



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

NÁVRH NEPŘÍMÉHO SNÍMÁNÍ POLOHY ŠKRTÍCÍ KLAPKY PLYNOVÉHO VENTILU

DESIGN OF INDIRECT SENSING OF GAS VALVE THROTTLE POSITION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jaroslav Burian

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Alexandr Otáhal, Ph.D.

BRNO 2024

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

Student: Bc. Jaroslav Burian

ID: 220798

Ročník: 2

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Návrh nepřímého snímání polohy škrtkící klapky plynového ventilu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Provedte rešerši na metody snímání polohy škrtkící klapky u plynových ventilů. Zaměřte se také na provedení a výhody a nevýhody jednotlivých řešení. Sestrojte zařízení pro snímání škrtkící klapky pomocí dvou cívek. Využijte metody měření vzájemné indukčnosti nebo transformačního poměru. Snažte zohlednit kritéria vyžadovaná pro plynové zařízení dle normy EN 60730-2-5. Uvažujte rozsah snímání maximálně 12 mm, napájecí napětí 24 V a výstup na modbus/LIN vrstva. Zařízení otestujte na škrtkící klapce ventilu PX52. Všechny postupy a dosažené výsledky popište v diplomové práci.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 21.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Alexandr Otáhal, Ph.D.

doc. Ing. Lukáš Fucík, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem obvodu pro měření pozice škrtící klapky ventilu PX52 od firmy Resideo. V teoretické části jsou rozebrány metody, jejichž princip lze využít pro určení pozice škrtící klapky řízené krokovým motorem. Následně byly popsány komunikační protokoly, mezi kterými lze volit při návrhu. Dále byly popsány metody pro měření vzájemných vlastností cívek. V praktické části byla vytvořena DPS pro ověření obou metod. Dále je v práci popsán program pro otestování obou metod. Tyto metody jsou mezi sebou porovnány pro různé varianty cívek. Na závěr je zvolena metoda a upraven program pro měření.

KLÍČOVÁ SLOVA

Plynový ventil, škrtící klapka, vodík, krokový motor, cívky, vzájemná indukčnost, transformační poměr

ABSTRACT

This thesis deals with the design of a circuit for measuring the throttle position of the PX52 valve from Resideo. The theoretical part discusses the methods whose principle can be used to determine the position of the throttle valve controlled by a stepper motor. Subsequently, the communication protocols that can be chosen between in the design are described. Methods for measuring the mutual properties of the coils were also described. In the practical part, a PCB was created to verify both methods. Furthermore, a program for testing both methods is described in the paper. These methods are compared with each other for different coil variants. Finally, the method is selected and the program is modified for the measurements.

KEYWORDS

Gas valve, throttling valve, hydrogen, stepper motor, coils, common inductance, transformation ratio

BURIAN, Jaroslav. *Návrh nepřímého snímání polohy škrťící klapky plynového ventilu.*
Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a ko-
munikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2024. Vedoucí práce: Ing. Alexandr
Otáhal, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Bc. Jaroslav Burian
VUT ID autora: 220798
Typ práce: Diplomová práce
Akademický rok: 2023/24
Téma závěrečné práce: Návrh nepřímého snímání polohy škrtkící klapky plynového ventilu

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

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

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu semestrální práce panu Ing. Alexandru Otáhalovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a rady k formální upravě práce. Dále by chtěl poděkovat kolegovi a konzultantovi Ing. Michalu Štěpánkovi za bohaté rady a zkušenosti a za vedení celého projektu ve firmě Resideo. Dále pak přítelkyni rodině za podporu během celého studia.

Obsah

Úvod	13
1 Plynový ventil	14
2 Metody měření polohy škrtkící klapky	16
2.1 Měření polohy krokového motoru	16
2.1.1 Měření zpětného EMF	16
2.1.2 Měření pomocí enkodéru	17
2.2 Měření polohy hřídele	19
2.2.1 Měření pomocí potenciometru	19
2.2.2 Měření pomocí LVDT	20
3 Komunikační protokoly	21
3.1 Modbus	21
3.2 LIN bus	23
4 Měření vzájemných vlastností cívek	25
4.1 Transformační poměr	25
4.2 Vzájemné indukčnosti	25
5 Návrh elektroniky	26
5.1 Celkový koncept	26
5.2 Výběr mikrokontroleru	27
5.3 Blok napájení	28
5.4 AD a DA převodníky	28
5.5 Úprava vstupního a výstupního signálu	29
5.6 Přepínání měřících metod	31
5.7 Měřící metody	32
5.8 Řízení krokového motoru	35
5.9 Komunikace	36
5.10 Implementace normy EN 60730-2-5	37
5.11 Navržená DPS	37
6 Programové řešení	38
6.1 Úvodní konfigurace	38
6.2 Řízení motoru	38
6.3 Modbus komunikace	39
6.4 Měření cívek	41

6.4.1	Vyhodnocovací algoritmus	41
6.4.2	Měření transformačního poměru	43
6.4.3	Měření vzájemné indukčnosti	44
7	Oživení zařízení	45
7.1	Úpravy programu	45
7.2	Úprava zapojení	46
7.3	Ověření funkčnosti měření	48
7.3.1	Transformační metoda	49
7.3.2	Metoda vzájemné indukčnosti	51
8	Testování měřících metod	53
8.1	Testování metody transformačního poměru	53
8.1.1	Měření dvojice cívek - primární 2715 závitů, sekundární 478 závitů	54
8.1.2	Měření dvojice cívek - primární 100 závitů, sekundární 100 závitů	58
8.1.3	Měření dvojice cívek - primární 1000 závitů, sekundární 1000 závitů	61
8.1.4	Vyhodnocení	64
8.2	Testování metody vzájemné indukčnosti	65
8.2.1	Měření dvojice cívek - primární 2715 závitů, sekundární 478 závitů	67
8.2.2	Měření dvojice cívek - primární 100 závitů, sekundární 100 závitů	71
8.2.3	Měření dvojice cívek - primární 1000 závitů, sekundární 1000 závitů	74
8.2.4	Vyhodnocení	78
8.3	Výběr metody	79
9	Úprava měřícího programu	80
	Závěr	82
	Literatura	84
	Seznam symbolů a zkratk	89
	Seznam příloh	90

A Schémata DPS	91
A.1 Zapojení bloku napájení	92
A.2 Zapojení mikrokontroléru	93
A.3 Zapojení AD a DA převodníku	94
A.4 Zapojení měřících metod	95
A.5 Zapojení přepínání cívek	96
A.6 Zapojení ovládání motoru	97
A.7 Zapojení komunikace	98
B Program pro mikrokontroler	99

Seznam obrázků

1.1	Plynový ventil PX52 [1].	14
1.2	Škrtící klapka ventilu PX52.	15
2.1	Optický enkodér [11].	17
2.2	Mechanická konfigurace AS5600 [12].	18
2.3	Princip kapacitního enkodéru [12].	18
2.4	Lineární aktuátor s potenciometrem [15].	19
2.5	Princip LVDT [16].	20
3.1	Základní rámec Modbus zprávy [19].	21
3.2	Průběh Modbus komunikace bez chyby [21].	22
3.3	Průběh Modbus komunikace s chybou [21].	22
3.4	Rámec hlavičky - LIN bus [24].	23
3.5	Rámec odpovědi - LIN bus [24].	24
5.1	Blokový diagram elektronického obvodu.	26
5.2	Schéma vstupní úpravy signálu.	29
5.3	Schéma výstupního úpravy signálu.	30
5.4	Schéma zapojení obvodu pro přepínání metod měření cívek.	31
5.5	Schéma zapojení obvodu pro měření indukčnosti.	32
5.6	Vylepšený Howlandův zdroj proudu.	33
5.7	Obvod úpravy signálu sekundární cívky transformační metody.	34
5.8	Zapojení řízení krokového motoru.	35
5.9	Zapojení komunikace.	36
5.10	Navržená DPS.	37
6.1	Vyhodnocovací algoritmus.	41
6.2	Blokové schéma zapojení transformační metody.	43
6.3	Napětí v Gaussově rovině [51].	43
6.4	Blokové schéma zapojení metody vzájemné indukčnosti.	44
7.1	Špatný (vlevo) a správný (vpravo) výstup DA převodníku.	45
7.2	Zákmity způsobené externím vzorkovacím kondenzátorem.	47
7.3	Nabíjení vzorkovacího kondenzátoru mezi měřeními.	48
7.4	Blokové schéma zapojení pro ověření transformační metody.	49
7.5	Generovaný (žlutý) a měřený (fialový) signál pro transformační metodu.	50
7.6	Blokové schéma zapojení pro ověření metody vzájemné indukčnosti.	51
7.7	Generovaný (žlutý) a měřený (fialový) signál pro metodu vzájemné indukčnosti.	52
8.1	Blokový diagram testování transformační metody.	54
8.2	Změna amplitudy v čase bez pohybu motoru (2715/478 závitů).	55

8.3	Změna amplitudy v čase bez pohybu motoru se změnou teploty z 20 °C na 70 °C (2715/478 závitů).	55
8.4	Změna amplitudy při pohybu motoru (2715/478 závitů).	56
8.5	Změna amplitudy v čase bez pohybu motoru (100/100 závitů).	58
8.6	Změna amplitudy v čase bez pohybu motoru se změnou teploty z 20 °C na 70 °C (100/100 závitů).	59
8.7	Změna amplitudy při pohybu motoru (100/100 závitů).	60
8.8	Změna amplitudy v čase bez pohybu motoru (1000/1000 závitů).	61
8.9	Změna amplitudy v čase bez pohybu motoru se změnou teploty z 20 °C na 70 °C (1000/1000 závitů).	62
8.10	Změna amplitudy při pohybu motoru (1000/1000 závitů).	63
8.11	Blokový diagram testování metody vzájemné indukčnosti.	66
8.12	Změna vzájemné indukčnosti v čase bez pohybu motoru (2715/478 závitů).	67
8.13	Změna vzájemné indukčnosti v čase bez pohybu motoru se změnou teploty z 20 °C na 70 °C (2715/478 závitů).	68
8.14	Změna vzájemné indukčnosti při pohybu motoru (2715/478 závitů).	69
8.15	Změna vzájemné indukčnosti v čase bez pohybu motoru (100/100 závitů).	71
8.16	Změna vzájemné indukčnosti v čase bez pohybu motoru se změnou teploty z 20 °C na 70 °C (100/100 závitů).	72
8.17	Změna vzájemné indukčnosti při pohybu motoru (100/100 závitů).	73
8.18	Změna vzájemné indukčnosti v čase bez pohybu motoru (1000/1000 závitů).	75
8.19	Změna vzájemné indukčnosti v čase bez pohybu motoru se změnou teploty z 20 °C na 70 °C (1000/1000 závitů).	76
8.20	Změna vzájemné indukčnosti při pohybu motoru (1000/1000 závitů).	77
A.1	Schéma zapojení bloku napájení.	92
A.2	Schéma zapojení mikrokontroléru.	93
A.3	Schéma zapojení AD a DA převodníku.	94
A.4	Schéma zapojení měřících metod.	95
A.5	Schéma zapojení přepínání cívek.	96
A.6	Schéma zapojení ovládání motoru.	97
A.7	Schéma zapojení komunikace.	98

Seznam tabulek

6.1	Přehled použitých Modbus registrů.	40
7.1	Výsledky ověření transformační metody pomocí rezistorů.	50
8.1	Průměrné hodnoty rozdílů mezi kroky motoru.	56
8.2	Porovnání změn statických a dynamických měření.	57
8.3	Průměrné hodnoty rozdílů mezi kroky motoru.	60
8.4	Porovnání změn statických a dynamických měření.	61
8.5	Průměrné hodnoty rozdílů mezi kroky motoru.	63
8.6	Porovnání změn statických a dynamických měření.	64
8.7	Porovnání rozpoznatelnosti kroků pro jednotlivé varianty cívek - transformační metoda.	65
8.8	Průměrné hodnoty rozdílů mezi kroky motoru.	69
8.9	Porovnání změn statických a dynamických měření.	70
8.10	Průměrné hodnoty rozdílů mezi kroky motoru.	73
8.11	Porovnání změn statických a dynamických měření.	74
8.12	Průměrné hodnoty rozdílů mezi kroky motoru.	77
8.13	Porovnání změn statických a dynamických měření.	78
8.14	Porovnání rozpoznatelnosti kroků pro jednotlivé varianty cívek - metoda vzájemné indukčnosti.	78
8.15	Porovnání rozpoznatelnosti kroků pro nejlepší výsledek z obou metod.	79
9.1	Přidané Modbus registry ve výsledném zařízení.	81

Úvod

Cílem této semestrální práce je navrhnout řešení pro nepřímé měření pozice plynového ventilu PX52 pro firmu Resideo.

Primárně se v dnešní době stále využívají kotle na zemní plyn, který je převážně složen z metanu. V tomto případě je měření směsi zemního plynu s kyslíkem prováděno jednoduše. Zemní plyn totiž obsahuje uhlík, který vykazuje dobrou elektrickou vodivost. Toho je využito a měří se vodivost plamene.

Když však chceme nahradit zemní plyn vodíkem, je nezbytné počítat s tím, že ten neobsahuje uhlík, díky kterému bychom mohli měřit vodivost plamene. Výhodou navíc může být přítomnost měření ještě před samotným hořením. Práce s vodíkem je totiž méně bezpečná, než se zemním plynem. Příčinou je výbušnost vodíku. Bylo proto nezbytné vymyslet jiný způsob. Jedním z nich je měření průtoku plynu na samotném plynovém ventilu.

V práci je nejprve popsán plynový ventil, jsou rozebrány metody měření pozice škrtkící klapky, komunikační protokoly a možnosti měření vzájemných vlastností cívek. V následující kapitole probíhá samotný návrh elektroniky a rozbor konkrétních částí schématu. Pro navrženou DPS je vytvořen program, jehož jednotlivé části jsou v práci popsány. DPS je oživena, je ověřena funkčnost obou metod a obě metody jsou otestovány v různých podmínkách pro různé varianty cívek. Výsledky jednotlivých měření jsou diskutovány a na jejich základě je vybrána vhodná metoda. Pro zvolenou metodu je následně upraven program.

1 Plynový ventil

Ventil v plynovém kotli slouží ke vpouštění hořlavého plynu do spalovací komory. Příklad jednoho z těchto ventilů od formy Resideo je na obrázku 1.1. Tyto ventily se vyrábí ve třech variantách. Jednostupňový, dvoustupňový a modulační.

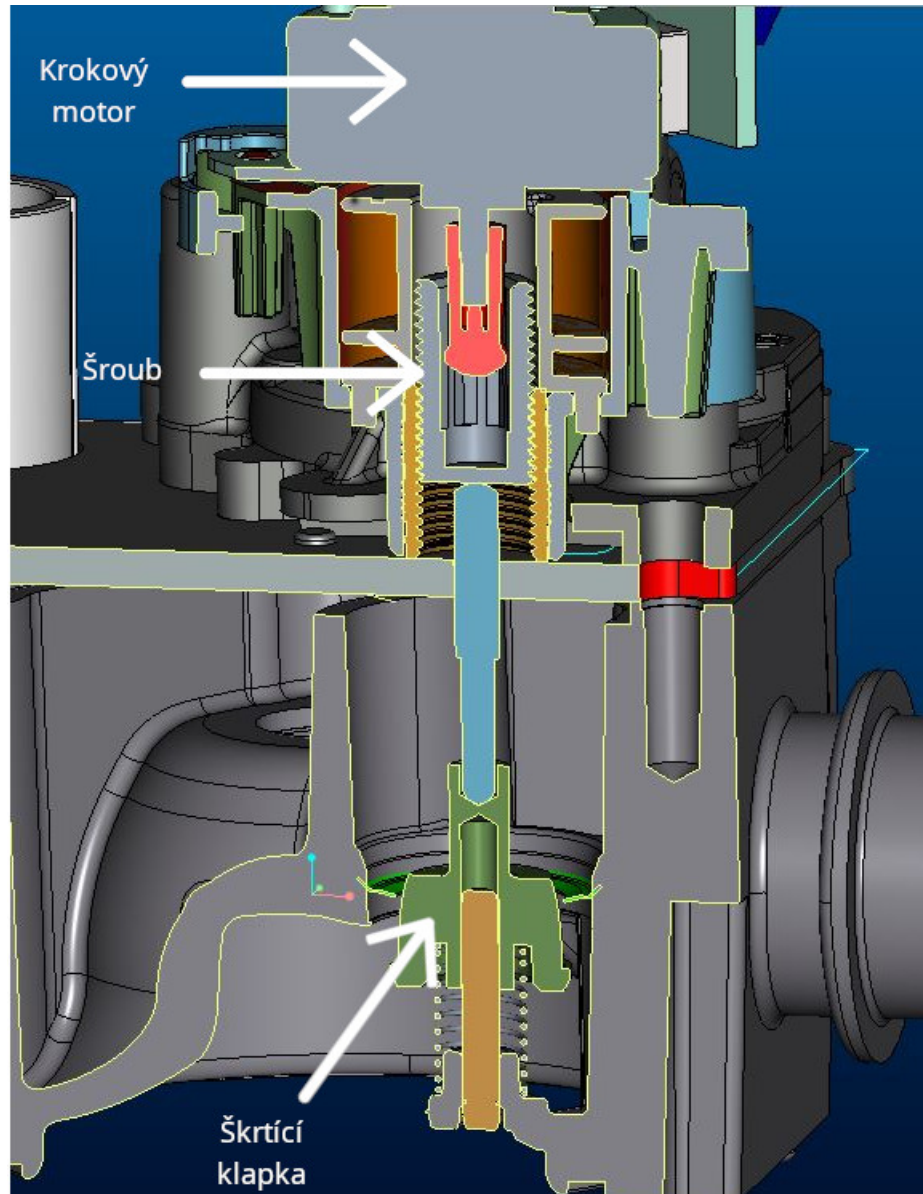


Obr. 1.1: Plynový ventil PX52 [1].

Jednostupňový ventil byl standardní konstrukcí pro dřívější pece. Tato konstrukce umožňovala dvě nastavení: zapnuto a vypnuto. Toto je problematické při nižších rozdílech teplot, kdy je cílem pouze mírně zatopit a dohřát na požadovanou teplotu, jelikož v té chvíli dochází většímu opotřebení zařízení. Dalším problémem, který tato konstrukce přináší je tzv. krátké cyklování. Kotel je častěji spínán na krátké chvíle, což vede k většímu opotřebování komponent [2].

Dvoustupňový ventil plynu snižuje krátké cyklování a umožňuje kotli pracovat na nižší výkon, když není venkovní teplota příliš nízká. Toto vede k větší úspoře energie [2].

Modulační ventil umožňuje pak mnohastupňovou regulaci vháněného plynu, což opět zvýší životnost komponent. Nevýhodou je ale vyšší cena a častější údržba kvůli složitější konstrukci. Pro přesnou regulaci množství plynu je u plynového ventilu PX52 škrťací klapka. Klapka je řízena přes šroub pomocí krokového motoru, jako je znázorněno na obrázku 1.2 [3].



Obr. 1.2: Škrťací klapka ventilu PX52.

2 Metody měření polohy škrťací klapky

K pohybu škrťací klapky se využívá krokový motor. Nabízí se tedy možnost využít přímo počítání jeho kroků ke zjištění pozice. Další možností je snímat pozici hřídele motoru nebo šroubu (lineární hřídele), který je otáčen krokovým motorem a tím je působeno na škrťací klapku. Všechny tyto metody mají své výhody i nevýhody, které jsou v této kapitole rozebrány.

2.1 Měření pozice krokového motoru

Výhodou krokového motoru je, že umožňuje posun o definovaný počet kroků. Pomocí toho je při znalosti parametrů motoru a pohybovaného systému možné dopočítat pozici hřídele. Tento systém se nazývá bez zpětné vazby, protože neposkytuje zpětnou vazbu o tom, zda byl pohyb skutečně proveden. Nejedná se tedy o spolehlivou metodu v systémech s požadavky na precizní kontrolu pohybu. Je proto nezbytné využít snímání se zpětnou vazbou, kterou je možné realizovat vícero způsoby.

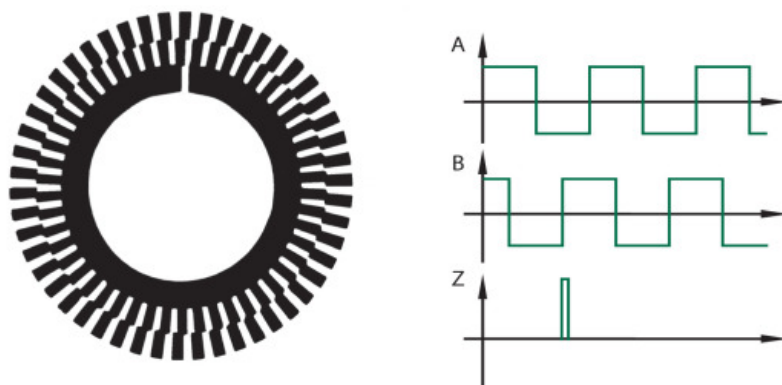
2.1.1 Měření zpětného EMF

Při otáčení krokového motoru se generuje zpětné elektromotorické napětí. Příčinou je pohyb rotoru, což má za následek změny magnetického pole. Díky změnám magnetického pole dochází v cívkách statoru ke generaci napětí opačné polaritě vzhledem k řídicímu napětí. Toto napětí lze změřit a na jeho základě určit, zda se motor skutečně otáčí. Firma Trinamic nabízí v některých typech svých řadičů pro řízení krokových motorů technologii StallGuard, která právě tento princip využívá. Vnitřní logika řadiče už sama měří toto napětí a po překročení nastaveného prahu dokáže poskytnout zpětnou vazbu. Výhodou pak je, že k řízení a zpětné vazbě stačí jeden čip. Tato metoda má však i svá omezení. Pro spolehlivou detekci musí motor určitou dobu rotovat. Metoda nefunguje v celém rozsahu otáček motoru. Není ani možné spolehlivě detekovat ztrátu jednotlivých kroků. Je tedy zřejmé, že tento způsob zpětné vazby je vhodný spíše jako koncový spínač [4, 5].

2.1.2 Měření pomocí enkodéru

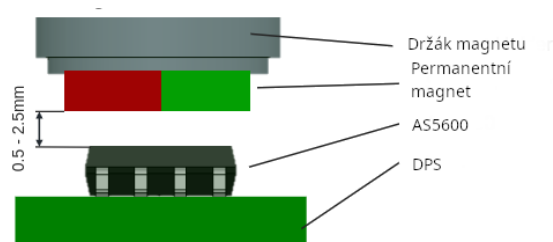
Pohyb krokového motoru lze měřit i pomocí enkodéru. Enkodér je zařízení, které se umístí na, resp. do blízkosti hřídele krokového motoru. Při pohybu motoru potom enkodér posílá signál (nejčastěji pulzy), že k pohybu došlo. Enkodéry lze rozdělit na inkrementální a absolutní, kdy inkrementální po zapnutí neznají pozici, na které se nachází, zatímco absolutní ano. Enkodéry fungují na vícero principech, od čehož se odvíjí jejich parametry. Každý typ má své výhody a nevýhody. Volba záleží na aplikaci [6, 7].

Optický enkodér je nejpoužívanějším a také nejlevnějším typem. Hojně se používá i u dalších typů motorů a řídicích prvků. Funkční princip je znázorněn na obrázku 2.1. Skládá se ze zdroje světla (nejčastěji LED), disku s drážkami a dvou fotodetektorů. Při otáčení disku je detektor střídavě osvětlený a neosvětlený. Tímto je určeno, že došlo k pohybu. Druhý detektor slouží k určení směru otáčení, kdy je díky posunutí drážek vždy osvětlen jeden z detektorů dříve. V této konfiguraci se jedná o inkrementální typ. Druhým typem je absolutní, kdy je použito více senzorů (podle požadavku na rozlišení) a drážky na disku. Výhodou je jednoduchost konstrukce, rozlišení a nízká cena. Nevýhodou je křehkost, citlivost na znečištěné prostředí a přídatná zátěž na motor [8, 9, 10].



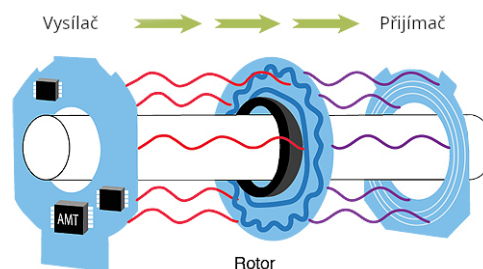
Obr. 2.1: Optický enkodér [11].

Magnetický enkodér využívá Hallova efektu, kdy příčinou působení magnetického pole dochází k vychylování elektrického pole, čímž vzniká rozdíl napětí, který je závislý na intenzitě magnetického pole. Na hřídel motoru je umístěn permanentní magnet, jehož úhel otočení lze určit pomocí hallových sond. Příkladem může být integrovaný obvod AS5600, který v sobě obsahuje čtyři hallové sondy a pomocí nich vyhodnocuje úhel otočení. Změřenou hodnotu pak vrací po sběrnici I2C nebo jako analogovou úroveň napětí. Mechanická konfigurace tohoto řešení je znázorněna na obrázku 2.2. Výhodou je jednoduchost, robustnost a schopnost určit úhel natočení po zapnutí (stále však jen v rozsahu jedné otáčky). Nevýhodou je složitější vyhodnocení měření (výstupem nejsou pulzy) a nižší rozlišení, oproti optickým enkodérům [12, 10].



Obr. 2.2: Mechanická konfigurace AS5600 [12].

Kapacitní enkodér využívá měření změny kapacity. Jak je patrné z obrázku 2.3 na jedné straně je vysílač, který vysílá signál o vysoké frekvenci směrem k přijímači. Mezi vysílačem a přijímačem se nachází rotor, který je buď speciálně natvarován, nebo je v něm vyleptaný speciální vzor. Signál z vysílače je modulovaný tímto vzorem. Přijímač pak díky znalosti tvaru na rotoru dokáže zjistit jeho pozici. Pozici lze opět přibližně určit i po zapnutí zařízení. Mezi výhody patří robustnost, velké rozlišení a odolnost vůči znečištění prostředí. Mezi nevýhody patří potřeba časté kalibrace a složitější vyhodnocení měření [10].



Obr. 2.3: Princip kapacitního enkodéru [12].

2.2 Měření pozice hřídele

Pokud se hřídel pohybuje v ose motoru (což v případě škrtkící klapky šroub provádí), jedná se o lineární pohon. Je proto možné několika způsoby měřit i pozici samotné lineární hřídele. Toto měření lze provádět kontaktní nebo bezkontaktní metodou. V prvním případě je část měřicího ústrojí připevněna k pohybující se hřídeli. V druhém případě tomu tak není, odpadá tedy další zátěž motoru. Je ale potřeba dát větší pozor na vnější vlivy, protože pohyb je snímán pomocí některé z vlastností materiálu hřídele. U hotových řešení jsou využívány metody měření pomocí enkodérů (stejně jako u samotného krokového motoru). Velice časté je i využití potenciometru [13, 14].

2.2.1 Měření pomocí potenciometru

Jedná se o nejčastěji využívanou metodu zpětné vazby u hotových lineárních aktuátorů. Na hřídel (lineárně pohybující se část) je upevněn jezdec potenciometru, který se pohybuje po vrstvě odporového materiálu. Vývodem senzoru jsou tři svorky, kde jsou dvě umístěny na koncích odporové vrstvy a jeden na jezdcu. Při připojení napětí na tyto konce je pomocí jezdcu vytvořen dělič napětí. Se znalostí parametrů potenciometru je pak možné určit polohu. Výhodou tohoto typu zpětné vazby je velká stabilita a opakovatelnost a zejména možnost určit absolutní pozici ihned po zapnutí zařízení. Navíc se, díky své jednoduchosti, jedná o relativně levný typ senzoru. Mezi nevýhody spadá nižší životnost (primárně kvůli opotřebení odporové dráhy přejížděním jezce) a vyšší šum. Tato metoda je však vhodná spíše pro kratší aktuátory, protože s délkou pohybu roste i délka odporové vrstvy, což přináší problémy se stabilitou a šumem. Výstup tedy není tak spolehlivý. Na obrázku 2.4 je jedna z variant. Takto vypadá hotové průmyslové řešení s motorem i převodovkou [14].

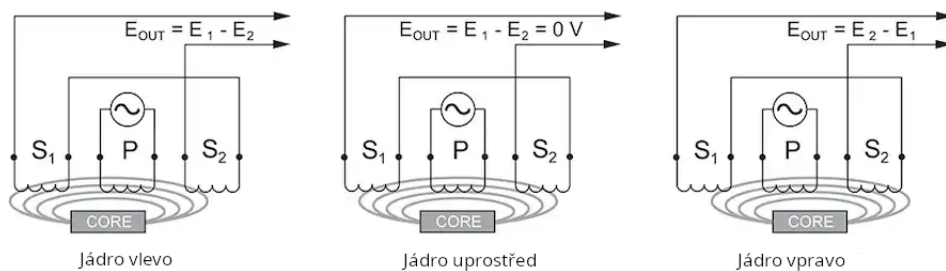


Obr. 2.4: Lineární aktuátor s potenciometrem [15].

2.2.2 Měření pomocí LVDT

V případě, kdy je měřený přípravek (hřídel) z feromagnetického materiálu, je možné využít principu lineárního variabilního diferenciálního transformátoru. Tento typ snímače se skládá ze tří cívek navinutých vedle sebe. Uprostřed je primární a po stranách jsou sekundární cívky [16].

Na primární cívku je přiveden střídavý proud o známé amplitudě a frekvenci. Vznikne střídavý magnetický indukční tok, který je společným jádrem přiváděn do sekundárních cívek. V cívkách je poté indukováno napětí. Jak je vidět na obrázku 2.5, pohybem jádra pak dochází ke změně působení toku na jednotlivé sekundární cívky. Díky jejich zapojení do série dochází k odečtu a výsledkem je rozdílové napětí. Výhodou tohoto principu je, že se jedná o rozdílové měření. Velké množství okolních vlivů je tedy tímto způsobem odfiltrováno. V okamžiku, kdy je jádrem šroub, jako v případě škrtící klapky PX52, nedochází k další zátěži motoru. Pozice je navíc známa ihned po zapnutí. Problémem pro tento typ snímače může být však externí magnetické pole a vibrace [16, 17].



Obr. 2.5: Princip LVDT [16].

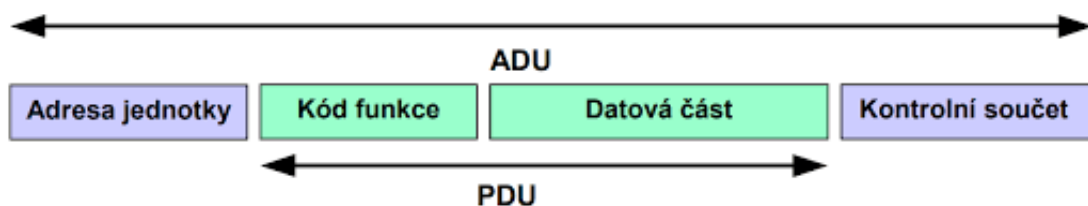
3 Komunikační protokoly

Tato kapitola pojednává o komunikačních protokolech, které používá firma Resideo pro komunikace řídicí jednotky s periferiemi. Primárně je využíván protokol Modbus na fyzické vrstvě RS485.

3.1 Modbus

Tento komunikační protokol byl vyvinut firmou Modicon v roce 1979. Jedná se o otevřený protokol, díky čemuž se stal velice populární primárně v průmyslovém prostředí. Komunikace je typu klient-server na úrovni aplikační vrstvy referenčního ISO/OSI modelu. Jako fyzickou vrstvu nejčastěji využívá RS485 a RS232 [18, 19].

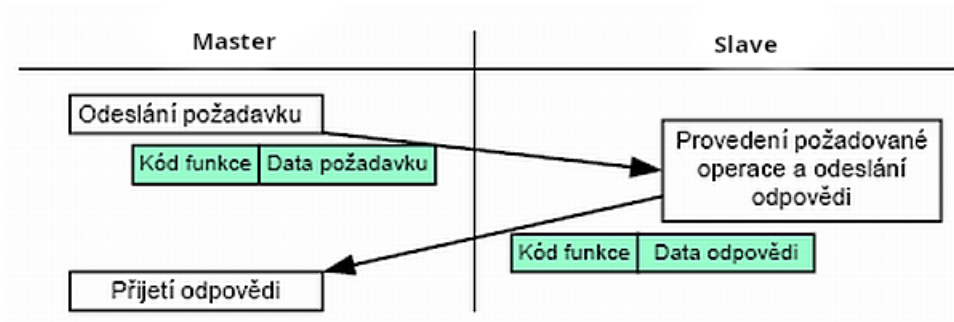
Struktura zprávy je definována dvěma částmi - PDU (protocol data unit) a ADU (Application data unit). PDU obsahuje funkční kód a data. ADU obsahuje PDU plus přidanou adresu umístění požadavku a kontrolní součet. Tato struktura je graficky znázorněna na obrázku 3.1 [18, 20].



Obr. 3.1: Základní rámec Modbus zprávy [19].

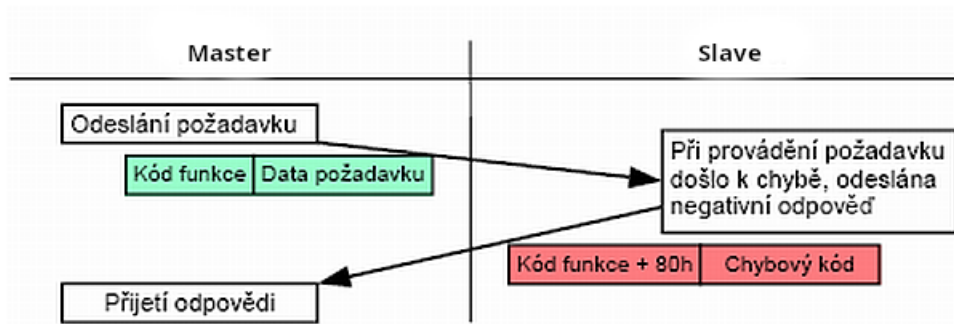
Komunikace probíhá tak, že Master nejprve vytvoří požadavek s kódem funkce (například zápis nebo čtení registru). Datová část slouží k uskutečnění operace určené kódem funkce. Požadavek následně odešle a čeká na odpověď. Na straně Mastera je vhodné implementovat časový limit pro odpověď, protože může dojít ke ztrátě požadavku nebo odpovědi. Doba, do které musí Slave odpovědět totiž není protokolem specifikována. Samotná odpověď pak může dopadnout dvěma způsoby [21].

V prvním případě komunikace proběhla bez chyby a reakcí Slave zařízení je odpověď bez chybového kódu viz. obrázek 3.2 [21].



Obr. 3.2: Průběh Modbus komunikace bez chyby [21].

Druhou možností je chybový stav, kdy je v odpovědi v kódu funkce nastaven nejvyšší bit do jedničky. Tento stav se nazývá výjimka. Průběh je opět znázorněn na obrázku 3.3. Na tento stav by měl Master reagovat [21].

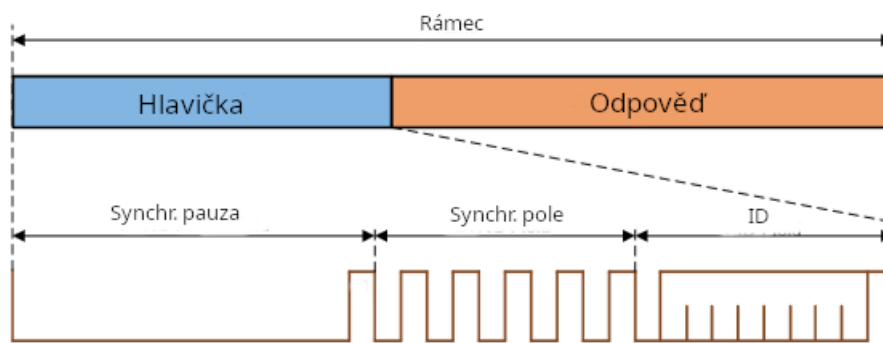


Obr. 3.3: Průběh Modbus komunikace s chybou [21].

3.2 LIN bus

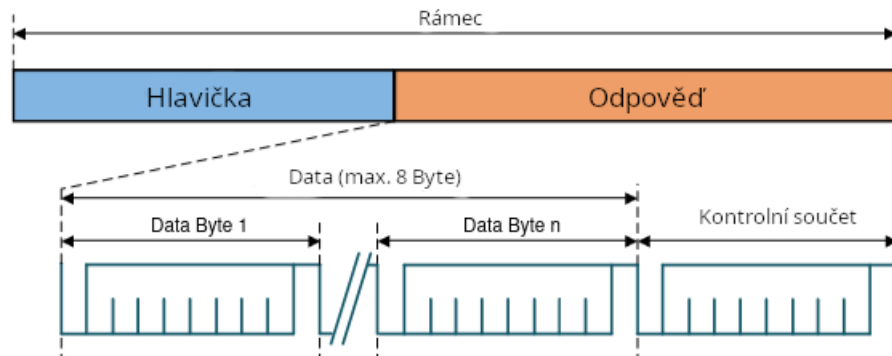
LIN bus je sériový protokol, který byl původně navržen pro komunikaci pro komponenty v automobilovém průmyslu jako komplement ke složitějšímu protokolu CAN bus. LIN Consortium (BMW, Volkswagen Group, Audi, Volvo Cars, Mercedes-Benz) jej vydalo roku 1999. Jedná se o komunikaci po jednom vodiči. Topologicky se síť skládá z jednoho master a až šestnáct slave zařízení. Veškerou komunikaci zahajuje master a čeká na odpověď (není proto potřeba implementovat detekci kolizí). Samotná komunikace se skládá z hlavičky a odpovědi. Hlavičku vysílá master a čeká na odpověď od slave zařízení. Průběh komunikace je pak následující [22, 23, 24].

Master nejprve vytvoří hlavičku, která obsahuje synchronizační pauzu, synchronizační pole a identifikátor. Díky prvním dvěma částem není nezbytná vysoká přesnost časování slave zařízení (stačí RC obvod), master totiž tímto způsobem provádí synchronizaci před každou zprávou. Identifikátor určuje, který slave bude odesílat nebo přijímat. Graficky je hlavička znázorněna na obrázku 3.4 [24].



Obr. 3.4: Rámec hlavičky - LIN bus [24].

Slave poté odesílá odpověď, která obsahuje data a kontrolní součet. Délka dat je variabilní v rozsahu dva až osm bajtů. Tento rámeček je opět na obrázku 3.5 [24].



Obr. 3.5: Rámec odpovědi - LIN bus [24].

4 Měření vzájemných vlastností cívek

V této kapitole budou popsány základní metody, které lze využít k měření vzájemných vlastností dvou cívek se společným jádrem. Existuje velké množství metod, které je možné využít. Každá je ale vhodná pro jiné rozsahy indukčností, typ jádra atd. Při výběru je tento fakt nezbytné zhodnotit.

4.1 Transformační poměr

Pravděpodobně nejjednodušší metodou je metoda transformačního poměru. Cívky jsou navinuty vedle sebe na společném jádře. Jedna je primární a je na ni přiváděno střídavé napětí. Do druhé (sekundární) se pomocí magnetického indukčního toku, stejně jako v případě LVDT, indukuje napětí. Oproti LVDT je problémem, že nedochází k odečtení vlivů okolí [25].

4.2 Vzájemné indukčnosti

Vzájemná indukčnost je parametr vznikající mezi dvěma magneticky spojenými cívkami. Každá cívka má svou vlastní indukčnost, kterou jsme schopni změřit. Lze spočítat následujícím způsobem [26]:

$$M = k * \sqrt{L_1 * L_2} \quad [H; -; H; H] \quad (4.1)$$

kde k je činitel vazby, L_1 a L_2 jsou indukčnosti jednotlivých cívek. Změřit tuto vlastnost je možné vícero způsoby. Jedním z nich je sériové spojení cívek. V prvním kroku změříme jejich celkovou indukčnost, následně se jedna z cívek zapojí obráceně (překříží se její vývody), poté se opět změří celková indukčnost a výsledkem jednoduché matematické operace je vzájemná indukčnost. Matematické vyjádření [27]:

$$L_{celk1} = L_1 + L_2 + 2M \quad [H; H; H; H] \quad (4.2)$$

$$L_{celk2} = L_1 + L_2 - 2M \quad [H; H; H; H] \quad (4.3)$$

kde L_{celk1} je celková indukčnost v prvním kroku. L_{celk2} získáme obráceným zapojením jedné z cívek. Odečtením rovnic a jednoduchou úpravou pak získáme vzájemnou indukčnost M [27]:

$$L_{celk1} - L_{celk2} = 4M \quad [H; H; H] \quad (4.4)$$

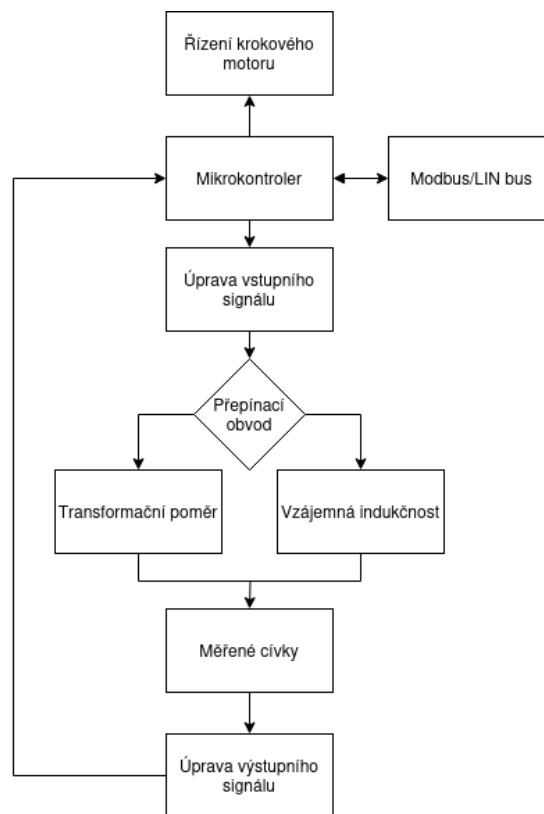
$$M = \frac{L_{celk1} - L_{celk2}}{4} \quad [H; H; H] \quad (4.5)$$

5 Návrh elektroniky

V této kapitole je popsán samotný návrh elektroniky, včetně objasnění voleb, které vedly k výběru konkrétních komponent. Následuje popis samotného schématu a návrh DPS. K návrhu elektroniky byl zvolen program KiCAD ve kterém jsou nakreslena veškerá schémata a DPS.

5.1 Celkový koncept

Ze začátku bylo nutné určit požadavky na první prototyp zařízení. Základní představu o blokovém diagramu elektronického obvodu zachycuje obrázek 5.1. Základem celé desky je mikrokontroler, který generuje vstupní signál a zároveň provádí měření. Měřené napětí musí být tedy uzpůsobeno jeho napětovým úrovním. Jak již zmiňovala teoretická část, pro měření vzájemných vlastností cívek lze využít dvě metody. Je proto vhodné, aby první prototyp obsahoval obě metody s možností jejich přepnutí, kde bude možné jejich ověření v reálném prostředí. Další úlohy, které má mikrokontroler na starosti jsou řízení krokového motoru a komunikace.



Obr. 5.1: Blokový diagram elektronického obvodu.

5.2 Výběr mikrokontroleru

Mikrokontroler je nejdůležitější komponentou celého návrhu. Je tudíž vhodné věnovat jeho výběru náležitý čas. Snadno by mohlo dojít k tomu, že na generování signálu a měření zároveň nebude dostatečně rychlý. Ač se může na první pohled zdát, že vytížení mikrokontroleru nebude velké, opak je pravdou. Samotná komunikace a řízení motoru nebudou výrazným způsobem vytěžovat mikrokontroler, ačkoliv je nezbytné brát na tyto části ohled. U motoru není nezbytná okamžitá reakce, ale komunikace musí po přijetí zprávy téměř okamžitě reagovat.

První volba padla na STM32L073V8 od společnosti ST Microelectronics. Primárním důvodem bylo to, že se jedná o jeden z velmi využívaných mikrokontrolerů firmy Resideo. Jeho hlavní parametry jsou [28]:

- Jádru ARM 32-bit Cortex M0+
- Maximální frekvence 25 MHz
- 192 KB Flash paměti, 20 KB RAM a 6 KB EEPROM
- 1x USB 2.0, 4x USART, 6x SPI, 3x I2C
- 16-kanálový 12-bitový AD převodník
- 2x 12-bitový DA převodník
- 7-kanálový DMA kontroler
- 16x čítač/časovač

Další možnou variantou je opět firmou Resideo používaný STM32F446VET6 od firmy ST Microelectronics. Hlavní parametry [29]:

- Jádru ARM 32-bit Cortex M4
- Maximální frekvence 180 MHz
- 512 KB Flash paměti, 128 KB RAM
- 1x USB 2.0, 4x USART, 2x UART, 4x SPI, 4x I2C, 2x SAI, 2x CAN
- 3x 24-kanálový 12-bitový AD převodník
- 2x 12-bitový DA převodník
- 16-kanálový DMA kontroler
- Redundance některých dat.
- 17x čítač/časovač

Z důvodu nejistoty, zda bude STM32L073V8 dostatečně rychlý je DPS přizpůsobena pro osazení obou variant. Ve schématu je popsáno, které komponenty osadit a které neosadit pro vybraný mikrokontroler.

5.3 Blok napájení

Napájecí napětí, pro které je obvod určen je 24 V. Díky stabilizátorům je možný mírný rozptyl. Horní hranice je 26 V, kterou určuje transil SMBJ26A. Ten navíc slouží jako základní ochrana proti přepólování. Spodní hranici pak určuje IU2424SA, jehož minimální pracovní napětí je 18 V. V příloze A.1 se nachází celé schéma napájecího bloku [31, 32].

Obvod R-78E5.0-0.5 mění hodnotu napájecího napětí na hodnotu 5 V. Lineární stabilizátor LD1117S33TR pak tuto hodnotu stabilizuje na napětí 3,3 V pro napájení mikrokontroleru a dalších obvodů. Je z něj také napájena napěťová reference 2,5 V pro AD a DA převodníky [33, 34].

Pro operační zesilovače je možné vybrat dva typy zdrojů napájení - L7815 a L7915 nebo obvod TPS60400 a již zmíněný zdroj 5 V. První varianta je na DPS pro možnost vyššího napájecího napětí ± 15 V a většího proudového odběru. Na stabilizátor L7815 je napájecí napětí připojeno přímo. Pro L7915 je pomocí IU2424SA vytvořeno záporné napětí o hodnotě -24 V. Druhá varianta je pak výrazně jednodušší, ale poskytuje napětí pouze ± 5 V s tím, že 5 V je realizováno již existujícím stabilizátorem, zatímco -5 V vytvoří nábojová pumpa TPS60400 [32, 35, 36, 37].

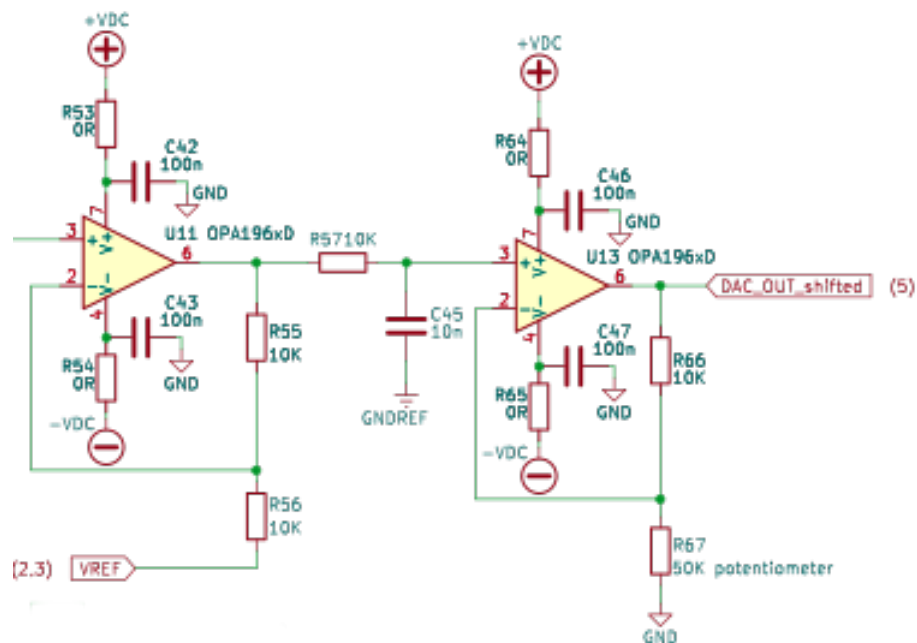
5.4 AD a DA převodníky

I této volbě předcházela dlouhá úvaha. Bylo potřeba zvážit, zda bude pro měření stačit interní AD a DA mikrokontroleru, či bude-li potřeba použít externí. Pro testovací DPS byly tedy vybrány externí AD a DA převodníky s možností přepnutí na interní. Jako externí AD převodník byl zvolen 24-bitový ADS1259QPWRQ1, který s mikrokontrolerem komunikuje pomocí sběrnice SPI. Umožňuje měřit až 14,4 K vzorků za vteřinu. Jednou z jeho výhod je i přítomnost 2,5 V napěťové reference. Nemusí tedy být použita externí (pro větší variabilitu je na desce však přítomna). Externím DA převodníkem je poté 16-bitový DAC8830ID, který s mikrokontrolerem také komunikuje pomocí sběrnice SPI. Oba tyto čipy umožňují připojení externí napěťové reference. Ta je použita i pro interní AD a DA převodníky [38, 39].

5.5 Úprava vstupního a výstupního signálu

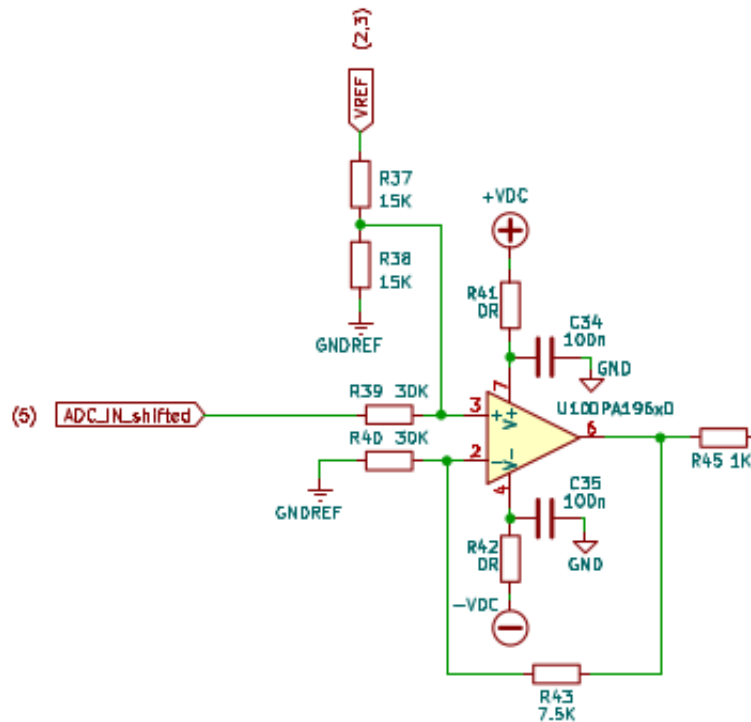
Signály na výstupu DA převodníku a na vstupu AD převodníku musí být napětově upraveny. Příčinou nutnosti tohoto kroku je fakt, že výstup DA převodníku má rozkmit 0 V až 2,5 V. Nejedná se tedy o symetrický signál kolem 0 V. Jeho amplituda je navíc velice nízká a výstupní proud, který dokáže dodat DA převodník také (jeho výstupní impedance je totiž 6,25 K Ω). Z toho vyplývá, že výstupní signál musí být také upravený [39].

Obvod pro úpravu signálu z DA převodníku se nachází na obrázku 5.2. Oba zesilovače jsou zapojeny jako neinvertující. První zesilovač provede posun napětí, aby bylo symetricky kolem nuly (navíc dojde k zesílení koeficientem 2). Druhý zesilovač opět zesílí napětí stejným způsobem. Takto získáme rozkmit napětí ± 5 V. Mezi operačními zesilovači je navíc umístěn kondenzátor pro vyfiltrování signálu.



Obr. 5.2: Schéma vstupní úpravy signálu.

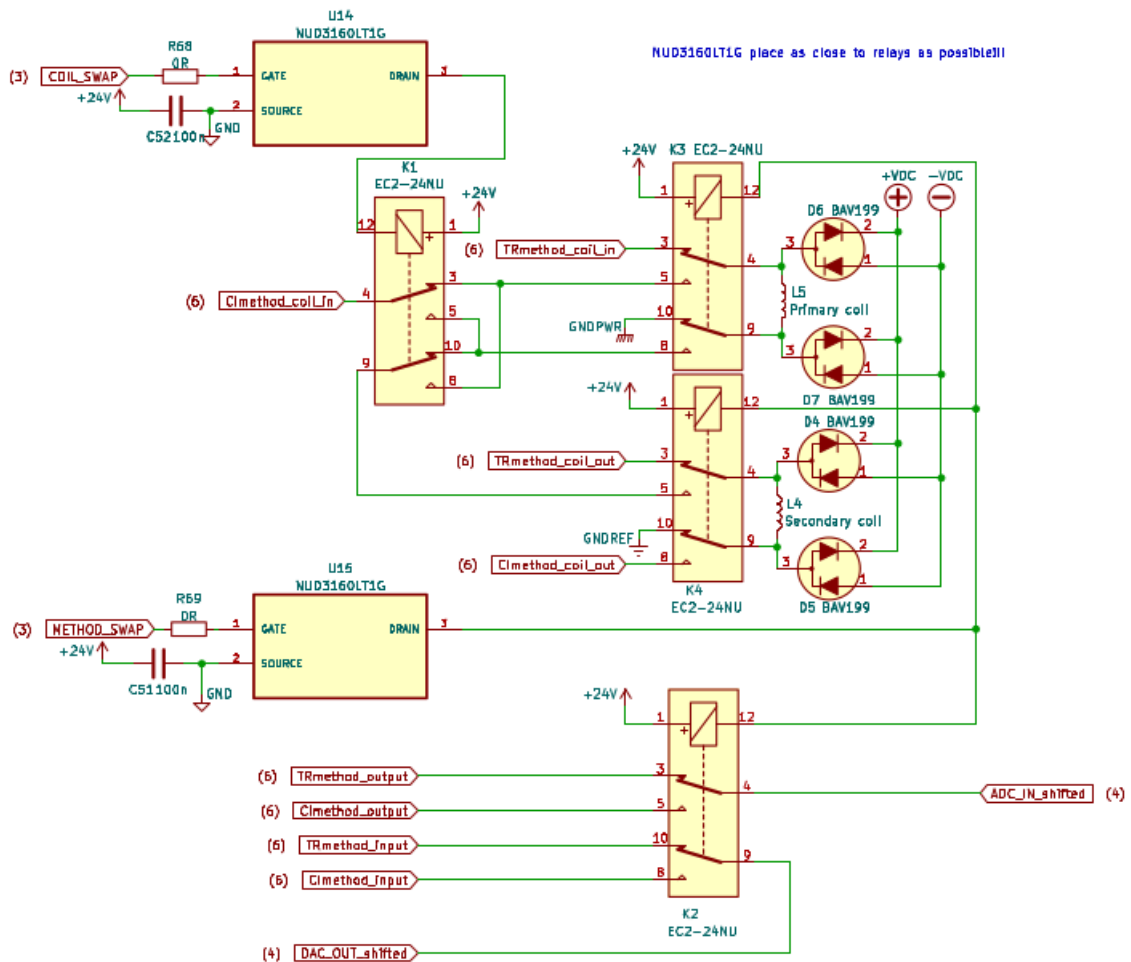
Pro úpravu výstupního signálu z cívek vstupujícího do AD převodníku je pro změnu použit operační zesilovač v sumačním zapojení (obrázek 5.3). Tento obvod čtyřikrát zeslabuje vstupní signál a navíc přidává stejnosměrnou složku o hodnotě $V_{REF}/2$.



Obr. 5.3: Schéma výstupního úpravy signálu.

5.6 Přepínání měřících metod

Již v kapitole 5.1 byla zmíněna volba použít pro měření cívek obě metody. Je mezi nimi ale potřeba nějakým způsobem přepínat. V ideálním případě, aby přepínací prvek nezanášel chybu či nelinearitu do signálu. Pro zjednodušení byla vybrána signálová relé EC2-24NU. Celkové zapojení tohoto obvodu je na obrázku 5.4. Cívky jsou řízeny pomocí 24 V a pro jednodušší spínání jsou využity dva spínače indukativní zátěže NUD3160LT1G. Aby nedocházelo ke zbytečnému opalování kontaktů relé, jsou v obvodu navíc umístěny diody BAV199, které zkratují napětí vytvořené hrouticím se magnetickým polem měřených cívek. Pinem METHOD_SWAP dochází k přepnutí metody, zatímco pinem COIL_SWAP k otočení (překřížení vývodů) jedné z cívek. [40].

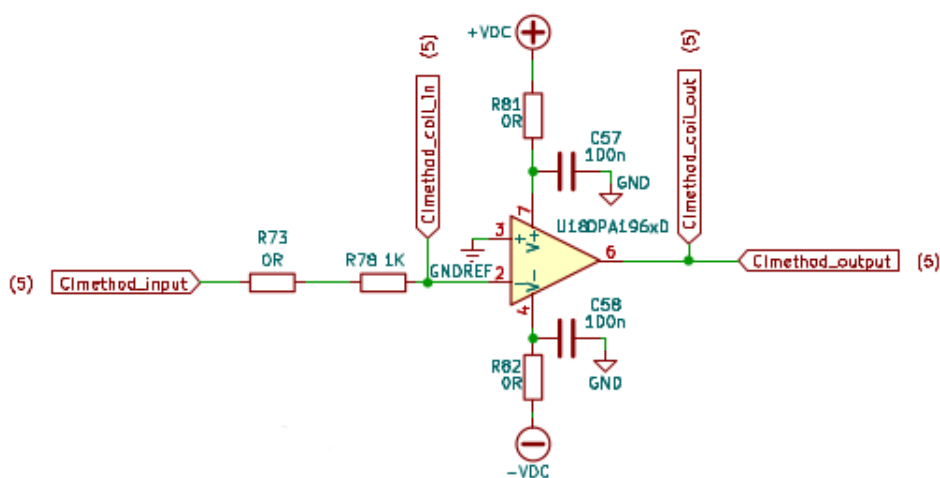


Obr. 5.4: Schéma zapojení obvodu pro přepínání metod měření cívek.

5.7 Měřící metody

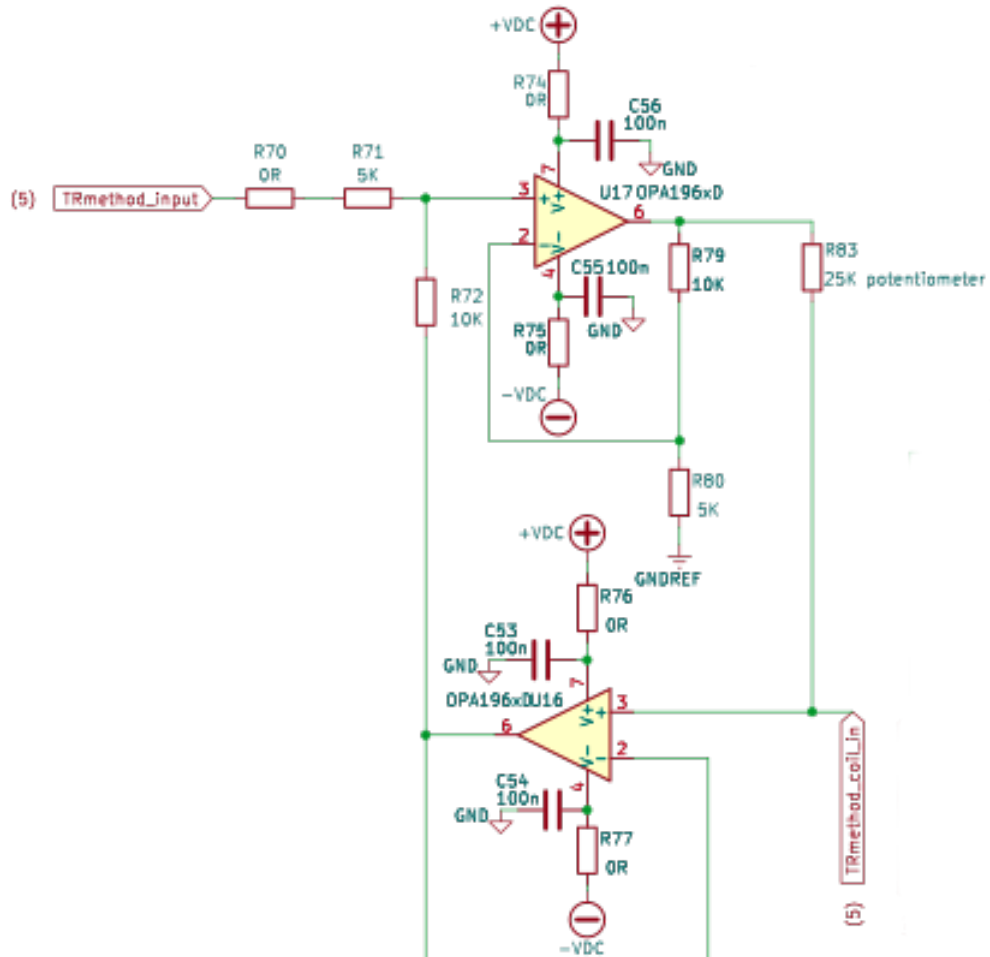
V této části je popsáno, jak jsou realizována zapojení pro měření jednotlivými metodami. V případě měření vzájemné indukčnosti musí být tato indukčnost změřena jednou ze známých metod. Zatímco v případě transformačního poměru je nezbytné vybudit primární cívku ideálně proudovým zdrojem.

Pro měření vzájemné indukčnosti bylo opět zvoleno jednoduché zapojení s operačním zesilovačem 5.5. Toto zapojení lze využít k měření komplexní impedance. Tato impedance se zapojuje do zpětné vazby zesilovače. Její hodnota se následně porovnává s hodnotou normálového rezistoru R78. Při znalosti vstupního signálu je možné matematicky získat hodnotu indukčnosti měřené cívky [41, 42].



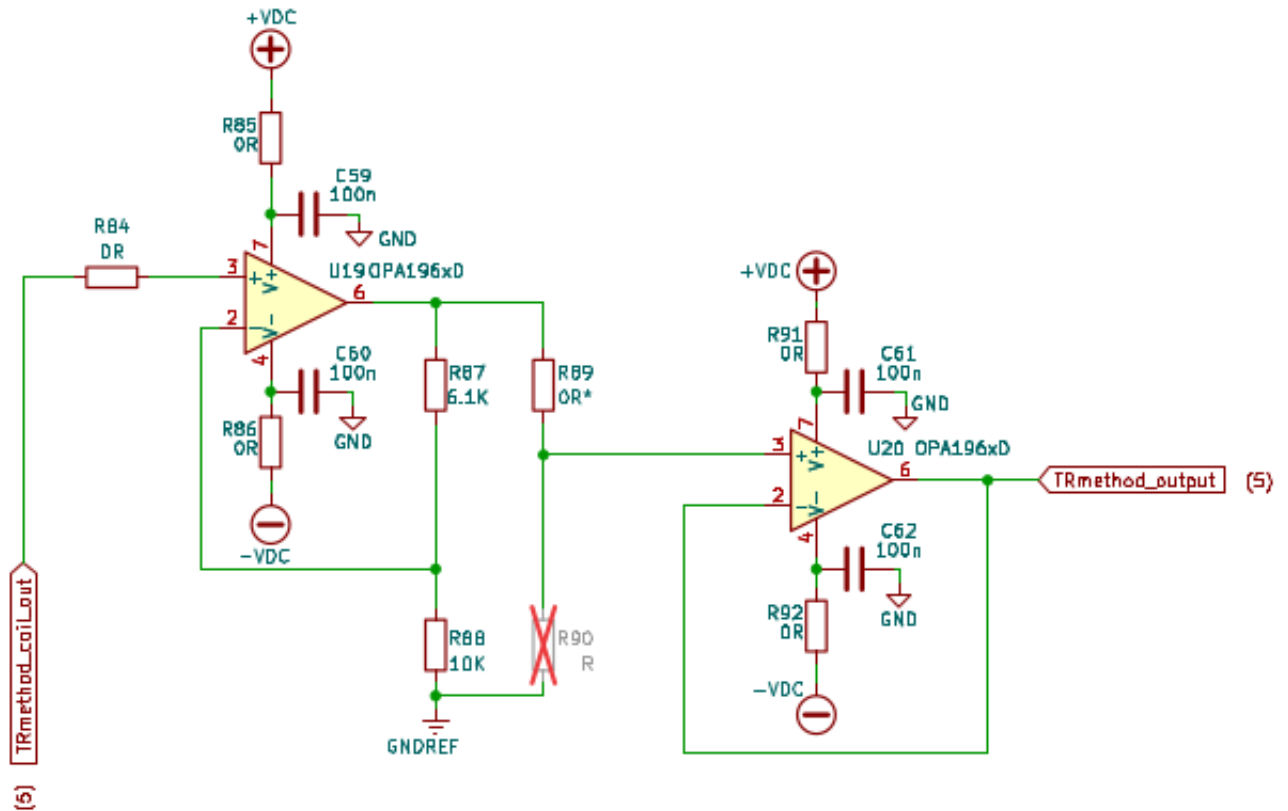
Obr. 5.5: Schéma zapojení obvodu pro měření indukčnosti.

Pro metodu transformačního poměru byla potřeba nejprve vymyslet schéma proudového zdroje pro primární cívku. Takový zdroj se nachází na obrázku 5.6. Oproti klasickému Howlandově zdroji proudu se obvod liší přidáním sledovačem ve zpětné vazbě. Tato úprava má za následek vyšší rozkmit výstupního napětí díky možnosti lépe zvolit hodnoty rezistorů. Rezistorem R83 lze pak přímo měnit hodnotu proudu tekoucí cívkou [43].



Obr. 5.6: Vylepšený Howlandův zdroj proudu.

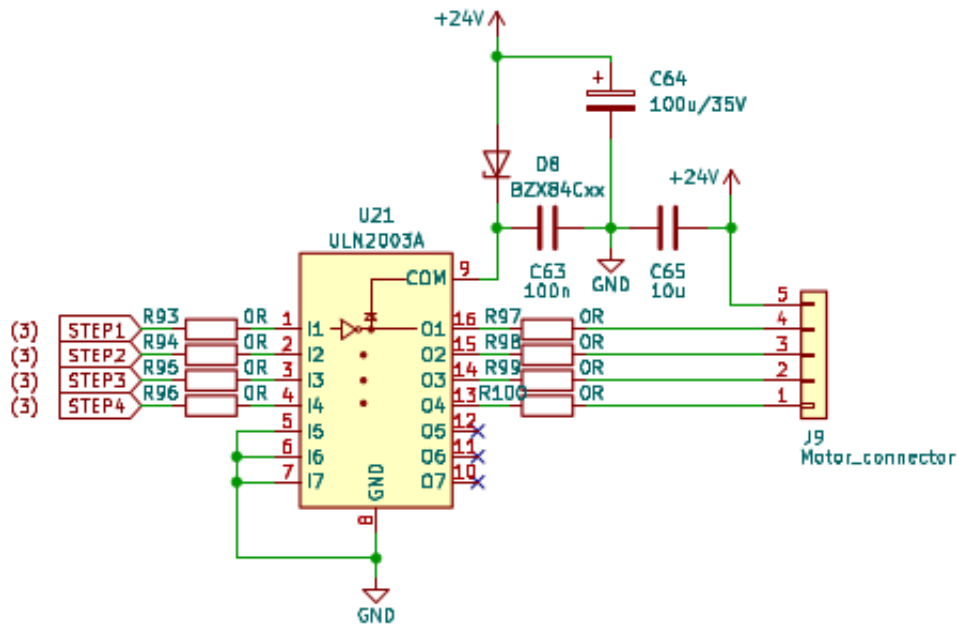
Výstup ze sekundární cívky bude nezbytné opět nějakým způsobem upravit (pravděpodobně zesílit). K tomu slouží schéma uvedené na obrázku 5.7. První zesilovač je zapojen jako neinvertující. Mezi zesilovači je ještě navíc příprava na odporový dělič napětí pro případně snížení jeho hodnoty. Druhý zesilovač v zapojení jako sledovač už slouží pouze jako oddělení, aby případný dělič zůstal nezatížený resp. velmi málo.



Obr. 5.7: Obvod úpravy signálu sekundární cívky transformační metody.

5.8 Řízení krokového motoru

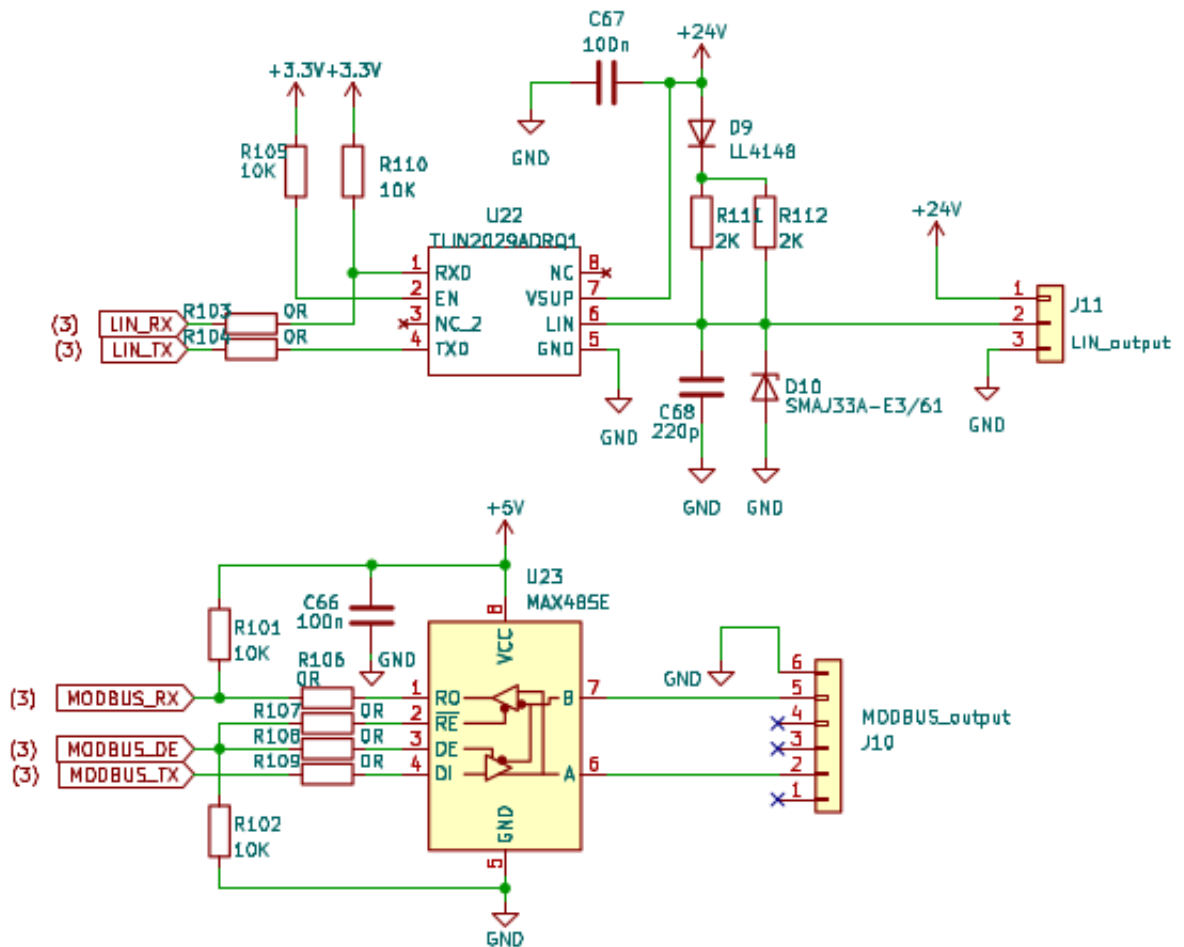
Pro řízení krokového motoru je použito tranzistorové pole ULN2003A. Obvod umožňuje jednotlivými piny jednoduše spínat Darlingtonovy dvojice tranzistorů. Po připojení výstupních pinů na vývody krokového motoru lze pak snadným způsobem jednotlivé cívky spínat. Integrovaný obvod nijak logiku řízení neusnadňuje, jako jiné typy konkrétně určené pro řízení krokových motorů. Sekvenci spínání proto bude řídit mikrokontroler. Schéma zapojení se nachází na obrázku 5.8 [44].



Obr. 5.8: Zapojení řízení krokového motoru.

5.9 Komunikace

Na DPS se opět nachází Modbus i LIN bus s tím, že výsledná varianta bude zvolena později. Na obrázku 5.9 se nachází obě zapojení. Modbus je z mikrokontroleru veden pomocí UART a integrovaný obvod MAX485E zajišťuje změnu na RS485, což je využívaná fyzická vrstva pro Modbus ve firmě Resideo. Pro LIN bus je převod z UART do fyzické vrstvy LIN proveden integrovaným obvodem TLIN2029. V obou případech je potřeba samotné komunikační protokoly implementovat do programu [45, 46].



Obr. 5.9: Zapojení komunikace.

5.10 Implementace normy EN 60730-2-5

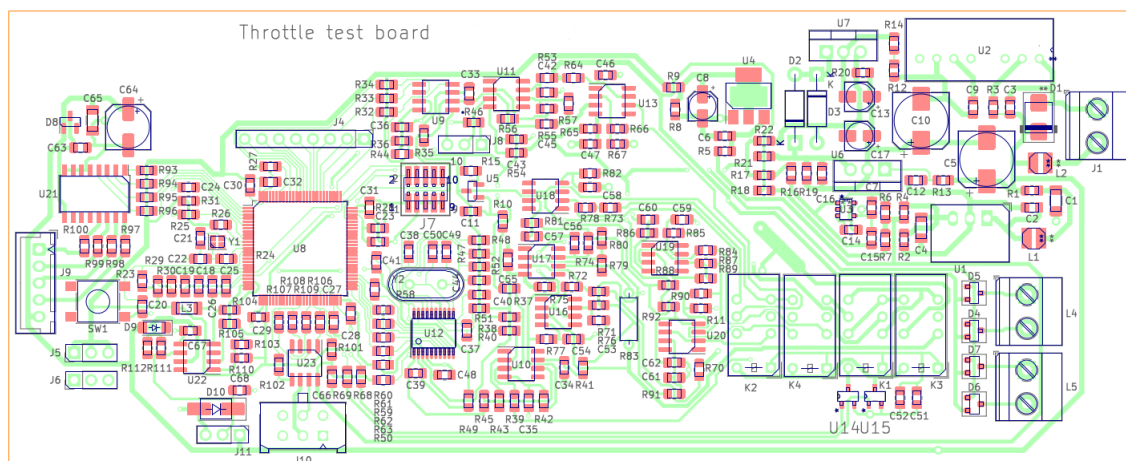
Norma EN 60730-2-5 se zabývá automatickými elektrickými řídicími systémy pro automatické řízení hořáků na olej, plyn, uhlí nebo jiná paliva pro domácnosti a podobné použití, včetně vytápění, klimatizace atd. Pokud by mělo ovládání škrtící klapky být zdrojem informace o bohatosti směsi, spadalo by toto zařízení podle normy do třídy C. Na zařízení této třídy jsou kladeny speciální požadavky. Z důvodu, že DPS je pouze testovací prototyp, nebyla tato norma zohledněna při jejím návrhu. V této kapitole je však popsáno, které části budou implementovány do programové části [47].

Program bude psán v souladu s většinou pravidel MISRA 2004. Jedná se o statickou analýzu kódu, kdy je cílem napomáhat bezpečnosti, přenositelnosti a spolehlivosti kódu. Další prvky, které budou implementovány podle vnitřních norem firmy Resideo[48]:

- Redundance paměti.
- Kontrola pomocí této redundance.
- Externí komunikace zabezpečena kontrolním součtem.
- Nepoužití dynamické alokace paměti.
- Zabezpečení Flash paměti pomocí kontrolního součtu.

5.11 Navržená DPS

V této části je pouze ukázán výhledný návrh DPS. Deska byla vyrobena ve firmě Gatema. Její rozměry jsou 167,6 mm x 67,8 mm.



Obr. 5.10: Navržená DPS.

6 Programové řešení

Cílem kapitoly je seznámení s návrhem programu pro mikrokontroler řídící celý proces měření. Tento kód slouží k otestování obou metod zmíněných v kapitole 4. Programovací jazyk použitý pro psaní kódu je C. Mikrokontroler musí obsluhovat veškeré bloky napojené na něj. Tyto bloky jsou znázorněny na obrázku 5.1. Jedná se o kód primárně určený k otestování obou metod měření. Tento kód může být následně upraven pro využití pouze jedné metody.

6.1 Úvodní konfigurace

Pro základní konfiguraci mikrokontroleru STM32 byl využit program od jeho výrobce, STM32CubeMX. Tento grafický nástroj slouží pro snadnou úvodní konfiguraci pinů a periférií mikrokontroléru. Nástroj při generování kódu umožňuje volbu mezi dvěma typy knihoven - HAL a LL. První zmíněná je jednodušší na použití. Druhá zase slouží pro lepší kontrolu nad jednotlivými perifériemi, při psaní kódu je však potřeba ohlídat vícero věcí. Je navíc možné využít obou typů v jednom projektu. Z důvodu větší flexibility byl vybrán LL typ knihoven. Samotný kód byl poté importován do vývojového prostředí IAR [49].

6.2 Řízení motoru

Pro řízení motoru je využit čip ULN2003A. Jedná se pouze o pole tranzistorů, samotnou logiku řízení je tedy nutné implementovat v kódu. Knihovna pro ovládání motoru se nachází v souborech stepper.c a stepper.h.

Jako motor je na ventilu PX52 použit typ PM25S-048. Jedná se o bipolární krokový motor. V katalogovém listu motoru se nachází sekvence spínání vinutí potřebná pro správný pohyb motoru. Ta byla implementována do kódu jako stavový automat. Knihovna obsahuje funkce, pomocí kterých lze nastavit počet kroků, které má motor vykonat, směr a vypnutí motoru. Knihovna následně obsahuje funkci void Stepper_Loop(void), jejíž implementace je uvedena níže. Tato funkce je volána v časovači, kdy s každým zavoláním je proveden jeden krok, pokud je požadováno [50].

Výpis 6.1: Smyčka řízení krokového motoru.

```
void Stepper_Loop(void)
{
    if (mubStepsRemaining > 0u)
    {
        if (mubDirection == UP)
        {
            mubStep--;
            if (mubStep > STEPPER_SEQ_4)
            {
                mubStep = STEPPER_SEQ_4;
            }
            Stepper_Step(mubStep);
            mubStepsRemaining--;
        }
        else
        {
            mubStep++;
            if (mubStep > STEPPER_SEQ_4)
            {
                mubStep = STEPPER_SEQ_1;
            }
            Stepper_Step(mubStep);
            mubStepsRemaining--;
        }
    }
}
```

6.3 Modbus komunikace

Komunikace Modbus probíhá skrze UART5 mikrokontroleru. Zařízení pracuje v režimu slave, takže samo od sebe neinicuje žádnou komunikaci, ale čeká na přijetí zprávy od zařízení typu master.

V hlavní programové smyčce se nachází funkce ModbusSlave_MainLoop. Jejím úkolem je kontrola, zda došlo k přijetí rámce. Po přijetí prvního bajtu se spouští čítač, který je nastaven tak, že přeteče, pokud po dobu 3,5 násobku UART rámce nedojde k příjmu dalšího rámce. Tím je ukončen příjem.

Následuje kontrola přijatých dat, kdy dojde ke kontrole délky Modbus rámce, adresy a kontrolního součtu. Po úspěšné kontrole dojde ke zpracování PDU části rámce, která obsahuje samotná data, informaci jejich délce a co se s nimi má provést (funkční kód). Opět dojde ke kontrole správnosti všech částí. Podle funkčního kódu (implementováno čtení vícero registrů, zápis do jednoho registru a zápis do vícero registrů) jsou data zpracována. V tomto kroku zároveň dojde k vygenerování rámce pro odpověď. Rámec je následně odeslán a tím je dokončen cyklus. Celý proces komunikace je opět řízen pomocí stavového automatu. Knihovna v hojně míře využívá přerušení, aby nedocházelo k blokování hlavní programové smyčky.

Pro testování metod není výhodné s každou změnou měření nahrát jiný firmware do mikrokontroleru. Z tohoto důvodu je možné měnit měřicí metody a některé jejich parametry pomocí Modbus komunikace. Dále je možné pohybovat motorem a vyčítat samotná data z měření. Registry využitě k těmto účelům se nachází v souboru ModbusTable.c, jejich výčet je uveden v tabulce 6.1 níže.

Tab. 6.1: Přehled použitých Modbus registrů.

Adresa registru	Počet registrů	Datový typ	Funkce	Popis
0x0600	2	float	Čtení	Amplituda
0x0602	2	float	Čtení	Fáze
0x0604	1	uint16	Zápis	Posun motoru
0x0606	1	uint8	Zápis	Směr motoru
0x0608	1	uint16	Zápis	Frekvence signálu
0x0610	1	uint8	Zápis	Vypnutí motoru
0x0611	1	uint8	Zápis	Změna metody
0x0612	1	uint8	Zápis	Přepólování cívky
0x0614	2	float	Čtení	Reálná hodnota
0x0616	2	float	Čtení	Imaginární hodnota

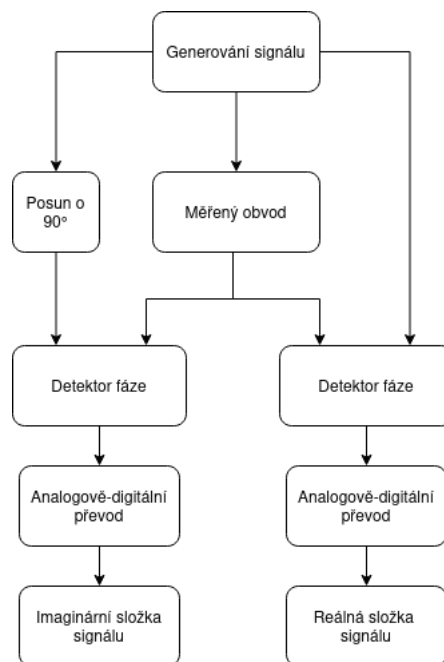
6.4 Měření cívek

Pro měření cívek jsou v kódu implementovány obě zmíněné metody, aby bylo možné je průběžně testovat bez výrazného zásahu do kódu. Je s výhodou využito toho, že značná část kódu může být pro obě metody shodná. Základem je generování harmonického signálu pomocí digitálně-analogového převodníku. Signál je následně změřen pomocí analogově-digitálního převodníku a po naměření určeného množství period dojde k vyhodnocení dat.

V první revizi kódu byl signál generovaný pouze v okamžiku měření. Velmi brzy však bylo jasné, že tento přístup povede k velkému zkreslení měření přechodovými jevy. Z tohoto důvodu je signál generován neustále.

6.4.1 Vyhodnocovací algoritmus

Základem vyhodnocení měření je využití trigonometrických funkcí pro určení reálné a imaginární hodnoty napětí. Pro správnou funkci tohoto algoritmu je nezbytné porovnávat fázi signálu vstupujícího a vystupujícího z měřeného obvodu, tímto způsobem je ze signálu získána jeho reálná složka. Stejný proces se opakuje, tentokrát však se vstupním signálem posunutým o 90° , čímž se získá imaginární složka. Blokové schéma znázorňující průběh algoritmu se nachází na obrázku 6.1.



Obr. 6.1: Vyhodnocovací algoritmus.

V této aplikaci lze s výhodou využít toho, že mikrokontroler generuje signál a také jej měří. Proto je možné fázovou detekci, posun i výpočet možné provádět softwarově. Vzorek naměřených dat z analogově-digitálního převodníku je amplitudově přizpůsoben a převeden na hodnotu 0 až 1 pro normalizaci. Z tabulky dat pro generování signálu je to samé provedeno se vzorkem ve fázi s měřeným signálem a se vzorkem posunutým o 90. Měřený vzorek je následně vynásoben vzorkem ve fázi a opět to samé pro posunutý vzorek. Toto se provede pro všechny měřené vzorky a výsledky těchto operací se sčítají. Oba výsledky se na závěr podělí počtem vzorků a výsledkem je imaginární a reálná hodnota normalizována do rozsahu -1 až 1. Každý výpočet je proveden na počtu vzorků odpovídající pěti periodám signálu, což odpovídá 1800 vzorkům.

Výpis 6.2: Kód vyhodnocovacího algoritmu.

```

static complex_t Calc_ReIm(void)
{
    float lfSumI, lfSumQ; // suma i a q
    complex_t data;

    lfSumI = 0.0f;
    lfSumQ = 0.0f;
    for (uint8_t lubPeriod = 0u; lubPeriod < NUMBER_OF_PERIODS; lubPeriod++)
    {
        for (uint16_t luwIndex = 0u; luwIndex < SAMPLES_PER_PERIOD; luwIndex++)
        {
            int16_t luwIndexSin = (luwIndex + SAMPLES_PER_PERIOD -
                                   PHASE_CORRECTION) % SAMPLES_PER_PERIOD;
            int16_t luwIndexCos = (luwIndex + SAMPLES_PER_90DEGREES -
                                   PHASE_CORRECTION) % SAMPLES_PER_PERIOD;

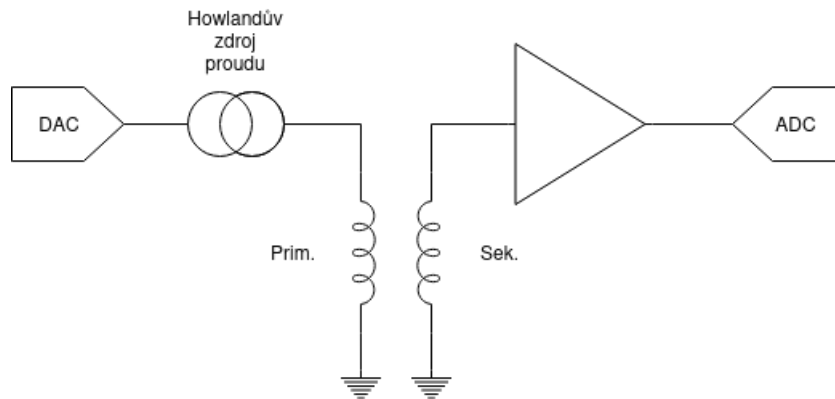
            float32_t u = Convert_U16ToFloat(muwAdcData[lubPeriod][luwIndex]);
            float32_t i = Convert_U16ToFloat(uwSineTable[luwIndexSin]);
            float32_t q = Convert_U16ToFloat(uwSineTable[luwIndexCos]);

            lfSumI += u * i;
            lfSumQ += u * q;
        }
    }
    data.lfRe = lfSumI / (-1.0f * TOTAL_SAMPLES);
    data.lfIm = lfSumQ / (-1.0f * TOTAL_SAMPLES);
    return data;
}

```

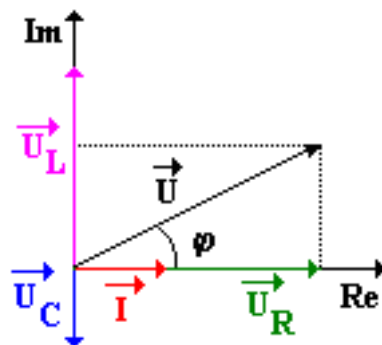
6.4.2 Měření transformačního poměru

Při měření transformačního poměru jsou relé, která řídí zapojení cívek ve výchozím stavu, tedy připravena na měření transformačního poměru, jak je patrné z kapitoly 5.6. Blokové schéma pro lepší představu o zapojení se nachází na obrázku 6.2.



Obr. 6.2: Blokové schéma zapojení transformační metody.

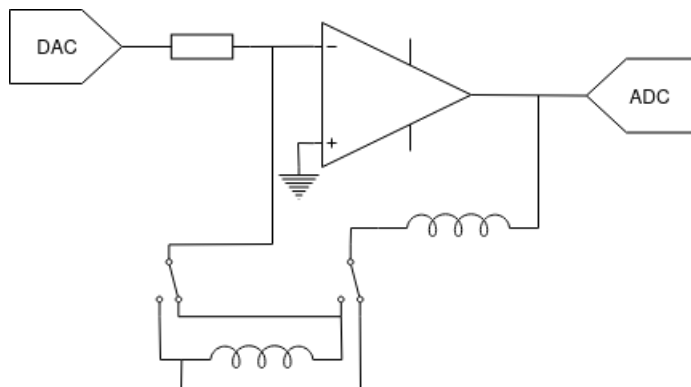
Pomocí výše zmíněného algoritmu dojde k získání reálné a imaginární složky napětí. Díky znalosti trigonometrie je pak možné Pythagorovou větou dopočítat modul napětí. Princip je znázorněn na obrázku 6.3.



Obr. 6.3: Napětí v Gaussově rovině [51].

6.4.3 Měření vzájemné indukčnosti

Při měření touto metodou dojde nejprve k přepnutí relé do polohy měření vzájemné indukčnosti. Následně je změřena indukčnost cívek v sérii, poté dojde k přepnutí relé, které zajistí přepólování jedné cívky a opět je změřena indukčnost. Pomocí jednoduché matematické úpravy z kapitoly 4.2 je zjištěna vzájemná indukčnost. Blokové schéma zapojení je na obrázku 6.4.



Obr. 6.4: Blokové schéma zapojení metody vzájemné indukčnosti.

Indukčnost lze poté vypočítána pomocí níže uvedeného vztahu s využitím znalosti imaginární složky napětí, frekvence a normálového rezistoru [52]:

$$L = \frac{X_L}{2\pi * f} = \frac{im * R_N}{2\pi * f} \quad [H; \Omega; Hz; -; \Omega; Hz] \quad (6.1)$$

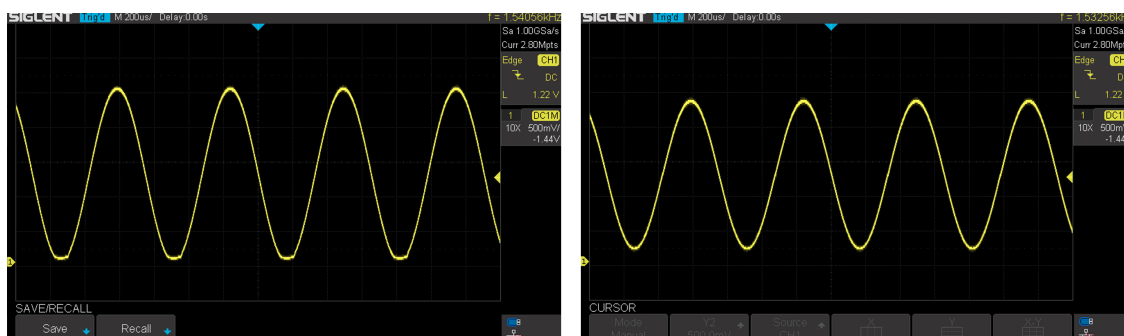
kde L je indukčnost, X_L je induktivní reaktance, f je frekvence signálu, im je imaginární složka napětí a R_N je normálový odpor.

7 Oživení zařízení

Cílem kapitoly je popsat, zda výsledný obvod odpovídal teoretickému očekávání při jeho návrhu, případně co bylo nezbytné upravit. Po osazení DPS byl do mikrokontroleru nahrán úvodní program. Na některé úpravy stačila změna programu, některé musely být provedeny na DPS. Pro tento test byl využit interní AD a DA převodník s tím, že volba, zda jsou jejich parametry dostatečné, proběhne až při samotném měření.

7.1 Úpravy programu

Jako první došlo k ověření, zda DA převodník generuje požadované napětí. Data byla vygenerována pro celý rozsah 12 bit DA převodníku, tudíž 0 až 4095. Bohužel bylo zjištěno, že interní převodník nezvládne generovat napětí od 0 V. Tato informace je zmíněna i v katalogovém listu výrobce. Z tohoto důvodu došlo k úpravě a generovaný rozsah napětí není 0 až 2,5 V, ale 0,3 až 2,2 V. Na obrázku 7.1 je pak znázorněn výstup DA převodníku před a po úpravě. Všechna měření byla provedena za RC filtrem (pro generovaný signál) a na vstupu AD převodníku (pro měřený signál) [28].



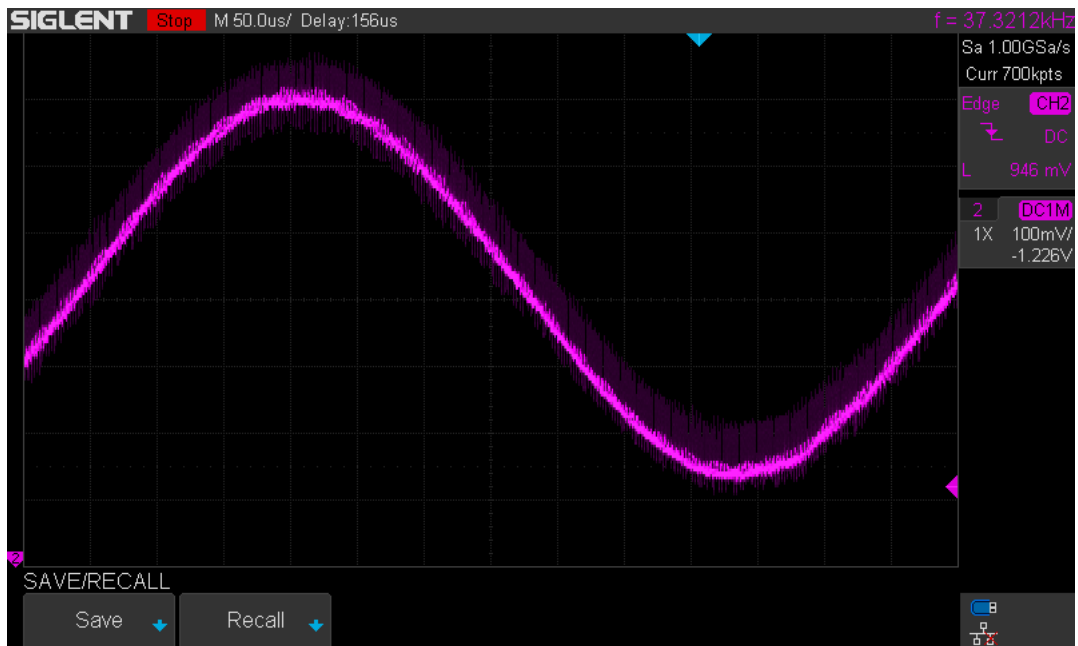
Obr. 7.1: Špatný (vlevo) a správný (vpravo) výstup DA převodníku.

Další rozsáhlou úpravou, kterou bylo nezbytné provést je zvýšit frekvenci, kterou lze budít měřené cívky. V kapitole 6.4 je zmíněno, že kvůli přechodovým jevům není přerušeno generování signálu. Generování signálu bylo tudíž přesunuto do přerušení, na jehož konci byl spuštěn AD převod. Díky této úpravě bylo možné dosáhnout generované frekvence přibližně 150 Hz. Jelikož vzorků v generovaném signálu je 360, frekvence přerušení tudíž vychází 54 KHz. Po změření bylo přerušeno čtení AD převodníku a došlo k výpočtu. Frekvence 150 Hz však nestačila k dostatečnému vybuzení sekundární cívky.

Z tohoto důvodu se pro generování a měření signálu využívá DMA. Díky tomuto kroku bylo možné dosáhnout frekvence okolo 1,5 KHz. Tato frekvence již stačila k dostatečnému vybudování sekundární cívkou. Čtení AD převodníku tudíž probíhá také neustále a vzorek je sejmuto vždy po zápisu do DA převodníku. Výsledný vzorkovací kmitočet je tedy přibližně 540 KHz. DMA pro AD převodník ukládá data do bufferu, jehož velikost je dvojnásobná oproti požadovanému počtu měřených vzorků. Mikrokontroler umožňuje vygenerovat přerušování v okamžiku naplnění poloviny zmíněného bufferu. Následně dojde k přesunutí dat do pole pro výpočet a měřená data se ukládají do druhé půlky bufferu. Během této doby proběhne výpočet a to samé se provádí s druhou půlkou bufferu. Nevýhodou tohoto postupu je, že využitá paměť RAM je trojnásobná oproti předchozí metodě.

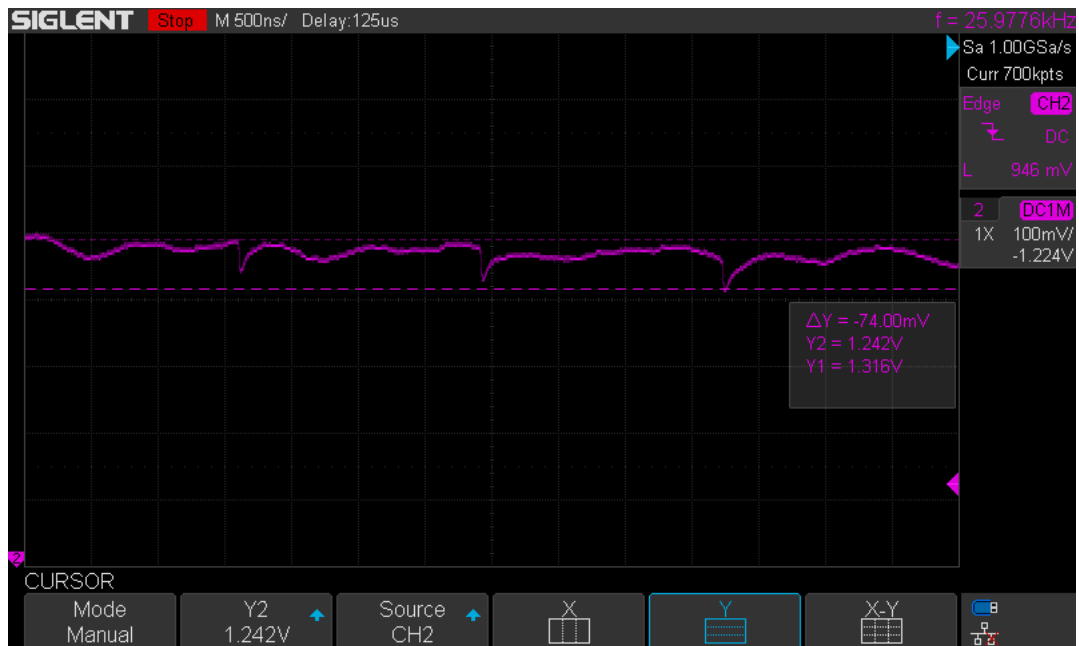
7.2 Úprava zapojení

Vstup AD převodníků není přepínatelný, jako v případě DA převodníků, kvůli předpokladu, že tyto vysokoimpedanční vstupy se nebudou ovlivňovat. Externí AD převodník ale musel být odpojen, protože ovlivňoval měřený signál. Dále byl odpojen i vzorkovací kondenzátor C39, protože interní AD převodník již obsahuje vzorkovací kondenzátor tvořený spínanými kondenzátory. Externí kondenzátor interagoval se spínanými kondenzátory a způsoboval přesun náboje mezi vnitřním obvodem AD převodníku a kondenzátorem, tento projev je patrný z obrázku 7.2. Po jeho odpojení došlo ke snížení odchylek v měření.



Obr. 7.2: Zákmity způsobené externím vzorkovacím kondenzátorem.

Nabíjení vnitřního vzorkovacího obvodu se do signálu stále mírně propaguje kvůli výstupní impedanci operačního zesilovače s rezistorem na výstupu, to však již nezpůsobuje chybu v měření, protože mezi jednotlivými měřeními je dostatečný čas k nabití spínaných kondenzátorů. Průběh je znázorněn na obrázku 7.3 [53].



Obr. 7.3: Nabíjení vzorkovacího kondenzátoru mezi měřeními.

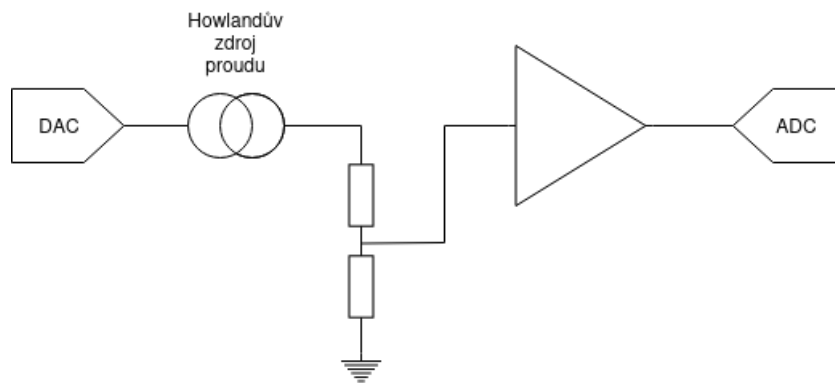
Následně došlo k nahrazení rezistoru R83 v Howlandově zdroji proudu byl nahrazen potenciometrem, aby bylo možné měnit velikost proudu a díky tomu dostatečně vybudit sekundární cívku (viz. schéma na obrázku 5.6). Potenciometrem byl nahrazen i rezistor R67, který určuje zesílení operačního zesilovače za DA převodníkem. Rezistor byl nahrazen, protože původní zapojení nezesilovalo signál pro některé měřené obvody dostatečně a amplituda musela být kompenzována v programu.

7.3 Ověření funkčnosti měření

V dalším kroku bylo potřeba zjistit, zda měřící obvod a vyhodnocovací algoritmus fungují správně. Navíc pomocí tohoto měření byly nakalibrovány hodnoty fáze a amplitudy. Tento krok není pro samotné měření nezbytný, cílem normalizace výsledných jednotek. Pro ověření byly pro obě metody využity rezistory o známých hodnotách. Jejich fázový posun byl zanedbaný, protože jeho hodnota by měla mít minimální vliv na měření. Navíc cílem zařízení není získat přesné hodnoty, ale jejich změny. To platí jak pro amplitudu, fázi, tak i reálnou a imaginární složku signálu. Z tohoto důvodu byl pro ověření použit osciloskop.

7.3.1 Transformační metoda

Na výstupní svorky pro měřené cívky byl připojen odporový dělič napětí. Kvůli tomu, že primární cívka je buzena proudem, nemohl být rezistor zapojen přímo ze svorky primární cívky do svorky sekundární cívky. Sekundární cívka je totiž přímo zapojena na vstup operačního zesilovače a docházelo by tudíž u zdroje proudu k saturaci. Výstup děliče byl zapojen na svorku sekundární cívky (viz. blokové schéma na obrázku 7.4).



Obr. 7.4: Blokové schéma zapojení pro ověření transformační metody.

Na obrázku 7.5 jsou zobrazeny průběhy jak generovaného, tak měřeného signálu. Nejprve byl tímto způsobem změřen fázový posun mezi těmito signály. Na osciloskopu byl výsledek $43,1^\circ$, zařízení měřilo hodnotu $45,29^\circ$. Do programu byla uložena hodnota 45° . Ta slouží jako kompenzace fázového posunu měřícího obvodu, aby výsledná hodnota zobrazovala posun pouze měřeného obvodu. Dominantním zdrojem fázového posunu je RC článek R57 a C45, které mají mezní kmitoček mírně nad frekvencí generovaného signálu (viz. schéma na obrázku 5.2). Po tomto kroku následovalo ověření měření amplitudy. Hodnota, kterou odesílá zařízení není přímo velikost napětí, ale reprezentuje poměr mezi amplitudou měřeného signálu a amplitudou generovaného signálu. Amplituda generovaného signálu měřená osciloskopem byla 2,18 V, měřeného signálu pak 2,2 V. Jejich poměr je tedy 1,0092. Zařízení naměřilo hodnotu 1,0085. Pro větší přehlednost byla tato měření zanesena do tabulky 7.1

Tab. 7.1: Výsledky ověření transformační metody pomocí rezistorů.

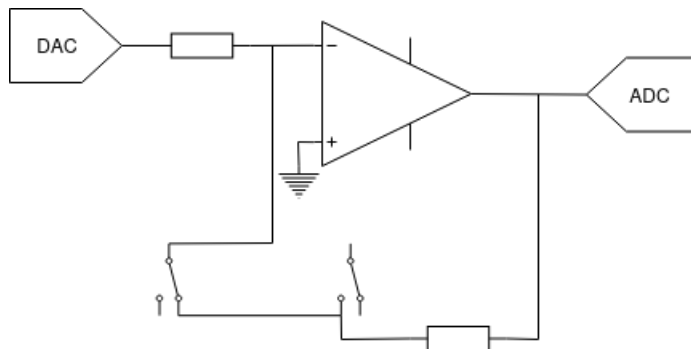
Zdroj dat	Fáze [°]	Poměr generovaného a měřeného signálu [-]
Osciloskop	43,1	1,0092
Zařízení	45,29	1,0085



Obr. 7.5: Generovaný (žlutý) a měřený (fialový) signál pro transformační metodu.

7.3.2 Metoda vzájemné indukčnosti

V případě měření vzájemné indukčnosti jsou cívky zapojeny v sérii a jsou součástí zpětné vazby operačního zesilovače. Rezistor tedy může být zapojený přímo na svorky a není potřeba použít dělič napětí jako je znázorněno na obrázku 7.6.

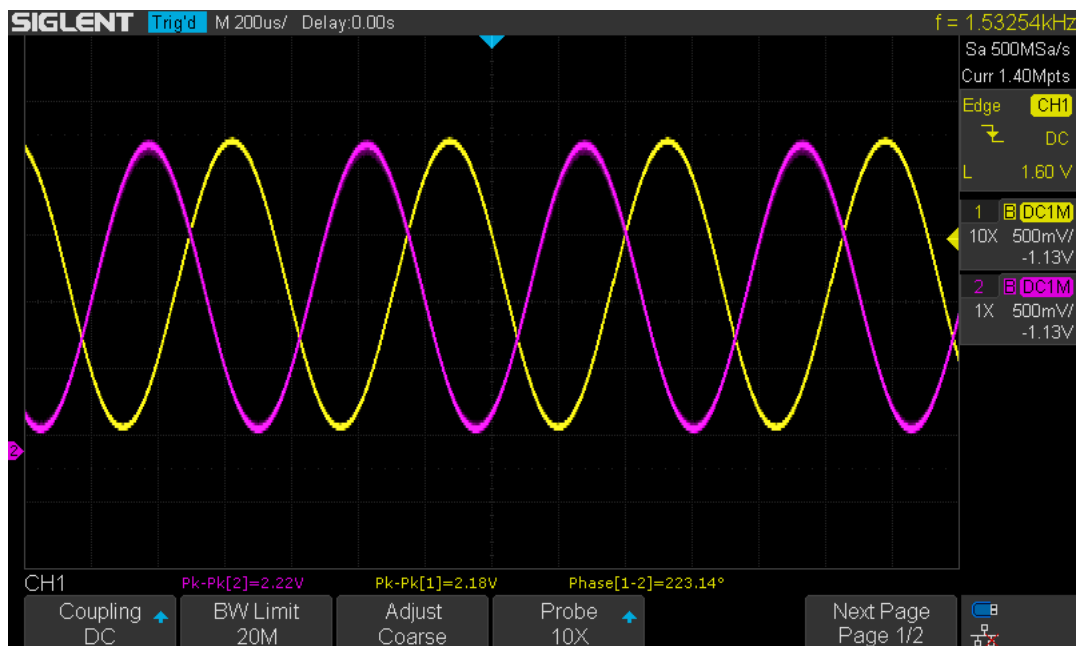


Obr. 7.6: Blokové schéma zapojení pro ověření metody vzájemné indukčnosti.

Opět byl změřen fázový posun obvodu. V tomto případě je hodnota na osciloskopu větší o 180° . To je způsobeno inverzním zapojením měřícího zesilovače. Toto otočení fáze je zohledněno ve výpočtu, proto je tento posun od kompenzace odečten. Průběhy se nachází na obrázku 7.7. Osciloskop naměřil fázové posunutí $223,14^\circ$. Bez zmíněných 180° je výsledná fáze $43,14^\circ$. Zařízení naměřilo hodnotu $44,9^\circ$. Primárním zdrojem tohoto posuvu je opět RC článek R57 a C45. Do programu tedy byla uložena hodnota 45° pro kompenzaci fáze měřícího obvodu. V porovnání s ověřením transformační metody jsou tyto hodnoty téměř shodné, z toho je možné usoudit, že konkrétní měřící obvody nemají na fázi signálu výrazný vliv. Po tomto kroku následovala kalibrace na známém rezistoru. Normálový rezistor má hodnotu $1\text{ K}\Omega$, kalibrační rezistor také. Pomocí potenciometru došlo k co nejlepšímu vyrovnání amplitud. Pro měření odporu touto metodou potom platí:

$$R = re * R_N [\Omega; -; \Omega] \quad (7.1)$$

kde R je výsledný odpor, re je reálná složka napětí měřeného signálu a R_N je normálový odpor. Po tomto kroku bylo měření ověřeno na rezistoru nižší hodnoty.



Obr. 7.7: Generovaný (žlutý) a měřený (fialový) signál pro metodu vzájemné indukčnosti.

8 Testování měřících metod

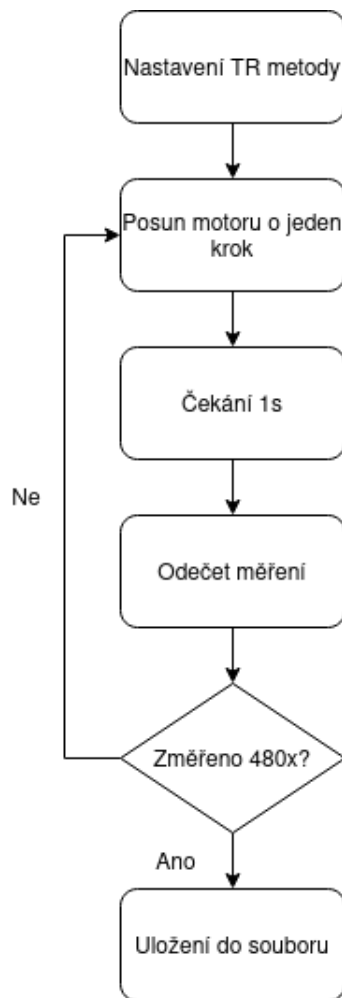
Tato kapitola popisuje průběh a výsledky testování měřících metod již na konkrétních cívkách. Cílem je porovnat obě metody a zvolit jednu z nich. Testování probíhalo na cívkách s různými počty závitů. Tyto cívky byly navinuty na kostříčku vytištěnou na 3D tiskárně a navinuty na vyrobené navíječe. Vzájemnou indukčnost je vhodné měřit u cívek se stejným počtem závitů a u transformačního poměru je tento poměr také výhodný kvůli podobnému zapojení obvodů pro úpravu signálu za DA převodníkem i před AD převodníkem. Byly nachystány tři cívky, první se shodným počtem závitů 1000, druhá se shodným počtem závitů 100 a pro porovnání třetí s rozdílným počtem závitů 2715 a 478 [27].

Bylo potřeba velké množství měření, z toho důvodu byl vytvořen kód v programovacím jazyce Python. Ten komunikuje pomocí převodníku se zařízením prostřednictvím rozhraní Modbus.

8.1 Testování metody transformačního poměru

Postupně byly změřeny všechny varianty cívek za různých podmínek. Pro každou variantu bylo nezbytné upravit zesílení a proud obvodem. Naměřená data byla následně vynesena do grafu a vyhodnocena.

Pro tuto metodu byla hlavní měřenou veličinou amplituda napětí měřená AD převodníkem v porovnání k amplitudě napětí generované DA převodníkem. Byla provedena tři měření pro každou variantu. Byla testována opakovatelnost měření bez pohybu hřídele při pokojové teplotě. Ten samý test byl proveden s cívkami umístěnými v teplotní komoře při teplotě stoupající z pokojové teploty až na 70 °C. Posledním testem bylo měření po každém kroku motoru v rozsahu 10 mm (480 kroků motoru). Tento test byl opakován třikrát. Jeho průběh je znázorněn na obrázku 8.1. Pro statické metody se hřídel nacházela v horní pozici ve které by měřené veličiny měly dosahovat maxim.

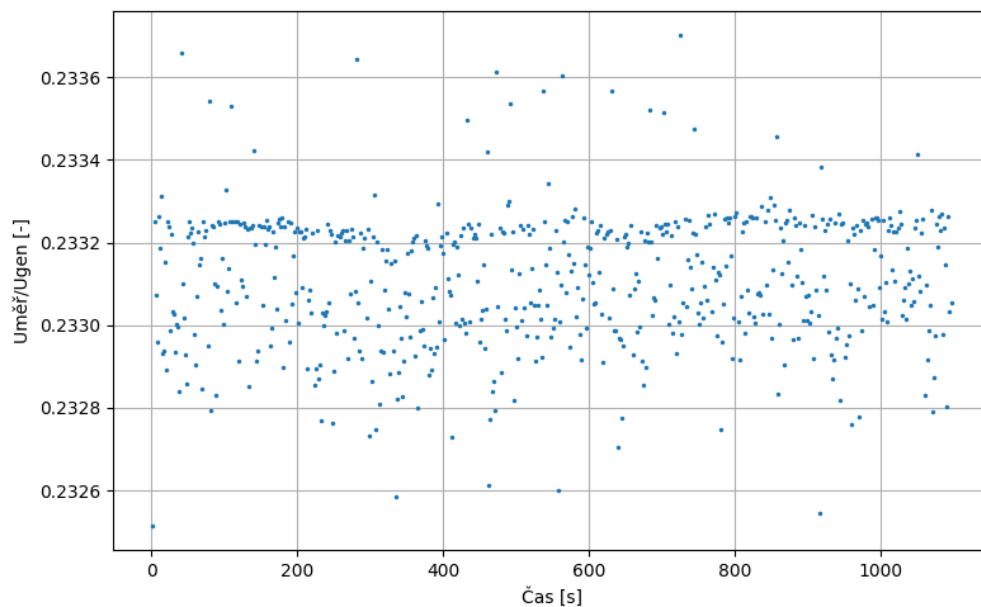


Obr. 8.1: Blokový diagram testování transformační metody.

8.1.1 Měření dvojice cívek - primární 2715 závitů, sekundární 478 závitů

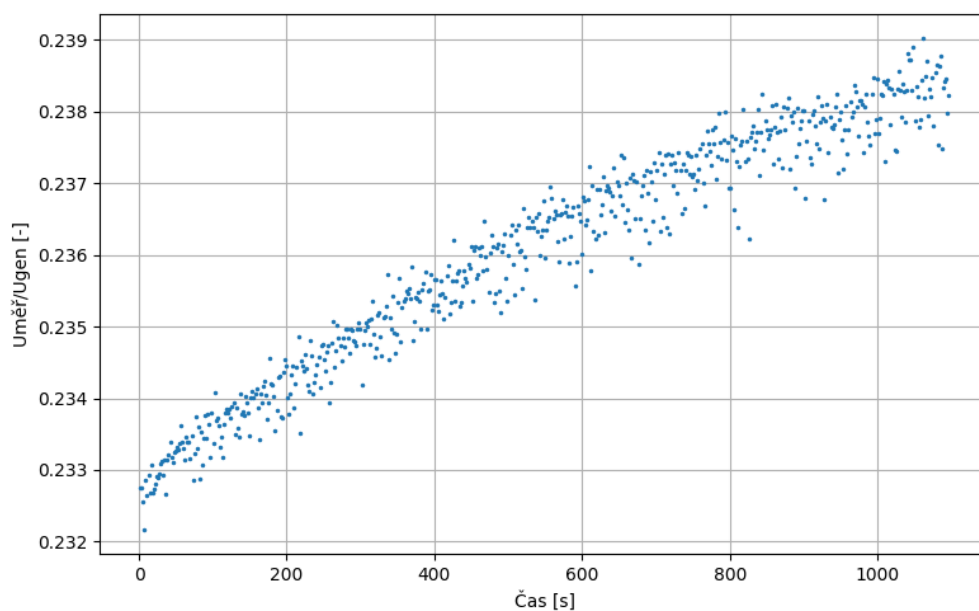
Cívky byly připojeny k zařízení a pomocí kontroly na osciloskopu byl nastaven proud. Hned z prvního grafu nacházejícím se na obrázku 8.2 je patrné, že poměr amplitud signálů nedosahuje ideálního poměru, ale měřený signál dosahuje pouze asi 0,23 násobku generovaného signálu. To je způsobeno nízkým napájecím napětím (± 15 V) operačních zesilovačů ve zdroji proudu, kdy při snaze o zvýšení docházelo k saturaci signálu.

Měření stability hodnoty bez pohybu motoru se nachází na obrázku 8.2. Z grafu je patrné, že maximální změna dosahuje přibližně desetinu procenta generované amplitudy (2,3 mV) s většinou naměřených dat ve zhruba polovičním rozsahu. V průběhu měření není patrný žádný klesající či stoupající trend.



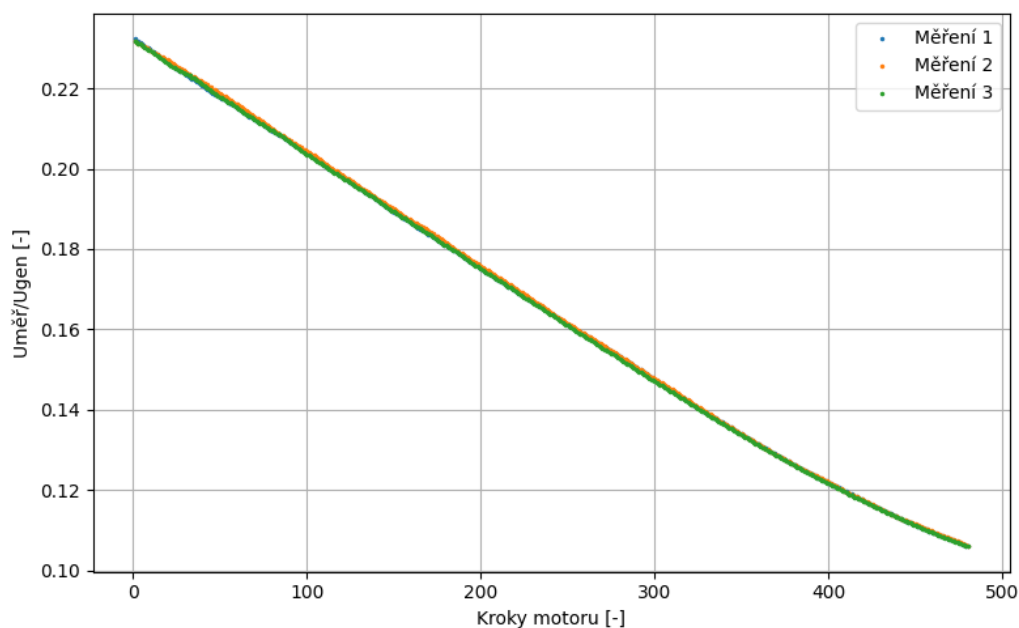
Obr. 8.2: Změna amplitudy v čase bez pohybu motoru (2715/478 závitů).

Druhý graf znázorněný na obrázku 8.3 zobrazuje průběh měření se stoupající teplotou až k hodnotě 70 °C. Zde je již patrný trend růstu s teplotou. Změna hodnot je již ve značně větším rozsahu (necelých sedm desetín procenta).



Obr. 8.3: Změna amplitudy v čase bez pohybu motoru se změnou teploty z 20 °C na 70 °C (2715/478 závitů).

Na posledním grafu na obrázku 8.4 se nachází měření při pohybu motoru. Průběh naměřených hodnot je téměř lineární s poklesem velikosti změny amplitudy v okamžiku, kdy se hřídel nacházela v primární cívce pouze minimálně.



Obr. 8.4: Změna amplitudy při pohybu motoru (2715/478 závitů).

V tabulce 8.1 se nachází střední hodnoty jednotlivých měření při pohybu motoru. Hodnoty jsou uvedeny jak relativně vůči generované hodnotě, tak v milivoltech. Z dat je patrné, že při opakovaném měření nedochází k výraznější změně i přes to, že při měření nebylo zohledněno vymezení vůlí měřeného systému.

Tab. 8.1: Průměrné hodnoty rozdílů mezi kroky motoru.

Měření	Průměrný rozdíl mezi kroky [mV]	Průměrný rozdíl mezi kroky [-]
1	0,606	0,000263
2	0,603	0,000262
3	0,603	0,000262

Tabulka 8.2 zachycuje maximální a minimální hodnoty statických měření a jejich rozdíl. Pro porovnání je uveden i údaj průměrné změny mezi kroky motoru.

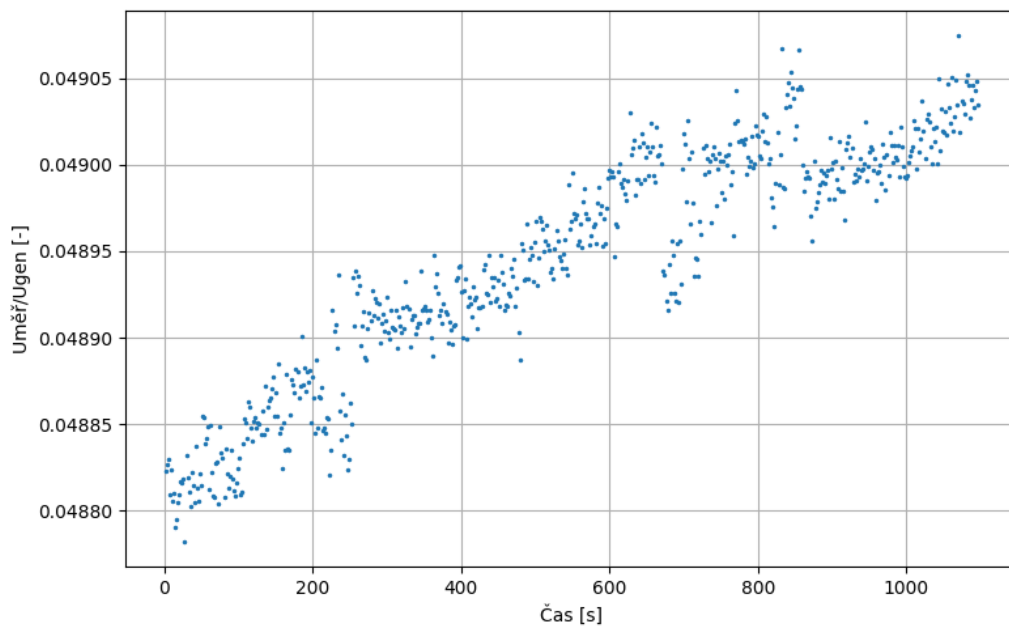
Tab. 8.2: Porovnání změn statických a dynamických měření.

Min 20 °C [mV]	534,8
Max 20 °C [mV]	537,5
Rozdíl 20 °C [mV]	2,7
Min 70 °C [mV]	534,0
Max 70 °C [mV]	549,7
Rozdíl 70 °C [mV]	15,7
Prům. změna mezi kroky [mV]	0,6

Z naměřených dat lze vyvodit, že pro přesnější měření pohybu tato konfigurace cívek není příliš vhodná. Hlavním problémem je stálost měření, kdy bez pohybu lze rozpoznat až každý pátý krok. Změna teploty z 20 °C na 70 °C má na toto měření také značný vliv, kdy rozdíl odpovídá hodnotě 27 kroků. Pro zjištění pozice po spuštění tedy lze tuto kombinaci cívek použít spíše orientačně. Pro měření před a po pohybu se zdá být vhodnější, protože dochází k ustálení hodnot. Hlavní problém je nízká měřená amplituda, jejíž zvyšování by vyžadovalo výměnu symetrických zdrojů a zvyšování napětí, což přidává složitost a cenu. Byl proveden i rychlý test s opačným zapojením cívek (primární 478 závitů a sekundární 2715 závitů). Tato varianta však pro transformační metodu s aktuálním zapojením nešla použít, protože způsobovala nestabilitu proudového zdroje a již při malém proudu se dostávala měřící strana do limitace.

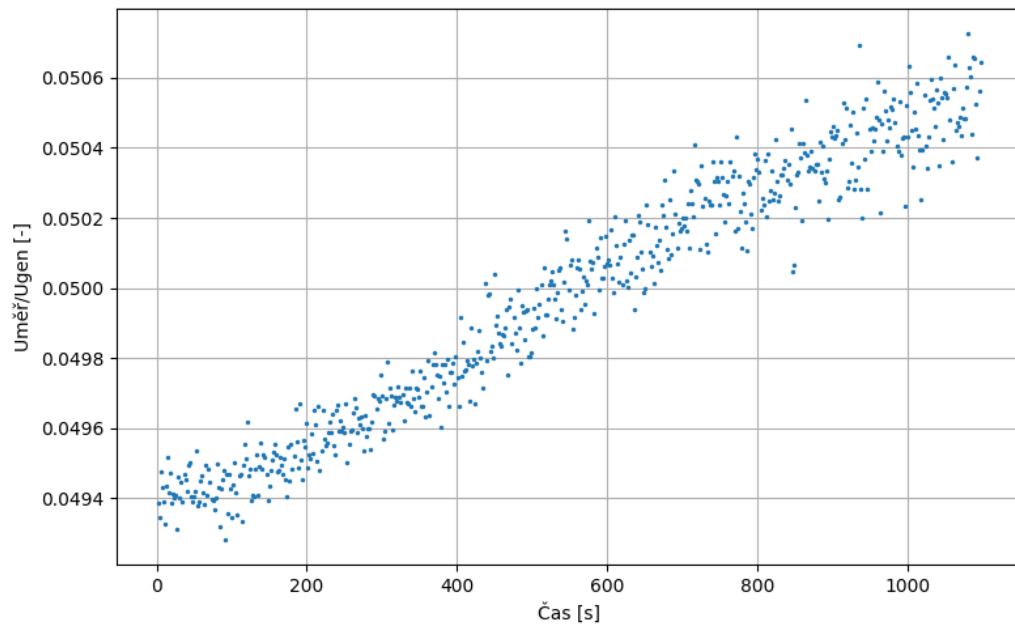
8.1.2 Měření dvojice cívek - primární 100 závitů, sekundární 100 závitů

V tomto případě byl opět nastaven proud cívkami. V takto nízkém počtu závitů byl problém naindukovat do sekundární cívky dostatečně vysoké napětí, což je opět patrné z obrázku 8.5. Měřený poměr je ještě horší, než v předchozím případě. Pro celkové porovnání jsou zde však uvedena i tato data. Rozptyl měřené hodnoty je v tomto případě značně menší vůči generovanému signálu. V porovnání s měřeným signálem je však mnohem výraznější.



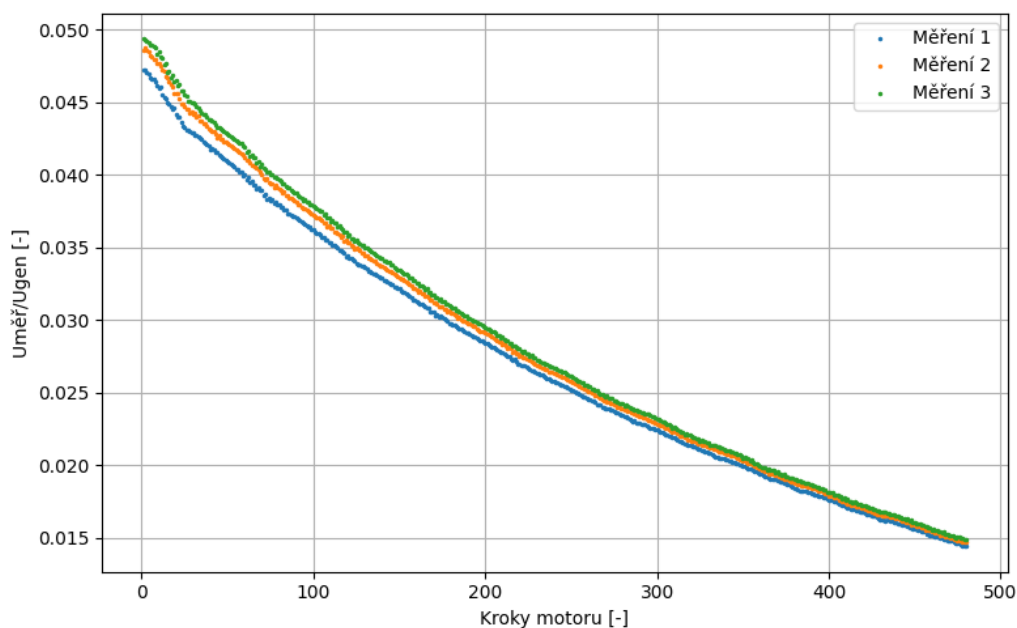
Obr. 8.5: Změna amplitudy v čase bez pohybu motoru (100/100 závitů).

Graf na obrázku 8.6 zachycuje změnu hodnoty při změně teploty. Trend je opět rostoucí a změna vůči generovanému signálu je značně nižší. V porovnání vůči měřenému signálu je však změna podobná.



Obr. 8.6: Změna amplitudy v čase bez pohybu motoru se změnou teploty z 20 °C na 70 °C (100/100 závitů).

Z obrázku 8.7 je patrné, že linearita klesá a samotná opakovatelnost je také horší. Největší rozptyl jednotlivých měření je patrný na začátku charakteristiky a postupně klesá.



Obr. 8.7: Změna amplitudy při pohybu motoru (100/100 závitů).

Z tabulky 8.3 je vidět, že rozdíly jednotlivých měření z grafu 8.7 se projeví i na středních hodnotách. Naměřená data však dosahují velice nízkých hodnot.

Tab. 8.3: Průměrné hodnoty rozdílů mezi kroky motoru.

Měření	Průměrný rozdíl mezi kroky [mV]	Průměrný rozdíl mezi kroky [-]
1	0,158	0,000069
2	0,163	0,000071
3	0,166	0,000072

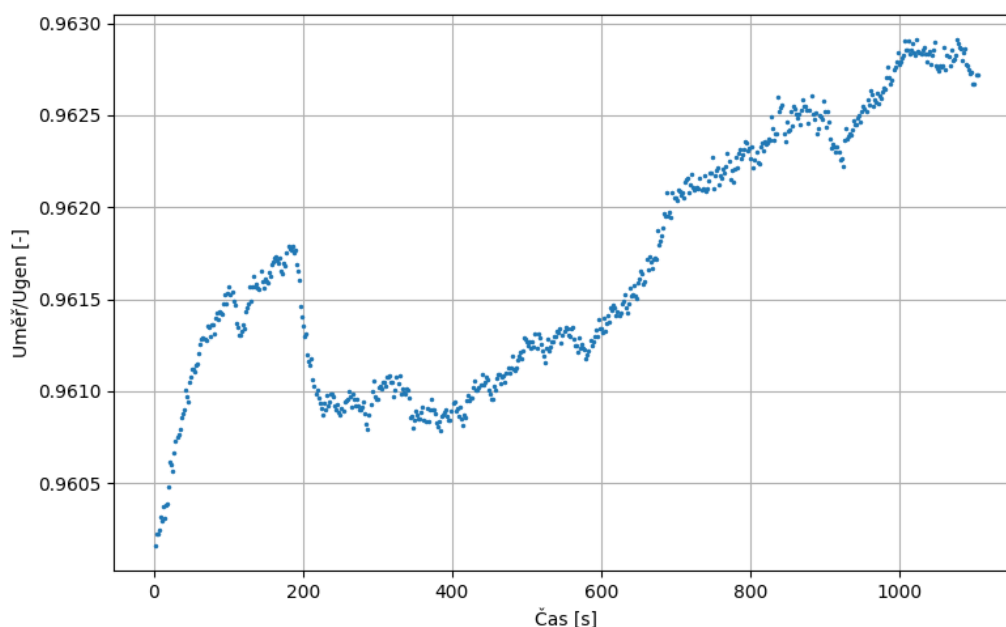
V tabulce 8.4 se nachází spočítané hodnoty ze statických měření a průměrná změna mezi kroky. Dle průměrných dat by mělo být možné opět rozpoznat každý pátý krok i se statickou chybou opakování bez změny teploty. Při změně teploty je rozdíl mezi krajními body 21 kroků. Je však nezbytné vzít v potaz horší linearitu měření, tudíž rozpoznatelnost se bude lišit v jednotlivých úsecích pohybu motoru. Velkým problémem je opět nízká hodnota měřené amplitudy, tudíž potřeba zdroje s vyšším napětím.

Tab. 8.4: Porovnání změn statických a dynamických měření.

Min 20 °C [mV]	112,2
Max 20 °C [mV]	112,9
Rozdíl 20 °C [mV]	0,7
Min 70 °C [mV]	113,3
Max 70 °C [mV]	116,7
Rozdíl 70 °C [mV]	3,3
Prům. změna mezi kroky [mV]	0,16

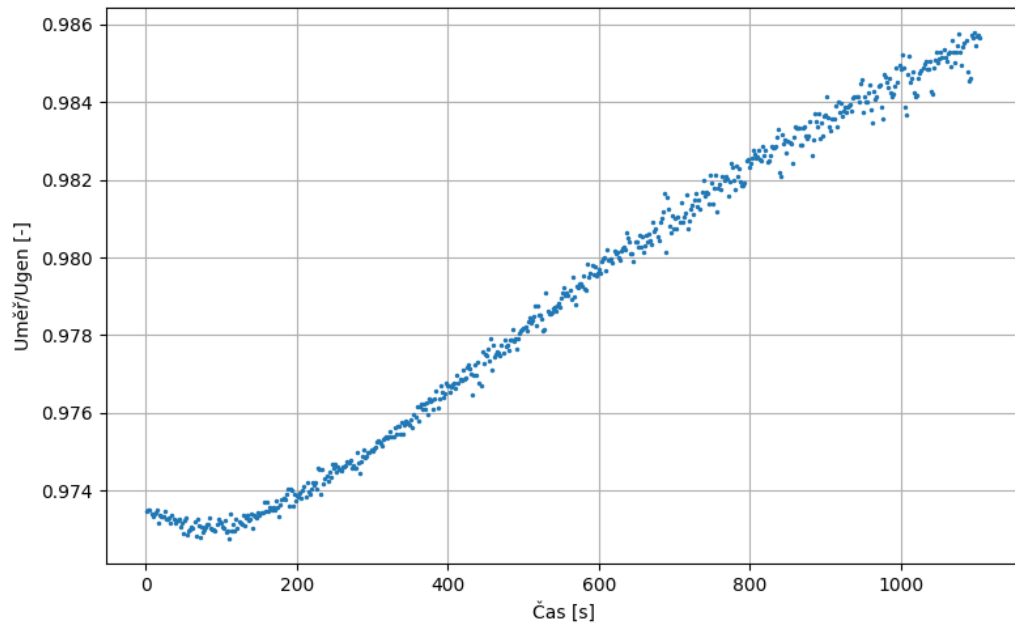
8.1.3 Měření dvojice cívek - primární 1000 závitů, sekundární 1000 závitů

Proud primární cívkou byl nastaven, aby poměr měřeného a generovaného napětí byl co nejbližší hodnotě 1. V případě této konfigurace cívek bylo tohoto možné dosáhnout. Napájecí napětí operačních zesilovačů bylo dostatečné a cívky ani nezpůsobovaly jakoukoliv nestabilitu obvodu. Konkrétní nastavený poměr v horní pozici je znázorněn na obrázku 8.8, kde je vidět i změna měřeného napětí bez pohybu motoru. Změna dosahuje desetin procent, výhodou je však již zmíněná možnost dosáhnout vyšší amplitudy než v předchozích variantách.



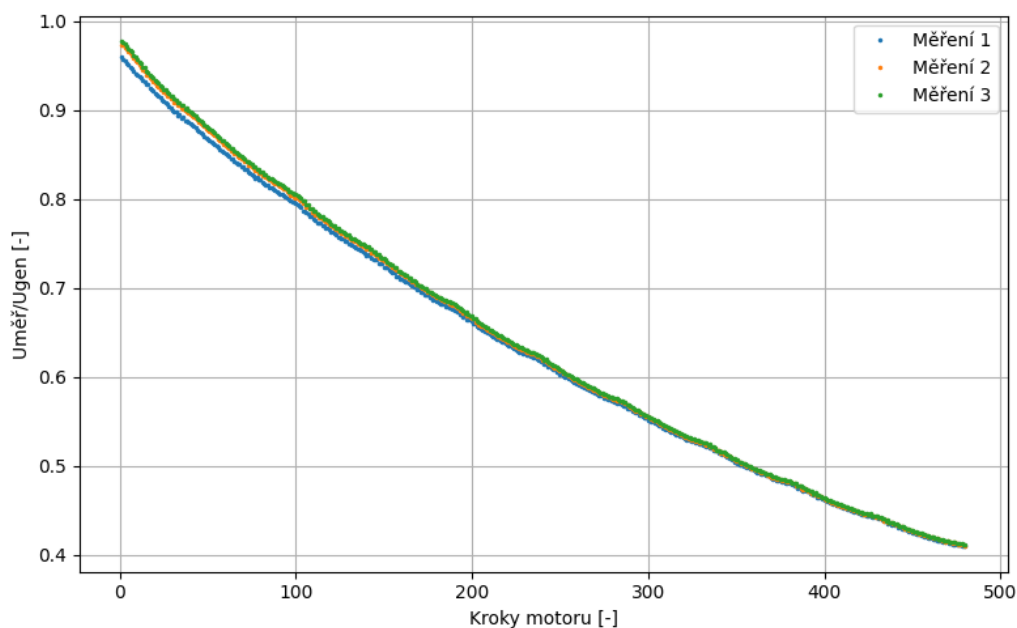
Obr. 8.8: Změna amplitudy v čase bez pohybu motoru (1000/1000 závitů).

S teplotou amplituda mírně roste, což je patrné z obrázku 8.9. Tato změna se pohybuje okolo jednoho procenta od minima po maximum.



Obr. 8.9: Změna amplitudy v čase bez pohybu motoru se změnou teploty z 20 °C na 70 °C (1000/1000 závitů).

Opakované měření s pohybem motoru se nachází na obrázku 8.10. Je z něj patrné, že křivky vykazují mírnou nelinearitu. Co se týče opakovatelnosti, tak nejvíce se liší první měření.



Obr. 8.10: Změna amplitudy při pohybu motoru (1000/1000 závitů).

V tabulce 8.5 jsou průměrné změny měřeného napětí mezi kroky motoru uvedeny jak v milivoltech, tak v poměru ke generovanému napětí. Díky zvýšení proudu primární cívkou (a tak zvýšením amplitudy měřeného napětí) bylo možné zvýšit změnu amplitudy mezi jednotlivými kroky. Tento krok by měl vést ke snížení vlivu šumu na měření.

Tab. 8.5: Průměrné hodnoty rozdílů mezi kroky motoru.

Měření	Průměrný rozdíl mezi kroky [mV]	Průměrný rozdíl mezi kroky [-]
1	2,647	0,001151
2	2,706	0,001177
3	2,723	0,001184

Jak je vidět v tabulce 8.6, zvýšení amplitudy mělo alespoň mírný pozitivní vliv na veškeré parametry oproti předchozím měřením. Bez změny teploty se měřená veličina může měnit až o přibližně 3 kroky. Při změně teploty na 70 °C dojde k posunu měřené veličiny až o změnu odpovídající 11 krokům.

Tab. 8.6: Porovnání změn statických a dynamických měření.

Min 20 °C [mV]	2208,4
Max 20 °C [mV]	2214,7
Rozdíl 20 °C [mV]	6,3
Min 70 °C [mV]	2237,4
Max 70 °C [mV]	2267,3
Rozdíl 70 °C [mV]	29,9
Prům. změna mezi kroky [mV]	2,7

8.1.4 Vyhodnocení

Z měření je patrné, že výhodný pro transformační metodu z důvodu obvodové realizace je poměr cívek 1:1. Na měření měla největší vliv možnost vybudit sekundární cívku tak, aby na vstupu AD převodníku bylo napětí o podobné amplitudě, jako generované napětí.

Rozptýl měření a teplotní závislost byla ve všech případech značná, proto lze říci, že měřicí metoda není zcela vhodná pro přesné určení pozice bez předchozí informace o poloze. Na druhou stranu opakovatelnost byla ve všech případech velmi dobrá s tím, že nejvíce se odlišovalo vždy první měření, což může být způsobeno vřelými mezi jednotlivými částmi měřeného ústrojí.

Změna mezi jednotlivými kroky byla největší u cívek s 1000 závitů. Lze to jednoznačně přisuzovat vyšší měřené amplitudě. Proto tato varianta byla zvolena jako nejlepší. Je nezbytné ale vzít v potaz, že linearita na celém rozsahu je mírně horší, než v případě cívek s 2715 a 478 závitů. Z tohoto lze usoudit, že mezi měřené varianty by bylo vhodné začlenit ještě jednu variantu s vyšším počtem závitů a poměrem 1:1 pro ověření této hypotézy. Hodnoty rozpoznatelnosti jednotlivých kroků bez a se změnou teploty z 20 °C na 70 °C byly zaneseny do tabulky 8.7.

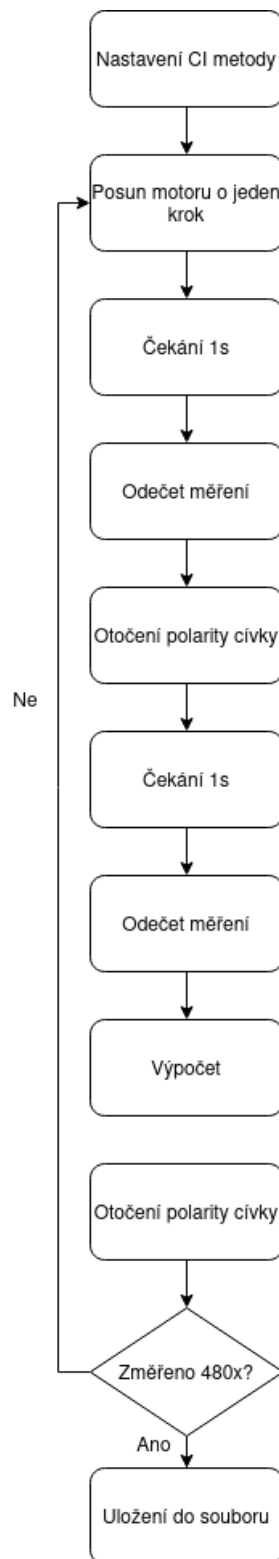
Tab. 8.7: Porovnání rozpoznatelnosti kroků pro jednotlivé varianty cívek - transformační metoda.

Počet závitů	Rozpoznatelnost kroků (20 °C)	Rozpoznatelnost kroků (20 °C až 70 °C)
2715/478	5	27
100/100	5	21
1000/1000	3	11

8.2 Testování metody vzájemné indukčnosti

V tomto případě byly opět otestovány všechny cívky. Před prvním měřením došlo ke kalibraci metody na známém rezistoru. Podle toho bylo nastaveno zesílení vstupního zesilovače pomocí potenciometru připojeného na osazovací plošky R67. Pro každé měření byl pak volen normálový rezistor R78 podle konkrétních cívek, aby byl dosažen co největší rozkmit na vstupu AD převodníku.

V tomto případě byla odečítána reálná a imaginární složka napětí, které byly převedeny na vzájemnou indukčnost. Princip testů byl shodný s metodou transformačního poměru. Kvůli potřebě otočení polarity jedné cívky a následný výpočet byl však průběh testů mírně složitější. Průběh testování je opět znázorněn na obrázku 8.11. Statické metody byly opět testovány s hřídelí v horní pozici.

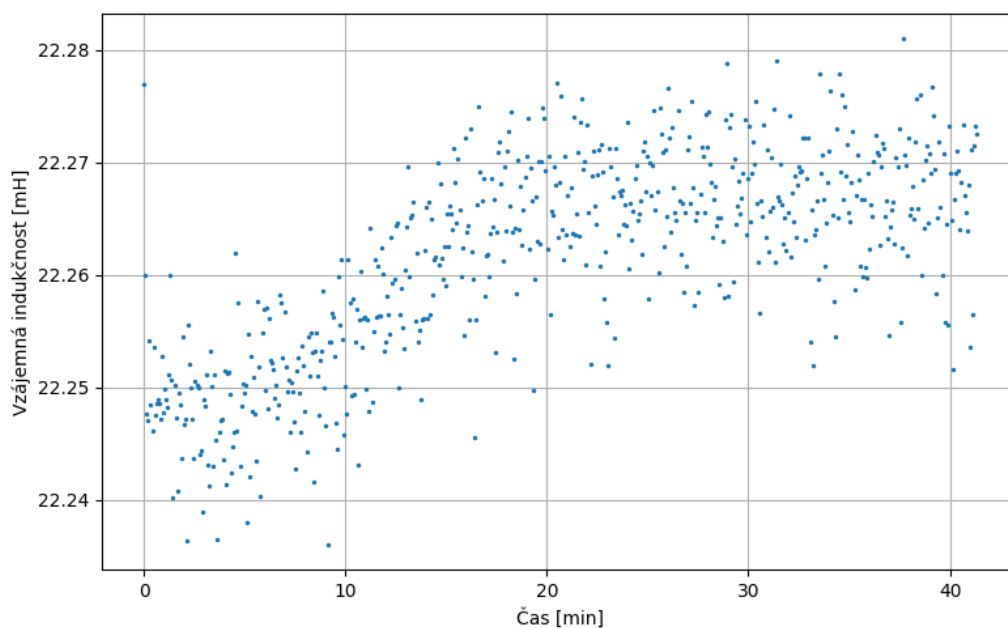


Obr. 8.11: Blokový diagram testování metody vzájemné indukčnosti.

8.2.1 Měření dvojice cívek - primární 2715 závitů, sekundární 478 závitů

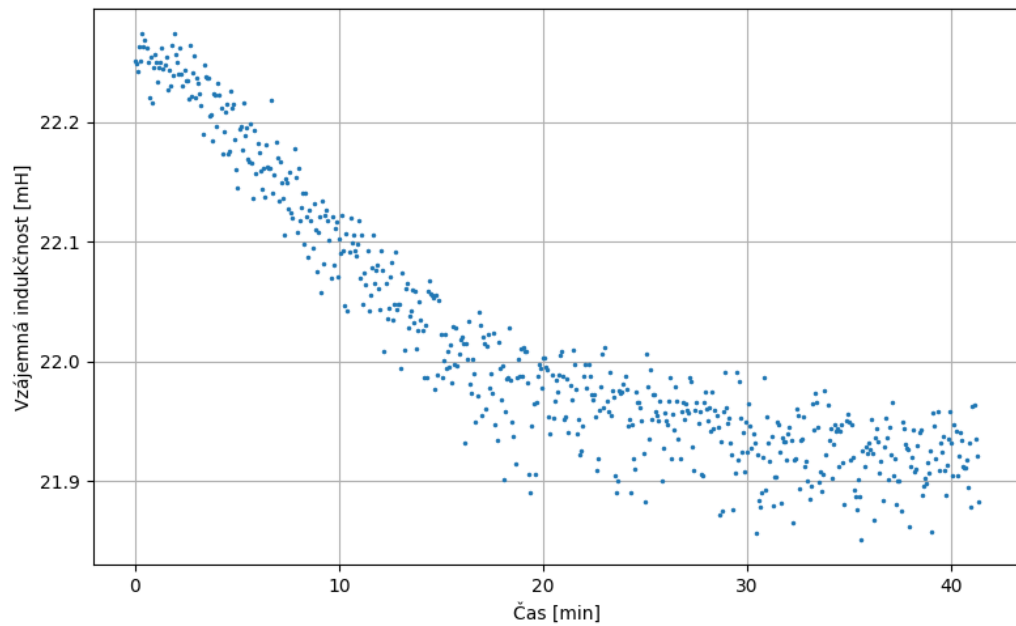
Po zapojení cívek byl zvolen normálový rezistor R78 o hodnotě $3,2\text{ K}\Omega$ (viz. schéma na obrázku 5.5). V takovém případě dosahovala amplituda přibližně 0,85 násobku generovaného signálu. Amplituda v tomto měření není porovnávána, ale je vhodné volit takový normálový rezistor R78, aby poměr amplitud byl co nejbližší jedné.

Měření bez pohybu motoru se nachází na obrázku 8.12. Rozptyl vzájemné indukčnosti je v desetinách procenta oproti střední hodnotě.



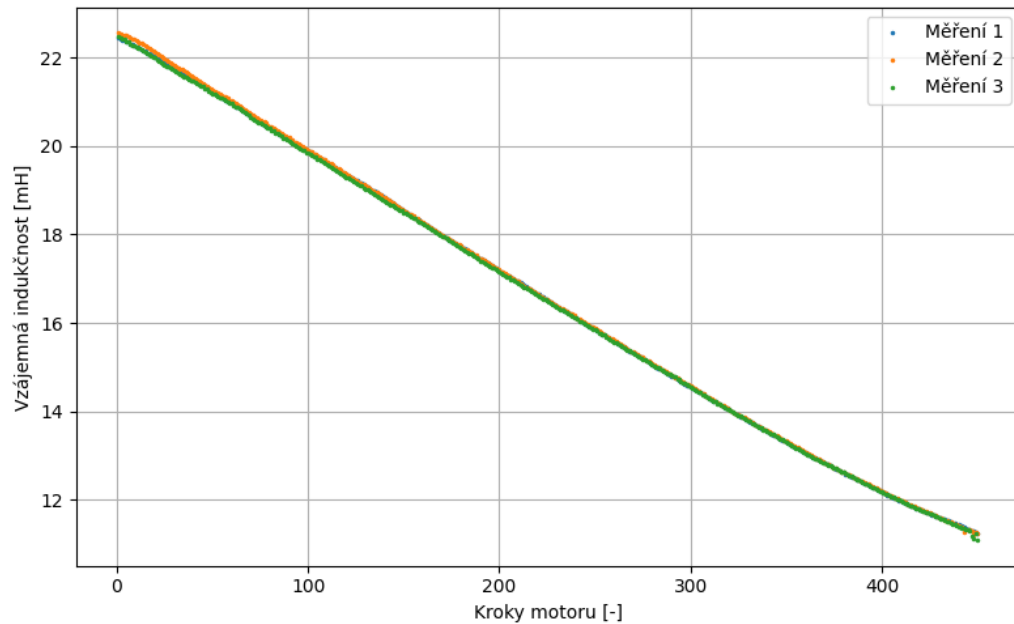
Obr. 8.12: Změna vzájemné indukčnosti v čase bez pohybu motoru (2715/478 závitů).

Graf se změnou teploty, který se nachází na obrázku 8.13 již vykazuje větší změnu. Je patrné, že s rostoucí teplotou vzájemná indukčnost klesá. Tato změna je výraznější a dosahuje přibližně dvou procent v porovnání se střední hodnotou.



Obr. 8.13: Změna vzájemné indukčnosti v čase bez pohybu motoru se změnou teploty z 20 °C na 70 °C (2715/478 závitů).

Z obrázku 8.14 je patrné, že jak linearita, tak opakovatelnost měření se zdá být na dobré úrovni a průběh v celém rozsahu nevykazuje žádné značné odchylky.



Obr. 8.14: Změna vzájemné indukčnosti při pohybu motoru (2715/478 závitů).

Tabulka 8.8 zachycuje průměrný rozdíl mezi kroky. Uvedené průměrné hodnoty jsou dalším důkazem, že mezi jednotlivými měřeními je relativně malý rozdíl.

Tab. 8.8: Průměrné hodnoty rozdílů mezi kroky motoru.

Měření	Průměrný rozdíl mezi kroky [μH]
1	25,015
2	25,241
3	25,394

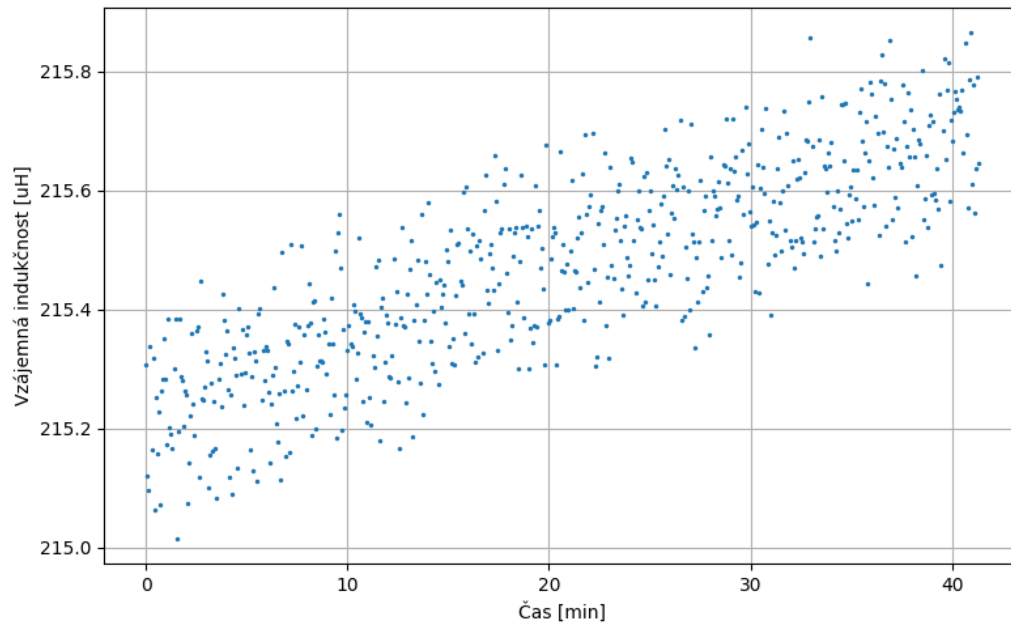
V tabulce 8.9 se pak nachází hodnoty maxim a minim pro měření bez pohybu motoru a jejich rozdíly. Je zde také uvedena průměrná změna mezi jednotlivými kroky motoru. Z naměřených dat s touto variantou cívek lze říci, že bez změny teploty je možné rozpoznat změnu již o dva kroky. Toto lze prohlásit díky vysoké linearitě naměřených dat z grafu 8.14. Se změnou teploty dochází k výraznější změně měřené veličiny, kdy při zahřátí na 70 °C dojde k takové změně vzájemné indukčnosti, která odpovídá skoro 17 krokům.

Tab. 8.9: Porovnání změn statických a dynamických měření.

Min 20 °C [mH]	22,236
Max 20 °C [mH]	22,281
Rozdíl 20 °C [uH]	45
Min 70 °C [mH]	21,852
Max 70 °C [mH]	22,274
Rozdíl 70 °C [uH]	422
Prům. změna mezi kroky [uH]	25

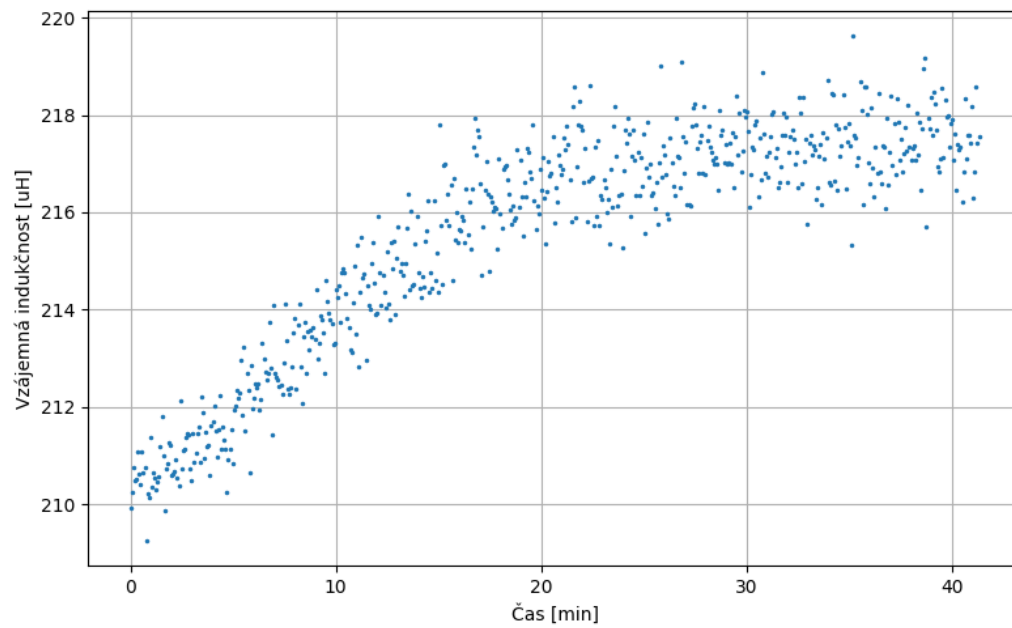
8.2.2 Měření dvojice cívek - primární 100 závitů, sekundární 100 závitů

Pro tuto kombinaci byl zvolen normálový rezistor o hodnotě 100Ω . Na obrázku 8.15 se nachází rozptyl měřených hodnot bez pohybu motoru. Během měřeného času dosáhl rozptyl hodnot v desetinách procenta v poměru k průměrné hodnotě měření.



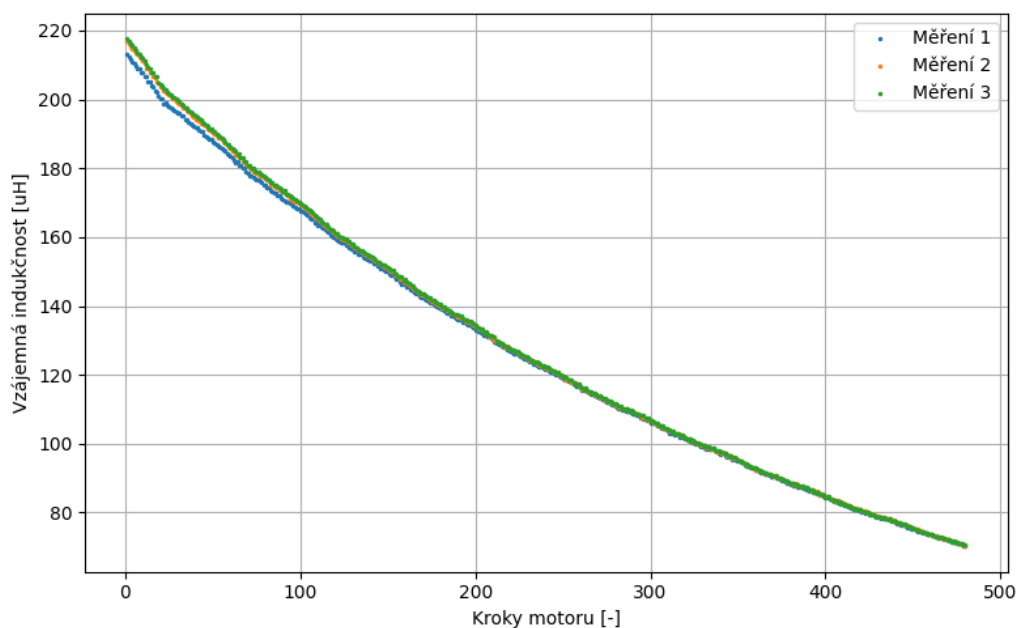
Obr. 8.15: Změna vzájemné indukčnosti v čase bez pohybu motoru (100/100 závitů).

Z grafu se změnou teploty (obrázek 8.16) je opět patrná větší změna vzájemné indukčnosti. Změna dosahuje jednotek procent z průměrné hodnoty měření.



Obr. 8.16: Změna vzájemné indukčnosti v čase bez pohybu motoru se změnou teploty z 20 °C na 70 °C (100/100 závitů).

Opakované měření s pohybem motoru se nachází na obrázku 8.17. Je zde zjevná horší linearita průběhu. Největší odchylka mezi jednotlivými měřeními se nachází v první pětině grafu, tedy v pozici, kdy se hřídel nachází z největší části mezi cívkami.



Obr. 8.17: Změna vzájemné indukčnosti při pohybu motoru (100/100 závitů).

Průměrný rozdíl v zájemné indukčnosti pro všechny tři opakování se nachází v tabulce 8.10. Změny dosahují opravdu nízkých hodnot ve stovkách nanohenry. Projevila se zde i odchylka prvního měření, která je z grafu 8.17 patrná.

Tab. 8.10: Průměrné hodnoty rozdílů mezi kroky motoru.

Měření	Průměrný rozdíl mezi kroky [uH]
1	0,298
2	0,306
3	0,307

V poslední tabulce 8.11 jsou pro porovnání základní statistické hodnoty z jednotlivých měření. Z dat lze říci, že pro tuto variantu lze bez změny teploty rozpoznat každý třetí krok, zatímco změna teploty způsobí posun hodnoty odpovídající přibližně 34 krokům. Tato chyba je již opravdu velká a lze říci, že tato varianta cívek není vhodná pro tuto metodu s nastavenými parametry.

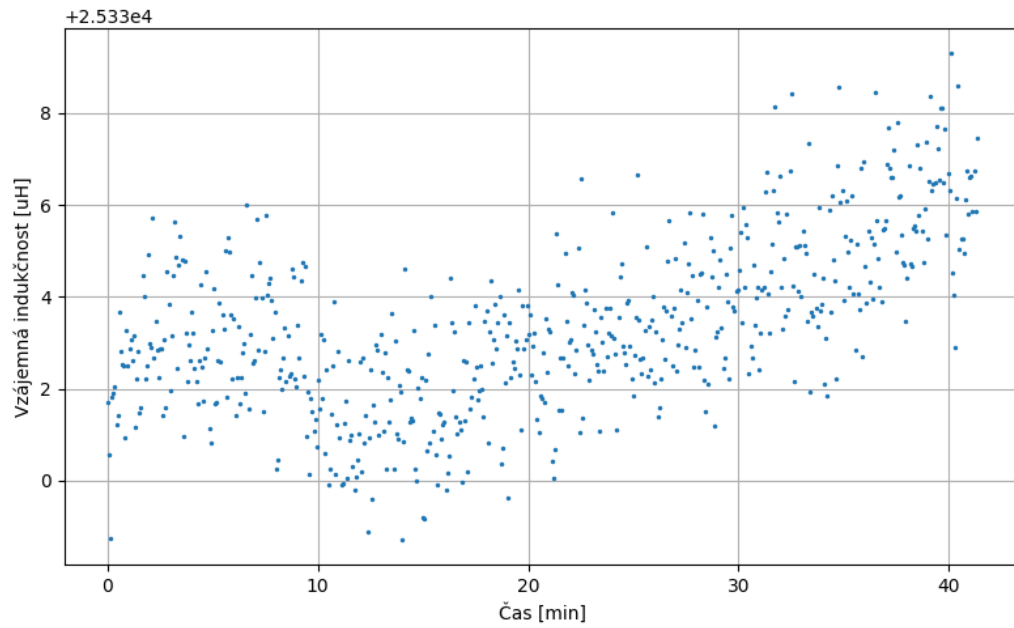
Tab. 8.11: Porovnání změn statických a dynamických měření.

Min 20 °C [uH]	215,015
Max 20 °C [uH]	215,865
Rozdíl 20 °C [uH]	0,850
Min 70 °C [uH]	209,267
Max 70 °C [uH]	219,628
Rozdíl 70 °C [uH]	10,361
Prům. změna mezi kroky [uH]	0,304

8.2.3 Měření dvojice cívek - primární 1000 závitů, sekundární 1000 závitů

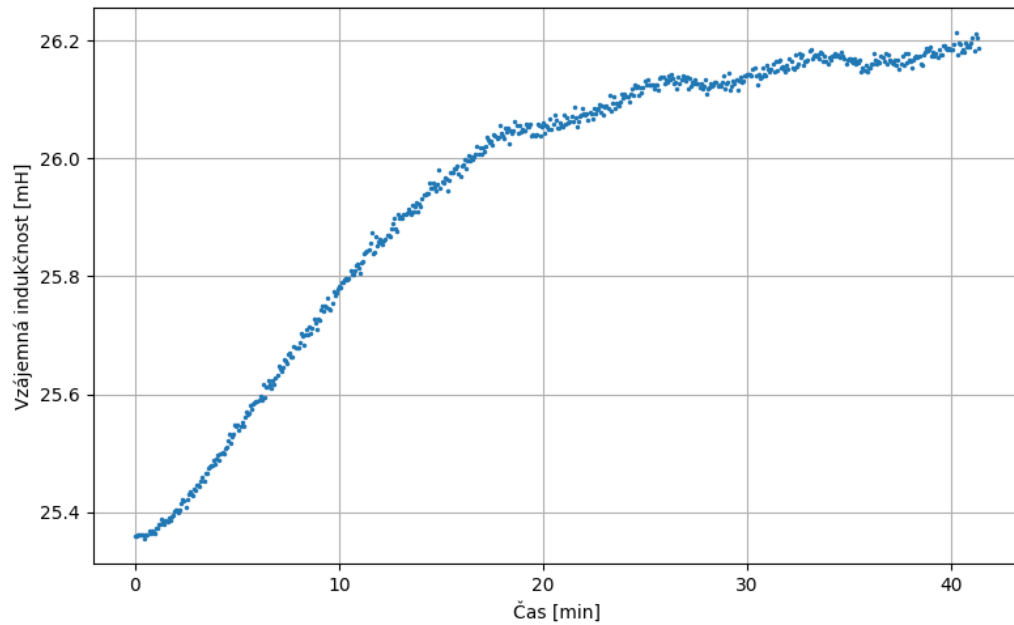
Při volbě normálového rezistoru bylo vyzkoušeno vícero variant. Díky výrazně vyššímu počtu závitů na obou cívkách byla amplituda měřeného signálu bez obrácení polarity výrazně nižší, než při obrácené polaritě. Bylo nezbytné najít takový rezistor, aby první zapojení mělo co nejvyšší amplitudu, ale aby při otočení polarity cívky nedošlo k překročení bezpečného napětí na vstupu AD převodníku. Při hodnotě normálového rezistoru R78 1500 Ω (viz. schéma na obrázku 5.5) měl měřený signál v prvním případě amplitudu okolo 0,25 násobku generovaného, zatímco při obrácení polarity byla amplituda téměř shodná s generovanou. Proto zůstala hodnota hodnota 1500 Ω ponechána.

Rozptyl hodnot při měření bez pohybu motoru při pokojové teplotě byl velice nízký. Průběh je znázorněn na obrázku 8.18. Při porovnání s průměrnou hodnotou dosahoval rozptyl pouze setin procenta.



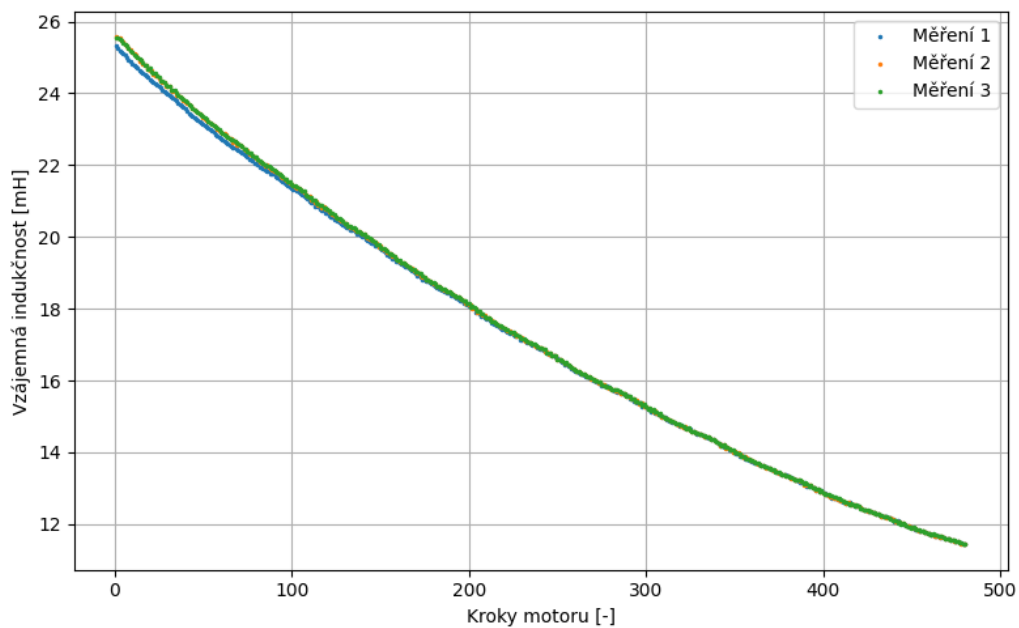
Obr. 8.18: Změna vzájemné indukčnosti v čase bez pohybu motoru (1000/1000 závitů).

Stejný test jen s rostoucí teplotou se nachází na obrázku 8.19. Tato chyba dosahuje opět jednotek procent vůči průměrné změřené hodnotě. Oproti stejným měřením s jinými počty závitů je zde zřejmý mnohem menší rozptyl jednotlivých hodnot.



Obr. 8.19: Změna vzájemné indukčnosti v čase bez pohybu motoru se změnou teploty z 20 °C na 70 °C (1000/1000 závitů).

Opakovatelnost je opět velmi dobrá s mírnou odchylkou prvního měření. Linearita je mírně horší, než v případě rozdílých cívek. Znázorněno na obrázku 8.20



Obr. 8.20: Změna vzájemné indukčnosti při pohybu motoru (1000/1000 závitů).

V tabulce 8.12 jsou uvedeny průměrné rozdíly mezi kroky motoru pro jednotlivá měření. Největší odchylku tvoří první měření, zbylá dvě se téměř shodují, což je zjevné i z grafu 8.20.

Tab. 8.12: Průměrné hodnoty rozdílů mezi kroky motoru.

Měření	Průměrný rozdíl mezi kroky [uH]
1	28,993
2	29,508
3	29,461

Jak již bylo zmíněno výše, odchylka mezi měřeními při pokojové teplotě je velmi nízká. To má za následek možnost spolehlivě rozpoznat každý jednotlivý krok. Se změnou teploty je rozdíl v měřené hodnotě značný a odpovídá posunu přibližně o 30 kroků motoru. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 8.13.

Tab. 8.13: Porovnání změn statických a dynamických měření.

Min 20 °C [mH]	25,329
Max 20 °C [mH]	25,339
Rozdíl 20 °C [uH]	10,611
Min 70 °C [mH]	25,355
Max 70 °C [mH]	26,213
Rozdíl 70 °C [uH]	857,624
Prům. změna mezi kroky [uH]	29,320

8.2.4 Vyhodnocení

Poměr závitů cívek 1:1 se opět zdá být vhodný pro použití s touto metodou. Pravděpodobně by bylo možné najít poměr cívek s lepšími vlastnostmi, to by však vyžadovalo výrazně více měření.

Změna vzájemné indukčnosti s teplotou byla poměrně vůči průměrné hodnotě měření velmi podobná pro cívky s poměrem 1:1. Zbývající cívka měla závislost vůči průměrné metodě zhruba poloviční. Pravděpodobným zdrojem zmenšení této odchylky je již zmíněný rozdílný poměr mezi počty závitů. Co se týče stability měřené hodnoty bez pohybu motoru, tak ze všech měření bylo zdaleka nejstabilnější to s použitím cívek s 1000 závity. Díky tomuto byla i pro tuto metodu zvolena zmíněná varianta. Linearita po celém průběhu je také na dobré úrovni. Rozpoznatelné kroky pro jednotlivé cívky se nachází v tabulce 8.14.

Tab. 8.14: Porovnání rozpoznatelnosti kroků pro jednotlivé varianty cívek - metoda vzájemné indukčnosti.

Počet závitů	Rozpoznatelnost kroků (20 °C)	Rozpoznatelnost kroků (20 °C až 70 °C)
2715/478	2	17
100/100	3	34
1000/1000	1	30

I pro tuto metodu by bylo vhodné otestovat ještě jednu sadu cívek s větším počtem závitů a pozorovat toto zvýšení na vliv linearity. Je však možné, že by mezi amplitudami při otočení polaroty cívky byl takový rozdíl, že by to zhoršilo další měřené parametry.

8.3 Výběr metody

Obě měřící metody nabízí výhody i nevýhody. Transformační metoda vyžaduje jednodušší obvodové zapojení cívek a ve všech případech vykazovala menší teplotní závislost. Na druhou stranu rozptyl měření bez pohybu při pokojové teplotě byl u všech variant cívek relativně velký. Navíc je pro měření nezbytný proudový zdroj a vyšší napájecí napětí pro operační zesilovače.

Naopak metoda vzájemné indukčnosti vyžaduje složitější zapojení cívek kvůli potřebě měnit polaritu jedné z nich. Pro zbytek obvodu je však možné použít pouze jeden operační zesilovač. Na navržené desce je operační zesilovač napájen ze zdroje ± 15 V. Mělo by však být možné snížit toto napětí a tím snížit cenu. Pro metodu je nezbytné pečlivěji volit počet závitů, ale při správné volbě dochází k minimálnímu rozptylu měřených hodnot bez pohybu motoru. Ke minimalizaci rozptylu napomáhá i fakt, že se jedná o rozdílové měření, tudíž jsou některé vnější vlivy částečně odečteny. Vliv teploty je u této metody větší. Díky dobré opakovatelnosti by však mělo být možné kompenzovat tuto chybu programově s využitím znalosti okolní teploty. S chybou bez změny teploty toto nelze, protože se zdá být nahodilá. Z grafů je také patrné, že naměřená data vykazují mírně lepší linearitu.

Pro obě metody se z vybraných variant cívek ukázala varianta 1000/1000 závitů jako nejlepší. Rozpoznatelnost kroků bez i s pohybem teploty pro obě metody zachycuje tabulka 8.15. Jak již bylo zmíněno, posun měřené hodnoty s teplotou je výrazně větší u metody vzájemné indukčnosti. Kvůli výborné stabilitě měřené veličiny bez změny teploty však byla vybrána tato metoda.

Tab. 8.15: Porovnání rozpoznatelnosti kroků pro nejlepší výsledek z obou metod.

Metoda	Rozpoznatelnost kroků (20 °C)	Rozpoznatelnost kroků (20 °C až 70 °C)
Tr. poměr	3	11
Vz. indukčnost	1	30

9 Úprava měřícího programu

V této kapitole je popsáno, jakým způsobem musel být upraven testovací program pro mikrokontroler pro výsledné zařízení metodou vzájemné indukčnosti. Testovací program pro mikrokontroler pouze měřil reálnou a imaginární složku signálu, z čehož následně počítal fázi a amplitudu. Funkce přepínání cívek a výpočet indukčnosti byly prováděny pomocí testovacího skriptu, napsaném v jazyce python. Všechny tyto funkcionality byly implementovány do programu zařízení.

Díky už tak vysokému vytižení nesměl být implementován žádný kód, který by zdlouhavě čekal a neumožnil by vykonávání jiných instrukcí. Z tohoto důvodu jsou funkce psány tak, aby se vždy provedla pouze část a další až při příštím průběhu.

Jako první byl implementován celý cyklus měření. Kvůli použití relé nebylo využito neustálého měření, jako v ostatních částech programu (ač generování signálu běží dál). Proto dochází k měření pouze při požadavku o pohyb motoru. Hodnoty jako amplituda, fáze, reálná a imaginární složka signálu jsou měřeny neustále a tudíž neustále dostupné. Po požadavku o posun motoru skrze Modbus zprávu začne měření. Měření je provedeno vždy pětkrát (je možné zvolit počet měření) a z těchto hodnot je spočítán medián. Dojde k otočení polaritu cívky a znovu je změřeno pět hodnot. Následuje posun motoru a proces měření je zopakován. Tímto jsou získány hodnoty vzájemné indukčnosti před a po pohybu motoru.

Měřené hodnoty jsou následně porovnány s kalibračními daty a podle nich je určeno o jaký počet kroků se motor posunul. Kalibraci je možné spustit také pomocí Modbus zprávy. Po požadavku o kalibraci (je možné zvolit počet kalibračních bodů, i počet kroků motoru mezi nimi - výchozí stav je 10 měřících bodů po 48 krocích) dojde ke změření absolutních hodnot vzájemné indukčnosti v jednotlivých bodech (motor se otočí o 48 kroků, dojde ke změření - celý cyklus desetkrát). Data jsou uložena a vždy mezi dvěma body je spočítána změna na jeden krok. Při požadavku na posun motoru jsou jednotlivé kroky ověřovány pomocí těchto dat.

Tímto způsobem je měřená křivka rozdělena do několika úseků a ty jsou následně aproximovány přímkou (podle počtu měřících bodů). Algoritmus byl implementován kvůli nelinearitě průběhu na celém rozsahu pohybu motoru. Metoda vzájemné indukčnosti s touto variantou cívek již vykazovala velmi dobrou opakovatelnost, díky vícero měřením a počítáním mediánu je ale dosaženo dalšího zpřesnění, protože dojde k eliminaci okrajových hodnot.

Do programu byly přidány další Modbus registry umožňující spuštění kalibrace, vyčtení změřené hodnoty před i po pohybu motoru a změřený počet kroků. Konkrétní registry a jejich parametry jsou uvedeny v tabulce 9.1.

Tab. 9.1: Přidané Modbus registry ve výsledném zařízení.

Adresa registru	Počet registrů	Datový typ	Funkce	Popis
0x0618	2	float	Čtení	Měření před pohybem motoru
0x0620	2	float	Čtení	Měření po pohybu motoru
0x0624	1	uint8	Zápis	Spuštění kalibrace
0x0622	1	uint16	Čtení	Změřené kroky

Kvůli zohlednění normy EN 60730-2-5 byly ve výsledném programu využity některé techniky pro větší bezpečnost vykonávání programu. Jedná se konkrétně:

- Kontrolu integrity FLASH paměti.
- Zabezpečení vnější komunikace pomocí kontrolního součtu.
- Redundance některých dat.
- Statická analýza kódu podle pravidel MISRA-C:2004.
- Nevyužití dynamické alokace paměti.

Kontrola paměti FLASH je probíhá tak, že s každým průběhem smyčky hlavního programu je spočítán kontrolní součet části paměti FLASH. Po dosažení konce je výsledek porovnán s kontrolním součtem předchozího běhu. Kontrolní součet je počítán i při komunikaci Modbus, jak při příjmu, tak při odesílání nad celým rámcem zprávy. Dále jsou některé proměnné drženy v paměti třikrát a jejich shodnost je kontrolována před použitím. Vždy se musí shodovat alespoň dvě ze tří. U využití MISRA pravidel a nepoužití dynamické alokace paměti se pak jedná o kontrolu při psaní programu, samotné zařízení tedy nijak kontrolu neprovádí.

Závěr

Na začátku této práce byl popsán samotný plynový ventil, jeho možné varianty a jak je ovládána škrtkící klapka. Následoval výčet možností pro snímání polohy škrtkící klapky. Byly popsány komunikační protokoly, které lze využít při komunikaci s hotovým zařízením. V závěru teoretické části byly rozebrány metody, jimiž je možné měřit vzájemné vlastnosti cívek.

Cílem praktické části bylo navrhnout zařízení, které pomocí dvou cívek navinutých okolo hřídele krokového motoru řídícího škrtkící klapku snímá její pozici. Byl zde představen celkový koncept navrženého zařízení se zjednodušeným blokovým schématem. Následoval rozbor jednotlivých bloků schématu včetně kapitoly o implementaci normy EN 60730-2-5. Následně byla zobrazena navržená DPS.

Následoval popis programu pro mikrokontroler, který sloužil pro měření transformační metody a metody vzájemné indukčnosti. V kapitole byl nastíněn způsob implementace měření obou metod a výpočtu hodnot. Program umožňoval komunikaci pomocí Modbus, díky čemuž bylo možné řídit frekvenci signálu, měřící metodu a pohyb motoru. Dále bylo možné vyčíst důležité parametry jako amplitudu, fázi, reálnou a imaginární hodnotu měřeného signálu. Při ožívování zařízení došlo k úpravám jak z hlediska programu, tak DPS. Díky tomu bylo možné dosáhnout frekvence generovaného signálu 1,5 KHz. Dále došlo k nahrazení dvou rezistorů potenciometry, kvůli možnosti upravit signál pro jednotlivé varianty cívek. Proběhl test obou metod s nahrazením měřených cívek rezistory. Došlo ke zjištění fázového posunu obvodu bez cívek a ke kalibraci metody vzájemné indukčnosti.

Proběhl rozsáhlý test obou metod pro varianty 2715/478 závitů, 100/100 závitů a 1000/1000 závitů. Počty závitů byly voleny tak, aby test obsahoval varianty s malým počtem závitů, s velkým počtem závitů a rozdílným počtem závitů. Předpoklad byl takový, že cívky s výrazným rozdílem poměru počtu závitů nebudou vhodné, ať už kvůli obvodovému řešení, tak z literatury (pro měření vzájemné indukčnosti). Pro každou variantu byly provedeny tři testy. Jeden bez pohybu motoru a změny teploty, druhý bez pohybu motoru a se změnou teploty a třetí s opakovaným pohybem motoru. Tyto testy proběhly jak pro transformační metodu, tak pro metodu vzájemné indukčnosti. Pro všechny varianty cívek byly spočítány rozdíly mezi kroky a změny bez i s rostoucí teplotou.

Transformační metoda vykazovala relativně velké odchylky bez změny teploty. Pro tuto metodu nejlépe dopadla cívka s počtem závitů 1000/1000. Velký vliv mělo to, že jediná tato varianta mohla využít celého rozsahu AD převodníku. Varianta 100/100 vyžadovala vyšší napájecí napětí, stejně jako varianta 2715/478 (kvůli nízkému počtu závitů na sekundární cívce). Pro cívky s počtem závitů 1000/1000 bylo možné bez pohybu motoru a změny teploty rozpoznat každý třetí krok.

U metody vzájemné indukčnosti došlo ke zlepšení rozpoznatelnosti kroků bez změny teploty. To bylo patrné i při rostoucí teplotě, kde průběh vytvořil křivku bez značných odchylek od střední hodnoty. To je patrné hlavně u cívek se závitů 1000/1000, kde se měřená veličina nemění ani o hodnotu odpovídající jednomu kroku. Metoda však vykazovala větší změnu s růstem teploty oproti transformační metodě. Díky výborné statické opakovatelnosti bez změny teploty byla opět vybrána varianta s 1000/1000 závitů.

Jako lepší metoda pro požadovaný účel byla zvolena metoda vzájemné indukčnosti, která ač vyžaduje změnu polaritu jedné z cívek, tak má výrazně lepší možnost rozpoznat jednotlivé kroky bez změny teploty. Tuto změnu by totiž bylo obtížné kompenzovat, narozdíl oproti změně s rostoucí teplotou, kdy pomocí měření teploty (většina STM32 obsahuje senzor teploty) lze násobit změřenou hodnotu koeficientem pro úpravu. Až na změnu polaritu cívky navíc metoda vyžaduje jednodušší obvodové zapojení a nic by nemělo bránit ani snížení napětí napájecího zdroje, který pro všechna měření byl ± 15 V.

Ve finále byl program pro mikrokontrolér upraven pro využití měření vzájemné indukčnosti. Veškeré výpočty, které byly při testování metod prováděny byly implementovány do mikrokontroleru. Program po požadavku na kalibraci změní průběh na požadovaném rozsahu, uloží si deset hodnot, spočítá rozdíly mezi kroky mezi těmito hodnotami a uloží si je. Před každým pohybem motoru dojde ke změření vzájemné indukčnosti, posunu motoru a opětovnému změření. Podle změřené hodnoty dojde k výběru intervalu a jsou spočítány kroky, které se provedly. Každé měření navíc probíhá pětkrát a je vybrána mediánová hodnota.

Kapitola také popisuje, jakým způsobem byla zohledněna norma EN 60730-2-5. Samotná norma obsahuje velmi striktní kritéria pro její splnění. Zařízení v aktuální formě není připraveno pro její splnění, některé techniky však byly implementovány. Komunikace Modbus je zabezpečena kontrolním součtem, nepoužívá se dynamická alokace paměti, paměť Flash je zabezpečena kontrolním součtem a některá důležitá data jsou uložena v paměti vícekrát s tím, že před použitím se musí většina z nich shodovat a běh programu je kontrolován Watchdog časovačem.

Výsledkem práce je prototyp zařízení, které umožňuje ověřit posuv motoru pomocí metody vzájemné indukčnosti. Před skutečným použitím zařízení bude nezbytné provést ještě další důkladná měření a připravit kompenzaci teploty. Deska bude muset být předělána, čímž dojde ke zmenšení a zjednodušení. Relé pro přepínání polaritu cívky by bylo vhodné nahradit přepínacím prvem s větší životností. Stejná měření lze doporučit provést ještě pro jednu variantu s větším počtem závitů, což by mohlo následně zlepšit některé měřené vlastnosti.

Literatura

- [1] Product: pX42. Online. In: Resideo. 2024. Dostupné z: https://homecomfort.resideo.com/sites/oem/en-gb/Solutions/Residential_Heating/Pages/HighEfficiencyBoilers.aspx?Solution=High+Efficiency+Boilers. [cit. 2024-01-04].
- [2] Advantages of a two stage gas valve. Online. Accuservheating. 2019. Dostupné z: <https://accuservheating.com/blog/advantages-of-a-two-stage-gas-valve/>. [cit. 2024-01-04].
- [3] Modulating Valve - How They Work. Online. Accuservheating. 2019. Dostupné z: <https://tameson.com/pages/modulating-valve>. [cit. 2024-01-04].
- [4] TMC2209. Analog [online]. 2023 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/TMC2209_datasheet_rev1.09.pdf
- [5] Back-EMF Motion Feedback. Acroname [online]. 1994 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: <https://acroname.com/articles/back-emf-motion-feedback>
- [6] Different Types of Encoder Motors and their Working. Online. Components101. 2021. Dostupné z: <https://components101.com/articles/different-types-of-encoder-motors-and-their-working>. [cit. 2024-01-04].
- [7] Rotary Encoders: When to Use Absolute vs Incremental Rotary Encoders. Online. Arrow. 2018. Dostupné z: <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/when-is-an-absolute-encoder-right-for-your-design>. [cit. 2024-01-04].
- [8] Optical Encoder Basics. Online. Quantum Devices. 2023. Dostupné z: <https://www.quantumdev.com/resource-library/optical-encoder-basics-what-is-an-optical-encoder/>. [cit. 2024-01-04].
- [9] Gray code. Online. Wikipedie. 2023. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Gray_code. [cit. 2024-01-04].
- [10] What are capacitive encoders and where are they suitable? Motion Control Tips [online]. 2015 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: <https://www.motioncontroltips.com/faq-what-are-capacitive-encoders-and-where-are-they-suitable/>

- [11] Incremental Encoder. Online. Sciencedirect. 2018. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/incremental-encoder>. [cit. 2024-01-04].
- [12] AS5600. Mouser [online]. 2014 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: https://www.mouser.com/datasheet/2/588/AS5600_UG000254_2_00-1877354.pdf
- [13] Feedback Linear Actuators: Popular Uses and Applications. Progressive Automations [online]. 2021 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: <https://www.progressiveautomations.com/blogs/products/feedback-actuator-uses-applications>
- [14] Don't Buy a Feedback Linear Actuator Until You Read This. AFFIRGELI Automations [online]. 2018 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: <https://www.firgelliauto.com/blogs/news/don-t-buy-a-feedback-linear-actuator-until-you-read-these-important-tips>
- [15] TSINY Linear Actuator Motor with Potentiometer Feedback 12vdc Stroke 50mm 2inch 750n. Amazon [online]. 1996 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: <https://www.amazon.com/Linear-Actuator-Potentiometer-Feedback-Stroke/dp/B0000G2C34>
- [16] Linear Variable Differential Transformer. TE connectivity [online]. 2023 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: <https://www.te.com/usa-en/products/sensors/position-sensors/resources/lvdt-tutorial.html>
- [17] LVDT Advantages And Disadvantages. AplusTopper [online]. 2022 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: <https://www.aplustopper.com/lvdt-advantages-and-disadvantages/>
- [18] Modbus. Wikipedie [online]. 2024 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Modbus>
- [19] Modbus Application Protocol. Modbus [online]. 2012 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: https://modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b3.pdf
- [20] Řízení teplovzdušného vytápění průmyslové haly pomocí protokolu Modbus. ČVUT [online]. 2020 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/90109/F3-DP-2020-Turicky-David-Rizeni%20teplovzdusneho%20vytapani%20prumyslove%20haly%20pomoci%20protokolu%20Modbus.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>

- [21] Popis protokolu Modbus I. MCU [online]. 2008 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: <http://mcu.cz/news.php?extend.1104>
- [22] Local Interconnect Network. Wikipedie [online]. 2023 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Local_Interconnect_Network
- [23] CSS Electronics. Wikipedie [online]. 2023 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: <https://www.csselectronics.com/pages/lin-bus-protocol-intro-basics#lin-description-file>
- [24] LIN Protocol and Physical Layer Requirements. Texas Instruments [online]. 2022 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/s11a383a/s11a383a.pdf?ts=1703793555979>
- [25] Transformer. Wikipedie [online]. 2023 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Transformer>
- [26] Mutual Inductance. Electronics tutorials [online]. 2020 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: <https://www.electronics-tutorials.ws/inductor/mutual-inductance.html>
- [27] Měření vzájemné indukčnosti. Hradební [online]. 2013 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: https://vyuka.hradebni.cz/file.php/65/Mereni_impedanci/Prezentace_-_Mereni_vzajemne_indukcnosti.pdf
- [28] STM32L073x8 STM32L073xB STM32L073xZ. STMicroelectronics [online]. 2022 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l073v8.pdf>
- [29] STM32F446xC/E. STMicroelectronics [online]. 2021 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f446re.pdf>
- [30] MATOUŠEK, David a Bohumil BRTNÍK. Aplikace algoritmů číslicového zpracování signálů. Praha: BEN - technická literatura, 2014. ISBN 978-80-7300-478-1.
- [31] SMBJ5V0(C)A - SMBJ170(C)A. Mouser [online]. 2002 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/308/SMBJ26A-1301666.pdf>
- [32] IU Series. XPPower [online]. 2021 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: https://www.xppower.com/portals/0/pdfs/SF_IU.pdf
- [33] R-78E-0.5. Recom Power [online]. 2021 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: <https://recom-power.com/pdf/Innoline/R-78E-0.5.pdf>

- [34] LD1117. Mouser [online]. 2020 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/389/ld1117-1849389.pdf>
- [35] LD79. STMicroelectronics [online]. 2019 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/179.pdf>
- [36] LD78. STMicroelectronics [online]. 2018 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/178.pdf>
- [37] TPS6040x. Texas Instruments [online]. 2020 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps60402.pdf?ts=1703897723192>
- [38] ADS1259-Q1. Texas Instruments [online]. 2014 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1259-q1.pdf?HQS=dis-mous-null-mouser-mode-dsf-pf-null-wwe&ts=1703987355040&ref_url=https%253A%252F%252Fcz.mouser.com%252F
- [39] 16-Bit, Ultra-Low Power, Voltage-Output Digital-to-Analog Converters. Texas Instruments [online]. 2005 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/dac8830.pdf?ts=1703934787036&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [40] NUD3160, SZNUD3160. ONSEMI [online]. 2022 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/nud3160-d.pdf>
- [41] HANDBOOK OF OPERATIONAL AMPLIFIER APPLICATIONS. Texas Instruments [online]. 2016 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/an/sboa092b/sboa092b.pdf?ts=1704044583654&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [42] Op-Amp complex impedance. Stack Exchange [online]. 2022 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: <https://electronics.stackexchange.com/questions/622388/op-amp-complex-impedance>
- [43] Howland Current Source. Circuit Cellar [online]. 2021 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: <https://circuitcellar.com/resources/quickbits/howland-current-source/>
- [44] ULN2002A, ULN2003A, ULN2004A. Diodes Incorporated [online]. 2023 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/ULN200xA.pdf>
- [45] MAX481E/MAX483E/MAX485E/ MAX487E–MAX491E/MAX1487E. Maxim Integrated [online]. 2003 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/products/diagnostic/481-491/481-491-datasheet.pdf>

- [//www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/max1487e-max491e.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/max1487e-max491e.pdf)
- [46] TLIN2029-Q1. Texas Instruments [online]. 2017 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/sllsey6f/sllsey6f.pdf?ts=1704039999711&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [47] EN 60730-2-5. Automatic electrical controls for household and similar use - Part 2-5: Particular requirements for automatic electrical burner control systems [online]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2013 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: <https://csnonlinefirmy.agentura-cas.cz/Vysledky.aspx>
- [48] MISRA-C:2004. Caxapa [online]. 2004 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: <https://caxapa.ru/thumbs/468328/misra-c-2004.pdf>
- [49] STM32Cube initialization code generator. STMicroelectronics [online]. 2024 [cit. 2024-01-05]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html>
- [50] Minebea PM25S-048. Farnell [online]. 2024 [cit. 2024-01-05]. Dostupné z: <https://www.farnell.com/datasheets/2343844.pdf>
- [51] Sériový RLC obvod - popis pomocí komplexních čísel. Jreichl [online]. 2006 [cit. 2024-01-05]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/317-seriovy-rlc-obvod-popis-pomoci-komplexnich-cisel>
- [52] Inductance. Wikipedie [online]. 2024 [cit. 2024-01-05]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Inductance>
- [53] How to optimize the ADC accuracy in the STM32 MCUs. STMicroelectronics [online]. 2023 [cit. 2024-01-05]. Dostupné z: https://www.st.com/resource/en/application_note/an2834-how-to-optimize-the-adc-accuracy-in-the-stm32-mcus-stmicroelectronics.pdf

Seznam symbolů a zkratek

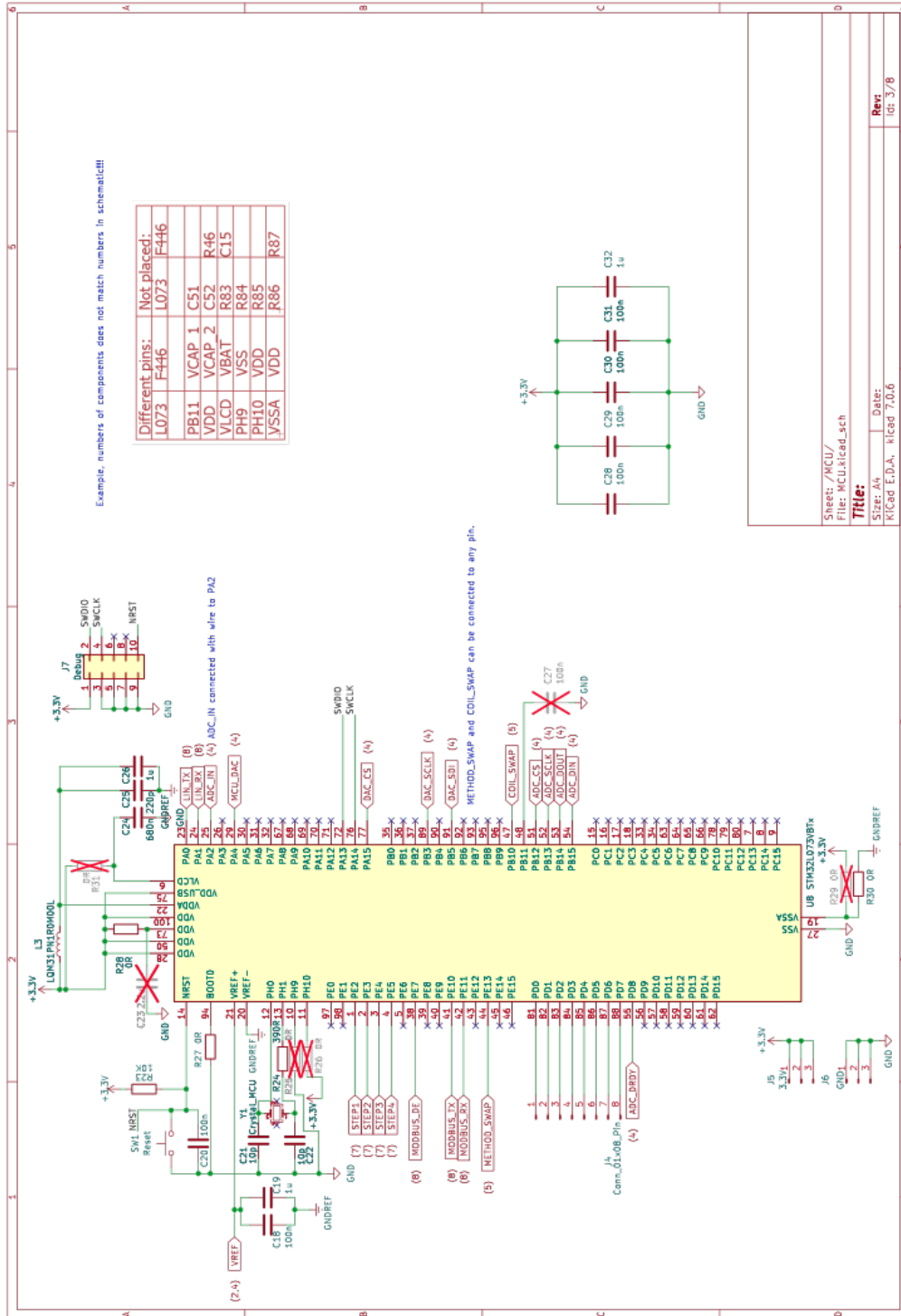
LED	Světlo emitující dioda
DPS	Deska plošných spojů
AD	Analogově-digitální
DA	Digitálně-analogový
UART	Univerzálně asynchronní přijímač a vysílač
MISRA	Asociace pro spolehlivost softwaru v automobilovém průmyslu
EMF	Elektromagnetické pole
LVDT	Lineární proměnný diferenciální transformátor
PDU	Data protokolu
ADU	Data aplikace
LIN	Místní propojovací síť
SPI	Sériové periferní rozhraní
EN	Evropská norma
HAL	Vrstva hardwarové abstrakce
LL	Nízkoúrovňové
DMA	Přímý přístup k paměti
TR	Transformační metoda

Seznam příloh

A Schémata DPS	91
A.1 Zapojení bloku napájení	92
A.2 Zapojení mikrokontroléru	93
A.3 Zapojení AD a DA převodníku	94
A.4 Zapojení měřících metod	95
A.5 Zapojení přepínání cívek	96
A.6 Zapojení ovládání motoru	97
A.7 Zapojení komunikace	98
B Program pro mikrokontroler	99

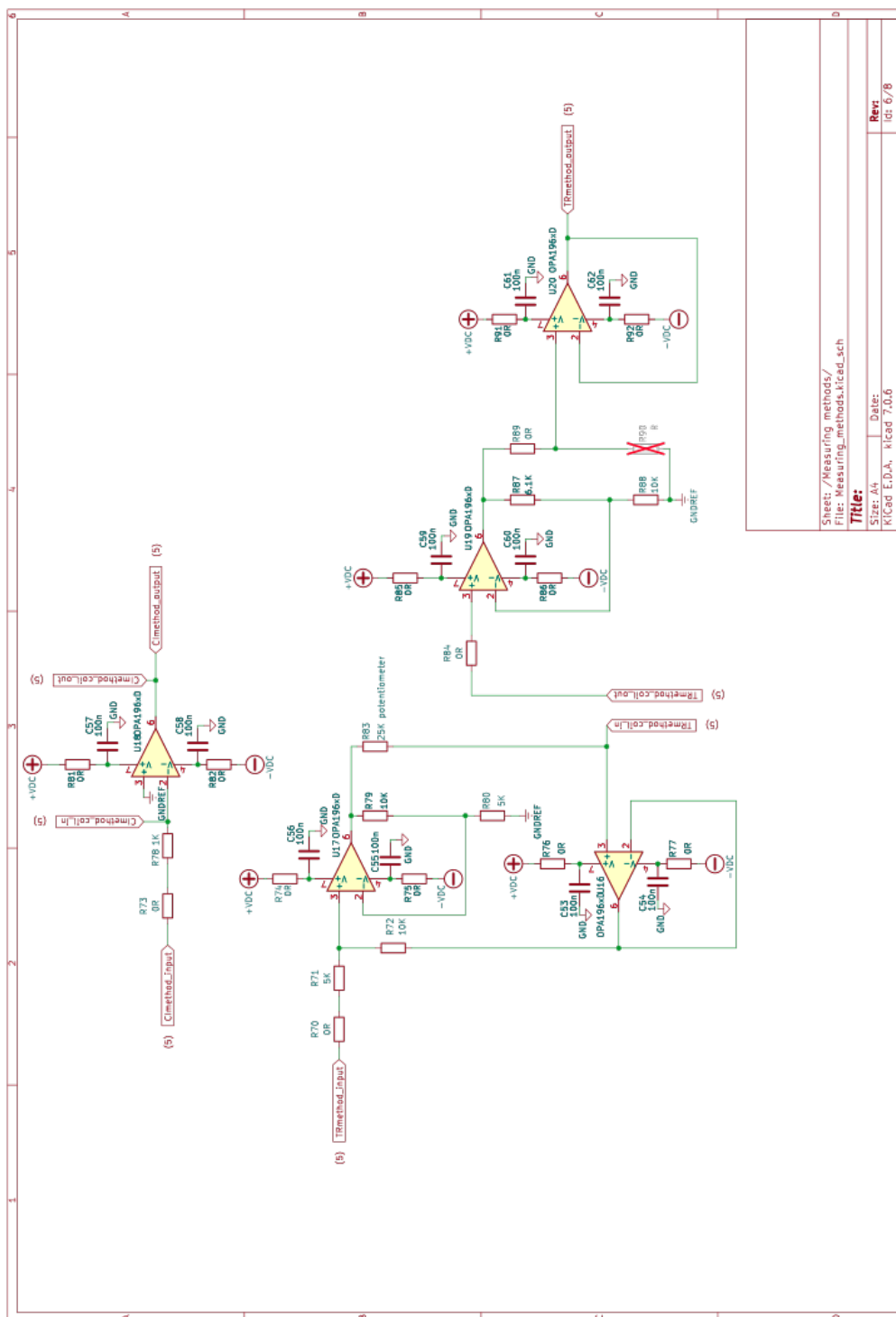
A Schémata DPS

A.2 Zapojení mikrokontroléru



Obr. A.2: Schéma zapojení mikrokontroléru.

A.4 Zapojení měřících metod



Sheet: /Measuring_methods/
 File: Measuring_methods.kicad_sch
Title:
 Size: A4 Date:
 KICad E.D.A. KICad 7.0.6
 Rev: 1 dt: 6/8

Obr. A.4: Schéma zapojení měřících metod.

B Program pro mikrokontroler

Jedná se o elektronickou přílohu přiloženou k dokumentu. Jsou přiloženy dva programy, první se kterým byly prováděny testy a druhý se zvolenou metodou.