu aplikace sloužící k simulaci Andersonovy smyčky je na obrázku 5.2. Aplikace je vytvořena pro použití Andersonovy smyčky ke kompenzaci odporu vedení při měření teploty pomocí odporových kovových snímačů. V pravé části předního panelu se nachází základní schéma zapojení Andersonovy smyčky, které je shodné s obrázkem 3.3.

Stejně jako u simulace vícevodičových zapojení uživatel vybírá materiál použitého snímače (nikl nebo platinu) a hodnotu odporu snímače při teplotě 0 °C (výběr z průmyslové řady 100, 200, 500, 1000, 2000 Ω). Na základě této hodnoty je vybrána hodnota referenčního odporu R_{ref} , která je shodná s hodnotou odporu snímače při teplotě 0 °C. Tato hodnota je uživateli pouze zobrazena na předním panelu a nemůže ji nijak měnit.

Skutečnou hodnotu odporu snímače R_S , napájecí proud Andersonovy smyčky i (v simulaci omezen na maximálně 100 mA), nominální odpor vedení R_V a případnou změnu odporu daného vodiče připojovacího vedení uživatel zadává stejným způsobem jako u simulace vícevodičových zapojení, tj. buď z klávesnice nebo pomocí šipek nahoru/dolů.

Výsledky simulace jsou uživateli zobrazeny v pravé horní části předního panelu. Je zde zobrazeno napětí na snímači U_S , napětí na referenčním odporu U_{ref} a výstupní napětí Andersonovy smyčky U_{out} , které je dáno rozdílem napětí na snímači U_S a napětí na referenčním odporu U_{ref} .

Výpočet naměřeného odporu snímače je prováděn poměrově z napětí na snímači U_S a referenčního napětí U_{ref} a ze znalosti hodnoty referenčního odporu R_{ref} . Obdobně jako u vícevodičových zapojení je uživateli zobrazena naměřená teplota získaná převodem z naměřeného odporu snímače.

Stejně jako u simulace vícevodičových zapojení je i u Andersonovy smyčky zajištěno hlídání překročení teplotního rozsahu snímače při zadání nesprávné hodnoty odporu snímače.

Ukončení aplikace se provádí kliknutím na červené tlačítko STOP v pravé dolní části předního panelu.

Typ snímače

Materiál snímače

Platina

Odpor snímače při 0 °C [Ω]

100

Odpor snímače R_s [Ω]

120

Napájecí proud i [mA]

10

max.100 mA

Nominální odpor vedení R_{v1-Rv4} [Ω]

10

Změna odporu vedení R_{v1} [Ω]

1

Změna odporu vedení R_{v2} [Ω]

1

Změna odporu vedení R_{v3} [Ω]

1

Změna odporu vedení R_{v4} [Ω]

1

Referenční odpor R_{ref} [Ω]

100

Napětí na snímači U_s [V]

1,200

Napětí na referenčním odporu U_{ref} [V]

1,000

Výstupní napětí U_{out} [V]

0,200

Naměřený odpor [Ω]

120

Naměřená teplota [°C]

51,95

Schéma zapojení

STOP

Obrázek 5.2: Vzhled předního panelu aplikace sloužící k simulaci Andersonovy smyčky

6 ÚKOLY PRO LABORATORNÍ MĚŘENÍ

Na základě provedených měření a vlastností laboratorního přípravku jsem vytvořil následující seznam rámcových zadání (úkolů) pro měření v laboratorním cvičení. Jednotlivé hodnoty v úkolech jsem volil tak, aby odpovídaly parametrům vytvořeného laboratorního přípravku, popsaného v kapitole 3.

Zadání úkolů vychází z proměřených závislostí naměřeného odporu snímače na změně odporu vedení, popsaných v kapitole 4. Pro každé zapojení rovněž doporučuji provést porovnání naměřených hodnot s hodnotami získanými simulací v prostředí LabVIEW, jejíž obsluha je popsána v kapitole 6.

6.1 Zadání úkolů pro laboratorní cvičení

1. Proveďte analýzu závislosti změny odporu vedení na okolní teplotě pro měděné připojovací vedení o nominálním odporu $R_V = 10 \, \Omega$ při $25 \, ^\circ\text{C}$, teplotní součinitel odporu mědi $\alpha_{\text{Cu}} = 4,0 \cdot 10^{-3} \, \Omega \cdot \text{K}^{-1}$.
Výpočtem určete odpor takového vedení v rozmezí teplot od $25 \, ^\circ\text{C}$ do $100 \, ^\circ\text{C}$. Pro vypočtené změny odporu připojovacího vedení proměřte závislosti naměřeného odporu snímače na změně odporu vedení pro jednotlivé metody kompenzace odporu vedení.
2. Pro odpor snímače $R_S = 120 \, \Omega$ (typ snímače Pt100 případně Ni100) a nominální odpor vedení $R_V = 10 \, \Omega$ zjistěte pomocí simulace závislost naměřeného odporu snímače ve dvouvodičovém zapojení na změně jednotlivých odporů vedení R_{V1} a R_{V2} i současně změně obou odporů vedení. Zaznamenávejte si i naměřenou teplotu, správnou teplotu a chybu měření teploty.
Simulací získané hodnoty ověřte pomocí měření na laboratorním přípravku. K měření použijte Wheatstoneův můstek, snímač s připojovacím vedením, napájecí zdroj a multimetr. Změnu odporu vedení simulujte pomocí odporových dekád, které zapojíte do série s příslušným odporem připojovacího vedení R_V . Napájecí napětí můstku U_{cc} nastavte na vhodně zvolenou hodnotu.
3. Stejný postup opakujte pro třívodičové zapojení. Simulací a měřením zjistěte závislost naměřeného odporu snímače na změně odporu vedení R_{V1} , R_{V2} , současně změně R_{V1} a R_{V2} a změně R_{V3} .
4. Pro čtyřvodičové zapojení pomocí simulace i měření na laboratorním přípravku zjistěte závislost naměřeného odporu snímače na změně odporu vedení R_{V1} , R_{V2} , současně změně R_{V1} a R_{V2} a současně změně R_{V3} a R_{V4} . Ve čtyřvodičovém zapojení měřte pomocí jednoho multimetru výstupní napětí můstku a pomocí druhého multimetru úbytek napětí na snímači.

5. Proved'te přepojení laboratorního přípravku do topologie Andersonovy smyčky. Využijte k tomu snímače s připojovacím vedením a referenčního odporu. K napájení Andersonovy smyčky použijte stejnosměrný zdroj v proudovém režimu (CC – constant current). Do série se zdrojem zapojte ampérmetr a nastavte zdroj na vhodně zvolenou hodnotu napájecího proudu. Přesnou hodnotu proudu si průběžně pro každé měření zaznamenávejte.

K vyhodnocení signálu z Andersonovy smyčky použijte přístrojový zesilovač s nastaveným jednotkovým zesílením. Přístrojový zesilovač napájejte ze symetrického zdroje napětí ± 10 V. Vstup přístrojového zesilovače zapojte na svorky R_{V3} a R_{V4} snímače. Referenční vstup přístrojového zesilovače uzemněte. Na výstupu zesilovače dostanete proti kladné svorce referenčního odporu napětí odpovídající změně odporu snímače ΔR oproti jeho počáteční hodnotě R_0 . Toto napětí měřte pomocí multimetru a vypočítejte z něj změnu odporu snímače ΔR .

Pro parametry uvedené v bodu 2 a zvolený napájecí proud smyčky zjistěte měřením i simulací závislost naměřeného odporu snímače na změně odporu vedení R_{V1} , R_{V2} a současné změně R_{V1} a R_{V2} . U simulace si запиšte i výstupní napětí Andersonovy smyčky a porovnejte je s hodnotou získanou měřením.

6. Graficky vyhodnoťte a vzájemně porovnejte získané závislosti naměřeného odporu snímače na změně odporu vedení, resp. změně okolní teploty vedení (vypočtené v bodě 1) pro dvou vodičové zapojení, třívodičové zapojení, čtyřvodičové zapojení a Andersonovu smyčku. Určete, u kterého (případně kterých) zapojení lze dosáhnout největší přesnosti a nezávislosti měření odporu snímače.

7 ZÁVĚR

V bakalářské práci jsem se zabýval problematikou kompenzace odporu vedení u odporových snímačů. Soustředil jsem se na kompenzaci odporu vedení u kovových odporových snímačů teploty.

Provedl jsem návrh a následnou realizaci laboratorního přípravku sloužícího k demonstraci metod kompenzace odporu vedení, souhrnně nazývaných jako vícevodičová zapojení. Do laboratorního přípravku jsem rovněž implantoval netradiční metodu kompenzace známou pod názvem Andersonova smyčka.

Ověřil jsem funkčnost laboratorního přípravku. Pro jednotlivé metody kompenzace jsem proměřil závislosti naměřeného odporu snímače na změně odporu vedení, kterou jsem simuloval pomocí odporové dekády. Změna odporu vedení bývá v praxi nejčastěji způsobena změnou okolní teploty připojovacího vedení.

Na základě dosažených výsledků měření jsem došel k závěru, že nejlepšími kompenzačními metodami jsou čtyřvodičové zapojení a Andersonova smyčka. U těchto dvou kompenzačních metod jakákoli změna odporu vedení neovlivní naměřenou hodnotu odporu snímače.

Dvouvodičové zapojení není úplně vhodné, neboť změna odporu vedení se u něj přímo projevuje na naměřené hodnotě odporu snímače. Třívodičové zapojení je vhodnější, ale je rovněž citlivé na změnu odporu vedení. Porovnání výsledků pro jednotlivé metody kompenzace odporu vedení je vyneseno do grafu 4.4 v kapitole 4.4.

V rámci bakalářské práce jsem dále vytvořil aplikaci v programovém prostředí National Instruments LabVIEW, která slouží k simulaci vícevodičových zapojení a Andersonovy smyčky při měření teploty pomocí kovových odporových snímačů. Pomocí vytvořené aplikace lze ověřit správnost měření na laboratorním přípravku. Uživatel může provést porovnání hodnot získaných měření s hodnotami simulovanými.

Na základě vlastností laboratorního přípravku a provedených měření jsem vytvořil rámcový návod pro laboratorní cvičení. Vzhledem k otevřenosti systému laboratorního přípravku lze v budoucnu provést jeho případné rozšíření, například o měření se skutečným snímačem teploty. Jednotlivé části laboratorního přípravku lze také využít k vytvoření automatizovaného měřicího pracoviště s programovatelnými měřicími přístroji.

Použitá literatura

- [1] Analog Devices, Inc. *Precision Single Supply Instrumentation Amplifier AMP04* [online]. USA: 2015 [cit. 2016-04-26].
Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AMP04.pdf>
- [2] ANDERSON, K. F. *Your Successor to the Wheatstone Bridge? NASA's Anderson Loop*. USA: IEEE Instrumentation and Measurement Magazine, 1998.
Dostupné z: <http://www.vm-usa.com/papers/im.pdf>
- [3] DRAHOKOUPIL, P. *Netradiční metody korekce vlivu odporu přívodních vodičů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 48 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.
- [4] GESCHEIDTOVÁ, E.; REZ, J.; STEINBAUER, M. *Měření v elektrotechnice*. Brno: VUT, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT, 2002. 241 s.
- [5] KESTER, W. *Practical design techniques for sensor signal conditioning*. USA: Analog Devices, Inc., 1999. ISBN 0-916550-20-6
- [6] RIPKA, P.; ĎAĎO, S.; KREIDL, M.; NOVÁK, J. *Senzory a převodníky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. 130 s. ISBN 80-01-03123-3
- [7] VLACH, J.; HAVLÍČEK J.; VLACH M. *Začínáme s LabVIEW*. Praha: BEN – technická literatura, 2008. 248 s. ISBN 978-80-7300-245-9
- [8] ZEHNULA, K. *Převodníky fyzikálních veličin*. Brno: VUT FEI Brno, 1990.
- [9] Rezistivita. In: *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2016-03-02].
Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Rezistivita>

Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Náhradní schéma odporového snímače s připojovacím vedením [7].....	9
Obrázek 2.2: Elektrické schéma Wheatstoneova můstku [3]	12
Obrázek 3.1: Elektrické schéma navrženého Wheatstoneova můstku	14
Obrázek 3.2: Elektrické schéma navrženého snímače	15
Obrázek 3.3: Základní elektrické schéma Andersonovy smyčky	15
Obrázek 3.4: Vzhled Wheatstoneova můstku.....	17
Obrázek 3.5: Vzhled snímače.....	17
Obrázek 3.6: Vzhled referenčního odporu pro Andersonovu smyčku	17
Obrázek 4.1: Celkový vzhled měřicího pracoviště pro ověření vícevodičových zapojení.....	19
Obrázek 4.2: Schéma dvouvodičového zapojení	20
Obrázek 4.3: Schéma třívodičového zapojení	22
Obrázek 4.4: Schéma čtyřvodičového zapojení.....	23
Obrázek 4.5: Elektrické schéma použité topologie Andersonovy smyčky	26
Obrázek 4.6: Vzhled měřicího pracoviště k ověření Andersonovy smyčky.....	26
Obrázek 5.1: Vzhled předního panelu aplikace sloužící k simulaci vícevodičových zapojení ...	31
Obrázek 5.2: Vzhled předního panelu aplikace sloužící k simulaci Andersonovy smyčky	33

Seznam tabulek

Tabulka 2.1: Hodnoty odporu vedení v závislosti na délce vedení a průřezu vodiče	10
Tabulka 4.1: Seznam použitých přístrojů pro ověření vícevodičových zapojení	19
Tabulka 4.2: Naměřené a vypočtené hodnoty pro dvouvodičové zapojení snímače	20
Tabulka 4.3: Naměřené a vypočtené hodnoty pro třívodičové zapojení snímače.....	22
Tabulka 4.4: Naměřené a vypočtené hodnoty pro čtyřvodičové zapojení snímače	24
Tabulka 4.5: Seznam použitých přístrojů pro ověření Andersonovy smyčky	27
Tabulka 4.6: Naměřené a vypočtené hodnoty pro Andersonovu smyčku	27
Tabulka 4.7: Naměřené hodnoty odporu snímače pro jednotlivé kompenzační metody	28

Seznam grafů

Graf 2.1: Závislost odporu vedení na jeho délce pro různé průměry vodiče	11
Graf 4.1: Závislost naměřeného odporu snímače v dvouvodičovém zapojení na změně odporu vedení způsobené změnou okolní teploty vedení	21
Graf 4.2: Závislost naměřeného odporu snímače v třívodičovém zapojení na změně odporu vedení způsobené změnou okolní teploty vedení	23
Graf 4.3: Závislost naměřeného odporu snímače v čtyřvodičovém zapojení na změně odporu vedení způsobené změnou okolní teploty vedení	25
Graf 4.4: Porovnání naměřených závislostí naměřeného odporu snímače v závislosti na okolní teplotě připojovacího vedení pro různé kompenzační metody	28

Seznam příloh

CD s následujícími soubory:

- Kompletní text bakalářské práce ve formátu .pdf
- Zdrojové soubory simulace vícevodičových zapojení a Andersonovy smyčky v LabVIEW 2015 (32 bit)
- Soubory .exe spustitelných aplikací simulace vícevodičových zapojení a Andersonovy smyčky
- Instalační soubor LabVIEW Run-Time Engine 2015 (32 bit), jenž je potřeba k spuštění vytvořených aplikací