



ČESKÝ METROLOGICKÝ INSTITUT

OBLASTNÍ INSPEKTORÁT BRNO

ZÁVĚREČNÁ ZPRÁVA Č. 6014-TR-Z0002-21

o plnění úkolu TR

**Primární realizace jednotky Kelvin
pomocí Johnsonova šumového teploměru**

Odpovědný řešitel: Doc. Mgr. Jan Martinek, Ph.D.

Vypracovali: Doc. Mgr. Jan Martinek, Ph.D.
Mgr. Petr Klapetek, Ph.D.
Bc. Václav Hortvík
Mgr. Jiří Šperka, Ph.D.


Ředitel VOJ: Ing. Radovan Wiecek
ředitel OI Brno

Datum: 23. listopadu 2021

Schválil: RNDr. Pavel Klenovský
odborný ředitel pro FM

Rozdělovník: 2x ČMI 0211, ČMI 6014
2x oponenti

výtisk č.

	Český metrologický institut Oblastní inspektorát Brno	Zpráva úkolu TR č. 6014-TR-Z0002-21	Počet příloh: 1 Počet listů: 2/54
---	---	---	--------------------------------------

Resumé

Cílem úkolu je vytvořit novou koncepci nízkonákladového šumového teploměru a otestovat ji měřením jeho přesnosti a stability. Šumové teploměry mají pomalou odezvu a nejistota měření klesá s odmocninou doby měření. Přesto se ukázala rychlost reakce a stabilita měření jako dostatečná pro téměř všechny metrologické a kalibrační účely. Po mnoha neúspěších se podařilo dosáhnout též velmi dobré linearity.



Obsah

Resumé	2
Obsah	3
1 ÚVOD	4
1.1 Měření teploty	4
1.2 Stručná historie termometrie	4
1.3 Realizace a měření termodynamické teploty, Boltzmannova konstanta a ITS	6
1.3.1 Realizace a měření termodynamické teploty	6
1.3.2 Boltzmannova konstanta	8
1.3.3 Mezinárodní teplotní stupnice (ITS)	8
1.4 Johnsonův šum a Johnsonův šumový teploměr	9
2 POPIS ŘEŠENÍ ÚKOLU	11
2.1 Princip a návrh šumového teploměru	11
2.1.1 Platinové teploměry a přesnost měření	14
2.2 Analogový korelátor	17
2.3 Šumový teploměr na základě přístrojového zesilovače AD8429	20
2.3.1 Postup měření	21
2.3.2 Výsledky	23
2.3.3 Měření referenční teploty	24
2.4 Měření pomocí mikropočítače Red Pitaya	27
2.5 Zesilovač s FET vstupy	30
2.5.1 Citlivost zařízení na okolní teplotu	32
2.5.2 Teplotní stabilizace elektroniky	33
2.5.3 Stabilizace teploty měřicí karty	35
2.5.4 Test stability	35
2.5.5 Ověření kalibrační přímky	37
2.5.6 Příčiny nelinearity	37
2.5.7 Test linearity každého zesilovače	40
2.6 Kalibrace sond pro termální mikroskopii	43
2.7 Kompenzace dlouhodobého driftu, etalon šumu	45
3 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY	47
4 ČERPANÉ NÁKLADY NA ÚKOL	50
5 ZÁVĚR	51
Seznam bibliografických citací	53
PŘÍLOHY	54



1. ÚVOD

1.1. Měření teploty

Na úplný začátek si položíme otázku, co je to teplota? Už v dávných dobách lidé díky své empirické zkušenosti věděli, že jeden předmět může být „teplejší“ než předmět druhý. Od podobných kvalitativních porovnání k měření kvantitativnímu ovšem vedla dlouhá a složitá cesta. Navíc se díky poznatkům z oblasti termodynamiky a kinetické teorie látek ukázalo, že kromě určení teploty pomocí teplotní škály teplota souvisí také s vnitřním stavem/energií dané látky, respektive s kinetickou energií atomů dané látky. Takže nyní pracujeme s pojmy jako absolutní termodynamická teplota, absolutní nula, Boltzmannova konstanta nebo entropie. Tato práce je zaměřena na přesné kvantitativní měření teploty s využitím Johnsonova šumu.

Měření teploty, nebo také termometrie, je oborem metrologie, jehož cílem je přesně a kvantitativně určit, jakou má daná látka v určitém místě teplotu. Měření teploty je nezbytné v nejrůznějších oblastech lidské činnosti, zmiňme např. lékařství, meteorologii nebo elektrotechniku. Znalost teploty je nezbytná také pro různá další měření, protože teplotní podmínky ovlivňují průběh a výsledky mnoha různých fyzikálních měření, platí to například pro délková měření kvůli závislosti délkových charakteristik pevných látek na teplotě, tj. teplotní roztažnosti látek. Pomocí měření teploty je ale také možné určovat jiné fyzikální veličiny, např. relativní vlhkost vzduchu pomocí psychrometru, tlak plynů látek za předpokladu platnosti stavové rovnice ideálního plynu nebo délku pevných látek. Ke současnému stavu poznání měření teploty vedla dlouhá cesta a důležité milníky jsme shrnuli do podkapitoly 1.2. Rozvoj termometrie souvisí přirozeně s technologickým pokrokem naší civilizace, vždyť právě nutnost porozumět funkci tepelných strojů vedla k obrovskému rozmachu poznatků v oblasti termodynamiky a ke zdokonalení měření teploty. Důkazem toho, že se stále jedná o rozvíjející se obor, svědčí nejen neustálá snaha o menší nejistoty měření a speciální případy, jako měření teploty v nanoměřítku, ale také nedávná redefinice mezinárodní soustavy jednotek fyzikálních veličin SI, ve které byla hodnota Boltzmannovy konstanty k zafixována na pevné hodnotě $k = 1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$. Díky tomu je nyní možné etalon teploty v principu vytvořit různými metodami pomocí dostupných fyzikálních postupů za využití takto definované hodnoty Boltzmannovy konstanty.

Tato práce se týká primární realizace jednotky termodynamické teploty Kelvin pomocí Johnsonova šumu, proto se úvodem v podkapitole 1.2 zabýváme stručnou historií termometrie, v podkapitole 1.3 definicí jednotky Kelvin a v podkapitole 1.4 Johnsonovým šumem a jeho využitím pro teploměr.

Závěrem uvádíme, že popis základů termodynamiky, kinetické teorie, případně pokročilejších aspektů v rámci kvantové termodynamiky, jsou však nad rámec tohoto úvodu, čtenáře tak laskavě odkazujeme na další literaturu.

1.2. Stručná historie termometrie

Vybrané důležité historické momenty vývoje měření teploty od raného období velmi stručně shrnuje následující výčet¹, který čerpá zejména z publikace *The foundations of thermometry* [1].

- Zajímavý pokus o vytvoření jednoduchého teplotního etalonu náleží starověkému lékaři Galénovi, který navrhl jak obdržet jím označovanou tzv. „neutrální“ teplotu smícháním stejného podílu vařící vody a ledu [1].

¹Podrobný historický vývoj měření teploty a vývoje teploměrů je velmi zajímavý, ale není jej možné obsáhnout v celé šíři v rámci tohoto výkladu, který slouží pro zasazení naší výzkumné práce do širších souvislostí.



- Vyhne se dlouhé diskusi, komu patří prvenství za vynález prvního, ne příliš dokonalého, teploměru a přeskočíme tak příspěvky mnoha slavných vědců, mezi které patří např. Galileo Galilei díky jeho vzduchovému teploměru. Každopádně velký pokrok ve vývoji prvních teploměrů byl učiněn ve Florencii v první polovině 17. století, kdy se podařilo vytvořit první citlivé teploměry díky umu tamních řemeslníků, kteří vytvořili skleněné uzavřené teploměry plněné alkoholem se stupnicí [1].
- V Anglii Robert Hooke dříve zmíněný teploměr navržený ve Florencii pozměnil a navrhl teplotní stupnici, ve které každý stupeň odpovídá změně přibližně 1/500 objemu kapaliny teploměru. Ve druhé polovině 17. století byla tato teplotní škála rozšířena na další teploměry, které byly kalibrovány vůči originálnímu teploměru (etalon, známý jako *Standard of Gresham College*) ve vlastnictví Královské společnosti v Londýně [1]. V roce 1665 Hook, Boyle a Huygens navrhli vzít jeden pevný teplotní bod, jako např. bod tuhnutí, nebo bod varu vody, jako počáteční bod teplotní stupnice, o něco později bylo navrženo využívat dva fixní teplotní body a dělení intervalu mezi nimi, a to např. Newtonem, Halleyem nebo Roemerem [2]. Je vhodné zdůraznit, že samotné využití pevných teplotních bodů a jejich definice je netriviální, a ačkoliv se to dnes zdá přirozené, ve své době bylo zkoumání a definování pevných teplotních bodů důležitým počinem, koneckonců bližší objasnění vztahu skupenské přeměny, dodaného tepla a změny teploty, podal až Black v roce 1757 [2]. Daniel Gabriel Fahrenheit vytvořil jako první spolehlivý skleněný teploměr využívající rtuť jako náplň a v roce 1724 publikoval teplotní stupnici, která byla založena na dělení intervalu mezi dvěma pevnými teplotními body (tělesná teplota a bod tuhnutí vody) [1]. Na podobných principech vznikly také další teplotní stupnice, nebudeme je ale zde zmiňovat všechny, uvedeme jen stupnici Celsiovu, kdy Celsiův teploměr byl popsán v roce 1742 a založen na rozdělení teplotního intervalu mezi bodem tuhnutí a varu vody na sto díly, ovšem původně opačným způsobem (tj. bod varu byl označen jako nula stupňů, bod tuhnutí jako sto), ovšem rychle došlo ke změně na stupnici, jakou známe dnes [2].
- Kolem roku 1701 Guillaume Amontons objevil, že tepelná roztažnost vzduchu je překvapivě stejnoměrná, zjistil totiž, že pokud se vzduch při stálém objemu zahřeje z nižší teploty na bod varu vody, tak tlak naroste asi o jednu třetinu, a to ať je počáteční tlak vzduchu jakýkoli. Z tohoto faktu Amontons usoudil, že stejnému nárůstu, nebo poklesu teploty bude tlak plynu zvýšen nebo zmenšen o stejný podíl tlaku v libovolném bodě. Proto Amontons navrhl teplotní škálu založenou na jednom pevném bodě (bod varu vody) s teplotními stupni určenými úměrnému zvětšení, nebo zmenšení tlaku daného objemu vzduchu z dané počáteční teploty. Antonius tak učinil důležitý závěr, že díky extrapolaci je možné usoudit, že za nulové teploty na takto definované škále by byl tlak vzduchu nulový, Amontons usoudil, že tuto teplotu je možné považovat za absolutní nulu „obsahu tepla nebo intenzity tepla“. Avšak vědci v této době byli skeptičtí vůči takovému závěru a tak návrh absolutní teplotní stupnice zůstal prakticky ignorován. Později byla Amontonova pozorování chování vzduchu znovuobjevena a zobecněna také pro jiné plyny. Směrem k polovině 19. století byla tato práce o plynech spojena s Kelvinem a Clausiem s nezávislým vývojem termodynamiky, který také vyústil ve absolutní nulovou teplotu [2].
- Některé moderní metody měření teploty a také např. využití trojného bodu vody popíšeme v následujícím textu, ve kterém také znovu zmíníme pojem termodynamické teploty. Ke stručnému historickému vývoji ještě závěrem poznamenáme, že právě rozvoj termometrie umožnil rozvoj termodynamiky, kalorimetrie a dalších oblastí. Pro ještě detailnější rozbor vývoje termometrie doporučujeme dříve citovanou literaturu, případně publikaci *The development of thermometry and the temperature concept* [3] nebo knihu *A history of the thermometer and its use in meteorology* [4].



1.3. Realizace a měření termodynamické teploty, Boltzmannova konstanta a ITS

1.3.1. Realizace a měření termodynamické teploty

Díky Williemu Thomsonovi, který byl titulovaný jako Lord Kelvin, došlo v 19. století k dalšímu průlomům v porozumění pojmu teploty. Kelvin upozornil na to, že pro Carnotův cyklus ideálního tepelného stroje, je poměr dodaného tepla Q_1 (absorbovaného z ohříváče o teplotě T_1) vůči odevzdanému teplu Q_2 (odevzdaného chladiči o teplotě T_2) následující:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Teploty T_1 a T_2 jsou termodynamické (absolutní) teploty. Tento vztah platí pro vratný Carnotův cyklus a je nezávislý na vykonané práci a na pracovní látce [5]. Pokud vezmeme v potaz závěry, ke kterým došel již Guillaume Amontons (viz předchozí podkapitola), které ve dnešní době známe v podobě stavové rovnice ideálního plynu

$$pV = NkT,$$

kde p je tlak, V objem plynu, N počet částic, k Boltzmannova konstanta a T termodynamická teplota, tak nám pro definici termodynamické teploty, vzhledem k linearitě této teplotní stupnice a jednomu známému nulovému bodu (absolutní nula), stačí pouze jeden další referenční bod. V roce 1954 představila desátá Generální konference pro míry a váhy (*General Conference on Weights and Measures - CGPM*) koncept definování termodynamické teplotní stupnice a nový symbol pro jednotku termodynamické teploty, tento koncept byl poté dále vylepšen v roce 1967 na třinácté konferenci CGPM [5]. V rámci definice absolutní termodynamické teplotní stupnice se tak dnes jako jednotka používá kelvin označený symbolem K. Jako referenční bod byl historicky definován trojný bod vody o přesné teplotě 273,16 K. Jeden kelvin pak byl ještě donedávna přesně definován jako zlomek $1/273,16$ termodynamické teploty trojného bodu vody. Jak je patrné např. z již dříve zmíněné stavové rovnice ideálního plynu, byla touto definicí termodynamické teploty zavedena Boltzmannova konstanta, která spolu s teplotou udává charakteristickou energii tepelného pohybu částic. V současnosti, dle nejnovější redefinice jednotek SI, fixujeme pevně hodnotu Boltzmannovy konstanty a kelvin určujeme pomocí ní, viz podkapitola 1.3.2. Zadefinovaná teplota trojného bodu vody se však v rámci kontinuity nijak nezměnila [6].

Typy teploměru, u nichž může být dán základní vztah mezi měřenou veličinou a termodynamickou teplotou přímo, bez nutnosti neznámých, na teplotě závislých konstant, jsou obecně označovány jako primární teploměry [5]. Termodynamická teplota může být přesně určena například pomocí následujících primárních metod:

a) S využitím plynových teploměrů.

- K plynovým teploměrům patří např. dříve zmíněný teploměr Amontonsse. Metoda plyné termometrie za konstantního objemu byla, a je, velmi častou metodou, proto se jí budeme více věnovat. Metoda využívá stavové rovnice ideálního plynu pro určení teploty (případně mírně upravené verze této rovnice pro reálný plyn; dalšími metodami plynocími ze stavové rovnice jsou pak z principu metoda konstantního tlaku nebo konstantní teploty, ale dnes se využívá primárně metoda konstantního objemu pro nejnižší nejistoty v porovnání s dalšími zmíněnými metodami [5]). Mnoho plynů se svými vlastnostmi dosti blíží plynu ideálnímu, jako plyn v plynovém teploměru se využívá většinou helium, protože je svými vlastnostmi nejvíce vhodné (vnitřní energie by měla být nezávislá na vzdálenosti molekul/atomů plynu). Například využití oxidu uhličitého není vhodné. Navíc je praktické snížit tlak plynu, protože se potom běžné plyny ještě více blíží plynu ideálnímu [7]. Odchylka skutečných plynů od plynu reálného je jedním z největších problémů tohoto druhu termometrie.



Mezi další zdroje nejistot patří např. to, že samotné tělo plynových teploměrů má určitou teplotní roztažnost, nutnost čistoty plynu nebo adsorpce plynu na stěny, respektive možná desorpce plynu při vyšších teplotách. Primární termometrie pomocí plynových teploměrů pak může být prováděna dvěma metodami, buď absolutní nebo relativní pV -izotermální plynovou termometrií za konstantního objemu. Při absolutní metodě se naplňuje teploměr za konstantní, ale neznámé teploty T , různými množstvími plynu pro dosažení různých tlaků, ze změřených izoterm a známého množství plynu (např. zjištěného např. metodou gravimetrie) je poté možné zjistit jednoznačně neznámou teplotu T . Užití relativní metody spočívá ve měření stejného množství daného plynu za konstantního objemu, ovšem jednou za neznámé a podruhé za známé teploty (jako známá teplota může být výhodně volena teplota trojného bodu vody), využitím stavové rovnice je poté možné snadno určit neznámou teplotu [5]. Měření plynovým teploměrem za konstantního objemu byla využita také pro zavedení mezinárodní stupnice ITS-90 [8, 9] (více o mezinárodních teplotních stupnicích viz následující text).

- Dalším typem plynové termometrie je akustická termometrie, která stanovuje teplotu pomocí závislosti rychlosti zvuku v plynu a teploty. Pro ideální plyn je tento vztah pro rychlost vzduchu c_{ideal} závislejší na termodynamické teplotě T následující

$$c_{\text{ideal}} = \sqrt{\frac{\gamma \cdot k \cdot T}{m}}$$

kde k je Boltzmannova konstanta, m je hmotnost jedné molekuly, γ je Poissonova konstanta (adiabatický index). Zatímco dříve se pro akustickou termometrii využívaly válcové interferometry s pevnou frekvencí zvuku a proměnnou délkou, dnes se upřednostňují neměnné sférické rezonátory s proměnnou frekvencí zvuku [5].

- Dalším typem plynové termometrie je pak termometrie s využitím znalosti dielektrické konstanty ideálního plynu v kondenzátoru. Základní myšlenkou této techniky je vyjádřit hustotu částic ve stavové rovnici ideálního plynu (již dříve uvedená rovnice, nyní ve tvaru $p = nkT$, kde n je hustota částic) využitím permitivity, která je pro ideální plyn dána vzhledem $\varepsilon = \varepsilon_0 + \alpha n$, kde ε_0 je přesně známá permitivita vakua, α je polarizovatelnost molekul a n je hustota částic [5]. Touto cestou je možné získat rovnici ideálního plynu ve tvaru $p = kT(\varepsilon - \varepsilon_0)/\alpha$ [5]. Vztah permitivity a hustoty ideálního plynu je možné získat díky Clausius-Mossottiově rovnici, která má podobu [10]

$$\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} = \frac{n \alpha}{3 \varepsilon_0},$$

kde $\varepsilon_r = \varepsilon/\varepsilon_0$ je relativní permitivita materiálu za daného tlaku a teploty, ε_0 je permitivita vakua, n je hustota částic (počet na metr krychlový) a α je molekulární polarizabilita (jednotka $\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{V}$).

- Spektroskopické metody, např. laserová absorpční spektroskopie, byly již také otestovány za účelem primární termometrie, viz [11, 12].

b) S využitím magnetických teploměrů. V tomto případě se teplota vyhodnocuje z charakteristického členu (obsahujícího teplotu) $\exp(-\Delta E/kT)$ Boltzmannova rozdělení detekováním variací populace elektronových a jaderných energiových hladin, ideálně těch s rozdílem energií $\Delta E = \mu B$, kde μ je magnetický moment a B je magnetická indukce [5].

c) Radiační termometrie. Tento druh termometrie se využívá ve dvou podobách, a to jako spektrální termometrie (s využitím Planckova vyzařovacího zákona) a totální termometrie (totální výkon vyzařovaný

	Český metrologický institut Oblastní inspektorát Brno	Zpráva úkolu TR č. 6014-TR-Z0002-21	Počet příloh: 1 Počet listů: 8/54
--	---	---	--------------------------------------

černým tělesem s určitou teplotou vystihuje Stefan–Boltzmannův zákon). Spektrální radiační termometrie je specifikována v mezinárodní stupnici ITS-90 (viz další text) pro měření neomezeně vysokých teplot, kdy se hodnoty teplot určují relativně vůči vyzařování černého tělesa na nějaké referenční teplotě, ITS-90 má tuto relativní teplotu zvolenu jako bod tuhnutí stříbra, zlata, nebo mědi. Přes náročnost tohoto měření, je metoda radiační termometrie velmi užitečná [13].

d) Šumová termometrie. Tato metoda spočívá v měření Johnsonova tepelného šumu, věnuje se jí tato práce a metoda je blíže popsána v části 1.4.

1.3.2. Boltzmannova konstanta

Ohledně stanovení Boltzmannovy konstanty k zmíníme aktuální stav a nebudeme se zabývat různými historickými a přehledovými aspekty stanovení k , které je možné dohledat např. zde [14]. Z hlediska nejnovějšího vývoje a současného stavu je nutné zdůraznit, že v rámci redefinice jednotek SI, která vstoupila v platnost v roce 2019, došlo k fixaci hodnoty Boltzmannovy konstanty na pevné hodnotě $k = 1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$. Tím pádem je jednotka kelvin určena právě s využitím této známé hodnoty k a souvisejících známých fyzikálních vztahů termální/kinetické energie a teploty v mikrosvětě.

Obecně všechny používané metody stanovení Boltzmannovy konstanty spojuje ten princip, že měření některou z metod primární termometrie (viz část 1.3.1) probíhá za definované teploty trojného bodu vody. Hodnotu k je poté možné určit pomocí známých fyzikálních principů díky známé teplotě, za které měření probíhalo. V rámci nejnovější redefinice bylo třeba zajistit, aby se zamezilo systematickým vlivům na určení k zapříčiněných jednou měřicí technikou, a tedy s touto jedinou technikou souvisejících. Proto doporučila konzultační komise pro termometrii (Consultative Committee for Thermometry CTT) Mezinárodní komise měř a vah (International Committee for Weights and Measures), aby bylo jedno měření jednou technikou s relativní nejistotou menší než 10^{-6} podpořeno druhým měřením nezávislou měřicí technikou. Metodou, kterou je možné volit jako první, je akustická plynová termometrie, která má relativní nejistoty menší, než 10^{-6} [15–18]. Mezi další metody, které dosahují nízkých nejistot měření je termometrie s využitím znalosti dielektrické konstanty plynu [19] nebo Johnsonova šumová termometrie [15], které se věnujeme v této práci. Pro více detailů a přehled hodnot Boltzmannovy konstanty určených z různých měření odkážeme zájemce na článek [6] a první tabulku v tomto článku, případně na článek s názvem *Determinations of the Boltzmann constant* [20] obsahující také vývoj určení hodnoty k .

1.3.3. Mezinárodní teplotní stupnice (ITS)

Obecně je termodynamickou teplotu pomocí primárního teploměru poměrně složité a časově náročné přesně a spolehlivě určovat tak, jak to provádí některé primární laboratoře. Proto byly schváleny mezinárodně uznávané teplotní stupnice (často se setkáváme s pojmem International Temperature Scale, zkratka ITS, v překladu mezinárodní teplotní stupnice) s teplotami na stupnici tak blízko teplotám termodynamickým, jak jen to je možné, aby je bylo možné využít jako dobrou aproximaci teploty termodynamické. Tyto mezinárodní teplotní stupnice jsou definovány pomocí pevných teplotních bodů, tlaku nasycených par některých zkapalněných plynů a teploměřů, se kterými je možné snadno měřit přesně a rovnic, které propojují měření těmito teploměry s teplotní stupnicí [21]. Pomocí těchto stupnic jsou pak prakticky realizována běžná měření teploty, která jsou nezbytná pro průmysl i vědu. Pro ukázkou historického vývoje mezinárodních stupnic uvádíme v tabulce 1 vybrané teplotní body ve třech různých teplotních stupnicích, poznamenejme jen, že moderní, dnes stále využívaná, teplotní stupnice ITS-90 obsahuje daleko více teplotních bodů, než kolik jich pro ilustraci v tabulce uvádíme. Termodynamicky pevné teplotní body jsou jednoduše řečeno fyzikálním stavem určitého systému, ve kterém některé čisté materiály existují ve dvou



nebo více skupenství zároveň a teplota tohoto systému je konstantní [7]. Dříve zmíněný trojný bod vody je jedním z takových bodů, při kterém spolu koexistují tři skupenství (led, voda a vodní pára) za termodynamické rovnováhy a tlak je roven tlaku nasycené páry. Trojfázové teplotní body jsou přesnější, než body dvojfázové.

Tabulka 1: Vybrané pevné teplotní body uvedené v různých mezinárodních teplotních stupnicích [21–24]. Uvedené body varu a tání jsou dané pro tlak 101 325 Pa.

Bod	NHS t [centigrade]	IPTS-68 T [kelvin]	ITS-90 T [kelvin]
Cu tuhnutí			1357,77
Au tuhnutí		1337,58	1337,33
Zn tuhnutí		692,73	692,677
H ₂ O bod varu	100	373,15	
H ₂ O trojný		273,16	273,16
H ₂ O tání	0		
Hg trojný			234,3156
O ₂ trojný		54,361	54,3584

1.4. Johnsonův šum a Johnsonův šumový teploměr

Právě tato metoda je považována za velice slibnou pro budoucí realizace jednotky kelvin, protože se jedná o metodu založenou na čistě elektronickém principu s velkým potenciálem pro zkvalitnění do budoucna díky velmi rychle se vyvíjející oblasti technologií mikroelektronických obvodů. Navíc je tato technologie výhodná pro miniaturizované levné sensory, přičemž vlastní sensory, tvořené v principu pouze kovovými odpory, mohou jednoduše odolávat i vysokým teplotám [6]. Tato metoda byla již zmíněna v přehledu primárních metod pro měření termodynamické teploty v části 1.3.1 a je středobodem výzkumu této práce. Nyní proto představíme jev známý jako Johnsonův šum (označovaný také jako Johnsonův-Nyquistův, tepelný nebo Nyquistův šum [25]) a budeme se také krátce věnovat tomu, jak byl objeven a v jakých souvislostech.

Johnsonův tepelný šum úzce souvisí s Brownovým pohybem, protože je v rámci představ klasické fyziky spojen s náhodným tepelným pohybem elektronů. Brownův pohyb částic mnohdy fyzikální měření ztěžuje [26], u měření elektrických veličin toto bylo pozorováno např. již v případech přesných galvanometrů [27]. Johnsonův šum je pojmenován po Johnovi Bertrandovi Johnsonovi, který během svého působení v Bellových laboratořích publikoval v roce 1927 krátký text v *Nature* s názvem *Thermal Agitation of Electricity in Conductors* [28], což je možné volně přeložit jako *termální fluktuace elektřiny ve vodičích*. Ve stejném roce byl publikován Johnsonův abstrakt ze setkání *American Physical Society*, které proběhlo na sklonku roku 1926, a v roce 1928 byl potom J. B. Johnsonem ve vědeckém časopise *Physical Review* [29] publikován článek se stejným názvem jako ve zmíněném časopise *Nature*, ovšem tentokrát již se jednalo o dlouhé pojednání o statistických fluktuacích elektrického náboje ve všech vodičích, které produkují napětí mezi konci vodiče. Johnsonův článek z roku 1928 o rozsahu třinácti stran již také cituje Nyquistovi teoretické články a rovnice o tepelném šumu [30]. Johnson sám v článku brilantně rozebírá jeho vlastní experimentální zkoumání a úvahy, kdy např. použil jako odpor různé materiály s různými vlastnostmi a elektrickým odporem pro ověření toho, že generované elektrické napětí způsobené tepelným pohybem nosičů náboje závisí při konstantní teplotě lineárně na elektrickém odporu, nebo se dokonce zabýval stanovením Boltzmannovy konstanty pomocí tepelného šumu. Johnson také zmiňuje vliv tepelného pohybu na šum v elektronkových zesilovačích, empirickou zkušenost techniků, že tento šum je větší



s větším ohmickým odporem u telefonních přijímačů, a zmiňuje práci Schottkyho, který ve svém článku již z roku 1918 teoreticky rozebíral právě možnost vlivu tepelného pohybu na zesilovače [31]. Johnson zmiňuje, že další experimenty vedly ke vzorci, který známe dnes, který později odvodil teoreticky H. Nyquist na zcela teoretickém základu [30]. Hlavní výsledek měření zmíněných, a dále rozvedených, v článku Johnsona bylo, že efektivní hodnota tepelných fluktuací napětí na vodiči je úměrná elektrickému odporu a absolutní termodynamické teplotě tohoto vodiče. Efektivní hodnota fluktuací napětí je naopak nezávislá na velikosti, tvaru nebo materiálu vodiče [29]. Využití termálního šumu pro termometrii je teoreticky jednoduché, využívá právě zmíněného poznatku lineární závislosti efektivní hodnoty tepelných fluktuací napětí na vodiči na teplotě, což bylo známo již Johnsonovi. Praktická realizace ovšem bývá složitější, což ukazuje nejen tato práce, ale také mnoho našich předchůdců. Nemůžeme vzpomenout na všechny, ale zmiňme alespoň zajímavou práci provedenou např. na institutu NIST a jiných [32–36]. Johnsonova termometrie se stává atraktivní s rozvojem mikroelektroniky a zesilovačů v nedávné době, což můžeme závěrem demonstrovat počtem článků, které jsou obsaženy v databázi Google Scholar při hledání klíčového slovního spojení „Johnson noise thermometry“, zatímco z roku 1990 v této databázi nalezneme takto pouze dva články, z roku 2005 je to již 24 článků a z roku 2020 je to již článků padesát.



2. POPIS ŘEŠENÍ ÚKOLU

2.1. Princip a návrh šumového teploměru

V současné době je jeden kelvin definován prostřednictvím Boltzmannovy konstanty k zakotvené v nové soustavě SI: $k = 1,380649 \text{ J/K}$. Dřívější definice kelvinu vycházela z teploty trojného bodu vody, který byl definován $T=273,15 \text{ K}$. Při konstrukci teploměru lze bez omezení použít kteroukoli z definic či kombinací obou, protože neočekáváme takovou přesnost, pro kterou by rozdílný přístup mohl mít význam.

Hlavní rozdíl lze spatřovat především při řešení. Dřívější publikace, které se zabývaly měřením Boltzmannovy konstanty, jsou v současné době důležitým zdrojem informací pro stavbu absolutního teploměru. Teplotní měření jsou obecně velmi obtížná, přičemž jedno z nejpřesnějších měření Boltzmannovy konstanty bylo založeno na měření Johnsonova šumu rezistoru.

Tatáž aparatura, která měřila Boltzmannovu konstantu, se pouhou změnou přístupu stala jedním z nejpřesnějších teploměrů světa. Došlo k tomu právě tím, že se změnila definice v soustavě SI. Cílem tohoto projektu je ověřit, zda lze vyrobit šumový teploměr výrazně jednodušší, s nižšími požadavky na přesnost, ale přesto dostatečnými pro některé metrologické aplikace. Využití Johnsonova šumu při měření teploty může představovat mnohé výhody:

1. Odezva šumového teploměru je lineární a lze ji vypočítat ze základních fyzikálních zákonů. Na základě této skutečnosti lze realizovat etalon pro téměř libovolný teplotní bod bez nutnosti použít příslušný přírodní artefakt.
2. Termální šum rezistoru dává do souvislosti teplotu a elektrické veličiny. Tím je možné získat zajímavou možnost kalibrace teploměrů a využít pouze elektrické veličiny, nikoli termální. Například, kdybychom požadovali ověření teplotního měřidla s přesností $0.3 \text{ }^\circ\text{C}$, pak v okolí běžných teplot (300 K) se jedná o relativní chybu 0.1% , což je u elektrických veličin obvykle snadno dostupná přesnost.
3. Teplotní čidlo může s časem změnit svou charakteristiku vlivem stárnutí anebo v důsledku změny provozních podmínek či hrubým zacházením. Drobné poškození čidla navíc může snadno uniknout pozornosti. Naproti tomu šum rezistoru je téměř imunní vůči stárnutí. Závisí pouze na teplotě a odporu, jehož případnou změnu lze vcelku snadno odhalit.
4. Měření teploty pomocí šumu rezistoru lze provést bez zahřívání samotného čidla. Velmi častým senzorem měření teploty je široce používaný platinový teploměr Pt100. Jeho teplotní závislost odporu je dobře známá, takže změření odporu je klíčový parametr pro stanovení teploty. Při měření odporu prochází čidlem proud, který způsobuje jeho zahřívání. Ztrátový výkon $P = RI^2$ může být natolik výrazný, že ovlivní naměřenou teplotu. Naproti tomu rezistor, jehož šum měříme, může mít stejnou teplotu jako měřený objekt, což je velmi výhodné při výzkumu v mikro- a nanoměřítku, kdy zahřívání čidla může zcela znehodnotit měření.
5. V případě zničení teplotního čidla může být náhrada velmi levná. V případě měření šumu rezistoru je čidlem pouhý rezistor, který je pro danou relativní přesnost výrazně levnější, než například Pt100.

Platí, že každý rezistor je zdrojem Johnsonova šumu, jehož výkon lze zapsat vztahem

$$P = 4kT\Delta f$$

kde Δf je šířka frekvenčního pásma. V uvedeném vztahu nevystupuje hodnota rezistoru R , protože výkon na odporu nezávisí. Závisí na něm však příslušné napětí, které lze naměřit na obou vývodech rezistoru.



Platí vztah $P = U^2/R$, a tak šumové napětí můžeme vyjádřit vztahem

$$U = \sqrt{4kTR\Delta f}$$

Je vhodné podotknout, že U představuje efektivní hodnotu šumového napětí. Pro získání představy o velikosti šumového napětí uvažujme rezistor o hodnotě 1 k Ω a teplotě 300 K. Pak lze vypočítat, že napěťová hustota teplotního šumu n_U pro takový rezistor je rovna

$$n_U = 4,07 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$$

Předpokládejme šířku pásma $\Delta f = 100$ kHz. Zmiňovanou šířku pásma v pozdějších úvahách přizpůsobíme podle schopností měřicího zařízení, ale pro začátek lze tuto hodnotu uvažovat. Pak celkové efektivní napětí bude mít úroveň

$$U = \sqrt{4kTR\Delta f} \cdot 1,3 \mu\text{V}$$

Máme-li měřit úroveň šumového napětí s dostatečnou přesností pro stanovení teploty s odchylkou 0,2 °C, což je nejistota platinového teploměru třídy A, pak vyjádříme citlivost napětí na teplotě jako derivaci výše uvedeného vztahu.

$$\frac{dU}{dT} = \sqrt{4kR\Delta f} \cdot T^{-1/2} \cdot \frac{1}{2} = \sqrt{\frac{kR\Delta f}{T}} \cdot 0,2 = 430 \text{ pV}$$

Úkolem je tedy měřit šumové napětí na úrovni přibližně 1,3 nV s přesností 430 pV, což je mimořádně náročný úkol především s ohledem na všudypřítomné elektromagnetické rušení. Šumové napětí je navíc náhodné a je rovnoměrně rozprostřeno přes celou šířku pásma, a proto je obtížné takový signál matematicky izolovat. Nepatrné šumové napětí je nutno před jakýmkoli zpracováním nejprve zesílit vhodným zesilovačem, u kterého se vždy jeho vlastní šum přidává k šumu rezistoru.

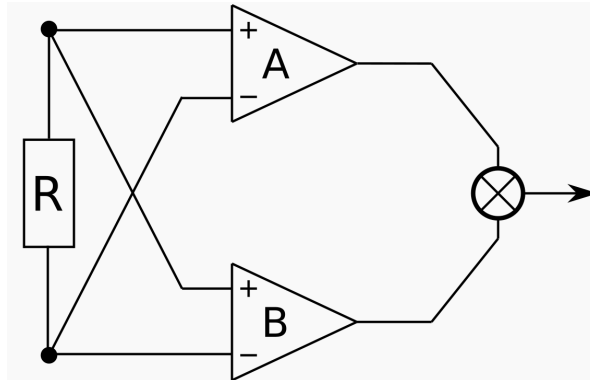
Existuje několik variant šumových teploměrů, které je vhodné podrobněji rozebrat. Můžeme rozlišovat zesilovače podle vstupních tranzistorů na unipolární nebo bipolární. Dále můžeme uvažovat počet zesilovačů – buď jeden nebo dva, případně více.

Také lze u šumových teploměrů rozlišovat mezi třemi variantami:

- Teploměr zcela absolutní. Jedná se o zařízení, které obsahuje vlastní umělý zdroj referenčního šumu, který má přesné parametry a který se porovnává se šumem rezistoru. Toto uspořádání bylo použito například v laboratořích NIST při velmi přesném měření Boltzmannovy konstanty. Po zaktování Boltzmannovy konstanty v soustavě SI lze tímto principem realizovat jeden Kelvin přímo z fyzikálních zákonů, bez použití jakéhokoli fixního teplotního bodu, například trojného bodu vody.
- Teploměr, jehož šumová odezva je lineární v závislosti na teplotě, přičemž při absolutní nule by úroveň šumu byla teoreticky nulová. Konstantu úměrnosti je nejprve nutno zjistit pomocí fixního teplotního bodu.
- Teploměr, jehož šumová odezva je lineární v závislosti na teplotě, ale při absolutní nule dává nenulový signál. Pro kalibraci je nutno použít dva teplotní body.

Dále platí, že absolutní nulu lze simulovat tím, že snímací rezistor zkratujeme.

Lineární odezvu splňují všechny zmiňované druhy teploměrů. Zkonstruovat první variantu, tj. zcela absolutní teploměr, by znamenalo sestavit kalibrovaný zdroj bílého šumu. Přestože byly provedeny počáteční kroky k výrobě takového šumového generátoru, bude praktičtější se soustředit na druhou variantu, která vyžaduje jeden fixní teplotní bod a ten lze realizovat snadno dostupnou ledovou tříští anebo jiným vhodným způsobem.



Obrázek 1: Schéma korelátoru, který je založen na dvou nezávislých zesilovačích, jejichž vstupy měří tentýž šum rezistoru. Lze ukázat, že po vynásobení výstupů mezi sebou vyjde střední hodnota nezávislá na šumu jednotlivých zesilovačů.

Tato varianta spoléhá na dvoukanálové měření, které umožňuje matematicky eliminovat vlastní šum zesilovačů. Principem je, že šum ze snímacího rezistoru je přiveden současně do dvou zesilovačů, přičemž tyto zesilovače označme písmeny A a B . Schéma je znázorněno na obrázku 1. Zavedme tyto veličiny:

- $n(t)$... šum snímacího rezistoru
- $n_A(t)$... šum zesilovače A
- $n_B(t)$... šum zesilovače B
- A_A ... zesílení zesilovače A
- A_B ... zesílení zesilovače B

Platí, že na výstupu zesilovače A naměříme šum rezistoru, ke kterému je přičten šum zesilovače a vše je zesíleno konstantou A_A :

$$A_A (n(t) + n_A(t))$$

obdobně uvažujme o zesilovači B :

$$A_B (n(t) + n_B(t))$$

a jestliže tyto dva signály vynásobíme, je výsledkem

$$A_A (n(t) + n_A(t)) \cdot A_B (n(t) + n_B(t)) = A_A A_B (n^2(t) + n_A(t) n(t) + n_B(t) n(t) + n_A(t) n_B(t))$$

Zásadní zjištění je, že pouze první člen, a to $n^2(t)$ má nenulovou střední hodnotu. Pouze tento člen je součin dvou stejných šumů. Ostatní členy jsou součiny vždy dvou různých šumů a jejich střední hodnota je nulová. Střední hodnota celého součinu závisí pouze na šumu rezistoru, což je velmi důležité. Vlastní šumy zesilovačů je možné tímto postupem eliminovat, ale přitom jejich zesílení význam má a na celkovém výstupu se projeví. Pro zpracování je tedy zásadní vypočítat střední hodnotu

$$A_A A_B n^2(t)$$

Další velmi užitečnou skutečností je to, že při vyjádření šumového napětí rezistoru máme na mysli *efektivní hodnotu* (RMS – root mean square), kterou lze pro digitalizovaný záznam zapsat jako

$$x_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} \Rightarrow x_{\text{RMS}}^2 = \frac{1}{n} (x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)$$



A jak je uvedeno výše, druhá mocnina efektivní hodnoty je úměrná absolutní teplotě. Platí tedy závěr, který je hlavním principem celé metody:

Střední hodnota součinu z obou zesilovačů je přímo úměrná absolutní teplotě.

Popsaná metoda, kdy zkoumaný signál zavedeme do dvou zesilovačů současně, pak jejich výstupy vynásobíme a hledáme střední hodnotu, se často nazývá *korelace* a příslušný elektronický obvod pak *korelátor*.

2.1.1. Platinové teploměry a přesnost měření

Při návrhu nového typu teploměru je vhodné mít na mysli stávající metody měření teploty a obvyklé požadavky na přesnost. V technické praxi se velmi často používají platinové teploměry (např. Pt100), jejichž princip je založen na teplotní závislosti jejich elektrického odporu.

Jejich použití je široké od nenáročných aplikací až po metrologická porovnání. Při kalibracích je běžnou situací, kdy se jeden platinový teploměr kalibruje pomocí jiného, přesnějšího, platinového teploměru.

Závislost elektrického odporu platiny na teplotě je nelineární, přičemž tuto závislost nelze odvodit ze základních fyzikálních principů, a proto je kalibrační křivka získána empiricky.

V mezinárodní teplotní stupnici ITS z roku 1990 je ustanovena sada koeficientů polynomů devátého až patnáctého stupně, které umožňují přepočítání změny elektrického odporu čisté platiny na teplotu a naopak. Koeficienty jsou uvedeny v tabulce 3 a výpočet teploty se provádí podle dvou vzorců, do kterých vstupuje hodnota W_R , což je poměr naměřeného odporu a odporu při teplotě 0°C . Pro záporné a kladné teploty – myšleno v Celsiově stupnici – se používají dva odlišné vzorce. Platí, že pro $W_R < 0$ vyjde teplota pod teplotou 0°C a používá se vzorec

$$T_{90} = D_0 + \sum_{i=1}^9 ((W_R - 2,64) / 1,64)^i + 273,15 \quad \text{K}$$

Zatímco pro $W_R > 0$ platí vztah následující

$$T_{90} = \left(B_0 + \sum_{i=1}^{15} B_i \left(((W_R)^{1/6} - 0,65) / 0,35 \right)^i \right) \cdot 273,16 \quad \text{K}$$

a vychází pak teplota vyšší než 0°C .

Tyto vztahy jsou natolik komplikované, že se v řadě případů používá některá ze zjednodušujících verzí, kterých existuje mnoho. V jednoúčelových zařízeních pro měření teploty bývá zabudovaný jen laciný procesor s omezenou výpočetní kapacitou a v technické praxi bývá postačující jen polynom třetího stupně podle Callendar – Van Dussena. Koeficienty pro tento polynom je nutno zjistit empiricky, získat od výrobce platinového teploměru anebo použít jejich nejčastější hodnoty.

Platinová čidla nejsou vyrobena z dokonale čisté platiny, což ovlivňuje jejich charakteristiku. Nejen materiál, ale též i samotná konstrukce čidla má vliv na přesnost v důsledku vnitřního pnutí či přítomnosti substrátu v případě tenkovrstvých čidel.

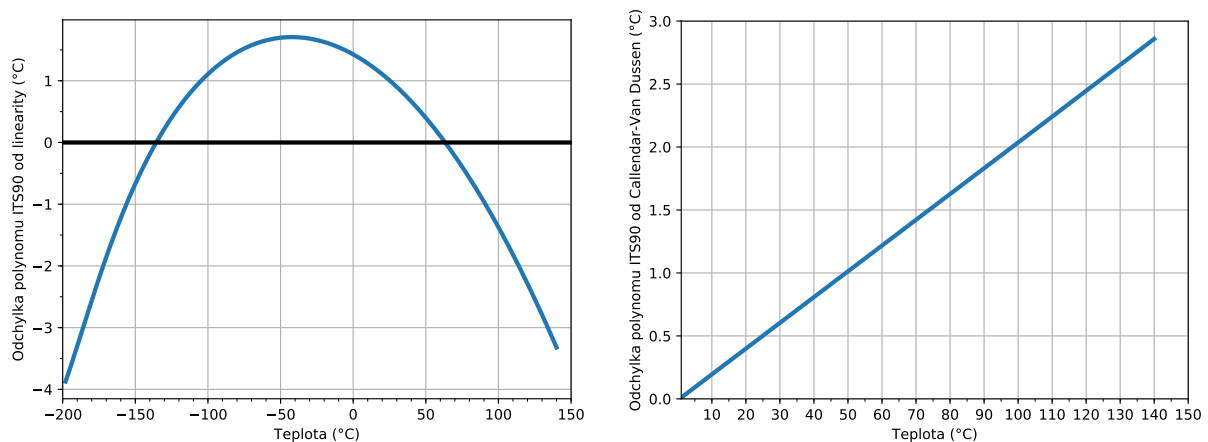
Existuje několik tříd přesnosti pro platinová čidla, přičemž nejčastěji používané jsou třídy A a B. Přesnější z nich, třída A, má toleranci uváděnou vztahem

$$0,15 + 0,0002|t|$$

což znamená, že nejnižší odchylka bude naměřena při teplotě 0 °C, a to 0,15 °C. Při změně teploty na kteroukoli stranu od 0 °C odchylka narůstá. Například pro teplotu 140 °C, což je horní hranice námi použité kalibrační pece, činí již 0,43 °C.

Na levém grafu na obrázku 2 je vynesena polynom pro rezistivitu platiny v souladu s ITS90 s odečtením lineárního trendu. Graf tedy zvýrazňuje nelinearitu teploměru a je zřejmé, že pro kalibraci je zapotřebí několik teplotních bodů, jistě mnohem více než dva krajní. Na pravém grafu je znázorněna odchylka mezi dvěma polynomy pro přepočtení rezistance na teplotu. Jeden z nich vychází z mezinárodní teplotní stupnice ITS 90 a využívá hodnoty z tabulky 3 a od něj je odečten běžně užívaný polynom podle Callendar – Van Dussena. Teplotní rozdíl obou metod je až zarážející, a vede k podezření na hrubou chybu při výpočtu $T(R)$. Pro kontrolu byl vypočten i zcela nezávislý inverzní vzorec $R(T)$ pro ITS 90, který taktéž vychází z tabulky 3, ale z jiných sloupců. Pomocí programu bylo ověřeno, že funkce $T(R(T))$ i $R(T(R))$ vracejí vždy stejnou hodnotu a omyl je takřka vyloučen. Ověřena byla i správnost Callendar – Van Dussenova vztahu. Na internetu je bezpočet tabulek a appletů, které vycházejí ze zmiňovaného vztahu a hrubá chyba by byla snadno odhalena.

Vše nasvědčuje tomu, že pravý graf na obrázku 2 je správně.



Obrázek 2: Levý graf představuje nelinearitu rezistivity platiny na teplotě v intervalu od teploty kapalného dusíku až po 150 °C. Pravý graf ukazuje odchylku polynomu ITS-90 od běžného polynomu Callendar – Van Dussena.

Z výše uvedeného rozboru vyplývá několik závěrů:

- Je třeba věnovat velkou pozornost třídám přesnosti a přepočtením vztahům.
- Platinové čidlo nelze použít jako absolutní teploměr, jehož princip by vycházel ze základních fyzikálních zákonů.
- Platinové čidlo má nelineární charakteristiku. Interpolace či extrapolace opět nemá žádnou oporu ve fyzikálních zákonech.
- U jednoduchých zařízení, u kterých nemáme kontrolu nad výpočtním algoritmem, může být velmi obtížné nahradit poškozené čidlo novým.
- U platinového teploměru nelze bez kalibrace odhalit změnu charakteristiky, která může nastat vlivem stárnutí, extrémních teplot, kontaminací, provozu v agresivním prostředí, hrubým zacházením apod.



Pokud by se podařilo zkonstruovat teploměr, který by byl absolutní, ověřitelný ze základních fyzikálních principů a jehož nejistota by činila několik desetin stupně Celsia, může takové zařízení nalézt své uplatnění.

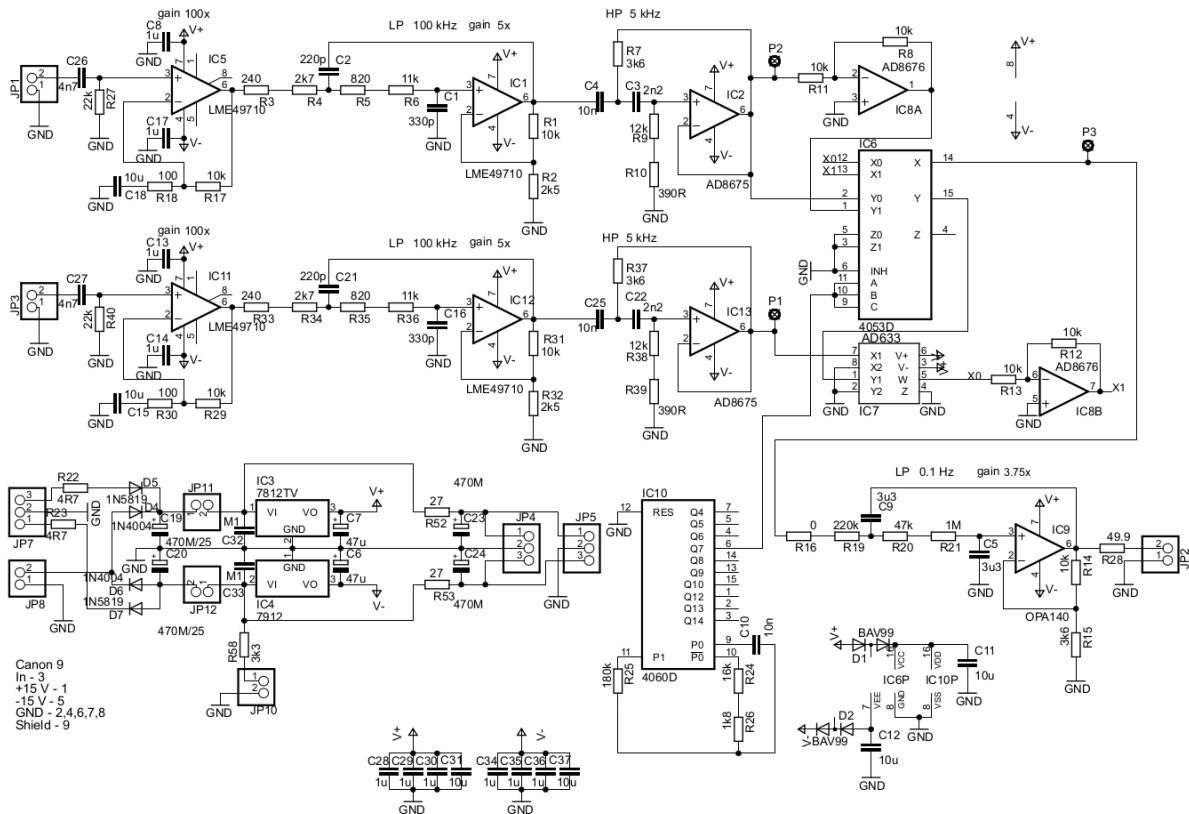
Table 3. Coefficients for the ITS-90 reference functions and approximate inverse functions.

Reference Function Coefficients for $T_{90} \leq 273.16$ K		Approximate Inverse Function Coefficients for $T_{90} \leq 273.16$ K		Reference Function Coefficients for $T_{90} \geq 273.15$ K		Approximate Inverse Function Coefficients for $T_{90} \geq 273.15$ K	
A_0	-2.135 347 29	B_0	0.183 324 722	C_0	2.781 572 54	D_0	439.932 854
A_1	3.183 247 20	B_1	0.240 975 303	C_1	1.646 509 16	D_1	472.418 020
A_2	-1.801 435 97	B_2	0.209 108 771	C_2	-0.137 143 90	D_2	37.684 494
A_3	0.717 272 04	B_3	0.190 439 972	C_3	-0.006 497 67	D_3	7.472 018
A_4	0.503 440 27	B_4	0.142 648 498	C_4	-0.002 344 44	D_4	2.920 828
A_5	-0.618 993 95	B_5	0.077 993 465	C_5	0.005 118 68	D_5	0.005 184
A_6	-0.053 323 22	B_6	0.012 475 611	C_6	0.001 879 82	D_6	-0.963 864
A_7	0.280 213 62	B_7	-0.032 267 127	C_7	-0.002 044 72	D_7	-0.188 732
A_8	0.107 152 24	B_8	-0.075 291 522	C_8	-0.000 461 22	D_8	0.191 203
A_9	-0.293 028 65	B_9	-0.056 470 670	C_9	0.000 457 24	D_9	0.049 025
A_{10}	0.044 598 72	B_{10}	0.076 201 285				
A_{11}	0.118 686 32	B_{11}	0.123 893 204				
A_{12}	-0.052 481 34	B_{12}	-0.029 201 193				
		B_{13}	-0.091 173 542				
		B_{14}	0.001 317 696				
		B_{15}	0.026 025 526				

Obrázek 3: Tabulka koeficientů pro polynomy vyjadřující závislost rezistivity platiny na teplotě

2.2. Analogový korelátor

Jedna z prvních verzí, která byla sestavena v roce 2019 v rámci projektu ÚTR 1011-TR-U0001-11 *Implementace metod souvisejících s novou soustavou SI při měření teploty ve vysokém rozlišení*, představovala kompletní aparaturu pro měření teploty pomocí šumu rezistoru, přičemž celý obvod nevyžadoval žádné dodatečné numerické zpracování a pro jeho použití nebyl nutný řídicí počítač. Schéma dvoukanálového zesilovače a následného analogového korelátoru je zakresleno na obr. 4 a vyrobený obvod ve stínících krabičkách je vyfotografován na obr. 6. Prvním stupněm obou zesilovačů je nízkošumový audio zesilovač LME49710 s velmi nízkým zkráslením, které zaručovalo dostatečnou linearitu obvodu. Oba zesílené signály byly přivedeny do analogového násobiče AD633. Z matematického rozboru vyplývá, že po vynásobení je potřeba zjistit střední hodnotu signálu, což v analogové verzi zajišťoval RC člen představující dolní propust. Teoreticky by mohlo platit, že výstupní stejnosměrné napětí je přímo úměrné termodynamické teplotě rezistoru.

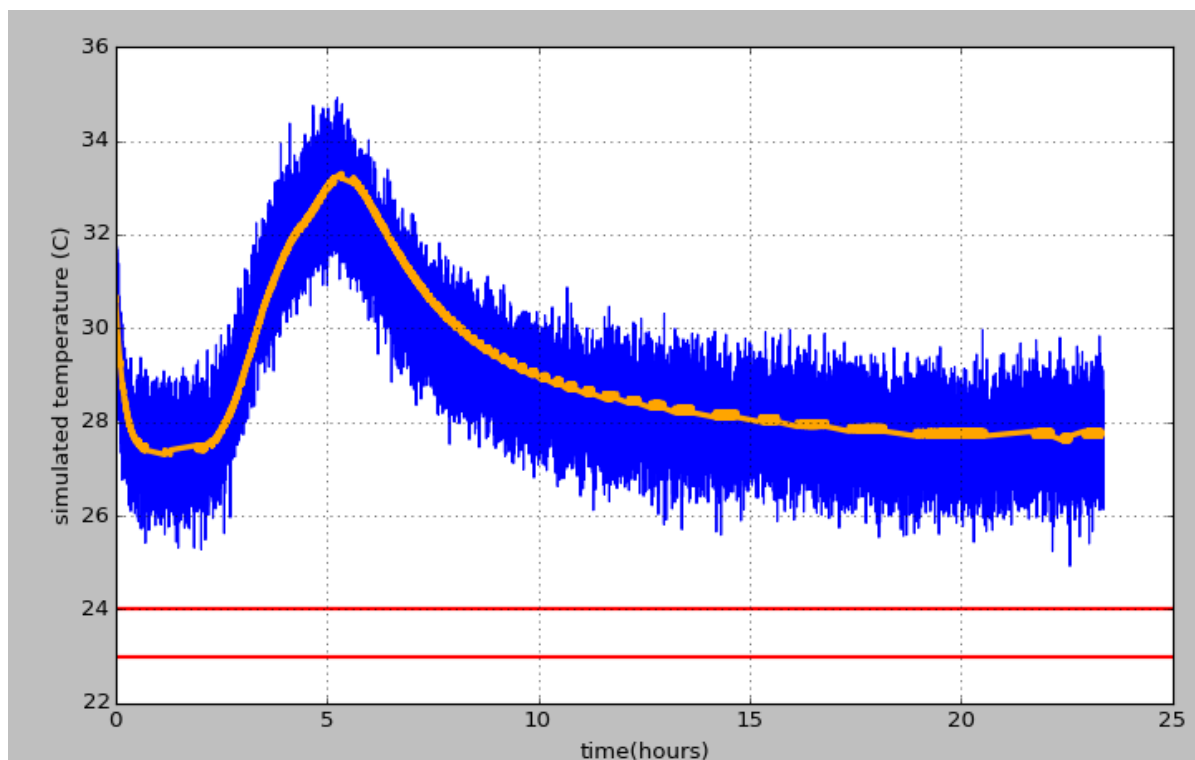


Obrázek 4: Schéma jedné z prvních verzí šumového teploměru. Na schématu jsou patrné dva nezávislé zesilovače na základě obvodů LME49710. Zesílené signály prochází pásmovými propustmi a následně jsou přivedeny do analogové násobičky. Vynásobené signály jsou filtrovány RC členem, který představuje dolní propust.

Následoval jeden z prvních testů, který měl za cíl zjistit, zda obvod reaguje na teplotu snímacího rezistoru. Reálná teplota byla měřena digitálním teploměrem Papouch a současně se zaznamenávala úroveň napětí. Získaná data jsou vynesena na grafu 5. Úroveň šumu byla naškálována tak, aby teplota korespondovala s referenčním teploměrem. Obvod byl velmi náchylný na všechny zdroje rušení, a tak bylo celé zařízení uzavřeno do stínícího kovového boxu a napájeno z baterií. Velmi primitivním způsobem se podařilo docílit změny teploty rezistoru – jedna stěna boxu byla zvenčí mírně zahřívána, čímž se teplo přeneslo i na rezistor

umístěný vevnitř.

Mnoho jiných možností nepřípadalo v úvahu, protože připojení jakéhokoli dalšího vodiče či elektroniky způsobilo znehodnocení dat v důsledku rušení. Experiment ukázal, že zařízení skutečně reaguje na teplotu a vypočtené hodnoty korespondují s referenčním teploměrem.



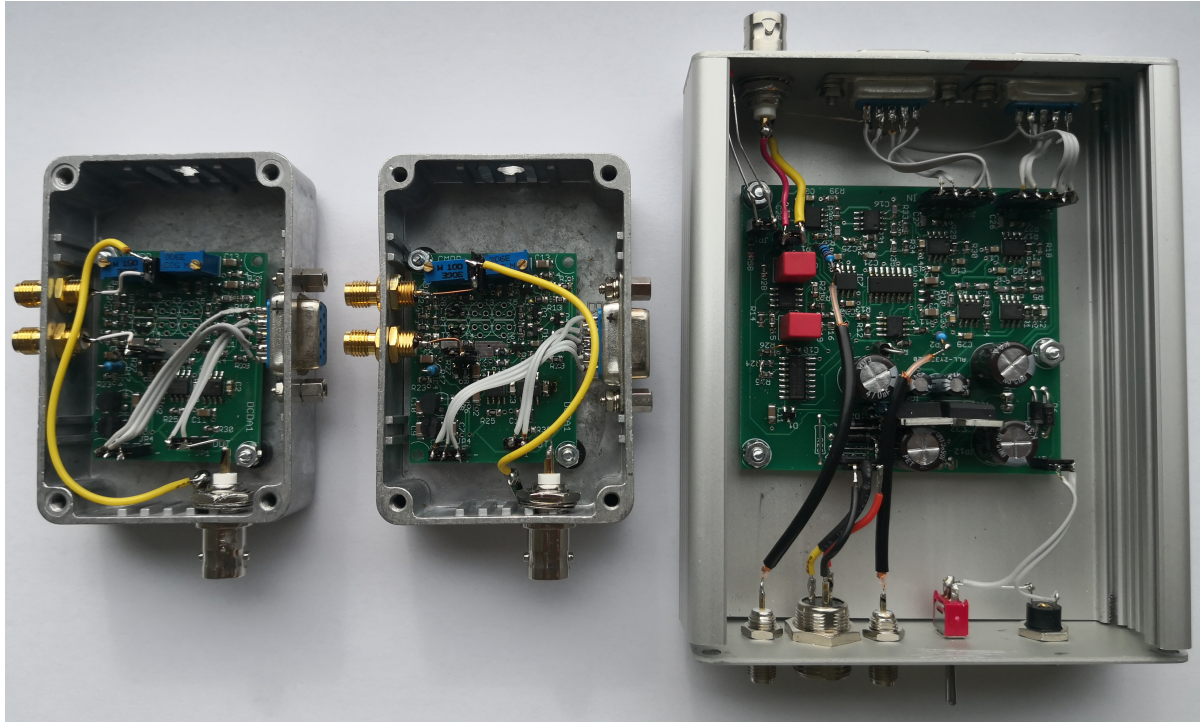
Obrázek 5: Verze teploměru s analogovým korelátorem úspěšně reagovala na teplotu snímacího rezistoru. Časová závislost teploty je naměřena dvěma senzory – pomocí šumu rezistoru (modrá křivka) a pomocí nezávislého teploměru Papouch (oranžová křivka).

Další experiment měl za cíl zjistit, jak souvisí nejistota teploty s dobou měření. Lze očekávat, že průměr z více dat povede k lepší přesnosti. V následující tabulce jsou uvedeny výsledky testu konvergence:

počet dat	integrační doba	nejistota (°C)
64	56 sekund	0,19
128	1m:52s	0,15
256	3m:45s	0,12
1024	7,5 minut	0,088
2048	15 minut	0,077
4096	30 minut	0,063
8192	1 hodina	0,056
16384	2 hodiny	0,048
32768	4 hodiny	N.A.

Nejistota měření poklesla po dvou hodinách testu na 48 milikelvinů. Bylo by možné provést další, podrobnější měření, ale obvod se často choval velmi nepředvídatelně a byl velmi náchylný na mnohá rušení,

přičemž tato nedostatečná odolnost znemožnila řadu experimentů. Proto se ukázalo jako vhodnější raději vyrobit novou verzi teploměru namísto pečlivější analýzy stávajícího. Prvotní výsledky přesto mohou být i povzbudivé. Stabilita 48 milikelvinů může být pro řadu aplikací dostačující.

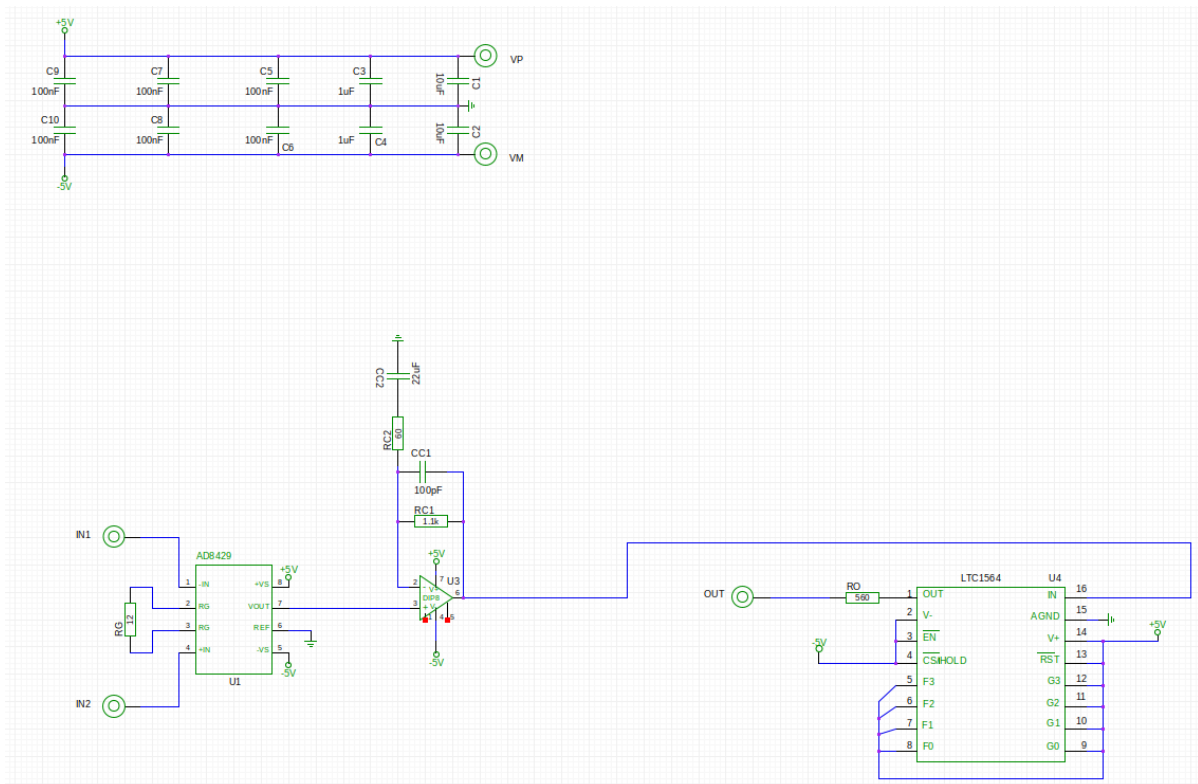


Obrázek 6: Jedna z prvních verzí šumového teploměru obsahovala dva nezávislé zesilovače, které se připojovaly na vstup analogového korelátoru.

2.3. Šumový teploměr na základě přístrojového zesilovače AD8429

Předchozí verze teploměru se ukázala jako nepraktická v tom, že celé zařízení bylo řešeno jako kompaktní a jednoúčelové. Při nesprávné funkci se velmi obtížně prováděla diagnostika a též nebylo možno vyhodnotit mnoho důležitých statistických parametrů, protože zásahy do elektroniky byly značně nepohodlné. Další vyrobená varianta byla koncipována spíše jako stavebnicový systém.

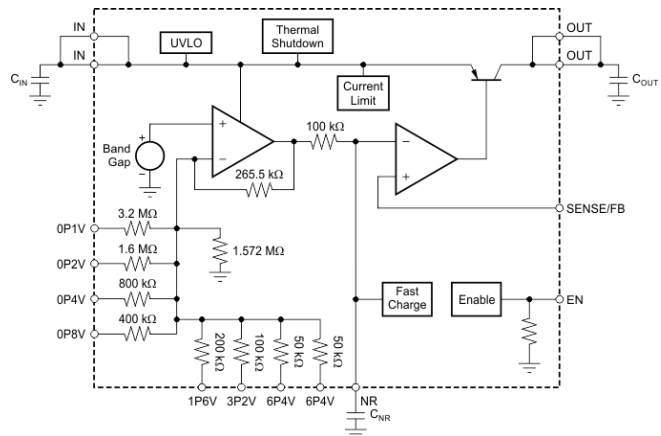
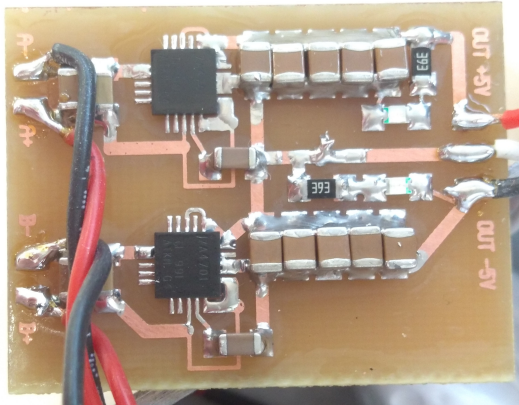
Zesilovač byl vyroben na základě přístrojového zesilovače AD8429, který se vyznačuje velmi dobrou linearitou a nízkým napěťovým šumem $1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$. Pomocí jednoho externího rezistoru o hodnotě $R_G = 12\Omega$ bylo jeho zesílení nastaveno na $A = 501$. Podrobněji je výpočet zesílení popsán v dokumentaci obvodu. Zesílený signál je dále v druhém stupni zesílen nízkošumovým audio zesilovačem OPA1611 s nízkým zkreslením. Pomocí pasivních komponent je šířka zesilovaného pásma omezena. Dolní hranice představuje především odstranění případně DC složky. Horní mez je stanovena s ohledem na maximální frekvenci, kterou je schopna zaznamenávat měřicí karta National Instruments PCI-6251. Její vzorkovací frekvence je 1 MHz, a tak nemá valný význam, aby zesilovač pracoval s vyššími frekvencemi, než je polovina této vzorkovací, tj. 500 kHz. Výstup z druhého stupně je přiveden k obvodu LTC1564, což je dolní propust osmého řádu s nastavitelnou hraniční frekvencí a současně obsahující zesilovač se zesílením až $A = 16$. Tento filtr byl zařazen proto, aby ostře omezoval frekvence vstupující do měřicí karty.



Obrázek 7: Schéma jednoho z kanálů zesilovače vyrobeného na základě obvodu AD8429, OPA1611 a LTC1564.

Předchozí experimenty potvrdily, že je velmi důležité věnovat pozornost i napájecí části, protože šum a nestabilita může negativně ovlivnit funkci citlivých zesilovačů. Osvědčilo se raději používat bateriové napájení namísto běžné elektrické sítě, která velmi často způsobuje rušení. Napájení zesilovačů je symetrické a obsahuje kladnou i zápornou větev s napětím $\pm 5 \text{ V}$. Pro každou napájecí větev se používá dvojice lithiových baterií s napětím přibližně $2 \cdot 3,7 = 7,4 \text{ V}$. Napětí z baterií je regulováno symetrickým

stabilizátorem, jehož fotografie je na obr. 8. Kapacita použitých lithiových článků formátu 18650 je přibližně 3400 mAh. Proudový odběr zesilovačů, počítáme-li pouze integrované obvody AD8429 (9 mA), OPA1611 (3,6 mA) a LTC1564 (25 mA) činí 36,5 mA, což znamená, že baterie vystačí na cca 90 hodin provozu a s tak dlouhými měřeními se prozatím nepočítá.



Obrázek 8: Nízkošumový stabilizátor napájení sestavený na základě obvodu TPS7A4700.

2.3.1. Postup měření

Předběžné měření spektra signálu, který byl zaznamenán měřicí kartou, je patrné z obrázku 9. Zesilovač se chová dle požadavků a jeho frekvenční pásmo ostře klesá přibližně na frekvenci 150 kHz, což je horní mez obvodu LTC1564. Na grafech jsou zobrazeny dva kanály, protože byla vyrobena dvojice zesilovačů a jeden z plánovaných experimentů předpokládá paralelní spojení jejich vstupů a pomocí dvoukanálového měření a korelátoru měření šumu rezistoru.

Dokud pracovaly oba zesilovače zcela nezávisle na sobě, pak zaznamenaná úroveň šumu byla u obou kanálů srovnatelná a dostatečně vysoká pro dobré využití dynamického rozsahu. Po výpočtu korelace vycházelo, že oba kanály nejsou dostatečně oddělené a korelovaná úroveň by představovala chybu cca 1 kelvin, což znamená, že sestava by nebyla příliš vhodná pro dvoukanálové měření.

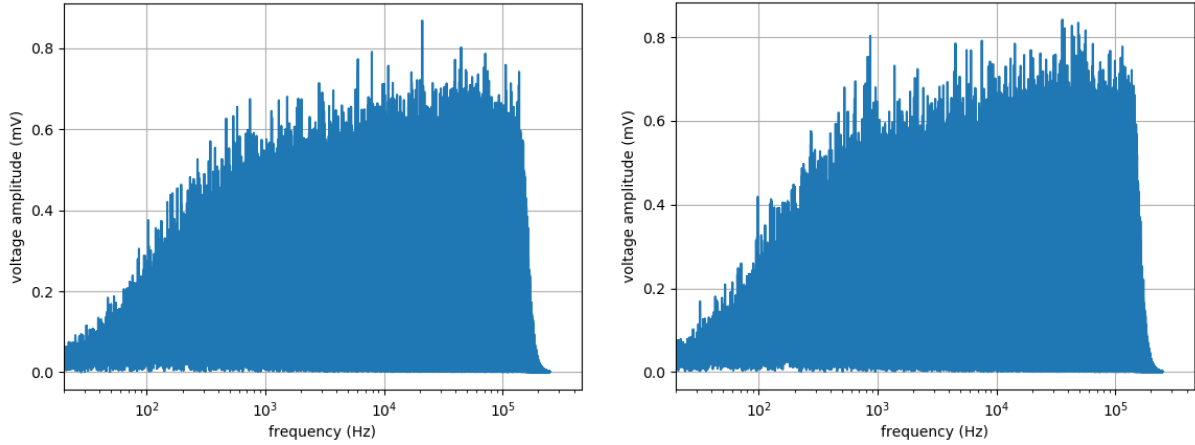
Přeslechy mezi oběma kanály mohou souviset s tím, že měřicí karta NI-6251 obsahuje pouze jeden převodník a jednotlivé kanály jsou mezi měřeními multiplexovány. V každém okamžiku se měří pouze jeden kanál. Měření tedy neprobíhá zcela simultánně a první a druhý kanál se střídá.

Je obtížné hledat konkrétní příčinu, ale v experimentech lze i nadále pokračovat i navzdory tomu, že měření bude probíhat pouze jednonálově.

Celková zaznamenaná efektivní hodnota napěťového šumu U_{eff} je dána několika příspěvky: napěťovým šumem zesilovače U_U , šumem rezistorů U_R a proudovým šumem zesilovače U_I . Pro jednotlivé příspěvky platí geometrický součet:

$$U_{\text{eff}}^2 = U_U^2 + U_R^2 + U_I^2$$

Hustotu napěťového šumu na vstupu zesilovače označme D_U , přičemž její jednotkou je $V/\sqrt{\text{Hz}}$. Podobně D_I s jednotkou $A/\sqrt{\text{Hz}}$ nechť je hustota proudového šumu na vstupu zesilovače. Zesílení zesilovače označme A a zpracovávanou šířku pásma Δf . Pro jednoduchost předpokládejme, že toto zesílení je konstantní přes celé pásmo Δf a pro všechny ostatní frekvence je nulové. Základní zesílení zesilovače určují



Obrázek 9: Byly vyrobeny dva zesilovače na základě obvodu AD8429 a každý z nich byl zapojen do měřicí karty National Instruments PCI-6251 nezávisle na sobě.

především použité rezistory a vychází $A = 154976$. Jednotlivé členy určující složky šumu lze rozepsat:

$$\begin{aligned} U_U^2 &= (D_U A \sqrt{\Delta f})^2 \\ U_R^2 &= 4kTR\Delta f A^2 \\ U_I^2 &= (D_I R A \sqrt{\Delta f})^2 \end{aligned}$$

Během měření byl každý bod přímky získaný dvoufázově. Pomocí zkratu vstupů byl zjištěn napěťový šum zesilovače U_U . Jsou-li vstupy zkratovány, neuplatní se ani proudový šum ani šum rezistorů. Poté byl zkratovací kontakt rozpojen a následně bylo naměřeno celkové šumové napětí U_N . Efektivní napětí, které v grafu 10 představuje osu y bylo vypočteno vztahem

$$U_{\text{eff}}^2 = U_N^2 - U_U^2$$

Přímka s obecnou rovnicí $y = ax + b$ má v našem případě podobu

$$U_{\text{eff}}^2 = A^2 \Delta f 4kTR + A^2 \Delta f (D_I R)^2$$

Osa x představuje teplotu T , a koeficienty přímky a a b lze rozepsat a zjistit pomocí lineární regrese. Platí

$$\begin{aligned} a &= A^2 \Delta f 4kR \doteq 317,07 \cdot 10^{-6} \text{ V}^2/\text{K} \\ b &= A^2 \Delta f D_I^2 R^2 \doteq 8,8138 \cdot 10^{-3} \text{ V}^2 \end{aligned}$$

Z těchto dvou rovnic lze vyjádřit a vypočítat šířku pásma Δf a hustotu proudového šumu D_I .

$$\begin{aligned} \Delta f &= \frac{a}{A^2 4kR} \doteq 119524 \text{ Hz} \\ D_I &= \sqrt{\frac{4kb}{aR}} \doteq 0,876 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}} \end{aligned}$$

Poté, co jsme určili šířku pásma, můžeme vypočítat i hustotu napěťového šumu. Napěťový šum U_U je hodnota na výstupu zesilovače při zkratu vstupů a průměrná hodnota činila 65 mV. Odtud

$$D_U = \frac{U_U}{A \sqrt{\Delta f}} = 1,21 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$$

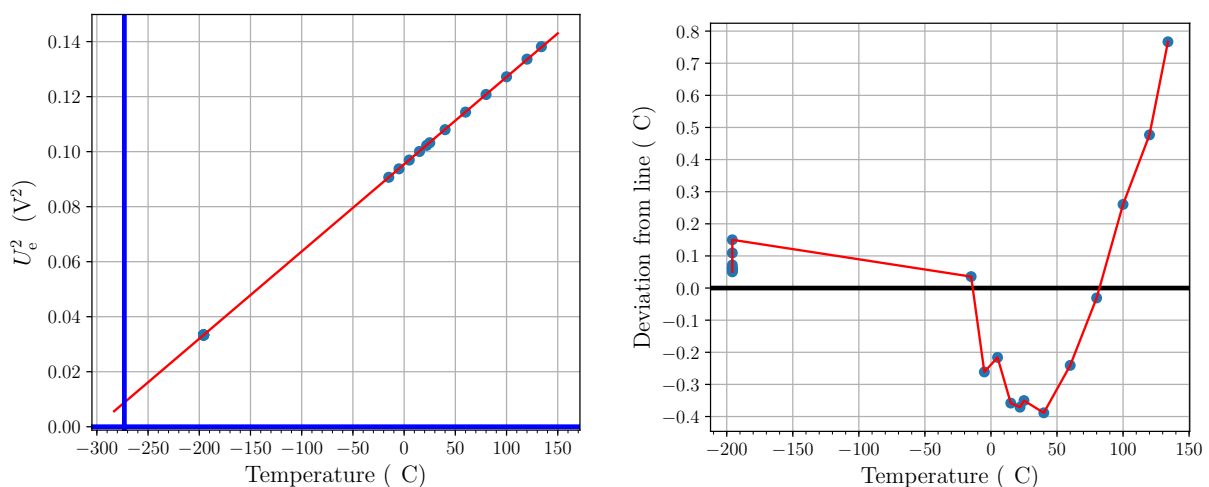
Hustota proudového šumu vychází výrazně nižší než v datasheetu zesilovače AD8429, kde je uvedena hodnota $1,5 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$. Při výpočtu jsme však pro jednoduchost předpokládali konstantní hustotu napěťového i proudového šumu v průběhu celé šířky pásma. Mimo to v datasheetu chybí mnohé podrobnosti. Pro tento parametr není kritické znát jeho přesnou hodnotu, ale především je nutné, aby byl stabilní. Narozdíl od napěťového šumu nelze během měření jeho hodnotu průběžně zjišťovat.

2.3.2. Výsledky

Snímací rezistor byl zahříván v kalibrační peci v teplotním intervalu od -15°C až 135°C . Krom toho bylo ještě provedeno dodatečné měření v kapalném dusíku. Při měření každého teplotního bodu byly nejprve zkratovány vstupy zesilovače, čímž bylo možné zjistit aktuální hodnotu napěťového šumu samotného zesilovače. Následně byl zkrat rozpojen a poté proběhlo měření šumu rezistoru. Získanými body byla proložena přímka a také byly vypočteny odchylky od této přímky. Výsledky jsou vyneseny na grafech na obr. 10. Nejvyšší odchylka od přímky, tj. nelinearita, dosahovala hodnoty 0,75 stupňů.

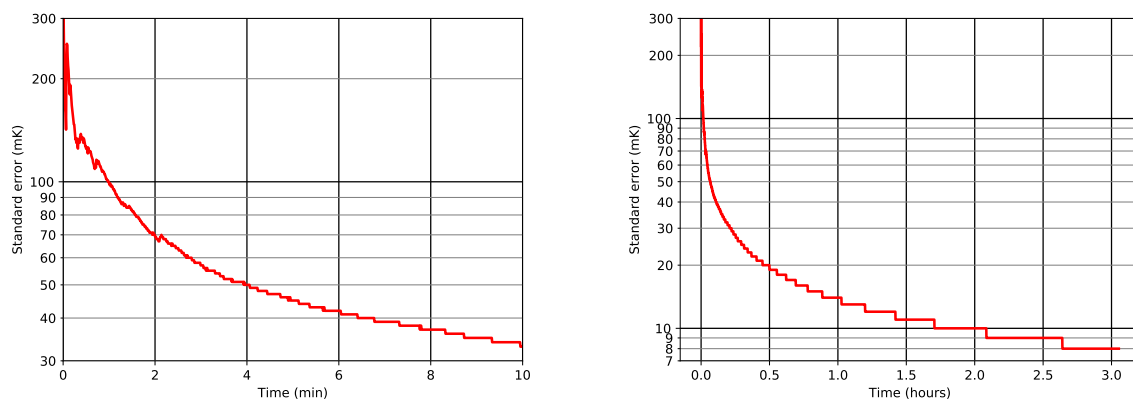
Tento výsledek na první pohled není uspokojivý, ale přesto si lze povšimnout některých detailů, které vyznívají pozitivně anebo nalézt chybu, kterou by bylo možné v další verzi odstranit a měření zlepšit:

- Odchylka od přímky dosahuje 0,75 stupňů. Jedná se však o krajní chybu, nikoli střední kvadratickou odchylku.
- Chování teploměru bylo naměřeno od teploty kapalného dusíku až po 135°C . V takto širokém intervalu teplot je linearita výrazně lepší, než u platinových čidel.
- Pro nastavení teploty se používal termostat kalibrační pece. Jak později vyšlo najevo, termostat nebyl kalibrován a je potřeba použít nezávislé teplotní čidlo.
- U kalibrační pece nebyla použita kapalinová lázeň, což je velký nedostatek a možná právě proto narůstá odchylka především u vyšších teplot.
- Elektronika nebyla teplotně stabilizována, což nepochybně mělo vliv na vlastní šum zesilovače. V pozdějších verzích teploměru byl již termostat samozřejmou součástí.



Obrázek 10: Test lineární odezvy při jednonábovém měření se zesilovačem na základě AD8429.

Dále byl proveden test stability a rychlosti konvergence teploty. U šumových teploměrů přibližně platí, že nejistota měření klesá s odmocninou měřicí doby. Tato zákonitost však přestane platit poté, co okolní vlivy nedovolí další pokles nejistoty. Na grafech 11 jsou vyneseny výsledky desetiminutového a tříhodinového testu. Po jedné minutě poklesla nejistota na 0,1 stupeň, po deseti minutách na 35 mK a počkáme-li tři hodiny, pak vychází standardní chyba pouhých 8 milikelvinů. Stabilita i rychlost konvergence je tedy zcela dostačující pro řadu metrologických aplikací.



Obrázek 11: Delší doba průměrování vede k postupnému zlepšování přesnosti. Graf nalevo představuje krátkodobé testovací měření, ze kterého je patrný pokles standardní chyby na 0,1 K po minutě průměrování a na 35 mK po deseti minutách. Graf napravo je výsledkem tříhodinového měření, kdy chyba poklesla až na 8 mK.

Je vhodné také poznamenat, že u šumového teploměru předpokládáme, že úroveň šumu je přímo úměrná termodynamické teplotě. To však platí pouze tehdy, je-li snímací rezistor konstantní. Jeho hodnota se však mění s teplotou a dle dokumentace výrobce je teplotní koeficient roven 15 ppm/K. Pro ověření vlivu teploty byla naměřena hodnota snímacího rezistoru při pokojové teplotě, následně byl rezistor schlazen na teplotu kapalného dusíku. Po odpaření dusíku se teplota rezistoru opět vyrovnala s okolím. Byly zjištěny tyto hodnoty:

- $T_1 = 23\text{ °C}$: 1000,632 Ω
- $T_2 = -196\text{ °C}$: 1000,740 Ω
- $T_3 = 23\text{ °C}$: 1000,635 Ω

Teplotní cyklus nejenže nijak nepoškodil snímací rezistor, ale zároveň se ukázalo, že chyba vzniklá změnou rezistoru je zanedbatelně malá ve srovnání s ostatními nejistotami.

2.3.3. Měření referenční teploty

Při konstrukci teploměru bylo nutné ověřovat funkci sestavených prototypů. Pro kalibraci byla použita kalibrační pec Isotech Hyperion 4936 s nastavením teploty s krokem 0,01°C. Nejčastější teplotní rozsah při testování byl 15°C až 140°C. Displej na peci zobrazuje nastavenou a aktuální teplotu a po ustálení se obě teploty vyrovnávají. Stabilita termostatu se ukázala jako velmi dobrá, avšak přesnost zobrazované teploty je vhodná pouze pro orientační měření, protože pec nebyla již řadu let kalibrována. Nebylo to třeba, protože při kalibracích se vždy spoléhá na nezávislé platinové čidlo, které je zasunuto do temperovaného bloku spolu s testovaným měřidlem.

U prvotních verzí šumového teploměru zcela postačilo sledovat údaje na displeji. S postupným vylepšováním se všakjevila přesnost pece jako nedostatečná a není vyloučeno, že některá naměřená data jsou poněkud zkreslena.

Proto se u testování novějších verzí šumového teploměru používalo raději platinové čidlo, jehož odpor byl měřen pomocí 24 bitového převodníku AD24USB. Ten byl připojený k počítači a naměřená data bylo možné odečítat pomocí programu a vypočítávat z nich teplotu. Převodník obsahuje zdroj proudu, který je realizován jako zdroj napětí z přesné 10V reference s připojeným interním rezistorem o přibližné hodnotě $R_i = 20 \text{ k}\Omega$. Pro dosažení lepší přesnosti má zdroj napětí možnost komutace, tj. změnu polarity, čímž lze eliminovat případné parazitní termoelektrické napětí. Počet změn polarity i dobu trvání jedné periody lze nastavit pomocí programu. Doba trvání jedné periody se obvykle volí tak, aby souhlasila s periodou napětí v elektrické síti, tj. $T = 20 \text{ ms} \approx f = 50 \text{ Hz}$. Tím je zajištěno, že během jednoho měření uplyne celistvý počet period případného rušení na frekvenci 50 Hz, čímž se vliv rušení potlačí.

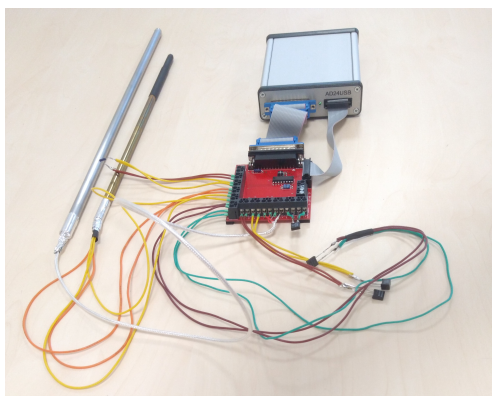
K dispozici je osm kanálů a jestliže připojíme na jeden z nich přesný referenční rezistor a naměříme na něm napětí, můžeme vypočítat přesnou hodnotu interního rezistoru R_i . Dále přečteme napětí z jiného kanálu, na němž je připojeno platinové čidlo Pt100 a opět přečteme napětí. Ze zjištěného napětí lze následně vypočítat hodnotu odporu platinového čidla.

Popsaným způsobem vznikne relativně levný, ale přesný vícekanálový ohmmetr, který je programovatelný a jehož přesnost je dána pouze přesností připojených referenčních rezistorů a linearitou interního AD převodníku. Přesnost se ještě zvýší, jestliže referenční rezistor má přibližně stejnou hodnotu jako měřený rezistor. Odpor platinového čidla Pt100 je 100 ohmů při teplotě 0°C a s rostoucí teplotou se zvyšuje. Proto byl referenční rezistor zvolen $R_{\text{ref}} = 120 \Omega$. Na několik dalších kanálů bylo pro kontrolu připojeno několik dalších přesných rezistorů a jejich kombinace. Budící proud, který prochází platinovým čidlem je přibližně $500 \mu\text{A}$, což je optimální hodnota pro přesné odečítání napětí a zároveň pro nízké zahřívání čidla. Naměřený odpor platinového čidla je v programu přepočítáván na teplotu dosazením do polynomu v souladu s ITS90.

Celková sestava je vidět na obrázku 13 spolu se zapouzdřením samotného čidla, které bylo chráněno nerezovou trubicí. Stejně provedení měl i šumový teploměr, a tak byl se měl minimalizovat případný teplotní rozdíl způsobený tepelnou vodivostí trubky.



Obrázek 12: Kalibrační pec Isotech Hyperion 4936 obsahuje displej, který zobrazuje nastavenou a aktuální teplotu, ale pro přesná měření bylo vhodnější použít nezávislý teploměr.



Obrázek 13: Referenční teplota byla měřena pomocí platinového čidla připojeného k 24 bitovému převodníku se zdrojem proudu. Zapouzdření platinového čidla i šumového teploměru bylo záměrně provedeno stejným způsobem.



2.4. Měření pomocí mikropočítače Red Pitaya

Dosavadní experimenty se prováděly s vybavením, které je relativně nákladné, komplikované a v případě potřeby obtížně přenositelné. Hlavní důvod takového uspořádání je univerzálnost a flexibilita, kdy lze poměrně snadno změnit měřicí sestavu, přeprogramovat její chování či podrobněji diagnostikovat problematickou část. Je možné však předpokládat, že po vyřešení řady technických problémů může vzniknout verze šumového teploměru, která bude jednoúčelová a kompaktní.

Velmi zajímavou alternativou se jeví použití jednodeskového mikropočítače Red Pitaya, který obsahuje mimo jiné programovatelné hradlové pole (FPGA) a dva nezávislé 14-bitové vstupní AD převodníky pracující až do frekvence 125 MHz. Jediný takový mikropočítač by pravděpodobně dokázal zpracovávat analogový signál ze zesilovačů a po převedení na digitální hodnoty vypočítávat teplotu.

Čtrnáct bitů vestaveného převodníku by svou přesností mohlo dostačovat a navíc existuje možnost získání další přesnosti dodatečným průměrováním. Vzorkovací frekvence je přibližně 500 krát vyšší, než požadujeme, a tak každá naměřená hodnota může být průměrem z 500 jednotlivých vzorků. Linearita či dlouhodobá stabilita převodníku je poněkud nejistá, protože se jedná o výrobek se značným tlakem na nízkou cenu, ale tyto parametry prozatím ponechme stranou a všimněme si, zda je vůbec měření teploty pomocí mikropočítače Red Pitaya technicky proveditelné.

Obecně platí, že hradlové pole je velmi flexibilní nástroj pro zpracování digitálních signálů v reálném čase, ale jeho programování a ladění je obtížné a zdlouhavé. Především v této rané fázi je důležité vytvořit prvotní verzi, byť s omezenou funkcí a mnoho detailů ponechat stranou. Relativně rychle lze vytvořit na počítači Red Pitaya software, který bude v reálném čase počítat pro každý kanál dva parametry zjištěné z hodnot AD převodníku: suma hodnot a suma kvadrátů. K tomu se přidává ještě suma součinu obou kanálů a celkový počet dat. Kanály označme x a y . Parametry se budou vždy zapisovat na dané místo v paměti, odkud si je může hlavní obslužný program přečíst a dále je zpracovávat. Máme tedy k dispozici těchto šest parametrů

$$\sum_{i=1}^N x_i \quad \sum_{i=1}^N x_i^2 \quad \sum_{i=1}^N y_i \quad \sum_{i=1}^N y_i^2 \quad \sum_{i=1}^N x_i y_i \quad N$$

přičemž úloha je rozdělena do dvou procesů. Rychlá část běží na hradlovém poli, zpracovává signál v reálném čase, ale obsahuje jen velmi jednoduché matematické operace. Pomalá část běží na hlavním procesoru a běh je natolik pomalý, že by nemohl zpracovávat data v reálném čase, zato však máme k dispozici jakékoli matematické nástroje včetně pokročilých matematických knihoven. Software běžící na hlavním procesoru se též výrazně pohodlněji vytváří a ladí, než část kódu pro hradlové pole.

Hlavní program čte data z předem určeného místa v paměti. Čtení dat je obecně nepravidelné a mezi jednotlivými čteními proběhne blíže neurčený počet vzorkování AD převodníku. Přesto lze ukázat, že popisovaná koncepce je jednoduchá a přitom dostačující k tomu, abychom získali potřebné výsledky.

Uvažujme dvoukanálové měření za použití korelace, přičemž výsledek vypočteme z bloku o N datech. Naměřená teplota šumového teploměru je úměrná výrazu

$$T \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\left(x_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \right) \cdot \left(y_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \right) \right)$$

Ve vzorci vystupuje okamžitá naměřená hodnota, ať už x_i nebo y_i , od které je odečtena průměrná hodnota celého bloku dat. Tento krok je nutné provést kvůli offsetu, který střední hodnotu posouvá mimo nulovou úroveň. Offset vzniká z nejrůznějších důvodů, například přítomnost termoelektrického napětí nebo offsetu samotného AD převodníku. Ať již jsou důvody jakékoli, je nutno výsledný šumový signál posunout tak, aby fluktoval symetricky kolem nulové úrovně.



Dále se oba kanály vynásobí. Tento krok je popsán v předcházejících teoretických rozborech. Součin obou kanálů má nenulovou střední hodnotu danou pouze šumem vstupního signálu, přičemž šumy jednotlivých zesilovačů nemají vliv. Poslední krok je výpočet střední hodnoty, tj. sumy dělené počtem dat. Tím je vysvětlen celý výše uvedený výraz, ale v takto zapsané podobě jej nelze spočítat na základě parametrů, které máme k dispozici z hradlového pole. Například samotné hodnoty x_i a y_i nejsou dostupné, protože se velmi rychle mění a hlavní výpočetní program by je nestačil zpracovávat. Proto pokračujeme matematickou úpravou výrazu:

$$\begin{aligned} T &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\left(x_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \right) \cdot \left(y_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \right) \right) = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(x_i y_i - \frac{x_i}{N} \sum_{i=1}^N y_i - \frac{y_i}{N} \sum_{i=1}^N x_i + \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i \right) = \\ &= \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N x_i y_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \sum_{i=1}^N x_i + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i \right) = \\ &= \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N x_i y_i + \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i \left(-\frac{1}{N} - \frac{1}{N} + \frac{1}{N} \right) \right) = \\ &= \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N x_i y_i + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i \right) \end{aligned}$$

Úpravou výrazu jsme získali výsledek, který již obsahuje pouze parametry, které může hlavní výpočetní vlákno přebírat od hradlového pole. Ve výrazu jsou pouze sumy a celkový počet dat. Popsaný matematický postup je pro naše účely velmi užitečný a je základem celého měření pomocí mikropočítače Red Pitaya. Doplnujícím měřením k dvoukanálové variantě je zpracování dat z každého zesilovače zvlášť, bez využití korelace. V takovém případě předpokládáme lineární závislost šumu na teplotě, přičemž přímka obecně neprochází počátkem souřadné soustavy a je nutné ji určit dvěma body. Teplota závisí na efektivní hodnotě šumu, přesněji řečeno na její druhé mocnině, U_{RMS}^2 . Platí

$$U_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad \text{kde} \quad \mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

Střední hodnota náhodného šumu je nulová, protože hodnoty fluktuují symetricky kolem nuly. Stejně jako v minulém případě musíme počítat se vznikem offsetu a před zpracováním odečíst od každé hodnoty celkovou střední hodnotu μ . Pak teprve můžeme vypočítat efektivní hodnotu, tj. Root Mean Square (RMS). Rozepíšeme-li vztah pro výpočet druhé mocniny efektivní hodnoty, dostáváme

$$U_{\text{RMS}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\left(x_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \right)^2 \right) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\left(x_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \right) \cdot \left(x_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \right) \right)$$

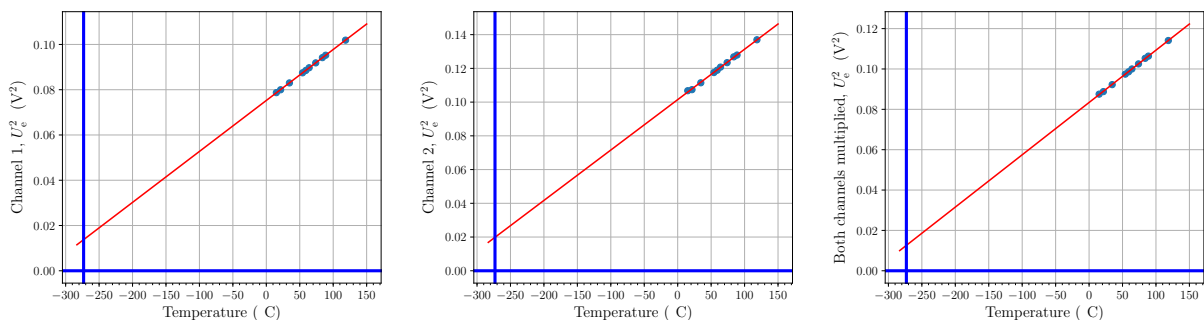
Přičemž vztah formálně velmi připomíná vzorec, ze kterého jsme vyšli při výpočtu korelace signálu. Matematické úpravy již není nutné opakovat, protože výsledek bude analogický:

$$U_{\text{RMS}}^2 = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2 \right)$$

Odvození platilo pro první kanál x , nicméně stejný postup uplatníme i pro druhý kanál. Získáme tak tři vztahy, pomocí kterých zjistíme samotný šum rezistoru s využitím korelace, dále šum rezistoru s příčte- ným šumem prvního kanálu a šum rezistoru se šumem druhého kanálu. Všemi třemi způsoby lze nalézt hodnotu, která reaguje na termodynamickou teplotu snímacího rezistoru. Výpočetní výrazy jsou upravené tak, aby byly veličiny měřitelné pomocí mikropočítače Red Pitaya.

Popsaný postup byl naprogramován do mikropočítače a pomocí kalibrační pece se zvyšovala teplota v in- tervalu $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ v deseti teplotních krocích. V každém kroku byla teplota stabilizována po dobu dostatečně dlouhou k tomu, aby nejistota šumového teploměru klesla pod 30 mK . V době měření sice není možné nejistotu stanovit přesně, ale na základě předchozích zkušeností je o měřící sestavě známo dostatek informací, aby doba měření byla vhodně zvolena.

Data získaná třemi metodami – z každého kanálu zvlášť a z jejich korelace – byla proložena přímkami. Dále byl u každé přímky nalezen bod, který je od přímky nejvíce vzdálen, což můžeme považovat za krajní chybu měření. Výsledky jsou vyneseny na grafech na obr. 14. Bylo zjištěno, že data z prvního kanálu se přímce přibližují nejlépe, a to s krajní odchylkou $0,36\text{ }^{\circ}\text{C}$. Poněkud hůře vycházejí data z korelace obou kanálů, přičemž odchylka od přímky dosahuje hodnoty $0,93\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nejméně zdařilý je druhý kanál s odchylkou $2,75\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obrázek 14: Měření teploty pomocí mikropočítače Red Pitaya. Kalibrační přímka byla získána z prvního kanálu (graf nalevo), z druhého kanálu (graf uprostřed) a z korelace obou kanálů (graf napravo). Nejlepší výsledek byl získán z prvního kanálu, kde maximální odchylka od přímky činí $0,36\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Šum rezistoru, který byl zjištěn pomocí korelace obou kanálů, má dle teorie ležet na přímce, která pro- chází počátkem souřadné soustavy. Platí tedy, že při teplotě absolutní nuly má vycházet též nulový šum rezistoru. Bohužel, graf v pravé části na obr. 14 je v rozporu s tímto předpokladem, z čehož plyne, že mě- řící sestava zachytávala rušení, které se promítlo současně do obou kanálů, což zřetelně posunulo přímku mimo počátek souřadné soustavy.

Přes tento neúspěch je zřejmé, že jednodeskový mikropočítač Red Pitaya je možné využít pro zpracování signálu ze šumového teploměru. Získané výsledky nejsou dostatečně přesné pro metrologické aplikace, ale příčinou neúspěchu bylo nedostatečné stínění a elektromagnetické rušení, nikoli samotný mikropočítač Red Pitaya nebo jeho vstupní AD převodník.



2.5. Zesilovač s FET vstupy

Všechny dříve popsané experimenty se týkaly jednobandového měření, kdy šum z rezistoru byl zesílen jedním zesilovačem. Zpracovávaný signál vždy obsahoval současně Johnsonův šum rezistoru a současně i šum samotného zesilovače. Úroveň celkového šumu sice narůstala lineárně s absolutní teplotou rezistoru, ale pro zjištění kalibrační přímky bylo potřeba dvou teplotních bodů, protože přímka neprocházela nulou. I při teoreticky nulové teplotě rezistoru bychom naměřili nenulový šum zesilovače. Byly provedeny pokusy oddělit šum zesilovače od šumu rezistoru pomocí zkratovací propojky. Jestliže měřený rezistor zkratujeme, pak výsledný šum bude pouze samotný napěťový šum zesilovače. Tato metoda však nedávala dobré výsledky, protože připojením rezistoru se uplatňuje navíc proudový šum zesilovače, a ten nelze stanovit s dostatečnou přesností tak, aby bylo možné provést korekci. Proto byla navržena a vyrobena další verze zesilovače, tentokrát s využitím operačních zesilovačů s FET tranzistory na vstupu, zatímco dřívější verze využívala vstupy s bipolárními tranzistory. Operační zesilovače na bázi bipolárních tranzistorů jsou obecně vhodnější, potřebujeme-li sestavit zesilovač s co nejnižším vlastním šumem. Tranzistory typu FET mají vyšší úroveň celkového šumu, ale jejich proudový šum můžeme považovat za zanedbatelný, a proto bude jejich chování lépe předpověditelné. Dříve použitý obvod AD8429 má úroveň napěťového šumu pouhých $1,1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, přičemž obvody s FET vstupy byly vybrány tři: OPA828 ($4 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$), OPA1652 ($4,5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$) a ADA4625 ($3,3 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$).

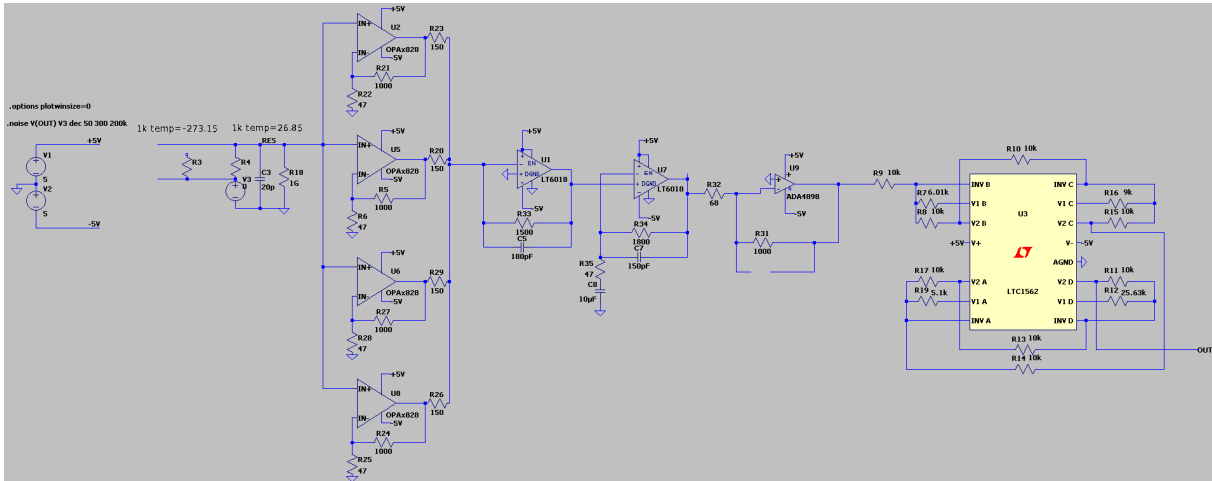
Napěťový šum lze snížit tím, že zapojíme několik zesilovačů paralelně, přičemž úroveň šumu klesá s odmocninou počtu zesilovačů. Zároveň při paralelním zapojení narůstá proudový šum, ale právě díky FET vstupům je proudový šum zanedbatelný a paralelní zapojení můžeme použít. Proto byl u každého zesilovače použitý vstupní obvod čtyřnásobně, aby napěťový šum klesl na polovinu. Stále ještě nedosahujeme původní hodnoty šumu AD8429, ale dále navyšovat počet obvodů se prozatím nejevilo jako praktické. Další stupně zesilovače tvořily dva obvody LT6018, což jsou precizní nízkošumové zesilovače. Poslední stupeň zesilovače tvořil, stejně jako ve dřívější verzi, analogový filtr LTC1564. Zmiňovaný filtr pracuje jako dolní propust, přičemž pomocí propojek či přepínačů lze nastavit mezní frekvenci. Krom toho obvod LTC1564 obsahuje vlastní zesilovač, který byl nastaven na zesílení $A=16$. Zesílení celého čtyřstupňového řetězce je dáno součinem zesílení jednotlivých stupňů:

$$A = 20 \cdot 40 \cdot 40 \cdot 16 = 512\,000$$

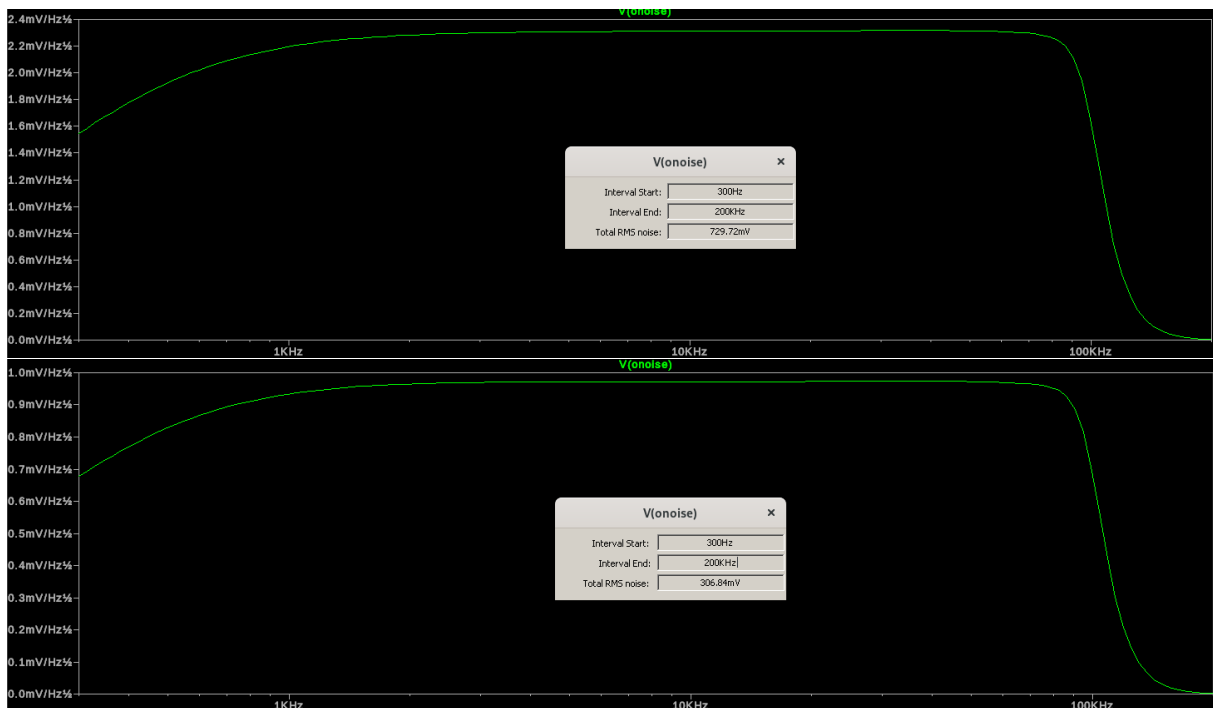
Tuto hodnotu je však nutno brát orientačně, protože zesílení závisí na frekvenci.

Chování zesilovače bylo ověřováno pomocí simulačního programu LTspice. Simulované schéma je zakresleno na obr. 15. U každé varianty obvodu byla provedena šumová analýza za tří různých podmínek. Snímací rezistor při teplotě absolutní nuly, tj. bezšumový, dále snímací rezistor při teplotě 300 K, což přibližně odpovídá pokojové teplotě a třetí simulace byla vypočtena za předpokladu, že namísto snímacího rezistoru je zkrat. Na obr. 16 jsou zobrazena některá šumová spektra a z nich celková úroveň napěťového šumu získaná jako integrál v zadaném intervalu frekvencí.

Popsaným postupem bylo otestováno několik desítek obvodů s různými hodnotami pasivních součástek ve zpětných vazbách, s různými typy operačních zesilovačů a řada dalších variant. Tři nejlepší návrhy obvodů byly nakonec reálně vyrobeny.



Obrázek 15: Schéma zesilovače se čtveřicí paralelně zapojených zesilovačů s FET vstupy překreslené do simulačního programu LTspice.



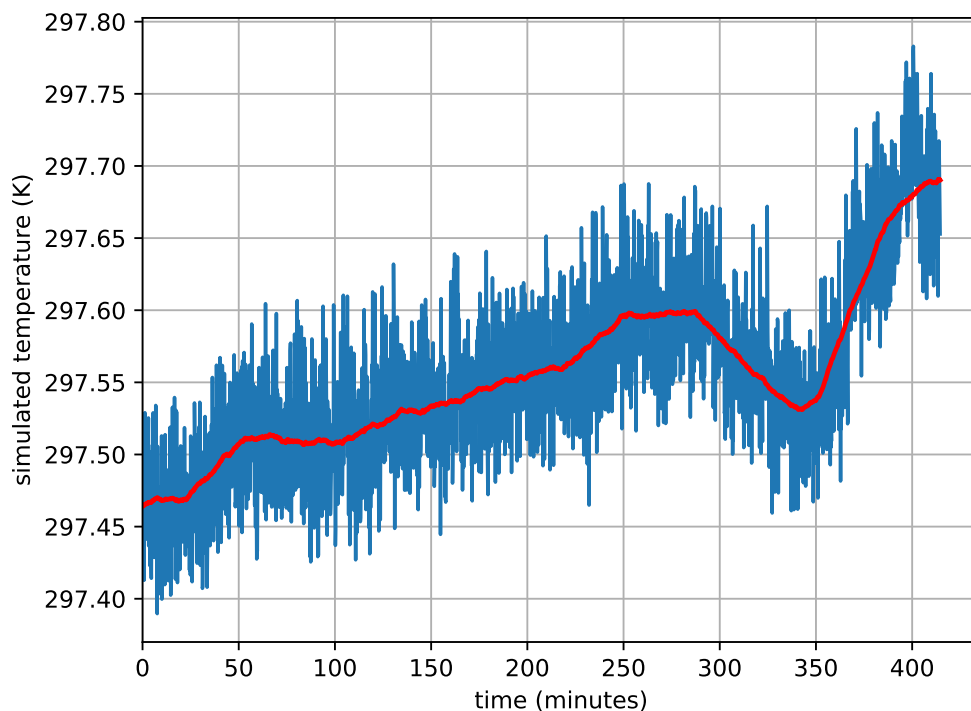
Obrázek 16: Simulace frekvenčních charakteristik zesilovače pro dvě různé teploty snímacího rezistoru, která byla nastavena na pokojovou teplotu (300 K) (horní graf) a na absolutní nulu (dolní graf). Dodatečnými výpočty bylo ověřeno, že celková úroveň šumu závisí na termodynamické teplotě lineárně.

2.5.1. Citlivost zařízení na okolní teplotu

Byla provedena řada experimentů, které měly za cíl ověřit opakovatelnost měření a posoudit případný dlouhodobý drift. Ve většině případů nebyly výsledky uspokojivé a vznikla tak domněnka, že okolní teplota ovlivňuje naměřené hodnoty. Většina součástí měřicí sestavy by měla být vůči takovým vlivům imunní, obzvlášť, měříme-li pomocí dvou kanálů s využitím korelátoru. Též v programu LTSpice byl testován i vliv okolní teploty.

Jednou z možností, kde by se okolní teplota mohla projevit, byla měřicí karta National Instruments PCI-6143, která se nacházela uvnitř počítačové skříně, kde nepochybně běžně dochází k velkým výkyvům teplot v důsledku proměnné zátěže systému.

Bylo provedeno měření, při kterém byl do měřicí karty přímo připojen generátor křivek Keysight 33500B nastavený pro generování šumu přibližně o takových parametrech, které se očekávají na výstupu zesilovačů. Samotné zesilovače však připojeny nebyly, test měl pouze ukázat stabilitu měřicí karty v součinnosti s generátorem.



Obrázek 17: Drift simulované teploty, který je způsoben pouze měřicí kartou National Instruments PCI-6143 a generátorem Keysight 33500B. Vlastní šumový teploměr připojen nebyl. V průběhu měření se měnila teplota v místnosti a současně se měnila teplota uvnitř počítače s měřicí kartou. Je zřejmé, že bude potřeba dalších experimentů k nalezení příčiny driftu.

Po několika hodinách byla získaná data zpracována stejným způsobem, jako data ze šumového teploměru. Vyšlo najevo, že vypočtená teplota je časově velmi nestabilní a driftuje o několik desetín stupně, což je nepřijatelné vzhledem k tomu, že ani neobsahuje zesilovače, které jsou hlavním předmětem vývoje. Experiment ukázal, že nelze spoléhat na kombinaci generátoru Keysight 33500B a měřicí karty NI PCI-6143. Drift je skutečně alarmující, ale nelze posoudit, zda je na vině měřicí karta či generátor.

	Český metrologický institut Oblastní inspektorát Brno	Zpráva úkolu TR č. 6014-TR-Z0002-21	Počet příloh: 1 Počet listů: 33/54
--	---	---	---------------------------------------

2.5.2. Teplotní stabilizace elektroniky

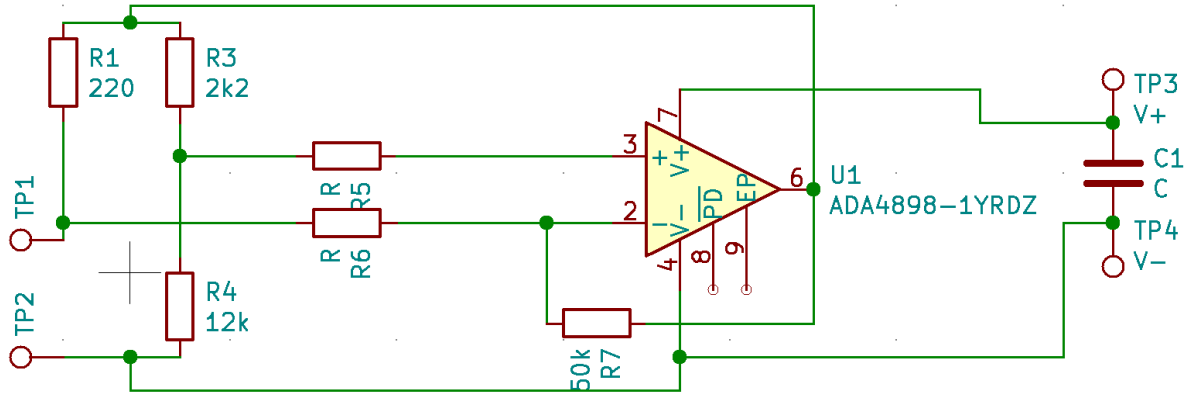
Naměřené výsledky byly obtížně reprodukovatelné a dlouhodobě nestabilní. Ukázalo se, že okolní teplota má značný vliv na naměřené hodnoty a je nutné zajistit teplotní stabilitu celé analogové části měřícího řetězce. Na desce zesilovače je několik prvků, které mohou vykazovat teplotní závislost, například integrované obvody zesilovačů, jejich zpětnovazební rezistory a kondenzátory. Při návrhu obvodu se s tímto rizikem počítalo. Nebylo však zřejmé, jak velký drift bude okolní teplota způsobovat. Mezi základní úvahy a předběžná opatření patří například:

- Veškeré rezistory jsou vybrány s teplotním koeficientem 10 ppm/K, což patří mezi nejstabilnější běžně prodávané typy.
- Přestože jsou v zapojení použity relativně stabilní rezistory, jejich odpor na teplotě vždy závisí. Rezistory jsou přítomny především u operačních zesilovačů, kdy dvojice rezistorů definuje jejich zesílení. Zesílení by tak mohlo záviset na teplotě elektroniky, což by mohlo znehodnotit měření. Zesílení je však dáno buď přímo poměrem rezistorů $-R_1/R_2$ u invertujícího zesilovače anebo vztahem $1 + R_1/R_2$ u neinvertujícího zesilovače. U obou vztahů se vyskytuje poměr rezistorů, který na teplotě nezávisí, pokud jsou oba rezistory ze stejného materiálu a jsou blízko sebe, přičemž obojí lze předpokládat.
- Veškeré kondenzátory ve zpětných vazbách mají nízký teplotní koeficient a jejich označení je buď NP0 nebo COG. Při změně kapacity s teplotou by došlo ke změně charakteristiky, což by mělo za následek zkreslené měření.
- Každý rezistor, ať už je samostatný nebo je součástí integrovaného obvodu, přispívá k celkovému šumu svým vlastním šumem. Tento příspěvek je závislý na teplotě a tomuto jevu nelze zabránit. Při měření se však používají dva nezávislé zesilovače a jejich výstupy se matematicky zpracovávají tak, aby se vlastní šumy zesilovačů zrušily. Teplota rezistorů by tudíž neměla mít vliv na celkový výsledek.
- Součástí obvodu je integrovaný RC anti-aliasing filtr LTC1564, který slouží jako dolní propust s hraniční frekvencí 125 kHz, což je polovina vzorkovací frekvence měřící karty. Tento filtr má nepochybně též svou teplotní závislost, která je zmiňována v dokumentaci, ale pro přesnější stanovení vlivu chybí podrobnější informace. Lze předpokládat, že právě tento filtr bude vhodné teplotně stabilizovat.
- Zesilovače jsou napájeny z baterií a je nutno počítat s jejich postupným vybíjením a s poklesem napájecího napětí. Tento jev nesouvisí s teplotou, ale mohl by způsobit obtížnou opakovatelnost výsledků. Proto je napětí z baterií dodatečně stabilizováno obvody TPS7A4700 na symetrické napětí $\pm 5V$.

Pro rozvod tepla byl vyroben hliníkový blok, který přiléhá na všechna pouzdra integrovaných obvodů. Pro zlepšení tepelného kontaktu byla na všech místech použita tepelně vodivá vazelína. Teplotní stabilita se zajišťovala pomocí platinových čidel a topného rezistoru.

Teplotní stabilizace byla navrhována s ohledem na možné rušení, které způsobí přírodní vodiče. Teplotní čidlo i topný rezistor musí být v blízkosti zesilovačů. Regulace výkonu rezistoru může být provedena buď spojitě anebo digitálně, pomocí pulzně-šířkové modulace. Náhlé spínání a vypínání proudu tekoucího rezistorem by způsobilo rušení, a proto byla první varianta teplotní stabilizace navržena jako analogová podle následujícího schématu:

Teplotním senzorem je zde platinové čidlo Pt1000, které současně slouží i jako topný element. Hlavní částí zapojení je můstek, jehož napájení zajišťuje operační zesilovač. Obvod je navržen tak, aby se odpor



Obrázek 18: Schéma analogového teplotního regulátoru

platinového čidla ustálil na hodnotě nastavitelné pomocí trimru. Pro prvotní testy byla zvolena hodnota 112 ohmů, což přibližně odpovídá teplotě 31 °C. Výkon topného rezistoru byl zvolen tak, aby byl přibližně stejný jako tepelný výkon celého zesilovače, ale předpokládá se, že bude v rovnovážném stavu pracovat pouze na polovinu svého výkonu a bude mít dostatečně velkou rezervu pro regulaci. Celý měřicí zesilovač je napájen napětím $\pm 5\text{V}$ a napájecí proud je přibližně 40 mA. Z toho vychází tepelný výkon 0,4 W. Operační zesilovač na teplotní regulaci musí svým výstupním proudem dodávat právě tento výkon, přičemž maximální výstupní proud u použitého zesilovače byl 30 mA. Při použití běžného platinového čidla Pt100 bychom dosáhli maximálního výkonu $P = RI^2 = 100 \cdot 0,03^2 = 0,09\text{ W}$, což by bylo příliš málo pro správně fungující teplotní regulaci. Proto bylo raději použito čidlo Pt1000, u kterého můžeme očekávat výkon o řád vyšší, což je zcela dostatečné. Naopak bude rozumné zvolit napájecí napětí tak, aby maximální výkon byl dříve uvedených 0,4 W. Tato hodnota vychází pro napětí $U=20\text{V}$:

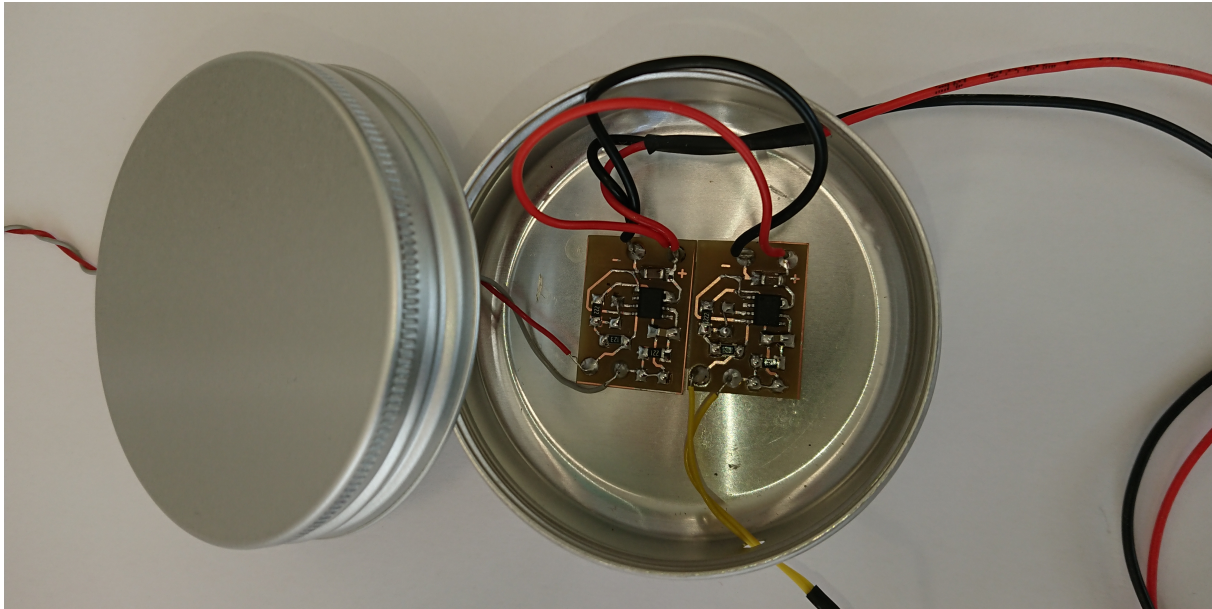
$$P = \frac{U^2}{R} \quad \Rightarrow \quad U = \sqrt{PR} = \sqrt{0,4 \cdot 1000} = 20\text{ V}$$

a tím je dáno hlavní napájecí napětí teplotního regulátoru. Zmiňované obvody byly vyrobeny dva, aby každý zesilovač měl svou vlastní termoregulaci.

Při realizaci se ukázalo, že obvod funguje správně a skutečně je schopen po čase stabilizovat teplotu na hliníkovém bloku a navíc nebylo zjištěno žádné dodatečné elektromagnetické rušení. Průběžné sledování teploty však bylo velmi nepraktické. Těž nastavení teploty, diagnostika a seřízení celého obvodu představovalo nepohodlnou manipulaci s elektronikou, a tak byla analogová regulace nakonec nahrazena digitálním řešením.

Digitální varianta byla založena na dvou platinových teplotních čidlech Pt100, které byly prostřednictvím obvodu MAX31865 připojeny k jednočipovému mikropočítači Arduino. Mikropočítač registroval teplotu čidel a pomocí svých výstupních pinů ovládal MOSFET tranzistory IRLB3034, čímž buď spínal nebo vypínal proud tekoucí vyhřívacími rezistory. Toto řešení bylo z hlediska uživatelského pohodlí velmi výhodné. Všechny potřebné parametry bylo možné měnit pomocí softwaru a taktéž teploty bylo možné monitorovat z hlavního počítače a data dále analyzovat. Velkou komplikací se však stalo elektromagnetické rušení, z čehož byla obava již při návrhu obvodu. Platinová čidla i vyhřívací rezistory byly přichyceny přímo na hliníkový blok, který překrýval čipy na zesilovačích. Výsledkem byla velmi dobrá termoregulace, ale bohužel se potvrdilo, že citlivá elektronika skutečně registruje pulzy vznikající při spínání vytápěcích rezistorů, a tato varianta byla nakonec po několika testech zavržena.

Termoregulace na základě jednočipového mikropočítače měla tolik výhod, že byla principiálně ponechána, ale další verze již měla teplotní čidla i vytápěcí rezistory vyvedeny mimo citlivou elektroniku.



Obrázek 19: Dvojice analogových teplotních regulátorů, které zajišťovaly stálou teplotu pro oba zesilovače. Platinové čidlo Pt1000 mělo dvě funkce – měření teploty a současně vyhřívání procházejícím proudem. Obvod zajišťoval, aby platinové čidlo mělo vždy stejnou teplotu bez ohledu na odvod tepla či okolní podmínky. Plynulá analogová regulace měla výhodu v malém elektromagnetickém rušení ve srovnání s cyklickým spínáním či PWM.

Ukázalo se, že z důvodu rušení není možné stabilizovat teplotu hliníkového bloku, a tak byla namísto něj stabilizována teplota krycí plechové krabičky, která zajišťovala odstínění zesilovačů umístěných vevnitř.

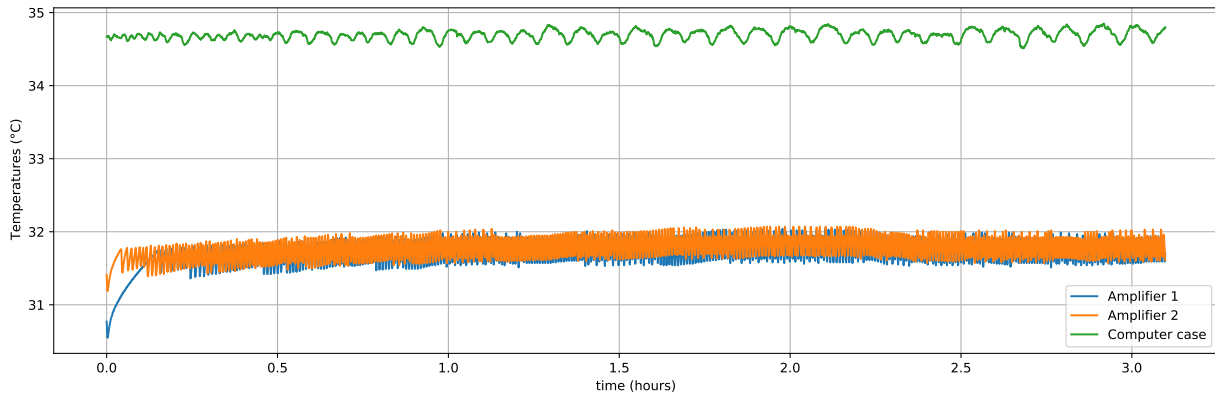
2.5.3. Stabilizace teploty měřící karty

Další možnou příčinou driftu naměřených hodnot může být i samotná měřící karta National instruments, která se nachází uvnitř počítače, přičemž její parametry mohou být ovlivňovány teplotou uvnitř počítačové skříně. Tato teplota se výrazně mění především v závislosti na zatížení procesoru. Proto byl k měřící kartě přichycen teplotní senzor Pt100, přičemž mikrokontrolér Arduino měřil teplotu prostřednictvím obvodu MAX31865 a přenášel data do počítače. Dále byl naprogramován skript, který na základě aktuální teploty spouštěl umělou zátěž procesoru, čímž byl vytvořen termostat pro celou počítačovou skříně.

Teplotní stabilita je tak udržována na třech místech – na dvou plechových krabičkách se zesilovači a uvnitř počítačové skříně. Záznam z těchto tří teplot je vynesena na grafu 20.

2.5.4. Test stability

Po přidání termoregulace byl znovu zopakován experiment pro zjištění opakovatelnosti měření. Testy byly prováděny ve vodní lázni při pokojové teplotě, přičemž teplota vody se měřila dvěma nezávislými platinovými čidly a do téže lázně byl ponořen též šumový teploměr. Měření probíhalo po dobu několika hodin. Po každém měření lze stanovit konstantu úměrnosti mezi naměřeným šumem a absolutní teplotou. Tato konstanta úměrnosti je jediný parametr, který je nutno u šumového teploměru kalibrovat. Pro kalibraci postačuje jediný teplotní bod a pro dobrou definici by bylo vhodné, aby tento teplotní bod byl 0 °C, který lze realizovat reprodukovatelně, levně a s dobrou přesností pomocí ledové tříště z destilované vody. Přesto byl zmiňovaný teplotní bod raději realizován při laboratorní teplotě a zjišťován platinovým



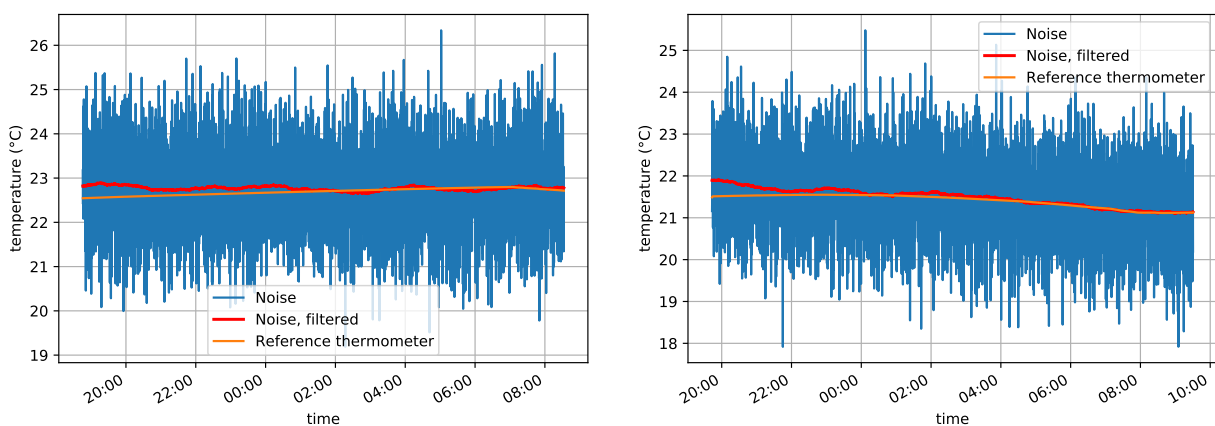
Obrázek 20: Záznam teplot obou zesilovačů a počítačové skříně. Je patrné, že přibližně po jedné hodině je zařízení teplotně stabilizováno a připraveno měřit.

teploměrem, jehož přenosť garantuje Oddělení teploty Českého metrologického institutu. Tento postup byl zvolen čistě z praktických důvodů, protože ledová tříšť vyžaduje jistou přípravu a pozornost, aby bylo možné se na její teplotu spolehnout. Navíc, nebyla k dispozici vhodná termoska, ve které by ledová tříšť vydržela potřebnou dobu.

Výsledky dvou nezávislých měření s dvoudenním odstupem jsou vyneseny na grafu 21. Data byla analyzována podrobněji, přičemž do výpočtů bylo zahrnuto vždy pouze 2000 posledních bodů.

- První měření: $(22.771 \pm 0.021)^\circ\text{C}$, střední odchylka od reference: 0.004061°C
- Druhé měření: $(21.234 \pm 0.021)^\circ\text{C}$, střední odchylka od reference: 0.000173°C

Je vhodné podotknout, že u obou naměřených dat byla použita tatáž kalibrační konstanta.

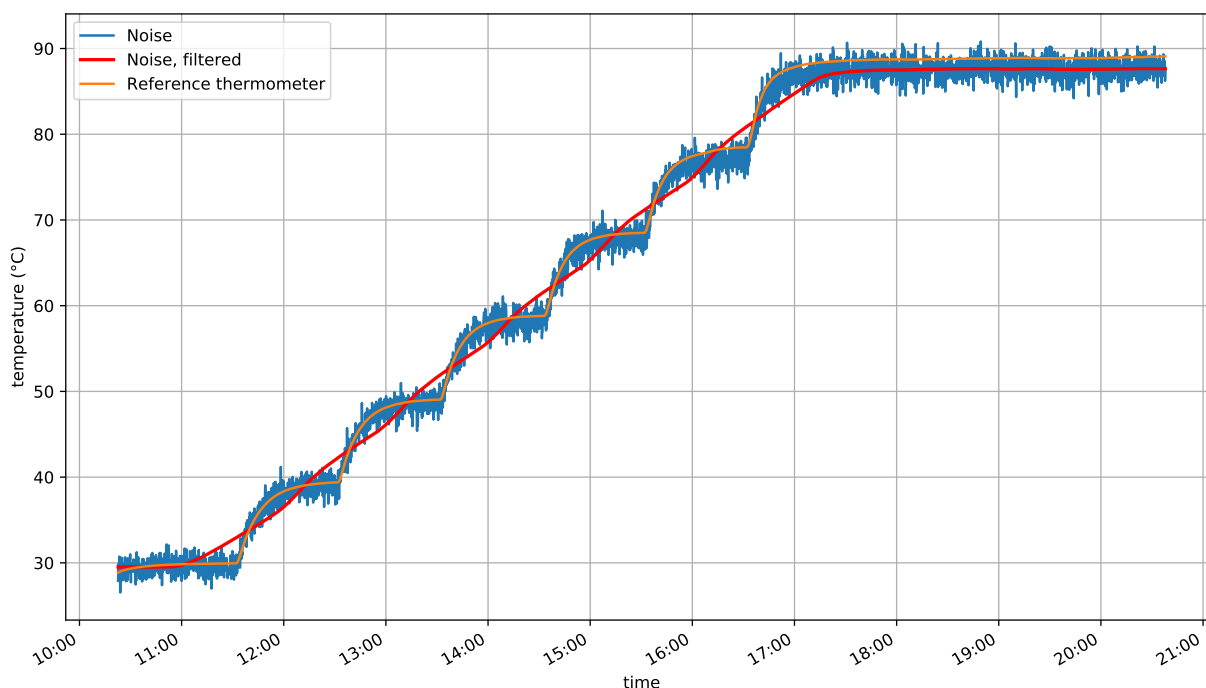


Obrázek 21: Grafy znázorňují průběh šumu u dvou měření, která byla provedena s dvoudenním odstupem. Je patrné, že data ze šumového teploměru dobře kopírují hodnotu z referenčního teploměru s výjimkou prvních několika hodin, což je pravděpodobně způsobeno nedostatečným temperováním.

Teplotní stabilizace obou zesilovačů a současně termoregulace měřicí karty vedla k velmi dobře opakovatelným výsledkům a je zřejmé, že teplotu elektroniky je nutno pečlivě hlídat i navzdory tomu, že při návrhu sestavy se všechny komponenty volily tak, aby nebyly teplotně závislé.

2.5.5. Ověření kalibrační přímky

Poté, co teplotu elektroniky korigoval termostat, vykazovalo již měření velmi dobrou stabilitu. Současně byla stanovena kalibrační konstanta, která představuje jediný neznámý parametr měřící sestavy. Tím vznikl plnohodnotný teploměr, jehož funkce se ověřovala postupným schodovitým zvyšováním teploty v kalibrační peci v předem definovaných krocích, přičemž teplota se měřila šumovým teploměrem a současně referenčním.



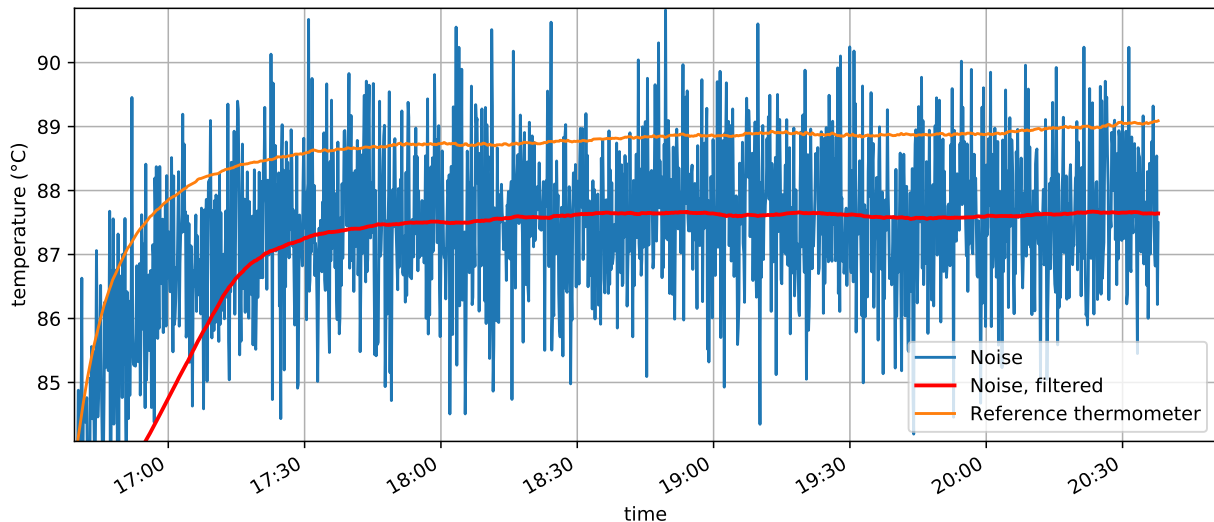
Obrázek 22: Ve vodní lázni kalibrační pece byl umístěn šumový teploměr spolu s referenčním teploměrem. Teplota byla schodovitě zvyšována přibližně každou hodinu o 10 °C.

Z obrázku 22 je patrné, že šumový teploměr reaguje na schodovitý nárůst teploty, která byla každou hodinu zvýšena o 10 °C. Závěrečná fáze při 90 °C byla záměrně prodloužena na dobu tří hodin, aby se šumový teploměr dostatečně stabilizoval a tento detail měření je vyneseno na grafu na obr.23. Ukazuje se, že v závěrečné fázi naměřený rozdíl mezi referenčním teploměrem a šumovým teploměrem představuje více než jeden stupeň Celsia, což znamená, že celé měření je znehodnoceno.

2.5.6. Příčiny nelinearity

Teploměr vykazuje nelineární chování, což je zásadní nedostatek a je potřeba nalézt a odstranit příčinu. Je třeba ověřit, že mezi měřicím rezistorem a okolní ochrannou trubkou je dostatečný tepelný kontakt. Je zjevné, že čím vyšší teplota, tím více šumový teploměr zaostává za referenční teplotou. Napovídá tomu též umístění samotného snímacího rezistoru. Konstrukce byla navržena tak, aby elektromagnetické stínění bylo co nejlepší a současně aby impedance celého vedení byla stabilní. Snímací rezistor je uvnitř ocelové trubky, která je navíc zasunuta do další trubky, která je z nerezi. Toto uspořádání představuje velkou tepelnou vodivost podél trubky, ale samotný rezistor není s ničím v kontaktu a teplo se přenáší vzduchem. Není tudíž zaručeno, že teplota rezistoru odpovídá teplotě lázně.

Bylo rozhodnuto, že prostor kolem snímacího rezistoru je nutno zaplnit tepelně vodivou pastou, která



Obrázek 23: Konstanta šumového teploměru byla seřízena pro laboratorní teplotu, ale detail záznamu teploty v okolí 90 °C ukazuje odchylku $-1,120$ °C. Taková nelinearita je nepřijatelná a je nutno nalézt a odstranit příčinu.

dosud nebyla použita z obavy o její fyzikální a chemickou stabilitu při nízkých teplotách kapalného dusíku a současně předpokládaných vyšších teplotách kolem 150 °C. Použití tepelně vodivé pasty si vyžádalo zásah do konstrukce teploměru a s novou verzí bylo provedeno další měření.

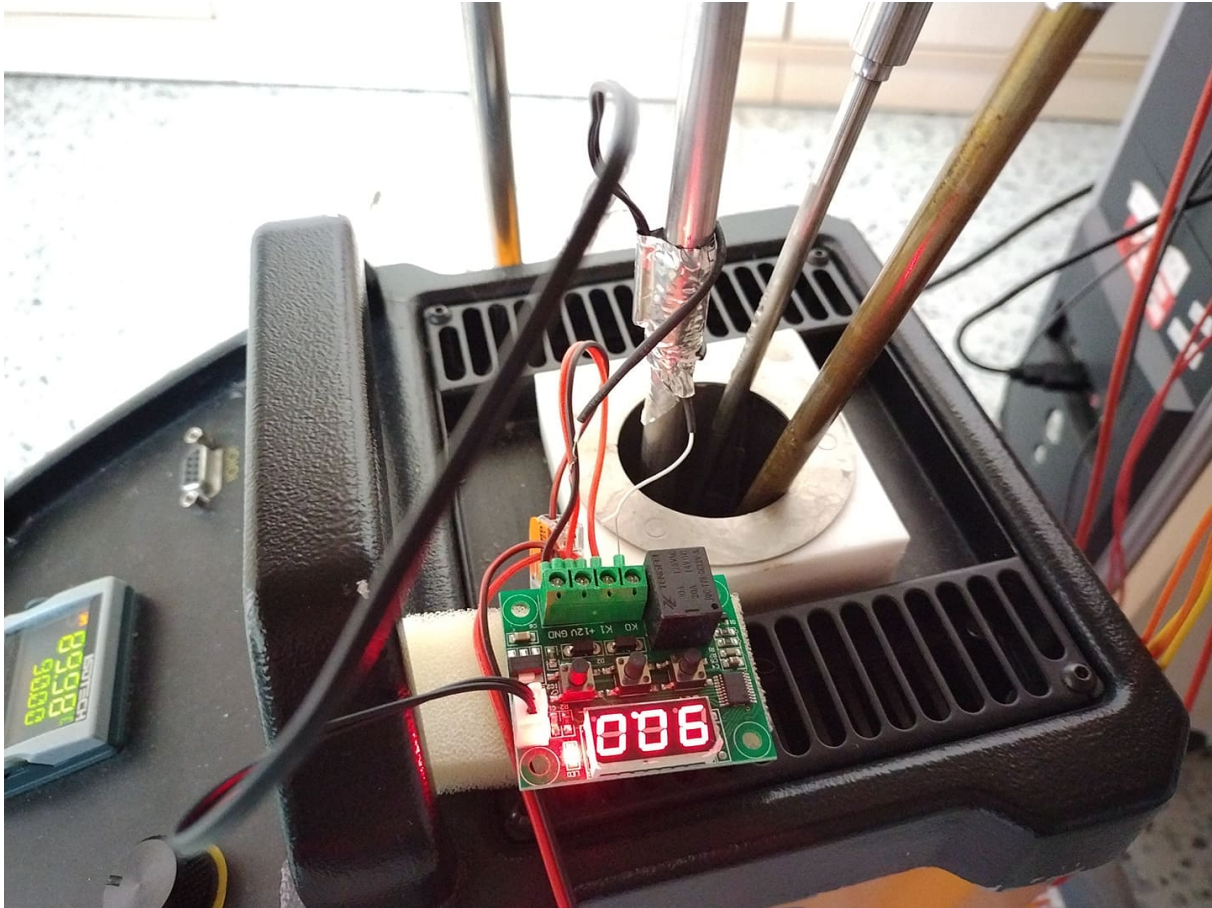
Přestože tepelně vodivá pasta zlepšila termální kontakt teploměru, nebylo i nadále jisté, zda teplota snímacího rezistoru skutečně odpovídá teplotě lázně. Proto byla provedena další úprava, která měla zamezit tepelnému toku podél ochranné trubky. Ve vzdálenosti přibližně 15 cm od snímacího rezistoru byl na trubku nainstalován topný drát s čidlem teploty a termostatem, který byl nastaven na stejnou teplotu, jako byla teplota lázně. Situaci ilustruje obrázek 24. Tím byla na dvou různých místech trubky zajištěna stejná teplota a gradient teploty podél trubky byl tudíž nulový.

Popisovanou měřicí metodu již můžeme považovat za velmi spolehlivou, pokud jde o nastavení teploty snímacího rezistoru. Dodatečné vytápění zajišťuje nulový gradient teploty podél ochranné trubky, vodní lázeň s magnetickým míchadlem velmi dobře rozvádí teplo v celém měřeném objemu, termostatem řízená kalibrační pec udržuje danou teplotu a tepelně vodivá pasta zprostředkovává dobrý tepelný kontakt v okolí snímacího rezistoru. Mimo to byla teplota měřena dvěma nezávislými platinovými teploměry, přičemž přesnější z nich má nejistotu 50 mK.

Po několikahodinovém měření zkonvergovala teplota měřená šumovým teploměrem k hodnotě s nejistotou v řádu desítek milikelvinů. Měření šumu pomocí dvou nezávislých zesilovačů a korelátoru vede k jediné neznámé, kterou je konstanta úměrnosti mezi termodynamickou teplotou a výstupním napětím na korelátoru.

V principu tedy postačí naměřit dvě různé teploty a bude potvrzeno či vyvráceno, že odezva šumového teploměru je přímo úměrná teplotě. Z toho důvodu byla změřena úroveň šumu pro teplotu přibližně laboratorní (přesněji 20,87 °C) a pro teplotu 90,27 °C. Příмка, která prochází dvěma naměřenými body by měla mít nulový absolutní člen, protože by měla procházet počátkem souřadné soustavy a při nulové absolutní teplotě by též šumové napětí mělo být nula.

Měření však tento předpoklad nepotvrdilo. Jak je patrné z grafů 25, absolutní člen posouvá příмку přibližně o deset stupňů, což činí teploměr nepoužitelným. Tento posun nelze vysvětlit nejistotami při měření a je zjevné, že chování šumového teploměru je zcela v rozporu s principy, na základě nichž byl navržen. Následovaly další, podrobnější, testy zesilovačů, které ukázaly vážné nedostatky. Zesilovače se vzájemně



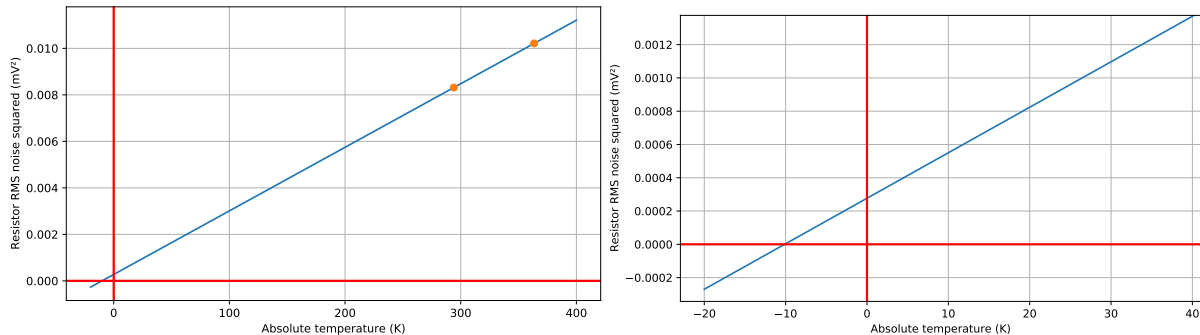
Obrázek 24: Na ochrannou trubku teploměru byl nainstalován topný drát, který byl řízen termostatem tak, aby měl stejnou teplotu, jako byla teplota lázně. Tím se zajistil nulový teplotní gradient podél trubky.

ovlivňovaly a zapnutí jednoho z nich způsobilo výraznou změnu u druhého. Právě tento test byl opakovaně proveden již dříve hned po sestavení obou zesilovačů, protože nezávislost obou kanálů je základním předpokladem pro správnou funkci korelátoru. Nezbyvá, než konstatovat, že při některé z úprav pravděpodobně došlo k poškození elektroniky, mnoho dosud naměřených datových souborů je bezcenných a bez odstranění zmiňované chyby nemá význam pokračovat v dalších experimentech.

Dvoukanálové měření a využití korelace tedy k výsledkům nevede, ale ve stávajících naměřených datech jsou též uloženy úrovně šumů každého ze dvou zesilovačů, a tak lze ověřit, zda alespoň jeden z nich vykazuje lineární odezvu na absolutní teplotu snímacího rezistoru. U jednocanálového měření již předpokládáme přítomnost absolutního členu u přímky. Při měření jedním zesilovačem se k šumu rezistoru přidává šum vlastního zesilovače, který lineární závislost posouvá mimo počátek souřadné soustavy. Z toho důvodu již nestačí pouze dva teplotní body pro stanovení nelinearity, nýbrž jsou nutné tři. K původním dvěma teplotám byla dodatečně přidána ještě třetí, mezilehlá, hodnota, a to 55,03 °C.

Výsledky jsou znázorněny na grafu 26. Na první pohled všechny tři body leží na přímce, a to u obou měřených kanálů. Je to však pouze vlastnost vykresleného grafu. Při vypočtení odchylky od přímky vychází nejvyšší nelinearita pro kanál A 1,48 stupňů a pro kanál B činí 0,39 stupňů.

Oba tyto výsledky ukazují nedobré vlastnosti stávajícího šumového teploměru, u něhož nelze pro měření teploty využít ani korelované dvoukanálové měření ani jednotlivé zesilovače zvlášť. Hlavní příčinou je



Obrázek 25: Levý graf znázorňuje odezvu poškozeného šumového teploměru pro dvě různé teploty. Proložená přímka neprochází počátkem souřadné soustavy. Graf napravo představuje detail, který ukazuje posunutí přímky přibližně o deset stupňů.

s největší pravděpodobností porucha, v důsledku které se zesilovače vzájemně ovlivňují.

Data, ze kterých vyplývá nelineární chování šumového teploměru, byla pořízena, když byly oba zesilovače zapnuty současně. Lze předpokládat, že při zapnutí pouze jednoho z nich budou výsledky lepší, a proto má význam pro ověření teorie provést ještě další experiment.

2.5.7. Test linearity každého zesilovače

Předchozí experimenty vedou k podezření, že žádná z variant šumového teploměru nemá dostatečně lineární odezvu. Proto bylo provedeno další měření, jehož cílem byl výhradně test linearity, a to na třech teplotních bodech, což dostačuje ke stanovení odchylky od proložené přímky. Byly vybrány tři teplotní body tak, aby bylo možné je snadno realizovat ve vodní lázni, a to přibližně 23 °C, 54 °C a 85 °C. Tyto hodnoty byly nastavené na termostatu a do žádných výpočtů nevstupují. Skutečné teploty byly nezávisle odečteny pomocí referenčního teploměru Greisinger GMH 3700 (viz obr. 27), jehož nejistota činila 50 mK.

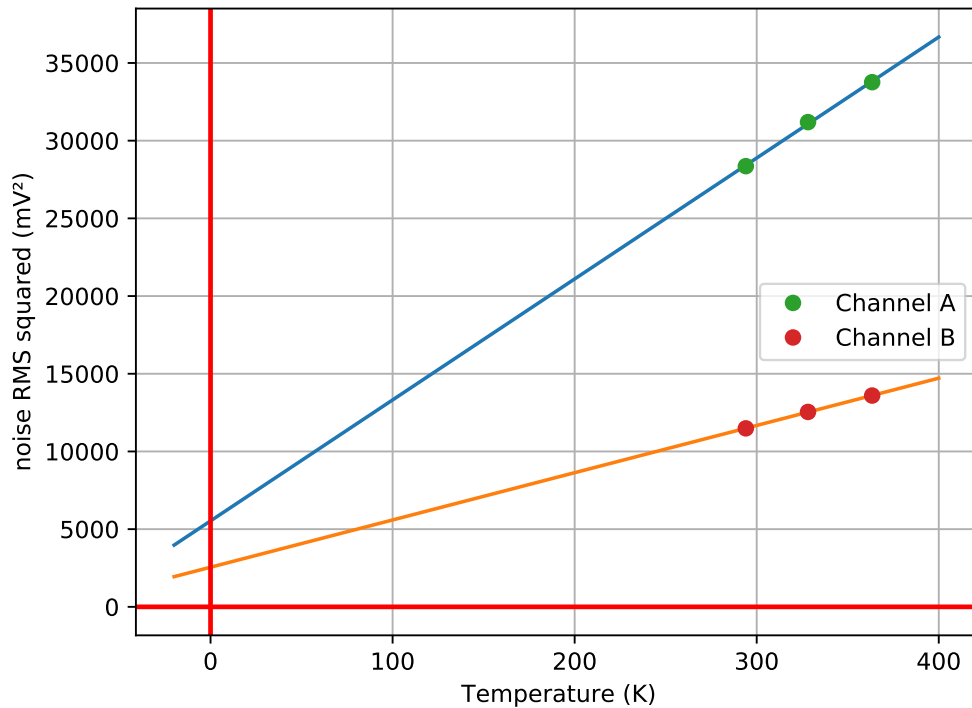
Původní plán představoval test lineární odezvy každého ze dvou zesilovačů zvlášť za předpokladu, že druhý z nich je vypnutý a tudíž nemůže ovlivňovat měření. Právě při tomto testu vyšla najevo pravděpodobná příčina všech předchozích neúspěchů. Jeden ze zesilovačů, připojený na kanál A, byl vadný a vykazoval náhodné nestability a oscilace. Proto nebyl nijak dále testován a veškeré výsledky se vztahují pouze na zesilovač připojený na kanál B.

Vzhledem k tomu, že se jedná o zásadní měření dokazující lineární odezvu teploměru, je vhodné uvést podrobněji i naměřené hodnoty.

Teplota (°C)	šum: U_{RMS}^2 (mV ²)	doba měření	odchylka od přímky (mK)
23,40	11374.21	2 hodiny	0,48
53,85	12259.77	2 hodiny	0,96
84,84	13160.95	1 hodina	0,48

Proložíme-li výše uvedenými daty přímku, což je znázorněno na grafech 28, pak největší odchylku od přímky naměříme u prostředního teplotního bodu. Tato odchylka je necelý jeden milikelvin. Výsledek předčil veškerá očekávání a je zjevné, že svou roli musela sehrát i náhoda, protože přesnost samotného referenčního teploměru je výrazně horší. Toto nebylo možné předvídat a vše zpočátku nasvědčovalo spíše pravému opaku, tj. že šumový teploměr bude svou přesností zaostávat za referenčním.

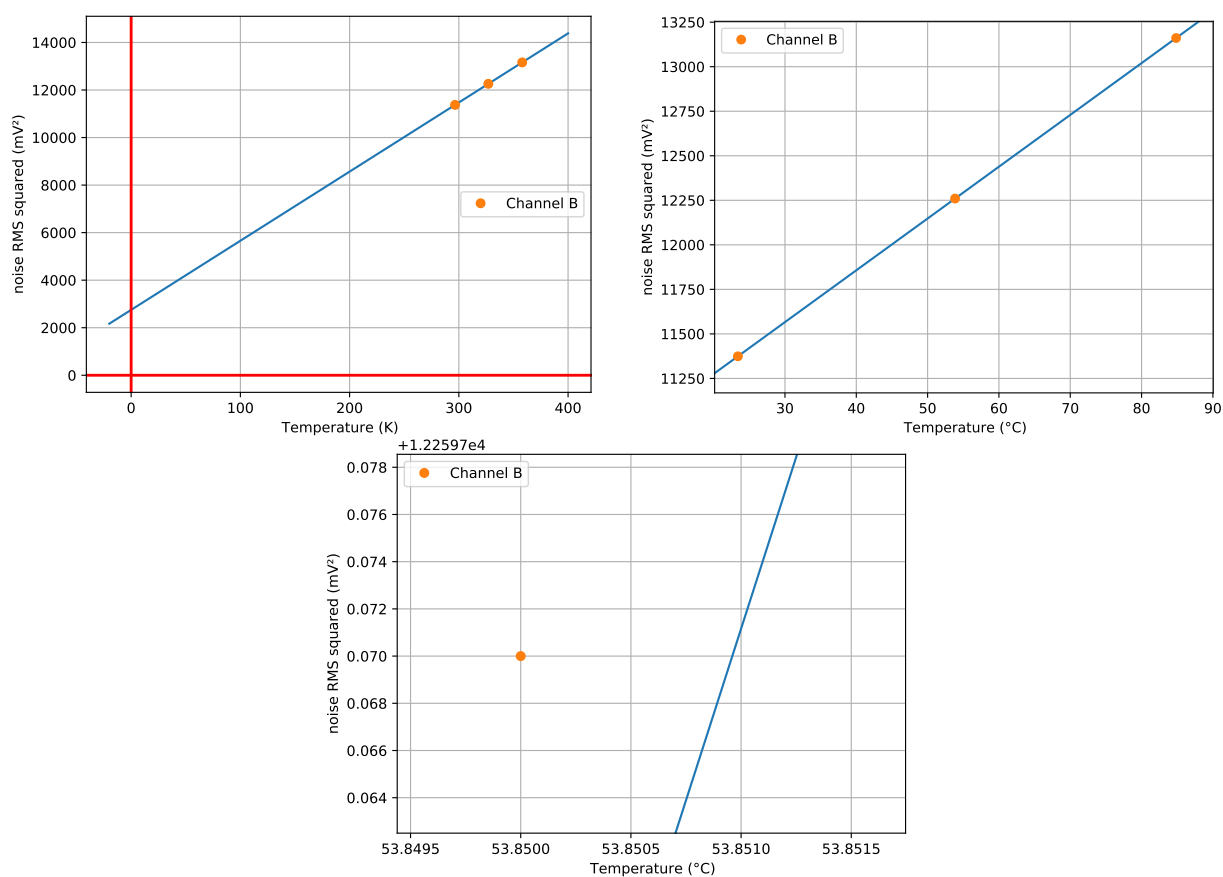
Experiment však dopadl natolik pozoruhodně, že by bylo vhodné jej zopakovat s výrazně přesnějším vybavením.



Obrázek 26: Poškozené zesilovače i nadále reagovaly na teplotu, ale jejich odezva nebyla dostatečně lineární. Z grafů na první pohled není patrná odchylka od linearity, ale ve skutečnosti je značná. Pro kanál A představuje 1,48 stupňů, pro kanál B činí 0,39 stupňů.



Obrázek 27: Referenční teploměr Greisinger GMH 3700



Obrázek 28: Výsledky testu lineární odezvy jednoho ze zesilovačů. Třemi teplotními body byla proložena přímka a z následné analýzy vyplynulo, že krajní odchylka představuje méně než jeden milikelvin. Použitý referenční teploměr však měl chybu 50 mK, a proto by bylo vhodné měření zopakovat s lepším vybavením.

	Český metrologický institut Oblastní inspektorát Brno	Zpráva úkolu TR č. 6014-TR-Z0002-21	Počet příloh: 1 Počet listů: 43/54
--	---	---	---------------------------------------

2.6. Kalibrace sond pro termální mikroskopii

Jednou ze zajímavých aplikací měření teploty pomocí šumu rezistoru je využití v nanometrologii pro kalibraci sond pro skenovací termální mikroskopii. Součástí sondy bývá miniaturní element, například tenký drátek, jehož elektrický odpor závisí na teplotě, a tak lze měřením odporu zjišťovat teplotu v různých místech zkoumaného vzorku v průběhu skenování a získat tak teplotní mapu. Přímé využití šumu při skenování je takřka vyloučené s ohledem na pomalou odezvu při měření šumu, ale při kalibracích delší čekací doba obvykle nevádí.

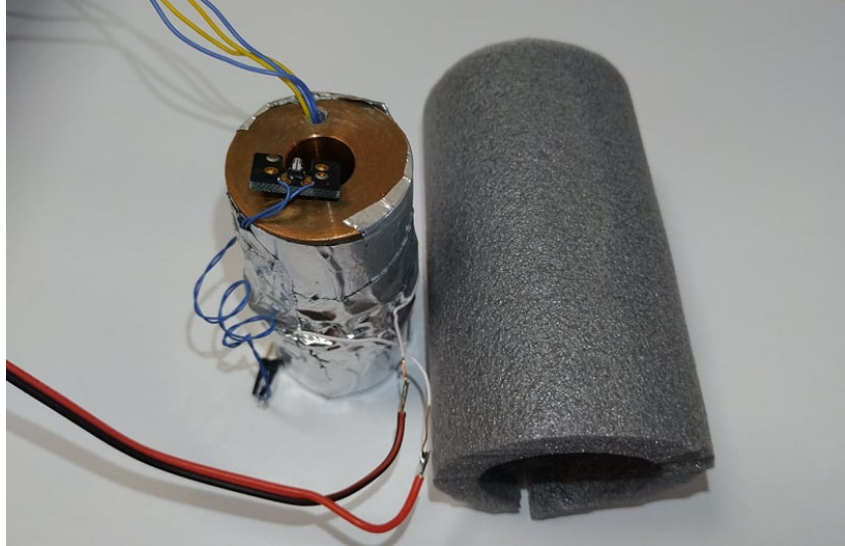
Kalibrace sondy je důležitý proces, protože teplotní závislost jejího odporu je předem známa pouze orientačně a pro přesná měření je vhodné znát vlastnosti každé sondy zvlášť. Během měření často dochází i k poškození sondy v průběhu skenování nebo ke změně jejích vlastností, a proto může být namísto sondy kalibrovat před každým měřením, pokud to situace vyžaduje. Kalibrace se provádí různými metodami, a to s ohledem na charakter vzorku, který bude následně měřen. Jednou z metod je kalibrace v peci, kdy se celá sonda nachází v prostředí s definovanou teplotou a zjišťuje se závislost odporu. Další možností je využití speciálně vyrobených kalibračních vzorků, které mají na svém povrchu struktury, jejichž teplotu lze ovládat a měřit. Takový vzorek se pak použije přímo v mikroskopu a skenovací proces je současně kalibrační. Obě zmiňované metody se ve výsledku liší. Zahříváme-li sondu v peci, pak se prohřeje v celém svém objemu. Použijeme-li kalibrační vzorek, pak se zahřívá pouze hrot sondy. Kalibrační křivky nejsou zaměnitelné. Existuje mnoho dalších metod, ale využití šumu může představovat vhodnou alternativu ke stávajícím postupům. Každá termální sonda je současně rezistor, jehož šum závisí pouze na teplotě. Tento fakt umožňuje, aby se sonda stala sama o sobě kalibračním elementem. Běžný postup představuje měření závislosti elektrického odporu sondy na teplotě, zatímco navrhovaná metoda by znamenala měření šumu v závislosti na odporu. Měření teploty tím zcela odpadá, protože teplotu lze vypočítat z úrovně šumu a z hodnoty odporu. Sonda může být v jakémkoli prostředí a může být vyhřívána jakýmkoli nekalibrovaným zdrojem. Zahřívát lze celý objem sondy anebo pouze hrot. Ve všech těchto situacích může být využití šumu výhodné.

Prvotní test měl prokázat, zda je měření šumu sondy prakticky realizovatelné. Ve všech stávajících experimentech byl snímací rezistor vybrán a zabudován tak, aby byl co nejlépe elektromagneticky odstíněn od okolního rušení. Kombinace dvou kovových trubek a stíněného vodiče tento požadavek úspěšně plní, ale pro termální sondu, jejíž tvar i s držákem je předem dán, je potřeba zvolit jinou konstrukci.

Vlastnosti zesilovačů již byly změřeny v předchozích testech, a proto bylo cílem zjistit pouze to, zda šum sondy reaguje na teplotu. Pro měření byl proto použit pouze jeden zesilovač, protože dvoukanálová varianta s korelátorem by představovala zbytečnou komplikaci. Z měděného válcového bloku byl vyroben přípravek pro nastavení definované teploty sondy, která se vkládala do vyvrtané dutiny. Teplota bloku se monitorovala pomocí platinového čidla Pt100 zasunutého do vedlejšího vývrtu. Po obvodu měděného válce byl navinut topný odporový drát. Pro snížení tepelných ztrát a prodloužení tepelné setrvačnosti byl celý blok tepelně izolován. Dále byl vyroben elektronický obvod zajišťující zpětnou vazbu mezi topením a čidlem teploty, čímž vznikla jednoduchá kalibrační pec pro termální sondy. Přípravek je vyfotografován na obr. 29.

Mezi sondou a zesilovačem nebyl žádný dodatečný vodič a sonda byla připojena do zesilovače přímo, aby délka citlivých vodičů byla co nejkratší. Zesilovač byl napájen z baterií a celá sestava byla uložena v silnostěnném ocelovém boxu, který představuje dobré stínění od okolního rušení. Jediné galvanické spojení s okolím představoval stíněný kabel, kterým byl výstup ze zesilovače připojen na měřící kartu.

Zmiňované uspořádání fungovalo správně pouze tehdy, pokud ze stíněného boxu nebyly vyvedeny jakékoli další vodiče. Velmi problematické však byly vodiče od topného drátu i vodiče pro platinové čidlo. Přestože nebyly galvanicky spojené s žádnou částí měřící elektroniky, vyvedení jejich konců mimo stíněný box způsobil okamžitý nárůst rušivých signálů. Teoreticky bylo zásadní chybou ponechat vodiče nestíněné, ale zbývající část elektroniky, která zajišťovala termoregulaci, byla natolik významným zdrojem



Obrázek 29: Fotografie nalevo představuje sondu pro SThM mikroskopii, napravo je vyhřívací přípravek pro měření jejího šumu. Základem je teplotně stabilizovaný měděný blok s dutinou, do které se vkládá sonda. Čtveřice vodičů (s modrou a žlutou barvou) vede k platinovému čidlu Pt100, červený a černý vodič je připojen k topnému odporovému drátu.

rušení, že kromě stínění by bylo zapotřebí mnoha dalších úprav.

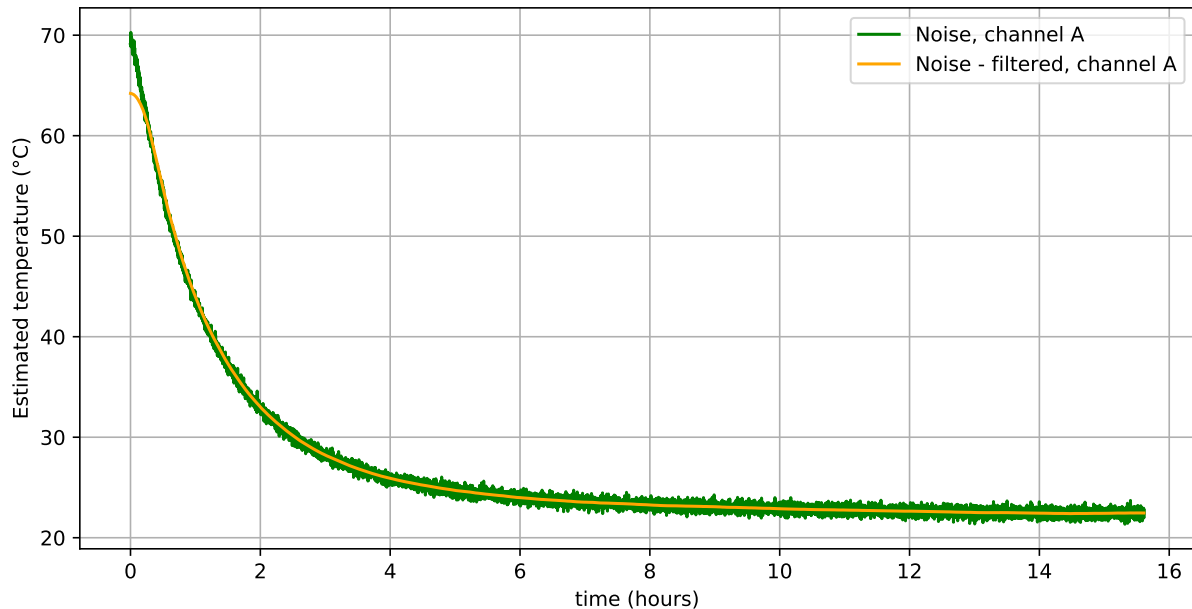
To však nebylo nutné pro tuto počáteční fázi experimentů. I přes neúspěch je důležitou informací opětovné potvrzení, že měření šumu je mimořádně náchylné na okolní elektromagnetické rušení. Současně bylo pro zjištění okolního vlivu použito mnohonásobné průměrování frekvenčního spektra naměřeného signálu. Tento nástroj se pro tento typ analýzy ukázal jako velmi užitečný.

Bylo nutné provést měření tak, aby žádný z vodičů nevycházel ven ze stíněného boxu. Z toho důvodu nebylo možné použít termoregulaci měděného bloku ani měřit jeho teplotu současně s měřením šumu.

Byl proto zvolen náhradní postup. Měděný blok byl nejprve s využitím termoregulace zahřátý na 70 °C a následně byly veškeré vodiče od vytápění i od platinového čidla odpojeny. Zůstal pouze postupně chladnoucí měděný blok se sondou uvnitř, která byla připojena na vstup zesilovače. V průběhu několika hodin byl pořízen záznam úrovně šumu, který představoval přibližně exponenciální pokles teploty z počátečních 70 °C až na laboratorní teplotu 23 °C. Získaná šumová data byla naškálována tak, aby hodnoty odpovídaly rozmezí teplot. Výsledný graf je vynesena na obr. 30.

Měření bylo provedeno s mnoha zjednodušeními. Zesilovač nebyl kalibrován a ani neměl nainstalovanou teplotní stabilizaci elektroniky, což se v předchozích měřeních ukázalo jako velmi důležité. Vlastní teplotu sondy nebylo možno zjišťovat ani korigovat, protože by vzniklo příliš velké rušení. Odpor sondy v závislosti na teplotě se zanedbával a nezjišťoval. Výsledkem měření proto, bohužel, není kalibrační křivka pro sondu, ale přesto se základní závěry podařilo získat.

Šum termální sondy je nepochybně měřitelný a velmi dobře reaguje na teplotu. Rozlišení i stabilita jsou dostatečné k nalezení kalibrační křivky. Jak se ukázalo v minulých experimentech, okolní rušení lze při dobrém návrhu sestavy úspěšně potlačit a jistě by to bylo možné i v tomto případě. I přes neúspěch lze křivku na grafu 30 považovat za nadějný výsledek a měření pokládat za unikátní, protože měření šumu je v termální mikroskopii neobvyklé.



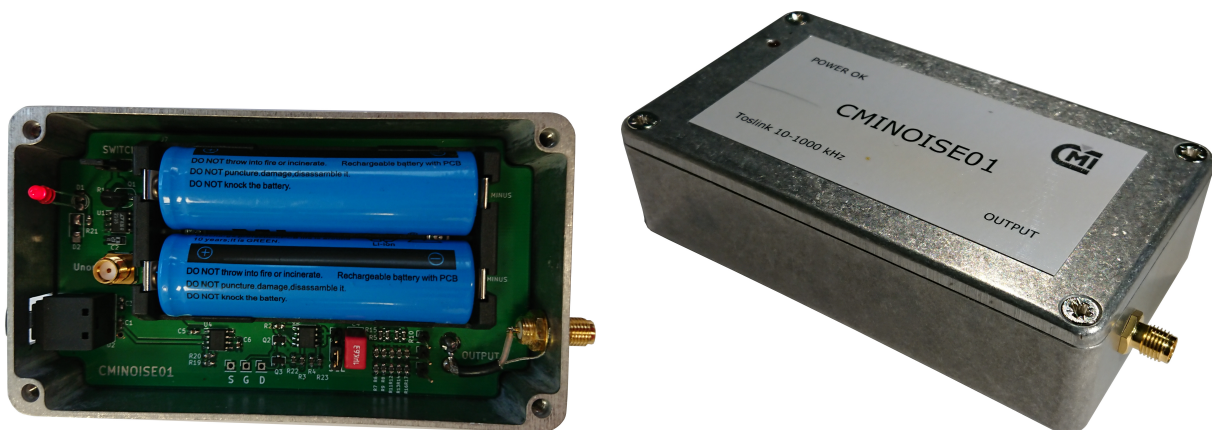
Obrázek 30: Sonda pro termální mikroskopii byla vložena do měděného bloku, který postupně vychlázal z teploty 70 °C na teplotu okolí 23 °C. Graf ukazuje záznam šumu sondy naškálovaný tak, aby souhlasila počáteční a koncová teplota.

2.7. Kompenzace dlouhodobého driftu, etalon šumu

Elektronika, která zpracovává termální šum rezistorů, se skládá z mnoha komponent, jejichž parametry nelze v dlouhodobém horizontu předvídat a je nutné očekávat například změnu zesílení každého ze zesilovačů, změnu šířky pásma u frekvenčních filtrů a podobně. Výstup z korelátoru představuje stejnosměrnou hodnotu, která může být dále zatížena chybou vzniklou v důsledku termoelektrického offsetu a nelze vyloučit ani drift u finálního záznamového AD převodníku. Všechny tyto jevy povedou na změnu zaznamenané úrovně termálního signálu pro danou teplotu. Dříve popsany test stability vede k logickému závěru, že delší doba měření vede na lepší přesnost, což bychom jistě mohli pozorovat i u běžných odporových teploměrů. Při měření teploty pomocí šumu rezistorů však získáváme velkou výhodu – možnost průběžné automatické kalibrace, která zajistí dlouhodobou stálost parametrů celé měřicí soustavy. Podobnou možnost máme i u elektroniky, která měří odpor platinových čidel, ale přesto je zde rozdíl. Teoreticky, kalibrační křivka platinového čidla se může s časem změnit. Úroveň šumu rezistoru však nikoli. Základní princip průběžné kalibrace spočívá v tom, že se vstup zesilovačů periodicky přepojuje mezi snímacím rezistorem a referenčním generátorem šumu, přičemž parametry šumu jsou dopředu známy. Vyhodnocovací elektronika pak koriguje měřený signál podle referenčního. Tento postup byl dříve použit u špičkových měření v laboratořích NIST, jejichž výsledkem je hodnota Boltzmannovy konstanty a generátor šumu byl založen na supravodivých Josephsonových přechodech. I když použijeme výrazně jednodušší řešení, můžeme získat měřicí aparaturu s přesností srovnatelnou s platinovými čidly a současně s velmi dobrou dlouhodobou stálostí. Navrhované řešení předpokládá využití binárního deterministického generátoru bílého šumu. Lze ukázat, že existuje taková binární sekvence, jejíž frekvenční spektrum je ploché, přesněji řečeno hřebenové. Snadno lze vyrobit generátor šumu, jehož frekvenční oblast bude pokrývat celou zpracovávanou šířku pásma při měření šumu rezistorů, a vytvoří se tak umělý šum, který se velmi podobá termálnímu šumu a kterým lze zesilovací sestavu kalibrovat. Velkou výhodou je fakt, že binární šum obsahuje pouze dvě úrovně napětí – jedna a nula. Vlastnosti šumu jsou určeny pouze jednou jedi-

nou napěťovou úroveň, která odpovídá logické jedničce. Samotný binární generátor bílého šumu je možné naprogramovat do jednočipového mikropočítače Arduino anebo využít již hotový generátor signálu. Právouhlý signál musí mít dobře definovanou úroveň, a proto byl vyroben elektronický modul, který tuto funkci zajišťuje. Signál z generátoru je přiveden na vstup modulu a spíná MOSFET, který přivádí na výstup buď (téměř) nulové napětí anebo výstup z napěťové reference LT1021-5. Právě tato napěťová reference je základem přesnosti celého zařízení. V dokumentaci je uvedena základní přesnost 0,05%. Pokud tento údaj převedeme na termodynamickou teplotu, jedná se o odchylku 0,15 °C při běžných teplotách kolem 300 K. Zásadnější je však dlouhodobý drift, který je u této komponenty uveden 15 ppm za 1000 hodin. Referenční napětí je následně výrazně sníženo pomocí odporového děliče na úroveň 2 μV, což odpovídá úrovni šumu, kterou očekáváme u snímacích rezistorů. Dlouhodobý drift bude určen pravděpodobně pouze driftem napěťové reference, protože u kvalitních rezistorů je jejich odpor výrazně stabilnější. Pro hrubou představu, 15 ppm v termodynamické škále představuje odchylku 0,00045 °C v okolí běžných teplot. Upravovač napěťových úrovní bude, podobně jako samotné rezistory, velmi náchylný na okolní rušení, protože na jeho výstupu bude velmi malé napětí. Proto byl modul koncipován tak, aby byl stíněný a zcela galvanicky oddělený od okolí.

Některé konstrukční detaily jsou patrné na fotografiích 31:



Obrázek 31: Modul pro úpravu napěťových úrovní pseudonáhodného signálu

Vstup je řešen pomocí optického vlákna s konektorem TOSLINK. Systém TOSLINK je určen k přenosu digitálního signálu, čehož lze využít, protože šum z generátoru obsahuje pouze dvě napěťové úrovně. Celý obvod je napájen ze dvou lithiových baterií, čímž je zajištěno kompletní galvanické oddělení. Elektronika je uzavřena do krabice z hliníku a předpokládá se další uložení do hlavního stínícího boxu.

Popsaný šumový kalibrátor je použitelný pro všechny typy teploměřů a jejich zesilovačů, které jsou v této práci uvedeny.



3. DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

Výsledky řešení projektu jsou popsány v předchozích kapitolách v rámci diskuse jednotlivých technických řešení.

Využití Johnsonova šumu k měření teploty je velmi zajímavou alternativou ke stávajícím metodám. Umožňuje výpočet termodynamické teploty přímo ze základních fyzikálních zákonů. Nespolehá na empiricky získané polynomiální závislosti, jako je tomu například u platinových čidel. Při využití šumu rezistoru lze vyrobit etalon pro téměř libovolný teplotní bod.

Šumový teploměr může být navržen tak, aby pro svou funkci nevyžadoval vůbec žádný přírodní artefakt, nicméně tento druh není v tomto projektu zahrnut, protože ke své funkci potřebuje komplikovaný etalon šumu.

V tomto projektu jsou popsány dva další druhy. Jednodušší z nich obsahuje pouze jeden zesilovač a pro kalibraci vyžaduje dva teplotní body. Vlastní šum zesilovače se přičítá k šumu rezistoru a tudíž je takový obvod závislý na teplotě samotného zesilovače. Teplotu elektroniky je proto nutno stabilizovat termostatem.

Další typ je nutno kalibrovat pouze jedním teplotním bodem, například ledovou tříští. Základem jsou dva nezávislé zesilovače, z nichž každý zesiluje tentýž šum ze snímacího rezistoru. Lze matematicky dokázat, že pomocí dvou zesilovačů a tzv. korelátoru je možné měřit šum rezistoru, aniž by výsledek byl ovlivněn vlastním šumem kteréhokoli zesilovače.

V rámci projektu bylo provedeno velké množství experimentální práce s cílem porovnat jednotlivé varianty teploměrů a ověřit jejich technickou proveditelnost. K tomu, aby teploměr byl reálně použitelný, musí splňovat řadu vlastností, přičemž jednotlivé varianty zřídka splňovaly vše potřebné. Mnohá měření provázely neúspěchy a bylo zřejmé, že testovaná varianta trpí zásadními nedostatky. V některých případech naopak vlastnosti předčily očekávání a nejslabším článkem pak bylo referenční či kalibrační zařízení, které svou přesností nedostačovalo k tomu, aby sledovaný parametr bylo možné stanovit.

Jedním z parametrů je konvergence teploty. U šumového teploměru platí, že jeho nejistota klesá s odmocninou z měřící doby. Byť toto tvrzení patří mezi základní zákony statistiky a platí pro každý měřicí přístroj, právě u šumového teploměru je tato zákonitost velmi dobře patrná. Byla provedena řada experimentů, které měly ukázat rychlost konvergence teploty, tj. dobu, za kterou nejistota klesne na požadovanou úroveň. Tato úroveň však nemůže být libovolně nízká, ale v důsledku okolních vlivů existuje její dolní hranice. To je též velmi významný parametr, který je nutno změřit. Nejlepší z testovaných teploměrů byl jednokanálový obvod, jehož první stupeň tvořil přístrojový zesilovač AD8429. Během jedné minuty poklesla nejistota na 0,1 stupňů, po deseti minutách měření na 35 mK a po tříhodinovém měření se nejistota ustálila na pouhých 8 mK. Je možné, že takto nízká chyba je částečně dílem náhody, protože je obtížné docílit takto stabilní teplotu lázně. Měření se však podařilo zopakovat a také pořádit příslušné záznamy dat. Při takto nízké nejistotě by bylo možné uvažovat o realizaci etalonu některého teplotního bodu, což by jistě našlo své uplatnění v metrologii.

Další ukazatel správné funkce teploměru je nezávislost kanálů u dvoukanálové varianty, u níž je klíčové, aby se zesilovače nijak neovlivňovaly. Oba jsou velmi citlivé a snadno může signál proniknout z jednoho kanálu do druhého. Byla provedena řada testů, při nichž žádný ze zesilovačů neměl reagovat na vypnutí a zapnutí či zkratování vstupů druhého z nich. V některých případech bylo měření uspokojivé, jinde testy odhalily nedostatečné oddělení signálových cest. Bohužel se též ukázalo, že měřící sestava nejprve vykazovala správnou funkci a po pořízení řady měření vyšlo najevo, že zesilovače se ovlivňují a získaná data je nutno považovat buď za úplně bezcenná anebo z nich získat pouze omezené informace. Pravděpodobně došlo k nějakému poškození elektroniky.

Dále byla sledována odolnost proti vnějšímu rušení. Pro tento účel byl naprogramován analyzátor, který opakovaně průměroval frekvenční spektra naměřených signálů a po delší době bylo patrné, zda se ve spek-



tru objevují frekvence, které zjevně pocházejí z okolního rušení. V mnoha případech bylo mimořádně obtížné celou měřicí sestavu dostatečně odstínit. Opět platí, že i nepatrným rušením jsou naměřená data znehodnocena. I přes dodržení řady zásad pro citlivá měření byla měřicí sestava náchylná na rozsvícení světel, zapojené spínané zdroje, těžko odstranitelné zemní smyčky, mikropočítač Arduino zajišťující termoregulaci a podobně. Další komplikace vyplývaly z toho, že samotná kalibrační pec je silným zdrojem rušení, což znemožnilo provádění mnoha experimentů. Přesto se některá měření podařilo úspěšně provést, což znamená, že elektromagnetické rušení představuje sice vážný problém, ale nikoli neřešitelný.

Mezi další důležité vlastnosti patří reprodukovatelnost a dlouhodobá stabilita. S odstupem několika dní bylo provedeno stejné měření s cílem ověřit, zda se zjištěné hodnoty neodlišují. Prvotní testy nedopadly nejlépe a též jednodenní experiment poukázal na vytrvalý drift hodnot. Problém se podařilo vyřešit dodatečnou teplotní stabilizací elektroniky, a také teplotní stabilizací prostoru uvnitř skříně řídicího počítače, kde se nacházela měřicí karta. Teplotní stabilizace se ukázala být nutou podmínkou i pro dvoukanálové měření, které by dle předpokladů mělo být méně náchylné na teplotu jednotlivých zesilovačů, ale přesto termoregulace výrazně napomáhá stabilitě.

Zásadní parametr pro šumový teploměr je linearita. Tato vlastnost je jeho velkou předností, protože úroveň šumu je vypočitatelná pomocí základních fyzikálních vztahů přímo z termodynamické teploty. Lineární odezva platí pro širokou škálu teplot – od kryogenních teplot až po stovky stupňů Celsia nebo i vyšší. Linearita je také zcela zásadní, pokud by šumový teploměr měl sloužit jako etalon pro určitý teplotní bod. Bohužel, právě lineární odezva se u mnoha experimentů nepotvrdila. Taktéž kalibrační přímka u dvoukanálového teploměru neprocházela počátkem souřadné soustavy, a to u žádné z testovaných variant. Příčinou neúspěchu bylo nepochybně elektromagnetické rušení a také nedostatečné oddělení signálových cest. Testy linearity si vyžádaly mnoho času a také dodatečných úprav měřicí sestavy. Jeden z experimentů však nakonec vedl ke skvělému výsledku. Jednalo se o jednocanálové měření při použití zesilovače, jehož první stupeň tvořila čtveřice paralelně zapojených operačních zesilovačů OPA828 se vstupními FET tranzistory. Testovaly se tři teplotní body v rozmezí 60 stupňů. Kalibrační pec nebyla použita pro své velké elektromagnetické rušení a namísto toho bylo vyrobeno nové kalibrační zařízení s vodní lázní a termostatem, přičemž vše bylo navrženo s ohledem na eliminaci rušivých částí. Naměřená maximální odchylka od proložené přímky činila méně než jeden milikelvin. Výsledek se zdá být vynikající, ale své dílo musela sehrát i náhoda. Krom toho, u referenčního teploměru Greisinger GMH 3700 očekáváme chybu 50 mK. Měření by tedy bylo vhodné provést mnohem precizněji, ale přesto je zřejmé, že šumový teploměr je schopen dosáhnout pozoruhodných výsledků.

U každého měřicího přístroje je vhodné mít možnost ověřit, zda se nezměnily některé jeho parametry. U popsaných měřicích sestav může snadno dojít ke dlouhodobým driftům, které by mohly zůstat bez povšimnutí. Jako doplněk ke všem typům šumových teploměrů byl proto navržen a vyroben generátor šumu, který se zapojuje místo snímacího rezistoru a simuluje jeho termální šum. Generátor šumu je pečlivě odstíněn od okolí, je napájen z baterií, signálové cesty jsou řešeny pomocí optického vlákna a navíc obsahuje komponenty s velmi nízkým driftem.

Jedno z doplňujících měření bylo provedeno s použitím jednodeskového mikropočítače Red Pitaya. Jednalo se spíše o zajímavost pro případ, že celý šumový teploměr bude koncipován jako levný a snadno přenositelný. Mikropočítač Red Pitaya obsahuje dva nezávislé AD převodníky a programovatelné hradlové pole (FPGA), které dokáže v reálném čase zpracovávat signál z obou kanálů. S využitím některých matematických vlastností šumu se podařilo sestavit relativně jednoduchý algoritmus, který byl schopen běžet na mikropočítači Red Pitaya a úspěšně vypočítával teplotu snímacího rezistoru. Krajiná chyba měření byla značná, a to 0,36 stupňů, avšak příčinou chyby bylo nepochybně opět elektromagnetické rušení, nikoli samotná Red Pitaya.

Posledním z řešených úkolů byla kalibrace sondy pro skenovací termální mikroskopii. Jedná se o pozoruhodnou aplikaci měření šumu, při které se sonda stává sama o sobě kalibračním zařízením a zcela



odpadá použití nezávislého teploměru. Běžný typ kalibrace představuje měření závislosti elektrického odporu sondy na teplotě, zatímco při měření šumu jde o závislost elektrického odporu na úrovni šumu. Při pokusu provést zmiňovaný typ kalibrace se ukázaly vážné problémy týkající se rušení, protože tvar sondy neumožňoval zajistit dostatečné stínění. Bylo nutné zcela odpojit hlavní součásti termostatu, a to elektronický teploměr a odporový drát zajišťující vyhřívání. Teprve tímto krokem se sice podařilo rušení eliminovat, ale nebylo možné provést kalibraci. Bylo provedeno alespoň ilustrativní měření. Termální sonda byla vložena do měděného bloku, který byl vyhřátý na 70 °C a následně postupně vychládal. Během tohoto procesu se zaznamenával termální šum sondy. Výsledné měření jednoznačně dokládá, že základní princip je použitelný. Předchozí zkušenosti se šumovými teploměry vedou k přesvědčení, že problémy s rušením jsou řešitelné, a tak lze i tento částečný výsledek považovat za unikátní v oblasti termální mikroskopie.

Veškeré provedené experimenty s měřením teploty pomocí šumu ukazují, že je možné sestavit teploměr na bázi Johnsonova šumu. Mezi sledované parametry patřila například rychlost konvergence, která u nejzdařilejší varianty představovala pokles nejistoty na 35 mK během deseti minut a dolní limit nejistoty činil 8 mK po tříhodinovém testu. Po mnoha neúspěších se podařilo dosáhnout i skvělé linearity. Z výpočtů vycházelo, že v rozmezí 60 stupňů nebyla odchylka od přímky větší než 1 milikelvin, což je nutno brát s rezervou, protože referenční teploměr měl nejistotu 50 mK.

Bezpochyby lze tvrdit, že šumový teploměr může konkurovat běžně používaným platinovým čidlům Pt100 a může sloužit i k jejich kalibraci. Nejistota platinových teploměrů narůstá na obě strany od teplotního bodu 0 °C, a tak především v oblasti nízkých či vysokých teplot je šumový teploměr velmi výhodný, protože tímto nedostatkem netrpí. Jeho linearita je zajištěna bez ohledu na teplotu přímo z fyzikálních zákonů.



4. ČERPANÉ NÁKLADY NA ÚKOL

Tabulka 2: Tabulka plánovaných a čerpaných nákladů (v tis. Kč):

		Plán	Odhad čerpání do 31. 12. 2021
Cena hodin	tis. Kč	1000	1000
Materiál	tis. Kč	200	200
Externí kooperace	tis. Kč		
Výdaje na porovnání v zahraničí	tis. Kč		
Interní kooperace se střediskem 6036	tis. Kč	100	100
Cestovné zahraniční	tis. Kč		
Celkem	tis. Kč	1300	1300

Většina výdajů byla čerpána formou hodin. Interní kooperace probíhala s Oddělením teploty ČMI. Materiál byl použit na stavbu jednotlivých experimentálních zařízení zmíněných v technické části zprávy.

	Český metrologický institut Oblastní inspektorát Brno	Zpráva úkolu TR č. 6014-TR-Z0002-21	Počet příloh: 1 Počet listů: 51/54
--	---	---	---------------------------------------

5. ZÁVĚR

Jak je uvedeno v předchozích kapitolách, v rámci řešení projektu bylo dosaženo následujících cílů:

- Bylo ověřeno, že lze sestavit nízkonákladový šumový teploměr, jehož přesnost je lepší, než u platinových čidel třídy A. Šumový teploměr je obzvláště vhodný pro kryogenní teploty.
- Šumové teploměry mají pomalou odezvu a nejistota měření klesá s odmocninou doby měření. Přesto se ukázala rychlost reakce jako dostatečná pro téměř všechny metrologické a kalibrační účely.
- Šumový teploměr je založen na základním fyzikálním principu, díky čemuž lze teplotu vypočítat bez použití empiricky získaných koeficientů. Šumový teploměr má lineární odezvu, což bylo po mnoha neúspěších nakonec potvrzeno. Přesnost linearity by bylo vhodné zopakovat s preciznějším vybavením, protože výsledky předčily očekávání.
- Nepodařilo se sestavit dvoukanálovou variantu teploměru za využití korelátoru, ale i jednobanální varianta vykazuje dobré výsledky.
- Principiálně se potvrdilo, že sondy pro termální mikroskopii lze kalibrovat pomocí jejich vlastního šumu. Kalibrační křivku se však nepodařilo stanovit z důvodu nedostatečného elektromagnetického stínění.
- Byl sestaven dlouhodobě stabilní šumový generátor pro ověřování šumových teploměrů.

Seznam bibliografických citací


- [1] TJ Quinn and JP Compton. The foundations of thermometry. *Reports on Progress in Physics*, 38(2):151, 1975.
- [2] Carl B Boyer. History of the measurement of heat i. thermometry and calorimetry. *The Scientific Monthly*, 57(5):442–452, 1943.
- [3] Martin K Barnett. The development of thermometry and the temperature concept. *Osiris*, 12:269–341, 1956.
- [4] WE Knowles Middleton. *A history of the thermometer and its use in meteorology*, volume 10. JHU Press, 1966.
- [5] J Fischer and B Fellmuth. Temperature metrology. *Reports on progress in physics*, 68(5):1043, 2005.
- [6] Joachim Fischer. The boltzmann constant for the definition and realization of the kelvin. *Annalen der Physik*, 531(5):1800304, 2019.
- [7] Henry E Sostmann and John P Tavener. Fundamentals of thermometry part i: The absolute or thermodynamic kelvin, temperature scale. *Isotech Journal of Thermometry*, pages 1–18, 1990.
- [8] KH Berry. Npl-75: a low temperature gas thermometry scale from 2.6 k to 27.1 k. *Metrologia*, 15(2):89, 1979.
- [9] RE Edsinger and JF Schooley. Differences between thermodynamic temperature and t (ipts-68) in the range 230 c to 660 c. *Metrologia*, 26(2):95, 1989.



- [10] Wikipedia contributors. Clausius–mossotti relation — Wikipedia, the free encyclopedia, 2021. [Online; accessed 3-November-2021].
- [11] G Casa, A Castrillo, Gianluca Galzerano, R Wehr, Andrea Merlone, D Di Serafino, Paolo Laporta, and L Gianfrani. Primary gas thermometry by means of laser-absorption spectroscopy: determination of the boltzmann constant. *Physical review letters*, 100(20):200801, 2008.
- [12] Eugenio Fasci, Maria Domenica De Vizia, Andrea Merlone, Luigi Moretti, Antonio Castrillo, and Livio Gianfrani. The boltzmann constant from the h₂ 18o vibration–rotation spectrum: complementary tests and revised uncertainty budget. *Metrologia*, 52(5):S233, 2015.
- [13] RL Rusby, RP Hudson, M Durieux, K Grohmann, HJ Jung, PPM Steur, and JV Nicholas. The status of thermodynamic thermometry. *Metrologia*, 33(4):409, 1996.
- [14] Bernd Fellmuth, Ch Gaiser, and Joachim Fischer. Determination of the boltzmann constant—status and prospects. *Measurement Science and Technology*, 17(10):R145, 2006.
- [15] Jifeng Qu, Samuel P Benz, Kevin Coakley, Horst Rogalla, Weston L Tew, Rod White, Kunli Zhou, and Zhenyu Zhou. An improved electronic determination of the boltzmann constant by johnson noise thermometry. *Metrologia*, 54(4):549, 2017.
- [16] Michael de Podesta, Robin Underwood, Gavin Sutton, Paul Morantz, Peter Harris, Darren F Mark, Finlay M Stuart, Gergely Vargha, and Graham Machin. A low-uncertainty measurement of the boltzmann constant. *Metrologia*, 50(4):354, 2013.
- [17] Michael de Podesta, Inseok Yang, Darren F Mark, Robin Underwood, Gavin Sutton, and Graham Machin. Correction of npl-2013 estimate of the boltzmann constant for argon isotopic composition and thermal conductivity. *Metrologia*, 52(5):S353, 2015.
- [18] Laurent Pitre, Fernando Sparasci, Daniel Truong, Arnaud Guillou, Lara Risegari, and Marc E Himbert. Measurement of the boltzmann constant using a quasi-spherical acoustic resonator. *International Journal of Thermophysics*, 32(9):1825–1886, 2011.
- [19] Christof Gaiser, Thorsten Zandt, Bernd Fellmuth, Joachim Fischer, Otto Jusko, and Wladimir Sabuga. Improved determination of the boltzmann constant by dielectric-constant gas thermometry. *Metrologia*, 50(6):L7, 2013.
- [20] Laurent Pitre, Mark D Plimmer, Fernando Sparasci, and Marc E Himbert. Determinations of the boltzmann constant. *Comptes Rendus Physique*, 20(1-2):129–139, 2019.
- [21] Billy W Mangum, GT Furukawa, Kenneth G Kreider, Christopher W Meyer, Dean C Ripple, Gregory F Strouse, Weston L Tew, MR Moldover, B Carol Johnson, Howard W Yoon, et al. The kelvin and temperature measurements. *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, 106(1):105, 2001.
- [22] Hugh Preston-Thomas et al. The international temperature scale of 1990(its-90). *metrologia*, 27(1):3–10, 1990.
- [23] Dr P Chappuis. *Études sur le thermomètre à gaz et comparaison des thermomètres à mercure avec le thermomètre à gaz, par MP Chappuis...* Gauthier-Villars et fils, 1888.
- [24] H Preston-Thomas, TJ Quinn, and JP Compton. International practical temperature scale of 1968. *Metrologia*, 5:35, 1969.



- [25] Wikipedia contributors. Johnson–nyquist noise — Wikipedia, the free encyclopedia, 2021. [Online; accessed 13-October-2021].
- [26] R Bowling Barnes and S Silverman. Brownian motion as a natural limit to all measuring processes. *Reviews of Modern Physics*, 6(3):162, 1934.
- [27] Martin Niss. Brownian motion as a limit to physical measuring processes: A chapter in the history of noise from the physicists' point of view. *Perspectives on Science*, 24(1):29–44, 2016.
- [28] John B Johnson. Thermal agitation of electricity in conductors. *Nature*, 119(2984):50–51, 1927.
- [29] John Bertrand Johnson. Thermal agitation of electricity in conductors. *Physical review*, 32(1):97, 1928.
- [30] Harry Nyquist. Thermal agitation of electric charge in conductors. *Physical review*, 32(1):110, 1928.
- [31] Walter Schottky. Über spontane stromschwankungen in verschiedenen elektrizitätsleitern. *Annalen der physik*, 362(23):541–567, 1918.
- [32] JF Qu, SP Benz, H Rogalla, WL Tew, DR White, and KL Zhou. Johnson noise thermometry. *Measurement Science and Technology*, 30(11):112001, 2019.
- [33] Nathan E Flowers-Jacobs, Alessio Pollarolo, A Weiss, K Coakley, Anna E Fox, Horst Rogalla, Weston L Tew, and Samuel P Benz. The nist johnson noise thermometry system for the determination of the boltzmann constant. *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, 122(46), 2017.
- [34] Nathan E Flowers-Jacobs, Alessio Pollarolo, Kevin J Coakley, Anna E Fox, Horst Rogalla, Weston L Tew, and Samuel P Benz. A boltzmann constant determination based on johnson noise thermometry. *Metrologia*, 54(5):730, 2017.
- [35] Samuel Benz, D Rod White, JiFeng Qu, Horst Rogalla, and Weston Tew. Electronic measurement of the boltzmann constant with a quantum-voltage-calibrated johnson noise thermometer. *Comptes rendus physique*, 10(9):849–858, 2009.
- [36] DR White, R Galleano, A Actis, H Brixy, M De Groot, J Dubbeldam, AL Reesink, F Edler, H Sakurai, RL Shepard, et al. The status of johnson noise thermometry. *Metrologia*, 33(4):325, 1996.

	Český metrologický institut Oblastní inspektorát Brno	Zpráva úkolu TR č. 6014-TR-Z0002-21	Počet příloh: 1 Počet listů: 54/54
---	---	---	---------------------------------------

PŘÍLOHY

Příloha č. 1 Kopie plánovacího listu

Číslo úkolu*	Název úkolu	Stručná charakteristika úkolu Výsledek řešení úkolu	Termíny řešení		Neinvestič. prostředky tis. Kč
			zahájení	ukončení	
UTR21E601411	Primární realizace jednotky Kelvin v nanometrologii	Cílem úkolu je vytvořit novou koncepci teploměru založené na využití Johnsonova šumu, otestovat ji měřením jeho přesnosti a stability a vytvořit nástroje pro jeho využití při kalibraci sond pro rastrovací termální mikroskopii.	1/2021	12/2021	1 300,-
Předkládá: Český metrologický institut Úsek FM, Okružní 31, Brno 638 00		Bank. spojení / č. Účtu: 70338-621/0100	Č.j.:		
		IČ / DIČ: 00177016 / CZ00177016	Došlo :		
		Odpovědný řešitel: doc. Mgr. Jan Martinek, Ph.D.	Financující organizace: ČMI		
		Podpis :	Poznámka:		
		Tel. / Fax: 545 555 337 / 545 555 183			
		Datum : 27. 7. 2021			

PLÁNOVACÍ LIST ÚKOLU TECHNICKÉHO ROZVOJE

1.1 Hlavní cíle úkolu (důvod zadání úkolu, např. zákonné požadavky, plnění koncepce rozvoje NMS, plnění požadavků CIPM MRA):

V roce 2019 byly na oddělení nanometrologie vytvořeny nástroje pro měření teploty pomocí šumu. Tyto nástroje byly primárně vytvořeny jako součást rozvojového úkolu na redefinici jednotek a to pro účely kalibrace sond termálního mikroskopu. Po následujícím zjednodušení celého zařízení se nicméně nabízí otázka, zda by bylo možné šumový teploměr využít i pro jiná měření v oblasti teploty. Výhodou aktuální koncepce teploměru je především nízká výrobní cena, kromě toho poskytuje mnohé principiální výhody z pohledu metrologické návaznosti. Je nicméně otázkou, nakolik tyto výhody převyšují nevýhody metody, což je zejména malá rychlost měření a mimořádná náchylnost na okolní elektromagnetické rušení.

V rámci řešení úkolu budou vyvinuty různé varianty uspořádání teploměru s ohledem na šum a drift jednotlivých zesilovačů, stínění elektronických komponent a přenositelnost teploměru. Bude také diskutována možnost praktického využití takového teploměru, nejen v oblasti nanometrologie. Cílem úkolu je dále ve spolupráci s oddělením teploty a vlhkosti na OI Brno otestovat metrologické vlastnosti některého z prototypů. Měření by proběhla v teplotní lázni, v rozmezí 20-100 °C a rádi bychom se zaměřili na přesnost a stabilitu navrhovaného řešení šumového teploměru.

Posledním cílem úkolu je vyvinout nástroje pro využití šumového teploměru při kalibraci sond pro rastrovací termální mikroskopii (S_{Th}M), ať už těch, které komerčně vyvíjíme (na bázi platinového drátku o průměru 5 mikrometrů), tak jiných typů (palladiem dopované, křemíkové). Rastrovací termální mikroskopii využíváme v řadě úkolů EMPIR, projektů GAČR a TAČR a je součástí řady plánovaných nových projektů. Termální sondy naší konstrukce nabízíme komerčně (v roce 2020 jsme měli zákazníky z CNRS, Francie). Kalibrace sond jsou problematické, protože je nutné zahřát jen aktivní část sondy (o velikosti cca 1 mikrometr) a znát teplotu, což je s pomocí standardních nástrojů (např. pec) nemožné a je nutné provádět velké množství korekcí. S využitím malého odporového elementu a šumového teploměru by bylo možné výrazně snížit nejistoty měření. Tento přístup by bylo možné dále doplnit měřením pomocí infračervené mikroskopie, vyvinutým v minulých letech.

1.2 Objektivně ověřitelné výsledky řešení úkolu:

- vyvinout nízkonákladovou primární realizaci jednotky Kelvin s využitím Johnsonova šumového teploměru
- otestovat její metrologické vlastnosti
- vyvinout nástroje pro její využití při kalibraci sond pro rastrovací termální mikroskopii.

1.3 Způsob ověření: (uvést neopomenutelné účastníky):

Závěrečná oponentura za účasti oponentů.

1.4 Navrhovaní oponenti úkolu (minimálně 2, podléhají odsouhlasení zadavatelem úkolu):

Prof. RNDr. Miloslav Ohlídál, CSc. , VUT v Brně

Mgr. Petr Klenovský, Ph.D, Masarykova univerzita v Brně

2.1 Dílčí cíle nezbytné k dosažení hlavních cílů úkolu (I. etapa řešení) :

Návrh a výroba zesilovače pro měření Johnsonova šumu rezistoru

2.2 Objektivně ověřitelné ukazatele dílčích cílů

Výsledky testování teplotní závislosti šumové úrovně

2.3 Způsob ověření dílčích cílů

Průběžná oponentura za účasti oponentů.

3. Kalkulace úkolu (rozpis nákladů) a ekonomické zhodnocení (přínos ekonomický): odhad jednorázových nákladů (stroje, zařízení, budovy) a odhad nákladů na projekt (pracovní hodiny, materiál, kooperace)

číslo střediska		6014		
č. úkolu	neuvádět			
počet hodin střediska na celý úkol x sazba		690hx1450Kč=1000		
materiál	tis. Kč	200		
externí kooperace	tis. Kč			
výdaje na porovnání v zahraničí	tis. Kč			
interní kooperace	tis. Kč	100		
kooperující středisko		6036		
cestovné zahraniční	tis. Kč			
celkem	tis. Kč	1 300		

4. Zdroj financování úkolu (v %):

100 % hrazeno z ČMI

5. Praktické využití výsledků řešení a požadavky pro udržitelnost výsledků (včetně vlivu výsledku na životní prostředí):

Výsledky řešení úkolu budou využity při snížení nejistoty při měření teploty v oblasti nanometrologie, kde nepatrné rozměry vzorků komplikují užití běžných metod známých u makroskopických vzorků. Především při užití skenovací termální mikroskopie jako měřicí metody je nutno uvažovat interakci mezi sondou a vzorkem, přičemž obojí je výrazně menší než běžně používané platinové teploměry. Proto může být výhodou, jestliže namísto teploměru bude sloužit mikrorezistor připravený technikami obvyklými v nanotechnologiích.

6. Spoluřešitelé úkolu (uvést rozsah spolupráce-věcný, finanční):

Oddělení 6036 – poskytnutí metrologické návaznosti a konzultace, 100 tis. Kč.

7. Nároky na zahraniční cesty (stát, organizace, délka pobytu, finanční nároky):

- s ohledem na aktuální situaci nejsou

8. Prohlašujeme, že naše organizace současně nenárokovala, resp. nemá přislíbeny finanční prostředky na řešení úkolu ze státního rozpočtu prostřednictvím jiného orgánu státní správy, popř. nevyužila jiné, duplicitní cesty k financování navrhovaného úkolu.

Název, adresa, razítko a podpis statutárního zástupce:

Český metrologický institut
Okružní 31
638 00 Brno

RNDr. Pavel Klenovský
odborný ředitel pro FM

Pozn.: Pokud nestačí formulář, je možno příslušný bod rozvést na další přílohu.