

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

MECHANICKÉ VÁHY S POKROČILÝMI FUNKCEMI



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Znamenáček** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **456392**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Mechanické váhy s pokročilými funkcemi

Název bakalářské práce anglicky:

Mechanical scales with advanced features

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s metodami a mechanismy používanými pro vážení.
- 2) Pro vybraný typ váhy proveďte silovou a kinematickou analýzu.
- 3) Vybraný typ váhy modifikujte tak, aby disponovala pokročilými funkcemi vážení s možností bezdrátového přenosu signálu.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Valášek M., Stejskal V., Březina J.: Mechanika A. ČVUT, Praha, 2007.
[2] Valášek M., Bauma V., Šika Z.: Mechanika B. ČVUT, Praha, 2007.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Zavřel, Ph.D., odbor mechaniky a mechatroniky FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **24.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **17.08.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Jan Zavřel, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Milan Růžička, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Anotační list

Jméno autora:	Jakub Znamenáček
Název bakalářské práce:	Mechanické váhy s pokročilými funkcemi
Anglický název:	Mechanical scales with advanced features
Akademický rok:	2017/2018
Studijní obor:	Teoretický základ strojního inženýrství
Ústav:	Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Jan Zavřel, Ph.D.
Bibliografické údaje:	39 stran 31 obrázků 1 tabulka příloha – CD s programem
Klíčová slova:	mechanical scales, loadcell, tensometer, arduino, scales history

Abstrakt: Tato bakalářská práce se zabývá modernizací starých mechanických vah, aby mohly být pohodlně použitelné i v dnešní době. Práce obsahuje přehled historického vývoje vah od prvních objevů až po moderní tenzometrické metody. V praktické části je popsána realizace úprav měřidla, a to od výběru senzorů až po tvorbu aplikace pro mobilní telefony.

Abstrakt: This bachelor thesis deals with the modernization of old mechanical scales so that they are convenient to use today. The work contains an overview of the historical development of the scales from the first discoveries to the modern strain gauging methods. In the practical part is described implementation of gauging modifications, from the selection of sensors to the creation of applications for mobile phones.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil pouze podklady uvedené v příloženém seznamu literatury.

V Praze dne _____

podpis

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval panu Ing. Janu Zavřelovi, Ph.D. za odborné vedení mé práce, podporu a jeho cenné rady, které vedly k úspěšnému dokončení mé bakalářské práce.

Obsah

1	ÚVOD.....	1
2	HISTORIE VÁŽENÍ.....	2
3	ZÁKLADNÍ TYPY MECHANICKÝCH VAH.....	4
3.1	ROVNORAMENNÉ VÁHY	4
3.2	NEROVNORAMENNÉ VÁHY	5
3.3	KYVADLOVÉ VÁHY.....	6
3.4	PRUŽINOVÉ VÁHY.....	8
4	DIGITÁLNÍ TENZOMETRICKÉ VÁHY.....	9
4.1	ZÁKLADNÍ PRINCIP TENZOMETRICKÝCH VAH	9
4.2	KOMPENZACE NECHTĚNÝCH VLVIVŮ	10
4.3	TYPY MŮSTKŮ	10
4.4	DEFORMAČNÍ ČLENY	12
4.5	BĚŽNĚ POUŽÍVANÉ DEFORMAČNÍ ČLENY	12
4.5.1	Deformační člen typu vetknutý nosník.....	12
4.5.2	Deformační člen typu S	13
4.5.3	Sloupcový deformační člen.....	13
5	KINEMATICKÉ ŘEŠENÍ MECHANISMU TRŽNÍCH VAH.....	14
5.1	KINEMATICKÉ SCHÉMA MECHANISMU TRŽNÍCH VAH	15
5.2	PRINCIP VIRTUÁLNÍCH PRACÍ.....	16
5.3	POČET STUPŇŮ VOLNOSTI	17
5.4	ZÁVISLOSTI MEZI JEDNOTLIVÝMI PROMĚNNÝMI	18
5.5	FUNKCE φ_1 V ZÁVISLOSTI NA ZATÍŽENÍ VAH	20
5.6	LINEARITA SYSTÉMU	21
6	VOLBA SOUČÁSTEK VHODNÝCH PRO MODIFIKACI VAH.....	25
6.1	ŘÍDICÍ JEDNOTKA.....	25
6.2	DEFORMAČNÍ ČLEN A AD PŘEVODNÍK	26
7	ZAPOJENÍ ELEKTRONIKY.....	28
7.1	DEFORMAČNÍ ČLEN, AD PŘEVODNÍK	28
7.2	AD PŘEVODNÍK, VÝVOJOVÁ DESKA	29

8	SOFTWAREVÁ ČÁST	30
8.1	MOBILNÍ APLIKACE.....	30
8.2	SOFTWARE VÝVOJOVÉ DESKY	32
8.2.1	Přípravy před programováním.....	32
8.2.2	Propojení desky s mobilní aplikací.....	33
8.2.3	Textový výpis do aplikace	35
8.2.4	Kalibrace.....	36
9	ZÁVĚR.....	37
10	POUŽITÁ LITERATURA A ZDROJE.....	38

Seznam obrázků

OBR. 1 – EGYPTSKÁ KNIHA MRTVÝCH (CS.WIKIPEDIA.ORG, 2018).....	2
OBR. 2 – SADA ZÁVAŽÍ (PETRUSO, 1981)	2
OBR. 3 – ZÁVAŽÍ VE TVARU LVA (BRITISHMUSEUM.ORG, 2018).....	2
OBR. 4 – PŘEZMEN (MUSEUM.VZVT.RU, 2018).....	3
OBR. 5 – ROVNORAMENNÉ VÁHY (CONCEITOZEN.COM, 2018).....	4
OBR. 6 – KINEMATICKÉ SCHÉMA MECHANISMU ROVNORAMENNÝCH VAH.....	4
OBR. 7 – NEROVNORAMENNÉ VÁHY (CS.WIKIPEDIA.ORG, 2018).....	5
OBR. 8 – KINEMATICKÉ SCHÉMA MECHANISMU NEROVNORAMENNÝCH VAH.....	6
OBR. 9 – KYVADLOVÉ VÁHY (ISASC.ORG, 2018).....	6
OBR. 10 – KINEMATICKÉ SCHÉMA MECHANISMU KYVADLOVÝCH VAH	7
OBR. 11 – PRUŽINOVÉ VÁHY	8
OBR. 12 – TENZOMETR.....	9
OBR. 13 – WHEATSTONŮV MŮSTEK	9
OBR. 14 – DEFORMAČNÍ ČLEN TYPU VETKNUTÝ NOSNÍK	12
OBR. 15 – DEFORMAČNÍ ČLEN TYPU S (VOLF, 2000).....	13
OBR. 16 – SLOUPCOVÝ DEFORMAČNÍ ČLEN	13
OBR. 17 – TRŽNÍ VÁHY	14
OBR. 18 – KINEMATICKÉ SCHÉMA MECHANISMU TRŽNÍCH VAH.....	15
OBR. 19 – KINEMATICKÉ SCHÉMA MECHANISMU TRŽNÍCH VAH V OBECNÉ POLOZE.....	16
OBR. 20 – POČET STUPŇŮ VOLNOSTI	17
OBR. 21 – ZÁVISLOSTI PROMĚNNÝCH.....	18
OBR. 22 – ZÁVISLOST Y_4 NA Y_2	18
OBR. 23 – ZÁVISLOST Y_1 NA Y_2	19
OBR. 24 – NODEMCU – 32S LUA TENSTAR ROBOT (AMAZON.COM, 2018).....	25
OBR. 25 – 3,3 V LOGIKA (HUANG, 2018)	26
OBR. 26 – PROPOJOVACÍ KABELY (FASTTECH.COM, 2018).....	28
OBR. 27 – PROPOJENÍ DEFORMAČNÍHO ČLENU A AD PŘEVODNÍKU HX711.....	28
OBR. 28 – PROPOJENÍ HX711 A VÝVOJOVÉ DESKY	29
OBR. 29 – BLYNK TVORBA APLIKACE	30
OBR. 30 – BLYNK TVORBA UŽIVATELKÉHO PROSTŘEDÍ	31
OBR. 31 – BLYNK UŽIVATELSKÉ PROSTŘEDÍ	31

Seznam tabulek

TAB. 1 – KOMPENZACE NECHTĚNÝCH VLIVŮ (VOLF, 2000).....	11
--	----

1 Úvod

Zdá se, že současná uspěchaná doba přispěla k návratu módních trendů, výrobků a doplňků z domácího prostředí. Tento trend se projevuje zejména u mladých spotřebitelů. Popularita využívání starších věcí bývá také spojována se změnou postoje spotřebitelů ke konzumnímu zboží. (Cassidy and Bennett, 2012)

Kromě tohoto, přispívají k růstu trendu „vintage fashion“, současní designéři, módní návrháři, a v neposlední řadě i média. Tohoto směru využívají také maloobchodníci, kteří mají lepší možnost prosadit se ručně vyráběnými produkty proti masově produkováným výrobkům na trhu plném velkých korporátních firem. Jejich obchody tak bývají často situovány do přírodního stylu s využitím starších doplňků, které mají navodit klidnou atmosféru a osvobodit zákazníky od uspěchaného světa tam venku.

Právě vzhled a atmosféra těchto prodejen bývají často narušeny nezbytnými moderními přístroji, jako jsou počítače, tiskárny, či digitální váhy. Tato bakalářská práce se zaměřuje na modernizaci starých mechanických vah tak, aby si zachovaly svůj starožitný vzhled a zároveň uživateli nabídly stejný, či alespoň podobný, komfort jako moderní digitální váhy.

2 Cíle bakalářské práce

Ze zadání vycházejí tyto cíle bakalářské práce:

1. Seznamte se s metodami a mechanismy používanými pro vážení.
2. Pro vybraný typ váhy proveďte silovou a kinematickou analýzu.
3. Vybraný typ váhy modifikujte tak, aby disponovala pokročilými funkcemi vážení s možností bezdrátového přenosu

3 Historie vážení

Měřením hmotnosti těles se člověk zabývá již od nepaměti. Ať již to bylo kvůli obchodu či z vědeckých důvodů, můžeme sledovat dlouhodobou snahu získání základních, pokud možno co nejobektivnějších jednotek pro měření veličin, jejich neustálé zpřesňování a rozšiřování. (Kolomý, 1969)

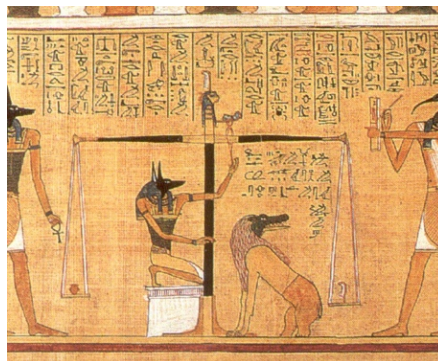
K prvnímu známému použití vah jako takových došlo v oblasti kolem středoziemního moře zhruba 4000 let před naším letopočtem. (Petrušo, 1981) O užívání vah ve starém Egyptě se dozvídáme z jejich vyobrazení v Egyptské knize mrtvých (OBR. 1). Ta znázorňuje rovnoramenné váhy jako symbol spravedlnosti, kdy je váženo srdce zemřelého.

Dalším důkazem rozšířnosti vah v té době jsou i četné nálezy archeologů, kteří objevili rovnoramenné váhy s jazýčkem z vápence, včetně sad pečlivě opracovaných kamínků, které s největší pravděpodobností sloužily jako závaží (OBR. 2). (Petrušo, 1981) Tyto váhy byly zprvu nejčastěji používány k vážení drahých kovů a kamenů, což naznačují i hieroglyfy na sadě závaží.

Více než dva tisíce let nedošlo ke změně principu vážení, velkého pokroku ovšem dosáhla závaží. V babylonské a asyrské říši, která se rozkládala severovýchodně od středoziemního moře, byly místo kamínků používány bronzové sochy lvů (OBR. 3), které byly velké od 3 centimetrů do 100 centimetrů. Jejich hmotnosti byly odstupňovány v rozmezí 60 gramů až 18 kilogramů a tyto údaje byly na soškách pečlivě vyryty v podobě čar. Velmi pozoruhodná byla přesnost, přičemž sošky označené patnácti symboly vážily 15,3 kg a sošky označené pouze pěti zářezy měly hmotnost mezi 4,9 a 5,1 kg.



OBR. 3 – závaží ve tvaru lva (britishmuseum.org, 2018)



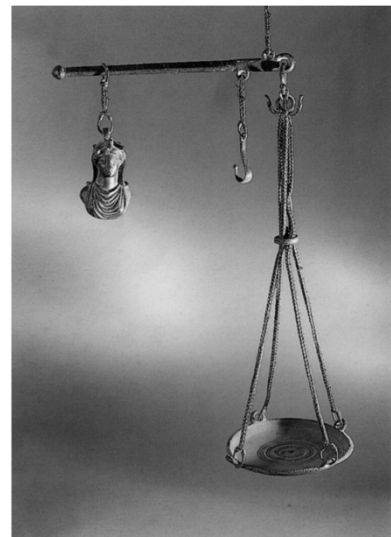
OBR. 1 – Egyptská kniha mrtvých (cs.wikipedia.org, 2018)



OBR. 2 – sada závaží (Petrušo, 1981)

(Britain and Ireland, 1834)

K další velké změně ve zjišťování hmotnosti těles došlo okolo roku 200 našeho letopočtu v říši římské. Tamní obyvatelé začali poprvé využívat nerovnoramenné váhy, toto dokazuje nález z Pompejí, kde byl objeven konkrétně přezmen (OBR. 4), závěsná nerovnoramenná váha s posuvným závažím. Tento typ vah je často spojován s počátky teoretické mechaniky. První dokument zmiňující vážení pomocí nerovnoramenných vah nese název „Problémy mechaniky“ kapitola „zákon rovnováhy“, jako jeho autor je považován Aristoteles. (Damerow et al., 2000) K rozšíření tohoto typu vah však dochází až o 500 let později. Dalším velkým pokrokem té doby bylo rozšíření sjednocených měr a vah.



OBR. 4 – přezmen
(museum.vzvt.ru, 2018)

V průběhu následujících let docházelo k vylepšování rovnoramenných a nerovnoramenných vah, případně vah od nich odvozených. Ty byly vyráběny s větší přesností a z kvalitnějších materiálů. Ke změně dochází až koncem osmnáctého století, kdy Richard Salter přichází s objevem pružinové váhy. (Benton, 1941) Tato váha neměla snahu nahradit rovnoramenné a nerovnoramenné váhy, nebyla tolik přesná, ale její mobilita a možnost vážit bez závaží si našla své příznivce. Nejvíce se rozšířila mezi zemědělci a farmáři, kteří nepotřebovali až takovou přesnost, ovšem mobilita pro ně byla prioritní.

Zhruba ve stejnou dobu přišel Philipp Matthäus Hahn pocházející ze Stuttgartu (Biener, 1999) s myšlenkou kyvadlové váhy. Jednalo se o jednu z nejméně úspěšných vah v daném tisíciletí. (Jenemann, 1980) Tato váha přinášela stejnou jednoduchost jako váhy pružinové, ovšem byla přesnější a přišla na trh o něco dříve, což způsobilo její ohromné rozšíření.

Na další významnou změnu v technologii zjišťování hmotnosti těles si lidé museli počkat až do poloviny dvacátého století, kdy byly světu představeny první tenzometry. Za jejich objevením stojí Edward E. Simmons (Simmons, 1946) a Arthur C Ruge (Ruge, 1944). Od té doby svět prochází značnou digitalizací a váhy nejsou výjimkou. S jejich digitální verzí, založenou právě na tenzometrech, se setkáváme každý den.

4 Základní typy mechanických vah

4.1 Rovnoramenné váhy

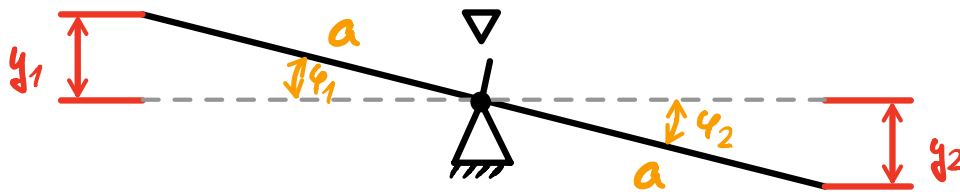
Nejstarším a zároveň nejjednodušším typem vah jsou váhy rovníramenné (OBR. 5). Jejich mechanismus je založen na volně uloženém rameni, které od rotační vazby přesahuje na obě strany o stejnou vzdálenost. Zjišťování hmotnosti poté probíhá zatížením jednoho konce váženým předmětem a následně přidáváním závaží na druhé rameno, dokud se jazýčky vah neustálí proti sobě. Poté působí vážený objekt na rameno stejnou silou, jako je tíha vyvolaná závažími. Jelikož síly působí na stejných ramenech, jsou i momenty vyvolané těmito silami stejné a vynulují se.



OBR. 5 – rovníramenné váhy (conceitozen.com, 2018)

Kinematické schéma mechanismu

Kinematické schéma (OBR. 6) se skládá pouze z jednoho tělesa, a to rameno vah. Úhly φ_1 a φ_2 , které svírá rameno s vodorovnou přímkou procházející rotační vazbou, jsou na obou stranách stejné a právě kvůli shodné délce ramen jsou shodné i posuvy y_1 a y_2 , jak vyplývá z rovnice (1).

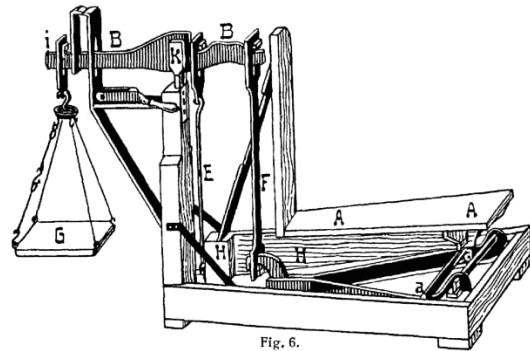


OBR. 6 – kinematické schéma mechanismu rovníramenných vah

$$\sin\varphi = \frac{y_1}{a} = \frac{y_2}{a} \quad (1)$$

4.2 Nerovnoramenné váhy

Nerovnoramenné váhy jsou modifikací předchozího měřidla, liší se však rozdílnou délkou přesahů ramene od rotační vazby. Tato úprava má za následek možnost použití lehčích závaží či dokonce závaží jednoho. Vše opět vychází z momentové rovnice. Pokud má nastat rovnovážná poloha, musí se momenty M_1 a M_2 svou velikostí rovnat (2) a (3).



OBR. 7 – nerovnoramenné váhy
(cs.wikipedia.org, 2018)

$$M_1 = M_2 \quad (2)$$

$$F_1 \cdot a = F_2 \cdot b \quad (3)$$

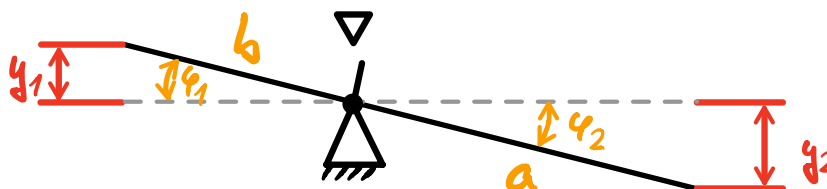
$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{b}{a} \quad (4)$$

V rovnovážném stavu musí poměr sil F_1 a F_2 odpovídat převrácenému poměru délek ramen a a b , na kterých zmiňované síly působí viz rovnice (4). Nerovnoramenné váhy mohou být děleny do dvou kategorií - váhy s proměnou délkou ramen a váhy s konstantní (neměnnou) délkou. Typickým představitelem první skupiny je přezmen (OBR. 4). Jedná se o závěsnou nerovnoramennou váhu, jejíž princip je založen na změně polohy působíště tíhové síly závaží od osy otáčení. Vyrovnání velikosti momentu M_1 na konstantním ramenu je tedy způsobeno prodloužením ramene působíště síly F_2 vyvolané závažím.

Zástupcem druhé skupiny mohou být uvedeny váhy zvané „decimálky“. Jedná se o váhy s konstantním převodem (jedna ku deseti), které byly využívány pro vážení těžkých věcí.

Kinematické schéma mechanismu

Kinematické schéma (OBR. 8) je obdobné jako u rovnoramenných vah. Opět se skládá pouze z jednoho tělesa a stejně jako předtím platí, že úhly φ_1 a φ_2 , které svírá rameno s vodorovnou osou procházející rotační vazbou, jsou na obou stranách shodné. Jak ovšem plyne z rovnice (5) stejná velikost úhlů φ_1 a φ_2 zde neznamená stejné posuny. Ty jsou totiž v poměru délek ramen a a b .



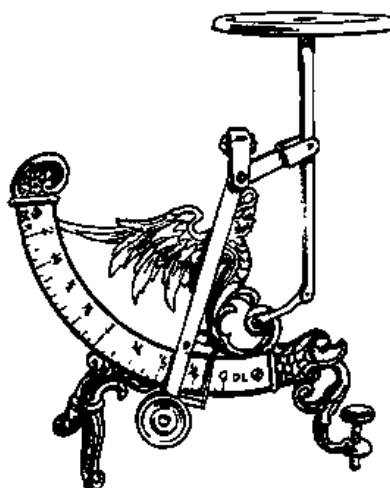
OBR. 8 – kinematické schéma mechanismu nerovnoramenných vah

$$\sin\varphi = \frac{y_1}{a} = \frac{y_2}{b} \rightarrow \frac{y_1}{y_2} = \frac{a}{b} \quad (5)$$

4.3 Kyvadlové váhy

S příchodem kyvadlových vah (OBR. 9) byla odstraněna největší nevýhoda dosavadních měřidel. Tento mechanismus totiž umožňoval vážení bez jakékoli manipulace se závažím. I zde podobně jako u vah nerovnoramenných s proměnnou délkou ramene docházelo ke změně polohy působivé síly. Tato změna ovšem již nemusela být prováděna obsluhou, nýbrž se rameno samo měnilo, dokud mechanismus nedosáhl rovnovážného stavu.

Díky jazýčku, který se pohyboval společně se závažím bylo možné hned po ustálení odečíst přesnou číselnou hodnotu na stupnici. Jednou z nevýhod byla ovšem její značná nelinearita.

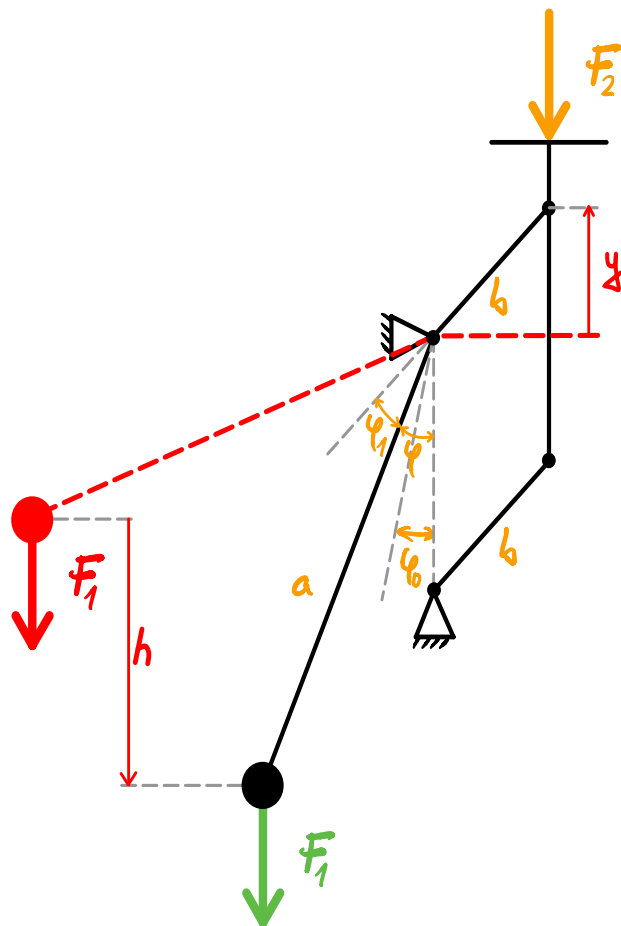


OBR. 9 – kyvadlové váhy (isasc.org, 2018)

Kinematické schéma mechanismu

Kinematické schéma tohoto mechanismu se skládá ze tří těles a ze čtyř rotačních vazeb. Těleso se závažím je spojeno s rámem a zároveň je na jeho konec přivedena síla vyvolaná váženým objektem. Úhel φ_1 mezi rameny délek a a b je konstantní.

Miska vah, kde působí síla vyvolaná zátěží, je udržována v rovině pomocí paralelogramu. Úhel nezatíženého mechanismu φ_0 je vyvolán vlastní tíhou ramene délky b a zbylých částí mechanismu nacházejících se na druhé straně než rameno délky a se závažím. Jakmile dojde k zatížení vychýlí se rameno o úhel φ , čímž se zvětší kolmá vzdálenost působíště síly F_1 od osy otáčení a mechanismus dospěje do stavu rovnováhy, viz OBR. 10.



OBR. 10 – kinematické schéma mechanismu kyvadlových vah

Z principu virtuálních prací lze vyjádřit φ jako funkci F_2 viz rovnice (6). Toto řešení zanedbává vlastní tíhu ramene vah a těles na pravé straně (nepočítá s úhlem φ_0), která je oproti silám vyvolaným závažím malá.

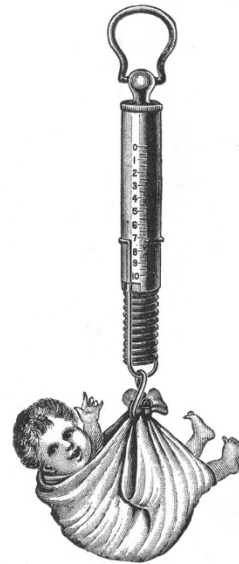
$$\varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{F_2 \cdot b \cdot \sin \varphi_1}{F_1 \cdot a - F_2 \cdot b \cdot \cos \varphi_1}\right) \quad (6)$$

4.4 Pružinové váhy

Dalším typem vah, kde není potřeba používat závaží jsou váhy pružinové (OBR. 11). Ty využívají platnosti Hookova zákona. Základem pružinových vah, jak již název napovídá, je pružina. Po jejím zatížení silou způsobenou hmotností tělesa se její délka změní o délku Δl , která je přímo úměrná hmotnosti předmětu.

Při zjišťování hmotnosti je tedy měřena deformace pružiny. Tímto se pružinové váhy podobají dnešním digitálním vahám, které též fungují na principu deformace.

S tímto typem vah se běžně můžeme setkat i dnes. Jsou využívány zejména jako ruční váhy zavazadel. Zde si své místo udržely převážně kvůli své jednoduchosti a nízké ceně. Důležité je také to, že při tomto použití není vyžadována vysoká přesnost.



OBR. 11 – pružinové váhy
(moziru.com, 2018)

5 Digitální tenzometrické váhy

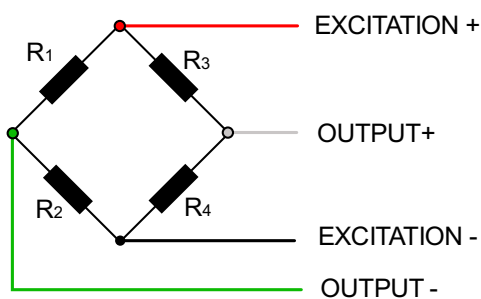
V dnešní době se ovšem setkáváme hlavně s tenzometrickými váhami. Tyto váhy umožňují velmi přesná měření a zároveň snadnou a rychlou digitalizaci jejich výstupu, čehož se využívá nejen při automatizaci ve výrobním procesu, v pokladnách potravních řetězců, ale i u chytrých osobních vah, které data o hmotnosti uživatele mohou v reálném čase odesílat do jeho chytrého telefonu.

5.1 Základní princip tenzometrických vah

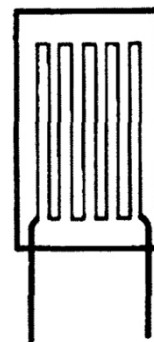
Je známo, že elektrický odpor materiálů se mění v závislosti na mechanické deformaci. Tato vlastnost může být zdrojem chyb při řadě měření, dala ovšem také možnost vzniku tenzometrů, zařízení měřících napětí (OBR. 12). (Fraden, 2004)

Jelikož mechanické deformace bývají běžně velmi malé, dochází také pouze k nepatrným změnám odporu. Přímé měření rozdílu napětí by tedy nemělo moc velký význam. V roce 1845 byl však anglickým fyzikem Sirem Charlesem Wheatstonem objeven elektrický můstek určený k měření elektrického napětí (Hoffmann, 1974). Měření napětí pomocí tohoto můstku, známého jako Wheatstonův můstek, je vhodné i pro malé změny napětí.

Princip Wheatstonova můstku je založen na porovnání známých odporů a odporů neznámých (tenzometrů), celkově se můstek skládá ze čtyř rezistorů OBR. 13. K jedné úhlopříčce můstku je připojen zdroj elektrického napětí a na druhé úhlopříčce probíhá samotné



OBR. 13 – Wheatstonův můstek



OBR. 12 – tenzometr
(Volf, 2000)

měření. Změna odporu tenzometru v jedné větvi způsobí rozvážení můstku a díky tomu dojde k výrazné změně měřeného napětí. Tato změna však nemusí být způsobena pouze deformací tenzometru. Se změnou teploty dochází u kovových tenzometrů k růstu jejich odporu, což může zcela znehodnotit naměřená data. Udržet stále stejnou teplotu není možné, proto musí být tato změna kompenzována.

5.2 Kompenzace nechtěných vlivů

Aby byl můstek v rovnováze musí platit (7) (Volf, 2000)

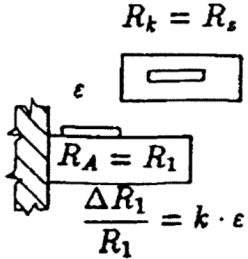
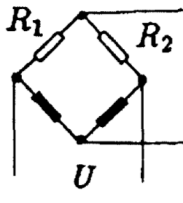
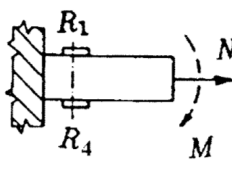
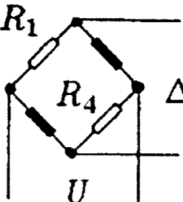
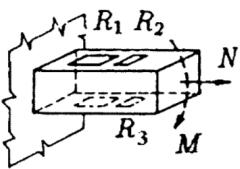
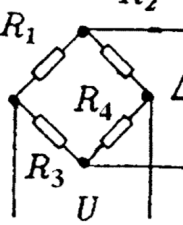
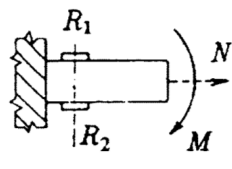
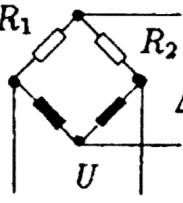
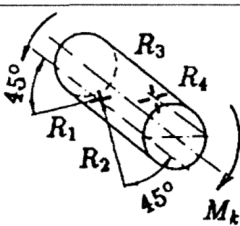
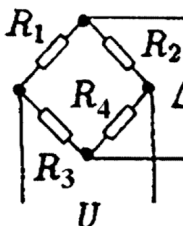
$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3 \quad (7)$$

pokud tedy budou na opačných stranách můstku zapojeny součástky se stejnými vlastnostmi vystavené stejným podmínkám jejich působení se navzájem vyruší. Při zapojení jednoho namáhaného tenzometru například jako R_1 a jednoho nenamáhaného tenzometru stejných parametrů jako R_2 vystaveného téže teplotě dojde k nárůstu na odporu vlivem teploty na obou stranách rovnice ve stejné míře a tím se vliv teploty na výsledné napětí zcela vyruší.

5.3 Typy můstků

Při zapojení dvou namáhaných tenzometrů na jedné straně rovnice (R_1 a R_4) a dvou kompenzačních (R_2 a R_3) dojde vlivem deformace ke dvojnásobné změně odporu na jedné straně rovnice, můstek se tedy rozváží více, tato situace má za následek dvojnásobnou citlivost měřícího obvodu. Takovýto můstek se poté nazývá půl můstek, analogicky pak při zapojení všech čtyřech tenzometrů namáhaných (plný můstek) citlivost stoupne na čtyřnásobek, zde je ovšem důležité, aby R_1 a R_4 byly namáhány nesouhlasně s R_2 a R_3 , tj. například R_1 a R_4 namáhány tahem a R_2 a R_3 tlakem.

Kompenzace se ovšem nemusí omezovat pouze na vlivy teploty, při správném zapojení tenzometrů lze kompenzovat ohybové momenty, přítláčivé síly, nebo osové síly, viz TAB. 1.

Měřená veličina	Uspořádání tenzometrů	Zapojení tenzometrů	Výstupní elektrické napětí z můstku
Deformace	 <p>$R_k = R_s$</p> <p>$R_A = R_1$</p> <p>$\frac{\Delta R_1}{R_1} = k \cdot \varepsilon$</p>		<p>Teplotní vlivy kompenzovány.</p> $\Delta U = \frac{U}{4R} (\Delta R_1 - \Delta R_2) =$ $= \frac{U}{4R} [(\Delta R_1 + \Delta R_{1T}) - \Delta R_{2T}]$ $= \frac{U}{4R} K[(\varepsilon + \varepsilon_T) - \varepsilon_T] = \frac{U}{4R} K\varepsilon$
Osová síla N			<p>Vliv ohyb. momentu M eliminován.</p> <p>Teplotní vlivy nekompensovány.</p> $\Delta U = \frac{U}{4R} (\Delta R_1 - \Delta R_4) =$ $= \frac{U}{4R} K[(\varepsilon_N + \varepsilon_M + \varepsilon_T) +$ $+ (\varepsilon_N - \varepsilon_M + \varepsilon_T)] =$ $= \frac{U}{4R} 2K(\varepsilon_N + \varepsilon_T)$
Osová síla N	 <p>$\varepsilon_{1N} = \varepsilon_{4N}$</p> <p>$\varepsilon_{2N} = \varepsilon_{3N} = k_1 \varepsilon_{1N}$</p>		<p>Vlivy ohybového momentu, resp. příčné síly F eliminovány.</p> <p>Teplotní vlivy kompenzovány.</p> $\Delta U = \frac{U}{4R} (\Delta R_1 - \Delta R_2 + \Delta R_4 - \Delta R_3)$ $= \frac{U}{4R} K[(\varepsilon_{11N} + \varepsilon_{1M} + \varepsilon_T) -$ $- (-\mu\varepsilon_{2N} - \mu\varepsilon_{2M} + \mu\varepsilon_T) +$ $+ (\varepsilon_{41N} - \varepsilon_{41M} + \varepsilon_T) -$ $- (-\mu\varepsilon_{3N} - \mu\varepsilon_{3M} + \mu\varepsilon_T)] =$ $= \frac{U}{4R} 2K(\varepsilon_{1N} + \mu\varepsilon_{2N}) =$ $= \frac{U}{4R} 2K(1 + k_1\mu)\varepsilon_N$
Ohybový moment M			<p>Vliv osové síly N eliminován.</p> <p>Teplotní vlivy kompenzovány.</p> $\Delta U = \frac{U}{4R} (\Delta R_1 - \Delta R_2) =$ $= \frac{U}{4R} K[(\varepsilon_N + \varepsilon_M + \varepsilon_T) -$ $- (\varepsilon_N - \varepsilon_M + \varepsilon_T)] =$ $= \frac{U}{4R} 2K\varepsilon_M$
Krouticí moment Mk			<p>Vliv ohybového momentu M a osové síly N eliminován.</p> <p>Teplotní vlivy kompenzovány.</p>

TAB. 1 – kompenzace nechtěných vlivů (Volf, 2000)

5.4 Deformační členy

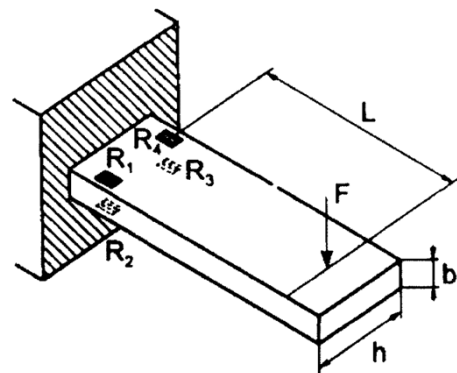
Tenzometry slouží obecně k měření deformace, jejich aplikace jsou velmi široké. Použití se dají téměř na vše od měření napětí na rámu jízdního kola až po robotickou paži využívající měření deformace k tomu, aby nedošlo k poškození uchopeného předmětu příliš velkou silou (Muller et al., 2010). V takovýchto případech bývají tenzometry nejčastěji upevněny přímo na konstrukci pro minimalizaci rozměrů a přesnosti umístění. Pokud se ovšem jedná o běžnější, často opakovanou aplikaci, jsou většinou využity deformační členy.

Deformační člen je snímač, který má již z výroby přesně umístěné tenzometry, které kompenzují nechtěné vlivy. Jeho použití je velmi jednoduché, stačí jej pouze připojit ke zdroji napětí a již je možné odečítat hodnoty, neboť jeho součástí je i Wheatstonův můstek.

5.5 Běžně používané deformační členy

5.5.1 Deformační člen typu vetknutý nosník

Deformační člen typu vetknutý nosník (OBR. 14) je jedním ze základních typů deformačních členů a je určen zpravidla pro malé síly do desítek kN (Volf, 2000). Tenzometry jsou umístěny na vrchní a spodní straně nosníku. Ten je působením síly F namáhán ohybovým momentem, který způsobuje tahové namáhání tenzometrů R_1 a R_4 a tlakové namáhání tenzometrů R_2 a R_3 . Jedná se o typické využití plného můstku, toto rozmístění má za následek velkou citlivost senzoru.

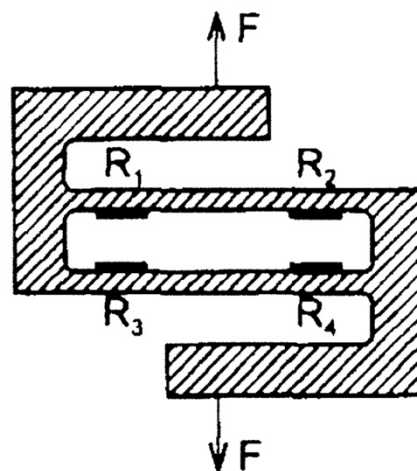


OBR. 14 – deformační člen typu vetknutý nosník
(Volf, 2000)

5.5.2 Deformační člen typu S

Deformační člen typu S (OBR. 15) dostal jméno podle svého tvaru, který připomíná písmeno S. Tento typ deformačního členu je velmi rozšířený, jeho použití se uplatňuje při měření hladiny nádrží, hmotnosti zásobníků či jako senzor ve vahách určených pro nákladní vozidla (Ghanvat and Patil, 2012).

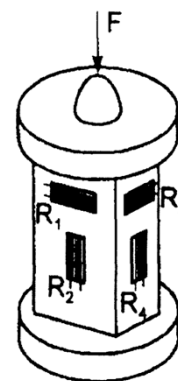
Velkou výhodou deformačního členu typu S je jeho odolnost vůči zničení přetížením. Pokud by došlo zatížení větší silou, než na kterou je senzor stavěn, dojde k dosednutí zatěžovaných částí na část prostřední, a tedy ke skokovému zvýšení tuhosti.



OBR. 15 – deformační člen typu S (Volf, 2000)

5.5.3 Sloupcový deformační člen

Sloupcový deformační člen je určen hlavně pro vysoké síly nad 10 kN (Volf, 2000), k těmto aplikacím je vhodný hlavně kvůli své odolnosti vůči přetížení. Velmi často bývá používán při vážení letadel a určování jejich těžiště. Letadlo je nadzvednuto na více místech pomocí hydraulických heverů, na jejichž koncích se nachází deformační člen. Tato vážení jsou potřebná nejen při stavbě nového modelu letadla, ovšem i při rekonstrukci interiéru. Špatné rozmístění sedadel by mohlo mít za následek změnu těžiště letounu a tím i následnou změnu ovladatelnosti.



OBR. 16 – sloupcový deformační člen

(Volf, 2000)

6 Kinematické řešení mechanismu tržních vah



OBR. 17 – tržní váhy

Tato kapitola bude věnována řešení kinematického mechanismu tržních vah. Kinematické řešení se v první řadě zabývá hledáním vztahů mezi jednotlivými souřadnicemi, které určují polohu těles mechanismu.

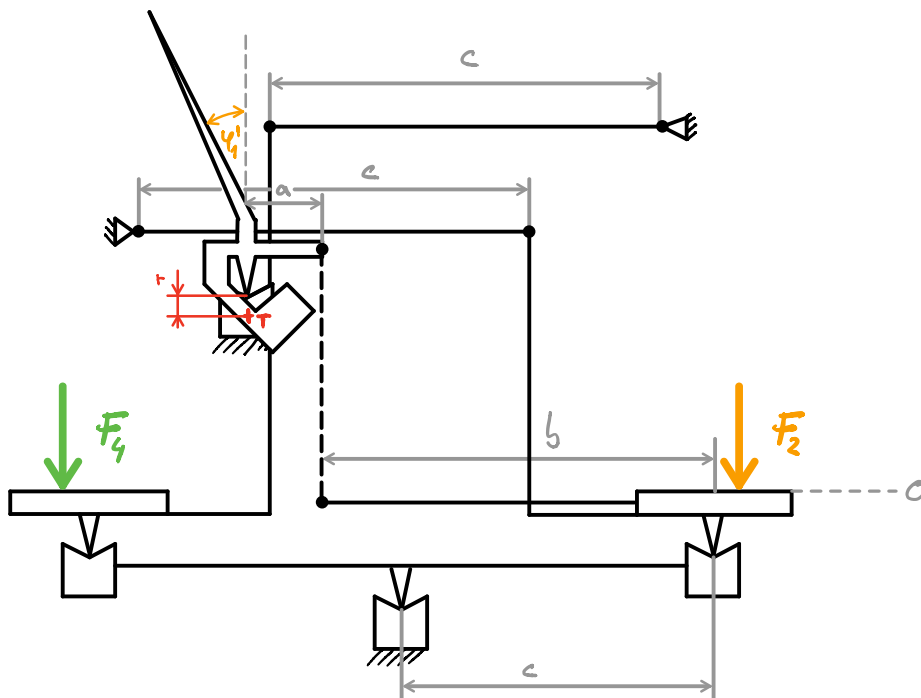
Na OBR. 17 jsou vidět tržní váhy po sundání předního krytu. Z obrázku je patrné, že tyto váhy budou příbuzné vahám kyvadlovým. Obrys závaží upevněného mimo své těžiště je vyznačen na obrázku. K tomuto tělesu je pevně připojena ručička vah, která po zatížení ukazuje naváženou hodnotu. Velikost ramene, na kterém síla M vyvolaná hmotností závaží působí, je rovna kolmé vzdálenosti těžiště T od rotační vazby (na tomto obrázku je velikost tohoto ramene rovna nule). Jak již bylo

zmíněno v kapitole o kyvadlových vahách, tak na téže těleso musí být kvůli měření přivedena i síla od váženého objektu. V tomto případě se jedná o sílu F působící na rameni o velikosti rovné kolmé vzdálenosti rotační vazby a působišti této síly.

Tržní váhy ovšem nejsou pouze váhy kyvadlové, jedná se o kombinaci s vahami rovnoramennými. Toto skloubení má za následek větší rozsah měření.

6.1 Kinematické schéma mechanismu tržních vah

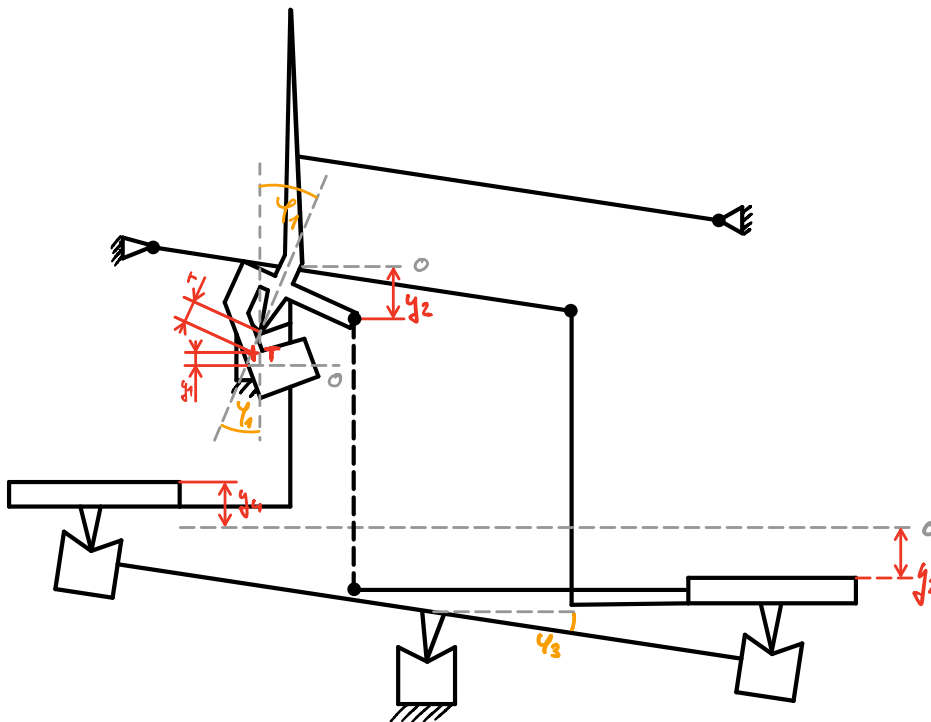
Na OBR. 18 je znázorněno kinematické schéma mechanismu tržních vah. Jedná se o mechanismus složený ze šesti těles, která jsou mezi sebou spojena břitovými vazbami, které mají příznivý vliv na minimalizaci tření a tím zpřesňují i prováděná měření. Z obrázku je patrné, že rovina misek vah je udržována pomocí paralelogramu.



OBR. 18 – kinematické schéma mechanismu tržních vah

Část mechanismu založená na principu rovníramenných vah zde má velký význam při změně rozsahu stupnice. Při zatížení mechanismu silou F_4 dojde na základě odečtení momentů ke změně velikosti výsledné síly F (OBR. 17), která je dána rozdílem $F = F_2 - F_4$. Jak dále vyplýne z výpočtů má tento princip vliv také na nelinearitu stupnice.

Na OBR. 19 je pak vyobrazen mechanismus v obecné poloze.



OBR. 19 – kinematické schéma mechanismu tržních vah v obecné poloze

6.2 Princip virtuálních prací

Při hledání rovnovážné polohy tohoto mechanismu je výhodné použít princip virtuálních prací, který pracuje s tím, že celková virtuální práce je při libovolných virtuálních posuvech nulová. Platí tedy rovnice:

$$\delta W = \sum_{A=1}^p F_A \cdot \delta r_A = 0 \quad (8)$$

$$\delta W = \sum_{A=1}^p F_A \cdot \left(\sum_{j=1}^n \frac{\partial r_A}{\partial q_j} \delta q_j \right) = \sum_{j=1}^n \left(\sum_{A=1}^p F_A \cdot \frac{\partial r_A}{\partial q_j} \right) \delta q_j = 0, \quad (9)$$

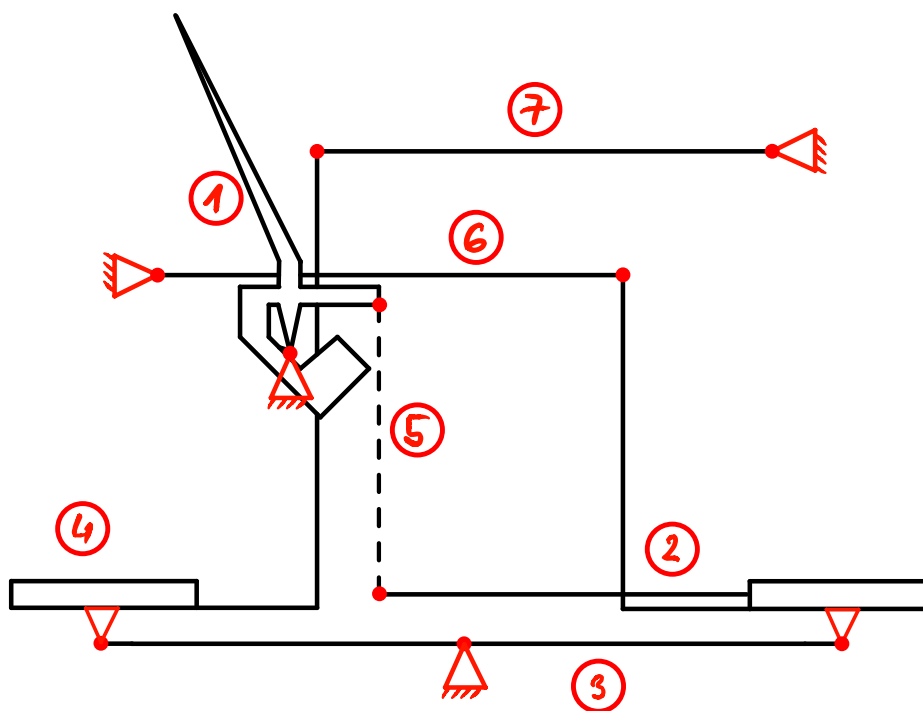
kde q_j je libovolná nezávislá (Valášek, 2014).

Velkou výhodou principu virtuálních prací je, že reakce ideálních vazeb nekonají práci, neboť jsou vždy k posuvům kolmé, takže s nimi nemusí být počítáno.

6.3 Počet stupňů volnosti

Před začátkem výpočtu je nutné určit počet stupňů volnosti tohoto systému (OBR. 20), ten totiž určuje počet rovnic při výpočtu.

Tuto úlohu lze modelovat jako rovnováhu tělesa v rovině (síly zde tvoří rovinnou soustavu sil). Počet stupňů volnosti volného tělesa v rovině je roven $n_0 = 3$, toto číslo představuje tři nezávislé souřadnice, kterými můžeme jednoznačně popsat jeho polohu. S tělesy volnými se setkáváme jen výjimečně, většinou jsou pohyby tělesa omezeny vazbami (každá vazba snižuje stupeň volnosti tělesa). V případě tržních vah jsou to výhradně vazby rotační. Tato vazba odebírá dva stupně volnosti.



OBR. 20 – počet stupňů volnosti

Celkový počet stupňů volnosti n je tedy dán vztahem (10)

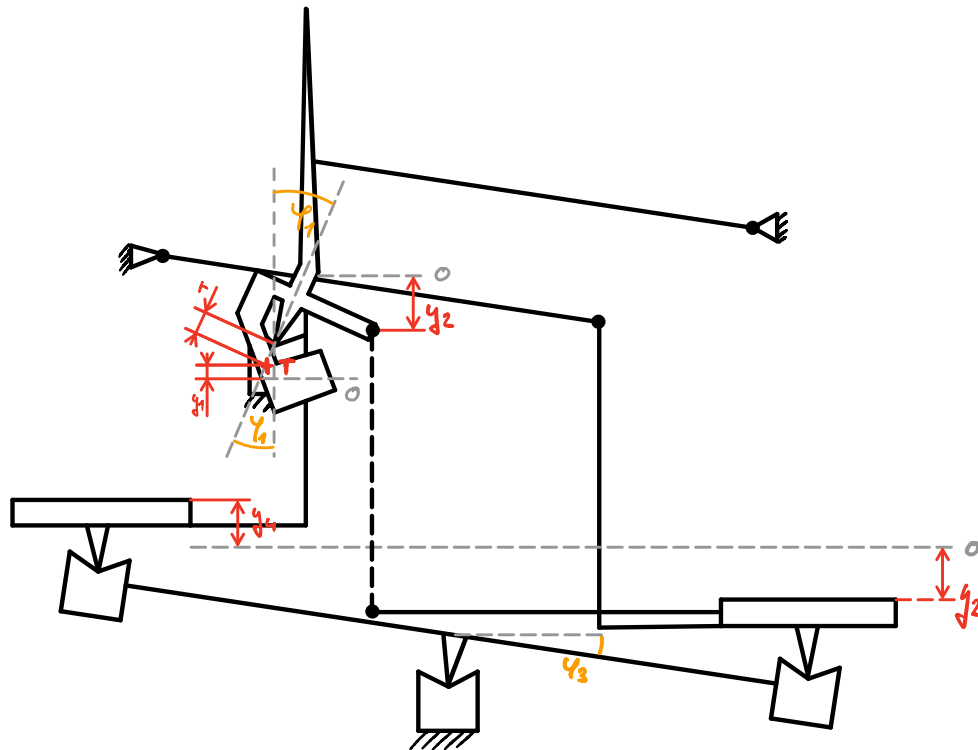
$$n = 3u - 3vp - 2 \cdot (r + p + v) - o, \quad (10)$$

kde vp označuje pevné vazby, r rotační vazby, p posuvné vazby, v valivé vazby a o obecné vazby, proměnná u je počet těles

$$n = 3 \cdot 7 - 2 \cdot (10 + 0 + 0) - 1 \cdot 0 = 21 - 20 = 1^\circ \quad (11)$$

Počet stupňů volnosti se vypočte podle vztahu (11) a je roven $n = 1^\circ$, což odpovídá i jedné rovnici ve výpočtu.

6.4 Závislosti mezi jednotlivými proměnnými



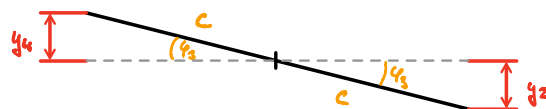
OBR. 21 – závislosti proměnných

Rovnicí řešící tento systém je

$$F_2 \delta y_2 - M \delta y_1 - F_4 \delta y_4 = 0 \quad (12)$$

Vzhledem k tomu, že mechanismus má 1° volnosti, musíme všechny proměnné vyjádřit na základně jedné souřadnice, například y_2 .

Závislost proměnné y_4 na y_2 můžeme vyjádřit z OBR. 22. Závislost mezi těmito posuvy je dána rovnicí (13), z které je patrné, že obě proměnné mají stejnou velikost viz vztah (14). Platí tedy i rovnice (15).



OBR. 22 – závislost y_4 na y_2

$$\sin \varphi_3 = \frac{y_2}{c} = \frac{y_4}{c} \quad (13)$$

$$y_2 = y_4 \quad (14)$$

$$\delta y_2 = \delta y_4 \quad (15)$$

Vyjádření vztahu mezi proměnnou y_1 a y_2 je nepatrně složitější a bude využít odvozený vztah (20), který vychází ze vzorce (16), kdy dosadíme za φ vnitřní funkci (17) čímž získáme vztah (18). Jelikož funkce $\sin \varphi$ a $\arcsin \varphi$ jsou k sobě inverzní, platí vztah (19).

$$\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi = 1 \quad (16)$$

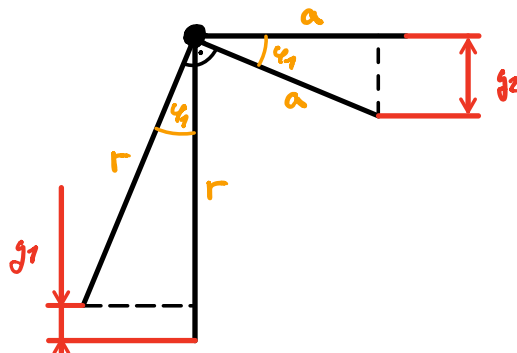
$$\varphi = \arcsin(x) \quad (17)$$

$$\sin^2(\arcsin(x)) + \cos^2(\arcsin(x)) = 1 \quad (18)$$

$$\sin^2(\arcsin(x)) = x^2 \quad (19)$$

$$\cos \left(\arcsin \left(\frac{y_2}{a} \right) \right) = \sqrt{1 - x^2} \quad (20)$$

Výsledný vztah mezi y_1 a y_2 vychází z OBR. 23. Tento obrázek představuje pootočení závaží kolem rotační vazby, y_1 je po té posunutí síly M a y_2 posunutí síly F_2 od nulové polohy.



OBR. 23 – závislost y_1 na y_2

Po dosazení vztahu (21) do vyjádření y_1 v závislosti na φ_1 (22) získáme rovnici (23), ze které byla po využití vztahu (20) vyjádřena hledaná závislost (24), která byla následně zjednodušena do tvaru (25).

$$\varphi_1 = \arcsin\left(\frac{y_2}{a}\right) \quad (21)$$

$$y_1 = r - r \cdot \cos\varphi_1 = r \cdot (1 - \cos\varphi_1) \quad (22)$$

$$y_1 = r \cdot (1 - \cos(\arcsin(\frac{y_2}{a}))) = r \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{y_2}{a}\right)^2}\right) \quad (23)$$

$$\delta y_1 = 0 - \frac{r}{2} \cdot \left(1 - \left(\frac{y_2}{a}\right)^2\right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \left(0 - 2 \cdot \left(\frac{y_2}{a}\right)\right) \cdot \frac{\delta y_2}{a} \quad (24)$$

$$\delta y_1 = \frac{ry_2}{a^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{y_2}{a}\right)^2}} \cdot \delta y_2 \quad (25)$$

6.5 Funkce φ_1 v závislosti na zatížení vah

Dosazením získaných vztahů (15) a (25) do rovnice (12) získáme vztah (26) po vykrácení δy_2 je vyjádřena závislost φ_1 resp. φ_1' jako funkce proměnných F_1 a F_2 viz (35).

$$F_2 \delta y_2 - M \cdot \frac{ry_2}{a^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{y_2}{a}\right)^2}} \cdot \delta y_2 - F_4 \delta y_2 = 0 \quad (26)$$

$$F_2 - F_4 = M \cdot \frac{ry_2}{a^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{y_2}{a}\right)^2}} \quad (27)$$

$$F = \frac{Mry_2}{a^2 \sqrt{1 - \left(\frac{y_2}{a}\right)^2}} \quad (28)$$

$$Fa^2 \sqrt{1 - \left(\frac{y_2}{a}\right)^2} = Mry_2 \quad (29)$$

$$F^2a^4 \left(1 - \left(\frac{y_2}{a}\right)^2\right) = M^2r^2y_2^2 \quad (30)$$

$$F^2a^4 - F^2y_2^2a^2 = M^2r^2y_2^2 \quad (31)$$

$$y_2^2(M^2r^2 + F^2a^2) = F^2a^4 \quad (32)$$

$$y_2^2 = \frac{F^2a^4}{M^2r^2 + F^2a^2} \quad (33)$$

$$y_2 = \pm \sqrt{\frac{F^2a^4}{M^2r^2 + F^2a^2}} \quad (34)$$

$$\varphi_1 = \arcsin\left(\frac{y_2}{a}\right) = \arcsin\left(\sqrt{\frac{(F_1 - F_2)^2a^4}{(m_2g)^2r^2 + (F_1 - F_2)^2a^2}}\right) \quad (35)$$

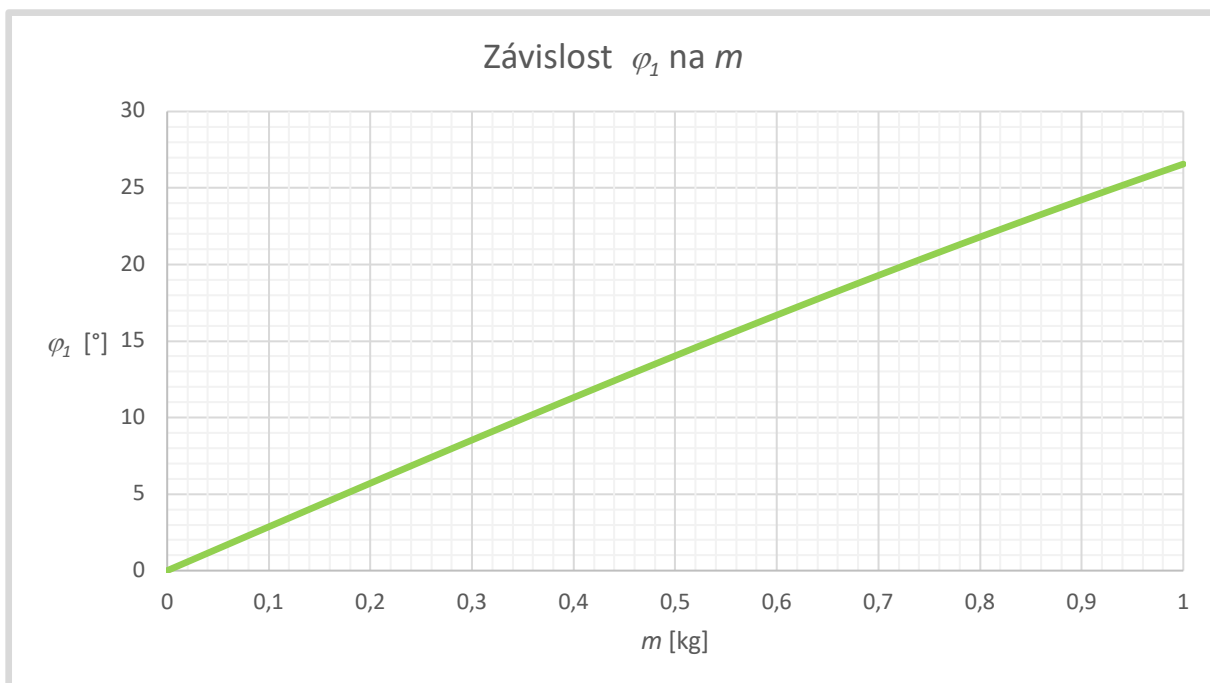
$$\varphi_1' = \varphi_1 - \varphi_0 \quad (36)$$

6.6 Linearita systému

Již na první pohled rovnice (37) není lineární, ovšem stupnice vah se lineární být zdá. Vše je vidět při vynesení funkce

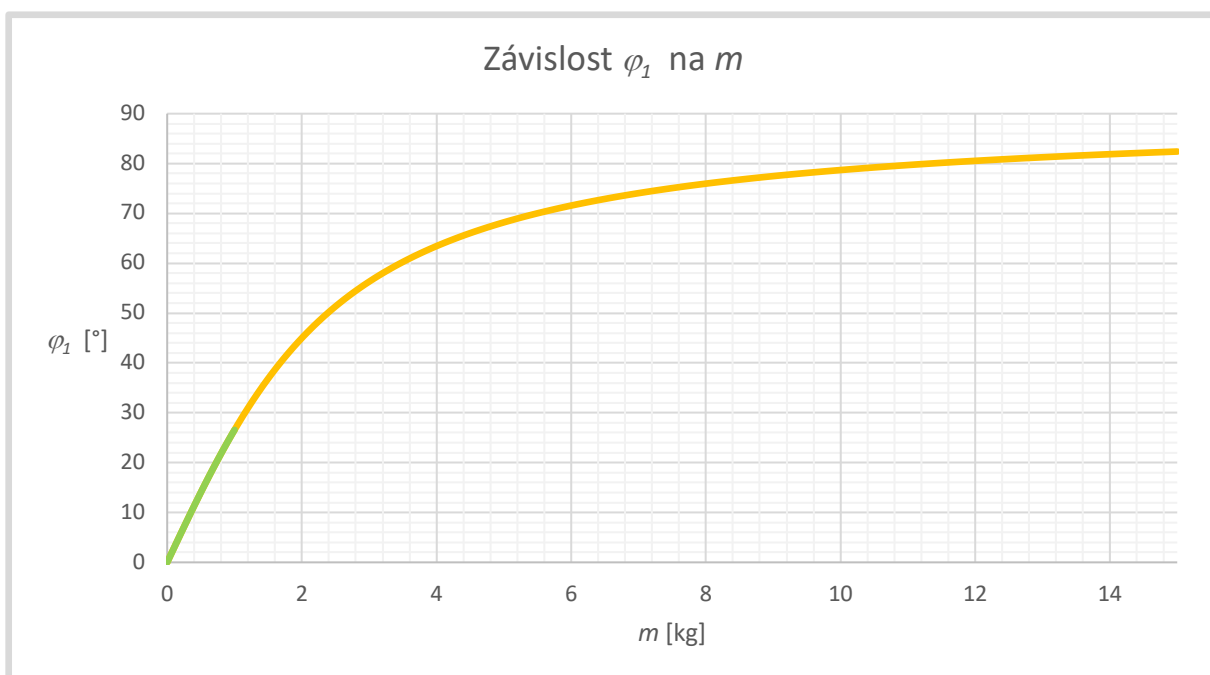
$$\varphi_1 = \arcsin\left(\sqrt{\frac{(m \cdot g)^2a^4}{(m_2 \cdot g)^2r^2 + (m \cdot g)^2a^2}}\right) \quad (37)$$

do grafu. Došlo k nahrazení členu $(F_1 - F_2)$ členem $m \cdot g$, kde m je rozdíl hmotností závaží na miskách a zároveň jediná proměnná. Z GRAF 1 je vidět, že i přes nelinearitu funkce se graf na rozsahu $m = 0 - 1$ kg velmi blíží přímce.



GRAF 1 – závislost φ_1 na m na rozsahu 0-1 kg

Ovšem při zvolení většího rozsahu $m = 0 - 15$ kg se nelinearita výrazně projeví. Z tohoto důvodu je zřejmé, proč jsou váhy konstruovány s protizávažím. Na GRAF 2 je vyznačena zelenou barvou oblast na rozsahu $m = 0 - 1$ kg a oranžovou barvou poté zvětšený rozsah.



GRAF 2 – závislost φ_1 na m na rozsahu 0-15 kg

Důsledkem nelinearity jako takové nejsou pouze rozdílné velikosti dílků stupnice, největším problémem je rychle klesající statická citlivost měřidla při zvětšování rozsahu.

Statická citlivost K tržních vah by se dala definovat jako poměr velikost změny úhlu na stupnici ku změně hmotnosti váženého předmětu, její jednotkou tedy je [rad/kg], resp. [°/kg]. Na GRAF 2 je statická citlivost vidět jako směrnice tečny pro danou hmotnost. Jak je patrné, na rozsahu $m = 0 - 1$ kg se mění pouze málo, ovšem od této hodnoty velmi rychle klesá.

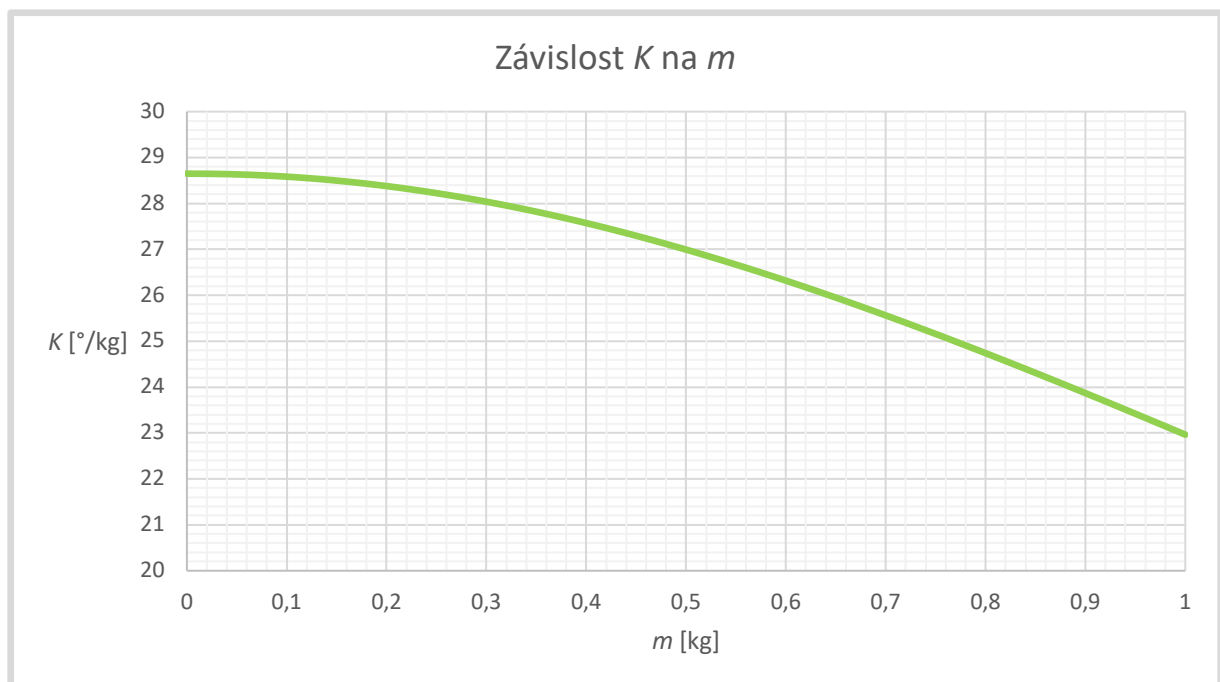
Jelikož se jedná o směrnici tečny, můžeme její hodnotu pro jednotlivé hmotnosti získat zderivováním funkce (37), získáme tak funkci pro závislost statické citlivosti K na m (38).

$$K = \frac{d}{dm} \left(\arcsin \left(\sqrt{\frac{(m \cdot g)^2 a^4}{(m_2 \cdot g)^2 r^2 + (m \cdot g)^2 a^2}} \right) \right) =$$

$$\frac{2a^4 g^2 m}{a^2 g^2 m^2 + g^2 m_2^2 r^2} - \frac{2a^6 g^4 m^3}{(a^2 g^2 m^2 + g^2 m_2^2 r^2)^2}$$

$$2 \sqrt{\frac{a^4 g^2 m^2}{a^2 g^2 m^2 + g^2 m_2^2 r^2}} \sqrt{1 - \frac{a^4 g^2 m^2}{a^2 g^2 m^2 + g^2 m_2^2 r^2}}$$
(38)

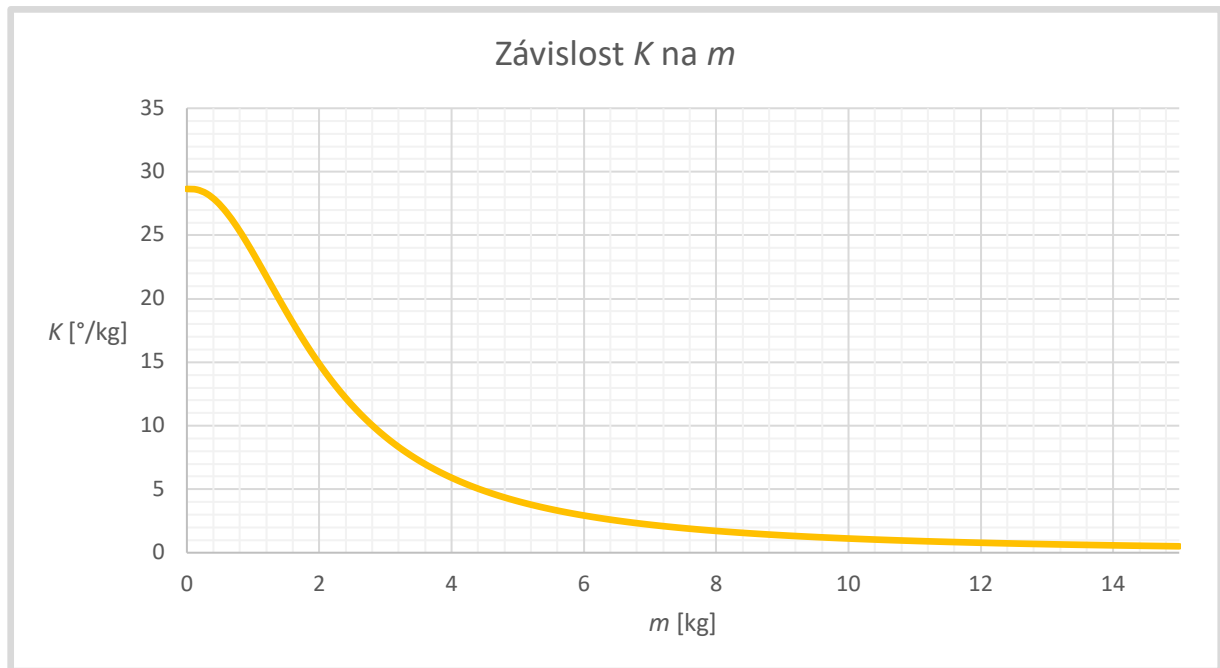
Vynesením statické citlivosti K do grafu v rozsahu 0 – 1 kg je zobrazeno na GRAF 3.



GRAF 3 – závislost statické citlivosti K na hmotnosti m na rozsahu 0-1 kg

Z grafu je patrné, že na tomto rozsahu klesne statická citlivost K z $28,7 \text{ }^\circ/\text{kg}$ na $23,0 \text{ }^\circ/\text{kg}$, což představuje 19,9 procentní pokles. Pokles tedy není nikterak zanedbatelný, ovšem hodnota statické citlivosti zůstala na dostatečně vysoké úrovni.

Při pohledu na GRAF 4 je vidět, že hodnota statické citlivosti K klesne na velmi malé hodnoty. Na tomto rozsahu její hodnota poklesne z $28,7 \text{ }^\circ/\text{kg}$ na $0,5 \text{ }^\circ/\text{kg}$. Procentuální pokles je tedy 98,3 %. Na tomto rozsahu by tedy nabylo možné měřit s dostatečnou přesností.



GRAF 4 – závislost statické citlivosti K na hmotnosti m na rozsahu 0-15 kg

7 Volba součástek vhodných pro modifikaci vah

Jak již bylo zmíněno v úvodu, cílem této práce je úprava tržních vah tak, aby nabízely co největší komfort při jejich používání. V rámci těchto úprav musely být zvoleny vhodné součástky a senzory, pomocí kterých budou dané funkce realizovány, a právě tímto se bude zabývat tato kapitola.

7.1 Řídicí jednotka

S výběrem začneme u nedůležitější části celého projektu, a to u řídicí jednotky. Tento prvek má na starost zpracování vstupů ze senzorů, jejich následné vyhodnocení a zaslání signálu do příslušných periférií. V rámci tohoto výběru bylo voleno mezi SBC (Single Board Computer) jehož typickým zástupcem je Raspberry Pi či mikrokontrolérem, kde za příklad může být uvedena jedna z desek Arduino. Hlavním rozdílem mezi těmito zástupci je to, že na Raspberry Pi (SBC) běží operační systém a v rámci něj podprogram ovládající dané senzory, kdežto u desek Arduino (mikrokontrolér) běží uživatelem napsaný program přímo, bez jakéhokoli operačního systému.

Vzhledem k tomu, že při modernizaci vah je potřeba řešit pouze základní problémy, je pro tento účel vhodné zvolit řídicí systém na základě vývojové desky s mikrokontrolérem. Jelikož jsou desky Arduino otevřeným HW, vzniká po celém světě spousta jejich alternativ. Zvolena byla vývojová deska NodeMCU-32S Lua od firmy TENSTAR ROBOT (OBR. 24), která nabízí přijatelnou cenu, dostatečné množství vstupů a výstupů a kombinaci bezdrátových technologií Bluetooth a WIFI. Navíc se po příslušných úpravách dá programovat jazykem Arduina. Další nespornou výhodou je dvou jádrový procesor Xtensa® 32-bit LX6, který usnadní práci při psaní programu.



OBR. 24 – NodeMCU – 32S Lua TENSTAR ROBOT (amazon.com, 2018)

7.2 Deformační člen a AD převodník

V rámci testování byl pro digitalizaci naměřené váhy byl zvolen deformační člen typu vetknutý nosník čínské firmy ZHIPU, který je schopen operovat v rozsahu 0-5 kg v kombinaci s 24-bit AD převodníkem HX711, který je vhodný pro přesné měření analogového signálu právě z deformačního členu. Deformační člen by bylo možné nahradit jiným s větším rozsahem bez jakékoli hardwarové či softwarové úpravy.

Důležitou vlastností HX711 je i to, že může být napájen napětím o rozsahu 2,6 – 5,5 V. Tato informace je důležitá, neboť vývojová deska NodeMCU-32S Lua má 3,3 V logiku. Touto logikou jsou dány rozsahy, kdy je daný vstupní (popřípadě výstupní) signál považován za „1“ či za „0“. Jak je vidět na OBR. 25 jsou rozdílná pásma pro výstupní a vstupní signály. Pro vstupní signál je „1“ přiřazena rozsahu 2 V – 3,3 V ($V_{IH} - V_{CC}$) naopak za „0“ je považován rozsah 0 V – 0,8 V ($GND - V_{IL}$), obdobně pak pro výstupní signály. Pásmo mezi těmito dvěma intervaly je „zakázané“ nelze mu přiřadit ani „1“ ani „0“.

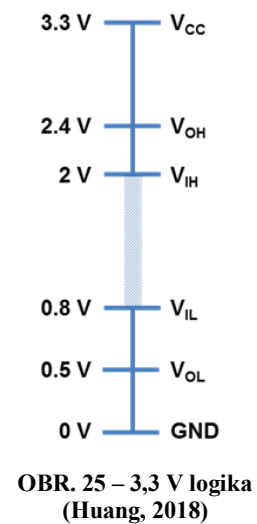
Přítomnost externího 24-bit převodníku je vhodná, neboť zabudovaný AD převodník ve vývojové desce je pouze 10-bit, čímž podle rovnice (39) umožní rozsah 1024 kroků, kdy jeden krok má hodnotu 3,22 mV (40).

$$2^{10} = 1024 \quad (39)$$

$$\frac{3,3 \text{ V}}{1024} = 4,88 \cdot 10^{-3} \text{ V} = 3,22 \text{ mV} \quad (40)$$

Tento údaj se může zdát jako dostatečný, je ovšem třeba si uvědomit, že při vážení 5 kg se dostáváme podle rovnice (41) na přesnost pouhých 4,88 g při využití plného rozsahu.

$$\frac{5000 \text{ g}}{1024} = 4,88 \text{ g} \quad (41)$$



Použitím HX711 je možné rozdělit souvislý analogový signál do 16777216 polí (rovnice (42)) to znamená teoretickou přesnost o čtyři řády větší, konkrétně 179 nV podle rovnice (43).

$$2^{24} = 16777216 \quad (42)$$

$$\frac{3 \text{ V}}{16777216} = 1,79 \cdot 10^{-7} \text{ V} = 179 \text{ nV} \quad (43)$$

Čistě teoreticky tak lze na rozsahu 5 kg podle rovnice měřit s přesností na $2,98 \cdot 10^{-4} \text{ g}$ (rovnice (44)).

$$\frac{5000 \text{ g}}{16777216} = 2,98 \cdot 10^{-4} \text{ g} \quad (44)$$

Tato teoretická přesnost je ohromná a do měření tedy AD převodník HX711 kromě přesnosti přinese i značný šum, neměl by být ovšem problém jej odstranit a dostat se na dostatečnou přesnost a to 1 gram.

8 Zapojení elektroniky

Tato část bude věnována zapojení jednotlivých součástí k vývojové desce. Kvůli jednoduché manipulaci a častému přepojování v průběhu testování bylo využito kabelů umožňujících propojení dvou kontaktů bez nutnosti pájení, viz OBR. 26.

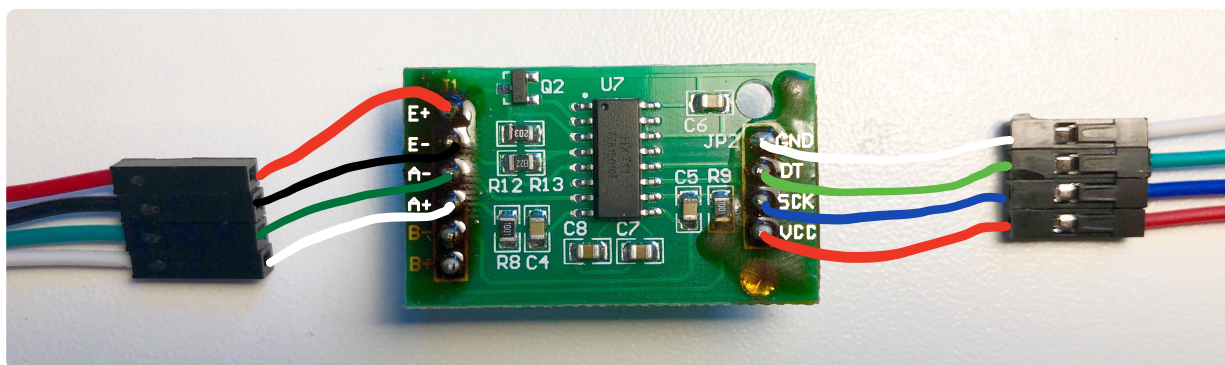
Tyto kabely se vyrábí ve všech variantách (male-male, female-male, female-female), což umožňuje jednoduché připojení na piny desky, popřípadě napojení kabelů za sebe.



OBR. 26 – propojovací kabely (fasttech.com, 2018)

8.1 Deformační člen, AD převodník

Z předchozí kapitoly víme, základem deformačního členu je Wheatstoneův můstek. Pro jeho připojení k AD převodníku je tedy potřeba propojit čtyři konektory viz OBR. 27.



OBR. 27 – propojení deformačního členu a AD převodníku HX711

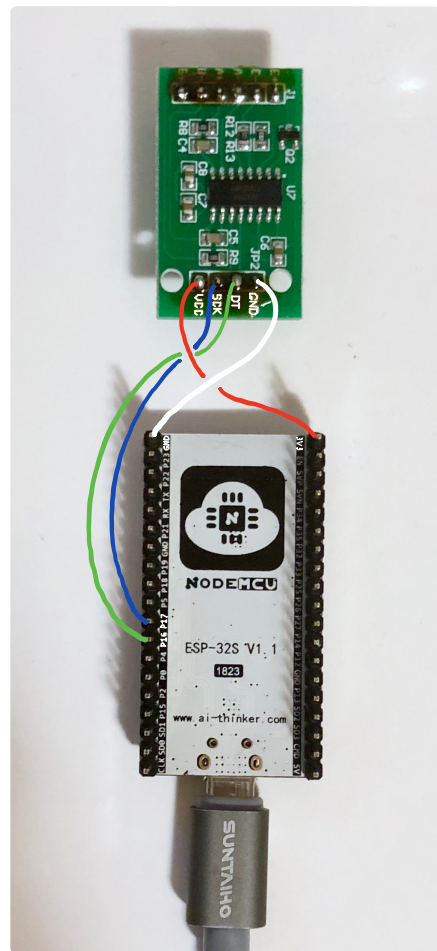
Červený kabel deformačního členu představuje napájení a je tedy připojen na E+ (EXCITATION +) AD převodníku, napájecí obvod je uzavřen pomocí černého vodiče připojeného na E- (EXCITATION -). Samotné měření pak probíhá na zbylých dvou konektorech A+ (OUTPUT +), který je spojen s bílým vodičem a A- (OUTPUT-) propojený se zbylým zeleným koncem.

8.2 AD převodník, vývojová deska

Propojení externího AD převodníku HX711 je realizováno pomocí čtyř vodičů. Červený zde má opět funkci napájení. Přivádí k převodníku napětí 3,3 V což označuje i pin **3V3** vývojové desky viz OBR. 28. Bílým kabelem jsou poté spojeny stejnojmenné piny **GND (GROUND)**. Tímto propojením je realizováno uzavření napájecího obvodu.

Jakmile je zajištěno napájení čipu HX711 může AD převodník plnit svou funkci a převádět spojitý analogový signál z Wheatstoneova můstku deformačního členu na impulzy podle 3,3 V logiky, které pak vývojová deska určí jako „1“, nebo „0“. Tyto signály jsou na desku přivedeny pomocí dvou vodičů modrého a zeleného. Zelený propojuje pin **P16** vývojové desky, modrý pak **P17**. Tato komunikace probíhá přes sběrnici I2C, jeden kontakt slouží pro udávání taktu (**SCK - modrý**) a druhý pro data (**DT - zelený**) (Blum, 2013).

Piny **P16** a **P17** pak musí být uvedeny v kódu vývojové desky, aby bylo definováno odkud má mikrokontrolér přijímat data.

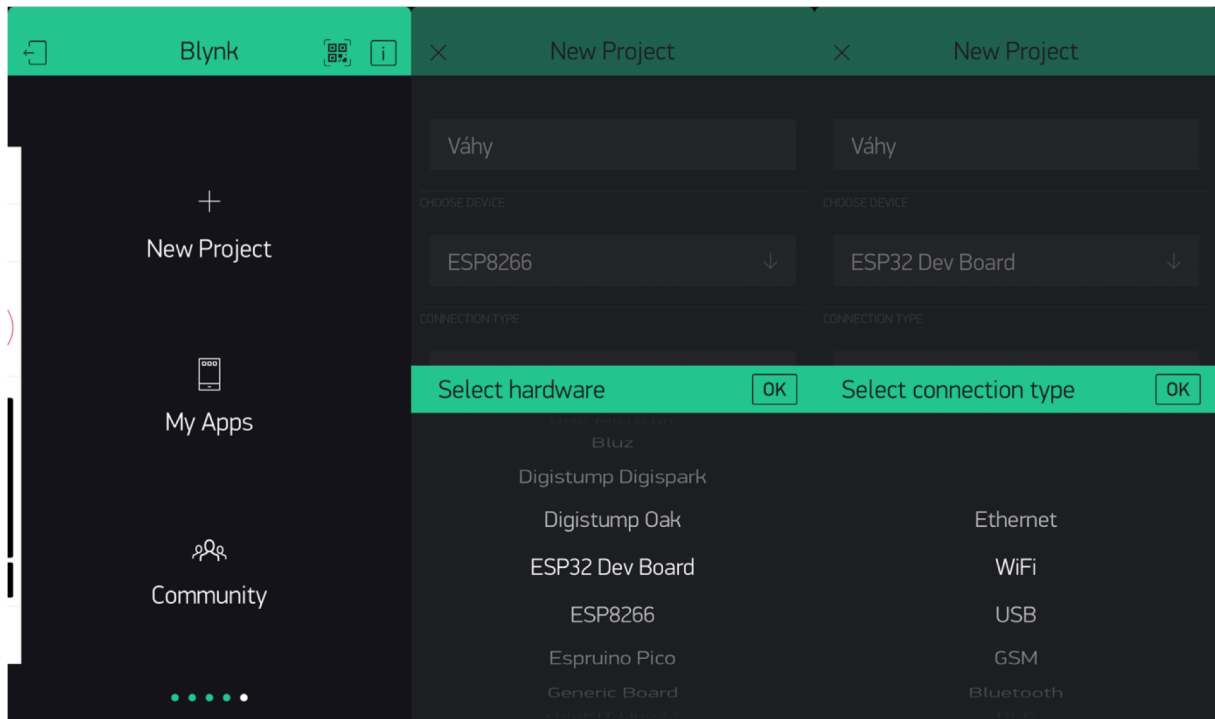


OBR. 28 – propojení HX711 a vývojové desky

9 Softwarová část

9.1 Mobilní aplikace

K vytvoření mobilní aplikace byl použit software Blynk, který je volně dostupný pro dvě největší mobilní platformy iOS a Android. Výroba aplikace byla v tomto případě prováděna na zařízení s operačním systémem iOS.

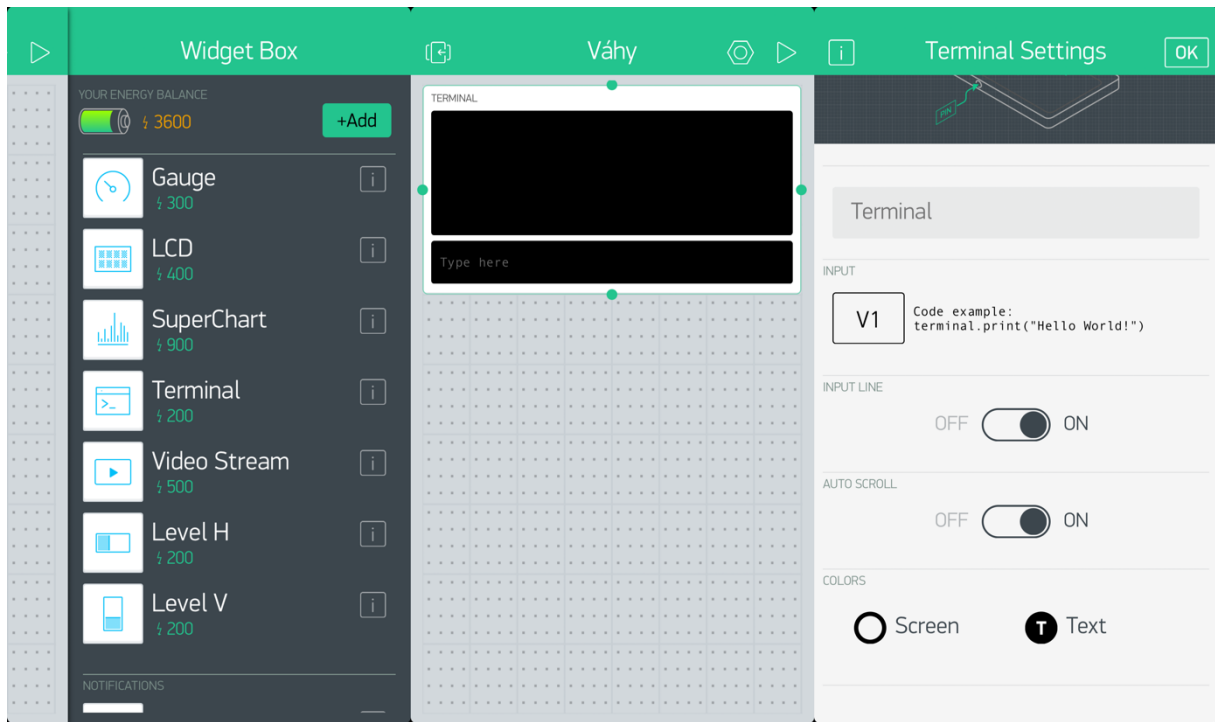


OBR. 29 – Blynk tvorba aplikace

Při tvorbě aplikace byla nejprve zvolena vývojová deska viz OBR. 29, zde se jednalo o ESP32 Dev Board. Následně bylo nutné zvolit typ propojení. NodeMCU-32S Lua podporuje jak WiFi, tak Bluetooth a samozřejmě i USB volba byla tedy mezi těmito třemi možnostmi. Vzhledem k co nejjednoduššímu propojení s chytrým telefonem bylo vybráno bezdrátové připojení přes WiFi, které zajistí dobrou mobilitu vah a zároveň na rozdíl od Bluetooth umožní i připojení k internetu a tím i kontrolu na velké vzdálenosti.

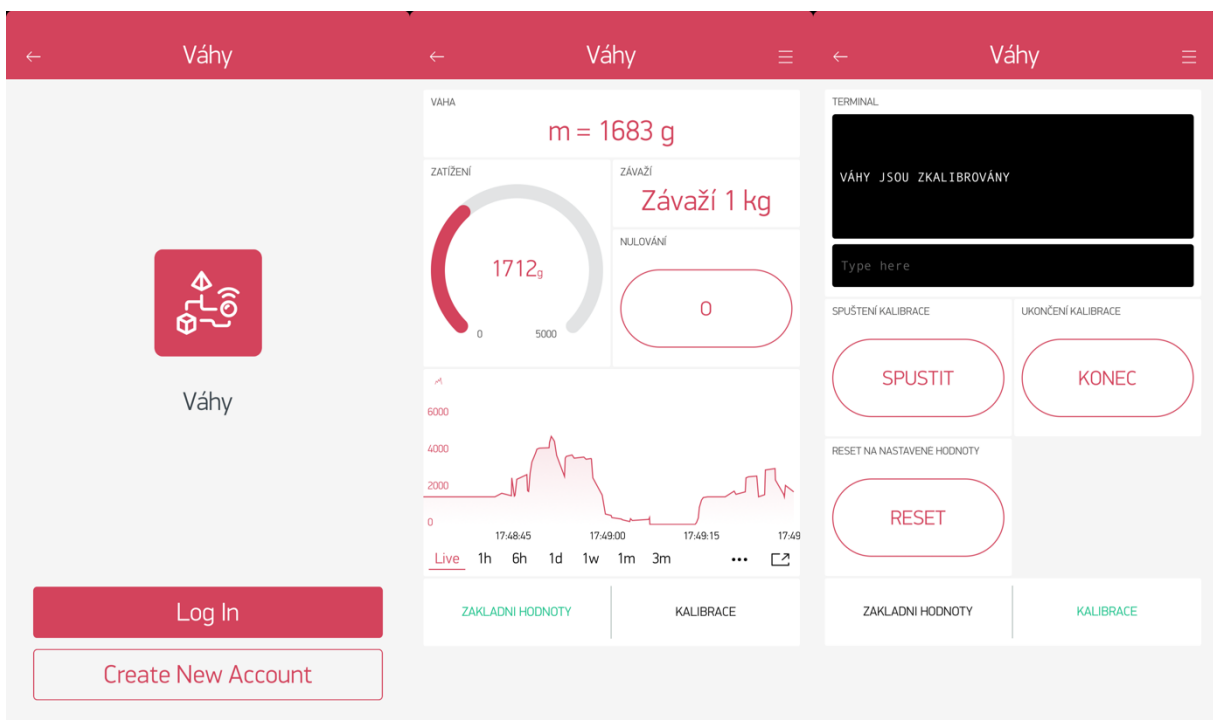
Nespornou výhodou softwaru Blynk je jeho jednoduchost. Uživatelské prostředí je tvořeno přetažením jednotlivých widgetů na pracovní plochu. Následně je potřeba zvolit

rozhraní, po kterém budou jednotlivé prvky aplikace komunikovat s vývojovou deskou (OBR. 30). Tento vstup je pak využit v kódu vývojové desky, která na daný pin (nebo z daného pinu)



OBR. 30 – Blynk tvorba uživatelského prostředí

zasílá data přes servery Blynku, takže není ani nutnost být na stejné síti. K datům má uživatel přístup odkudkoli z internetu.



OBR. 31 – Blynk uživatelské prostředí

Výsledná aplikace je pak na OBR. 31. Bylo zvoleno jednoduché rozložení se dvěma obrazovkami „ZÁKLADNÍ HODNOTY“ a „KALIBRACE“. První jmenovaná nabízí uživateli rychlý přístup k hodnotám, které jsou důležité při každodenním používání. První číslo shora udává měřenou hmotnost, pod ní vpravo se nachází doporučené protizávaží (přesáhne-li vážený předmět 1 kg – tedy rozsah stupnice váhy, aplikace mu automaticky doporučí hmotnost závaží, které je nutné přidat na druhou misku vah). Tento údaj může být pro uživatele důležitý, pokud váží předmět těžší než 1 kg. Nemusí tak zkoušet protizávaží, než nalezne to správné a rovnou použije závaží doporučené aplikací. Ukazatel zatížení v levé části uživatele informuje o využití rozsahu senzoru. Ten u námi konstruovaných vah má rozsah 0 – 5 kg. Tato informace je důležitá, neboť pomocí tlačítka „NULOVÁNÍ“ lze váhy nastavit tak, že zanedbají například hmotnost misky a ukazují tak pouze hmotnost obsahu. Obsluha tak může dosáhnout limitní hodnoty 5 kg i když váhy budou zobrazovat menší hodnotu, a právě tomuto má ukazatel rozsahu zabránit.

Druhá obrazovka „KALIBRACE“ jak již název napovídá umožňuje seřízení vah. Tlačítkem „SPUSTIT“ dojde k zahájení kalibrace o jejímž průběhu je uživatel informován v okně „TERMINÁL“. Ukončení kalibrace v jejím průběhu je možné pomocí tlačítka „KONEC“. Jelikož při nedokončené kalibraci může dojít k nesprávnému nastavení vah. Pro tento případ je tu tlačítko „RESET“, které váhy nastaví do výchozího nastavení.

Takto vytvořenou aplikaci je následně možné publikovat v App Store (pro iOS) či v Google Play (pro Android).

9.2 Software vývojové desky

V této části budou rozebrány nejdůležitější části kódu vývojové desky, který umožní propojení se všemi senzory a mobilní aplikací. Celý kód pak bude zahrnut mezi přílohami. Před samotným psaním programu je důležité doinstalovat potřebné ovladače a knihovny. Tomuto bude věnována následující kapitola.

9.2.1 Přípravy před programováním

Nejprve byla potřeba zajistit komunikaci vývojové desky s počítačem. Všechny následující úkony byly provedeny na notebooku s operačním systémem macOS High Sierra. Tento systém nepodporuje v základu čip CH340, který je typický pro alternativy desek Arduino pocházející z Číny a tedy ani zvolenou desku NodeMCU-32S Lua. Hlavní funkcí tohoto čipu je zajištění USB komunikace mezi kontrolérem počítačem. Byly tedy doinstalovány oficiální ovladače poskytované výrobcem.

Následně byly přidány doplňky pro programovací jazyk Arduina. Knihovna ESP32, která zajistila kompatibilitu vybrané vývojové desky právě s daným programovacím jazykem. Knihovna HX711 pro práci se stejnojmenným AD převodníkem a v neposlední řadě pak knihovna Blynk umožňující komunikaci desky s mobilní aplikací.

9.2.2 Propojení desky s mobilní aplikací

Hlavní roli v komunikaci desky s mobilní aplikací hraje knihovna Blynk. Přehled hlavních funkcí z této knihovny, které byly použity je uveden v KÓD 1.

První funkce *blynk.begin(auth,ssid,pass)* slouží k připojení desky k síti. Její parametr *auth* je autorizační token vázaný k danému projektu (zajišťuje správné přiřazení na serverech Blynku), *ssid* je SSID Wi-Fi sítě, ke které se mikrokontrolér bude připojovat a *pass* je heslo této sítě. Tyto proměnné byly definovány kvůli přehlednosti v samostatném hlavičkovém souboru *pomoc.h*. Druhá funkce *blynk.run()* je určena k běhu ve smyčce a zajišťuje samotnou komunikaci mezi aplikací a deskou. Pomocí funkce *WidgetTerminal kalibrace_terminal(V5)* je definován terminál na virtuálním pinu V5 s názvem *kalibrace_terminal*. Tisk do tohoto terminálu pak vyvolá příkaz *kalibrace_terminal.println*. Následující funkce *BLYNK_WRITE(V7)* zajišťuje komunikaci s tlačítkem na virtuálním pinu (V7). Poslední funkcí *Blynk.virtualWrite(V2,0)* je vyvolán zápis „0“ na virtuální pin V2.

```
Blynk.begin(auth,ssid,pass);  
Blynk.run();  
WidgetTerminal kalibrace_terminal(V5);  
kalibrace_terminal.println("Byla spuštěna kalibrace");  
BLYNK_WRITE(V7)(cs.wikipedia.org, 2018)  
Blynk.virtualWrite(V2,0);
```

KÓD 1

Zvolená vývojová deska je, jak již bylo řečeno v kapitole volba součástek, vybavena dvou jádrovým procesorem a jelikož její knihovna je postavena nad jádrem svobodného softwaru FreeRTOS (Melot, 2009), deska díky tomu umožňuje běh více smyček najednou (multitasking).

Použitím funkce `xTaskCreate` viz KÓD 2 byla vytvořena smyčka „loop2“, ve které poběží hlavní funkce programu jako například `Blynk.run()` viz KÓD 3.

```
xTaskCreate(  
  loop2,      /* Task function. */  
  "loop2",   /* name of task. */  
  10000,     /* Stack size of task */  
  NULL,      /* parameter of the task*/  
  1,         /* priority of the task */  
  NULL);     /* Task handle to keep track of created task*/
```

KÓD 2

Tento krok umožnil oddělení komunikace se servery Blynku a lokální komunikace se senzory. Při použití jedné smyčky (typické pro arduino) by mohl nastat konflikt, kdy by při delší lokální smyčce (např. výpočet za použití funkce `while`) došlo k odpojení od serverů a uživatel by tak nebyl schopen přístroj ovládat a musel by počkat na dokončení výpočtu.

Toto oddělení bylo využito při tvorbě tlačítka „KONEC“ v sekci „KALIBRACE“, kdy lze spuštěnou činnost vypnout stiskem daného tlačítka. Samostatné smyčky bylo též využito na výpis hmotnosti a zatížení do aplikace (KÓD 3).

```
void loop2 (void*parameter)  
{  
  for(;;){  
    ////////////ZASÍLÁNÍ HODNOT DO APLIKACE/////////  
    if(K2){  
      Blynk.virtualWrite(V2, 0);  
      Blynk.virtualWrite(V3, 0);  
    }  
    else{  
      Blynk.virtualWrite(V2, scale.get_units());  
      Blynk.virtualWrite(V3, scale2.get_units());  
      Blynk.virtualWrite(V8,(int)((scale.get_units())/1000));  
    }  
    Blynk.run();  
  } vTaskDelete(NULL);} 
```

KÓD 3

9.2.3 Textový výpis do aplikace

Pro výpis do terminálu na obrazovce „KALIBRACE“ byly dodefinovány pomocné funkce *mezera()* a *pockej()* viz KÓD 4. První jmenovaná funkce slouží k vytisknutí třech prázdných řádků, druhá funkce pak k pozastavení daného textu na obrazovce.

```
//////////////////////////////////MEZERA//////////////////////////////////
void mezera(){
    kalibrace_terminal.println();
    kalibrace_terminal.println();
    kalibrace_terminal.println();
}
//////////////////////////////////PAUZA//////////////////////////////////
void pockej(){
    delay(1700);
}
```

KÓD 4

Jednotlivé řádky vypisované do terminálu byly kvůli přehlednosti definovány jako jednotlivé funkce *TEXT1()*, *TEXT2()* ... viz KÓD 5. Zavolání funkce *TEXT()* tedy vytiskne pomocí funkce *mezera()* tři mezery, následně žádaný text, opět tři mezery, funkce *kalibrace_terminal.flush()* zkontroluje, zda vše dorazilo bezpečně do aplikace a funkce *pockej()* ponechá řádek na displeji 1,7s.

```
//////////////////////////////////TEXTY//////////////////////////////////
void TEXT1(){
    mezera();
    kalibrace_terminal.println("Byla spuštěna kalibrace");
    mezera();
    kalibrace_terminal.flush();
    pockej();
}
//////////////////////////////////
void TEXT2(){
    mezera();
    kalibrace_terminal.println("Zadejte hmotnost známého závaží [g]:");
    mezera();
    kalibrace_terminal.flush();
    pockej();
}
```

KÓD 5

9.2.4 Kalibrace

Při psaní funkce *kalibrace* bylo využito linearitu zvoleného deformačního členu. Pro výpočet kalibračního faktoru je tedy potřebné změřit hodnoty, které senzor zaznamenává nezátížený a hodnoty naměřené po zatížení vah závažím známé hmotnosti.

Tato měření jsou prováděna pomocí dodefinované funkce *prumer*, která provede zadaný počet měření a provede jejich aritmetický průměr. Do průměru nejsou započteny hodnoty lišící se o více než patnáct procent kvůli případným chybám, které by mohly pokazit měření.

Samotný výpočet pak probíhá tak, že jsou od sebe odečteny průměry hodnot zatížených a nezatížených vah a takto získaná hodnota je vydělena hmotností závaží viz KÓD 6. S takto vypočteným koeficientem již umí pracovat knihovna HX711.

```
float kalibrace(){
///////////////////////////////////////////////////PROMĚNNÉ////////////////////////////////////
float presnost1=100;
float presnost2=100;
float nulova_hodnota=0;
float zavazi_hodnota=0;
float KP=1;

///////////////////////////////////////////////////PROBĚHNE JEDNOU////////////////////////////////////
TEXT3(zavazi); //Zadaná hmotnost...
TEXT4(); //Odeberte předměty...
TEXT5(); //Nulování započne za...
TEXT6(); //Odpočet
TEXT7(); //Probíhá měření nulové hodnoty ...
scale2.tare();
nulova_hodnota=prumer(presnost1);
TEXT8(); //Vložte závaží
TEXT9(); //odpočet
TEXT10(); //Probíhá výpočet
zavazi_hodnota=prumer(presnost2);

///////////////////////////////////////////////////VÝPOČET PARAMETRU////////////////////////////////////
KP=(zavazi_hodnota-nulova_hodnota)/zavazi;
}
```

KÓD 6

10 Závěr

V teoretické části této bakalářské práce byla provedena rešerše nejvýznamnějších druhů vah, a to jak mechanických, tak digitálních. U těchto měřidel byly popsány principy, na základě kterých fungují.

Pro silovou a kinematickou analýzu byly zvoleny tržní váhy, které v sobě kombinují principy typické pro váhy rovnoramenné a kyvadlové. Na základě výpočtů byla zjištěna značná nelinearita vah, hlavně na větších rozsazích. Tato nelinearita má za následek rozdílnou velikost dílků stupnice, kde největším problémem je rychlé snižování statické citlivosti. Tento problém je u tržních vah řešen omezením rozsahu na jeden kilogram. Vážení těžších předmětů je umožněno díky protizávažím, která kompenzují hmotnosti přesahující tisíc gramů.

Hlavním cílem této práce bylo modifikovat mechanické váhy tak, aby uživateli umožnily jednoduchou a rychlou obsluhu. Tohoto cíle bylo dosaženo za pomoci deformačního členu, AD převodníku HX711 a mikrokontroléru NodeMCU-32S Lua. Všechny tyto součástky splnily své účely bez chyby a prokázaly, že byly dobrou volbou. Tímto způsobem by šlo modifikovat téměř všechny mechanické váhy, které mají misky, pod něž by se dal umístit deformační člen. Při reálném použití vah by bylo vhodné přístroj dovybavit LCD pro rychlé odečtení váhy bez nutnosti použití mobilního telefonu.

Původní myšlenou bylo zajistit pouze základní bezdrátový přenos dat (například v podobě výpisu hodnot do terminálu), nakonec se však podařilo vytvořit aplikaci, která by mohla být s několika drobnými úpravami distribuována pro dva nejrozšířenější mobilní operační systémy, a to Android a iOS. Celková modifikace vah se tak přiblížila finálnímu produktu více, než bylo předpokládáno, což lze považovat za značný úspěch.

11 Použitá literatura a zdroje

- AMAZON.COM. 2018. *ESP-32S* [Online]. Available: <https://www.amazon.com/DIYmall-NodeMCU32S-Bluetooth-Development-Dual-Core/dp/B01NAEPQB7> [Accessed].
- BENTON, W. 1941. The early history of the spring balance. *Transactions of the Newcomen Society*, 22, 65-78.
- BIENER, K. 1999. Philipp Matthäus Hahn.
- BLUM, J. 2013. *Exploring Arduino: tools and techniques for engineering wizardry*, John Wiley & Sons.
- BRITAIN, R. A. S. O. G. & IRELAND 1834. *Journal of the Royal Asiatic Society of Great Britain and Ireland*, Cambridge University Press for the Royal Asiatic Society.
- BRITISHMUSEUM.ORG. 2018. *bronze lion* [Online]. The British Museum. Available: http://www.britishmuseum.org/research/collection_online/collection_object_details.aspx?objectId=368914&partId=1 [Accessed].
- CASSIDY, T. D. & BENNETT, H. R. 2012. The rise of vintage fashion and the vintage consumer. *Fashion practice*, 4, 239-261.
- CONCEITOZEN.COM. 2018. *Scales* [Online]. Available: <https://www.conceitozen.com.br/o-que-e-qualidade-de-vida-no-trabalho.html> [Accessed].
- CS.WIKIPEDIA.ORG. 2018. *Decimálky* [Online]. Available: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Váhy> [Accessed].
- DAMEROW, P., RENN, J. & RIEGER, S. 2000. Mechanical knowledge and Pompeian balances.
- FASTTECH.COM. 2018. *Jumper Wires* [Online]. Available: <https://www.fasttech.com/product/1144701-male-to-female-40-pin-dupont-breadboard-jumper-wir> [Accessed].
- FRADEN, J. 2004. *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*, Springer Science & Business Media.
- GHANVAT, M. S. & PATIL, H. 2012. Shape Optimization of 'S' Type Load Cell Using Finite Element Method. *IJEIR*, 1, 310-316.
- HOFFMANN, K. 1974. *Applying the wheatstone bridge circuit*, HBM.
- HUANG. 2018. *Logic Levels* [Online]. Available: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/logic-levels> [Accessed].
- ISASC.ORG. 2018. *Pendulum Scales* [Online]. Available: <http://www.isasc.org/Tutorial/Scale-Types.html> [Accessed].
- JENEMANN, H. R. 1980. *Zur Entwicklungsgeschichte der Neigungswaage*.
- KOLOMÝ, R. 1969. Z historie starých měř a zavedení metrické soustavy. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, 14, 177-181.
- MELOT, N. 2009. Study of an operating system: FreeRTOS.
- MOZIRU.COM. 2018. *Spring Scales* [Online]. Available: <http://moziru.com/explore/Stork%20clipart%20baby%20scale/#> [Accessed].
- MULLER, I., DE BRITO, R. M., PEREIRA, C. E. & BRUSAMARELLO, V. 2010. Load cells in force sensing analysis--theory and a novel application. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 13.

- MUSEUM.VZVT.RU. 2018. *изменить* [Online]. Волгоградский Музей Мер и Весов. Available: http://museum.vzvt.ru/istoriya/mirovaya-istoriya-vesov/vesy_i_giri_legendarnogo_goroda_pompei/ [Accessed].
- PETRUSO, K. M. 1981. Early Weights and Weighing in Egypt and the Indus Valley. *M Bulletin (Museum of Fine Arts, Boston)*, 79, 44-51.
- RUGE, A. C. 1944. Strain gauge. Google Patents.
- SIMMONS, J. E. E. 1946. Strain gauge. Google Patents.
- VALÁŠEK, M. 2014. *Mechanika C*.
- VOLF, J. 2000. *Technická měření*, Praha, Vydavatelství ČVUT.