

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Váha pro motorová vozidla

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Stanislava Papežová, CSc.

Diplomant: Slavomír Hrdina

Praha 2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Slavomír Hrdina

Zemědělské inženýrství

Informační a řídicí technika v agropotravinářském komplexu

Název práce

Váha pro motorová vozidla

Název anglicky

Weight for Motor Vehicles

Cíle práce

Cílem práce je návrh a realizace váhy pro kontrolu hmotnosti a rozložení hmotnosti vozu Formula Student ČZU, výběr vhodných snímačů, vyřešení přenosu dat mezi snímači a řídicím počítačem a jejich prezentace. Navržený měřicí systém realizujte a ověřte jeho funkčnost.

Metodika

1. Proveďte analýzu problematiky měření rozložení hmotnosti vozidla.
2. Zvolte vhodný systém pro měření.
3. Vypracujte přehled vhodných typů snímačů pro použití v daném systému.
4. Zvolte vhodný způsob přenosu dat mezi snímači a počítačem.
5. Počítač vybavte softwarem pro sběr a prezentaci dat.
6. Systém realizujte a ověřte jeho funkčnost.
7. Výsledky vyhodnoťte.

Doporučený rozsah práce

50 – 60 stran

Klíčová slova

vážení motorových vozidel, snímač síly, přenos dat

Doporučené zdroje informací

ĎAĎO, S., Kreidl, M. *Senzory a měřicí obvody*, Praha, ČVUT, 1996, 1. vyd.

ŠTĚPÁNEK, Tomáš. *Měření polohy těžiště vozidla*. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.

Fakulta strojího inženýrství, 2008 . Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/11657>.

VLK, F. *Dynamika motorových vozidel : jízdní odpory, hnací charakteristika, brzdění, odpružení, říditelnost, ovladatelnost, stabilita*. Brno: Nakladatelství a vydavatelství Vlk, 2000. ISBN 80-238-5273-6.

VOBECKÝ, J., ZÁHLAVA, V. *Elektronika: součástky a obvody*. Grada, 2012

Předběžný termín obhajoby

2019/2020 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Stanislava Papežová, CSc.

Garantující pracoviště

Katedra elektrotechniky a automatizace

Elektronicky schváleno dne 1. 2. 2019

Ing. Miloslav Linda, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 15. 2. 2019

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 2.11.2020

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Váha pro motorová vozidla" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne:.....

.....

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucí mé práce doc. Ing. Stanislavě Papežové CSc. za odborné konzultace. Dále bych rád poděkoval všem, kteří mi při zpracování této práce poskytli pomoc a podporu.

Váha pro motorová vozidla

Abstrakt

Cílem této práce je návrh a realizace cenově dostupné váhy pro kontrolu celkové hmotnosti a rozložení hmotnosti vozidla. Nejdříve je vysvětlen princip snímačů hmotnosti. Dále jsou zde uvedeny běžně používané metody určování polohy těžiště u vozidel. I když nebylo možno měřit těžiště na reálném voze, bylo navrženo odpovídající zařízení pro měření těžiště modelu vozidla. Následuje návrh samotného zařízení. A po jeho sestavení je funkčnost ověřena provedeným měřením. Na tuto práci lze navázat sestavením měřícího zařízení pro měření na reálném voze.

Klíčová slova:

vážení motorových vozidel, snímač síly, přenos dat

Weight for motor vehicles

Abstract

The aim of this thesis is the design and implementation of an affordable scale for checking the total weight and weight distribution of a vehicle. First, the principle of weight sensors is explained. Then, commonly used methods for determining the center of gravity position of vehicles are presented. Although it was not possible to measure the centre of gravity on a real vehicle, a corresponding device was designed to measure the centre of gravity of a model vehicle. The design of the device itself follows. And after it is assembled, the functionality is verified by the measurements made. This work can be followed up by building a measuring device for measurement on a real car.

Keywords:

weighing of motor vehicles, force sensor, data transmission

Obsah

1	Úvod	1
2	Cíl práce	2
3	Metodika	3
4	Senzory hmotnosti	4
4.1	Deformační člen.....	4
4.2	Odporové tenzometry	5
4.3	Single point snímač hmotnosti.....	6
5	Metody zjišťování polohy těžiště vozidla	6
5.1	Měření těžiště v podélném směru	7
5.2	Měření těžiště v příčném směru.....	9
5.3	Měření výškové polohy těžiště naklápěním na nápravu.....	10
5.4	Měření výškové polohy těžiště naklápěním na bok.....	15
5.5	Zjištění úhlu překlopení	16
5.6	Měření při zavěšení celého vozidla za karoserii.....	17
6	Návrh zapojení a volba komponent	18
6.1	Snímač hmotnosti	19
6.2	Převodník HX711	20
6.3	Arduino UNO	20
6.4	Display	21
6.5	Tlačítkové ovládání.....	22
6.6	PC s předinstalovaným LabView	22
6.7	Schéma zapojení	23
6.8	Firmware vývojové desky Arduino	24
7	Program v LabView	25
7.1	Blokový diagram.....	25
7.2	Front-panel.....	27
8	Kalibrace zařízení	30
8.1	Určení hmotnosti závaží	30
8.2	Nastavení kalibračního faktoru	31

9	Měření těžiště vozidla.....	33
9.1	Měření hmotnosti.....	34
9.2	Měření v podélném a příčném směru – varianta č.1.....	35
9.3	Měření výškové polohy těžiště – varianta č.1.....	36
9.4	Měření v podélném a příčném směru – varianta č.2.....	38
9.5	Měření výškové polohy těžiště – varianta č.2.....	39
10	Závěr.....	41
11	Seznam použitých zdrojů.....	42
12	Seznam obrázků.....	44
13	Seznam Příloh.....	45

1 ÚVOD

Při konstrukci a vývoji dobře ovladatelných a bezpečných vozidel je důležité znát polohu těžiště, a to právě pro dosažení optimálních jízdních vlastností a stability. Bereme-li v úvahu závodní automobil, pilot může s dobře vyváženým a seřízeným vozem projet zatáčkou rychleji a zvyšuje tím šanci na výhru.

U vozidel určujeme polohu těžiště ve všech třech osách. Horizontální (příčná a podélná) poloha těžiště určuje rozdělení hmotnosti vozidla mezi jednotlivá kola. Toto rozdělení hmotnosti určuje přetáčivost nebo nedotáčivost vozidla. Vertikální poloha těžiště ovlivňuje rozdělení hmotnosti vozidla na jednotlivé nápravy při akceleraci nebo brždění. Je tedy důležité volit například rozložení brzdných sil na nápravy právě s ohledem na polohu těžiště.

2 CÍL PRÁCE

Cílem této práce je seznámit čtenáře se základní problematikou měření těžiště vozidel a navržení cenově dostupného zařízení pro kontrolu hmotnosti a určení polohy těžiště vozidla a přiblížit čtenáři princip fungování tohoto zařízení. Měřením těžiště bude funkčnost zařízení ověřena.

3 METODIKA

Zpracování této diplomové práce lze rozdělit do několika částí. V první části jsou uvedena nezbytná teoretická východiska k pochopení principu snímání síly a použitých snímačů. Dále jsou zde popsány vybrané principy určování polohy těžiště.

Ve druhé části je uveden výběr vhodných komponent k výrobě cenově dostupného zařízení určeného pro měření hmotnostních parametrů vozidla. Je zde také navrženo schéma zapojení celého měřicího řetězce a popis jeho funkce.

V další části je popsán program vytvořený ve vývojovém prostředí LabView a způsob jeho ovládání při měření úlohy pomocí vytvořeného uživatelského rozhraní.

Ve čtvrté části je uveden způsob kalibrace tenzometrických snímačů a následně prezentovány a zpracovány výsledky provedeného měření celkové hmotnosti vozidla, polohy těžiště v podélném směru, polohy těžiště v příčném směru a výškové polohy těžiště. Měření polohy těžiště je provedeno ve dvou variantách. V první variantě je dodatečné závaží umístěno blíže k zadní nápravě a ve druhé variantě je naopak umístěno blíže k té přední.

V závěru je práce shrnuta společně s doporučením pro další měření tohoto typu.

4 SENZORY HMOTNOSTI

Principem senzorů hmotnosti (síly), je ve většině případů měření deformačních účinků síly na objekt vhodného složení a tvaru pomocí tenzometru nebo soustavy tenzometrů. Obecně lze senzory síly, a tedy i hmotnosti rozdělit dle Obr. 1 [1].

Vážení je speciální případ určování hmotnosti objektu, na který působí síla:

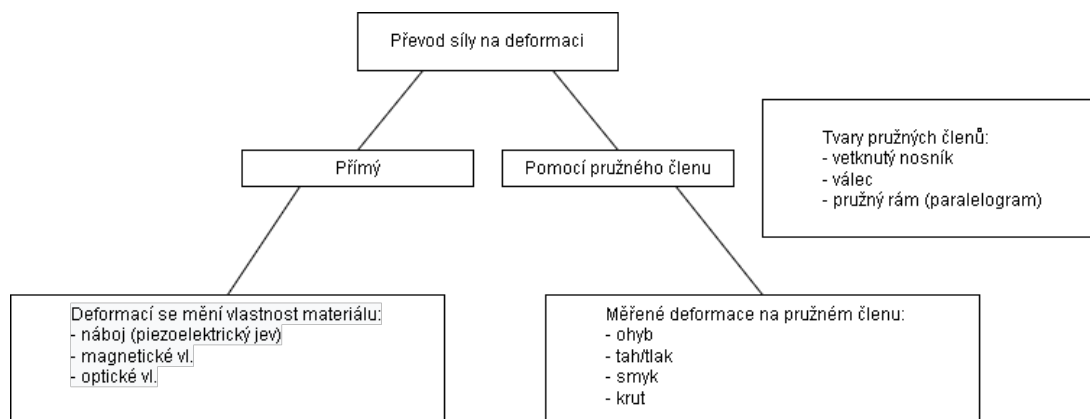
$$G = m \cdot g$$

(1)

kde je:

m – hmotnost

g – tíhové zrychlení



Obr. 1 – Obecné rozdělení senzorů síly dle principu [1]

4.1 Deformační člen

Klíčovým prvkem senzorů hmotnosti je pružný (deformační) člen, který převádí sílu na snadno měřitelné hodnoty mechanického napětí.

Toto napětí se určuje pomocí tenzometrů. Pružné členy jsou vyrobeny z materiálů, jejichž ideální vlastnosti jsou [1]:

- minimální teplotní roztažnost
- dobrá teplotní vodivost
- malá hystereze
- odolnost vůči korozi
- malé účinky tečení
- jemnozrná homogenní struktura

Vzájemné zapojení tenzometrů do plného můstku má následující výhody [1]:

- anulace činitele nelinearity za předpokladu stejného R_i všech tenzometrů
- nulová chyba vlivem teploty, pokud jsou tenzometry identické při stejné teplotě
- vyšší citlivost

Pro potřeby této diplomové práce je dále vysvětlen pouze princip odporových tenzometrů ve spojení s deformačními členy u dostupných snímačů typu single point.

4.2 Odporové tenzometry

Fungují na principu změny odporu v závislosti na deformaci. Tento jev popsal již v r. 1843 Wheatstone při pokusech s můstkovými obvody. [1]

Odporové tenzometry lze dle konstrukce dělit viz Obr. 2.

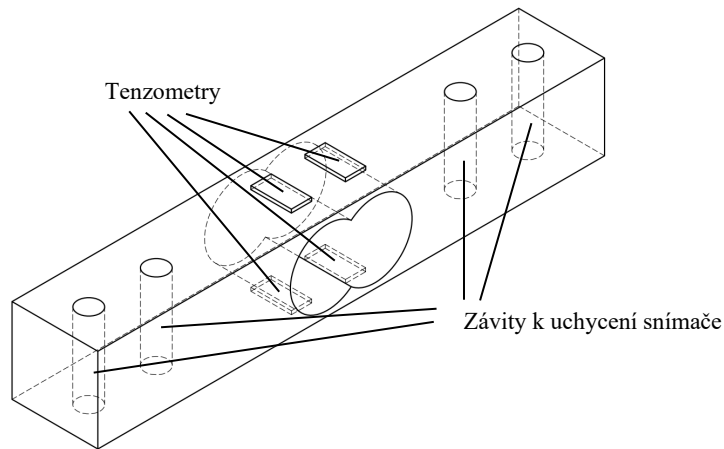


Obr. 2 - Rozdělení tenzometrů dle vlastností [1]

4.3 Single point snímač hmotnosti

Pro účely realizace experimentální váhy byly vybrány tři snímače typu single-point. Snímač je konstruován jako pružný člen, nosník čtvercového průřezu s vyfrézovaným otvorem uprostřed, se čtveřicí tenzometrů zapojených do plného můstku viz Obr. 3.

K jedné straně je tento nosník přišroubován pomocí dvou šroubů k podstavě váhy a k druhé straně nosníku je pomocí dvou šroubů přišroubovaná deska pro umístění váženého objektu [2].



Obr. 3 - Snímač hmotnosti typu single-point [2]

Pro splnění bezpečnostních požadavků je nutné snímač používat spolu s dorazy zabraňujícími mechanickému poškození vlivem zatížení nad přípustnou mez pro daný snímač.

5 METODY ZJIŠŤOVÁNÍ POLOHY TĚŽIŠTĚ VOZIDLA

Řiditelnost motorových vozidel je výrazně ovlivněna rozložením hmotnosti na jednotlivé nápravy. Pokud je poloha těžiště změněna o $\pm 20\%$, tak se velmi výrazně změní průběh dynamických ale i velikost statických odezev motorového vozidla. V praxi lze tyto změny těžiště kompenzovat volbou tuhosti řízení, změnou huštění pneumatik nebo například vhodným nastavením ESP systému vozidla [3].

Poloha těžiště se určuje vzhledem ke všem třem osám v prostoru. Pro určení polohy se využívá více metod. Přehled těchto metod je uveden dále v textu.

Polohu těžiště zjišťujeme [4]:

- horizontální poloha těžiště
 - v podélné rovině
 - v příčné rovině

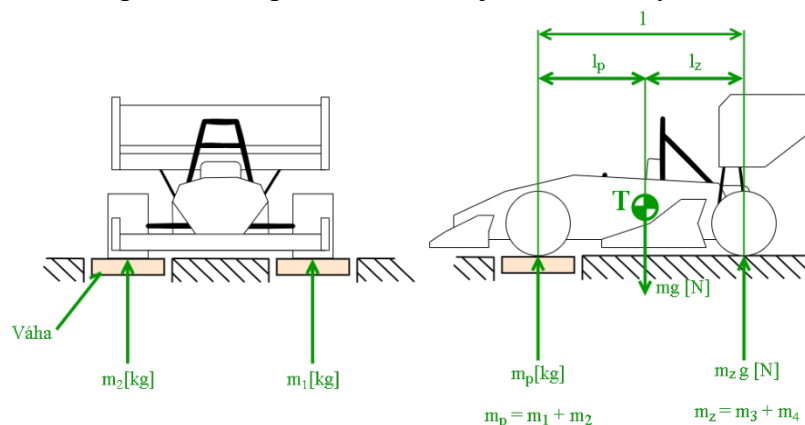
- vertikální poloha těžiště
 - naklápěním na nápravu
 - zavěšením vozidla
 - naklápěním na bok
 - zjištěním úhlu překlopení

K zjištění polohy těžiště bude potřeba mít minimálně dvě váhy. Aby byla zajištěna co nejmenší chybovost měření, je potřeba mít při měření podélné a příčné polohy těžiště vozidlo ve vodorovné poloze.

K řešení této práce je pro určení vertikální polohy těžiště zvolena metoda naklápěním na nápravu vozidla.

5.1 Měření těžiště v podélném směru

V podélném směru se poloha těžiště určuje pomocí vah umístěných pod kola přední (nebo zadní) nápravy. Pokud známe celkovou hmotnost vozidla, lze dopočítat polohu těžiště vzhledem k rozvoru náprav. Princip tohoto měření je schematicky znázorněn na Obr. 4 [4].



Obr. 4 - Zjištění polohy těžiště v podélném směru [4]

Je-li vozidlo ve vodorovné pozici, platí vztah [4]:

$$l = l_p + l_z$$

(2)

kde je:

l – rozvor náprav

l_p – vzdálenost těžiště od přední nápravy

l_z – vzdálenost těžiště od zadní nápravy

Celková hmotnost je poté [4]:

$$m = m_p + m_z$$

(3)

kde je:

m – celková hmotnost vozidla

m_p – hmotnost měřená pod přední nápravou

m_z – hmotnost měřená pod zadní nápravou

Z rovnic rovnováhy dle Obr. 4 pro vzdálenost od zadní nápravy platí [4]:

$$l_z = \frac{m_p}{m} \cdot l$$

(4)

kde je:

l – rozvor náprav

l_z – vzdálenost od zadní nápravy

m_p – hmotnost měřená pod přední nápravou

m – celková hmotnost vozidla

Z rovnic rovnováhy dle Obr. 4 pro vzdálenost od přední nápravy platí [4]:

$$l_p = \frac{m_z}{m} \cdot l$$

(5)

kde je:

l – rozvor náprav

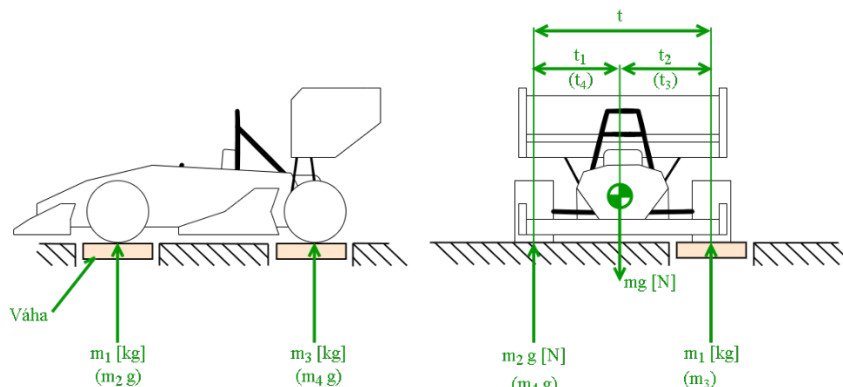
l_p – vzdálenost od přední nápravy

m_z – hmotnost měřená pod zadní nápravou

m – celková hmotnost vozidla

5.2 Měření těžiště v příčném směru

Ke zjištění skutečné příčné polohy těžiště je nutno vozidlo opět zvážit, jelikož těžiště vozidla obvykle není přímo v rovině souměrnosti vozidla. Princip je obdobný jako u určování polohy těžiště v podélném směru. [4]



Obr. 5 - Zjištění polohy těžiště v příčném směru [4]

Pro polohu těžiště v příčném směru podle Obr. 5 platí vztah [4]:

$$t_1 = \frac{m_{13}}{m} \cdot t$$

(6)

kde je:

m_{13} – hmotnost změřená pod levými koly náprav

m – celková hmotnost vozidla

t_1 – vzdálenost těžiště od pravých kol náprav

t – rozchod kol

Obdobně je pak možno určit tuto vzdálenost i pro vzdálenost t_2 [4]:

$$t_2 = \frac{m_{24}}{m} \cdot t$$

(7)

kde je:

m_{24} – hmotnost změřená pod pravými koly náprav

m – celková hmotnost vozidla

t_2 – vzdálenost těžiště od levých kol náprav

t – rozchod kol

Výše uvedené rovnice platí, jestliže je rozchod kol pro přední a zadní nápravu stejný.

$$t_p = t_z = t$$

(8)

kde je:

t_p – rozchod kol přední nápravy

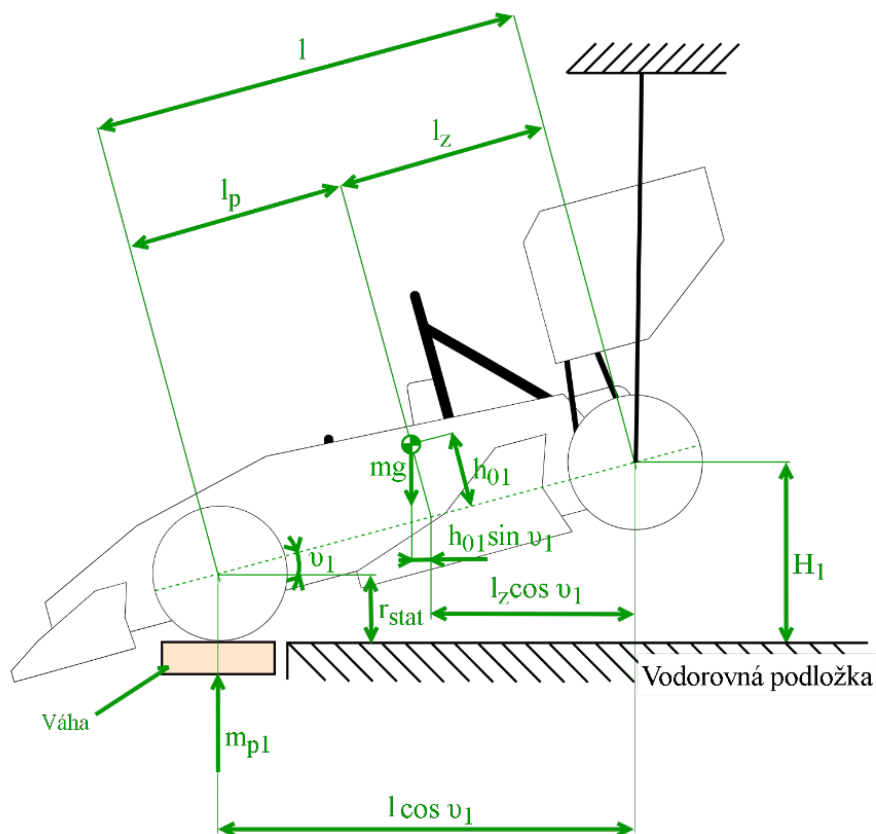
t_z – rozchod kol zadní nápravy

t – rozchod kol využívaný v předchozích rovnicích

Ze získaných hodnot lze pak snadno určit finální polohu těžiště jak v podélném, tak v příčném směru [4].

5.3 Měření výškové polohy těžiště naklápěním na nápravu

Výškovou polohu těžiště vozidla lze zjistit vážením dle Obr. 6. Vozidlo se naklání o úhel ν_1 zvednutím do výšky H_1 [4].



Obr. 6 - Zjištění výškové polohy těžiště vozidla [4]

Statická rovnice pro vozidlo je v tomto případě [4]:

$$m_{p1} \cdot l \cos v_1 - m \cdot (h_{01} \cdot \sin v_1 + l_z \cdot \cos v_1) = 0$$

(9)

kde je:

m_{p1} – měřená hmotnost pod přední nápravou

l – rozvor náprav

l_z – vzdálenost těžiště od zadní nápravy

v_1 – úhel naklonění vozidla

h_{01} – kolmá vzdálenost těžiště od spojnice středů náprav

Z této rovnice pro hmotnost, která připadá na přední nápravu platí [4]:

$$m_{p1} = \frac{m \cdot h_{01}}{l} \cdot \operatorname{tg} v_1 - m \cdot \frac{l_z}{l} = \frac{m \cdot h_{01}}{l} \cdot \operatorname{tg} v_1 - m_p$$

(10)

kde je:

m_{p1} – měřená hmotnost pod přední nápravou

l – rozvor náprav

l_z – vzdálenost těžiště od zadní nápravy

v_1 – úhel naklonění vozidla

h_{01} – kolmá vzdálenost těžiště od spojnice středů náprav

Okamžitá hmotnost, která připadá na přední nápravu je při zvednutí vozidla zvětšena o hodnotu Δm_{p1} a platí rovnice [4]:

$$m_{p1} = m_p + \Delta m_{p1}$$

(11)

kde je:

m_{p1} – celková měřená hmotnost pod přední nápravou

m_p – měřená hmotnost pod přední nápravou bez náklonu

Δm_{p1} – přírůstek měřené hmotnosti v závislosti na naklonění vozidla

Z této rovnice po vyjádření Δm_{p1} a dosazení získáme [4]:

$$\Delta m_{p1} = m_{p1} - m_p = \frac{m \cdot h_{01}}{l} \cdot \operatorname{tg} v_1$$

(12)

kde je:

m_{p1} – celková měřená hmotnost pod přední nápravou

m_p – měřená hmotnost pod přední nápravou bez náklonu

Δm_{p1} – přírůstek měřené hmotnosti v závislosti na naklopení vozidla

m – celková hmotnost vozidla

h_{01} – kolmá vzdálenost těžiště od spojnice středů náprav

v_1 – úhel naklopení vozidla

l – rozvor náprav

Jestliže zjistíme přírůstek hmotnosti Δm_{p1} , můžeme určit kolmou vzdálenost těžiště od spojnice středů přední a zadní nápravy označovanou jako h_{01} . Rovnice pro určení této vzdálenosti bude vypadat takto [4]:

$$h_{01} = \frac{\Delta m_{p1}}{m} \cdot \frac{l}{\operatorname{tg} v_1}$$

(13)

kde je:

Δm_{p1} – přírůstek měřené hmotnosti v závislosti na naklopení vozidla

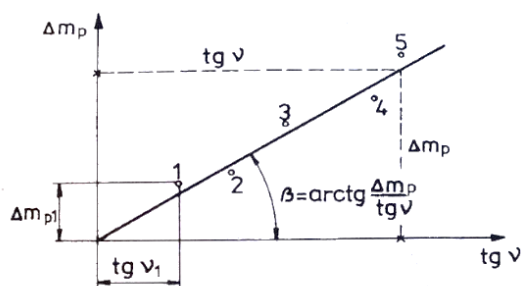
m – celková hmotnost vozidla

h_{01} – kolmá vzdálenost těžiště od spojnice středů náprav

v_1 – úhel naklopení vozidla

l – rozvor náprav

Aby byla vyloučena chybovost měření, je potřeba zjistit přírůstky Δm_{p1} pro několik úhlů naklopení vozidla v_1 . [4]



$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\Delta m_p}{\operatorname{tg} v}$$

$$h_0 = \frac{l}{m} \operatorname{tg} \beta$$

Graf. 1 - Diagram pro určení výškové polohy těžiště

V závislosti na $\text{tg } \nu_1$ vynášíme hodnoty Δm_{p1} do diagramu viz Graf. 1. Poté body grafu proložíme přímkou. U této přímky zjišťujeme její směrnici, tj. $\text{tg } \beta$. Výsledná vzdálenost h_0 bude poté dána vztahem [4]:

$$h_0 = \frac{\Delta m_p}{m} \cdot \frac{l}{\text{tg } \nu} = \frac{l}{m} \cdot \text{tg } \beta$$

(14)

kde je:

h_0 – výsledná vzdálenost těžiště od spojnice středů náprav určená pomocí diagramu

Δm_p – odečtená hodnota přírůstku měřené hmotnosti pomocí přímky

l – rozvor náprav

ν – úhel naklonění vozidla odečtený z diagramu

m – celková hmotnost vozidla

β – směrnice přímky určené metodou lineární regrese v diagramu

A výsledná výška těžiště se určuje pomocí vztahu [4]:

$$h = h_0 + r_{stat}$$

(15)

kde je:

h – výška těžiště nad vozovkou

h_0 – výška těžiště nad spojnicí středů náprav

r_{stat} – poloměr kol vozidla

Předpokládáme, že r_{stat} – poloměr kola vozidla je pro přední a zadní nápravu stejná.

Při měření výšky těžiště výše uvedeným způsobem je nutno zjistit úhel ν_1 . Tento úhel lze vyjádřit na základě změřené výšky H_1 pomocí vztahu [4]:

$$\sin \nu_1 = \frac{H_1}{l}, \cotg \nu_1 = \frac{\sqrt{1 - \sin^2 \nu_1}}{\sin \nu_1} = \frac{\sqrt{l^2 - H_1^2}}{H_1}$$

(16)

kde je:

ν_1 – úhel naklonění vozidla

H_1 – vzdálenost mezi středem zvedané nápravy a podložkou vozidla

l – rozvor náprav

Pro hodnotu h_{01} spojením rovnic (13) a (16) dostaneme vztah [4]:

$$h_{01} = \frac{\Delta m_{p1}}{m} \cdot \frac{l}{H_1} \cdot \sqrt{l^2 - H_1^2}$$

(17)

kde je:

Δm_{p1} – přírůstek měřené hmotnosti v závislosti na naklopení vozidla

h_{01} – kolmá vzdálenost těžiště od spojnice středů náprav

m – celková hmotnost vozidla

l – rozvor náprav

H_1 – vzdálenost mezi středem zvedané nápravy a podložkou vozidla

Stejně tak platí i pro vodorovnou osu kontrolního diagramu, že [4]:

$$\operatorname{tg} v_1 = \frac{H_1}{\sqrt{l^2 - H_1^2}}$$

(18)

kde je:

v_1 – úhel naklopení vozidla

l – rozvor náprav

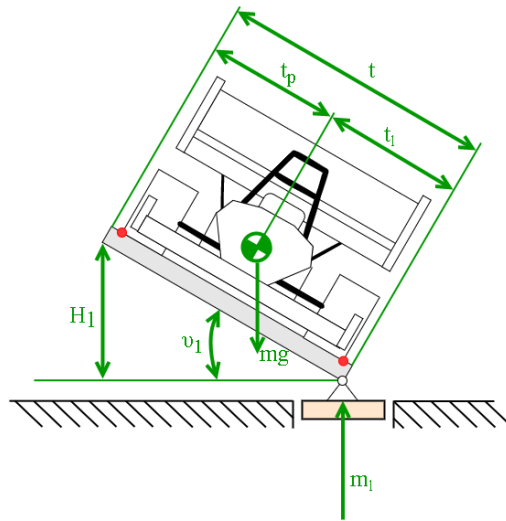
H_1 – vzdálenost mezi středem zvedané nápravy a podložkou vozidla

V případě zjišťování výšky těžiště je nutno zajistit, aby se karoserie vozidla při naklápění neposunula vzhledem k podvozku. Je tedy nutné zablokovat pružiny [4].

Jedná se o snadnou metodu měření výškové polohy těžiště. K jejímu provedení není potřeba speciálních plošin nebo rámců. Za nevýhodu můžeme považovat menší přesnost, jelikož při naklápění vozidla vznikají menší odchylky h_0 než u jiných metod.

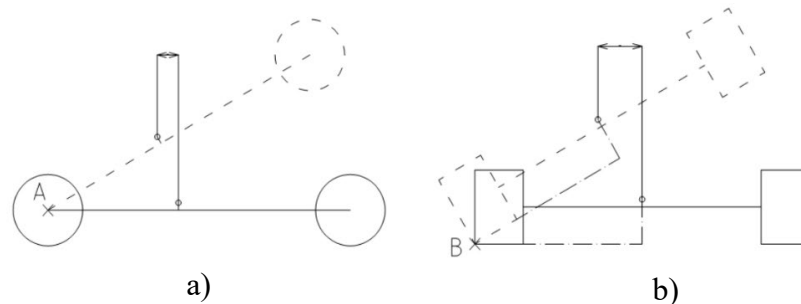
5.4 Měření výškové polohy těžiště naklápěním na bok

Tato metoda měření vychází z metody naklápěním na nápravu. Vozidlo je připevněno k plošině, pomocí které celé vozidlo naklápíme na bok viz Obr. 7. Nevýhodou této metody je nutnost konstrukce speciální plošiny, u které je nutno zjistit vlastní polohu těžiště. Tyto zjištěné hodnoty v příslušných osách se poté odečítají od měřených hodnot při zjišťování těžiště vozidla [4] [5].



Obr. 7 - Metoda měření naklápěním na bok [5] [4]

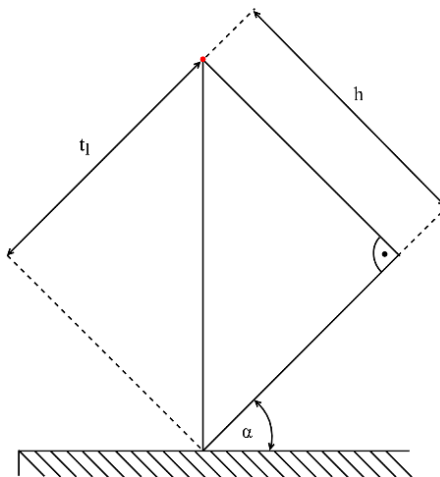
Tak jako při postupu měření v kapitole 5.3 je nutné zajistit, aby se karoserie neposunula vzhledem k podvozku. Je také nutné počítat s deformacemi pneumatik. Také je nutné vozidlo zajistit tak, aby bylo pevně připevněno k plošině a nedošlo k jeho posunutí a případnému poškození při větších úhlech náklonu. Za výhodu můžeme považovat přesnější zjištění polohy těžiště, jelikož při určitém úhlu naklonění vzniká větší odchylka $h_{01} \cdot \sin \nu_1$ než je tomu u metody měření těžiště nakloněním na nápravu viz Obr. 8. [4] [5].



Obr. 8 - Rozdíl mezi určováním těžiště při měření nakloněním: a) na nápravu b) na bok [5]

5.5 Zjištění úhlu překlpení

Princip této metody spočívá v uvedení vozidla do ustálené polohy postupným naklápěním na bok. Pokud je vozidlo v ustálené poloze, odečteme úhel naklpení a pomocí tohoto úhlu vypočítáme vertikální polohu těžiště h viz Obr. 9 [6].



Obr. 9 – Zjištění úhlu překlpení [6]

Za předpokladu, že je rozchod pro přední a zadní nápravu stejný pak jednoduše určíme vertikální polohu těžiště dle vzorce [6]:

$$h = t_l \cdot \operatorname{tg}(\alpha - 90^\circ)$$

(19)

kde je:

h – výška těžiště nad vozovkou

t_l – vzdálenost těžiště od pravého kola vozidla

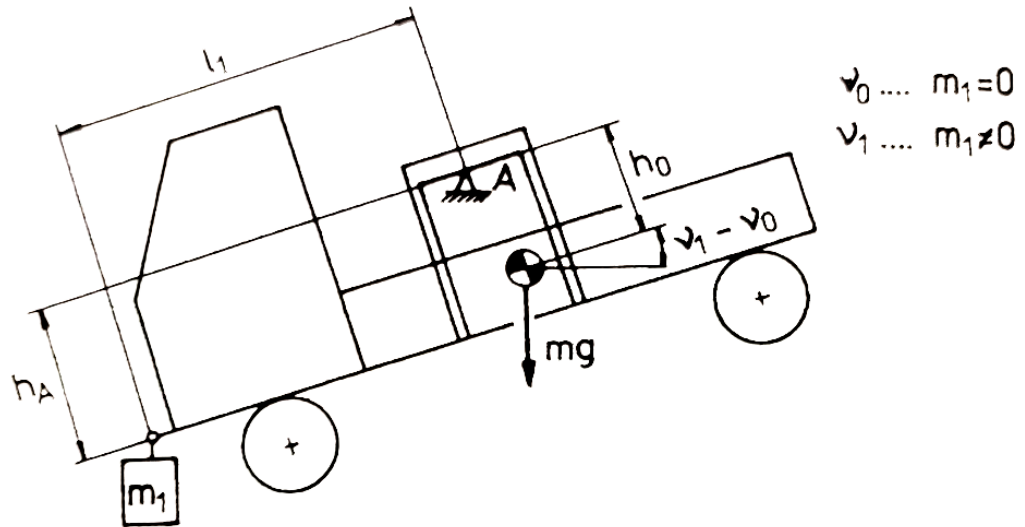
α – úhel naklpení vozidla

Stejně tak jako u předchozích metod je nutné nejprve zjistit horizontální polohu těžiště a vhodným způsobem zajistit, aby se karoserie nepohybovala při měření vůči podvozku.

Výhodou může být to, že k změření výšky nepotřebujeme váhy. Vozidlo je ale nutné zajistit tak, aby nedošlo k nechtěnému překlpení a poškození. Lehká vozidla lze snadno zvednout do požadovaného úhlu ale v případě těžších vozidel to tak snadné není.

5.6 Měření při zavěšení celého vozidla za karoserii

Je to princip, kdy je celé vozidlo zavěšeno za použití speciálního rámu, který je připevněn ke karoserii vozidla. Těžiště se měří bez použití vah a tímto způsobem lze určit též výškovou polohu odpružené části vozidla, jelikož je možno nápravy demontovat. Princip měření je naznačen na Obr. 10 [4].



Obr. 10 – Měření těžiště při zavěšení celého vozidla za karoserii [4]

Vzhledem k bodu A lze sestavit následující rovnice rovnováhy momentů [4]:

$$\sum M_A: m_1 \cdot [l_1 \cos(n_1 - n_0) - h_A \sin(n_1 - n_0)] - mh_0 \sin(n_1 - n_0) = 0$$

(20)

kde je:

m_1 – hmotnost přidaného závaží

l_1 – horizontální vzdálenost bodu zavěšení přidaného závaží od bodu zavěšení vozidla

h_A – vertikální vzdálenost bodu zavěšení přidaného závaží od bodu zavěšení vozidla

ν_0 – úhel naklonění vozidla bez přidaného závaží

ν_1 – úhel naklonění vozidla s přidaným závažím

m – celková hmotnost vozidla

h_0 – vertikální vzdálenost těžiště k bodu zavěšení

A z této rovnice následně vyjádřením vzdálenosti h_0 získáme [4]:

$$h_0 = \frac{m_1}{m} \cdot [l_1 \cotg(n_1 - n_0) - h_A]$$

(21)

kde je:

m_1 – hmotnost přidaného závaží

l_1 – horizontální vzdálenost bodu zavěšení přidaného závaží od bodu zavěšení vozidla

h_A – vertikální vzdálenost bodu zavěšení přidaného závaží od bodu zavěšení vozidla

ν_0 – úhel naklonění vozidla bez přidaného závaží

ν_1 – úhel naklonění vozidla s přidaným závažím

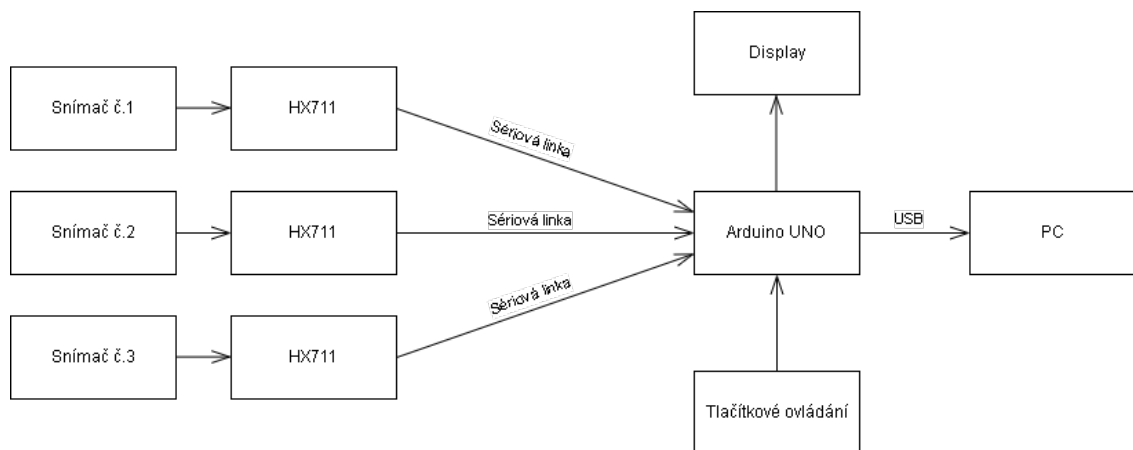
m – celková hmotnost vozidla

h_0 – vertikální vzdálenost těžiště k bodu zavěšení

V některých případech je potřeba určit polohu těžiště pouze odpružené části vozidla. V tomto případě je tato metoda vhodná, jelikož lze při měření demontovat všechny nápravy. Nicméně je potřeba zkonstruovat speciální rám za který je vozidlo zavěšeno v prostoru.

6 NÁVRH ZAPOJENÍ A VOLBA KOMPONENT

Celé zařízení je založeno na vývojové desce Arduino UNO, která je při použití vhodného firmware a doplňujících modulů finančně dostupnou alternativou k drahým měřicím kartám. Nicméně je potřeba myslet na kalibraci zařízení tak, aby výsledky měření byly správné. Na Obr. 11 je zobrazeno blokové schéma celého měřicího řetězce.



Obr. 11 - Blokové schéma zapojení měřicího řetězce

Jelikož nebylo možné měřit na reálném vozidle, měřicí zařízení je navrženo pro měření hmotnosti a polohy těžiště modelu vozidla. Komponenty jsou voleny s ohledem na tuto skutečnost. Nicméně pro měření na reálném voze stačí zvolit snímače s příslušným rozsahem a váhu na tyto snímače zkalibrovat.

6.1 Snímač hmotnosti

Pro potřeby realizace zařízení byly zvoleny tři snímače typu YZC-131 se jmenovitým zatížením 3 kg. Snímač je typu single-point se čtveřicí tenzometrů zapojených do plného můstku. Snímač je vyobrazen na Obr. 12 a jeho základní parametry jsou v Tab. 1.



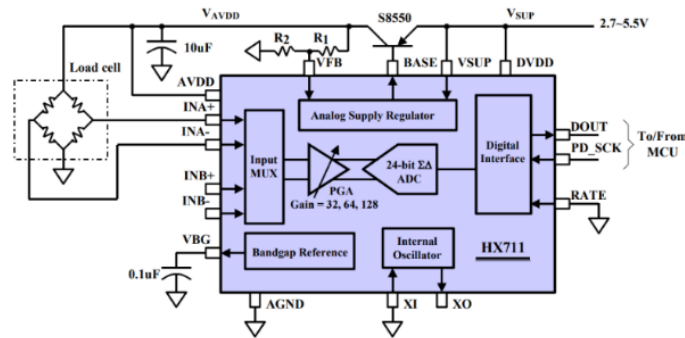
Obr. 12 - Snímač hmotnosti YZC - 131 [7]

Měřicí rozsah (N)	0–30
Povolené přetížení (%)	150
Napájecí napětí (V DC)	5–10
Vstupní impedance (Ω)	$1\ 066 \pm 10\ %$
Výstupní impedance (Ω)	$1\ 000 \pm 10\ %$
Izolační odpor (M Ω)	$\geq 2\ 000$
Výstupní napětí (mV/V FS)	$1 \pm 0,1$
Vyvážení nuly (mV/V)	$\pm 0,1$
Chyba linearity (% FS)	$\pm 0,03$
Opakovatelnost (% FS)	0,03
Hystereze (% FS)	0,03
Tečení (% FS, 5 min)	0,05
Rozsah provoz. teploty ($^{\circ}\text{C}$)	-20 až 40
Materiál	hliník
Rozměry (mm)	75 x 12,7 x 12,7

Tab. 1 - Základní parametry snímače YZC-131 [7]

6.2 Převodník HX711

Je to dvoukanálový vysoce přesný 24-bit A/D převodník určený k měření analogových signálů. Schéma zapojení tohoto převodníku je na Obr. 13. Modul obsahuje integrovaný zesilovač analogového signálu se zesílením až 128x a toto zesílení je možno programově měnit. Komunikace probíhá sériově [8] [9].



Obr. 13 - Zapojení převodníku HX711 [9]

6.3 Arduino UNO

Je vývojová deska založená na mikroprocesoru ATmega328. Deska disponuje šesti analogovými vstupy a čtrnácti I/O digitálními piny. Desku lze skrze USB programovat a toto rozhraní lze využít i k zasílání dat do PC.



Obr. 14 - Přední pohled na desku Arduino UNO [10]

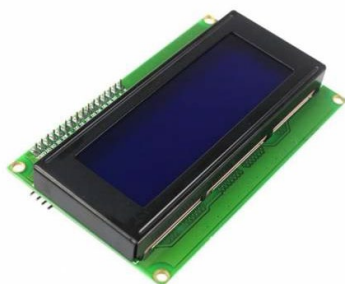
Vývojová deska se programuje pomocí programovacího jazyka Wiring, který je příbuzný jazyku C. Základní vývojové prostředí pro vytváření programů se jmenuje ArduinoIDE. Nicméně pro zjednodušení vývoje firmware při vyhotovení této práce bylo využito Prostředí Visual Studio Code s nainstalovaným doplňkem PlatformIO. Práce v tomto prostředí je intuitivnější a přehlednější.

Mikroprocesor	Atmega 328
Prac. napětí [V]	5
Vstupní doporučené napětí [V]	7 - 12
Počet digitálních I/O pinů	14
Počet analogových pinů	6
Paměť Flash [KB]	32
Paměť SRAM [KB]	2
Paměť EEPROM [KB]	1
Takt [MHz]	16

Tab. 2 - Základní parametry vývojové desky Arduino UNO [10]

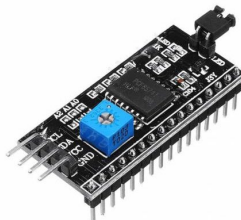
6.4 Display

Pro zobrazení okamžitých hodnot hmotnosti a údajů o kalibraci zařízení byl zvolen LCD displej HD44780 viz Obr. 15, který může zobrazit až 20x4 znaků [11].



Obr. 15 - LCD display HD44780 [11]

Tento displej je doplněn o sériové rozhraní I2C viz Obr. 16. Toto řešení dovoluje displej k vývojové desce připojit pouze pomocí dvou vodičů. Na modulu je i trimer, kterým nastavujeme kontrast displeje [12].



Obr. 16 - Sériové rozhraní I2C pro LCD HD44780 [12]

6.5 Tlačítkové ovládání

K ovládání váhy slouží tři tlačítka PBS-12B-B s polohou kontaktu NO určené k instalaci do panelu, který můžeme vidět na Obr. 17 [13].



Obr. 17 - Tlačítko PBS-12B-B [13]

6.6 PC s předinstalovaným LabView

Software LabView je vyvíjen společností National Instruments a je určen ke grafickému programování aplikací využívaných při měření a automatickém řízení.

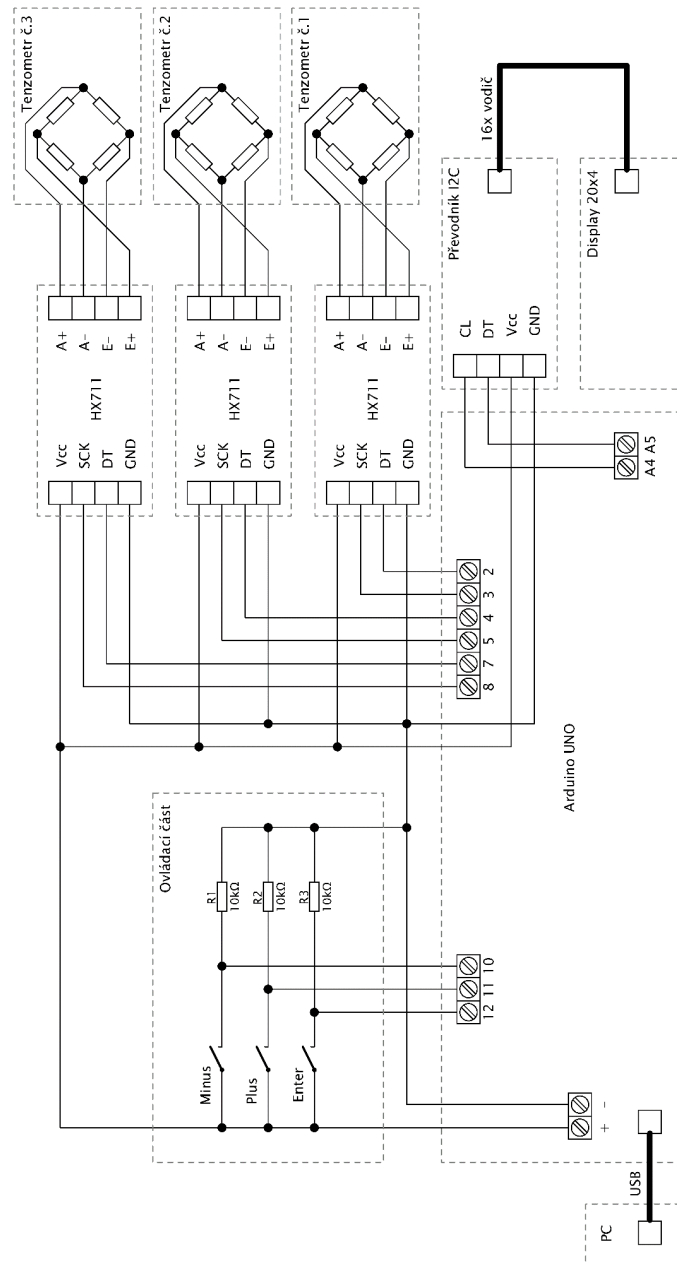
Při tvorbě této práce byla využita nejnovější verze LabView 21.0. Licenci trial mohou studenti získat na dobu 40 dnů zdarma. Nicméně vše v rámci této práce lze naprogramovat i pomocí starších verzí tohoto programu, které jsou dostupné v laboratořích na TF ČZU. Minimální systémové požadavky vývojového prostředí LabView na výpočetní výkon PC jsou uvedeny v tabulce níže.

Položka	Minimální požadavky
Procesor	Pentium 4M (nebo ekvivalent) a novější (32-bit)
	Pentium 4 G1 (nebo ekvivalent) a novější (64-bit)
RAM	1 GB
Rozlišení obrazovky	1024 x 768 px
Místo na disku	5 GB
Operační systém	Windows 10/8.1/8/7 SP1 (32- nebo 64-bit)
	Windows Server 2012 R2 (64-bit)
	Windows Server 2008 R2 SP1 (64-bit)
	OS X 10.11 nebo 10.12
	Red Hat Enterprise Linux Desktop + Workstation 6.5, open SUSE LEAP 42.1 nebo 42.2 Scientific Linux 6.5 nebo novější, CentOS 7

Tab. 3 - Minimální systémové požadavky vývojového prostředí LabView 21.0. [14]

6.7 Schéma zapojení

Schéma zapojení měřící soustavy vychází z blokového schématu a můžeme ho vidět na Obr. 18. Na digitální piny 2,4 a 7 přichází údaj o změřeném úbytku napětí na jednotlivých snímačích hmotnosti. Tyto údaje jsou pomocí firmware převedeny na údaje o změřené hmotnosti a následně zaslány po sběrnici USB do PC. Data o měřených hmotnostech jsou také zobrazeny na displeji.



Obr. 18 - Schéma zapojení měřícího řetězce

K ovládání zařízení slouží tři tlačítka. Pomocí tlačítka enter při provozu nulujeme měřenou hmotnost nebo se lze tímto tlačítkem při startu zařízení dostat podržením do menu pro kalibraci. Při kalibraci využíváme k nastavení kalibračního faktoru tlačítka plus a minus.

Tlačítka přivádí napětí na digitální piny 10,11 a 12. Tyto piny musí být nastavené ve firmware jako vstupní. Poté lze pomocí těchto pinů detekovat logickou jedničku nebo nulu, tj. stisknutí příslušného tlačítka.

Piny A4 a A5 slouží k zasílání dat pro displej po sériové lince I2C. Toto řešení má kromě šetření pinů výhodu v tom, že můžeme k vývojové desce případně připojit přes tyto piny další periferie. Celé zařízení je napájeno napětím +5 V ze sběrnice USB, případně lze využít externího zdroje napájení až +12 V. Na desce je integrovaný stabilizátor napětí +5 V, ze kterého jsou napájeny všechny součásti zařízení. Deska umožňuje též napájet zařízení napětím +3,3 V. Nicméně takové zařízení v tomto případě k vývojové desce připojeno není.

6.8 Firmware vývojové desky Arduino

Firmware naprogramovaný v jazyce Wiring se skládá zpravidla ze dvou částí. První částí je procedura `setup()`, která je volána jednou při začátku programu. Zpravidla je zde část kódu sloužící k inicializaci zařízení. A v tomto případě je zde i vytvořen program, který slouží ke kalibraci zařízení. Druhou částí je funkce `loop()`, která po ukončení `setup()` probíhá opakovaně. Zde probíhá vlastní měření hmotnosti a zasílání těchto dat po USB do PC.

K naprogramování firmware bylo využito několika knihoven sloužících k usnadnění programování, získávání dat z převodníků HX711 a zobrazování hodnot, případně textu na displeji. Vytvořený program pro účely této práce nalezneme na přiloženém CD.

7 PROGRAM V LABVIEW

Programování ve vývojovém prostředí LabView lze rozdělit do dvou částí. První částí je vytváření blokového diagramu, ve kterém pomocí spojování funkčních bloků tvoříme vlastní program a druhou částí je tvorba front-panelu, tedy uživatelského rozhraní pro zadávání dat uživatelem a prezentaci naměřených hodnot. Obě části na sebe vzájemně navazují. Vytvořený program je na přiloženém CD.

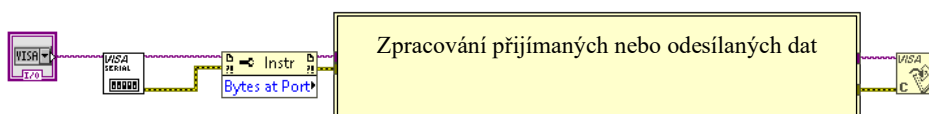
7.1 Blokový diagram

Pro správnou funkci programu je nejprve potřeba správně nastavit komunikaci s připojeným zařízením. V tomto případě je využito sady bloků VISA.

Komunikaci nastavujeme pomocí bloku VISA Configure Serial Port, ke kterému je pro usnadnění ovládání přiřazen ovládací blok na vstupu VISA resource name. Pomocí tohoto bloku je volen přístroj, se kterým je zahájena komunikace. Pokud to situace vyžaduje je možno blok VISA Configure Serial Port dvojklikem rozkliknout a nastavit další vlastnosti komunikace s připojeným zařízením.

Komunikaci dále řídíme pomocí bloku VISA property node. Pomocí tohoto bloku lze pro potřeby programování například získat informace o probíhající komunikaci.

K řádnému ukončení probíhající komunikace slouží blok VISA close. Bez tohoto bloku nám LabView nedovolí program spustit. Příklad blokového schématu pro nastavení komunikace můžeme vidět na Obr. 19.



Obr. 19 - Příklad zapojení bloků VISA pro nastavení komunikace

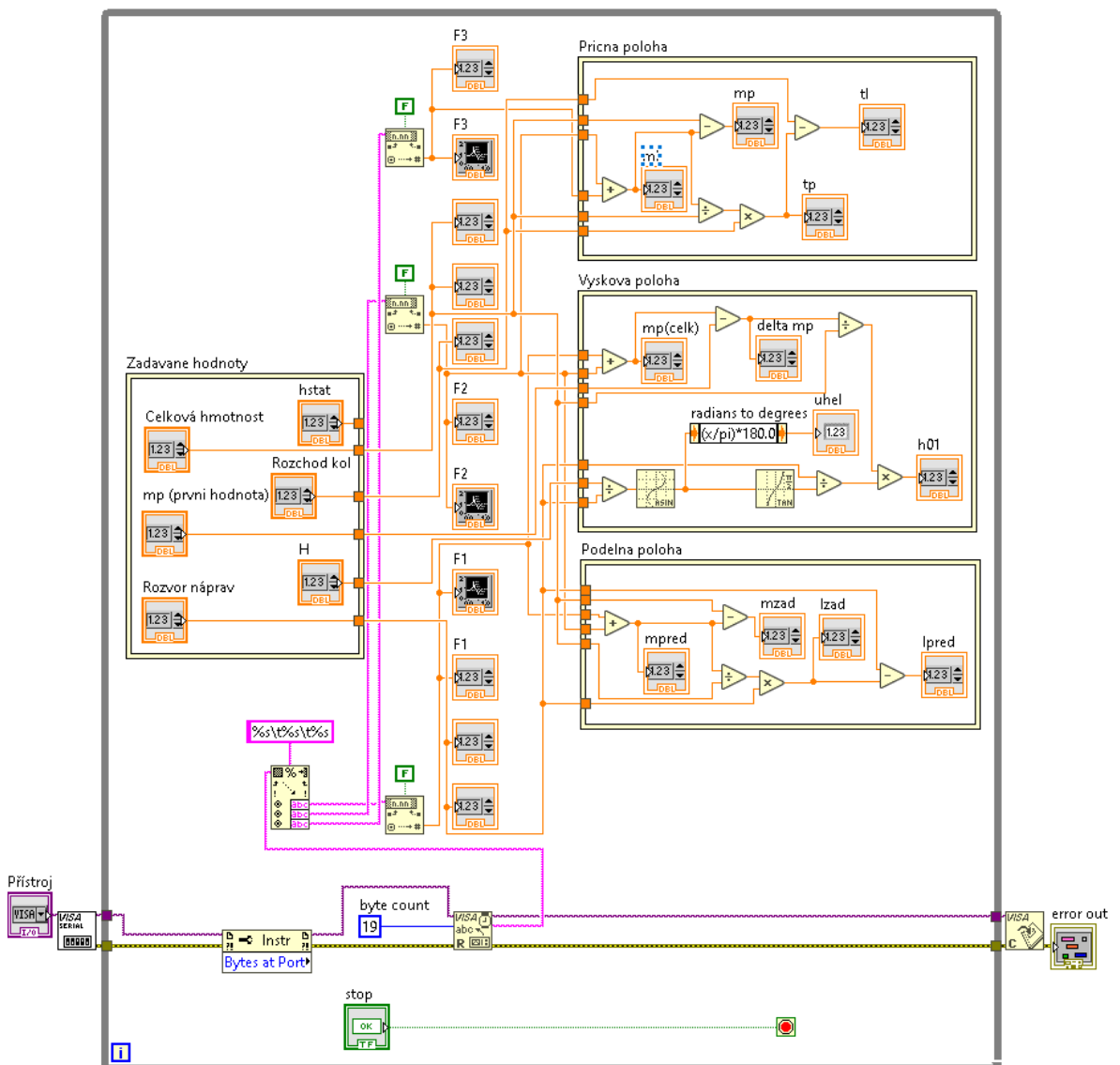
Aby měření po spuštění programu probíhalo kontinuálně, jsou bloky programu umístěny ve While smyčce, která je ukončována tlačítkem STOP.

Pro čtení dat odesílaných deskou Arduino používáme blok VISA read. Jednotlivé údaje o měřené hmotnosti je potřeba rozdělit zvlášť do proměnných. Tyto číselné údaje jsou odděleny tabulátorem a zasílané jako text.

Pomocí bloku scan from string lze zprávu dle nadefinovaného formátu rozdělit na dílčí textové řetězce. Tyto dílčí textové řetězce pak lze zkonvertovat na číselné údaje.

Dále jsou jednotlivé číselné údaje o hmotnosti zpracovány pomocí matematických operací dle postupu měření uvedeném v kapitole Metody zjišťování polohy těžiště vozidla, která je součástí této práce.

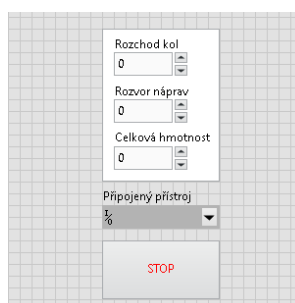
Kompletní blokové schéma můžeme vidět na Obr. 20. Části programu jsou pro přehlednost rozděleny pomocí struktur.



Obr. 20 - Blokové schéma programu pro měření polohy těžiště vozidla

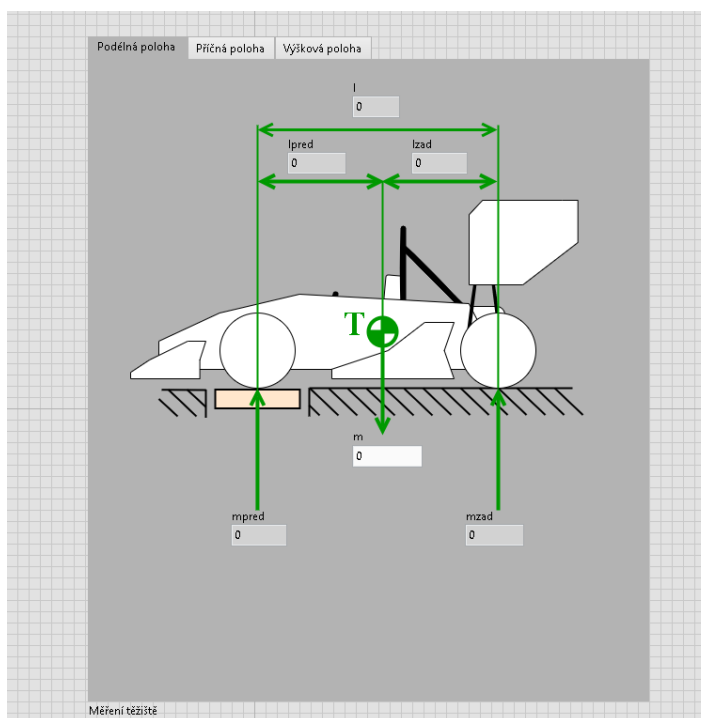
7.2 Front-panel

Jsou zde prvky k zadání hodnot rozvoru náprav, rozchodu kol a celkové hmotnosti měřeného vozidla. Dále zde volíme pomocí rozbalovacího menu připojený přístroj, od kterého se přijímají změřená data. A tlačítko stop, pomocí kterého lze zastavit probíhající měření viz Obr. 21.



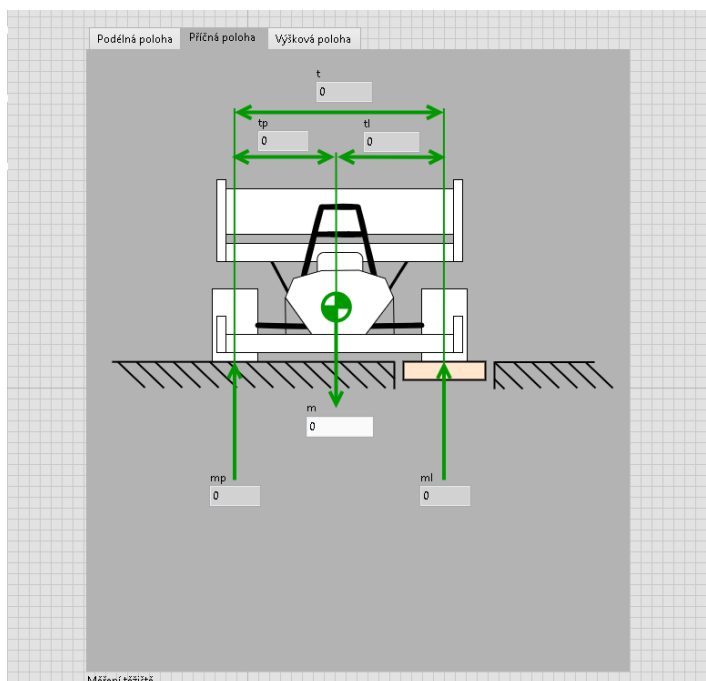
Obr. 21 - Prvky pro zadávání dat o vozidle a volbu připojeného měřicího zařízení

Jednotlivé části měření jsou rozděleny pomocí záložek, mezi kterými může uživatel libovolně přepínat dle aktuálně měřených parametrů. Příklad pro měření těžiště v podélném směru můžeme vidět na Obr. 22.

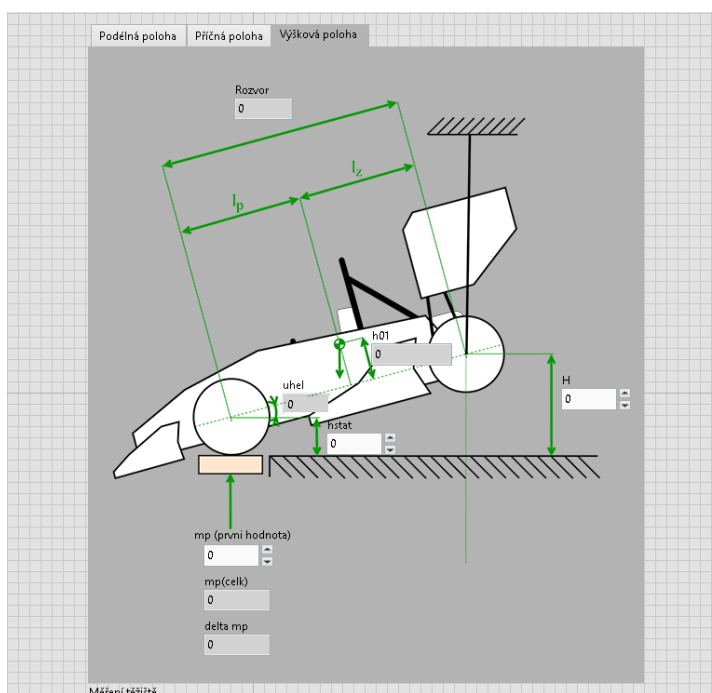


Obr. 22 - Záložka určená k měření těžiště v podélném směru

Druhá záložka je určena k měření polohy těžiště v příčném směru. Její podobu můžeme vidět na Obr. 24.



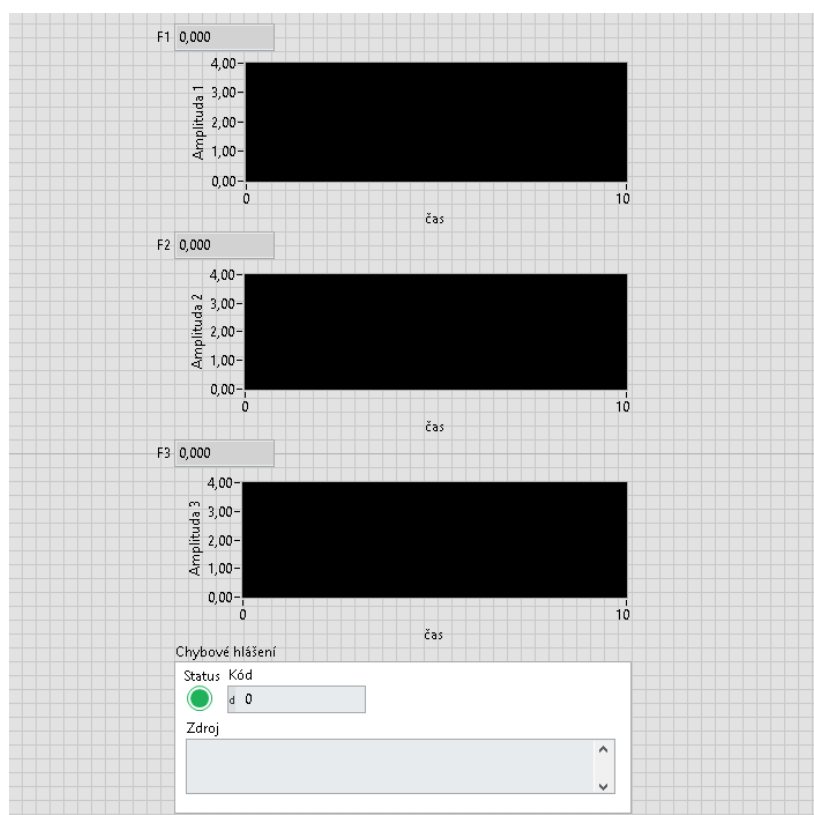
Obr. 24 - Záložka určená pro měření v příčném směru



Obr. 23 - Záložka určená k měření výškové polohy těžiště.

Na třetí záložce nalezneme prvky k určení výškové polohy těžiště. Na rozdíl od předchozích dvou záložek zde probíhá měření v několika fázích s různým náklonem měřeného vozidla. Proto se v této záložce zadávají další doplňující hodnoty týkající se aktuálního měření. Těmito hodnotami jsou: poloměr kol, výška zvednutí zadní (nebo přední) nápravy a hodnota zatížení nezvedané nápravy ve výchozí pozici bez náklonu viz Obr. 23.

Dále je zde číselné zobrazení aktuálního zatížení tenzometrických snímačů a jejich grafická interpretace v závislosti na čase pomocí třech grafů. Pod těmito grafy je umístěn výstup chybových hlášení. Zde lze zjistit, zda komunikace s připojeným měřicím zařízením probíhá v pořádku viz Obr. 25.



Obr. 25 - Prvky pro zobrazení probíhajícího zatížení a chybového hlášení

8 KALIBRACE ZAŘÍZENÍ

Kalibrace se provádí pomocí firmware vývojové desky Arduino. Do kalibračního menu se dostaneme podržením tlačítka enter při startu zařízení. Postupně tak kalibrujeme měřené hodnoty všech tenzometrických snímačů nastavením tzv. kalibračního faktoru pro obvod HX711.

8.1 Určení hmotnosti závaží

Kalibrace tenzometrických snímačů byla provedena pomocí závaží, u kterého byla přesně stanovena hmotnost laboratorní vahou Ohaus Adventurer AX5202. Tato váha má váživost do 5200 g s jedním dílkem 0,01 g. Vážena byla dvě olověná závaží pro potápěče o předpokládané hmotnosti 2 kg.

Měření hmotnosti těchto závaží bylo pro každé zvlášť provedeno 6x a výsledky z tohoto měření můžeme vidět v Tab. 4 a Tab. 5.

Měření	Hmotnost
1	2033,04
2	2033,05
3	2033,05
4	2033,05
5	2033,05
6	2033,06
Aritmetický průměr [kg]	2033,05
Směrodat. odchyl. jednoho měření [-]	0,02
Směrodat. odchyl. arit. prům. [-]	0,01
Relativní chyba [%]	0,00076

Tab. 4 - Určení hmotnosti závaží č.1

Měření	Hmotnost
1	2027,83
2	2027,83
3	2027,82
4	2027,84
5	2027,85
6	2027,84
Aritmetický průměr [kg]	2027,84
Směrodat. odchyl. jednoho měření [-]	0,03
Směrodat. odchyl. arit. prům. [-]	0,01
Relativní chyba [%]	0,00127

Tab. 5 - Určení hmotnosti závaží č.2

8.2 Nastavení kalibračního faktoru

K nastavení kalibračního faktoru bylo využito závaží č.1 kterému byla stanovena hmotnost 2033,05g dle postupu v předchozí kapitole. Tato hmotnost je zvolena jako referenční a kalibrační faktor poté nastavujeme tak aby při zatížení daného tenzometru zařízení zobrazovalo právě tuto hmotnost. Nastavení je provedeno opakovaně, abychom dosáhli co nejpřesnějšího výsledku. Nastavované hodnoty kalibračního faktoru pro všechny tři snímače můžeme vidět v Tab. 6, Tab. 7 a Tab. 8.

Nastavení senzoru č.1	kal. fakt.
1	3288
2	3286
3	3288
4	3289
5	3288
6	3288
Aritmetický průměr [kg]	3287,83
Směrodat. odchyl. jednoho měření [-]	2,41
Směrodat. odchyl. arit. prům. [-]	0,98
Relativní chyba [%]	0,07325

Tab. 6 - Nastavení kalibračního faktoru pro snímač č.1

Nastavení senzoru č.2	kal. fakt.
1	3112
2	3112
3	3113
4	3111
5	3113
6	3112
Aritmetický průměr [kg]	3112,17
Směrodat. odchyl. jednoho měření [-]	1,84
Směrodat. odchyl. arit. prům. [-]	0,75
Relativní chyba [%]	0,05925

Tab. 7 - Nastavení kalibračního faktoru pro snímač č.2

Nastavení senzoru č.3	kal. fakt.
1	3108
2	3109
3	3106
4	3108
5	3108
6	3108
Aritmetický průměr [kg]	3107,83
Směrodat. odchyl. jednoho měření [-]	2,41
Směrodat. odchyl. arit. prům. [-]	0,98
Relativní chyba [%]	0,07749

Tab. 8 - Nastavení kalibračního faktoru pro snímač č.3

Kalibrační faktory jsou nastaveny pro každý snímač zvlášť ve firmware vývojové desky Arduino UNO dle zjištěných hodnot kalibračního faktoru z Tab. 6, Tab. 7 a Tab. 8. Měřená hmotnost byla ověřena pomocí závaží č. 2 a pomocí závaží, která jsou k dispozici v laboratořích Katedry elektrotechniky a automatizace na TF ČZU viz Obr. 27 a Obr. 26..



Obr. 27 - Další příklad závaží v laboratořích TF ČZU



Obr. 26 - Sada závaží v laboratořích TF ČZU

9 MĚŘENÍ TĚŽIŠTĚ VOZIDLA

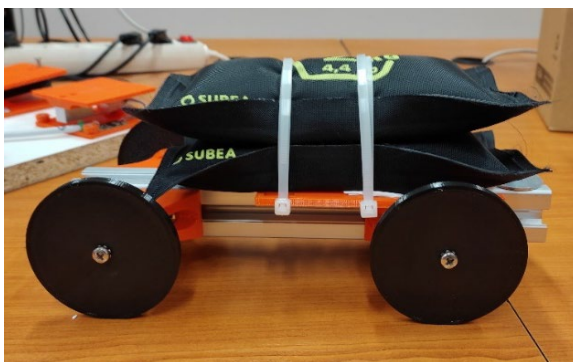
Pro správně určenou polohu těžiště dle metod popsanych v kapitole 5 je třeba znát celkovou hmotnost vozidla.

Kalibrace zařízení, měření hmotnosti modelu vozidla a měření těžiště proběhlo v laboratořích Katedry elektrotechniky a automatizace na TF ČZU v Praze. Jelikož nebylo možné měřit na reálném vozidle, byla změřena poloha těžiště vytvořeného modelu. Ale při použití snímačů s vhodným rozsahem a dodržení postupu popsáném v této práci lze určit polohu těžiště reálného vozu.



Obr. 28 - Fotografie měřeného modelu - pohled zepředu

Model se skládá z extrudovaného hliníkového profilu, který je 252 mm dlouhý. K tomuto profilu jsou připevněny pomocí T matic nápravy s koly a platforma pro připevnění dodatečného závaží. Díly modelu kromě zmiňovaného profilu byly vytvořeny autorem této práce v programu Fusion 360 od firmy Autodesk a následně vytisknuty pomocí 3D tiskárny z materiálu PET-G. Modely vytvořené v rámci vypracování zadání této práce jsou k dispozici na příloženém CD. Sestavený model, který byl použit při měření můžeme vidět na Obr. 28 a Obr. 29.



Obr. 29 - Fotografie měřeného modelu – pohled ze strany

Měření polohy těžiště bylo provedeno ve dvou variantách zatížení náprav modelu vozidla. V první variantě bylo závaží umístěno blíže k zadní nápravě podvozku a ve druhé variantě naopak bylo to samé závaží umístěno blíže k přední nápravě podvozku.

9.1 Měření hmotnosti

Při měření celkové hmotnosti modelu bylo nejprve zjištěno zatížení přední nápravy a poté zatížení zadní nápravy. Měření bylo opakováno 5x pro každou nápravu viz Tab. 9. Okamžité hodnoty zatížení byly odečteny pomocí naprogramovaného programu v prostředí LabView popsaného v kapitole 7.

Měření	m_p [kg]	m_z [kg]
1	1,590	2,894
2	1,590	2,892
3	1,591	2,895
4	1,589	2,893
5	1,590	2,894
Aritmetický průměr [kg]		
	1,590	2,894
Směrodat. odchyl. jednoho měření [-]		
	0,002	0,003
Směrodat. odchyl. arit. prům. [-]		
	0,001	0,001
Relativní chyba [%]		
	0,099	0,088

Tab. 9 - měření zatížení jednotlivých náprav pro určení celkové hmotnosti

Z hodnot měření byl určen aritmetický průměr, který při uvedené relativní chybě a směrodatné odchylce považujeme za výsledné zatížení. Všechny tyto údaje zvlášť pro přední a zadní nápravu jsou uvedeny v Tab. 9. Celková hmotnost modelu se rovná součtu zatížení pro přední a zadní nápravu, tedy $m = 4,484$ kg.

9.2 Měření v podélném a příčném směru – varianta č.1

Měření těžiště v podélném směru bylo provedeno 5x. Při první variantě měření byla zátěž umístěna blíže k zadní nápravě podvozku. Výsledky z tohoto měření můžeme vidět v následující tabulce.

Měření	l_p [mm]	l_z [mm]	m_p [kg]
1	101,329	55,671	1,590
2	101,084	55,916	1,597
3	101,259	55,741	1,592
4	101,294	55,706	1,591
5	101,329	55,671	1,590
Aritmetický průměr [kg]			
	101,259	55,741	1,592
Směrodat. odchyl. jednoho měření [-]	0,228	0,228	0,007
Směrodat. odchyl. arit. prům. [-]	0,102	0,102	0,003
Relativní chyba [%]	0,225	0,409	0,409

Tab. 10 - Výsledky měření polohy těžiště v podélném směru (varianta č.1)

Z naměřených hodnot vyplývá, že se těžiště nachází v podélném směru blíže k zadní nápravě. Tj. těžiště je vzdáleno v podélném směru od středu zadní nápravy 56,393 mm a od středu přední nápravy je těžiště vzdáleno 100,607 mm.

Výsledky měření polohy těžiště v příčném směru můžeme vidět v následující tabulce. Tak jako při měření polohy v podélném směru bylo toto měření provedeno 5x.

Měření	t_p [mm]	t_l [mm]	m_l [kg]
1	61,980	60,021	2,278
2	61,871	60,129	2,274
3	62,061	59,939	2,281
4	61,843	60,157	2,273
5	62,115	59,885	2,283
Aritmetický průměr [kg]			
	61,974	60,026	2,278
Směrodat. odchyl. jednoho měření [-]	0,263	0,263	0,010
Směrodat. odchyl. arit. prům. [-]	0,118	0,118	0,004
Relativní chyba [%]	0,424	0,438	0,425

Tab. 11 - Výsledky měření polohy těžiště v příčném směru (varianta č.1)

Z výsledků měření v Tab. 11 můžeme vidět, že při uvedené směrodatné odchylce a relativní chybě je vzdálenost těžiště od kol na levé straně automobilu o 1,948 mm kratší než vzdálenost ke kolům na pravé straně automobilu.

9.3 Měření výškové polohy těžiště – varianta č.1

Měření výškové polohy těžiště bylo opakováno 3x pro pět různých úhlů náklonu modelu vozidla dle postupu v kapitole 5.3. Ke zvedání modelu vozidla byl použit stativ na fotoaparát. Výsledky měření jsou uvedeny v Tab. 12, Tab. 13 a Tab. 14.

$m_{p(0)}$ [kg]	1,596					
Měření	H[mm]	v_1 [°]	tg v_1	$m_{p(celek)}$ [kg]	Δm_p [kg]	h_{01} [mm]
1	44	16,275	0,292	2,399	0,803	96,302
2	58	21,680	0,398	2,465	0,869	76,536
3	66	24,859	0,463	2,486	0,891	67,335
4	79	30,211	0,582	2,564	0,968	58,208
5	92	35,873	0,723	2,585	0,989	47,885

Tab. 12 – Výsledky měření výškové polohy těžiště – varianta č.1 (sada 1)

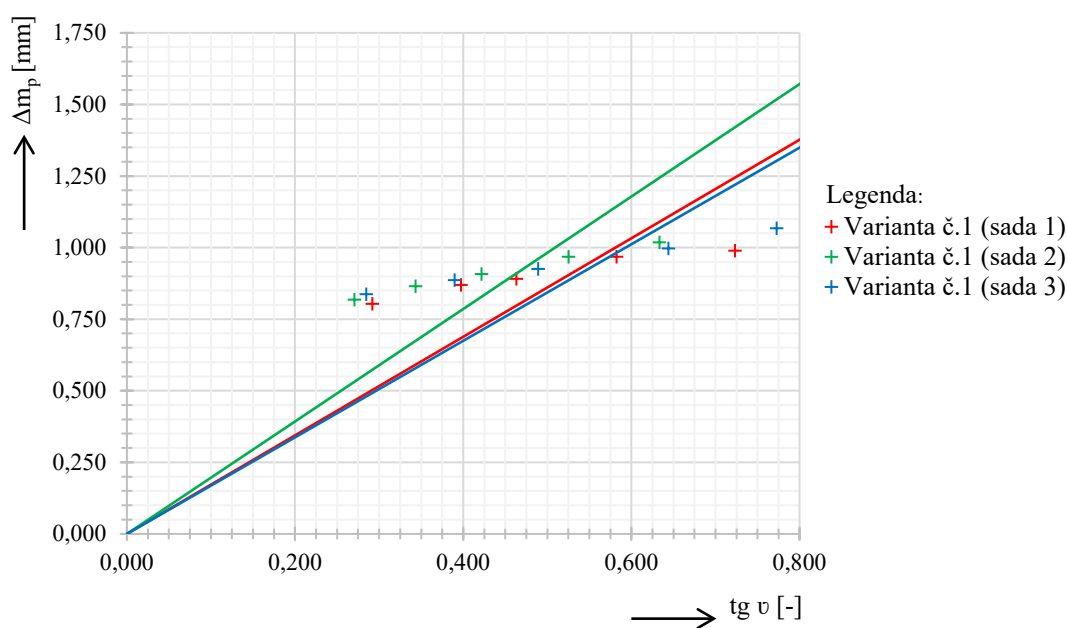
$m_{p(0)}$ [kg]	1,593					
Měření	H[mm]	v_1 [°]	tg v_1	$m_{p(celek)}$ [kg]	Δm_p [kg]	h_{01} [mm]
1	41	15,138	0,271	2,411	0,818	105,868
2	51	18,956	0,343	2,458	0,865	88,179
3	61	22,863	0,422	2,500	0,907	75,314
4	73	27,708	0,525	2,561	0,968	64,534
5	84	32,346	0,633	2,611	1,018	56,282

Tab. 13 - Výsledky měření výškové polohy těžiště – varianta č.1 (sada 2)

$m_{p(0)}$ [kg]	1,595					
Měření	H[mm]	v_1 [°]	tg v_1	$m_{p(celek)}$ [kg]	Δm_p [kg]	h_{01} [mm]
1	43	15,896	0,285	2,432	0,837	103,033
2	57	21,288	0,390	2,481	0,886	79,616
3	69	26,071	0,489	2,520	0,925	66,195
4	85	32,779	0,644	2,592	0,997	54,211
5	96	37,696	0,773	2,662	1,067	48,345

Tab. 14 - Výsledky měření výškové polohy těžiště – varianta č.1 (sada 3)

Dle postupu v kapitole 5.3 byl sestaven graf hodnot $m_{p(\Delta)}$ v závislosti na tg v_1 . Jednotlivé sady hodnot byly následně proloženy přímkami metodou lineární regrese viz Graf. 2. Směrnice těchto přímek slouží k vypočítání finální výškové polohy těžiště.



Graf. 2 - Naměřené hodnoty Δm_p v závislosti na naklonění vozidla - varianta č.1

	sada 1	sada 2	sada 3	Aritmetický průměr [mm]	Směrodat. odchyl. jednoho měření [-]	Směrodat. odchyl. arit. prům. [-]	Relativní chyba [%]
R^2	0,951	0,957	0,943	-	-	-	-
$\text{tg } \beta$	1,721	1,964	1,686	1,790	-	-	-
h_0	30,129	34,381	29,522	31,344	4,586	2,648	14,630

Tab. 15 - Hodnoty platné pro jednotlivé přímky vynesené v Graf. 2

Data pro jednotlivé přímky můžeme vidět v Tab. 15. Hodnota koeficientu determinace R^2 určuje míru shodnosti přímek určených lineární regresi s naměřenými hodnotami [15].

Z údajů h_0 je určen aritmetický průměr. Při uvedené směrodatné odchylce a relativní chybě je tento výsledný aritmetický průměr brán jako výsledná výška těžiště nad spojnici středů náprav. Připočtením poloměru kol k hodnotě h_0 získáme výšku těžiště nad vozovkou.

Při tomto měření vzniká podstatně vyšší relativní chyba, než tomu bylo u předchozích měření těžiště v příčném a podélném směru. Příčinou je zvolená metoda měření nakloněním na nápravu. Při dalším měření výšky těžiště by bylo dobré zvážit jiné metody měření popsané v první části této práce.

9.4 Měření v podélném a příčném směru – varianta č.2

Měření v příčném a podélném směru bylo provedeno pro každý směr 5x tak, jako u předchozí varianty. Závaží bylo umístěno blíže k přední nápravě modelu vozidla. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 16 a Tab. 17.

Měření	l_p [mm]	l_z [mm]	m_p [kg]
1	52,975	104,025	2,971
2	52,870	104,130	2,974
3	52,905	104,095	2,973
4	52,870	104,130	2,974
5	52,905	104,095	2,973
Aritmetický průměr [kg]	52,905	104,095	2,973
Směrodat. odchyl. jednoho měření [-]	0,096	0,096	0,003
Směrodat. odchyl. arit. prům. [-]	0,043	0,043	0,001
Relativní chyba [%]	0,181	0,092	0,092

Tab. 16 - Výsledky měření v podélném směru (varianta č.2)

Měření	t_p [mm]	t_l [mm]	m_l [kg]
1	62,170	59,830	2,285
2	61,952	60,048	2,277
3	62,088	59,912	2,282
4	62,224	59,776	2,287
5	62,116	59,885	2,283
Aritmetický průměr [kg]	62,110	59,890	2,283
Směrodat. odchyl. jednoho měření [-]	0,229	0,229	0,008
Směrodat. odchyl. arit. prům. [-]	0,103	0,103	0,004
Relativní chyba [%]	0,369	0,383	0,369

Tab. 17 - Výsledky měření v příčném směru (varianta č.2)

Z výsledků měření vyplývá, že se těžiště vozidla v podélném směru nachází blíže k přední nápravě. Těžiště je vzdáleno při uvedené směrodatné odchylce a relativní chybě 52,905 mm od středu přední nápravy a 104,095 mm od středu zadní nápravy.

V příčné rovině je těžiště vzdáleno od pravého kola 62,110 mm a od levého kola 59,890 mm s přihlédnutím k uvedené směrodatné odchylce a relativní chybě.

9.5 Měření výškové polohy těžiště – varianta č.2

Tak jako u varianty č.1 bylo měření výškové polohy těžiště opakováno 3x pro pět různých úhlů náklonu modelu vozidla. Měření bylo provedeno dle postupu v kapitole 5.3. Výsledky tohoto měření jsou uvedeny v Tab. 18, Tab. 19 a Tab. 20.

$m_{p(0)}$ [kg]	2,973					
Měření	H[mm]	v_1 [°]	tg v_1	$m_{p(ceklk)}$ [kg]	Δm_p [kg]	h_{01} [mm]
1	47	17,419	0,314	3,417	0,444	49,549
2	61	22,863	0,422	3,478	0,505	41,933
3	70	26,478	0,498	3,534	0,561	39,434
4	87	33,652	0,666	3,616	0,643	33,820
5	105	41,974	0,900	3,720	0,747	29,075

Tab. 18 - Výsledky měření výškové polohy těžiště – varianta č.2 (sada 1)

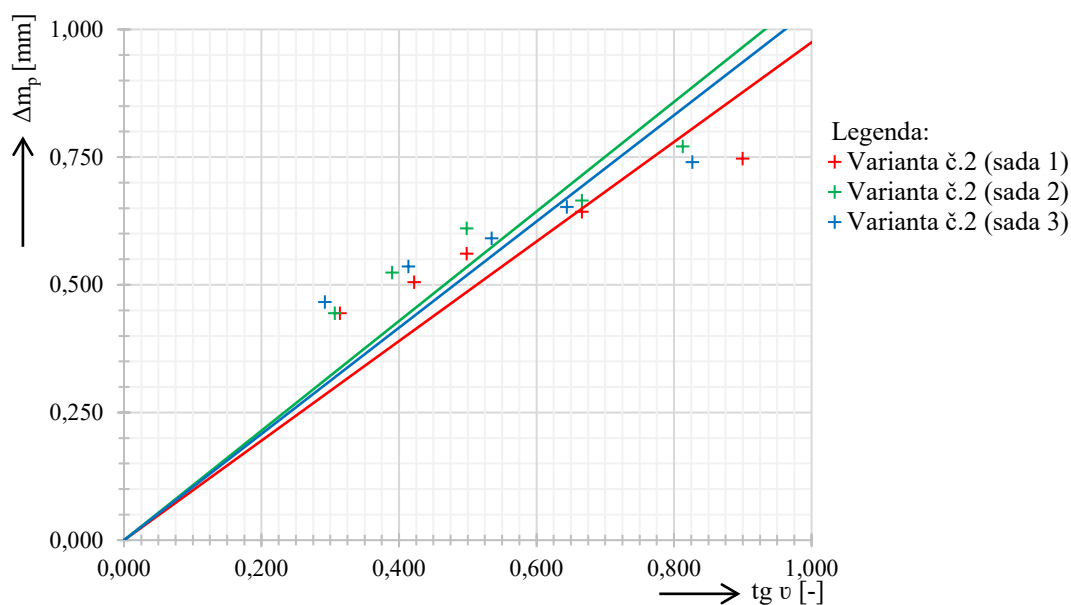
$m_{p(0)}$ [kg]	2,972					
Měření	H[mm]	v_1 [°]	tg v_1	$m_{p(ceklk)}$ [kg]	Δm_p [kg]	h_{01} [mm]
1	46	17,037	0,306	3,416	0,444	50,845
2	57	21,288	0,390	3,496	0,524	45,559
3	70	26,478	0,498	3,582	0,610	42,878
4	87	33,652	0,666	3,637	0,665	34,977
5	99	39,092	0,812	3,743	0,771	33,227

Tab. 19 - Výsledky měření výškové polohy těžiště – varianta č.2 (sada 2)

$m_{p(0)}$ [kg]	2,973					
Měření	H[mm]	v_1 [°]	tg v_1	$m_{p(ceklk)}$ [kg]	Δm_p [kg]	h_{01} [mm]
1	44	16,275	0,292	3,439	0,466	55,886
2	60	22,468	0,414	3,509	0,536	45,380
3	74	28,121	0,534	3,564	0,591	38,720
4	85	32,779	0,644	3,625	0,652	35,506
5	100	39,564	0,826	3,713	0,740	31,360

Tab. 20 - Výsledky měření výškové polohy těžiště – varianta č.2 (sada 3)

I pro tuto variantu byl vytvořen dle postupu v kapitole 5.3 graf závislosti $m_{p(\Delta)}$ na úhlu naklonění modelu vozidla viz Graf. 3.



Graf. 3 - Naměřené hodnoty Δm_p v závislosti na naklonění vozidla - varianta č.2

Pro jednotlivé sady naměřených hodnot byly do grafu proložením bodů vyneseny přímky dle postupu v kapitole 5.3. Hodnoty, které reprezentují tyto přímky jsou uvedeny v Tab. 21

	sada 1	sada 2	sada 3	Aritmetický průměr [mm]	Směrodat. odchyl. jednoho měření [-]	Směrodat. odchyl. arit. prům. [-]	Relativní chyba [%]
R^2	0,971	0,977	0,971	-	-	-	-
$\text{tg } \beta$	0,975	1,073	1,040	1,029	-	-	-
h_0	17,064	18,779	18,207	18,017	1,512	0,873	8,395

Tab. 21 - Hodnoty platné pro přímky vynesené v Graf. 3

Tak jako u předchozí varianty je pro každou přímku vypočítán koeficient determinace R^2 určující shodnost přímek určených lineární regrese s naměřenými daty. Také z hodnot h_0 je určen aritmetický průměr a tato hodnota je při uvedené směrodatné odchylce a relativní chybě považována za výslednou změřenou výšku těžiště nad spojnicí středů náprav.

10 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo navrhnout zařízení pro zjištění celkové hmotnosti a polohy těžiště vozidla. Pro správný návrh zařízení bylo nutné nejdříve získat potřebné teoretické znalosti v rámci problematiky tohoto měření a za tímto účelem byla vytvořena první část této diplomové práce.

Návrh cenově dostupného zařízení pro měření hmotnosti a polohy těžiště vozidla se podařil a jeho funkčnost je ověřena při vážení vytvořeného modelu vozidla. Byl navržen celý měřicí řetězec skládající se ze tří tenzometrických snímačů, A/D převodníků pro tyto snímače, vývojové desky Arduino UNO a PC s předinstalovaným LabView.

Pro vývojovou desku Arduino UNO byl vytvořen firmware sloužící pro zpracování měřených dat a jejich následné zaslání po USB do PC. Součástí tohoto firmware je i část kódu pomocí kterého lze zařízení kalibrovat. Program je na příloženém CD.

Ve vývojovém prostředí LabView byl vytvořen program pro měření polohy těžiště vozidla. Postupně lze takto zjistit celkovou hmotnost vozidla, polohu těžiště v příčném směru, polohu těžiště v podélném směru a výškovou polohu těžiště.

Přestože nebylo možno měřit hmotnostní parametry reálného vozu, lze postup popsaný v této práci využít i v tomto případě za předpokladu volby snímačů s vhodným rozsahem váživosti.

Polohu těžiště v podélném a příčném směru se podařilo určit poměrně přesně pro obě varianty zatížení náprav modelu vozidla. Nicméně při měření výškové polohy těžiště metodou naklápěním na nápravu byla výsledná relativní chyba u změřených poloh vyšší. Ke zpřesnění výsledků dalších měření by stálo za úvahu zvolit metodu měření výškové polohy těžiště naklápěním na bok nebo jiné metody popsané v této diplomové práci.

Pořizovací cena vývojové desky, A/D převodníků, snímačů a elektro-instalačního materiálu činí zhruba 1500Kč. Při použití přesnějších snímačů s větším rozsahem váživosti je potřeba počítat s jejich vyšší pořizovací cenou.

11 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*.
Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. ISBN 80-010-1500-9.
- [2] *What Is A Single-Point Load Cell, And How Does It Work?*
[online]. In: . Hudson, 2022 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z:
<https://www.flintec.com/weight-sensors/load-cells/how-does-a-single-point-load-cell>
- [3] VLK, František. *Dynamika motorových vozidel*.
2. vyd. Brno: František Vlk, 2003. ISBN 8023900242.
- [4] VLK, František. *Zkoušení a diagnostika motorových vozidel*.
1. vyd. Brno: Vlk, 2001. ISBN 80-238-6573-0.
- [5] FEDRA, Tomáš. *Měření výškové polohy těžiště vozidla*
[online]. Brno, 2010 [cit. 2022-02-14]. Dostupné z:
https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29233.
Diplomová práce. VUT v Brně.
- [6] HAKEWILL, James. *Measuring center-of-gravity height on a Formula Car*
[online]. 2007 [cit. 2022-01-20]. Dostupné z:
<http://www.jameshakewill.com/cg-height.pdf>
- [7] Váhový senzor YZC-131. *Drátek.cz*
[online]. [cit. 2022-02-15]. Dostupné z:
<https://dratek.cz/arduino/2204-vahovy-senzor-3-kg-yzc-131.html>
- [8] Modul HX711. *Drátek.cz*
[online]. [cit. 2022-02-14]. Dostupné z:
<https://dratek.cz/arduino/998-ad-prevodnik-modul-24-bit-2-kanaly-hx711.html>
- [9] *24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales*
[online]. [cit. 2022-02-14]. Dostupné z:
<https://manualzz.com/doc/1375325/24-bit-analog-to-digital-converter--adc--for-weigh-scales>

- [10] Arduino Uno. *Arduino.cc*
[online]. [cit. 2022-01-23]. Dostupné z:
<https://www.arduino.cc/en/pmwiki.php?n=Main/arduinoBoardUno>
- [11] Display modrý 20x4 znaků HD44780. *Drátek.cz*
[online]. [cit. 2022-01-22]. Dostupné z:
<https://dratek.cz/arduino/986-display-modry-20x4-znaku-hd44780.html>
- [12] LCD Sériové rozhraní IIC/I2C/TWI/SP 1602. *Drátek.cz*
[online]. [cit. 2022-01-22]. Dostupné z:
<https://dratek.cz/arduino/1071-lcd-seriove-rozhrani-iic-i2c-twi-sp-1602.html>
- [13] Tlačítko do panelu. *GM electronic*
[online]. [cit. 2022-01-22]. Dostupné z:
<https://www.gme.cz/p-pb303b-black>
- [14] *System Requirements for LabVIEW Development Systems*
[online]. [cit. 2022-01-20]. Dostupné z:
<https://www.ni.com/cs-cz/support/documentation/supplemental/17/system-requirements-for-labview-development-systems-and-modules.html>
- [15] ZVÁRA, Karel. *Koeficient determinace v regresi s chybami v obou proměnných*
[online]. [cit. 2022-02-10]. Dostupné z:
https://www.statpol.cz/robust/1994_zvara_94.pdf

12 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 – Obecné rozdělení senzorů síly dle principu [1].....	4
Obr. 2 - Rozdělení tenzometrů dle vlastností [1]	5
Obr. 3 - Snímač hmotnosti typu single-point [2].....	6
Obr. 4 - Zjištění polohy těžiště v podélném směru [4].....	7
Obr. 5 - Zjištění polohy těžiště v příčném směru [4]	9
Obr. 6 - Zjištění výškové polohy těžiště vozidla [4]	10
Obr. 7 - Metoda měření naklápěním na bok [5] [4]	15
Obr. 8 - Rozdíl mezi určováním těžiště [5]	15
Obr. 9 – Zjištění úhlu překlopení [6].....	16
Obr. 10 – Měření těžiště při zavěšení celého vozidla za karoserii [4]	17
Obr. 11 - Blokové schéma zapojení měřícího řetězce.....	18
Obr. 12 - Snímač hmotnosti YZC - 131 [7]	19
Obr. 13 - Zapojení převodníku HX711 [9].....	20
Obr. 14 - Přední pohled na desku Arduino UNO [10]	20
Obr. 16 - LCD display HD44780 [11]	21
Obr. 15 - Sériové rozhraní I2C pro LCD HD44780 [12].....	21
Obr. 17 - Tlačítko PBS-12B-B [13]	22
Obr. 18 - Schéma zapojení měřícího řetězce.....	23
Obr. 19 - Příklad zapojení bloků VISA pro nastavení komunikace.....	25
Obr. 20 - Blokové schéma programu pro měření polohy těžiště vozidla.....	26
Obr. 21 - Prvky pro zadávání dat o vozidle a volbu připojeného měřícího zařízení..	27
Obr. 22 - Záložka určená k měření těžiště v podélném směru	27
Obr. 24 - Záložka určená k měření výškové polohy těžiště.	28
Obr. 23 - Záložka určená pro měření v příčném směru.....	28
Obr. 25 - Prvky pro zobrazení probíhajícího zatížení a chybového hlášení.....	29
Obr. 27 - Sada závaží v laboratořích TF ČZU	32
Obr. 26 - Další příklad závaží v laboratořích TF ČZU	32
Obr. 28 - Fotografie měřeného modelu - pohled zepředu	33
Obr. 29 - Fotografie měřeného modelu – pohled ze strany.....	33

13 SEZNAM PŘÍLOH

Všechny níže uvedené přílohy jsou na přiloženém CD.

Příloha 1 – Program pro měření těžiště vozidla pomocí LabView 21.0

Příloha 2 – Firmware vytvořený pomocí Visual Studio Code pro vývojovou desku Arduino UNO

Příloha 3 – Soubor 3D modelů vytvořených pro potřeby měření