

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra měření

Návrh a implementace teplotní stabilizace observatorního magnetometru

Vojtěch Voska

Vedoucí: Ing. Michal Janošek, PhD.
Obor: Elektrotechnika, energetika a management
Studijní program: Aplikovaná elektrotechnika
Leden 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Voska** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **474387**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Teplotní stabilizace hlavice magnetometru

Název bakalářské práce anglicky:

Temperature stabilization of magnetometer sensor head

Pokyny pro vypracování:

Návrh, testování a implementace teplotní stabilizace mramorové desky se senzorem - cíl $\pm 0,5\text{C}$ max. při $\pm 15\text{C}$ změně teploty okolí. Činnost zahrnuje : identifikaci systému, tepelný model vč. návrhu izolace, model regulace, a implementace regulace hardwarově, testování. Důležitým faktorem je vytápění střídavé s minimálním vyzařovaným elmag polem. Použijte magnetický zesilovač - transduktor pro výkonovou část.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Michal Janošek, Ph.D., katedra měření

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **11.06.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **05.01.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **19.02.2022**

Ing. Michal Janošek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce, Ing. Michalu Janoškovi, PhD., za jeho vedení, rady, rychlé reakce a trpělivost.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 5. ledna 2021

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem a konstrukcí stabilizátoru teploty pro přesný observatorní magnetometr s pomocí transduktoru. Výsledné zařízení musí být vysoce elektromagneticky kompatibilní a musí udržovat magnetometr na co nestabilnější teplotě. Důvody pro teplotní regulaci jsou diskutovány, sestava magnetometru je popsána a teplotní izolace a ohřev jsou navrženy. Transduktor je detailně popsán. Teplotní simulace je provedena k modelování chování systému. Stabilizátor je zkonstruován a jeho řídicí software popsán. Nakonec je stabilizátor vyzkoušen, jeho charakteristiky změřeny a jeho elektromagnetické rušení vyhodnoceno.

Klíčová slova: fluxgate magnetometr, teplotní drift, regulátor teploty, transduktor, elektromagnetická kompatibilita, EMC, izolace, teplotní simulace, PID regulace

Vedoucí: Ing. Michal Janošek, PhD.

Abstract

This thesis deals with the design and construction of a temperature stabilizer for a precise observing magnetometer using a transducer. The device must be highly electromagnetically compatible and must keep the magnetometer at a stable temperature. Reasons for thermal regulation are discussed, the magnetometer assembly is described, and thermal insulation and heating are designed. The magnetic amplifier is described in detail. A thermal simulation is conducted to model the behavior of the system. The thermal stabilization system is constructed, and its control software is described. Finally, the prototype is tested for electromagnetic compatibility and regulative function.

Keywords: fluxgate magnetometer, thermal drift, thermal regulator, transducer, electromagnetic compatibility, EMC, insulation, thermal simulation, PID control

Title translation: Design and Implementation Of Thermal Stabilization System For Observing Magnetometer

Obsah

1 Úvod	1		
2 Teoretická část	3		
2.1 Diskuze zadání	3		
2.2 Sestava magnetometru	4		
2.2.1 Lokalita	4		
2.3 Vliv deviace teploty na magnetometrická měření	4		
2.3.1 Požadavky INTERMAGNET	5		
2.4 Teplotní stabilizace magnetometrů	7		
2.4.1 Pasivní stabilizace	7		
2.4.2 Aktivní stabilizace	8		
2.5 Návrh teplotní stabilizace	10		
2.5.1 Izolace	11		
2.5.2 Toné těleso	11		
2.5.3 Řízení	12		
2.5.4 Měření	12		
2.6 Transduktor	13		
2.6.1 Princip činnosti	14		
2.6.2 Stavby transduktoru	17		
2.6.3 Žádoucí vlastnosti transduktoru	17		
3 Vývoj regulátoru	19		
3.1 3D model	19		
3.2 Simulace	19		
3.2.1 Volba referenční teploty	21		
3.2.2 Idealizovaná simulace	21		
3.2.3 Simulace reálných podmínek	22		
3.3 Prototyp stabilizátoru	23		
3.3.1 Topné těleso a simulátor sestavy magnetometru	24		
3.3.2 Prototyp transduktoru	25		
3.3.3 Výkonový rozsah a řídicí charakteristika	26		
3.3.4 Měření	26		
3.3.5 Řízení a SW	27		
3.3.6 Měření EMC	27		
3.3.7 Závěry prototypu	29		
4 Implementace regulace	31		
4.1 Sestava magnetometru	31		
4.2 Výkonový obvod	31		
4.2.1 Parametry stabilizátoru	32		
4.3 Regulační obvod	33		
4.3.1 Potlačení vlivů vyšších harmonických	33		
4.3.2 Řídicí a měřicí elektronika	34		
4.3.3 Teploměr	35		
4.4 Deska plošných spojů	37		
4.5 Software	37		
4.5.1 PID	37		
4.5.2 Program	38		
5 Testování	41		
5.1 Vyzařované EM rušení	41		
5.1.1 EMI: Transduktor	41		
5.1.2 EMI: Topná tělesa	42		
5.2 Frekvenční analýza topného proudu	43		
5.3 Stabilizace teploty	44		
6 Závěr	49		
A Seznam zkratk	51		
B Literatura	53		

Obrázky

2.1 Fotka umístění sestavy magnetometru v přístřešku na stanici Polom[12].....	5	3.4 Reálná simulace teplotní regulace pro výkon 18 W	23
2.2 Model sestavy magnetometru....	6	3.5 Topné těleso a jeho umístění ...	24
2.3 Hodinová teplotní data ze stanice Polom, leden - prosinec 2019	6	3.6 Simulátor sestavy magnetometru	25
2.4 Numerická kompenzace teplotního driftu na stanici Polom, před kompenzací (a) a po komenzaci (b). B_{diff} je rozdíl proti referenční stanici[12].....	7	3.7 Řídící charakteristika regulátoru	27
2.5 Příklad kontejneru pro uložení magnetometru[11].....	8	3.8 Obvodové schéma prototypu regulace	28
2.6 Foto pasivní stabilizace lahvemi s vodou	9	3.9 Regulovaná teplota finální verzí prototypu.....	28
2.7 Efekt pasivní stabilizace lahvemi s vodou[13]	9	3.10 Schéma zapojení pro měření EMC.....	29
2.8 Bifilárně navinutý vodič	10	3.11 Měření na padu	29
2.9 Schéma návrhu teplotní stabilizace	10	3.13 Podoba prototypu	30
2.10 Tepelná fólie se zvýrazněním trasy odporového vodiče (vlevo) [29]....	11	4.1 Schéma stabilizátoru	32
2.11 Vysoce obdélníková hysterezní křivka vhodná pro jádro transduktoru[22]	13	4.2 Schéma řídicího obvodu	33
2.12 Křivka permeability[22].....	13	4.3 Fotky izolace, sestavy magnetometru a stabilizátoru	34
2.13 Schéma saturovatelného reaktoru[23]	15	4.4 Fotka stabilizátoru.....	35
2.14 Typický transduktor	16	4.5 Proudová (vlevo) a výkonová (vpravo) řídicí charakteristika transduktoru	35
2.15 Kontrolní charakteristika transduktoru[22]. Proud I_L je posunut od nuly	17	4.6 Průběh napětí na řídicí straně transduktoru při svorkách naprázdno (po kompenzaci dalším vinutím) ..	36
2.16 Průběhy proudů a toků v transduktoru řízeném střídavým proudem[22].....	18	4.7 Wheatstoneův můstek[10].....	36
3.1 Rozměry sestavy magnetometru (milimetry)	20	4.8 Deska plošných spojů - schéma (vlevo) a foto (vpravo).....	37
3.2 Schéma tepelné simulace.....	21	4.9 Diagram PID regulace[6].....	38
3.3 Idealizovaná simulace teplotní regulace	22	4.10 Algoritmus řídicího SW.....	39
		5.1 Náčrt konfigurace pro měření...	42
		5.2 EMI: Transduktor	43
		5.3 Spektrum rušení 2 metry od transduktoru	43
		5.4 EMI: Topná tělesa	45
		5.5 Jednotlivé harmonické podle výkonu	46

5.6 Průběh proudu zátěží (vlevo) a jeho spektrální výkonová hustota (vpravo)	47
5.7 Stabilizovaná teplota (30 vzorků za minutu)	47

Tabulky

2.1 Požadavky INTERMAGNET na vektorový magnetometr (2012) [27].	7
3.1 Parametry dvojice topný fólií v sérii	24
3.2 Parametry transformátorů v prototypu transduktoru	25
5.1 Amplitudy magnetického pole topného tělesa při harmonických frekvencích	42
A.1 Seznam zkratk	52

Kapitola 1

Úvod

Pro kvalitu měření zemského magnetického pole a jeho variací v důsledku denního cyklu, geomagnetických bouří, sluneční aktivity atd. je stěžejní nepřítomnost vnějšího rušení a teplotní stálost prostředí, v němž je magnetometr instalován. Zdrojem rušení, které se projevuje v širokém frekvenčním spektru, je především lidská civilizace – populační centra, vedení a dopravní tepny. Magnetometry se proto instalují v geograficky odlehlých lokalitách[12]. Problém teplotní nestálosti se takto ale vyřešit nedá.

Průmyslovým standardem geomagnetických observatoří jsou fluxgate magnetometry, které jsou velice citlivé na teplotu[22]. Vlivem teplotní roztažnosti se totiž mění rozměry cívek magnetometru, což způsobuje teplotní drift neboli změnu výstupu magnetometru v závislosti na jeho teplotě. V závislosti na konstrukci magnetometru může být teplotní drift natolik významný, že znehodnotí celé měření. Magnetometr je proto třeba teplotně stabilizovat.

Ke stabilizaci lze přikročit pasivně nebo aktivně. Pasivní stabilizací se rozumí ochrana před počasím a slunečním zářením a izolace, v praxi to obvykle znamená zakopání magnetometru pod zem. Dokáže zajistit stabilitu v řádech jednotek stupňů při minimálních udržovacích nákladech[13]. Pokud to však nestačí, je nutné přikročit k aktivní stabilizaci, tedy dodávání tepla z vnějšího zdroje pomocí termostatu.

Cílem této práce je navrhnout a implementovat aktivní teplotně stabilizační systém pro observatorní fluxgate magnetometr na meteorologické stanici Polom, který udrží teplotu magnetometru v rozmezí $\pm 0,5$ stupně Celsia při vnějších podmínkách, které lze na stanici očekávat. Taková teplotní stabilita by měla zajistit snížení odchylky měření vlivem teplotního driftu pod 5 nT, což je v souladu s podmínkami stanovenými mezinárodní organizací INTERMAGNET, jejíž specifikace se dají považovat za standard pro observatorní magnetometry[27].

Protože přítomnost elektronického stabilizátoru poblíž magnetometru s sebou nese hrozbu znehodnocení dat, je stěžejním tématem této práce elektromagnetická kompatibilita (EMC). Je to rovněž důvod pro volbu poněkud zastaralé formy regulace střídavého proudu, transduktoru.

První část práce se věnuje teplotnímu driftu a z něho plynoucím důvodům

teplotní stabilizace, problému elektromagnetického rušení a popisu observatoře v Polomu. Dále je popsán návrh stabilizace a je vysvětlen princip a funkce transduktoru. V dalších částech je popsán vývoj prototypu a posléze konečné verze stabilizátoru podle návrhu. V poslední části je pak stabilizátor testován a jím vyzařované magnetické pole změřeno.

Kapitola 2

Teoretická část

2.1 Diskuze zadání

Cílem bakalářské práce je vyvinout systém tepelné stabilizace pro magnetometr. Tento systém musí splňovat následující dva požadavky:

- minimální deviaci od zvolené teploty, nejvíce však $\pm 0,5$ °C při dlouhodobé změně okolní teploty o až 15 °C,
- minimální elektromagnetické rušení.

Z prvního kritéria vyplývá požadavek na zajištění vhodných tepelných vlastností hlavice magnetometru. Těmito vlastnostmi je izolace a dodání tepla.

Izolace minimalizuje vliv změny okolní teploty na teplotu zařízení, a zároveň umožní zjednodušit návrh ohřevu. Úroveň izolace pak určí potřebný ohřívací výkon, který kompenzuje teplo ztracené do okolí. Magnetometr bude uchováván při stálé teplotě, která převyšuje nejvyšší přirozenou teplotu lokality.

Druhé kritérium má vliv na charakter regulace zařízení a samotný způsob ohřevu. Je nutné navrhnout ohřev tak, aby vyzařoval co nejméně elektromagnetické energie do svého okolí, a tím vnášel rušení do dat magnetometru.

Pro splnění zadání tedy bude nutné:

- získat data o teplotě v lokalitě,
- tepelně simulovat zařízení,
- navrhnout izolaci,
- navrhnout způsob ohřevu,
- navrhnout způsob regulace,
- zařízení postavit a naprogramovat,

- zařízení otestovat na funkčnost a elektromagnetickou kompatibilitu (EMC).

2.2 Sestava magnetometru

Magnetometr instalovaný na stanici Polom je vektorový magnetometr vyrobený na ČVUT. Používá nízkošumové fluxgate senzory s oválným (tzv. race-track) detektorem. Senzory mají vlastní šum ≈ 20 pT a vykazují vysokou teplotní a geometrickou stabilitu, přibližně 30 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ [12].

Magnetometr je orientován podle UVZ orientace, tj. obě horizontální osy jsou natočeny o 45° od místního poledníku. Komponenty NET a HDZ magnetického pole jsou dopočítány numericky, což snižuje vliv teplotního driftu a mechanické nestability azimutu[12].

Magnetometr je upevněn na sensorové hlavě ze strojně opracovatelné keramiky MACOR, která je zasazena do trojúhelníkové desky z mramoru. Deska stojí na trojici polohovatelných mosazných nohou. Celá sestava je umístěna v ochranném přístřešku z PVC, který chrání sestavu před vlivy počasí a poskytuje rudimentární tepelnou izolaci, viz Obr. 2.1.[12].

2.2.1 Lokalita

Stanice Polom je odloučené pracoviště Vojenského geografického a hydrometeorologického úřadu v Dobrušce. Je to seismologická a meteorologická stanice, nacházející se v podzemní a nadzemní části bývalého pěchotního srubu v Orlických horách na severovýchodě Čech. Slouží potřebám Armády České republiky (AČR), které souvisí s geofyzikálním zabezpečením a speciálními monitorovacími službami[1]. Stanice je dostatečně vzdálena od frekventovaných silnic a trakční soustavy[12].

Teplotní data z roku 2019 v hodinových intervalech mi laskavě poskytla meteorologická stanice a jsou na Obrázku 2.3. Teploty na stanici Polom kolísaly od přibližně 30 $^{\circ}\text{C}$ do -12 $^{\circ}\text{C}$. Rozdíl teplot mezi dnem a nocí dosahoval až 20 $^{\circ}\text{C}$.

2.3 Vliv deviace teploty na magnetometrická měření

Fluxgate magnetometry jsou založeny na nelineární magnetizaci magneticky měkkých materiálů. Sestávají z magnetického jádra s vysokou permeabilitou, na němž jsou dvě vinutí - excitační a sběrné. Excitační cívkou protéká střídavý proud o známé frekvenci tak, aby docházelo k saturaci jádra. Pokud je magnetometr ve vnějším magnetickém poli, na sběrné cívce lze naměřit signál, který obsahuje frekvenci excitačního proudu a vyšší harmonické frekvence,



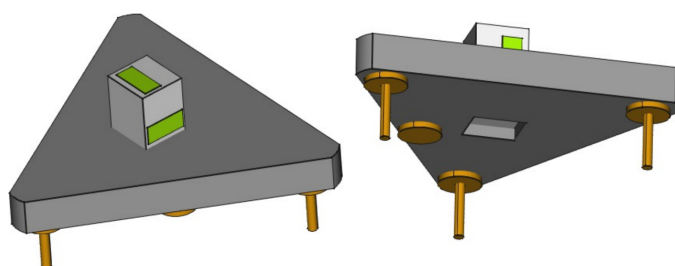
Obrázek 2.1: Fotka umístění sestavy magnetometru v přístřešku na stanici Polom[12]

zejména druhou, které korespondují s vnějším magnetickým polem. Tyto frekvence jsou izolovány, filtrovány a integrovány, čímž se získá stejnosměrný výstup proporcionalní k velikosti vnějšího magnetického pole. Pro zvýšení linearity systému je sběrná cívka zároveň napájena stejnosměrným proudem proporcionalním k výstupu (dochází tedy ke zpětné vazbě)[24].

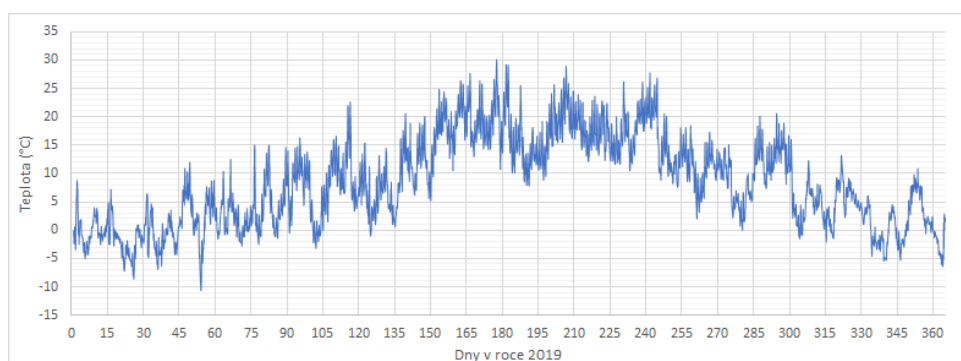
Fluxgate magnetometry jsou velmi citlivé a teplotu. Problémem je především teplotní roztažnost nosné konstrukce cívek senzoru. Při změně jejich rozměrů se mění parametry cívky, čímž dochází v měření k teplotnímu driftu citlivosti. Cívky se proto vinou na teplotně stabilní plasty a keramiky, k úplnému potlačení teplotního driftu to ale nestačí. Další problémy může způsobit teplotní roztažnost samotného podstavce magnetometru, což může narušit nastavené natočení v prostoru[12].

■ 2.3.1 Požadavky INTERMAGNET

INTERMAGNET je globální síť sledující zemské magnetické pole. Stanovuje požadavky, které musí splňovat každá observatoř, která se chce do sítě při-



Obrázek 2.2: Model sestavy magnetometru



Obrázek 2.3: Hodinová teplotní data ze stanice Polom, leden - prosinec 2019

pojit. Taková observatoř pak může nosit titul *INTERMAGNET Magnetic Observatory (IMO)*[27]. Požadavky INTERMAGNET stanovují, že observatoř musí být vybavena vektorovým magnetometrem a sbírat minutová data s rozlišením 0,1 nT, dostupná online do 72 hodin po získání. Magnetometr musí splňovat specifikace týkající se přesnosti a stability, které jsou shrnuty v Tabulce 2.1.

Stěžejní z hlediska této práce je požadavek na přesnost. Magnetometr na Polomu nespĺňuje požadavek na teplotní stabilitu, neboť jeho teplotní drift je 30 ppm/K[12]. To při velikosti vertikální složky magnetické indukce Země v ČR $\approx 40 \mu\text{T}$ znamená teplotní drift dB_t přibližně

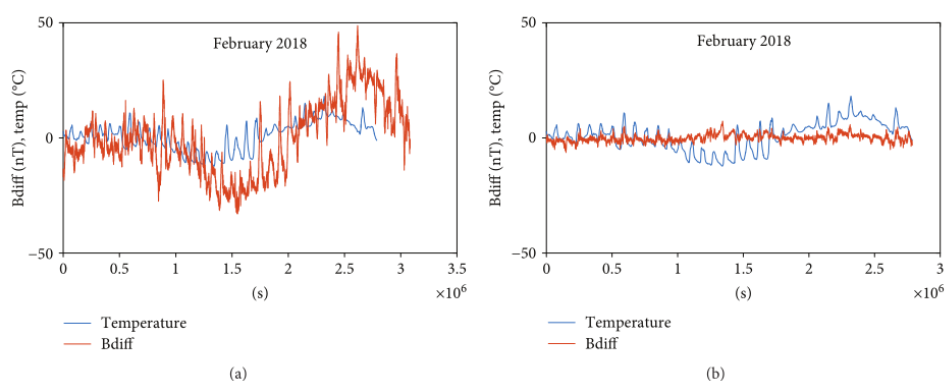
$$dB_t = (40 \mu\text{T}) \left(30 \frac{10^{-6}}{\text{K}} \right) = 1,2 \text{ nT K}^{-1} \quad (2.1)$$

Z této rovnice je patrné, že aby splnil požadavek na přesnost $B_A = 5 \text{ nT}$, musí být magnetometr teplotně stabilní s odchylkou menší než $\frac{B_A}{dB_t} = \frac{5}{1,2} = 4,17 \text{ K}$, tedy přibližně $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

V současné době je na stanici Polom teplotní drift kompenzován numericky pomocí referenčních měření ze stanice Budkov, s dobrými výsledky - největší odchylka vlivem teplotního driftu je o přibližně 5 nT větší než na referenční stanici při silných mrazech (viz Obrázek 2.4)[12]. To pro splnění požadavků ale nestačí.

Přesnost	5 nT
Rozlišení	0,1 nT
Šířka pásma	DC - 0,1 Hz
Vzorkování	1 Hz
Teplotní stabilita	0,25 nT / K

Tabulka 2.1: Požadavky INTERMAGNET na vektorový magnetometr (2012) [27]



Obrázek 2.4: Numerická kompenzace teplotního driftu na stanici Polom, před kompenzací (a) a po komenzaci (b). B_{diff} je rozdíl proti referenční stanici[12]

2.4 Teplotní stabilizace magnetometrů

K teplotní stabilizaci se dá přikročit aktivně nebo pasivně. Aktivní stabilizace znamená ohřev, popř. chlazení aparatury za pomoci termostatu, pasivní stabilizace je věcí volby teplotních vlastností. V obou případech je ale nutné magnetometr vhodně umístit, chránit před vnějšími vlivy a tepelně izolovat.

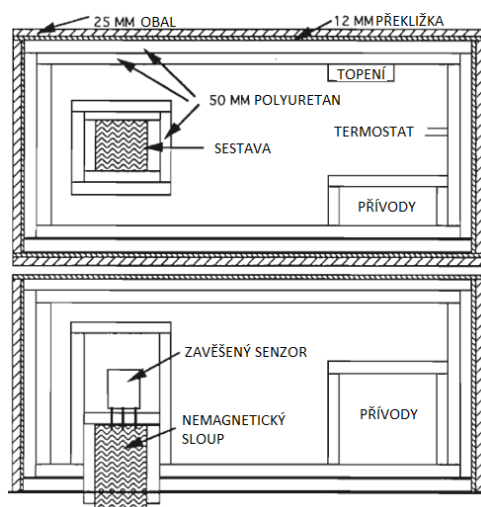
Ochrana před vnější prostředím eliminuje teplotní efekty srážek, větru a především přímého slunečního záření, které výrazně přispívá k denním výkyvům teplot. Zároveň poskytuje základní izolaci. Patrně nejlepší formou ochrany je zakopání pod zem, to však může být nákladné a ztěžuje to přístup k měřicí aparatuře[13].

Izolace zabraňuje úniku tepla do okolí a stabilizuje teplotu aparatury v krátkodobém měřítku. Běžným izolátorem je polystyren, používaný v kon-
zumní i průmyslové sféře.

2.4.1 Pasivní stabilizace

Pasivní stabilizací se rozumí zajištění takových tepelných vlastností sestavy magnetometru, aby se její teplota v čase příliš neměnila, a to bez vnějšího vstupu. Příklad konstrukce kontejneru pro uložení magnetometru je na Obr. 2.5.

Příkladem výborné pasivní stabilizace teploty může být magnetometr



Obrázek 2.5: Příklad kontejneru pro uložení magnetometru[11]

instalovaný v Keetmanshoopu v Namibii týmem Moniky Korte. Magnetometr je uložen v plastovém kontejneru s polystyrenovou izolací, jehož vnitřní prostor je vyplněn lahvemi vodou (viz Obr. 2.6). Kontejner je zakopán pod zemí a je krytý stínící střeškou k omezení výkyvů v důsledku přímého slunečního záření. Voda kolem magnetometru zajistí jeho velkou hmotnost a tím i velkou teplotní setrvačnost. Týmu se tak podařilo dosáhnout dlouhodobé teplotní stability v řádek jednotek stupňů Celsia[13], viz Obrázek 2.7.

■ 2.4.2 Aktivní stabilizace

Aktivní stabilizace znamená udržování sestavy magnetometru na stálé teplotě dodáním tepla pomocí termostatu.

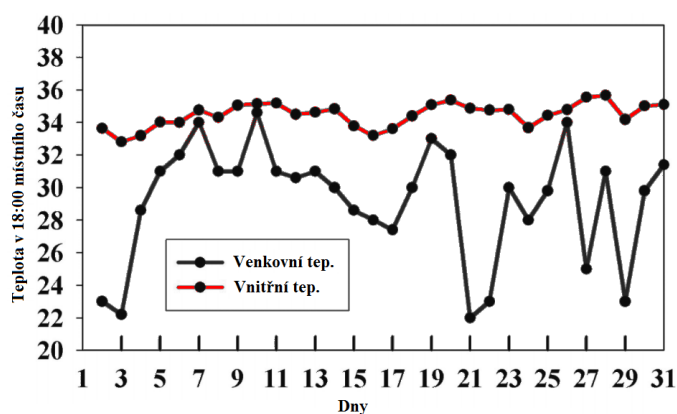
Pro dodání tepla do okolí soustavy lze využít proudění, např. instalací ventilátoru s topným tělesem, či zároveň využít i přenosu tepla radiací, např. pomocí odporových radiátorů. Pro dodání tepla do sestavy vedením při zachování vzdálenosti mezi zdrojem tepla a sestavou lze použít tepelnou trubici, popř. kapalinu a cirkulační čerpadlo. V těchto případech není do blízkosti senzoru zanášeno EM rušení, neboť aparatura ohřevu může být instalována v dostatečné vzdálenosti.

Pro dodání tepla přímo do sestavy magnetometru je nejvhodnější odporový ohřev elektrickým proudem, především pro své kompaktní rozměry. Na podstavec magnetometru, popř. do jeho úložné nádoby se přiloží topné těleso, jehož tepelný výkon bude dán dodávaným proudem z regulátoru umístěného dostatečně daleko na to, aby rušením neznehodnotil měření. Nevýhodou tohoto uspořádání je zanesení potenciálně rušivého elektrického proudu, a tím i magnetického pole do těsné blízkosti magnetometru.

Přímý ohřev podstavce magnetometru pracuje s menším objemem vyhřívaného prostoru, což zároveň znamená menší rozměry izolace. Pořizovací i



Obrázek 2.6: Foto pasivní stabilizace lahvemi s vodou



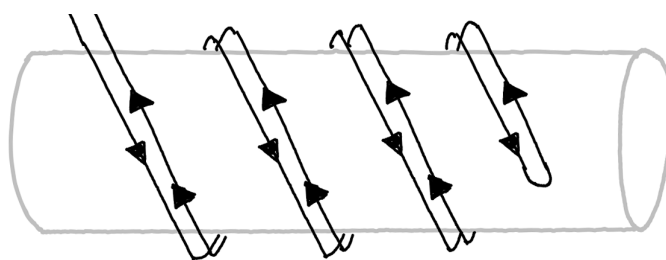
Obrázek 2.7: Efekt pasivní stabilizace lahvemi s vodou[13]

udržovací náklady tak budou nižší. Z tohoto důvodu a pro jeho jednoduchost a nenáročnost na údržbu jsem se rozhodl použít právě tento způsob dodání tepla.

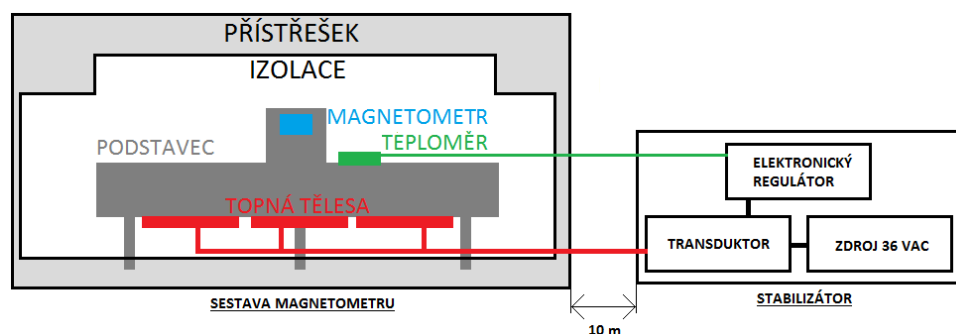
■ Odporový ohřev a rušení

Stejnoseměrný proud v blízkosti magnetometru je vyloučen, protože generuje stejnosměrné magnetické pole, tedy stejného charakteru, jako je magnetické pole Země. Měření by tak bylo znehodnoceno.

Topný proud musí být střídavý, o známé a konstantní frekvenci. Nejjednodušší je použít síťovou frekvenci, což s sebou nese další výhody: protože značná část EM rušení z lidských zdrojů je právě na síťové frekvenci, dá se předpokládat, že digitální metody odrušení magnetometrických dat budou



Obrázek 2.8: Bifilárně navinutý vodič



Obrázek 2.9: Schéma návrhu teplotní stabilizace

pro tuto frekvenci optimalizovány.

Střídavé EM pole na známé frekvenci lze kompenzovat při digitálním zpracování dat z magnetometru. Proto je nutné změřit složku vyšších harmonických, a pokud by byly příliš silné, zajistit adekvátní filtraci. Přítomnost vyšších harmonických frekvencí v proudu je důsledkem deformace sinusového průběhu signálu, zejména nespojitých změn signálu způsobených spínáním a přerušováním proudu.

Problém EM rušení lze rovněž omezit na straně samotného topného tělesa uspořádáním vodičů a na straně regulátoru malou deformací průběhu proudu. Z hlediska elektromagnetické kompatibility (EMC) je nejvýhodnější bifilární uspořádání vodičů (viz Obr. 2.8), při němž se vedle sebe vždy nachází vodiče s proudy opačných fází. Tím se indukovaná magnetická pole obou vodičů navzájem odečtou, což se vnějšímu pozorovateli jeví jako absence elektromagnetického pole.

2.5 Návrh teplotní stabilizace

Po zvážení výhod a nevýhod různých způsobů teplotní stabilizace jsem se rozhodl použít aktivní stabilizační systém, sestávající ze subsystému pro dodání tepla do regulovaného prostředí (topné těleso), subsystému pro udržení tepla v systému (izolace), subsystému pro řízení ohřevu (regulátor) a subsystému pro získání dat (senzor teploty). Viz schéma na Obr. 2.9.



Obrázek 2.10: Tepelná fólie se zvýrazněním trasy odporového vodiče (vlevo) [29]

■ 2.5.1 Izolace

Protože izolace poskytnutá ochranným přístřeškem je jen velmi základní, je nutné dodat ještě jednu vrstvu izolace přímo kolem sestavy magnetometru. Při návrhu této izolace jsem zohlednil především praktičnost a cenu.

Pro minimalizování přenosu tepla vedením do okolí jsem navrhl celou sestavu obalit extrudovaným polystyrenem (XPS). Měrná tepelná vodivost XPS se udává jako $0,0341 \text{ W/mK}$ [14]. Tento materiál má výborné izolační vlastnosti, je odolný vůči vlivům prostředí a je běžnou součástí stavebního průmyslu, což ho činí dobře dostupným.

Délka nožiček (viz Obr. 2.2) omezuje tloušťku izolační vrstvy na 4 cm, ale pouze zespodu. Z ostatních stran je tloušťka izolace teoreticky neomezená. Nožičky samotné představují problém – jsou z mosazi, což je vysoce teplotně vodivý materiál. Konce nožiček jsou seříznuty do špičky, aby sestava magnetometru přesně seděla na podstavci, čímž se zároveň minimalizuje styčná plocha s okolím, a tím i přenos tepla vedením. Pro zabránění vyzařování tepla do okolí jsem navrhl vnější izolaci obalit reflektivním materiálem, např. hliníkovou fólií.

■ 2.5.2 Toné těleso

Z důvodů uvedených v Sekci 2.4.2 jsem se rozhodl pro **odporový ohřev podstavce magnetometru střídavým elektrickým proudem o síťové frekvenci a nulové stejnosměrné složce**.

Z hlediska uspořádání vodičů a praktičnosti umístění se jako nejvhodnější jeví tepelné fólie. Ty sestávají z vodiče z tenké odporové pásky nalepeného na kaptonové fólii. Tepelná fólie je tenká a má velkou styčnou plochu, což zajistí dobrý přestup tepla. Jejich obvykle kruhový tvar vytváří dobré podmínky pro to, aby jejich odporový vodič byl navinut bifilárně. Takto navržené tepelné fólie jsou skutečně na trhu dostupné (viz Obr. 2.10).

Protože se na kruhové fólii budou délky jednotlivých částí vodičů lišit, neodečtou se indukovaná magnetická pole úplně. Proto jsem se rozhodl fólie používat v párech - dvě fólie se přiloží k sobě tak, aby vedle sebe ležely vodiče s opačným směrem protékajícího proudu.

Parametry topné fólie, především její tepelný výkon, resp. odpor, jsou dány kvalitou izolace, vnější teplotou a nastavenou teplotou. Parametry jsem získal

ze simulace.

■ 2.5.3 Řízení

Systém řízení teplotní regulace má za úkol dodat adekvátní výkon do topného tělesa. Sestává ze zdroje střídavého napětí, mikroprocesoru a regulátoru proudu.

Protože základním požadavkem na vyvíjený systém je maximální elektromagnetická kompatibilita, musí výstupní proud obsahovat co nejmenší složku vyšších harmonických. V praxi to znamená spojitý a rovnoměrný průběh proudu dodaný zdrojem bez rušení zaneseném regulací.

Nejjednodušší zdroj střídavého napětí je transformátor připojený k síti. Nevyžaduje údržbu ani řízení, je mechanicky jednoduchý a poskytuje napětí o známé amplitudě a stálé frekvenci.

■ Regulace střídavého proudu

Výběr regulačního mechanismu pro střídavý proud je podřízen elektromagnetické kompatibilitě, diskutované v Sekci 2.4.2.

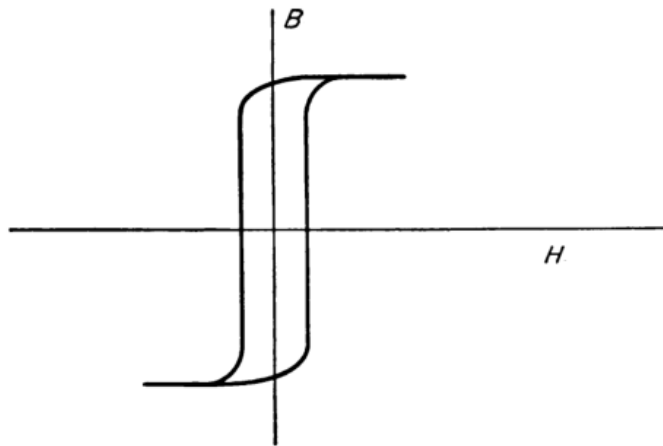
Jednou z možností regulace proudu je triak, polovodičová součástka schopná vést elektrický proud oběma směry, která je říditelná proudovým impulsem. Efektivní hodnota proudu je určena okamžikem v rámci půlperrody, kdy triak sepne a začne vést proud. Průběh proudu řízeného triakem proto obsahuje skokové změny, které mají za důsledek přítomnost vyšších harmonických frekvencí v proudu, což je nežádoucí z hlediska EMC. Triak dokáže přenést stejnosměrný proud, proto požadavek na nulovou stejnosměrnou složku proudu jím není zaručen[25].

Další možností je robotizovaný autotransformátor, tedy transformátor o říditelném přenosu, který je určen vzájemným natočením vinutí. Ačkoliv splňuje požadavky na EMC, jedná se o mechanicky komplikované zařízení, což zvyšuje jeho cenu, snižuje jeho spolehlivost a zvyšuje náklady na údržbu[26].

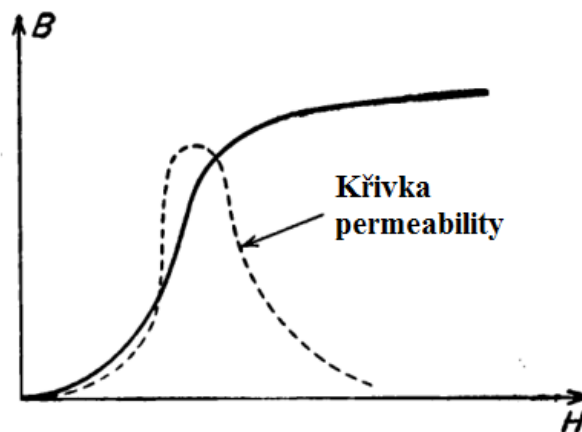
Jednou z možností je transduktor, který funguje jako říditelná impedance. Je robustní, jednoduchý, efektivní a použitelný i pro velké proudy. Princip tohoto regulátoru a vlastnosti, pro než jsem si jej zvolil, jsou popsány v Kapitole 2.6.

■ 2.5.4 Měření

Řídící elektronika regulátoru teploty musí získat informace o aktuální teplotě, aby mohla upravit dodávaný výkon. K tomu slouží odporový senzor teploty Pt1000 integrovaný do hlavičky magnetometru.



Obrázek 2.11: Vysoce obdélníková hysterezní křivka vhodná pro jádro transduktoru[22]



Obrázek 2.12: Křivka permeability[22]

2.6 Transduktor

Transduktor je nelineární magnetický prvek pro regulaci a zesílení střídavého elektrického signálu. Byl vynalezen na počátku dvacátého století a extenzivně využíván po boku vakuových elektronek, až do jejich postupného nahrazení tranzistory. Dnes se dají nalézt v kritických aplikacích, které upřednostňují robustnost a spolehlivost, například v leteckém průmyslu[4].

■ 2.6.1 Princip činnosti

■ Proměnná impedance

Impedance cívky v ustáleném stavu je dána jako

$$Z = i\omega L \quad (2.2)$$

kde

$$L = \frac{N \Phi}{I} \quad (2.3)$$

ω je úhlová frekvence, L je indukčnost, N je počet závitů cívky, Φ je magnetický indukční tok a I je proud cívkou

Protože magnetická indukce cívky s ferromagnetickým jádrem o permeabilitě μ se dá zjednodušeně vyjádřit jako

$$B = \frac{\mu N I}{\ell} \quad (2.4)$$

a zároveň jako

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (2.5)$$

dá se pro magnetický indukční psát

$$\Phi = \frac{\mu N I A}{\ell} \quad (2.6)$$

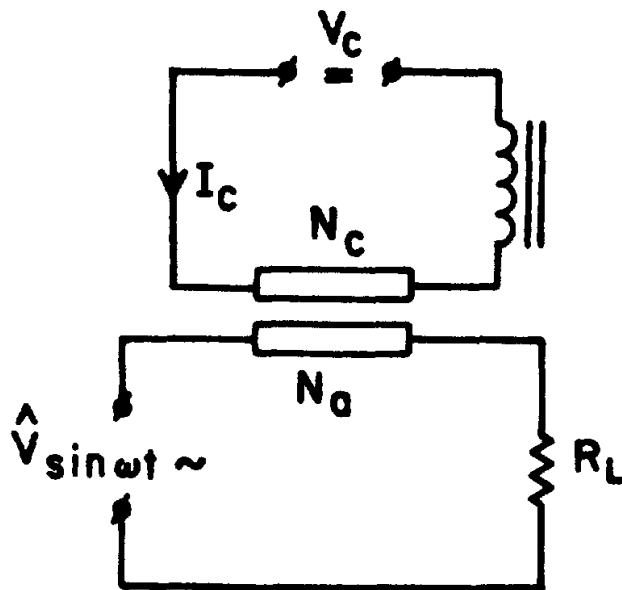
μ je permeabilita jádra, A je plocha cívky, ℓ je délka cívky.

Z dosazení do rovnice 2.3 vyplývá závislost indukčnosti na permeabilitě jádra:

$$L = \frac{\mu N^2 A}{\ell} \quad (2.7)$$

Permeabilita ferromagnetického jádra není konstantní - závisí na části hysterezní křivky (viz Obr. 2.11), níž se v daný moment jádro nachází. Permeabilita je malá pro malé intenzity magnetického pole H přiloženého na jádro, dosahuje maxima před oblastí saturace a klesá pro velké intenzity H , viz Obr. 2.12. Proto indukčnost (a tím impedance) cívky s ferromagnetickým jádrem klesá s přiblížením k saturaci[22].

Pro maximální využití tohoto efektu je žádoucí, aby mělo ferromagnetické jádro vysoce obdélníkovou hysterezní křivku (jako ta na Obr. 2.11).



Obrázek 2.13: Schéma saturovatelného reaktoru[23]

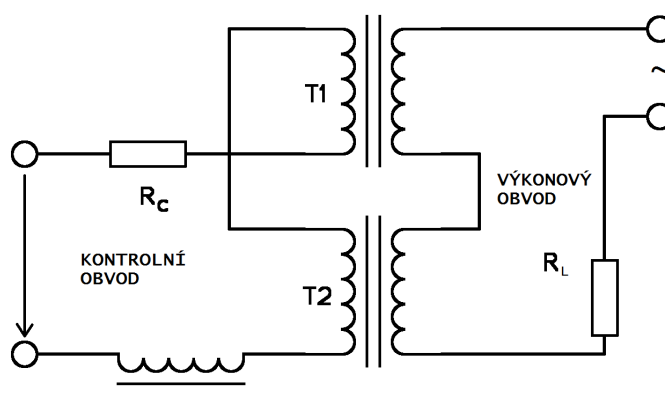
■ Řízení saturace

Proměnnost impedance v závislosti na míře saturace lze využít pro její řízení. Na ferromagnetické jádro se navinou dvě cívky. Zátěžová cívka se přes zátěž připojí na zdroj střídavého napětí, řídicí cívka se připojí na zdroj stejnosměrného napětí (viz schéma na Obr. 2.13).

Po zapnutí zdroje střídavé napětí v zátěžovém okruhu začne zátěžovou cívku procházet střídavý proud I_L , který v jádře vybudí střídavý magnetický tok Φ_L . Ten jádro v rámci jedné periody dvakrát částečně saturuje. Reaktor je ve stavu vysoké impedance, protože není v žádném okamžiku saturován (to je zajištěno volbou jádra a vinutí).

Zapne-li se i zdroj stejnosměrného napětí, vybudí se díky řídicí cívce v jádře další magnetický tok Φ_C . Ten v rámci jedné periody zátěžového proudu jednou posílí a jednou zeslabí tok Φ_L podle toho, jestli mají souhlasnou nebo protiběžnou orientaci. Pokud je tok Φ_C dostatečně velký, jádro se při souhlasném směru toků Φ_L a Φ_C saturuje. Reaktor je ve stavu malé impedance, protože je při jedné polaritě střídavého napětí saturován.

Tok Φ_C může být natolik velký, že udrží jádro v saturaci i během času, kdy tok Φ_L působí proti toku Φ_C . Reaktor je pak ve stavu minimální impedance, neboť je saturován pořád[23].



Obrázek 2.14: Typický transduktor

■ Asymetrie a zpětně indukované napětí

Chod saturovatelného reaktoru, jak je popsán výše, má dva problémy.

Pokud není stejnosměrný proud dostatečně velký, aby udržel trvalou saturaci jádra, je impedance reaktoru v rámci jedné periody proudu I_L nestejnoměrná. Při souhlasném směru toků Φ_L a Φ_C je reaktor saturován, při opačném není. To způsobí asymetrický průběh proudu I_L , což znamená větší složku vyšších harmonických, což vede k horší EMC[16].

Potenciálně závažnější problém představuje vazba mezi zátěžovou a řídicí cívkou přes ferromagnetické jádro. Tok Φ_L indukuje na řídicím vinutí střídavé napětí U_{Cemf} podle rovnice

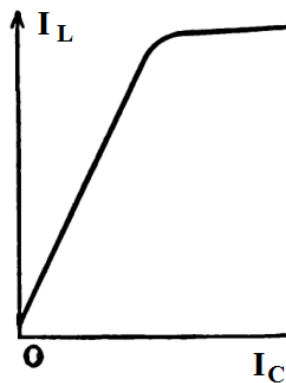
$$\frac{N_L}{N_C} = \frac{U_L}{U_{Cemf}} \quad (2.8)$$

kde N_L a N_C jsou počty závitů jednotlivých vinutí. Toto napětí může poškodit řídicí elektroniku, reprezentovanou ve schématu na Obr. 2.13 zdrojem stejnosměrného napětí.

Pro omezení obou problémů lze do obvodu přidat druhý pár cívek s vlastním jádrem, jehož zátěžové vinutí se zapojí do série k vinutí prvního jádra. Nové řídicí vinutí se pak zapojí proti původnímu vinutí tak, aby napětí indukovaná střídavým tokem do obou řídicích vinutí měla opačnou orientaci. Protože parametry jader a cívek jsou identické, *efektivní* hodnoty zpětně indukovaných napětí jsou rovněž identické, a vzhledem k jejich opačnému smyslu se navzájem odečtou. Tohoto zapojení využívá transduktor, jehož schéma je na Obr. 2.14.

Protože toky Φ_{C1} a Φ_{C2} mají opačnou orientaci, zatímco toky Φ_{L1} a Φ_{L2} jsou souhlasné, bude v každém okamžiku jeden tok posílen a druhý zeslaben. Výsledný průběh proudu na zátěži bude proto symetrický.

Ze stejného důvodu se budou v každém okamžiku lišit velikosti zpětně indukovaného napětí do řídicího obvodu, a to o rozdíl zesíleného a zeslabeného toku v jádře. Na svorkách zdroje stejnosměrného napětí bude proto stále



Obrázek 2.15: Kontrolní charakteristika transduktoru[22]. Proud I_L je posunut od nuly

pozorovatelné zpětně indukované napětí. Pro jeho omezení se do řídicího obvodu zařazuje tlumivka.

■ 2.6.2 Stav transduktoru

Transduktor může operovat ve třech stavech: naplno zapnut, částečně zapnut a vypnut.

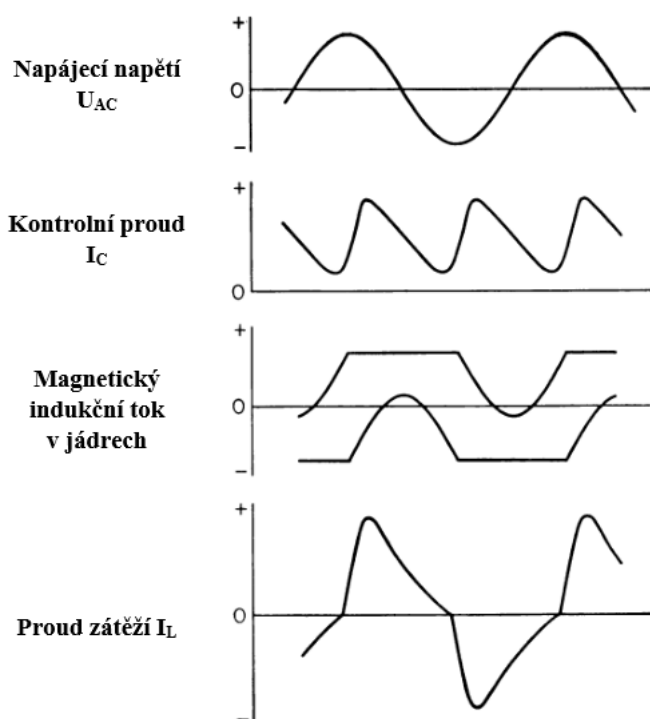
V *naplno zapnutém* stavu jsou jádra transduktoru plně nasycena. Tím je indukance a tím impedance výkonové části transduktoru minimální. Výkonový proud je ve své maximální udržitelné hodnotě I_{Lmax} . Kontrolní proud je ve své maximální užitečné hodnotě I_{Con} , tedy nejvyšší hodnotě, nad níž už se výkonový proud nemění.

Ve *vypnutém* stavu se impedance transduktoru nejvyšší. Jádra nejsou saturována kontrolním proudem, který je nulový. Zde je velice důležité vyzdvihnout, že **výkonový proud není nikdy nulový**, neboť obvod je ve vysokoimpedančním stavu, není však přerušen. Namísto toho je výkonový proud ve svém minimu, $I_{Lmin} \neq 0$. Nulového výkonového proudu lze dosáhnout jen vypnutím napájecího zdroje.

Mezi plným zapnutím a vypnutím je výkonový proud úměrný kontrolnímu proudu neboli míře saturace jádra. Přesný vztah mezi výkonovým a kontrolním proudem je dán hysterezní křivkou magnetických jader a jejich parametry, obecně se pro vhodně zvolené jádro dá očekávat přibližně lineární funkce posunutá od nuly, která přechází v konstantní funkci po dosažení stálé saturace (viz Obr. 2.15)[22].

■ 2.6.3 Žádoucí vlastnosti transduktoru

Transduktory jsou široce vyzdvihovány pro svou robustnost, spolehlivost a vysoké maximální proudy[4]. Na druhou stranu mají transduktory značně



Obrázek 2.16: Průběhy proudů a toků v transduktoru řízeném střídavým proudem[22]

menší jednostupňové zesílení (až v řádu jednotek) v porovnání s tranzistorovými zesilovači, a jsou velmi těžké a prostorné, což ale pro tuto práci není překážkou.

Transduktor jsem zvolil především pro jeho elektromagnetickou kompatibilitu. Pracuje na principu saturace magnetického jádra, což je spojitý a relativně pomalý proces. Výkonový proud není nikdy přerušen, a to ani ve *vypnutém* stavu. A ačkoliv vzniká v okolí transduktoru nezanedbatelné magnetické pole, transduktor může být umístěn daleko od magnetometru. Jediným problémem tak může být deformace proudu průchodem jádry. Z těchto důvodů by elektromagnetické rušení vnášené do systému transduktorem mělo být minimální. Transduktor navíc není schopen převést stejnosměrnou složku napětí z řídicího obvodu do zátěže, což je pro magnetometrická měření nesmírně důležité (viz Sekci 2.4.2)[8].

Průběhy proudů a toků v transduktoru řízeném střídavým proudem jsou na Obrázku 2.16.

Kapitola 3

Vývoj regulátoru

3.1 3D model

Pro lepší vizualizaci a zjednodušení další práce jsem se rozhodl vytvořit přibližný 3D model sestavy magnetometru. Použil jsem open-source program FreeCAD. Rozměry sestavy jsou na Obrázku 3.1, model samotný je pak na Obrázku 2.2.

3D modelovací software rovněž umožňuje výpočet plochy sestavy magnetometru, která je stěžejní pro modelování přenosu tepla.

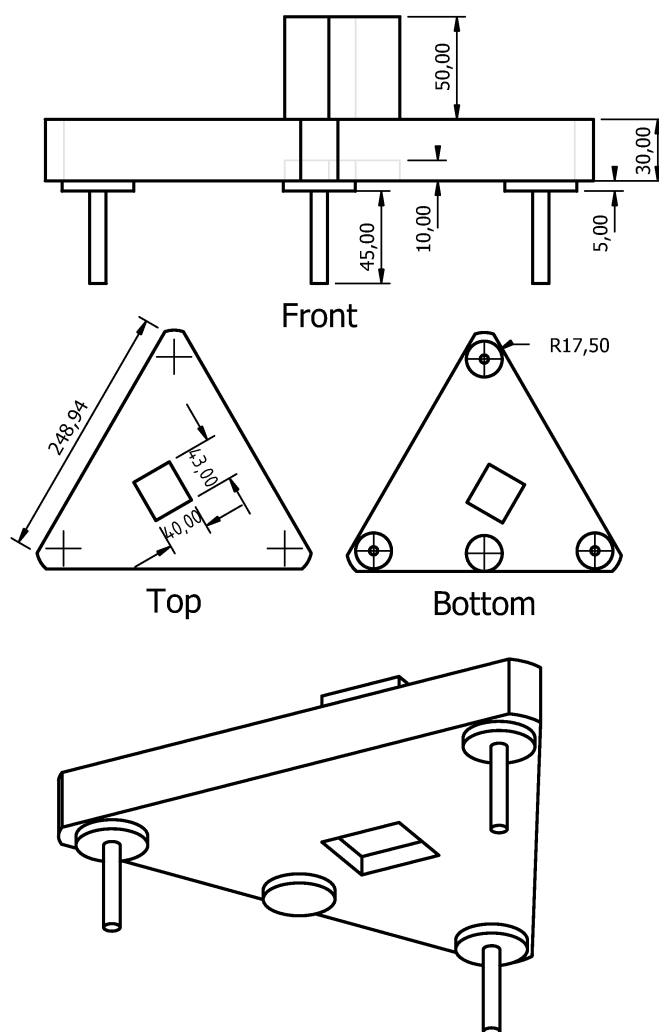
Plocha sestavy je $S = 0,11 \text{ m}^2$, z čehož $S_d = 0,04 \text{ m}^2$ připadá na spodní část mramorové desky a $S_h = 0,7 \text{ m}^2$ připadá na zbytek sestavy (to je důležité pro modelování). Hmotnost je $m = 8 \text{ kg}$.

3.2 Simulace

Simulace přenosu tepla je stěžejní pro zjištění velikosti tepelného výkonu, který je nutné sestavě dodat. Použil jsem reálná data z teplotního senzoru na podstavci magnetometru v Polomu, naměřená mezi 7. a 28. únorem 2018, vzorkovaná po vteřině. Data mi laskavě poskytl vedoucí práce. Měsíc únor jsem zvolil, protože jde o nejchladnější měsíc na stanici Polom, a proto je pro regulaci nejrelevantnější.

Pro simulaci jsem použil program Matlab Simulink s knihovnou Simscape, která umožňuje simulaci fyzikálních procesů. Schéma simulace je na obrázku 3.2. Skládá se z bloků

- *Mass*, představující hmotu sestavy $m = 8 \text{ kg}$ o specifickém teple $C_p = 0,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$ [21] a počáteční teplotě $T_0 = 310 \text{ K} \approx 37 \text{ °C}$;
- *Heater*, představující topné těleso řízené PID kontrolérem;
- *Thermometer*, představující ideální senzor teploty;

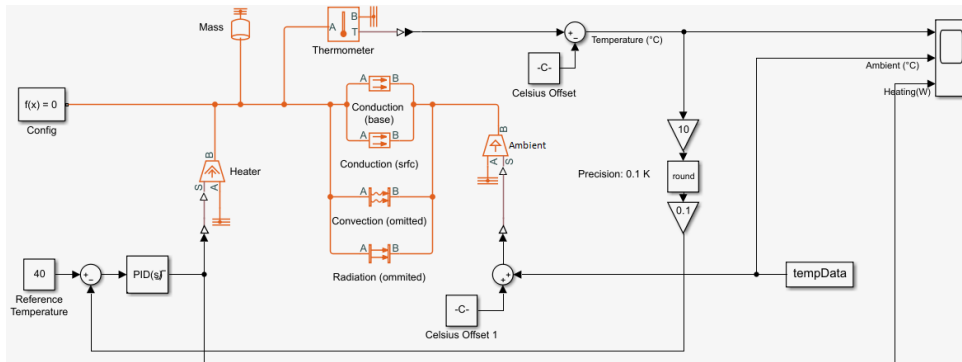


Obrázek 3.1: Rozměry sestavy magnetometru (milimetry)

- skupiny modelující přenos tepla, sestávající z:
 - *Conduction (base)*, představující přenos tepla základnou o ploše $S_d = 0,04 \text{ m}^2$ přes $h = 4 \text{ cm}$ polystyrenové (XPS) izolace s tepelnou vodivostí $k = 0,033 \frac{\text{W}}{\text{K}\cdot\text{m}}$ [14];
 - *Conduction (srfc)*, představující přenos tepla zbytkem sestavy o ploše $S_h = 0,07 \text{ m}^2$ přes $h = 8 \text{ cm}$ polystyrenové izolace;
 - *Convection*, představující přenos tepla prouděním, zanedbáno;
 - *Radiation* představující přenos tepla vyzařováním, zanedbáno;
- *Ambient*, představující teplotu vnějšího prostředí, která je získána z dat z bloku tempData;
- idealizovaného *PID kontroléru*¹

¹Pro vysvětlení PID kontroly viz sekci o vyvinutém software.

- *Reference Temperature*, představující referenční teplotu t_{ref} ;
- skupiny *Precision*, která výstup z ideálního teploměru zaokrouhluje na jedno desetinné místo a přibližuje tak senzor realitě;
- procedurálních bloků potřebných pro chod simulace: *Config*, *plotter*, *Celsius Offset* a suma (zajišťující převod z Kelvinů do stupňů Celsia).



Obrázek 3.2: Schéma tepelné simulace

3.2.1 Volba referenční teploty

Referenční teplotu bylo nutné zvolit tak vysokou, aby ji vnější teplota nepřekročila, a zároveň dost nízkou, aby nebylo nutné dodávat velký výkon. V roce 2019 byla nejvyšší naměřená teplota v Polomu 30,1 °C (viz Obr.2.3). Kvůli slunečnímu záření může ale teplota v přístřešku pro magnetometr být vyšší.

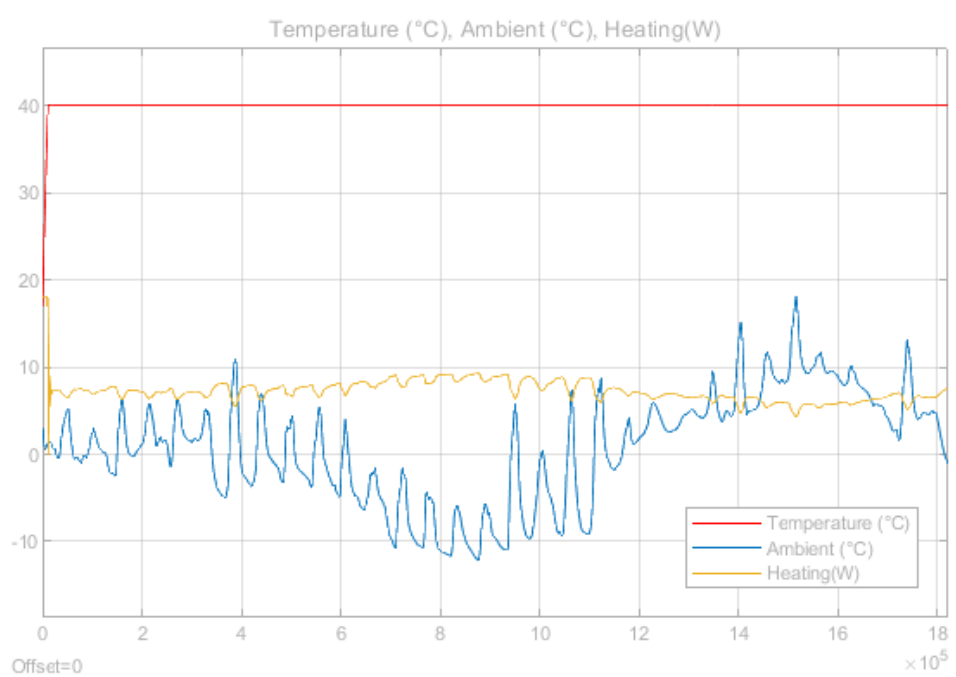
Vzhledem k lokalitě bylo 40 °C dobrým kompromisem, později během vývoje a po konzultaci s podrobnějšími daty o teplotách v Polomu jsem se rozhodl zvýšit teplotu na 50 °C. Simulaci jsem provedl pro obě teploty, předpokládaný výkon je dostatečný v obou případech. Níže prezentuji simulaci pro 40 °C.

3.2.2 Idealizovaná simulace

Účelem této simulace je získat nejvyšší nutnou hodnotu tepelného výkonu pro efektivní regulaci. Kvůli charakteru PID regulace je nutné systém idealizovat.

Vyřazením bloku *Precision* systém získá ideální teploměr, a tím ideální odezvu regulace na změny teploty. Ačkoliv tento systém nereprezentuje realitu, odezva regulátoru neobsahuje žádné nespojitosti. To znamená, že výstup PID regulátor je rovněž spojitý, což usnadňuje odečtení maximálního potřebného výkonu.

Jak je vidět z Obrázku 3.3, předpoklady chování PID regulace se potvrdily. S výjimkou začátku simulace, kdy byl systém mimo své požadované parametry,



Obrázek 3.3: Idealizovaná simulace teplotní regulace

je průběh tepelného výkonu spojitý. Hodnota dodávaného výkonu nikdy nepřekročí 10 W. Z toho se dá vyvodit maximální potřebný výkon topného tělesa.

Protože reálný regulátor nemá nekonečně rychlou odezvu, výkon ohříváče musí být vyšší než plynoucí z ideální simulace. Rovněž se může stát, že teplota okolí klesne pod $-11,8\text{ °C}$. I proto je nutné výkon předdimenzovat. Po aplikování konstanty $\times 2$ vyplyne, že **topný výkon musí být $\approx 20\text{ W}$** .

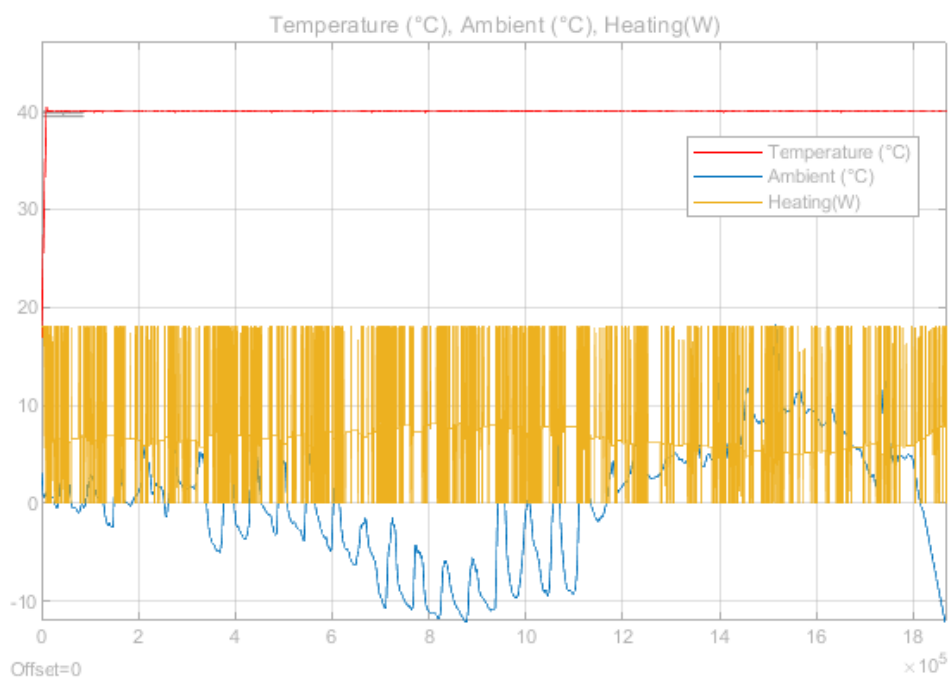
3.2.3 Simulace reálných podmínek

Pro ověření dostatečnosti výkonu a funkce celého systému, a pro získání předpokládaného průběhu regulované teploty, jsem provedl ještě reálnou simulaci s nepřesným teplotním senzorem.²

Jako maximální výkon dostupný regulátoru jsem zvolil 18 W, což vyplývá ze zvoleného topného tělesa (viz Sekce 3.3.1). Tato hodnota zároveň splňuje požadavky formulované výše.

Z výsledků na Obrázku 3.4 plyne, že celý systém je schopen fungovat při tomto výkonu, aniž by v oblastech s nejnižší teplotou pracoval na 100% výkon. Při dané konfiguraci izolace a při očekávatelných vnějších podmínkách je tedy **tepelný výkon 18 W adekvátní**. Tuto hodnotu jsem zvolil jako cíl pro regulátor teploty.

²Snížení přesnosti výstupu z teplotního senzoru se týká pouze vstupu do PID regulátoru. Uvedené grafy stále zobrazují skutečnou, resp. přesně simulovanou teplotu sestavy. Viz



Obrázek 3.4: Reálná simulace teplotní regulace pro výkon 18 W

3.3 Prototyp stabilizátoru

Po získání potřebného výkonu jsem mohl navrhnout a sestavit prototyp stabilizace, jehož cílem je ověřit návrh v praxi.

Základní výkonový obvod tvoří zdroj střídavého napětí 36 V (transformátor), transduktor a topné těleso. Transduktor je saturován přes tranzistor z laboratorního zdroje stejnosměrného proudu (80 V). Tranzistor je řízen digitálně-analogovým převodníkem (DAC) mikrokontroléru Nucleo-L476RG. Mikrokontrolér čte termistor na simulátoru magnetometru analogově-digitálním převodníkem (ADC) a vyhodnocuje adekvátní otevření tranzistoru, tím míru saturace transduktoru a tím velikost proudu do topného tělesa.

K sestavení prototypu mi posloužil hardware, který z většiny nebude tvořit finální regulátor. Kritéria pro výběr hardwaru prototypu byla dostupnost a ekvivalentní funkce jako finální hardware. Naopak jsem nebral ohledy na velikost, kvalitu a výkonové dimenzování³.

schéma simulace na Obrázku 3.2.

³Tato práce vznikala v době jarní a podzimní pandemie SARS-CoV-2, kdy byly obchody i vzdělávací instituce zavřené. Klíčovým faktorem pro výběr hardwaru, metod a výstupů proto byla jejich okamžitá dostupnost. Čtenáře pak žádám o shovívavost s mnohdy úsměvnou kvalitou reprezentace dat (zejména narážím na mobilní snímky analogového osciloskopu)

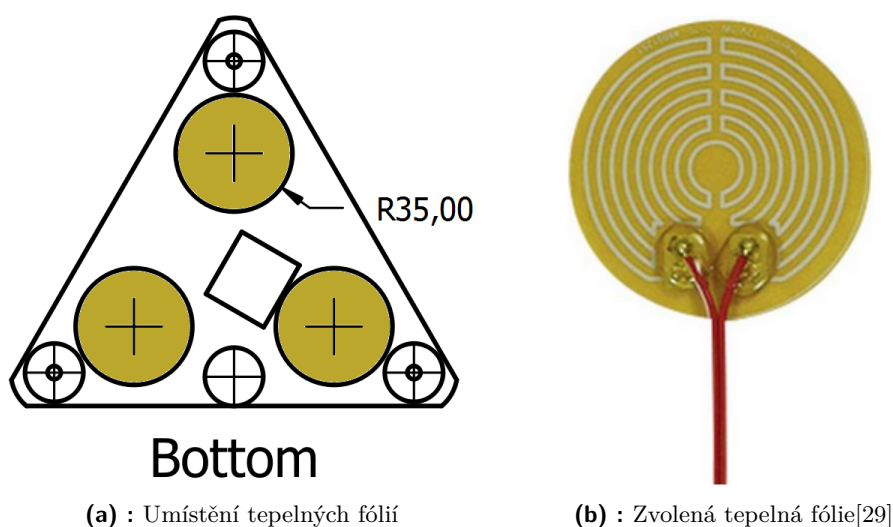
jmenovité napětí	U_N	12	V
jmenovitý výkon	P_N	3	W
odpor	R	94	Ω

Tabulka 3.1: Parametry dvojice topný fólií v sérii

3.3.1 Topné těleso a simulátor sestavy magnetometru

Požadavky stran elektromagnetické kompatibility na topné těleso byly formulovány už v Sekci 2.5.2. Připomenu, že jde o správný způsob navinutí odporového vodiče, který minimalizuje vyzářené magnetické pole. Požadavky na výkon byly formulovány v Sekci 3.2.2.

Zvolil jsem samolepicí tepelnou fólii Thermo Tech 12 V, 3 W o průměru 70 mm, která je na Obrázku 3.5b[29], neboť se její podoba z dostupných produktů nejvíce přibližovala bifilárnímu uspořádání, a její výkon byl dostatečný.



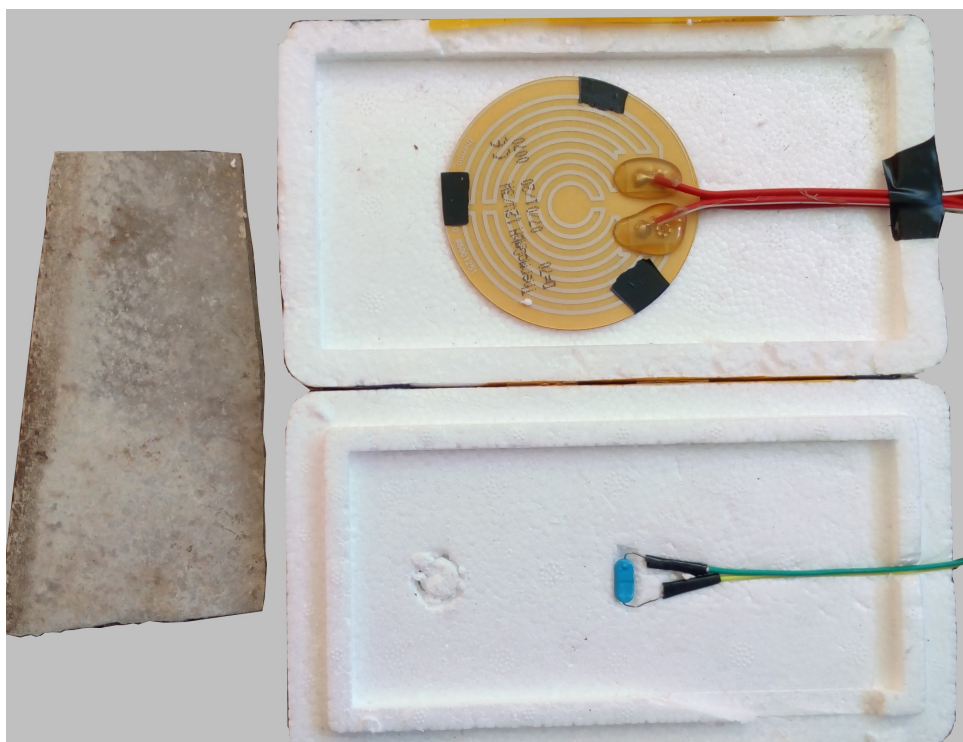
(a) : Umístění tepelných fólií

(b) : Zvolená tepelná fólie[29]

Obrázek 3.5: Topné těleso a jeho umístění

Protože topné těleso má jmenovitý výkon 3 W, ve finálním regulátoru jsem použil tři páry, tedy šest topných fólií, odtud výkon 18 W pro "reálnou" simulaci v sekci 3.2.3. Umístění tepelných fólií na sestavu magnetometru ukazuje Obrázek 3.5a. Pro účely prototypu mi stačil jeden pár, který mi umožnil otestovat regulaci i EMC při malých nákladech. Fólie jsem spájel do série a parametry výsledné změřil multimetrem, jsou uvedeny v Tabulce 3.1.

V průběhu vývoje prototypu jsem neměl k dispozici sestavu magnetometru, a proto jsem si musel postavit její simulátor. Jako tělo sestavy jsem použil kus dlaždice, na kterou jsem z jedné strany přiložil tepelnou fólii a z druhé strany teploměr. Jako izolaci jsem použil polystyrenovou krabičku s tloušťkou stěny asi 1 cm. Viz Obrázek 3.6. Přívodní kabely byly dlouhé přes 2 metry, aby se zamezilo rušení od regulátoru při vyhodnocování EMC.



Obrázek 3.6: Simulátor sestavy magnetometru

		Transformátor A	Transformátor B	
napětí primárního vinutí	U_P	220		V
napětí sekundárního vinutí	U_S	24		V
jmenovitý výkon	P_N	2		VA
odpor primárního vinutí	R_P	2235	2260	Ω
odpor sekundárního vinutí	R_S	45.5	44.9	Ω

Tabulka 3.2: Parametry transformátorů v prototypu transduktoru

3.3.2 Prototyp transduktoru

Pro transduktor jsem použil dvojici měřicích transformátorů 220/24 V o výkonu 2 VA. Jejich parametry jsou uvedeny v Tabulce 3.2.

Jak je vidět, odpory vinutí jsou téměř totožné (rozdíl méně než 2%). Přesto se zpětně indukovaná napětí, pohybující se okolo hodnoty 240 V lišila o 11 V. To svědčí o dalších, skrytých rozdílech v transformátorech. Při této hodnotě jsem stále považoval za bezpečné pokračovat, ale při větší zátěži by napětí mohlo dosáhnout nebezpečných hodnot pro řídicí elektroniku, hlavně pro mikrokontrolér.

Hodnota odporu primárního vinutí, které tvoří kontrolní obvod transduktoru, je problematicky vysoká. Protože jsou transformátory zapojeny v sérii, společný odpor v řídicím obvodu přesahuje 4,5 k Ω . To znamená, že k dosa-

žení saturačního proudu transduktoru je potřeba silný zdroj s maximálním poskytovaným napětím přibližně 100 V. Tento problém jsem ve finálním stabilizátoru vyřešil volbou toroidních transformátorů o vysokém výkonu, jejichž sekundární resp. primární vinutí má odpor v řádech jednotek resp. desítek ohmů.

Jako mezičlánek mezi mikrokontrolérem a transduktorem jsem použil tranzistor MJ15003 NPN v zapojení SE. Tento tranzistor má zesílení $h_{FE} = 25 - 150$, maximální kolektorový proud $I_C = 20$ A a maximální napětí kolektor-emitor $U_{CE} = 140$ V[20]. Tranzistor s takto nízkým zesílením jsem zvolil, protože jsem potřeboval využít co největší rozsah výstupního napětí DAC mikrokontroléru. To zajistí jemnější řídicí rozsah.

Jako zdroj střídavého napětí jsem použil transformátor, kterému jsem zapojil odbočky do série. Pro ochranu jsem ho zapojil přes oddělovací transformátor do sítě. Výsledná sestava poskytovala napětí 36 V. Jako zdroj stejnosměrného napětí jsem použil laboratorní zdroj do 80 V.

Schéma prototypu regulátoru je na Obr. 3.8.

3.3.3 Výkonový rozsah a řídicí charakteristika

Pro získání výkonového rozsahu jsem na svorky topného tělesa připojil voltmetr a ampérmetr.

Ve vypnutém stavu je výkon topného tělesa 17 mW. V plně zapnutém stavu je to ≈ 1100 mW. To je výrazně méně než jmenovitý výkon dvojice teplotních fólií, 6 W. Je to dáno velkým odporem transduktoru. Vzhledem k situaci jsem s tím nemohl dělat nic jiného, než snížit nastavenou teplotu regulace. V prototypu je proto teplota nastavena na 30 °C.

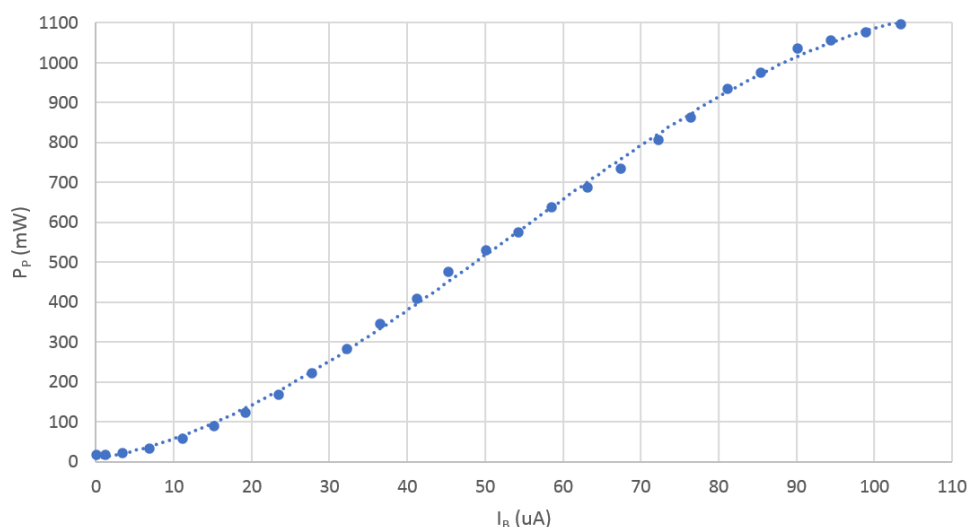
Z měření jsem získal kontrolní charakteristiku regulátoru, tedy závislost tepelného výkonu na proudu do báze tranzistoru. Je na Obrázku 3.7.

3.3.4 Měření

Pro měření teploty jsem použil 50 k Ω termistor s negativním teplotním koeficientem. Termistor jsem zapojil do série s napěťovým výstupem mikrokontroléru 3,3 V a ochranným odporem 14,8 k Ω , který zajistí, aby proud termistorem nepřesáhl 200 μ A, což je obvyklá maximální dovolená hranice⁴. Napětí mezi zemí a termistorem jsem snímal ADC mikrokontroléru.

Termistor bylo nutné zkalibrovat, tj. najít převodní vztah mezi teplotou a údajem z ADC. Učinil jsem tak pomocí sklenice vody, kterou jsem ohřál na 45 °C a pozoroval její chladnutí až do pokojové teploty. Jako referenční teploměr jsem použil termočlánek multimetru. Vzniklou charakteristiku jsem

⁴K termistoru jsem neměl dokumentaci, proto jsem se musel spolehnout na obvyklé hodnoty.



Obrázek 3.7: Řídicí charakteristika regulátoru

proložil lineární funkcí. Její rovnice je níže.

$$t(^{\circ}\text{C}) = -1,0282R_T(\text{k}\Omega) + 68.616 \quad (3.1)$$

Zde je nutné podotknout, že teploměr nemusí udávat přesnou teplotu. Stačí, pokud jeden jím udávaný stupeň je stejně velký jako jeden kelvin. Cílem práce je teplotu stabilizovat, nikoliv ukotvit na přesné hodnotě.

3.3.5 Řízení a SW

Řízení systému zajišťoval mikrokontrolér ST Nucleo-L476RG na platformě STM32, jehož aplikační software jsem napsal sám. Mikrokontrolér provádí s periodou 500 ms PID regulaci (viz Sekci 4.5.1).

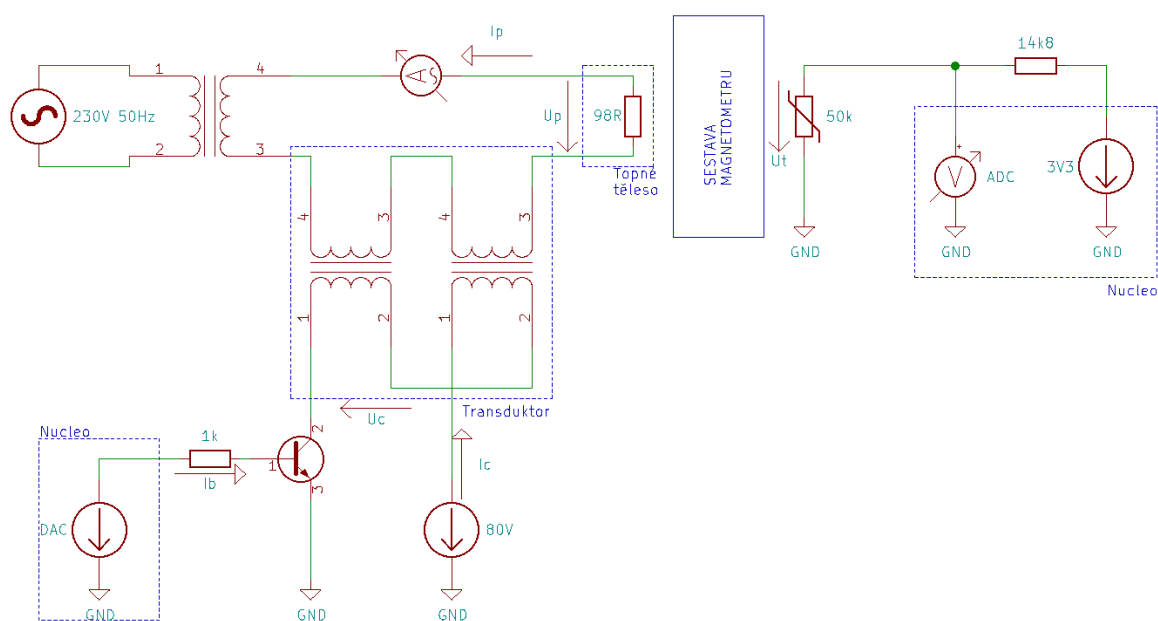
Pro prototyp regulátoru jsem koeficienty PID regulace odhadl a poté metodou pokus-omyl doladil. Výsledné koeficienty, při nichž poskytuje regulátor nejmenší rozptyl teploty, jsou:

$$k_P = 50, k_I = -200, k_D = 50, k_F = 300 \quad (3.2)$$

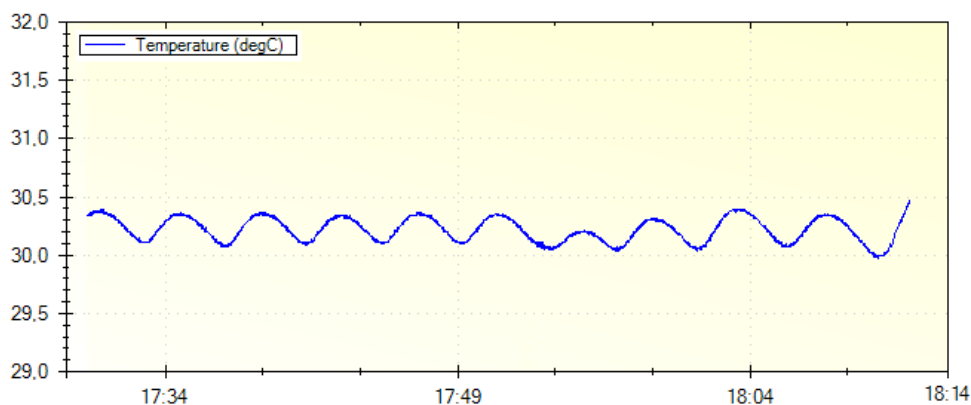
Výsledný, prototypem stabilizovaný průběh teploty je na Obrázku 3.9.

3.3.6 Měření EMC

K měření elektromagnetické kompatibility jsem použil analogový osciloskop, fluxgate magnetometr DRV425 a jednoduchý stonásobný zesilovač. Schéma zapojení je na Obrázku 3.10. Pakliže jsem měřil EMC přímo na topném tělese, umístil jsem jej alespoň dva metry od veškeré elektroniky, abych omezil vnější vlivy v měření. Měřil jsem na jedné ose magnetometru orientované normálově na směr proudu v závitě. Jeden volt na osciloskopu odpovídá magnetickému poli o intenzitě 0,7 uT.



Obrázek 3.8: Obvodové schéma prototypu regulace

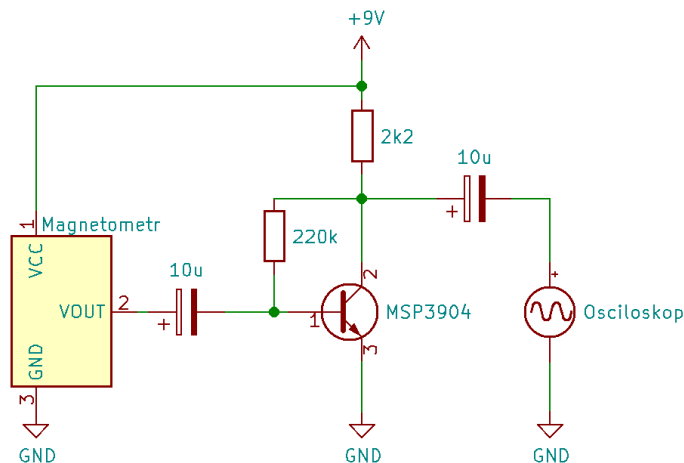


Obrázek 3.9: Regulovaná teplota finální verzi prototypu

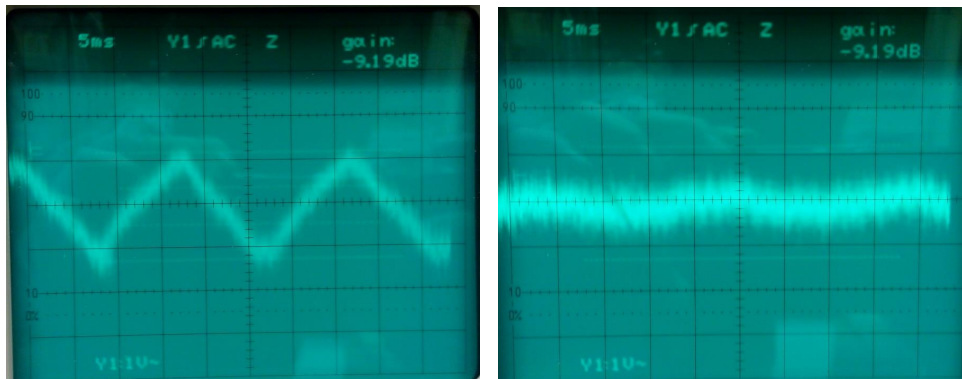
EM pole topné fólie

Měření EMC na topném tělese jsem provedl pro dva případy: pro jednu samostatnou tepelnou fólii a pro dvě přiložené k sobě tak, aby se jejich magnetické pole vyrušilo. Výsledky jsou na Obrázku 3.11.

Jak je vidět, toto měření potvrdilo můj předpoklad, že přiložení tepelných fólií k sobě kompenzuje jejich magnetické pole. V případě jedné fólie je pole jasně zřetelné, v případě dvou je na úrovni šumu. Nicméně stále jsou vidět slabé amplitudy o frekvenci 50 Hz.



Obrázek 3.10: Schéma zapojení pro měření EMC



(a) : Samostatné topné těleso

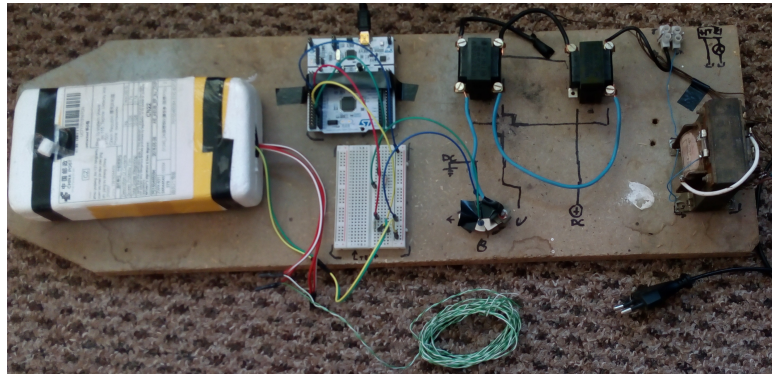
(b) : Dvě topná tělesa bifilárně

Obrázek 3.11: Měření na padu

3.3.7 Závěry prototypu

Výsledný průběh teploty prototypu je na Obrázku 3.9, fotka sestavy je pak na Obrázku 3.13, průběh magnetického pole kolem teplotních fólií je na Obr. 3.11.

Prototyp stabilizátoru udržoval teplotu s odchylkou $\pm 0,25$ °C od nastavené hodnoty, přičemž zadání požaduje odchylku $\pm 0,5$ °C. Při tom generoval magnetické pole o menší intenzitě, než bylo možné přesně změřit, určitě však menší než $0,35$ μ T. Tyto výsledky jsou přijatelné pro potvrzení koncepce regulace teploty transduktorem.



Obrázek 3.13: Podoba prototypu

Kapitola 4

Implementace regulace

Po potvrzení koncepce regulace transduktorem jsem přikročil ke stavbě finálního stabilizátoru. Fotky izolačního obalu a úpravy podstavce magnetometru jsou na Obr. 4.3, fotka stabilizátoru je na Obr. 4.4.

4.1 Sestava magnetometru

Topné fólie jsou umístěny v párech na spodní straně podstavce magnetometru. Přilepeny jsou oboustrannou lepící páskou, a jejich přípoje jsou vyvedeny měděnou páskou o šířce přibližně 1 cm. Přívody samotné jsou uspořádány bifilárně (viz Obr 4.3a).

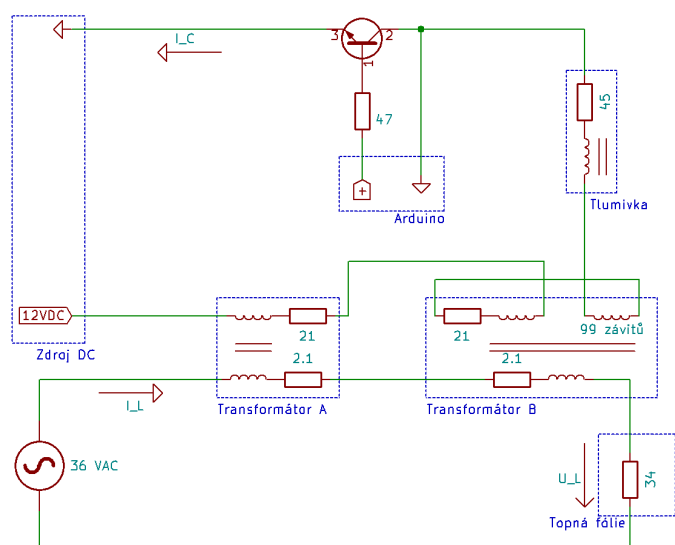
Izolační obal podstavce magnetometru je tvořen 5 vrstvami extrudovaného polystyrenu (XPS), každá o výšce 4 cm. Obal má půdorys rovnostranného trojúhelníku o hraně 60 cm, což znamená, že v každém směru kromě dolů od podstavce je nejméně 8 cm izolace. Obal je tvořen dvěma bloky slepených desek, a jeho váha spočívá na horní stěně podstavce (viz Obr 4.3d).

První (nejnižší) vrstva obsahuje dutiny pro průchod nožiček podstavce. Podstavec samotný je umístěn v druhé vrstvě. V této vrstvě je výřez pro umístění přívodů k magnetometru a topnému tělesu. Ve třetí vrstvě je pak dutina pro keramickou krychli, na které je umístěn magnetometr. Zbýlý materiál z druhé vrstvy je přilepen na plné čtvrté vrstvě, aby tuto dutinu v izolaci vykompenzoval a bylo tak dodrženo konzistentních 8 cm izolace.

4.2 Výkonový obvod

Pro účely testování implementace jsem pro napájení zátěže použil transformátor 220/36 V zapojený v síti. Na stanici Polom je zaveden obdobný zdroj.

Srdcem stabilizátoru jsou dva identické toroidní transformátory 230/36 V BREVE TUFVASSONS TTS100, každý o výkonu 100 VA a maximálním proudu v sekundárním okruhu 2,67 A[5]. Toroidní transformátory jsem zvolil



Obrázek 4.1: Schéma stabilizátoru

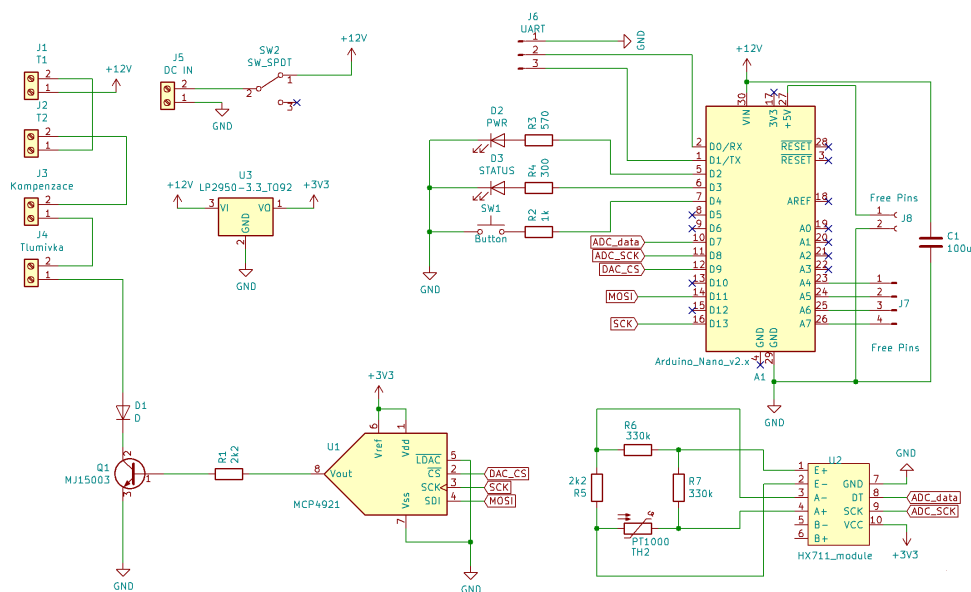
proto, že díky tvaru jejich jádra vykazují menší rozptylové toky, a tím se rychleji saturují oproti konvenčním transformátorům s jádry z plechů[9]. Při dimenzování výkonu jsem bilancoval cenu, dostatečně malý DC odpor sekundárního vinutí a dostatečně velkou indukčnost v nesaturovaném stavu. Sekundární (36 V) vinutí jsem použil jako zátěžová, primární jako regulační.

Napájecí napětí výkonového obvodu je $U_S = 36 \text{ V}$ a sério-paralelní kombinace šesti (tří dvojic) tepelných fólií má odpor $R_H \approx 34 \Omega$. To znamená, že pro dosažení výkonu 18 W jimi musí protékat proud $I_L = \sqrt{\frac{P}{R_H}} = 0,7 \text{ A}$. Tento proud omezuje odpor v zátěžovém obvodu na $R_{max} = \frac{U_S}{I_L} = 51 \Omega$, z čehož na transduktor samotný připadá 17,5 Ω . Pro transformátor to pak stanovuje minimální výkon 140 VA. Protože tyto transformátory byly velmi drahé, rozhodl jsem se použít 100 VA. Na stanici Polom by se v případě potřeby zvýšilo dodávané napětí.

Parametry zvoleného transformátoru byly lepší, než jsem očekával. Jeho DC odpor na sekundárním vinutí je 2,6 Ω , v primárním pak 21 Ω . Indukčnost sekundáru je přibližně 3 H pro malé proudy. Tomu odpovídá reaktance 1000 Ω a impedance 1400 Ω . To je konzistentní s chováním během provozu zařízení. Tato impedance omezuje proud transduktoru ve vypnutém stavu na 12 mA.

4.2.1 Parametry stabilizátoru

Stabilizátor je schopný dodat tepelný výkon do podstavce magnetometru v rozsahu 2,6 mW až 18,6 W s krokem přibližně 9 mW. Proudová a výkonová řídicí charakteristika transduktoru je na Obr. 4.5.



Obrázek 4.2: Schéma řídicího obvodu

4.3 Regulační obvod

Stejněměrná - tedy řídicí - část transduktoru je napájena ze spínaného zdroje *MEAN WELL APV-12-12*. Jedná se o AC-DC konvertor se vstupním síťovým napětím a výstupem 12 V, s výstupním proudem až 1 A. Vybral jsem jej pro jeho relativně malé zvlnění výstupního signálu (120 mVp-p) a dostatečnou výkonovou rezervu, která zajistí jeho dobré chlazení[17].

Tranzistor použitý v obvodu je tentýž jako v prototypu, MJ15003 NPN v zapojení SE (viz Sekci 3.3.2)[20]. Důvodem byla především dostupnost - byl pořízen v rámci stavby prototypu, a splňoval veškeré požadavky.

4.3.1 Potlačení vlivů vyšších harmonických

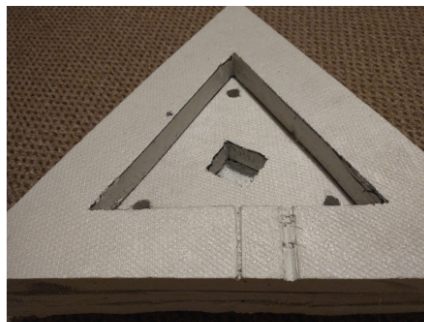
Protože zpětně indukované napětí v regulačním obvodu přesahovalo špičkově 20 V, přikročil jsem ke dvěma opatřením.

Na jádro B transduktoru, na němž jsem naměřil vyšší napětí než na jádře A, jsem navinul 100 závitů kompenzačního vinutí, které jsem pak zapojil antisériově k sekundárnímu vinutí jádra B. Tím jsem zpětně indukované napětí snížil na 12 Vp-p. Z jeho průběhu (Obr. 4.6) jsem usoudil, že další kompenzační vinutí již nepomůže. Napětí bylo důsledkem vyšších harmonických v obvodu[22].

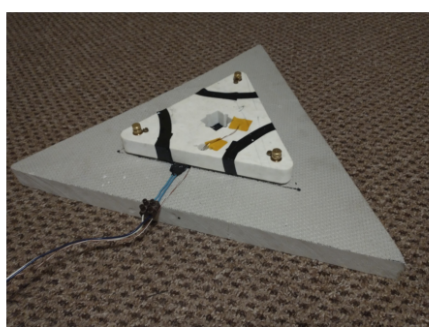
Do obvodu řízení jsem proto zařadil tlumivku, tvořenou sekundárním vinutím jednoho z měřících transformátorů, které jsem použil v prototypu, o indukčnosti 1,8 H (při provozních proudech). V chodu se tedy projeví jako impedance 570 Ω pro střídavou složku napětí v regulaci, ale jen jako odpor



(a) : Umístění topných fólií a přívodů



(b) : Horní část izolačního obalu



(c) : Umístění podstavce magnetometru v izolačním obalu



(d) : Sestava izolace

Obrázek 4.3: Fotky izolace, sestavy magnetometru a stabilizátoru

45 Ω pro stejnosměrnou složku.

4.3.2 Řídicí a měřicí elektronika

Pro napájení převodníků jsem použil lineární stabilizátor napětí LP2950CZ-3.3, dodávající napětí v rozsahu 3,221 - 3,379 V[19].

Jako ADC¹ jsem použil modul s 24 bitovým převodníkem HX711, optimalizovaný pro můstková zapojení. Připojen je přes modifikované rozhraní SPI² na mikrokontrolér[7]. Rozlišení 24 bitů umožňuje krok³ 20 nV.

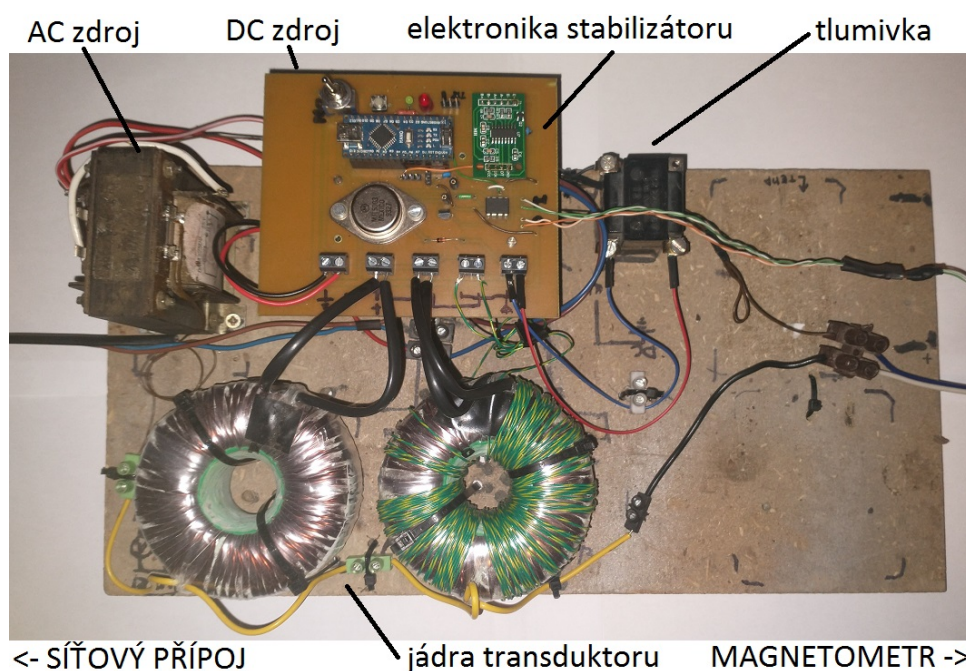
Použitý DAC⁴ je jednobitový 12 bitový převodník MCP4921 s rozsahem 0 - U_{DD} V, kde U_{DD} je napájecí napětí, v mém případě 3,3 V[18]. Změřil jsem stabilitu výstupního napětí multimetrem, a nepozoroval jsem žádné výchylky. Mohu tedy říct, že je stabilní na 1 mV. Rozlišení 12 bitů umožňuje regulaci s krokem 0,8 mV.

¹Analogově-digitální převodník

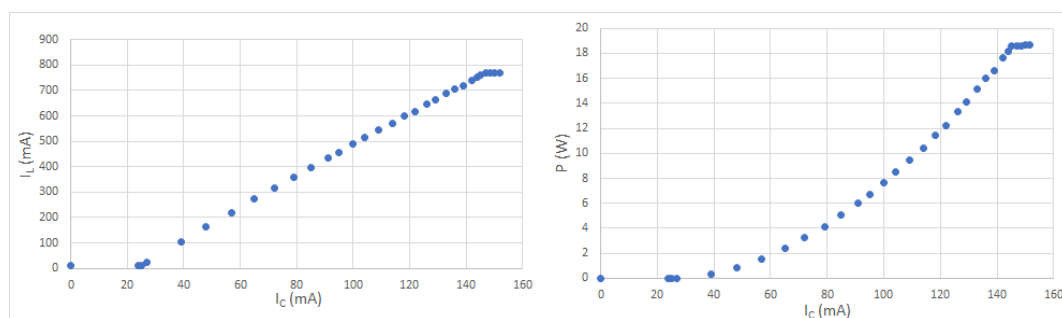
²Serial Periphering Interface

³Rozlišení se spočítá jako $\frac{U_{DD}}{2^N}$, kde U_{DD} je vstupní napětí a N je počet bitů.

⁴Digitálně-analogový převodník



Obrázek 4.4: Fotka stabilizátoru



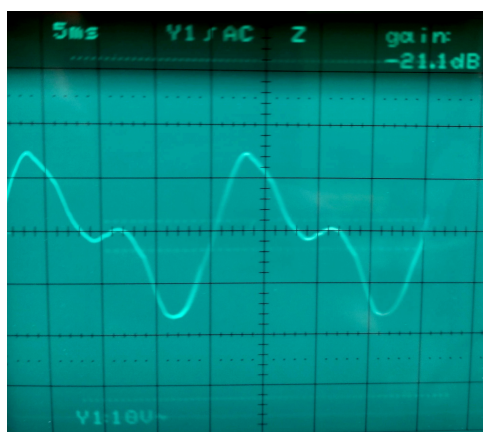
Obrázek 4.5: Proudová (vlevo) a výkonová (vpravo) řídicí charakteristika transduktoru

Použitý mikrokontrolér je Arduino Nano v2.3 na platformě Atmega 328P, disponující 8 bitovou architekturou a frekvencí 18 MHz[3]. Arduino jsem zvolil pro jeho dostupnost, robustnost, jednoduchý přístup a dostačující vlastnosti. Napájeno je přes vlastní stabilizátor přímo ze zdroje 12 V pro regulační obvod (s blokovacím kondenzátorem).

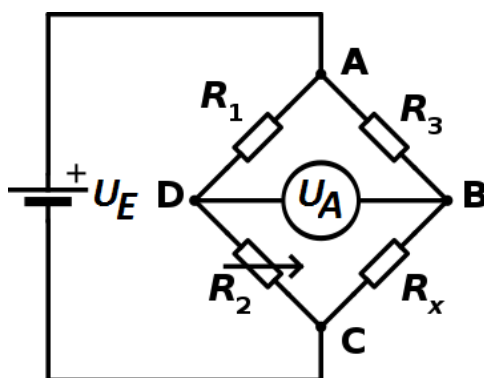
4.3.3 Teploměr

Jako teploměr jsem použil odporový senzor Pt1000, neboť disponuje známým převodním vztahem mezi odporem a teplotou, a na změnu teploty reaguje relativně velkou změnou odporu. Rovnice obecného senzoru Pt1000 pro teploty $t > 0$ °C je[15]

$$R_{Pt1000} = 1000(1 + 3.9083 \times 10^{-3} t - 5.775 \times 10^{-7} t^2) \quad (4.1)$$



Obrázek 4.6: Průběh napětí na řídicí straně transduktoru při svorkách naprázdno (po kompenzaci dalším vinutím)



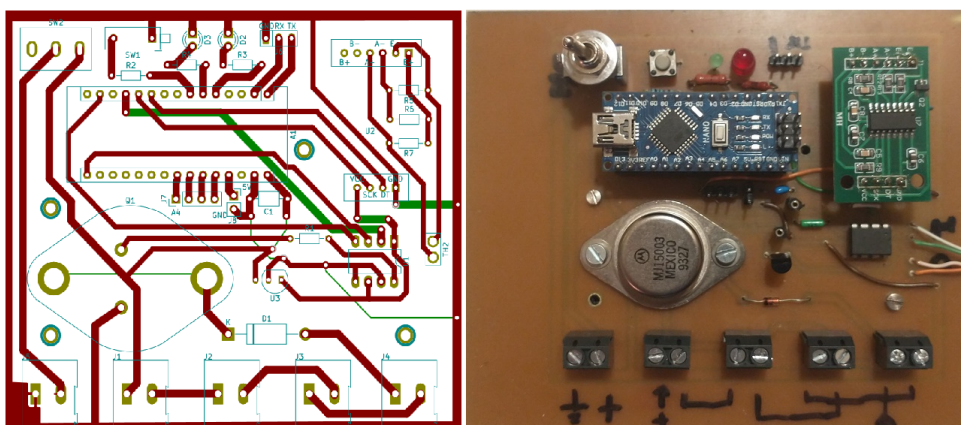
Obrázek 4.7: Wheatstoneův můstek[10]

Senzor je zapojen ve Wheatstoneově můstku (viz Obr. 4.2). Proud senzorem je rezistory omezen na $I_{Pt1000} = 100 \mu\text{A}$. Senzor je přilepen na podstavci magnetometru, takže efekt ohřevu vlastním průchodem proudu je snížen, což umožňuje vyšší proud.

Pro zapojení podle Obr. 4.7, kde R_x je odpor senzoru Pt1000 a jeho přívodů, $R_1 = R_3 = 300 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 2 \text{ k}\Omega$, $U_E = 3,3 \text{ V}$ je excitační napětí dodané svorkami ADC a U_A je napětí naměřené ADC, platí[10]:

$$U_A = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_x}{R_x + R_3} \right) U_E \quad (4.2)$$

$$R_x = \frac{R_2 \cdot U_E - (R_1 + R_2) \cdot U_A}{R_1 \cdot U_E + (R_1 + R_2) \cdot U_A} R_3 \quad (4.3)$$



Obrázek 4.8: Deska plošných spojů - schéma (vlevo) a foto (vpravo)

4.4 Deska plošných spojů

Pro umístění elektroniky řídicího obvodu jsem navrhl, vyfrézoval a osadil desku plošných spojů. Její podoba je na Obr. 4.8. Obsahuje všechny komponenty řídicího obvodu kromě transformátorů, DC zdroje a tlumivky. Pro připojení těchto součástek obsahuje svorky.

Mimo komponentů řídicího obvodu obsahuje dvě signalizační diody (Napájení a Status), tlačítko, spínač pro napájení a vyvedení pinů pro sériovou komunikaci.

K umístění desky plošného spoje do stabilizátoru jsem na 3D tiskárně vytiskl dvoupatrový podstavec, jehož horní patro drží desku a spodní drží DC zdroj.

4.5 Software

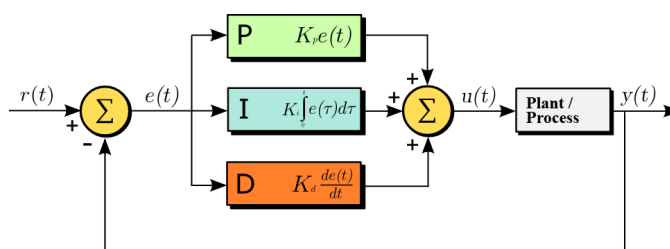
Software k ovládání regulátoru jsem napsal pro účely této práce, s využitím principu PID kontroly.

4.5.1 PID

PID kontrolér je jednoduchý kontrolní algoritmus, který sestává ze tří složek: proporcionální, integrální, derivativní. Tyto složky váženým součtem přes koeficienty vytvoří výstup[2]. Diagram PID regulace je na Obr. 4.9.

Proporcionální složka porovnává současnou hodnotu (vstup ze zpětné vazby) s nastavenou, a nastavuje výstup na jejich rozdíl e . Je zesílena koeficientem k_P .

Integrální složka sčítá e v čase. Důsledkem je, že i malá odchylka způsobí rostoucí odezvu kontroléru. Integrální složka roste, dokud e nedosáhne nuly.



Obrázek 4.9: Diagram PID regulace[6]

Je zesílena koeficientem k_I .

Derivativní složka je proporcionální rychlosti změny vstupní hodnoty. Zajišťuje, že výstup klesne pokud rychle roste vstup. Je zesílena koeficientem k_D .

Rovnice PID kontroly je:

$$Výstup = k_P e(t) + k_I \int e(t) dt + k_D \frac{d}{dt} e(t) \quad (4.4)$$

kde $e = \text{nastavená hodnota} - \text{vstup}$ a k_P, k_I, k_D jsou koeficienty.

4.5.2 Program

Pro řízení regulátoru jsem použil open-source vývojovou platformu Arduino, poskytující jednoduchý přístup k funkcím mikrokontroléru. Algoritmus programu je na Obr. 4.10.

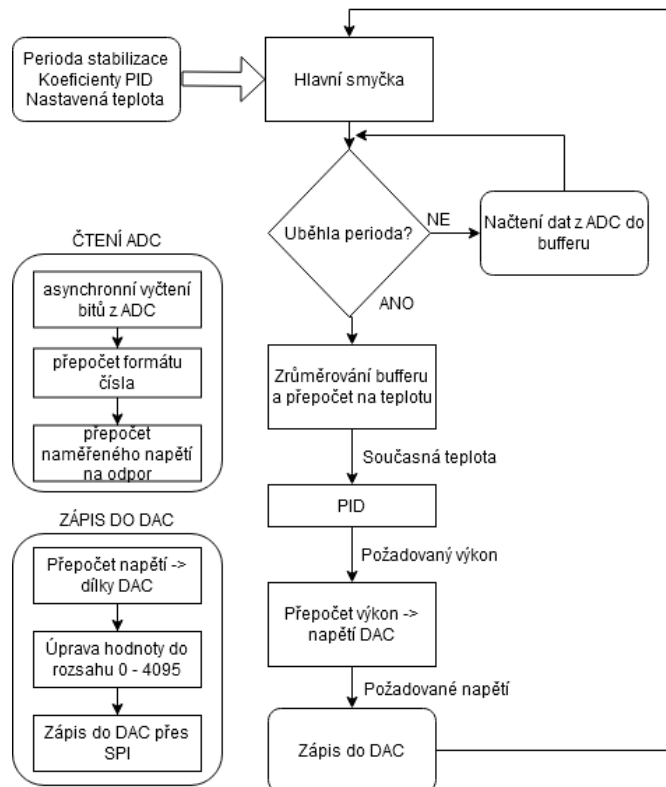
Program s periodou 2000 ms vyhodnocuje aktuální teplotu hlavice magnetometru. Hodnoty z ADC program čte po dobu periody⁵, následně spočítá jejich průměr a ten předá PID regulátoru, který vypočítá potřebnou hodnotu výkonu. Ta je přepočítána na výstup z DAC, který je následně zapsán. V případě, že je mikrokontrolér připojen k PC, je možné jedou za periodu odeslat přes rozhraní UART do terminálu na PC změřenou teplotu a výkonový výstup.

Software umožňuje ladění koeficientů PID kontroléru za běhu, čehož jsem plně využil. Výsledné koeficienty, při nichž poskytuje stabilizátor přijatelný rozptyl teploty, jsou:

$$k_P = 7500, k_I = 250, k_D = 0 \quad (4.5)$$

Stabilizátor pracuje jen s proporcionální a malou integrační složkou, což je umožněno relativně velkou teplotní setrvačností sestavy.

⁵Při periodě 2000 ms je to desetkrát



Obrázek 4.10: Algoritmus řídicího SW

Kapitola 5

Testování

Po zkonstruování a naprogramování stabilizátoru, topného tělesa a izolačního obalu magnetometru jsem mohl celý systém otestovat. Náčrt konfigurace pro měření je na Obr. 5.1.

5.1 Vyzařované EM rušení

Jedním ze základních požadavků na teplotně stabilizační systém pro magnetometr na Polomu je minimální elektromagnetické rušení. Pro měření EM rušení (dále EMI, z anglického *Electromagnetic Interference*) jsem použil jednoosý magnetometr sestávající z fluxgate senzoru DRV425 připojeného přes 24bitový ADC na mikroprocesor a převodník UART – USB k vyhodnocovacímu software na platformě LabView. Senzor disponuje rozsahem 0 - 100 kHz, nízkou úrovní šumu, typicky $1,5 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$, a maximálním offsetem $\pm 8 \mu\text{T}$. Přesnost magnetometru je 2% (max), teplotní drift je 50 ppm/°C (max)[28].

Měření byla provedena s osou citlivosti magnetometru směřující normálově od povrchu Země při vzorkovací frekvenci 60 kHz.

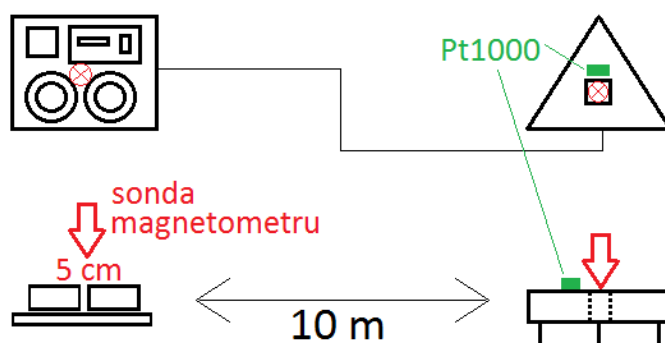
Grafy níže zobrazují amplitudovou spektrální hustotu výkonu vyzařování (označená jako *APSD*, jednotka $\text{T}/\sqrt{\text{Hz}}$) v závislosti na frekvenci. Data byla průměrována ze sta vzorků.

5.1.1 EMI: Transduktor

Pro měření pole transduktoru jsem sondu umístil asi 5 cm nad středem sestavy stabilizátoru.

Jak je vidět z Obr. 5.2, transduktor generuje při maximálním výkonu magnetické pole velikostně srovnatelné s magnetickým polem Země. Složka na 50 Hz dosahuje téměř $20 \mu\text{T}$. Velmi dobře viditelné jsou i další harmonické složky, zejména druhá, třetí a pátá, které všechny přesahují $1 \mu\text{T}$.

Je zřejmé, že stabilizátor nesmí být umístěn v blízkosti magnetometru. Za účelem zjištění nejmenší vzdálenosti, která mezi senzorem a stabilizátorem



Obrázek 5.1: Náčrt konfigurace pro měření

f (Hz)	B_{max} (nT)
50	25
150	8
250	2
> 250	< 1,5 (šum)

Tabulka 5.1: Amplitudy magnetického pole topného tělesa při harmonických frekvencích

musí být, jsem s magnetometrem ustupoval od stabilizátoru, dokud nebylo spektrum magnetického pole nerozeznatelné od šumu senzoru. K tomu došlo ve vzdálenosti přibližně dvou metrů od stabilizátoru, jak je vidět na Obr. 5.3.

Na stanici Polom je pro instalaci stabilizátoru k dispozici přístřešek umístěný přibližně 10 m od měřicí hlavice, což je podle závěrů tohoto měření dostatečné.

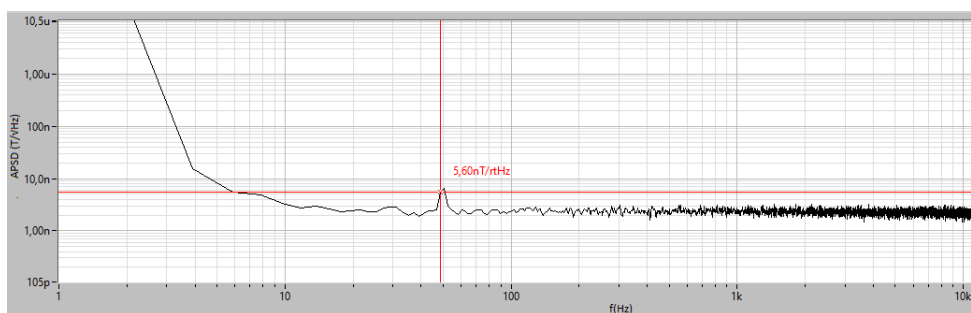
5.1.2 EMI: Topná tělesa

Pro změření elektromagnetického pole topného tělesa jsem sondu umístil doprostřed dutiny v podstavě magnetometru, tedy asi 2 cm pod místo, kde by se nacházel magnetometr. Orientoval jsem ji ve směru největšího magnetického pole - kolmo na na podstavec magnetometru (tj. kolmo k povrchu Země).

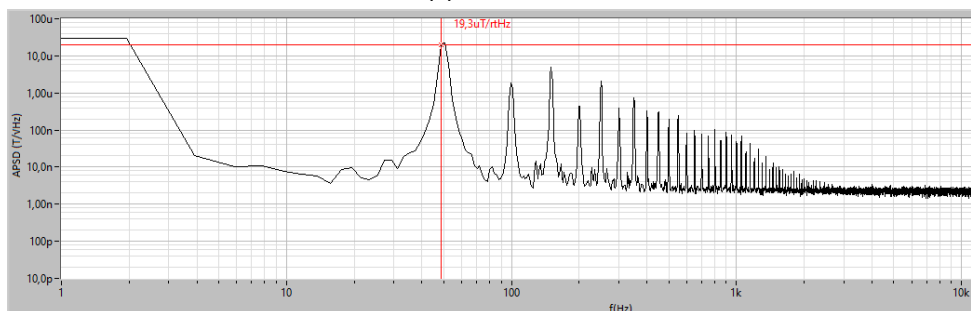
Při minimálním výkonu (≈ 3 mW) je magnetické pole topného tělesa zanedbatelné proti pozadí (viz Obr. 5.4a a b). Při plném výkonu dosahuje pole na frekvenci 50 Hz přibližně 26 nT, znatelné jsou rovněž 3. a 5. harmonické složky (8 nT resp. 2 nT). Viz Obr. 5.4c a souhrn v Tab. 5.1. Ostatní frekvenční složky jsou neznatelné proti pozadí.

Bifilární uspořádání spolu s volbou regulátoru proudu zajistilo, že se v magnetickém poli proti šumu¹ projeví jen 3 frekvenční složky.

¹1,5 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ [28]

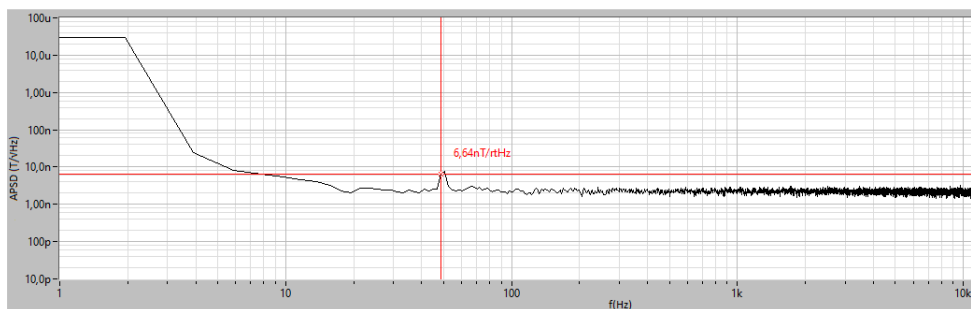


(a) : Pozadí



(b) : Plný výkon

Obrázek 5.2: EMI: Transduktor



Obrázek 5.3: Spektrum rušení 2 metry od transduktoru

5.2 Frekvenční analýza topného proudu

Pro lepší pochopení zdrojů konkrétní podoby magnetického pole generovaného stabilizátorem jsem se rozhodl ověřovat průběh topného proudu a provést frekvenční analýzu. Výstupem této analýzy je amplitudová spektrální hustota výkonu.

K měření jsem použil indukční proudovou sondu připojenou k digitálnímu osciloskopu Keysight InfiniiVision. Data jsem zpracoval v programu Matlab pomocí Welchovy metody.

Průběhy proudu a spektrální výkonové hustoty (vzaté ze značně delšího průběhu) jsou na Obr. 5.6. Proud je deformován průchodem transduktorem, kvůli kterému je v průběhu proudu silná složka vyšších harmonických, zejména

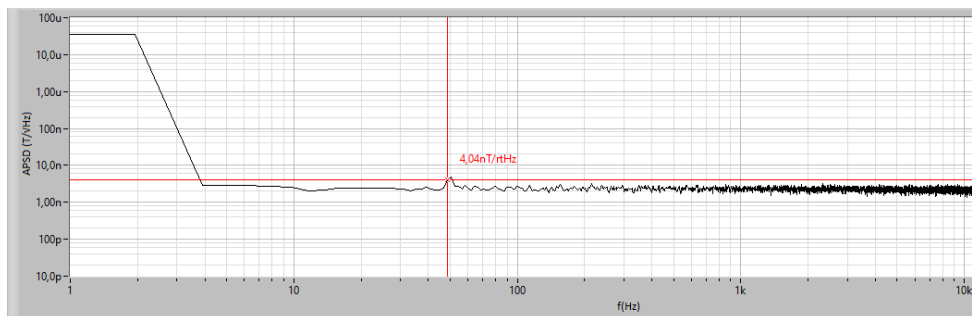
třetí, páté a sedmé (150, 250 a 350 Hz). Amplitudy výkonových hustot těchto harmonických (a ještě druhé) v závislosti na amplitudě proudu jsou na Obr. 5.5. Jak je vidět, mírně stoupají s výkonem. Anomálii tvoří amplituda druhé harmonické při plném výkonu, jejíž pokles je dán plnou saturací jader transduktoru[22].

Frekvenční analýza topného proudu vysvětluje spektrální hustotu výkonu magnetického pole generovaného stabilizátorem. Je nutné, aby se při numerickém zpracování magnetických měření navzorkovaly a odfiltrovaly složky s největší amplitudou - tedy 150 a 250 Hz.

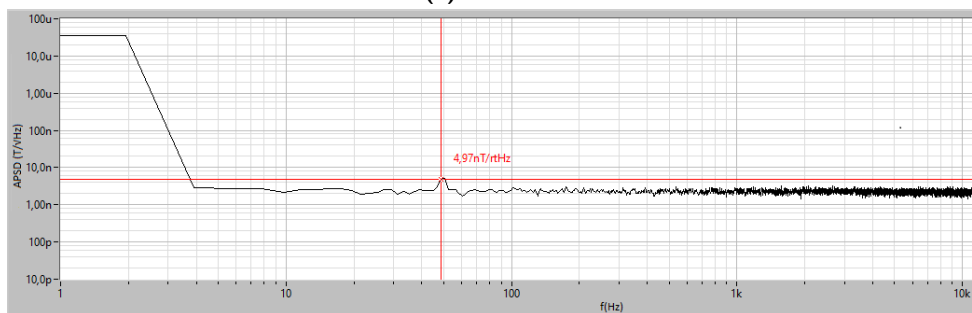
5.3 Stabilizace teploty

Smyslem testu stabilizace teploty je ověření splnění prvního bodu zadání, tedy stabilizace teploty v rozmezí $\pm 0,5$ °C. Průběh teploty podstavce magnetometru jsem získal přímo z mikrokontroléru ve stabilizátoru. Teplota je snímána odporovým čidlem umístěným na horní stěně podstavce.

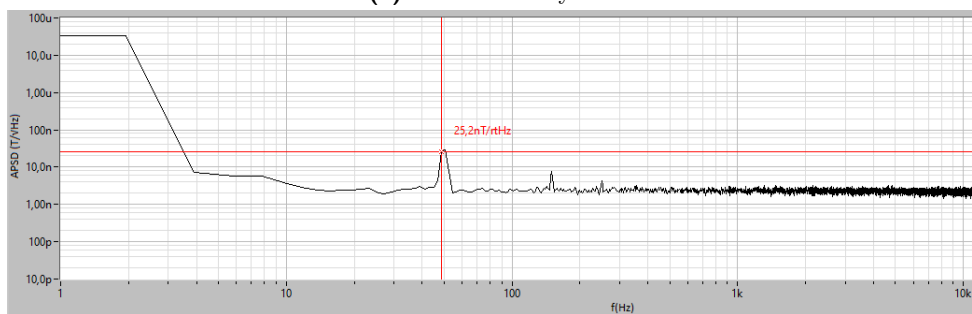
Průběh teploty a dodaného výkonu po dobu přibližně 5,5 hodin při okolní teplotě 13 - 10 °C je na Obr. 5.7. První hodina, kdy se sestava zahřívala na nastavenou teplotu 50 °C je z výsledků odstraněna. Po dosažení požadované hodnoty se teplota sestavy drží většinu času na hodnotě $50_{-0,4}^{+0,2}$ °C, což splňuje zadání. Po dovršení požadované teploty systém nikdy nepoužije více než 5 W, což je jen 28% instalovaného výkonu (18 W), což je při dané venkovní teplotě srovnatelný výsledek se simulací (viz pravou část grafu na Obr. 3.3).



(a) : Pozadí

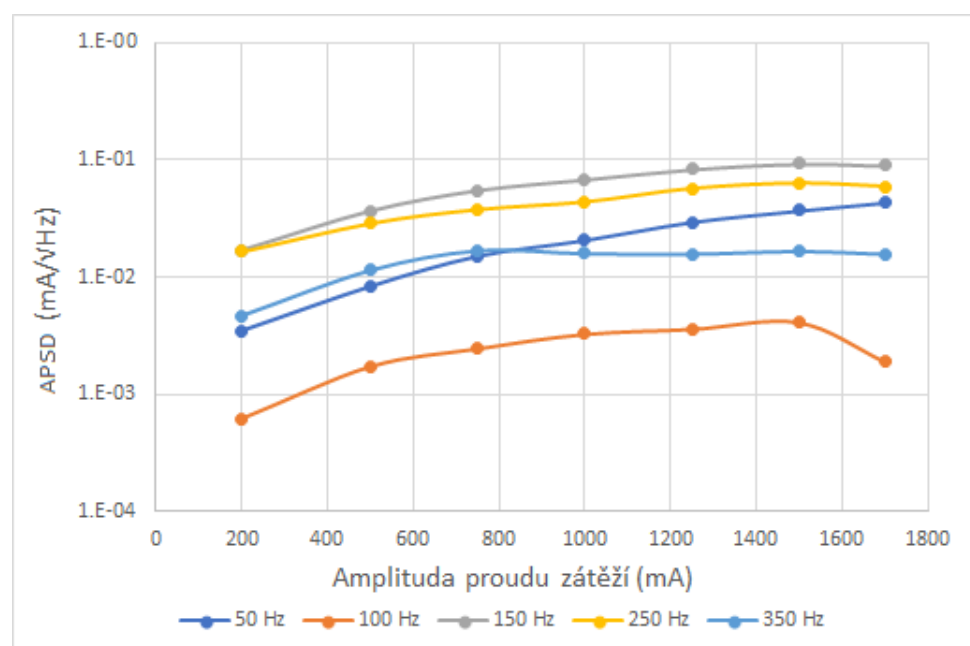


(b) : Minimální výkon

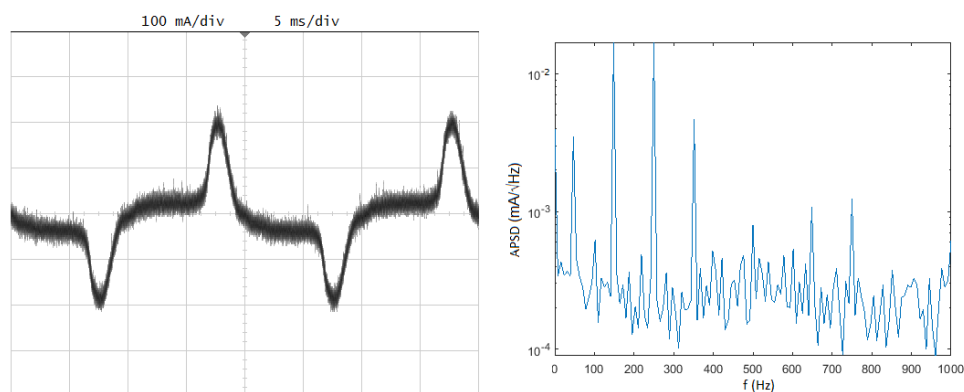


(c) : Plný výkon

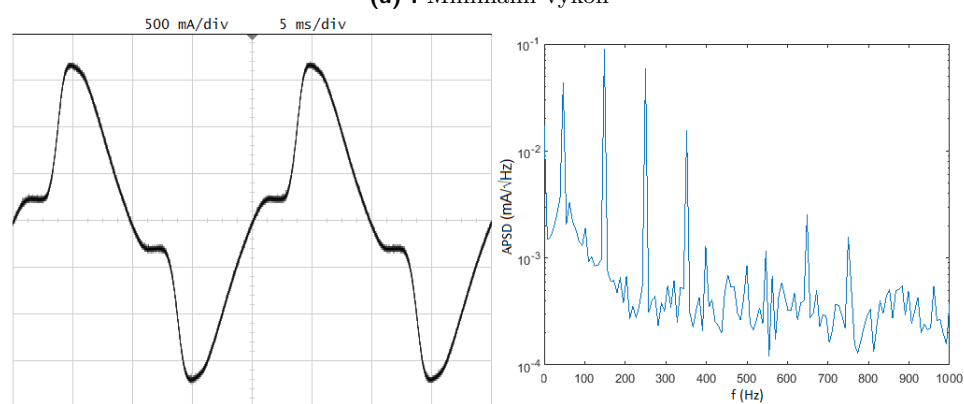
Obrázek 5.4: EMI: Topná tělesa



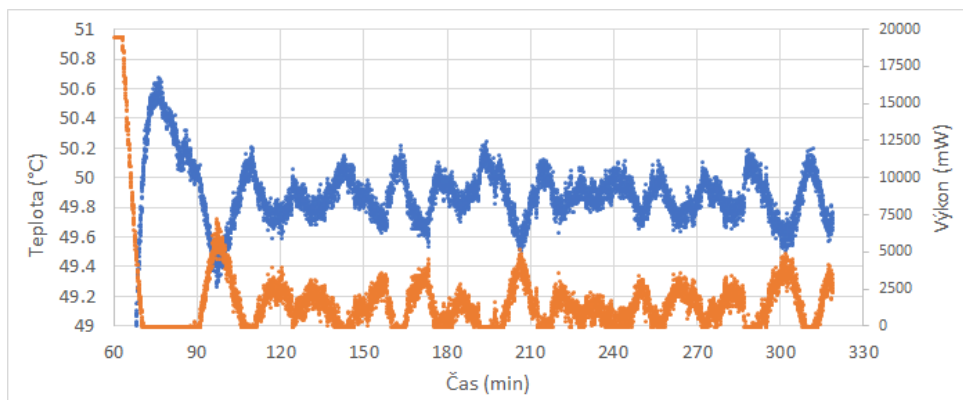
Obrázek 5.5: Jednotlivé harmonické podle výkonu



(a) : Minimální výkon



(b) : Maximální výkon

Obrázek 5.6: Průběh proudu zátěží (vlevo) a jeho spektrální výkonová hustota (vpravo)**Obrázek 5.7:** Stabilizovaná teplota (30 vzorků za minutu)

Kapitola 6

Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout, postavit a otestovat teplotně stabilizační systém pro hlavici magnetometru. Systém má za úkol omezit odchylku magnetických měření vlivem změny teploty bez toho, aniž by sám znehodnotil měření elektromagnetickým rušením.

V rámci teoretické části práce jsem vysvětlil mechanismus teplotního posuvu a jeho vliv na měření. Následně jsem diskutoval různé možnosti teplotní stabilizace, obzvláště s ohledem na minimální vyzařované magnetické pole. Zvolil jsem přímé odporové vytápění podstavce magnetometru střídavým proudem o síťové frekvenci regulovaným transduktorem, jehož princip a funkce jsou v práci rovněž popsány.

V praktické části práce jsem provedl simulaci, která určila potřebný topný výkon. Zkonstruoval jsem prototyp stabilizátoru a ověřil tak, že navržený systém bude splňovat podmínky na odchylku teploty a elektromagnetickou kompatibilitu. Podle návrhu jsem pak systém zkonstruoval z dvojice toroidních transformátorů, tranzistoru, tlumivky a mikrokontroléru, jemuž jsem napsal software pro PID regulaci.

Celý systém jsem v poslední části práce otestoval na stabilizační funkci a elektromagnetickou kompatibilitu, v rámci čehož jsem provedl měření magnetometrem, abych zjistil konkrétní podobu magnetického pole vyzařovaného jak stabilizátorem, tak přímo topným tělesem.

Transduktor, topné těleso i izolace fungují podle předpokladů, systém udržuje teplotu na hodnotě $50_{-0,4}^{+0,2}$ °C při rozsahu venkovní teploty od 13 do 15 °C. Činí tak při použití čtvrtiny instalovaného výkonu (špičkově), což mě vede k závěru, že systém splní parametry návrhu i pro požadovaný rozsah teplot. Magnetické pole transduktoru při plném výkonu, 19,3 μ T, je na frekvenci 50 Hz velikostně srovnatelné s vertikální složkou magnetického pole Země. Provedl jsem proto měření minimální vzdálenosti mezi stabilizátorem a magnetometrem, která se musí dodržet, a došel k závěru, že na stanici Polom nebude s umístěním problém. Magnetické pole topného tělesa má znatelné špičky jen na frekvencích 50, 150 a 250 Hz, a to o amplitudách 26, 8 a 2 nT. To umožňuje jejich budoucí numerické odstranění z dat, popř. jejich filtraci. Testování mě vede k závěru, že navržený a zkonstruovaný systém splňuje

zadání.

Konečným cílem projektu je nainstalovat teplotní stabilizátor na stanici Polom. Proto projekt teplotní stabilizace touto prací nekončí, a nekončí ani má účast v něm. Mimo jiné bude nutné stabilizátor otestovat a změřit za lepších podmínek, než jaké umožnila tato práce. Musí se ověřit vliv elektroniky stabilizátoru na magnetická měření, nejlépe společným testem obou systémů, a pokud to bude nutné, navrhnout patřičnou filtraci. Posledním krokem pak bude instalace na stanici, ověření funkce celé sestavy a vyhodnocení přínosu teplotní stabilizace pro měření.



Příloha A

Seznam zkratk

Zkratka	Slovy	Překlad / Význam
EMC	Electromagnetic Com- patibility	Elektromagnetická kompatibilita
EMI	Electromagnetic Inter- ference	Elektromagnetické rušení
PVC	Polyvinylchlorid	
EM	Elektromagnetický	
AC	Alternating Current	Střídavý proud, též "střídavý"
DC	Direct Current	Stejnoseměrný proud, též "stejnoseměrný"
XPS	Extrudovaný polysty- ren	
PID	Proportional-Integral- Derivative	regulační algoritmus
ADC	Analog to Digital Con- verter	Analogově-digitální převodník
DAC	Digital to Analog Con- verter	Digitálně-analogový převodník
APSD	Amplitude Power Spectral Density	Amplitudová spektrální hustota výkonu
UART	Universal Asynchro- nous Receiver and Transmitter	protokol a součástka pro asynchronní sériovou komunikaci
SPI	Serial Peripheral Inter- face	protokol pro synchronní sériovou komunikaci

Tabulka A.1: Seznam zkratek

Příloha B

Literatura

- [1] Dobruška/Polom (DPC). *Geofyzikální ústav Akademie věd ČR*, 2020, [online].
URL <<https://www.ig.cas.cz/vyzkum-a-vyuka/observatore/ceska-regionalni-seismicka-sit/dobruska-polom-dpc/>>
- [2] PID Theory Explained. Mar 2020, [online].
URL <<https://www.ni.com/cs-cz/innovations/white-papers/06/pid-theory-explained.html>>
- [3] Arduino.cc: *Arduino Nano v2.3.6* 2008, datasheet [online].
- [4] Austrin, L.: *On magnetic amplifiers in aircraft applications*. Dizertační práce, KTH, 2007.
- [5] Breve Tufvassons: *TTS Toroidal Transformers*. 1 2015, datasheet [online].
- [6] contributors, W.: PID.svg. 12 2004, [online].
URL <https://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller#/media/File:PID_en.svg>
- [7] Eclipse RA: *HX711 AD převodník 24-bit 2 kanály*. 10 2016, datasheet [online].
- [8] Erlicki, M.; Schieber, D.; Uri, J. B.: A simplified approach to instruction in saturable reactors and magnetic amplifiers. *IEEE Transactions on Education*, ročník 8, č. 4, 1965: str. 93.
- [9] Hernández, I.; De Leon, F.; Gómez, P.: Design formulas for the leakage inductance of toroidal distribution transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, ročník 26, č. 4, 2011: str. 2198.
- [10] Hoffmann, K.: *Applying the Wheatstone bridge circuit*. HBM Germany, 1974, 3–3 s.
- [11] Jankowski, J.; Sucksdorff, C.: *Guide for magnetic measurements and observatory practice*. 1996.

