



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

KIBBLEOVY VÁHY

KIBBLE BALANCE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Tomanec

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Jakub Tomanec

ID: 203609

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Kibbleovy váhy

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Od května 2019 platí nové definice jednotek SI. Cílem práce je navrhnout a zkonstruovat model Kibbleových vah pro demonstrační účely. Zadaní lze shrnout do následujících úkolů:

- 1) Seznamte se s problematikou redefinice SI jednotky hmotnosti, přehledně zpracujte historický vývoj vedoucí k současné realizaci etalonu
- 2) Navrhněte technické řešení modelu. Předpokládá se využití stavebnicových dílů (např. Lego, Merkur), případně u kritických dílů 3D tisk nebo profesionální konstrukční komponenty
- 3) Vyberte vhodné elektronické komponenty pro měření a řízení, diskutujte jejich volbu
- 4) Model realizujte a proměřte jeho parametry
- 5) Stanovte nejistotu měření hmotnosti a kvantifikujte hlavní zdroje nejistot
- 6) Na základě předchozího bodu navrhněte úpravy a dle možností je i realizujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

L.S.Chao et al.: A LEGO Watt balance: An apparatus to determine a mass based on the new SI. American Journal of Physics 83, 913, 2015; <https://doi.org/10.1119/1.4929898>

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 23.5.2022

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Bakalářská práce se skládá ze tří částí. V první části je vysvětlena reforma mezinárodní soustavy jednotek SI, která proběhla v roce 2018 na 26. Generální konferenci o vahách a mírách (CGPM). V druhé části je vysvětlen pojem Kibbleových vah a představeny některé z realizovaných projektů. Ve třetí části práce proběhla realizace prototypu Kibbleových vah, vyhodnocení naměřených dat a návrh budoucích úprav prototypu.

Klíčová slova

Kibbleovy váhy, Kibblovy váhy, wattové váhy, SI, váha, hmotnost, Planckova konstanta, kilogram, redefinice, Josephsonův jev, kvantový Hallův jev, definující konstanty.

Abstract

The bachelor thesis consists of three sections. The first section explains the revision of the international system of units (SI), which took place in 2018 at the 26th General Conference on Weights and Measures (CGPM). The second section explains the concept of Kibble balance and introduces some of the created projects. The third section of the work was the creation of a prototype Kibble balance, evaluation of measured data and design of future modifications of the prototype.

Keywords

Kibble balance, watt balance, SI, weight, Planck constant, kilogram, redefinition, Josephson effect, quantum Hall effect, defining constants.

Bibliografická citace

TOMANEC, Jakub. Kibbleovy váhy [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142582>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Petr Beneš

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Jakub Tomanec</i>
VUT ID studenta:	<i>203609</i>
Typ práce:	<i>Bakalářská práce</i>
Akademický rok:	<i>2021/22</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Kibbleovy váhy</i>

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 jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 20. května 2022

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za odborné vedení, pedagogickou a odbornou pomoc, za jeho zájem o aktivní komunikaci, nezměrnou trpělivost a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

Také bych chtěl poděkovat svým kolegům, jmenovitě Bc. Jakubu Charvátovi, Bc. Janu Zerzánovi a Bc. Danielu Macháčkovi, kteří mi poskytli morální oporu a cenné rady. Bc. Jakubu Charvátovi chci navíc poděkovat za zapůjčení generátoru signálu, který jsem během téhle práce využil.

V neposlední řadě děkuji své rodině za podporu a důvěru, kterou ve mně vložila.

V Brně dne: 20. května 2022

podpis autora

Obsah

.....	7
SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK	10
ÚVOD	11
1. SOUSTAVA JEDNOTEK SI	12
1.1 SEZNÁMENÍ	12
1.2 MOTIVACE PRO ZMĚNU	13
1.3 REDEFINICE SOUSTAVY	14
2. KIBBLEOVY VÁHY	17
2.1 SEZNÁMENÍ	17
2.2 TEORIE	17
2.2.1 <i>Základní princip vah</i>	17
2.2.2 <i>Kvantový Hallův jev (QHS)</i>	18
2.2.3 <i>Josephsonův jev</i>	19
2.2.4 <i>Aplikace kvantových jevů</i>	19
2.3 DRUHY KIBBLEOVÝCH VAH	20
2.3.1 <i>Konvenční Kibbleovy váhy dvou móde s dvoufázovým měřením</i>	21
2.3.2 <i>Joulovy váhy</i>	21
2.3.3 <i>Kibbleovy váhy jedno móde s jednofázovým měřením</i>	21
2.3.4 <i>Kibbleovy váhy jedno móde s dvoufázovým měřením</i>	22
2.3.5 <i>Kibbleovy váhy s pohybujícím se magnetem</i>	22
2.4 DIY KIBBLEOVY VÁHY	22
2.4.1 <i>National Institute of Standards and Technology (NIST)</i>	22
2.4.2 <i>Practical Engineering</i>	23
2.4.3 <i>National Metrology Institute of South Africa (NMISA)</i>	24
2.4.4 <i>Measurement Standard Laboratory of New Zealand (MSL)</i>	25
3. REALIZACE	26
3.1 NÁVRH	26
3.1.1 <i>Mechanická část</i>	26
3.1.2 <i>Magnetická část</i>	27
3.1.3 <i>Elektronická část</i>	27
3.1.4 <i>Softwarová část</i>	27
3.2 KONSTRUKCE	28
3.2.1 <i>Mechanické díly</i>	28
3.2.2 <i>Cívka a permanentní magnety</i>	29
3.2.3 <i>Elektronika a zpracování dat</i>	30
4. MĚŘENÍ	32
4.1 ÚVOD	32
4.1.1 <i>Popis kalibrace</i>	32
4.1.2 <i>Popis měření hmotnosti závaží</i>	33
4.2 POKUSNÉ MĚŘENÍ.....	34

4.2.1	<i>Kalibrace Vah</i>	35
4.2.2	<i>Měření rychlostního módu</i>	35
4.2.3	<i>Měření hmotnostního módu</i>	36
	ZÁVĚR	38
	ZDROJE	39

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Znázornění základních jednotek SI	12
Obrázek 2: Znázornění definujících konstant	14
Obrázek 3: Znázornění definujících konstant a základních jednotek SI	15
Obrázek 4: Rychlostní mód (levá), hmotnostní mód (pravá).....	17
Obrázek 5: Schéma zapojení Kibbleových vah pro hmotnostní mód (horní) a rychlostní mód (dolní). Voltmetr (DVM) je použit pro měření drobných rozdílů mezi PJVM a napětím na rezistoru R (horní), nebo pro měření indukovaného napětí na cívce (dolní). [10]	18
Obrázek 6: Systém permanentních magnetů s radiálním magnetickým polem užitý.....	21
Obrázek 7: fotografie LEGO Kibbleových vah od NIST [15]	23
Obrázek 8: fotografie Kibbleových vah od Practical Engineering [18].....	24
Obrázek 9: fotografie Kibbleových vah od NMISA, 3D model (levá), modifikované tradiční váhy s 3D komponenty (pravá) [16].....	24
Obrázek 10: fotografie Kibbleových vah od MSL [20]	25
Obrázek 11: Prototyp Kibbleových vah.....	28
Obrázek 12: Systém uchycení permanentních magnetů	29
Obrázek 13: Výroba cívek pro Kibbleovy váhy	29
Obrázek 14: Schéma zapojení Kibbleových vah [15].....	30
Obrázek 15: Senzor (vlevo) a laser (vpravo) pro snímání pohybu.....	30
Obrázek 16: Kalibrační laser	31
Obrázek 17: Znázornění měřených vzdáleností pro kalibraci světelného senzoru [21].....	33
Obrázek 18: Kalibrace světelného senzoru v programu od instituce NIST	35
Obrázek 19: Rychlostní mód měření v programu od NIST	36
Obrázek 20: Hmotnostní mód měření v programu od NIST.....	36

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Základní jednotky soustavy SI, včetně barevného rozlišení, dle „SI Illustration Guidelines“ [2]	12
Tabulka 2: Znění původních i nově schválených definic jednotek SI [4]	16
Tabulka 3: Srovnání naměřených hodnot hmotnosti od NMISA [16]	27
Tabulka 4: Srovnání naměřených hodnot hmotnosti závaží	37

ÚVOD

V dnešní době moderních a vysoce přesných měření je představa užití fyzického artefaktu jako etalonu definujícího SI jednotku zcela absurdní. Z toho důvodu byl v roce 2011 podán návrh na změnu definice jednotek SI; návrh byl následně schválen v roce 2018 na 26. zasedání Generální konference pro míry a váhy CGPM. Samotná redefinice soustavy jednotek SI vstoupila v platnost dne 20. května 2019. Jednou z největších provedených změn je nová definice hmotnosti, která může být realizována pomocí Kibbleových vah.

Cílem této práce je seznámení se s problematikou redefinice SI jednotek, celkovou změnou filozofie jejich definice a jejich současnou podobou. Dále se v práci seznámíme s pojmem Kibbleových vah, jakožto současnou realizací etalonu SI jednotky hmotnosti, a vysvětlíme si jejich princip. Nakonec se pokusíme vytvořit prototyp Kibbleových vah.

Práce se skládá ze čtyř hlavních kapitol. První kapitola je zaměřena na seznámení se s SI jednotkami a vysvětlení jejich změn. Druhá kapitola je zasvěcena vysvětlení funkce Kibbleových vah a seznámení s realizovanými příklady vah. Třetí kapitola obsahuje samotnou realizaci prototypu Kibbleových vah, který je založen na již dříve realizovaných experimentech. Čtvrtá kapitola se zabývá měřením Kibbleových vah, vysvětlení jednotlivých částí měření, příkladem reálného měření a vyhodnocením naměřených hodnot. V závěru je pak zhodnocen výsledek práce a jsou navrženy možné budoucí úpravy Kibbleových vah.

1. SOUSTAVA JEDNOTEK SI

1.1 Seznámení

Mezinárodní soustava jednotek SI je mezinárodně smluvená soustava jednotek fyzikálních veličin a konstant, byla zřízena v roce 1960 na sjezdu CGPM a od té doby se postupně vyvíjela. Soustava SI má využití ve všech aspektech každodenního života.

Do základní soustavy jednotek spadá: kilogram (kg), metr (m), sekunda (s), ampér (A), kelvin (K), mol (mol) a kandela (cd). To jsou příslušně jednotky hmotnosti, délky, času, elektrického proudu, termodynamické teploty, látkového množství a svítivosti. Všechny ostatní jednotky jsou od nich odvozeny. I když není výběr těchto základních jednotek unikátní, jsou to známé základní jednotky, které se nezměnily od jejich zahrnutí v roce 1960 pro zřízení SI, kromě přidání molu v roce 1971. [1]

Tabulka 1: Základní jednotky soustavy SI, včetně barevného rozlišení, dle „SI Illustration Guidelines“ [2]

Fyzikální veličina	Značka veličiny	Jednotka	Značka
Hmotnost	m	kilogram	kg
Délka	l	metr	m
Čas	t	sekunda	s
Elektrický proud	I	ampér	A
Termodynamická teplota	T	kelvin	K
Látkové množství	n	mol	mol
Svítivost	I _v	kandela	cd

Jak je uvedeno v 9. vydání „*The International System of Units (SI)*“ [3], představuje definice jednotek soustavy SI nejvyšší úroveň svázanosti měření k SI. Metrologické ústavy se zabývají praktickou realizací těchto definic. Původně byla soustava SI závislá na základních jednotkách, po redefinici v roce 2019 jsou jednotky definovány sedmi definujícími fyzikálními konstantami.



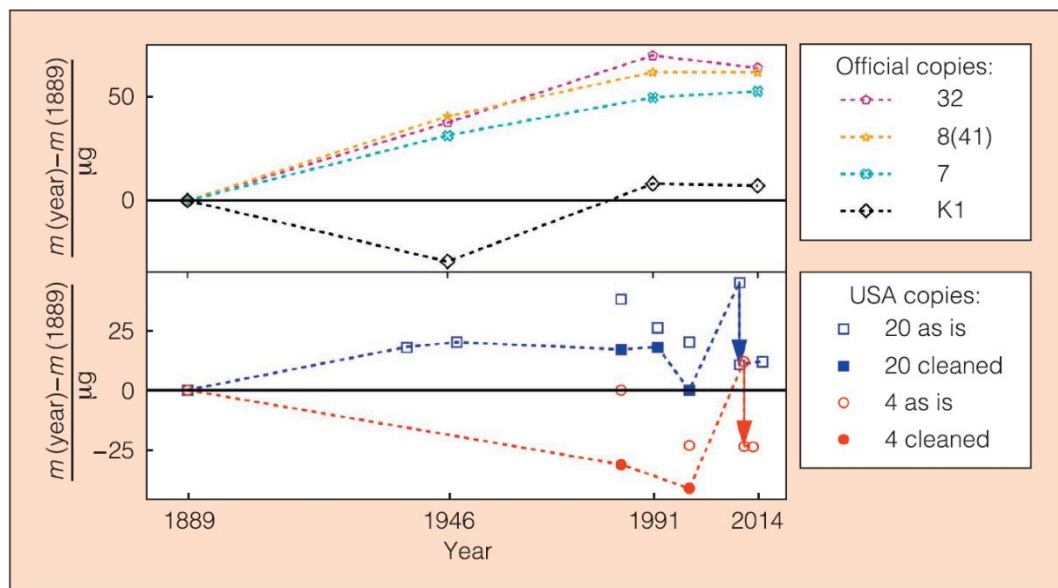
Obrázek 1: Znárodnění základních jednotek SI

1.2 Motivace pro změnu

Hlavní motivací k redefinici SI byla snaha o vytvoření definic, jež by byly závislé na neměnných fyzikálních konstantách, díky čemuž by bylo možné dané jednotky realizovat kdykoli, nezávisle na místě či prostředí.

Před redefinicí byly použité různé definice pro základní jednotky: specifické vlastnosti artefaktu, jako je hmotnost mezinárodního prototypu (IPK) pro jednotku kilogramu, specifický fyzický stav, jako je trojný bod vody pro jednotku kelvin, idealizovaný experimentální předpis pro jednotky ampér a kandela, nebo přírodní konstanty, jakou je rychlost světla pro definici jednotky metr.

Už při zřízení soustavy v roce 1960 se jednalo o nebezpečí týkající se IPK jako definice kilogramu, obávaná nebezpečí se převážně týkala možné ztráty či zničení artefaktu, ale také se týkala přirozené ztráty hmotnosti materiálu, která je s fyzickým artefaktem spojená. Již tehdy se uvažovalo nad možnou změnou definice hmotnosti, ale bohužel nebylo tehdy technicky možné realizovat vhodnou náhradu. V článku „*The Units for Mass, Voltage, Resistance, and Electrical Current in the SI*“ [7] je graficky znázorněna změna hmotnosti IPK vůči oficiálním kopiím, v ohledu na čas (viz Graf 1).



Graf 1: Znázornění změny hmotnosti IPK a jeho oficiálních kopií v závislosti na čase

Další důležitou motivací pro změnu definice byla potřeba přesné definice jednotky ampéru a odvozených jednotek voltu a ohmu. Její dosavadní definice nebyla vhodná pro užití v metrologii, a tak vznikla v roce 1990 konvenční soustava jednotek, která obsahovala kvantově přesné numerické vyjádření hyperjemné přechodové frekvence cesia-133 $\Delta\nu_{CS}$, Josephsonovy konstanty K_{J-90} a von Klitzingovy konstanty R_{K-90} . Konvenční soustava jednotek se tehdy začala využívat v metrologii, čímž narušila status soustavy SI jako jednotného univerzálního systému fyzikálních jednotek. Více

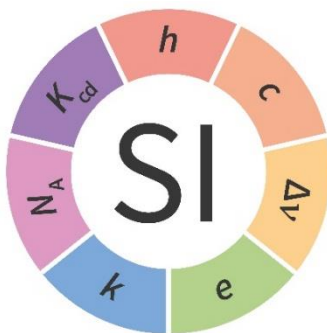
podrobností ohledně konvenční soustavy jednotek je uvedeno v „CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2014“ [5].

1.3 Redefinice soustavy

Nová definice SI jednotek užívá sedm definujících konstant jako jádro soustavy, jedná se o konstanty s neměnnými číselnými hodnotami. Na těchto konstantách je založeno znění jednotlivých základních jednotek soustavy SI, odvozené jednotky soustavy zůstávají nadále založeny na základních jednotkách, neboť jsou stále užitečné a dobře srozumitelné pro širší veřejnost. Znění starých a nových definic je shrnuto v „Zpráva o 26 CGPM“ (Tabulka 2).

Mezi sedm definujících konstant se řadí:

- frekvence záření při přechodu atomu cesia-133 ^{133}C mezi dvěma hladinami velmi jemné struktury základního stavu (hyperjemné přechodové frekvence cesia-133) $\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770\text{ Hz}$
- rychlost světla ve vakuu $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$
- Planckova konstanta $h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$
- Elementární náboj $e = 1.602\,176\,634 \times 10^{-19}\text{ C}$
- Boltzmannova konstanta $k = 1.380\,649 \times 10^{-23}\text{ J/K}$
- Avogadrova konstanta $N_A = 6.022\,140\,76 \times 10^{23}\text{ mol}^{-1}$
- světelná účinnost monochromatického záření o frekvenci 540 THz $K_{\text{cd}} = 683\text{ lm/W}$



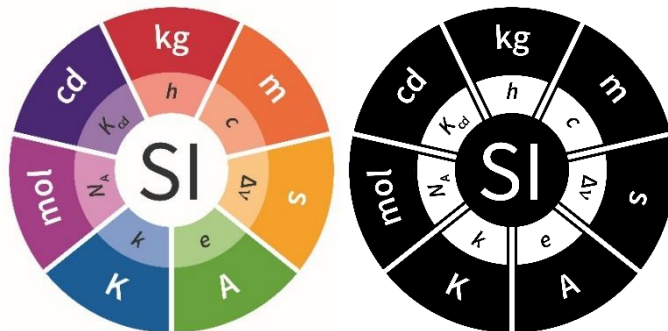
Obrázek 2: Znázornění definujících konstant

Součástí redefinice bylo stanovení přesné číselné hodnoty Planckovy konstanty, Boltzmannovy konstanty, Avogardovy konstanty a elementárního náboje. Změna definice jednotek se jmenovitě týkala čtyř základních jednotek, mezi něž patří kilogram, ampér, kelvin a mol. U zbývajících jednotek se změnil pouze zápis, pro sjednocení způsobu zápisu jednotek.

V článku od Ing. Hudličky „Redefinice soustavy jednotek SI“ [6] jsou uvedeny metody, jimiž je možné realizovat jednotlivé definice nově definovaných jednotek:

- **Kilogram** je možné realizovat pomocí dvou odlišných metod, první metoda je realizována měřením váhy křemíkové koule (XRCD metoda) za užití znalosti konstanty N_A , tato metoda je vysvětlena v „*The units for mass voltage resistance and electrical current in the SI*“ [7]. Druhou metodou je metoda Kibbleových vah, jejich funkce je podrobně popsána v druhé kapitole této práce.
- **Ampér** je možné realizovat pomocí Ohmova zákona či kontrolovaným pohybem elektronů. Při těchto metodách se pracuje s von Klitzingovou a Josephsonovou konstantou, ty jsou popsány v druhé kapitole této práce.
- **Kelvin** může být realizovaný několika různými metodami, mezi hlavní dvě metody patří užití akustického rezonátoru nebo dielektrického teploměru.
- **Mol** jsme schopni realizovat za použití koule izotopu křemíku, se znalostí Avogardovy konstanty.

Součástí nové definice soustavy je i její grafické znázornění, vytvořené Mezinárodním úřadem pro míry a váhy BIPM (viz obrázky 1–3); toto znázornění by mělo sloužit pro seznámení širší veřejnosti s novou definicí, nezávisle na jazykové bariéře, přesněji je to popsáno v [2]. V obrázku obr. 3 je názorně zobrazeno spojení mezi jednotlivými konstantami a základními jednotkami SI. Obrázek je dostupný ve třech variantách: černá, bílá (s transparentním pozadím) a barevná, kde barevné rozlišení jednotlivých jednotek a konstant je přesně stanoveno a nesmí se nijak upravovat.



Obrázek 3: Znázornění definujících konstant a základních jednotek SI

Tabulka 2: Znění původních i nově schválených definic jednotek SI [4]

Jednotka	Původní definice	Nová definice
Sekunda	Sekunda je doba trvání 9 192 631 770 period záření odpovídajícího přechodu mezi dvěma hladinami velmi jemné struktury základního stavu atomu cesia 133.	Sekunda, symbol s, je SI-jednotka času. Je definována fixováním číselné hodnoty cesiové frekvence $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, přechodové frekvence atomu cesia 133 v klidovém stavu při přechodu mezi dvěma hladinami velmi jemné struktury základního stavu, rovné 9 192 631 770, je-li vyjádřena v jednotce Hz, jež je rovna s^{-1} .
Metr	Metr je vzdálenost, kterou urazí světlo ve vakuu za dobu 1/299 792 458 sekundy.	Metr, symbol m, je SI-jednotka délky. Je definována fixováním číselné hodnoty rychlosti světla ve vakuu c rovné 299 792 458, je-li vyjádřena v jednotkách $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, kde sekunda je definována ve smyslu $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
Kilogram	Kilogram je jednotka hmotnosti; je rovna hmotnosti mezinárodního prototypu kilogramu.	Kilogram, symbol kg, je SI-jednotka hmotnosti. Je definována fixováním číselné hodnoty Planckovy konstanty h rovné $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$, je-li vyjádřena v jednotkách J·s, což se rovná $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$, kde metr a sekunda jsou definovány ve smyslu c a $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
Ampér	Ampér je stálý elektrický proud, který protéká dvěma rovnoběžnými nekonečně dlouhými vodiči o zanedbatelném průřezu umístěnými ve vakuu 1 m od sebe, jestliže mezi vodiči působí magnetická síla o velikosti 2×10^{-7} newtonu na jeden metr délky vodiče.	Ampér, symbol A, je SI-jednotka elektrického proudu. Je definována fixováním číselné hodnoty elementárního náboje e rovné $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$, je-li vyjádřena v jednotce C, což se rovná $\text{A}\cdot\text{s}$, kde sekunda je definována ve smyslu $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
Kelvin	Kelvin, jednotka termodynamické teploty, je rovna zlomku 1/273,16 termodynamické teploty trojného bodu vody.	Kelvin, symbol K, je SI-jednotka termodynamické teploty. Je definována fixováním číselné hodnoty Boltzmannovy konstanty k rovné $1,380\,649 \times 10^{-23}$, je-li vyjádřena v jednotkách $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$, což se rovná $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, kde kilogram, metr a sekunda jsou definovány ve smyslu h , c a $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
Mol	Mol je látkové množství systému, který obsahuje stejný počet elementárních entit, kolik je atomů v 0,012 kg uhlíku ^{12}C .	Mol, symbol mol, je SI-jednotka látkového množství. Jeden mol obsahuje přesně $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ elementárních entit. Toto číslo je fixovaná číselná hodnota Avogadrovy konstanty, N_{A} , je-li vyjádřena v jednotce mol^{-1} a je nazývána Avogadrovo číslo. Látkové množství, symbol n , systému je mírou počtu specifikovaných elementárních entit. Elementární entitou může být atom, molekula, iont, elektron nebo jakákoliv jiná částice či specifikovaná skupina částic.
Kandela	Kandela je svítivost zdroje, který vydává monochromatické záření o frekvenci 540×10^{12} Hz, jehož intenzita v daném směru je 1/683 wattů na steradián.	Kandela, symbol cd, je SI-jednotka svítivosti v daném směru. Je definována fixováním číselné hodnoty světelné účinnosti monochromatického záření o frekvenci 540×10^{12} Hz, K_{cd} , rovné 683, je-li vyjádřena v jednotkách $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$, což se rovná $\text{cd}\cdot\text{sr}\cdot\text{W}^{-1}$ nebo $\text{cd}\cdot\text{sr}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^3$, kde kilogram, metr a sekunda jsou definovány ve smyslu h , c a $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

2. KIBBLEOVY VÁHY

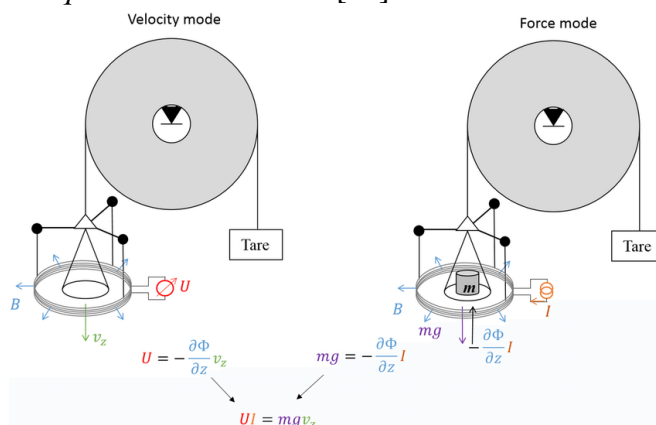
2.1 Seznámení

První Kibbleovy váhy vytvořil v roce 1975 Dr. Bryan Kibble v institutu National Physical Laboratory (NPL), tehdy pod názvem wattové váhy. Jejich funkce umožňuje virtuální spojení mezi elektrickým a mechanickým výkonem. Dr. Kibble umřel v roce 2016 a na jeho počest jsou wattové váhy označovány jako Kibbleovy váhy. V článku od I. A. Robinsona a S. Schlammingera „*The watt or Kibble balance: a technique for implementing the new SI definition of the unit of mass*“ [8] je vysvětleno, že původně byly Kibbleovy váhy zamýšleny pro realizaci SI jednotky ampér a že při kombinaci s SI jednotkou ohmu, odvozeného z vypočitatelného kapacitoru, můžeme použít Kibbleovy váhy k realizaci SI jednotky volt a ampér.

2.2 Teorie

2.2.1 Základní princip vah

Z druhého doplňku SI Brožury „*mises en pratique*“ [9] víme, že základní součástí Kibbleových vah je cívka zavěšená z ramene váhy, vnořená do silného magnetického pole, které může být realizováno dvěma způsoby: silným permanentním magnetem nebo elektromagnetem (sekundární cívka). Přístroj má dva základní módy měření: rychlostní mód a hmotnostní mód. Dle konstrukce vah mohou být módy měření vykonány buď současně, či ve sledu. Oba módy jsou graficky znázorněny v obrázku 4, z článku „*Bridging classical and quantum mechanics*“ [14].



Obrázek 4: Rychlostní mód (levá), hmotnostní mód (pravá)

Při rychlostním módu měření necháváme váhu nezátíženou a cívka se pohybuje v magnetickém poli s vertikální rychlostí v (v_z), čímž je následně indukováno napětí U na cívce s délkou L , dle vzorce:

$$U = BLv \quad (2.1)$$

Při hmotnostním módu měření váha mg , příslušná závaží m , je kompenzována elektromagnetickou silou $B LI$, která je generována na cívce s protékajícím proudem I , dle vzorce:

$$F = mg = BLI \quad (2.2)$$

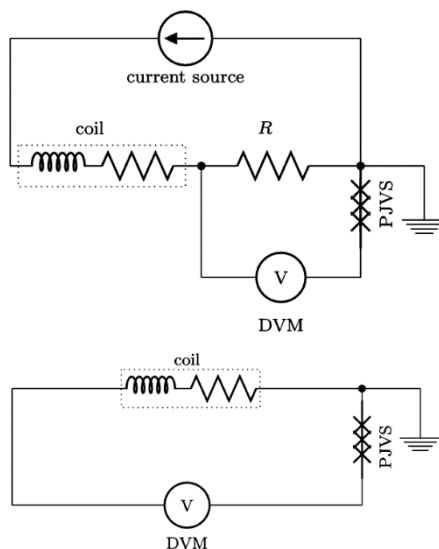
Za předpokladu, že hodnota BL je stejná pro oba módy měření, můžeme ji zanedbat, čímž výsledně získáváme vztah:

$$UI = mgv \quad (2.3)$$

Získaná rovnice nám reprezentuje virtuální závislost mezi mechanickou a elektrickou prací. V článku [10] je uvedeno, že rovnice (2.3) se označuje jako *Kibbleova rovnice* či *wattová rovnice*. Lehkou úpravou rovnice získáme vztah pro výpočet hmotnosti:

$$m = \frac{UI}{gv} \quad (2.4)$$

Virtuální spojení mezi elektrickým a mechanickým výkonem je možné díky objevu kvantového Hallova jevu a Josephsonova jevu, které jsou popsány v [7]. Užití těchto dvou kvantových jevů nám umožňuje měřit elektrický výkon pomocí Planckovy konstanty h a frekvence. Na obrázku 5 je zobrazeno obecné zapojení dvou módů měření Kibbleových vah:



Obrázek 5: Schéma zapojení Kibbleových vah pro hmotnostní mód (horní) a rychlostní mód (dolní). Voltmetr (DVM) je použit pro měření drobných rozdílů mezi PJVM a napětím na rezistoru R (horní), nebo pro měření indukovaného napětí na cívce (dolní).

[10]

2.2.2 Kvantový Hallův jev (QHS)

V roce 1980 Klaus von Klitzing objevil kvantový Hallův jev. Došlo k tomu během měření GaAs MOSFET, při nízkých teplotách a silných magnetických polích. Jedná se o jev, k němuž dochází v tenkých vrstvách polovodičů, kterými protéká proud I a indukuje se na nich Hallovo napětí U_H , díky čemuž Hallův odpor R_H nabývá diskretních hodnot a může být vyjádřen jako

$$R_H = \frac{U_H}{I} = \frac{R_K}{p}, \quad (2.5)$$

kde p představuje integrátor a R_K je von Klitzingova konstanta, jejíž hodnotu můžeme zapsat jako:

$$R_K = \frac{h}{e^2} = 25\,816,807\,45 \dots \Omega \quad (2.6)$$

Pro realizaci odporových měření u Kibbleových vah je primárně využíván quantum Hall resistance standard (QHRS), který operuje při extrémně nízkých teplotách.

2.2.3 Josephsonův jev

Tento jev poprvé objevil v roce 1962 Brian Josephson. Předpokládá se vznik tunelového jevu mezi párem supravodičů, které jsou odděleny tenkou nevodivou vrstvou. Při tomto jevu prochází nevodivou vrstvou Cooperovy páry elektronů a napětí vzniklé na přechodu je integrálem vícero f/K_J , kde K_J představuje Josephsonovu konstantu $2e/h$. Cooperův pár je dvojice elektronů, vznikající v kovu při nízké teplotě, kdy jsou spojeny prostřednictvím kmitů krystalické mřížky; tento jev je podrobněji vysvětlen v článku „*What is Cooper Pair?*“ [12].

S novou definicí soustavy SI je možné určit přesnou hodnotu Josephsonovy konstanty. Ze seznamu od výboru pro údaje pro vědu a technologii CODATA „*Fundamental Physical Constants—Extensive Listing*“ [13] víme, že jeho hodnota je rovna:

$$K_J = \frac{2e}{h} = 483\,597,848\,4 \dots \text{GHz} \cdot \text{V}^{-1} \quad (2.7)$$

Z článku [7] víme, že jeden spoj Josephsonova jevu vytvoří pouze 37uV pro 18GHz, což je typická mikrovlnná frekvence. Aby bylo možné prakticky využít Josephsonův jev, je potřeba použít sériově desítky tisíc těchto spojů, k tomu nám v dnešní době slouží programmable Josephson voltage standard (PJVS). V dnešní době je PJVS schopno vytvořit napětí v rozmezí 0–10 V s kvantovou přesností, běžně pracuje s frekvencí 20 GHz. Stejně jako u QHRS, pracuje PJVS za nízkých teplot. Výsledné napětí PJVS můžeme zapsat jako

$$U = n \frac{f}{K_J}, \quad (2.8)$$

kde n představuje počet použitých spojů a f reprezentuje mikrovlnou frekvenci.

2.2.4 Aplikace kvantových jevů

Jak vyplývá z článků [15], s užitím QHRS a PJVS je možné vytvořit vysoce přesné Kibbleovy váhy. Protože je velice obtížně měřit proud s dostatečně vysokou přesností měření, využíváme pro určení proudu Ohmův zákon $I=U/R$, kde R je rezistor, který je přesně kalibrován podle QHRS a U je jeho úbytek napětí U_R . Dosazením získaného vztahu $I=U_R/R$ do rovnice pro výpočet výkonu $P=UI$ získáme vztah $P=UU_R/R$. Obě získaná napětí jsou měřena v závislosti na PJVS a mohou tak být vyjádřena ve formě frekvence a Josephsonovy konstanty. Protože je rezistor kalibrován srovnáním s QHRS, je možné ho zapsat v závislosti na R_K , takže výslednou rovnici pro výkon můžeme zapsat

ve tvaru:

$$P = \frac{UU_R}{R} = Cf_1f_2 \frac{e^2}{h} \frac{h}{2e} \frac{h}{2e} = \frac{Cf_1f_2}{4} h \quad (2.9)$$

V tomhle vztahu je C konstanta, která představuje počet použitých spojů n a poměr R vůči R_K . Po dosazení do rovnice (2.4) dostáváme vztah:

$$m = \frac{Cf_1f_2}{4} \frac{h}{gv} \quad (2.10)$$

Díky této rovnici jsme schopni definovat kilogram dle fixní hodnoty h , stanovené dle nové definice soustavy SI jednotek.

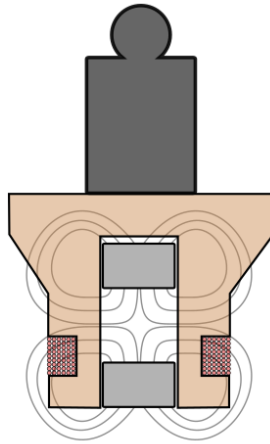
V běžných podmínkách se častokrát nesetkáme s kvantovými elektrickými standardy, ale i bez nich se dají Kibbleovy váhy realizovat. V článku [16] je uveden postup, jak se dalo měření realizovat před změnou definice SI, s použitím konvenčních jednotek. S novou definicí není zapotřebí odvození jednotek z konvenční soustavy a můžeme tak jednoduše použít rovnici (2.4)

$$m = \frac{UI}{gv}, \quad (2.11)$$

kde jsou všechny hodnoty vyjádřeny SI jednotkami. Zbývá určit hodnoty g a v . Hodnotu g můžeme přesně určit pomocí gravimetru, nebo případně zjednodušeně vyhledat na internetu. Vertikální rychlost v lze změřit pomocí interferometrické metody, jak je uvedeno v [15], či jednoduché optické metody, která je použita u experimentálních vah v části 2.4.

2.3 Druhy Kibbleových vah

Byť jsou všechny Kibbleovy váhy založeny na stejném principu, každá váha má svůj vlastní design. Z článku [10] víme, že i přes svůj rozdílný design používá většina vah stejný systém permanentních magnetů s radiálním magnetickým polem, kde se intenzita pole mění v závislosti na vzdálenosti od rádiusu systému, díky čemuž je měření neovlivněno případnou změnou průměru pohyblivé cívky, způsobenou teplotní roztažností cívky.



Obrázek 6: Systém permanentních magnetů s radiálním magnetickým polem užitý u experimentálních Kibbleových vah [18]

Kibbleovy váhy je možné rozdělit na několik základních typů podle jejich zásadních odlišností v provedení.

2.3.1 Konvenční Kibbleovy váhy dvou móde s dvoufázovým měřením

Jedná se o váhy, které mají dva módy měření, které jsou popsány v části 2.2.1, z nichž každý probíhá v jedné fázi měření. Tento typ vah je možné provozovat ve vakuu.

Tento to druh vah realizovaly následující instituce (viz [8]):

- Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Jižní Korea
- Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE), Francie
- Federal Institute of Metrology (METAS), Švýcarsko
- Measurement Standard Laboratory of New Zealand (MSL), Nový Zéland
- National Institute of Metrology (NIM), Čína
- National Institute of Standards and Technology (NIST), USA
- National Physical Laboratory (NPL), UK
- National Research Council (NRC), Kanada

2.3.2 Joulovy váhy

Jedná se originální design vah, realizovaný institutem NIM, kde je rychlostní mód měření nahrazen měřením vzájemné indukčnosti mezi dvěma stacionárními cívkami. Kvůli svým špatným teplotním jevům a problémům s měřením vzájemné indukčnosti se spíše používají váhy uvedené v části 2.3.1.

2.3.3 Kibbleovy váhy jedno móde s jednofázovým měřením

Tento design vah vytvořili v institutu Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). Jedná se o variaci klasického provedení vah s tou změnou, že oba módy měření jsou spojeny do jednoho a fáze měření probíhají současně.

2.3.4 Kibbleovy váhy jedno móde s dvoufázovým měřením

Institut NPL přišel s návrhem vah, jenž je variací na váhy popsané v 2.3.3, s tím, že měření je rozděleno do dvou fází jako u konvenčních Kibbleových vah.

2.3.5 Kibbleovy váhy s pohybujícím se magnetem

V tureckém institutu Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) přišli s návrhem variace konvenčních Kibbleových vah, kde pohyblivá část vah je tvořena permanentním magnetem, který se pohybuje v oblasti stacionárního elektromagnetu. Doposud nebyly realizovány.

2.4 DIY Kibbleovy váhy

Protože se v této práci snažíme sestrojít prototyp Kibbleových vah, je potřeba se seznámit s již realizovanými experimenty. Označením DIY (Do It Yourself) se rozumí jakýkoliv projekt, který lze realizovat v domácím prostředí, s relativně nízkými náklady. Přesnost těchto projektů nemá za cíl měření s extrémní přesností, ale spíše mají sloužit k objasnění problematiky. Častokrát jsou tyto projekt replikovány dalšími tvůrci a postupně odladovány, se snahou o snížení možných nejistot. K dnešnímu dni jsem byl schopen dohledat pět realizovaných projektů od čtyř autorů. Autoři jsou seřazeni podle toho, kdy publikovali svůj projekt.

2.4.1 National Institute of Standards and Technology (NIST)

V roce 2014 představil tým z amerického institutu NIST prototyp Kibbleových vah, jejich projekt je rozebrán v článku „A LEGO Watt balance: An apparatus to determine a mass based on the new SI“ [15].

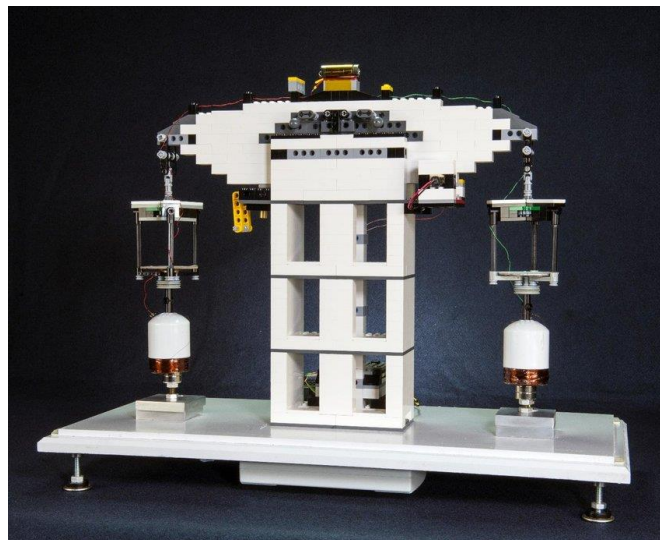
Tento projekt je, stejně jako váhy uvedené v části 2.3.1., založen na základním principu Kibbleových vah, váhy jsou koncipovány jako dvou móde s dvoufázovým měřením. Jak je z obrázku Obr. 7 vidět, je konstrukce vah založena na tradičních rovnoramenných vahách, tělo, ramena a misky vah jsou vytvořeny z lega, s tím, že na miskách vah jsou uchyceny plastové trubky, na nichž jsou namotány jednotlivé cívky, které se pohybují kolem středu magnetického systému. Stejně jako v předchozí části používá tento projekt magnetický systém s radiálním magnetickým polem, který je tvořen párem neodymových magnetů (NdFeB), které se navzájem odpuzují a jsou uchyceny s pomocí bronzového šroubu a matky, díky čemuž je možné nastavit vzájemnou vzdálenost magnetů. Cívky jsou tvořeny z 3000 otáček a na jejich výrobu byl použit měděný lakovaný drát s průměrem 0.12 mm.

Měření a sběr dat je realizován pomocí dvou USB zařízení, U6 od Labjacku a 1002_0 od Phidget. U6 slouží k měření indukovaného napětí a proudu na cívkách a k měření pozice balančního paprsku. Také umožňuje manuálně ovládat náklon vah, pro názornost

projektu. 1002_0 je čtyřkanálový zdroj napětí, který slouží pro napájení jednotlivých cívek. Jeden kanál je připojen pomocí relé, které umožňuje přepínat mezi oběma cívkami, kdy jedna cívka slouží jako střídavě napájený akční člen a na druhé se může měřit indukované napětí. Poslední kanál slouží k odstranění předpětí fotodiody. Celý program pro řízení a měření je realizován v prostředí Labview od společnosti National Instruments (NI).

Kalibrace vah se provádí pomocí laserového ukazovátka, které je umístěno na vrcholu vah, a světelného senzoru, který slouží k monitorování pozice ramen vah. Světelný senzor se skládá z fotodiody a laserového ukazovátka, které jsou uchyceny v pevné části vah, blízko spodní hrany ramene váhy. Samotné měření následně probíhá ve dvou fázích. Při rychlostním měření se využívá světelného senzoru k měření rychlosti pohybu vah, jedné cívky k měření indukovaného napětí a druhé cívky k rozpořívání vah. Při hmotnostním měření slouží jedna cívka k vygenerování elektromagnetického pole, pro vyvážení tíhy závaží; toto měření může být provedeno manuálně s využitím kalibračního laseru, nebo automaticky s regulováním napětí pomocí světelného senzoru, kdy se porovnává aktuální hodnota napětí senzoru s požadovanou hodnotou.

Váhy jsou schopné provádět měření s nejistotou pouhého 1 %.

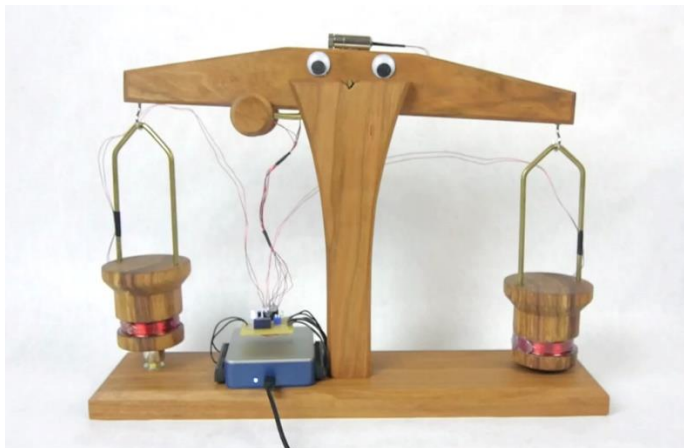


Obrázek 7: fotografie LEGO Kibbleových vah od NIST [15]

2.4.2 *Practical Engineering*

V roce 2016 realizoval G. Hillhouse z Youtube kanálu Practical Engineering svůj prototyp Kibbleových vah, jeho projekt je popsán v článku „*Redefining the Kilogram – Desktop Watt Balance*“ [18]. Jedná se o variaci na LEGO Kibbleovy váhy od NIST, odlišuje se tím, že celé váhy jsou konstruovány ze dřeva a bronzu, jak je vidět na obrázku Obr. 8, váha postrádá automatické měření hmotnostního měření, USB moduly U6 a 1002_0 jsou nahrazeny za DAQ 6001 od NI.

Při měření dosáhl maximálně nejistot 10 %.



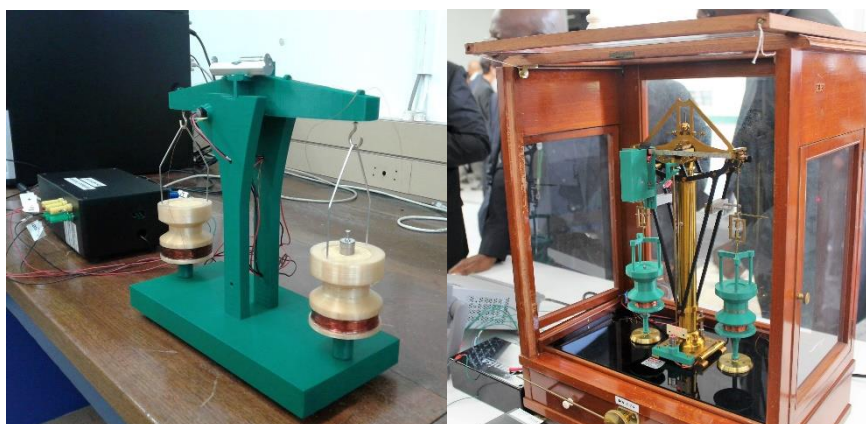
Obrázek 8: fotografie Kibbleových vah od Practical Engineering [18]

2.4.3 National Metrology Institute of South Africa (NMISA)

V roce 2018 publikoval tým z jihoafrického institutu NMISA článek „*NMISA's precursor Kibble watt balance*“ [16], kde představil hned dva realizované prototypy Kibbleových vah, které jsou ukázány v obrázku Obr. 9, jedná se o variace na projekt od NIST.

První projekt je podrobně popsán v článku „*A Low-Cost Kibble Balance for Africa*“ [17] a odlišuje se od původního projektu v tom, že je jeho celá konstrukce vytisknuta na 3D tiskárně, kalibrační laser je rozšířen o vodováhu a váhy jsou řízeny pomocí Teensy 3.2 mikroprocesoru, který je programovaný v jazyce C.

Konstrukce druhého projektu je tvořena modifikací tradičních rovnoramenných vah, s nahrazením některých komponent za 3D komponenty, dále je kalibrační laser umístěn v základně vah a na středu ramen vah je umístěno zrcátko pod úhlem 45° , na něž dopadá paprsek laseru. USB moduly jsou nahrazeny za DAQ 6001.



Obrázek 9: fotografie Kibbleových vah od NMISA, 3D model (levá), modifikované tradiční váhy s 3D komponenty (pravá) [16]

2.4.4 Measurement Standard Laboratory of New Zealand (MSL)

V roce 2019 zveřejnil institut MSL video „MSL LEGO Kibble Balance“ [19], které prezentuje jejich realizaci LEGO Kibbleových vah. Jedná se o variaci na projekt od NIST, bohužel není publikován článek, který by rozebral jejich konstrukci vah. Jediné znatelné rozdíly oproti původním LEGO vahám jsou některé 3D tištěné komponenty a užití vodováhy, stejně jako v předchozím projektu. Na následující fotografii je zobrazena konstrukce těchto vah.



Obrázek 10: fotografie Kibbleových vah od MSL [20]

3. REALIZACE

3.1 Návrh

V této části se zaměříme na návrh prototypu Kibbleových vah, podle kterého bude probíhat realizace. Návrh je založen na konvenčních Kibbleových vahách, které jsou popsány v části 2.3.1. Nejprve zhodnotíme projekty, které jsme si představili v předchozí části, a podle toho budeme rozhodovat o nejlepším postupu při konstrukci. Zhodnocení návrhu se dá rozdělit do čtyř hlavních částí konstrukce: mechanická, magnetická, elektronická a softwarová.

A. *Mechanická*

Do mechanické části spadají všechny díly, jež tvoří tělo vah, včetně uchycení systému magnetů.

B. *Magnetická*

Do magnetické části patří výběr systému permanentních magnetů a cívka pro generování magnetického pole a pro indukování elektrického napětí.

C. *Elektronická*

Do elektrické části spadají snímače určené pro fyzickou realizaci měření pohybu vah.

D. *Softwarová*

Do softwarové části spadá způsob, jakým jsou měřené veličiny zpracovány a následně vyhodnoceny.

3.1.1 Mechanická část

Z dostupných projektů lze vyzorovat tři hlavní typy mechanické konstrukce, které byly využity pro realizaci prototypu Kibbleových vah:

1. Lego konstrukce
 - Převážná většina těla vah je tvořena z kostek lego, včetně bodu náklonu, kde je využita „T“ součástka místo břítu tradičních vah.
 - Modularita návrhu umožňuje kdykoliv upravit rozměry vah dle potřeby.
2. Konstrukce vlastní výroby
 - Tělo vah je sestrojeno dle vlastního návrhu a je uzpůsobeno pro montáž součástek potřebných k realizaci měření. Z uvedených projektech máme dva názorné příklady, jedním je konstrukce vyrobeny ze dřeva (viz: 2.4.2) a druhým je konstrukce vytisknutá za použití 3D tiskárny (viz 2.4.3).
3. Využití straších laboratorních vah
 - Tělo vah je tvořeno z rovnoramenných laboratorních vah, k těm jsou vyrobeny potřebné díly na uchycení jednotlivých komponent pro realizaci měření.

- Tento postup zjednodušuje výrobu vah a umožňuje vyšší přesnost měření, jak lze vyčíst z tabulky 3.

Tabulka 3: Srovnání naměřených hodnot hmotnosti od NMISA [16]

Calibrated weights (g)	Lego Watt balance (g)	3D Watt balance value (g)	EQ Watt balance value (g)
1.0 ± 0.000004	1.01 ± 0.02	0.99 ± 0.03	$1.00 \pm 0.00x$
1.5 ± 0.000004	1.50 ± 0.03	1.51 ± 0.04	$1.50 \pm 0.00x$
2.0 ± 0.000005	2.01 ± 0.03	2.00 ± 0.06	$2.00 \pm 0.00x$
2.5 ± 0.000006	2.49 ± 0.04	2.50 ± 0.07	$2.50 \pm 0.00x$
3.0 ± 0.000006	3.00 ± 0.04	3.01 ± 0.07	$3.00 \pm 0.00x$

3.1.2 Magnetická část

Pro realizaci magnetické části byl opakovaně využit systém permanentních magnetů s radiálním magnetickým polem, které umožňuje stálou intenzitu magnetického pole při pohybu vah oběma směry. Na výrobu cívky využily všechny týmy stejné parametry, kde použily měděný drát s průměrem 0,1mm pro navinutí cívky s přibližně 3000 otáčkami, méně otáček by vedlo k nižšímu indukovanému napětí a zároveň více otáček by mělo za následek vyšší odpor cívky.

3.1.3 Elektronická část

Pro snímání pohybu vah byla použita fotodioda pro snímání změny intenzity při pohybu cívky a červený laserový modul s tvarem paprsku čáry jako zdroj snímaného paprsku. Dále je použit bodový laser pro kalibraci vah a elektrické relé pro přepínání mezi cívkami. Relé umožňuje jednoduše vybrat, která cívka bude použita jako měřicí cívka a která bude použita jako řídicí cívka (pro rychlostní mód měření).

3.1.4 Softwarová část

U softwarové části návrhu se vyskytly dva způsoby, jak zpracovat a vyhodnotit naměřená data:

1. Zpracování a vyhodnocení dat v jazyce C
 - Tento způsob využil tým z instituce NMISA v jednom ze svých tří projektů jako levnější alternativu k použití Labview.
2. Zpracování a vyhodnocení dat v Labview
 - Tento způsob navrhl tým z instituce NIST a vytvořil volně přístupný program v prostředí Labview, který využívají i další tvůrci.

3.2 Konstrukce

V této části je vysvětleno, jak jsem realizoval jednotlivé části Kibbleových vah.

3.2.1 Mechanické díly

Pro realizaci vah jsem se rozhodl postupovat dle návrhu Kibbleových vah z institutu NMISA za použití rovnoramenných laboratorních vah (viz 2.4.3). Použití původního těla vah ulehčuje realizaci projektu, nevyžaduje nákup velkého množství kostek lego a návrh dílů je omezen pouze na potřebné uchycení měřicích komponent, navíc váha, kterou v tomto projektu využívám, obsahuje kovový ukazatel pro jednoduchou kontrolu rovnováhy vah. Pro návrh potřebných dílů jsem využil modelovacího prostředí a vymodelované díly jsem následně vytisknul na 3D tiskárně z transparentního UV resinu. Pro realizaci Kibbleových vah jsem potřeboval vytvořit celkově pět mechanických dílů. Prvním dílem byla náhrada za původní misky vah, ty jsem nahradil miskami s prostorem určeným na upevnění cívky a připevnil je na ramena vah pomocí závěsů vyrobených z mosazných závitových tyčí. Druhý potřebný díl bylo jednoduché uchycení systému permanentních magnetů k základně vah. Jako třetí díl jsem potřeboval vytvořit uchycení pro snímač pohybu cívek, ten je tvořen ze dvou do sebe zapadajících částí, z čehož jedna část drží laser a druhá fotodiodu. Čtvrtý díl slouží jako jednoduché uložení kalibračního laseru pro kolmé upevnění k základně vah. Poslední potřebný díl pro konstrukci vah byla odrazná ploška tvořená pomocí zrcadlové fólie, která je připevněná k centru ramene vah a jejíž odrazná plocha je pod úhlem 45 stupňů vůči základně vah tak, aby odrážela paprsek kalibračního laseru na blízkou stěnu. Celá konstrukce vah je znázorněna na obrázku 11.



Obrázek 11: Prototyp Kibbleových vah

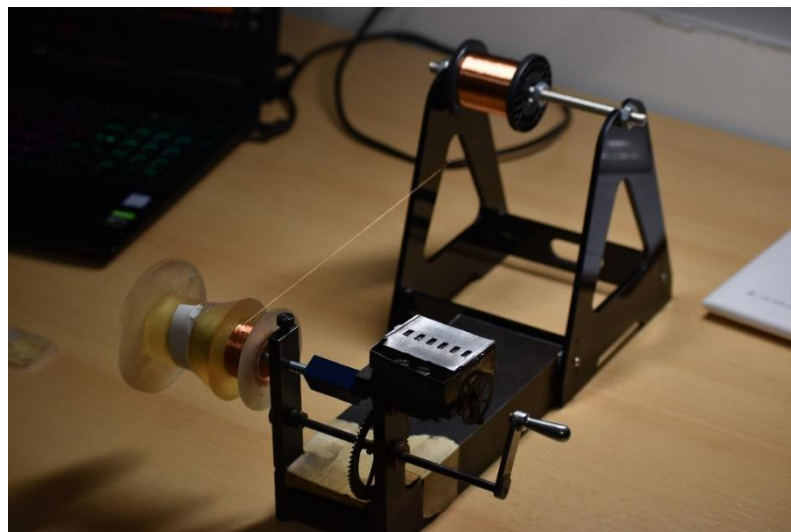
3.2.2 Cívka a permanentní magnety

Protože je široce nepoužívanějším systémem, použil jsem i v tomto projektu magnetický systém s radiálním magnetickým polem, za použití dvou párů totožných neodymových magnetů. Magnety jsou uchycené na závitové tyči, která je upevněna k základně pomocí vytištěného dílu, jak lze vidět na obrázku 12.



Obrázek 12: Systém uchycení permanentních magnetů

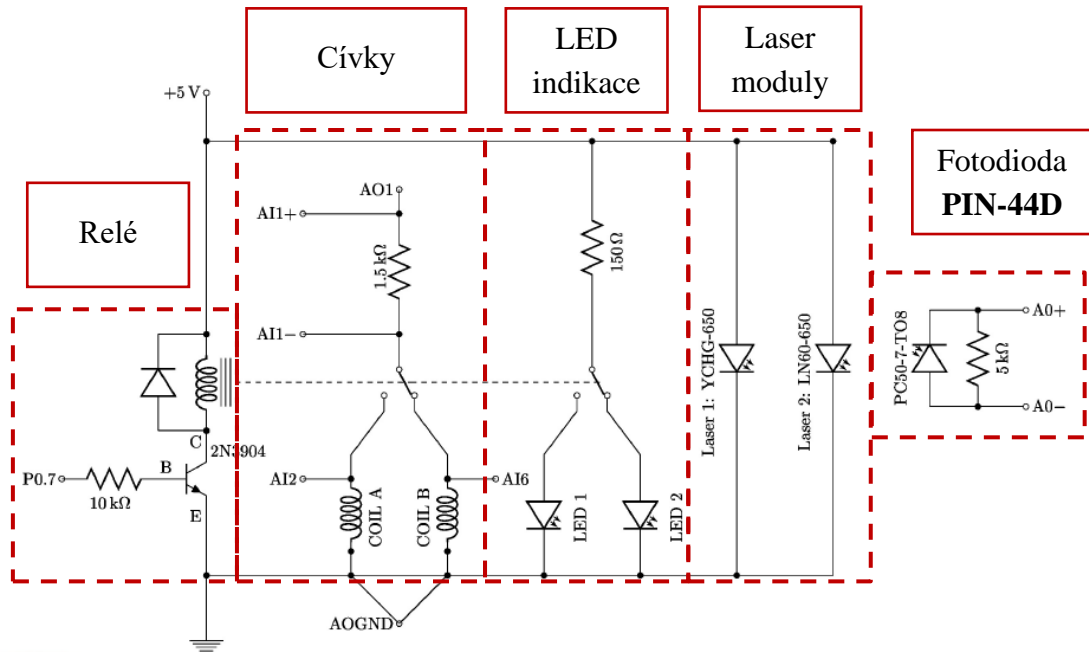
Na výrobu cívky jsem použil lakovaný měděný drát o průměru 0,1 mm. Abychom měli jistotu, že indukované napětí bude dostatečně vysoké, jednotlivé cívky mají 3000 otáček. Počet otáček jsem kontroloval za pomoci mechanického čítače otáček, průběžně jsem cívku potíral epoxidovou pryskyřicí, aby nedošlo k uvolnění závitů cívky po jejím dokončení. Pomocí multimetru jsem změřil odpor vinutí cívky a zjistil jsem, že odpor obou cívky se pohybuje kolem 670 Ω .



Obrázek 13: Výroba cívky pro Kibbleovy váhy

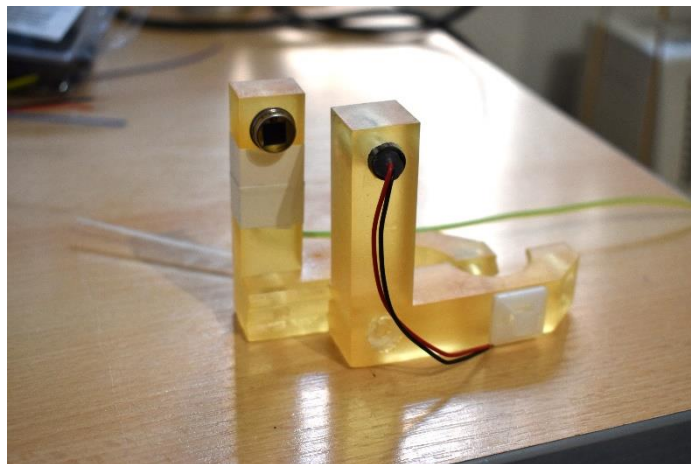
3.2.3 Elektronika a zpracování dat

Pro měření a zpracování dat Kibbleových vah jsem použil NI multifunkční jednotku USB-6215 DAQ jako náhradu za USB-6001 DAQ, kterou použili v projektu z NMISA [21]. Pro měření jsem použil volně přístupný program z instituce NIST, který je přiložen k jejich práci [15].



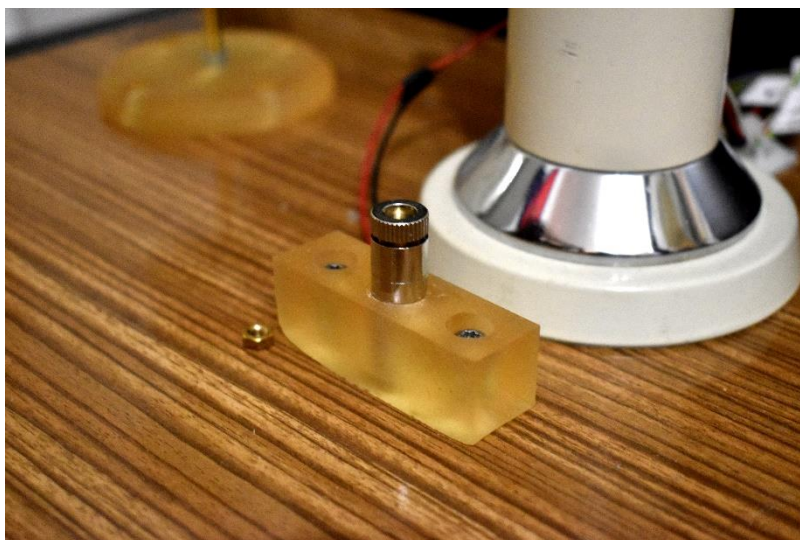
Obrázek 14: Schéma zapojení Kibbleových vah [15]

Pro zapojení prvků jsem použil schéma navržené pro ovládání Kibbleových vah pomocí UBS-60xx DAQ od týmu z instituce NIST, které je uvedeno na obrázku 14. Pro měření pohybu misek jsem použil senzor tvořený z laserového modulu čáry v kombinaci s fotodiodou, jak je znázorněno na obrázku 15.



Obrázek 15: Senzor (vlevo) a laser (vpravo) pro snímání pohybu

Na rozdíl od projektů zmíněných v předchozí kapitole, které všechny používají pro snímání fotodiody **PC50-7-TO8**, dle původního konceptu z NIST, jsem pro dočasnou nedostupnost součástky musel použít náhradu ve formě fotodiody **PIN-44D**, která má velice podobné parametry, včetně pouzdra TO8, takže je možné fotodiody jednoduše vyměnit. Pro kalibraci vah je použit laserový modul bodu s nastavitelným zaostřením paprsku, který je uchycen k základně vah, jak je uvedeno na obrázku 16.



Obrázek 16: Kalibrační laser

4. MĚŘENÍ

4.1 Úvod

Měření prototypu Kibbleových vah se skládá ze tří částí, těmi jsou kalibrace, rychlostí mód měření a hmotnostní mód měření. V této části si popíšeme, jak probíhají jednotlivé části měření, a následně provedeme příklad jednoho cyklu měření.

4.1.1 Popis kalibrace

Kalibrace se provádí před samotným měřením pro ustanovení závislosti mezi výstupním napětím světelného senzoru a vychýlením cívky, k tomu nám slouží fotodioda a dva laserové moduly. Před kalibrací musíme provést kontrolu, která se skládá ze čtyř kroků, jak je popsáno v [15]:

1. Prototyp vah položíme na stabilní vodorovný povrch několik metrů od zdi.
2. Laserovým modulem bodu posvítíme na zeď, na které připevněno pravítko určené pro záznam vychýlení paprsku laseru. Změříme vzdálenost d mezi balančním bodem vah a zdí.
3. Srovnáme rameno vah na tělu vah a ujistíme se pomocí kovového ukazatele, že jsou váhy v rovnovážném stavu, a poznačíme si polohu paprsku laseru na pravítku x_0 .
4. Umístíme systémy magnetů pod jednotlivé cívky a ujistíme se, že se magnety nedotýkají cívek.

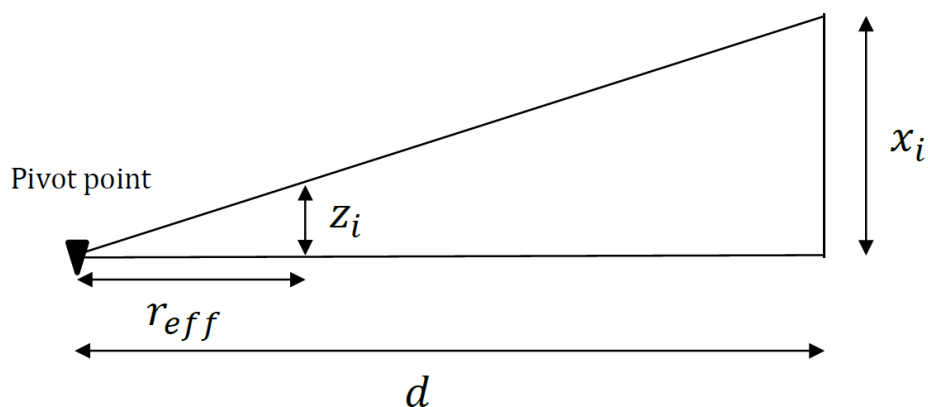
Po splnění všech čtyř kroků jsou váhy připravené ke kalibraci. Váhy jsou postupně vychylovány pod několika různými úhly, pro změření různých intenzit laserového paprsku ve formě výstupního napětí senzoru V_i a pro každou hodnotu intenzity je zaznamenána pozice paprsku laseru na pravítku x_i . Úhel vychýlení se následně určí jako:

$$\theta_i = \frac{x_i - x_0}{d} \quad (4.1)$$

Pozice vah se následně určí jako součin úhlu náklonu vah a efektivního poloměru, jež je vzdáleností mezi břitem ramene vah a závěsným bodem cívky:

$$z_i = r_{eff} \theta_i \quad (4.2)$$

Prototyp použitý v této práci má efektivní poloměr $r_{eff}=162$ mm.



Obrázek 17: Znázornění měřených vzdáleností pro kalibraci světelného senzoru [21]

4.1.2 Popis měření hmotnosti závaží

Měření hmotnosti se skládá ze dvou částí, jedná se o:

1. Rychlostní mód měření:

Při rychlostním módu měříme napětí indukované na cívce U a rychlost kmitání cívky v , pro stanovení velikosti BL složky, která představuje magnetické vlastnosti cívky.

$$U = BLv \quad (4.3)$$

Během tohoto měření používáme obě cívky, cívku A a cívku B. Jedna cívka je použita jako řídicí a druhá jako měřicí. Do řídicí cívky je přiveden sinusový signál, který uvede váhy do kmitavého pohybu, vzniklý pohyb způsobí, že se začne na měřicí cívce, která je umístěna mezi permanentními magnety, indukovat napětí, které může následně měřit. Pohyb ramene vah způsobí změnu intenzity dopadajícího světla na světelný senzor, která je po kalibraci úměrná velikosti vychýlení. Hodnoty výchylky jsou vzorkovány v čase, díky čemuž je možné měřit rychlost pohybu cívek.

Po úpravě rovnice (4.4), dostáváme vztah pro výpočet BL složky:

$$BL = \frac{U}{v} \quad (4.4)$$

2. Hmotnostní mód měření:

Při hmotnostním módu měření je na jednu miskou vah umístěno závaží, které svou hmotností způsobí vychýlení vah. Pro opětovné uvedení vah do rovnováhy je na měřicí cívku přiveden proud, jehož velikost je regulována tak, aby bylo dosaženo rovnovážného stavu. V případě manuálního nastavování proudu lze kontrolovat velikost vychýlení pomocí kovového ukazatele vah, nebo pomocí pozice laseru na pravítku na zdi. Při automatickém měření je k tomu využit světelný senzor a proud je regulován pomocí integrovaného PID regulátoru. Výsledná velikost proudu je změřena kompenzační metodou ve formě úbytku napětí přes známý rezistor 1.5 k Ω , viz obrázek 14.

$$mg = BLI \quad (4.5)$$

Po změření provedení obou módů měření získáme potřebné hodnoty pro stanovení hmotnosti měřeného závaží, které můžeme dosadit do výsledné rovnice, jež nám vyjde po dosazení rovnice (4.4) do rovnice (4.5):

$$m = \frac{UI}{vg} \quad (4.6)$$

Pro potřeby tohoto projektu jsem se rozhodl použít hodnotu normálního tíhového zrychlení:

$$g_0 = 9,80665 \text{ m/s}^2$$

4.2 Pokusné měření

Při měření jsem zjistil, že program od NIST není zcela kompatibilní s použitou kartou USB-6215, která má některé parametry odlišné, například má jiné rozložení vstupů a výstupů. Protože je program od instituce NIST *executable* pro Labview starší verze než 2018, nelze v něm upravovat propojení vstupů a výstupů, kvůli čemuž nefungovalo přepínání ovládání cívek pomocí digitálního výstupu *P0.7*, jak je uvedeno v obrázku Obrázek 14. Pro účely tohoto projektu jsem přepínání tranzistoru vyřešil pomocí mechanického přepínače, který je přiveden z napájecího kontaktu +5V, a cívky jsem tedy spínal manuálně podle potřeby.

Současně na analogovém výstupu *AO1*, který slouží pro napájení cívek, bylo konstantní záporné DC napětí, i mimo fáze měření. Tento problém jsem vyřešil přidáním potenciometru, jehož otáčením jsem mohl regulovat velikost průchozího signálu, a pomocí programu jsem mohl přepínat polaritu cívek.

4.2.1 Kalibrace Vah

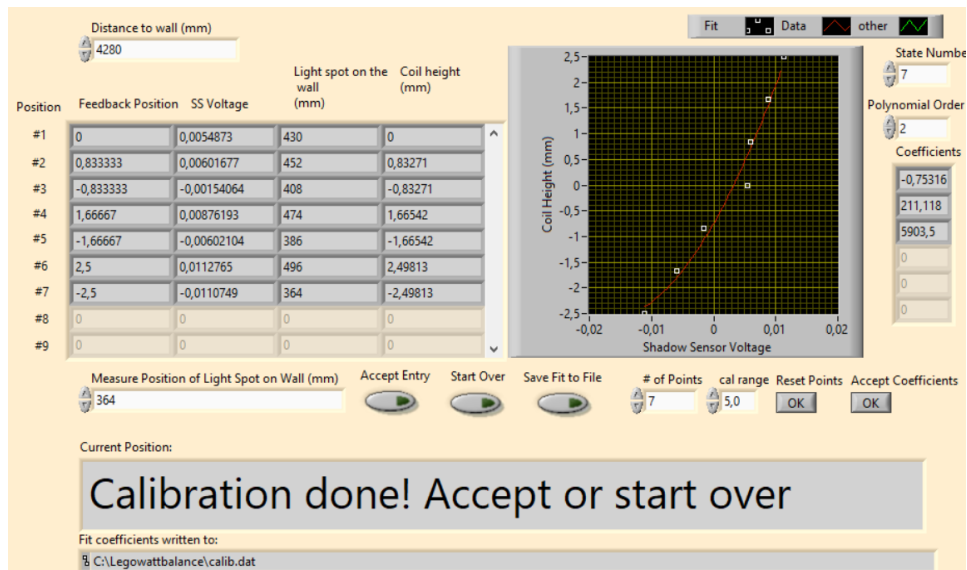
Před samotným měřením jsem musel v programu zaznamenat velikost napětí světelného senzoru ve stavu rovnováhy a následně provést jeho kalibraci. Kalibrace se provádí měřením napětí senzoru pro různá vychýlení cívek. Velikosti výchylek cívky pro kalibraci jsou uvedené v milimetrech na obrázku 18, ve sloupci *Feedback Position*.

Abych mohl nastavit jednotlivé výchylky cívky, potřeboval jsem si je nejprve převést na výchylky laseru na zdi. Převod výchylek jsem provedl podle obrázku Obrázek 17, spojením rovnic (4.1) a (4.2):

$$x_i = \frac{z_i d}{r_{eff}} + x_0 \quad (4.7)$$

Po přepočítání výchylek jsem pomocí potenciometru postupně nastavoval velikost stejnosměrného signálu tak, abych dosáhl potřebných výchylek zaznačených na ozařovaném pravítku, a podle potřeby jsem přepínal polaritu cívek, abych mohl vychylovat cívku oběma směry.

Během měření byla vzdálenost od zdi $d = 4280$ mm, což jsem změřil pomocí svinovacího metru.



Obrázek 18: Kalibrace světelného senzoru v programu od instituce NIST

4.2.2 Měření rychlostního módu

Během rychlostního měření jsem do řídicí cívky pustil sinusový signál, který uvedl cívku do kmitavého pohybu v rozmezí 4mm, k tomu jsem využil generátor signálu FY3200S. Rychlost v je měřena jako derivace polohy cívky z v čase Δt , kde polohu máme stanovenou z lineární závislosti napětí senzoru na výchylce a čas je dán vzorkováním.

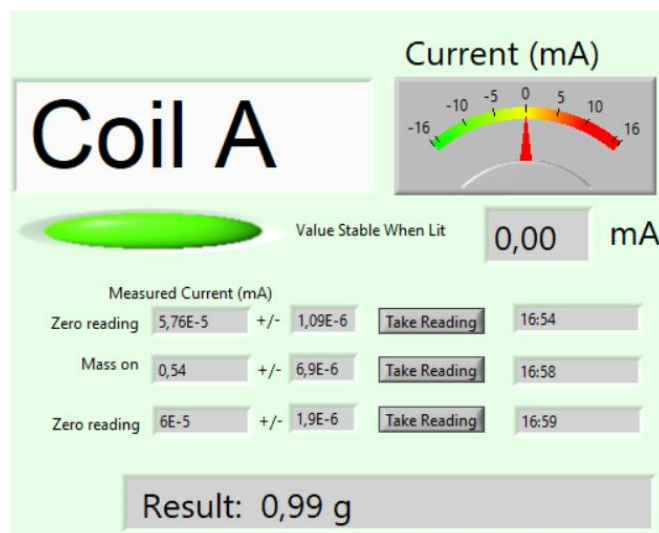
Vyvolaným pohybem cívek se indukovalo napětí (v řádu milivoltů) na měřicí cívce, hodnoty tohoto napětí jsou v programu zaznamenány příslušnými hodnotami rychlosti a jejich poměrem je stanovena velikost BL složky, jak je popsáno v rovnici (4.4)



Obrázek 19: Rychlostní mód měření v programu od NIST

4.2.3 Měření hmotnostního módu

Při měření hmotnosti jsem nejprve zaznamenal hodnotu nezatížená váhy ve stavu rovnováhy, jak lze vidět na obrázku 20. Následně jsem váhu zatížil závažím, hmotnost jsem kompenzoval DC proudem, jehož velikost jsem reguloval tak, abych váhy uvedl zpět do rovnováhy, a zaznamenal jsem velikost potřebného proudu.



Obrázek 20: Hmotnostní mód měření v programu od NIST

Měření proudu je prováděno jako měření napětí přes známý odpor $R = 1462 \Omega$. Přesnou hodnotu jsem změřil pomocí multimetru CM2703 a zapsal jsem ji v nastavení programu.

Měření jsem provedl pro třígramová závaží, u kterých jsem zkontroloval jejich hmotnost pomocí analytických vah RADWAG AS310.R2. Jednalo se o tři matice M5, měření hmotnosti jsem prováděl pro každou z nich a následně jsem je zvažil všechny dohromady. Srovnání naměřených hmotností jsem uvedl v tabulce 4, kde jsem navíc uvedl absolutní a relativní chyby měření Kibbleových vůči přesným analytickým vahám. Absolutní chybu Δ_x jsem vypočetl podle vzorce:

$$\Delta_m = m_{AS} - m_{Kibble} \quad (4.8)$$

Relativní chybu δ_x jsem vypočetl podle vzorce:

$$\delta_m = \frac{\Delta_m}{m_{Kibble}} 100 \quad (4.9)$$

Tabulka 4: Srovnání naměřených hodnot hmotnosti závaží

Závaží	AS310.R2 [g]	Kibbleovy váhy [g]	Δ_m [-]	δ_m [%]
Matice A	1,016	1,00	0,016	1,600
Matice B	1,000	0,99	0,010	1,010
Matice C	1,006	1,02	0,014	1,667
A+B+C	3,022	2,99	0,032	1,070

Přesnost naměřených hodnot byla ovlivněna omezenou citlivostí regulace proudu, s vyšší citlivostí by bylo možné určit hmotnosti měřených závaží přesněji. Největší relativní odchylka měření byla 1,667 % při měření matice C.

ZÁVĚR

V kapitole 1 byly vysvětleny změny týkající se redefinice soustavy SI jednotek, v části 1.2 byly popsány hlavní důvody, které motivovaly změnu definice soustavy a v části 1.3 byly uvedeny všechny definující konstanty.

V kapitole 2 byl vysvětlen koncept Kibbleových vah, byl popsán jejich základní princip a byly představeny všechny hlavní druhy realizace. V části 2.4 proběhlo seznámení s experimentálními prototypy Kibbleových vah, byl vysvětlen způsob jejich funkce a jejich vzájemné odlišnosti.

Na základě předchozí části byly v kapitole 3 vyhodnoceny jednotlivé návrhy prototypů a byl zvolen nejvhodnější návrh, podle kterého jsem postupoval při návrhu a realizaci prototypu Kibbleových vah.

Ve čtvrté kapitole byl popsán postup jednotlivých fází měření, následně byl vysvětlen postupný průběh pokusného měření, byly zváženy testovací hmotnosti a vypočteny hodnoty jejich absolutních a relativních chyb měření. Nejvyšší relativní odchylka byla 1,667 %, která je dostačující pro názornost tohoto projektu.

Prototyp Kibbleových vah má své nedostatky a je dozajista co zlepšovat, počínaje vytvořením nové verze programu pro ovládání Kibbleových vah, která by byla kompatibilní s USB-6215 a umožňovala by úpravu rozložení vstupů a výstupů programu. Dalším možným zlepšením, pro vyšší přesnost měření, by bylo použití laserového dálkoměru místo svinovacího metru na měření vzdálenosti od zdi. Důležitým aspektem měření je volný pohyb cívek – při testování jsem si povšiml, že se občas magnety dotýkají vnitřní strany cívek a narušují tak jejich plynulý pohyb. Možným řešením by bylo zvětšení vnitřního průměru cívek o 1–2 mm, což by měla být dostačující úprava. U odrazové plochy laseru jsem použil zrcadlovou fólii, kterou bych do budoucna nahradil zrcátkem o velikosti 20 x 20 mm, aby byl odrážený paprsek co nejpřesnější. Nakonec by bylo vhodné umístit pod spodní permanentní magnety zarážku, která by bránila cívkám v příliš velkém vyklonění z pole magnetického systému.

ZDROJE

- [1] DAVIS, Richard. An introduction to the revised international system of units (SI). *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine* [online]. 2019, **22**(3), 4-8 [cit. 2020-12-31]. ISSN 1094-6969. Dostupné z: doi:10.1109/MIM.2019.8716268
- [2] *SI Illustration Guidelines* [online]. Bureau International des Poids et Mesures, 2019, 4 [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: <https://www.bipm.org/utils/common/pdf/SI-Illustration-Guidelines.pdf>
- [3] *The International System of Units (SI): SI Brochure* [online]. 9. Bureau International des Poids et Mesures, 2019 [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: <https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/>
- [4] *Zpráva o 26 CGPM* [online]. Český metrologický institut, 2018, 2. Dostupné z: https://www.cmi.cz/redefinice_SI
- [5] MOHR, Peter J., David B. NEWELL a Barry N. TAYLOR. CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2014. *Reviews of Modern Physics* [online]. 2016, **88**(3) [cit. 2020-12-31]. ISSN 0034-6861. Dostupné z: doi:10.1103/RevModPhys.88.035009
- [6] HUDLIČKA, Martin. *Redefinice soustavy jednotek SI* [online]. Praha: Pravidelné setkání zájemců o mikrovláknovou techniku, 2019, 15.5.2019, **50**, 8 [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: http://web.cvut.cz/ces/mt/Hudlicka_Redefinice_SI_web.pdf
- [7] SCHLAMMINGER, Stephan, Patrick ABBOTT, Zeina KUBARYCH, Dean JARRETT a Randolph ELMQUIST. The units for mass, voltage, resistance, and electrical current in the SI. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine* [online]. 2019, **22**(3), 9-16 [cit. 2020-12-31]. ISSN 1094-6969. Dostupné z: doi:10.1109/MIM.2019.8716269
- [8] ROBINSON, Ian A a Stephan SCHLAMMINGER. The watt or Kibble balance: a technique for implementing the new SI definition of the unit of mass. *Metrologia* [online]. 2016, **53**(5), A46-A74 [cit. 2020-12-31]. ISSN 0026-1394. Dostupné z: doi:10.1088/0026-1394/53/5/A46
- [9] *The International System of Units (SI): Appendix 2* [online]. 9. Bureau International des Poids et Mesures, 2019 [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: <https://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/>
- [10] SCHLAMMINGER, Stephan a Darine HADDAD. *The Kibble balance and the kilogram*. *Comptes Rendus Physique* [online]. 2019, **20**(1-2), 55-63 [cit. 2020-12-31]. ISSN 16310705. Dostupné z: doi:10.1016/j.crhy.2018.11.006

- [11] Ortiz, Gerardo & Dukelsky, Jorge. *What is a Cooper pair?* [online]. 2006. Condensed Matter Theories, Vol. 21, Eds. H. Akai, A. Hosaka, H. Toki, and F. B. Malik (Nova Science Publishers, Inc., Huntington, New York, (2007)). https://www.researchgate.net/publication/1852026_What_is_a_Cooper_pair
- [12] *Fundamental Physical Constants—Extensive Listing* [online]. 2018. CODATA adjustment. [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: <https://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>
- [13] HADDAD, D, F SEIFERT, L S CHAO, S LI, D B NEWELL, J R PRATT, C WILLIAMS a S SCHLAMMINGER. Bridging classical and quantum mechanics. *Metrologia* [online]. 2016, **53**(5), A83-A85 [cit. 2020-12-31]. ISSN 0026-1394. Dostupné z: doi:10.1088/0026-1394/53/5/A83
- [14] CHAO, Leon, Frank SEIFERT, Darine HADDAD, Julian STIRLING, David NEWELL a Stephan SCHLAMMINGER. The Design and Development of a Tabletop Kibble Balance at NIST. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* [online]. 2019, **68**(6), 2176-2182 [cit. 2020-12-31]. ISSN 0018-9456. Dostupné z: doi:10.1109/TIM.2019.2901550
- [15] CHAO, L. S., S. SCHLAMMINGER, D. B. NEWELL, et al. A LEGO Watt balance: An apparatus to determine a mass based on the new SI. *American Journal of Physics* [online]. 2015, **83**(11), 913-922 [cit. 2020-12-31]. ISSN 0002-9505. Dostupné z: doi:10.1119/1.4929898
- [16] T.G. Mamteja, H. Potgieter, A.E. Karsten, A. Buffer. *NMISA's precursor Kibble watt balance* [online]. 2018. T&M 2018 Conference Proceedings. Dostupné z: http://www.nla.org.za/webfiles/conferences/2018/Proceedings/Manuscripts/Monday%2C%208%20October%202018/M106%20-%20NMISA%20Kibble%20Watt%20balance%20precursor_peer%20reviewed.pdf
- [17] SONNTAG, Christoph, Thapelo MAMETJA a Aletta KARSTEN. A Low-Cost Kibble Balance for Africa. In: *2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)* [online]. IEEE, 2020, 2020, s. 1-2 [cit. 2020-12-31]. ISBN 978-1-7281-5898-3. Dostupné z: doi:10.1109/CPEM49742.2020.9191904
- [18] HILLHOUSE, Grady. *Redefining the Kilogram – Desktop Watt Balance* [online]. Practical Engineering, 2019, July 2019 [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: <https://practical.engineering/blog/2016/9/25/redefining-the-kilogram-desktop-watt-balance>
- [19] MSL LEGO Kibble Balance. *Youtube* [online]. Measurement Standards Laboratory of NZ, 2018, August 2018 [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=-bKd81UtRW0>

- [20] WINKLESS, Laurie. MSL LEGO Kibble Balance: Photo. In: *Twitter* [online]. August 2018 [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: https://twitter.com/laurie_winkless/status/1157056092855123973
- [21] MAMETJA, Thapelo Given. An uncertainty budget for the precursor Watt balance for South Africa. [J.]. ,Faculty of Science ,Department of Physics, 2019 [cit. 2022-4-20]. Available from: <http://hdl.handle.net/11427/31583>