



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ VÝŠKOVÉ POLOHY TĚŽIŠTĚ VOZIDLA

DEVICE FOR MEASURING THE CENTRE OF GRAVITY HEIGHT POSITION OF ROAD VEHICLE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PETR KUBICA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAN VANČURA, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Petr Kubica

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Automobilní a dopravní inženýrství (2301T038)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Zařízení pro měření výškové polohy těžiště vozidla

v anglickém jazyce:

Device for measuring the centre of gravity height position of road vehicle

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je konstrukční návrh zařízení pro měření výškové polohy těžiště vozidla. Vlastní návrh by měl vycházet z principu měření momentu setrvačnosti vozidla ve více polohách od osy rotace.

Cíle diplomové práce:

1. Ze stávajícího zařízení pro měření momentu setrvačnosti vytvořte konstrukční návrh zařízení pro měření výškové polohy těžiště osobních vozidel
2. Proveďte návrh měřicího řetězce
3. Proveďte analýzu chyby měření

Seznam odborné literatury:

REIMPELL, Jornsen. The Automotive Chassiss. 2nd edition.

Oxford: Butterworth – Heinemann, 2001. 444 s. ISBN 0 7506 5054 0.

GILLESPIE, T. D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1992. ISBN 1-56091-199-9.

MORELLO, L., ROSTI ROSSINI, L., PIA, G., TONOLI, A. The Automotive Body. Springer Verlag, 2011. ISBN 978-94-007-0512-8.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Vančura, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 27.10.2014

L.S.

prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty



ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá měřením výškové složky těžiště vozidla a její problematikou. V úvodu se práce zaměřuje na určení polohy těžiště a momentu setrvačnosti vozidla. Dále se zaměřuje na vytvoření konstrukčního návrhu a jeho ověření. Práce obsahuje citlivostní analýzu daného zařízení s jejími výsledky. V závěru práce je uvedeno provedené měření v laboratořích a doporučení pro následná měření.

KLÍČOVÁ SLOVA

těžiště, moment setrvačnosti, měření výškové polohy těžiště vozidla, citlivostní analýza, perioda kmitu

ABSTRACT

This diploma thesis deals with measurement of the centre of gravity height position of a road vehicle and its issues. The introduction of this thesis focuses on the determining of the position of the center of gravity and the moment of inertia of a road vehicle. The next part is about creating of a construction plan and its verification. The thesis contains a sensitivity analysis of this device including its results. The end of the thesis informs about the executed measurement in a laboratory and about recommendations for next measurements.

KEYWORDS

centre of gravity, moment of inertia, measuring centre of gravity height position of road vehicle, sensitivity analysis, period of oscillation motion



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUBICA, P. Zařízení pro měření výškové polohy těžiště vozidla. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 87 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Vančura, Ph.D.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jana Vančury, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 29. května 2015

.....

Petr Kubica



PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Janu Vančurovi, Ph.D. za rady a připomínky při tvorbě této práce. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům a přátelům za podporu v průběhu studia na vysoké škole.



OBSAH

Úvod.....	11
1 Těžiště a moment setrvačnosti	12
1.1 Poloha těžiště vozidla	12
1.1.1 Poloha příčné a podélné složky těžiště	13
1.1.2 Poloha výškové složky těžiště	15
1.2 Moment setrvačnosti vozidla.....	23
1.2.1 Torzní kyvadlo	23
1.2.2 Fyzikální kyvadlo (volně zavěšené)	24
1.2.3 Fyzikální kyvadlo (podepřené pružinou).....	25
1.2.4 Bifilární, trojvláknový nebo čtyřvláknový závěs	27
2 Stávající zařízení a jeho modifikace	29
2.1 Zařízení vyvinuté firmami	29
2.1.1 Vehicle inertia measuring machine (VIMM)	29
2.1.2 Vehicle inertia measurement facility (VIMF).....	31
2.2 Zařízení používané na VUT v Brně FSI ÚADI	32
2.2.1 Zařízení pro měření momentu setrvačnosti kolem svislé osy vozidla.....	32
2.2.2 Zařízení pro měření momentů setrvačnosti kolem tří navzájem kolmých os	32
3 Modifikace zařízení pro měření momentů setrvačnosti kolem tří navzájem kolmých os	34
3.1 Popis modifikací na zařízení	35
3.1.1 Snížení světlé výšky zařízení.....	35
3.1.2 Roll, pitch pohyb pro více typů vozidel	36
4 Kinematika a dynamika modifikovaného zařízení.....	38
4.1 MBS – kontrola kinematiky a zjištění dynamiky zařízení.....	39
4.1.1 Měření dynamických simulací kolem svislé osy vozidla	39
4.1.2 Měření dynamických simulací kolem příčné osy vozidla	41
4.1.3 Měření dynamických simulací kolem podélné osy vozidla	42
4.2 Kontrola periody kmitu	43
4.2.1 Kontrola periody kmitu kolem svislé osy vozidla.....	43
4.2.2 Kontrola periody kmitu kolem příčné osy vozidla	44



4.2.3	Kontrola periody kmitu kolem podélné osy vozidla.....	46
5	Citlivostní analýza zařízení.....	47
5.1	Citlivost zařízení na nesprávné změření periody kmitu T_1	49
5.1.1	Případ 1	49
5.1.2	Případ 2	50
5.1.3	Případ 3	51
5.1.4	Případ 4	52
5.1.5	Případ 5	53
5.1.6	Případ 6	54
5.2	Citlivost zařízení na nesprávné změření periody kmitu T_2	55
5.2.1	Případ 7	55
5.2.2	Případ 8	56
5.2.3	Případ 9	57
5.2.4	Případ 10.....	58
5.2.5	Případ 11.....	59
5.2.6	Případ 12.....	60
5.3	Citlivost zařízení na nesprávné změření jednotlivých částí zařízení.....	61
5.3.1	Citlivost zařízení na nesprávné změření tuhosti pružin C_p	61
5.3.2	Citlivost zařízení na nesprávné změření hmotnosti vozidla m_v	62
5.3.3	Citlivost zařízení na nesprávné změření vzdálenosti od osy rotace k ploše nájezdů pro vozidlo - h_p	63
5.3.4	Citlivost zařízení na nesprávné změření hmotnost aktivních částí zařízení m_z	64
5.3.5	Citlivost zařízení na nesprávné změření vzdálenosti od osy rotace k těžišti aktivních částí zařízení h_{zto}	65
5.4	Zhodnocení citlivosti zařízení na jednotlivé vstupní parametry	66
5.4.1	Zhodnocení citlivosti zařízení na nesprávně změřený parametr periody T_1	67
5.4.2	Zhodnocení citlivosti zařízení na nesprávně změřený parametr periody T_2	68
5.4.3	Zhodnocení citlivosti zařízení na nesprávné změření jednotlivých částí zařízení.....	69
5.5	Celkové zhodnocení citlivosti zařízení na vstupní parametry.....	70
6	Návrh měřicího řetězce.....	71



7	Měření na ÚADI.....	73
7.1	Měření výšky těžiště přes pitch motion.....	74
7.2	Měření výšky těžiště přes roll motion.....	75
7.3	Zhodnocení měření na ÚADI.....	76
7.4	Doporučení pro měření.....	77
	Závěr	78
	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	81
	Seznam příloh.....	84



ÚVOD

V dnešní době je automobil nejrozšířenějším dopravním prostředkem pro překonávání nejrůznějších vzdáleností. Jízdní vlastnosti a ovladatelnost vozidla jsou velice důležitým aspektem pro předcházení dopravních nehod v krizových situacích. V minulém roce (2014) totiž jen Policie ČR řešila 85 859 dopravních nehod, při kterých bylo usmrceno 629 osob, 2 762 osob bylo těžce zraněno a 23 655 osob bylo zraněno lehce. Proto se automobilky snaží vyrábět vozidla, která se budou snadno ovládat, rychle měnit směr jízdy dle požadavků řidiče vozidla a hlavně budou bezpečná pro řidiče a jeho okolí. Proto je velmi důležité znát momenty setrvačnosti a přesnou polohu těžiště vozidla. [19]

Poloha těžiště a momenty setrvačnosti vozidla jsou tedy velice důležité k nastavení vozidla dle daných požadavků. Poloha příčné a podélné složky těžiště vozidla nám určuje vyváženost vozidla mezi jednotlivá kola a ovlivňuje, zda vozidlo bude nedotáčivé či přetáčivé při jízdě v zatáčkách. Výšková poloha těžiště nám určuje, jak se bude vozidlo chovat při akceleraci, deceleraci či celkové jízdní dynamice vozidla. Znat přesnou výškovou polohu těžiště je velmi důležité při dynamických simulacích vývoje vozidla, neboť u těchto simulací lze odhadnout, jak se dané vozidlo bude chovat na silnici.

Zjištění přesné polohy těžiště vozidla je velice důležité k následnému procesu vývoje vozidla. Ze statických řešení dokážeme poměrně přesně určit podélnou a příčnou složku těžiště vozidla. Při využití těchto metod dokážeme určit také výškovou polohu těžiště, ale v tomto případě jsou tyto metody buď velice nepřesné, nejsou universální nebo se nedají provést na zkoušeném vozidle, z důvodu možného poškození vozidla. Proto princip, který používá většina zařízení, která dokáží určit výškovou složku těžiště je přes dynamické simulování.

Jedním z cílů této práce je vytvoření konstrukčního návrhu zařízení pro měření výškové polohy těžiště osobních vozidel, který vychází ze stávajícího zařízení používaného na Ústavu automobilního a dopravního inženýrství FSI VUT v Brně. Princip zjištění výškové polohy těžiště u tohoto zařízení spočívá v dynamické simulaci, za předpokladu neměnného momentu setrvačnosti. První část této práce se zabývá teoretickými způsoby určení jednotlivých složek polohy těžiště a momentů setrvačnosti. V další části jsou rozebrány konstrukční úpravy stávajícího zařízení používaného na ÚADI. Velká část této práce se zabývá citlivostní analýzou, která popisuje citlivost zařízení na jednotlivých vstupních parametrech a jak se projeví nesprávné změření daných vstupních parametrů na konečném výsledku polohy těžiště vozidla. Celá práce je pak ukončena měřením v laboratořích ÚADI, shrnutím výsledků a doporučením pro následná měření.



1 TĚŽIŠTĚ A MOMENT SETRVAČNOSTI

Těžiště tělesa (soustavy těles) je bod, který se pohybuje tak, jakoby v něm byla soustředěna všechna hmota daného tělesa (soustavy) a působily v něm všechny vnější síly působící na těleso (soustavu).

Moment setrvačnosti tělesa vzhledem k libovolně zvolené ose o je součtem jeho momentu setrvačnosti I_T vzhledem k rovnoběžné ose o' ($o' \parallel o$), vedené jeho těžištěm a momentu setrvačnosti mh^2 veškeré hmoty soustředěné v těžišti vzhledem k ose o , kde h je vzdálenost os o, o' . Moment setrvačnosti závisí na tvaru tělesa, vzdálenosti jeho těžiště od osy otáčení a na orientaci vzhledem k ose otáčení.

Moment setrvačnosti je definován:

$$I = \int r^2 dm \quad (1)$$

[1]

Těleso v prostoru se tedy může charakterizovat třemi veličinami - hmotností, těžištěm a tenzory setrvačnosti k daným osám.

1.1 POLOHA TĚŽIŠTĚ VOZIDLA

Poloha těžiště se může zjistit primárně dvěma způsoby. Experimentálně nebo přes 3D CAD systémy (výpočtem).

Jelikož je automobil vyrobený z několikaset různých dílů, které mají rozdílnou hustotu, tak může nastat u 3D CAD systémů problém v tom, že všechny díly ve vozidle nemusí mít správně nadefinovaný tvar a hustotu. Mezi další problém se může zařadit kabeláž vozidla, která má nezanedbatelnou hmotnost (u vozidla nižší střední třídy to může být 15 - 22 kg v závislosti na výbavě vozu), elektromotory jiných výrobců apod. U prvních prototypů vozidel nemusí být některé komponenty a kabeláž vůbec zahrnuty v CAD systému a tudíž, může mít automobil ve skutečnosti rozdílné parametry oproti virtuální realitě. Proto by programátoři řídicích jednotek neměli k dispozici správná data o poloze těžiště a tenzorech setrvačnosti.

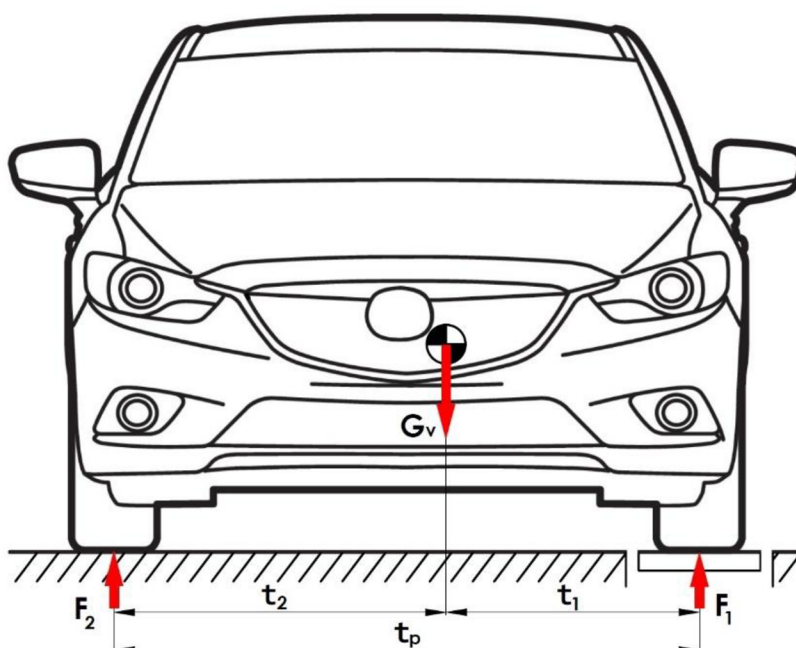
Experimentální způsob může mít několik variant, které jsou vysvětleny v následujících kapitolách.



1.1.1 POLOHA PŘÍČNÉ A PODÉLNÉ SLOŽKY TĚŽIŠTĚ

Pro určení příčné a podélné složky těžiště se může použít nezákladnější metoda, která vychází ze statické momentové rovnováhy. Toto měření spočívá ve zvážení automobilu na čtyřech vahách, tedy pod každým kolem jedna – ví se tedy, jak jsou zatížena jednotlivá kola a kdy se zjistí celková váha vozu. Pro určení těchto složek těžiště se musí tedy znát rozvor a rozchod kol. Při měření touto metodou se musí dbát na to, aby vozidlo mělo správně natlakované pneumatiky (dle výrobce) a také, aby se měření provádělo na vodorovné podložce. Oba tyto aspekty mohou zapříčinit nepřesnosti v měření. Měření je tedy nepřímé, jelikož daný výsledek se musí dopočítat z naměřených hodnot. [2, 3]

Poloha příčné složky těžiště:



Obrázek 1 Měření příčné složky těžiště vozidla [2]

Momentová rovnováha:

$$F_1 * t_p = G_v * t_2 \quad (2)$$

$$F_1 = m_1 * g \quad (3)$$

$$m_1 = m_{1p} + m_{1z} \quad (4)$$

$$G_v = m_v * g \quad (5)$$



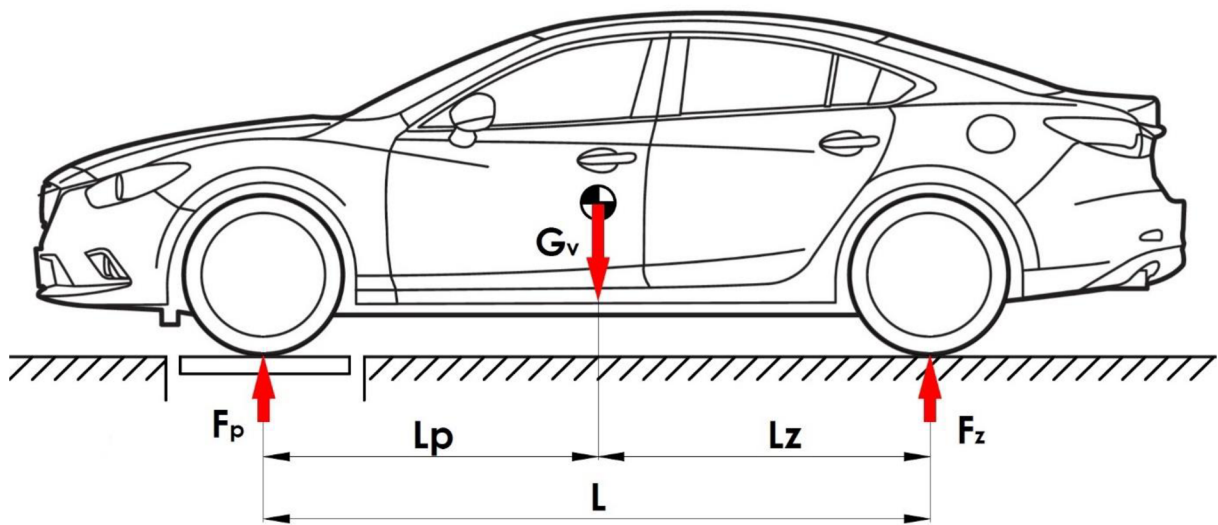
kde m_{1p} je hmotnost pod pravým předním kolem, m_{1z} je hmotnost pod pravým zadním kolem, m_v je celková hmotnost vozidla, g je gravitační zrychlení a t_p je rozchod kol. Pro příčnou složku těžiště od středů kol tedy platí:

$$t_2 = \frac{(m_{1p} + m_{1z}) * t_p}{m_v} \quad (6)$$

$$t_1 = t_p - t_2 \quad (7)$$

Poloha podélné složky těžiště:

U podélné složky těžiště se postupuje stejným způsobem jako u příčné složky těžiště.



Obrázek 2 Měření podélné složky těžiště vozidla [2]

Momentová rovnováha:

$$F_p * L = G_v * L_z \quad (8)$$

$$F_p = m_p * g \quad (9)$$

$$G_v = m_v * g \quad (10)$$

kde m_p je hmotnost naměřená pod předními koly a L rozvor vozidla. Pro podélnou složku těžiště od kol tedy platí:

$$L_z = \frac{m_p * L}{m_v} \quad (11)$$

$$L_p = L - L_z \quad (12)$$

[2,3]



1.1.2 POLOHA VÝŠKOVÉ SLOŽKY TĚŽIŠTĚ

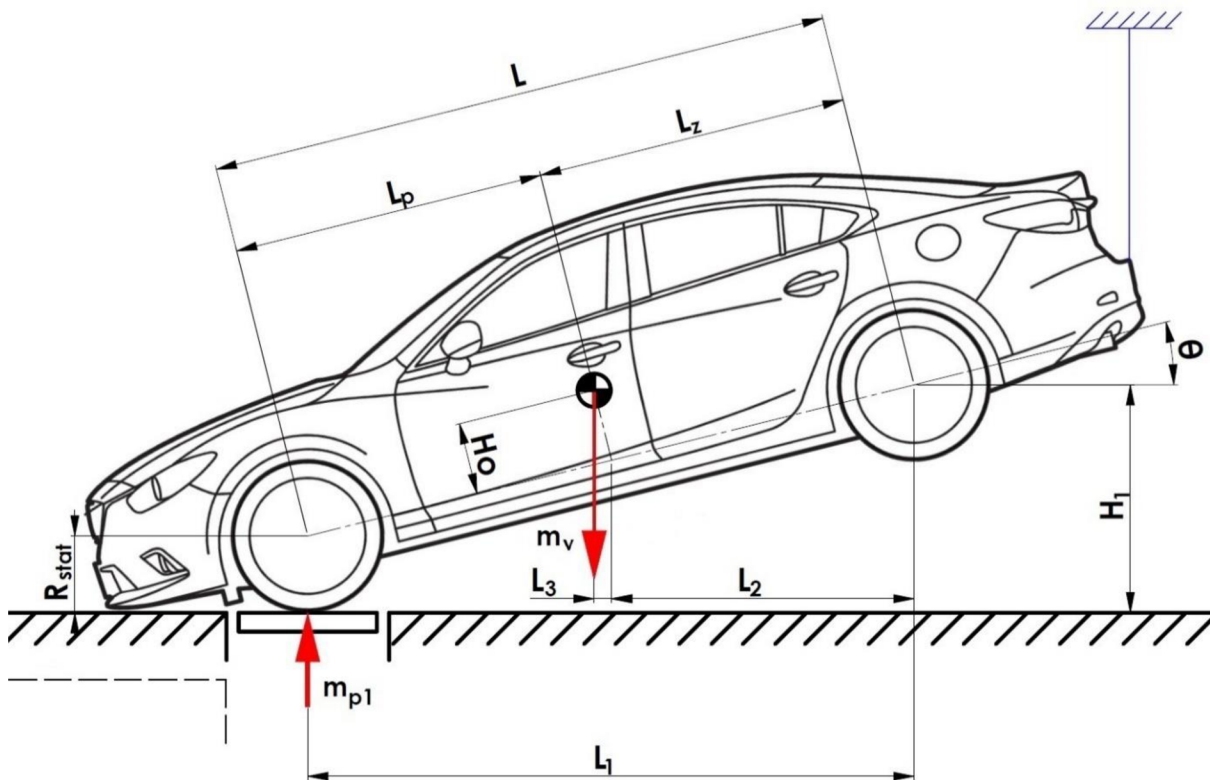
Výšková složka těžiště má významný vliv na jízdní vlastnosti vozidla. Výška těžiště ovlivňuje zatížení náprav při deceleraci či akceleraci (podélné zrychlení), zatížení jednotlivých náprav při projíždění zatáčkou (příčné zrychlení), sílu pro překlopení vozidla (zde také závisí na rozchodu), úhel klopení nebo má vliv na matematické simulování ovladatelnosti vozidla. [2, 5]

Výšková složka těžiště se může určit těmito metodami:

- metoda vážení vozidla při naklápění na nápravu
- metoda zavěšení celého vozidla
- metoda postupného zavěšování
- metoda vážení vozidla při naklápění na bok
- metoda zjištění úhlu překlopení

METODA VÁŽENÍ VOZIDLA PŘI NAKLÁPĚNÍ NA NÁPRAVU

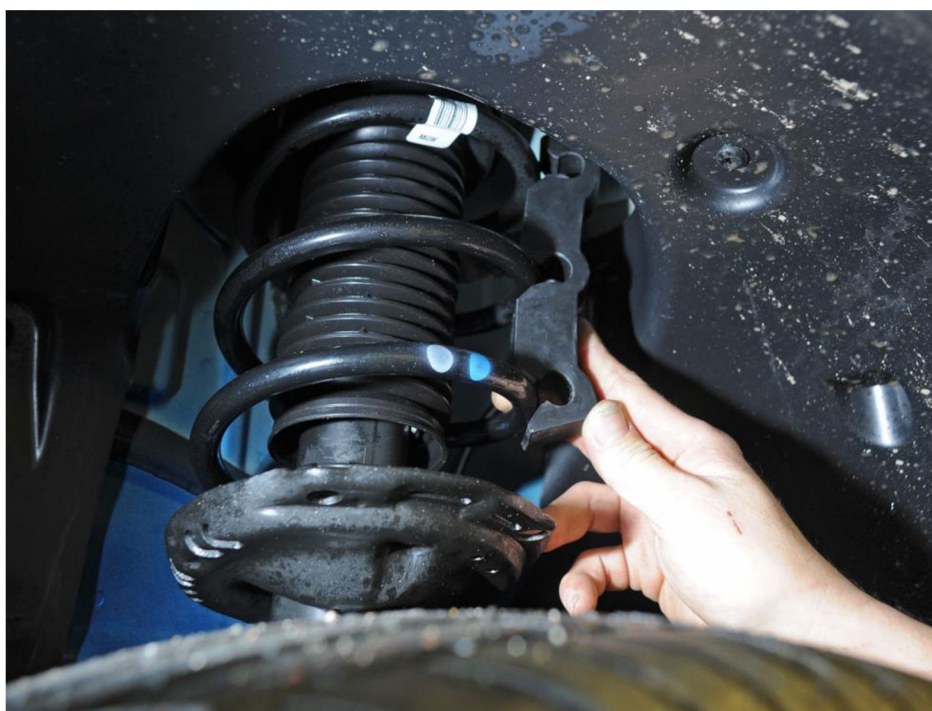
Tato metoda spočívá v zavěšení vozidla, kdy přední nebo zadní náprava zůstává na zemi (pod koly přední nebo zadní nápravy jsou umístěny váhy) a druhá náprava je zvednuta do výšky (obrázek 3). Tato metoda je nejpoužívanější, neboť je velmi jednoduchá a využívá stejně jako u měření příčné a podélné složky těžiště váhy pod koly.



Obrázek 3 Měření výškové složky těžiště vozidla [2]



Metoda vážení vozidla při naklápění na nápravu má ale jistá omezení. Na obrázku 6 si lze všimnout limitu přizvednutí zadní nápravy, kdy se přední nárazník dotýká podlahy už při úhlu 14 stupňů. Právě tato skutečnost ovlivňuje přesnost výpočtu. Tento limit by se dal odstranit, kdyby pod předním nárazníkem byl schod, který by zabránil dotknutí se nárazníku země. Při zvedání vozidla se vozidlo zajistí proti posuvu kol na zatížené nápravě. Dále je třeba zajistit, aby při měření nedošlo ke změně zdvihu tlumičů (poloha neodpružených hmot musí být ve stejné poloze, jako když vozidlo stojí na vodorovné podložce – nahrazení tlumičů tuhou tyčí nebo použít omezovače zdvihu pružin, které se využívají při převozu vozidel z výroby k prodejci na nákladních automobilech (obrázek 4)). Je třeba mít na mysli, že pneumatiky na zatížené nápravě budou více zdeformovány a provozní tekutiny nebudou v téže pozici tak, jako by vozidlo stálo na vodorovné podložce. Pro zjištění úhlu naklopení postačí znát výšku H_1 a rozvor vozidla, jelikož vozidlo má střed otáčení na zatížené nápravě. [2, 6]



Obrázek 4 Plastový omezovač zdvihu pružin [10]

Momentová rovnováha:

$$m_{p1} * L_1 = m_v * (L_2 + L_3) \quad (13)$$

$$L_1 = L * \cos(\theta) \quad (14)$$

$$L_2 = L_z * \cos(\theta) \quad (15)$$

$$L_3 = H_o * \sin(\theta) \quad (16)$$



$$m_{p1} = \frac{m_v * (L_z * \cos(\theta) + H_o * \sin(\theta))}{L * \cos(\theta)} = \frac{m_v * L_z * \cos(\theta)}{L * \cos(\theta)} + \frac{m_v * H_o * \sin(\theta)}{L * \cos(\theta)} \quad (17)$$

$$m_{p1} = \frac{m_v * H_o}{L} * \operatorname{tg}(\theta) + m_v * \frac{L_z}{L} \quad (18)$$

Z momentové rovnováhy výpočtu podélné složky těžiště vyplývá:

$$m_p = m_v * \frac{L_z}{L} \quad (19)$$

Z úvahy vyplývá vztah pro m_{p1} :

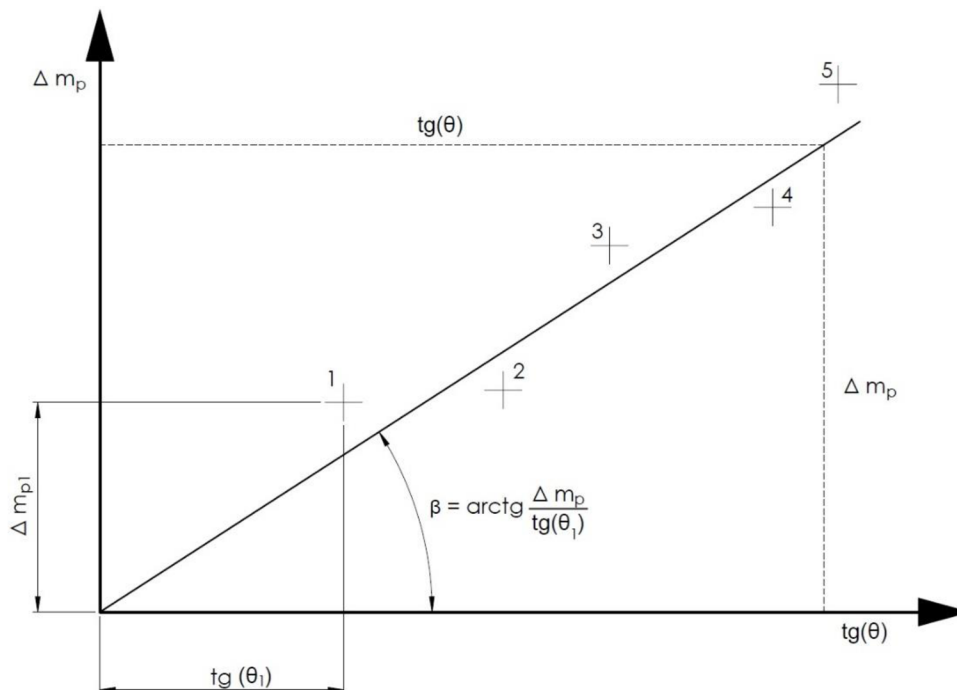
$$m_{p1} = m_p + \Delta m_{p1} \quad (20)$$

kde m_p je zatížení přední nápravy na vodorovné podložce a Δm_{p1} je přírůstek zatížení na zatížené nápravě z důvodu zvedání vozidla. Po dosažení:

$$\Delta m_{p1} = m_{p1} - m_p = \frac{m_v * H_o}{L} * \operatorname{tg}(\theta) \quad (21)$$

$$H_o = \frac{\Delta m_{p1}}{m_v} * \frac{1}{\operatorname{tg}(\theta)} \quad (22)$$

Pro zpřesnění výsledků výšky těžiště vozidla je třeba měření provést několikrát.



Obrázek 5 Graf minimalizace chyb vlivem měření [2]



Změřené veličiny Δm_p a $\text{tg}(\theta)$ se vynesou do grafu a body se proloží přímkou. U této přímky se zjistí její směrnice, přičemž její kolmá vzdálenost je vzdálenost těžiště vozidla od spojnice středů přední a zadní nápravy.

$$H_0 = \frac{1}{m} * \text{tg}(\beta) \quad (23)$$

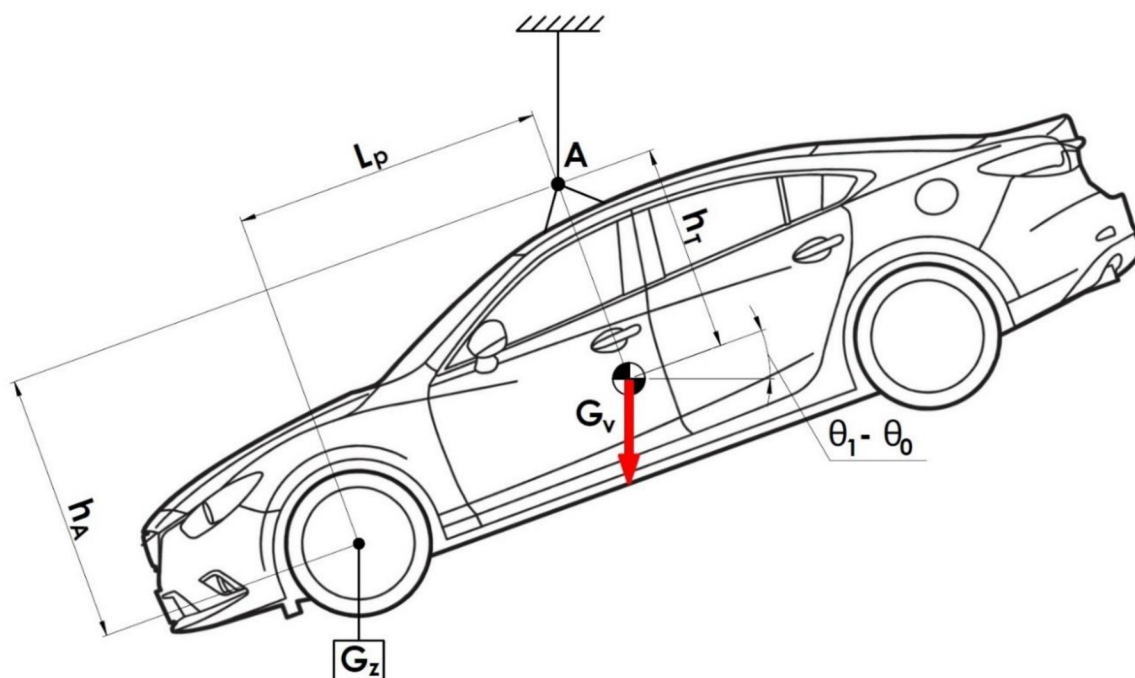
Celková výška těžiště H se tedy rovná:

$$H = H_0 + R_{stat} \quad (23)$$

[2, 6]

METODA ZAVĚŠENÍ CELÉHO VOZIDLA

Tato metoda je založená na zavěšení celého vozidla. Zavěšení je zprostředkováno pomocí speciálního přípravku, který je připevněný na karoserii, přičemž se vozidlo natáčí kolem bodu A. Pro určení výškové složky těžiště odpružené části vozidla se umístí na přední nápravu závaží o známé tíze G_z . Oproti předchozí metodě je zde změřen úhel naklonění, namísto zatížení kol (obrázek 5).



Obrázek 6 Metoda zavěšení celého vozidla [2]

Úhel naklonění při nezavěšeném závaží se liší od úhlu naklonění při zavěšeném závaží na přední nápravě. Rozdíl těchto úhlů se použije k následnému výpočtu momentové rovnováhy k bodu A:



$$\sum M_A = 0 \quad (24)$$

$$G_z * [L_p * \cot g(\theta_1 - \theta_0) - h_A * \sin(\theta_1 - \theta_0)] = G_v * h_T * \sin(\theta_1 - \theta_0) \quad (25)$$

kde:

$$G_z = m_z * g \quad (26)$$

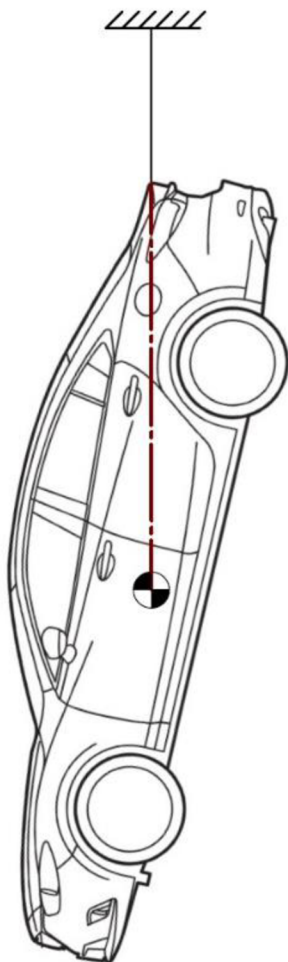
$$G_v = m_v * g \quad (27)$$

pro h_T tedy platí:

$$h_T = \frac{m_z}{m_v} * [L_p * \cot g(\theta_1 - \theta_0) - h_A] \quad (28)$$

Vozidlo se může měřit bez neodpružených částí. Čili dokáže se určit pouze výšková složka těžiště odpružených hmot.

METODA POSTUPNÉHO ZAVĚŠOVÁNÍ

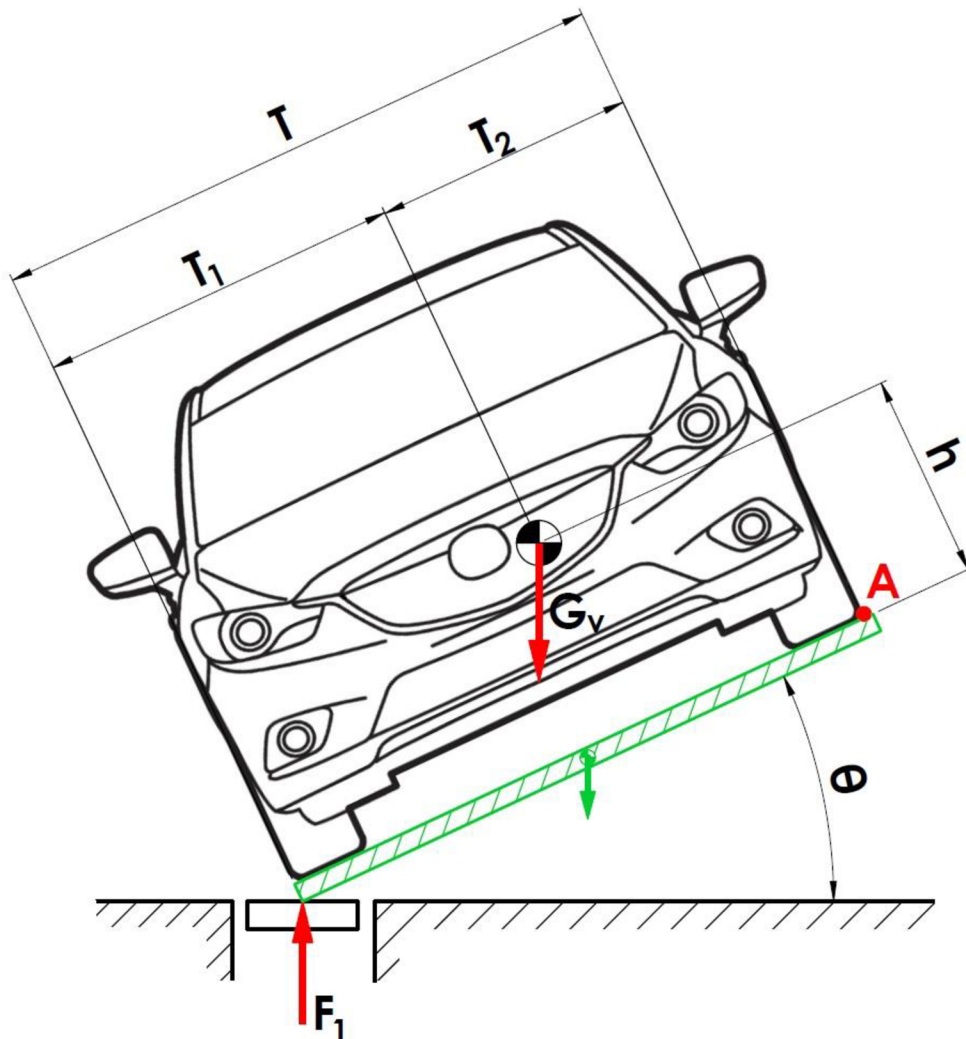


Metoda postupného zavěšování je určena pro tělesa s nepravidelným tvarem. Její podstata je v postupném zavěšení tělesa/vozidla. Základní vlastnost tohoto měření je ta, že při zavěšení a po ustálení do klidové polohy se bod závěsu s těžištěm nachází na svislici. Tato svislice se nazývá těžnice tělesa. Pro zjištění těžiště vozidla se musí vozidlo zavěsit ve třech různých bodech, jelikož u prostorového tělesa je třeba znát tři těžnice. Před měřením se musí zjistit vhodné body, za které se vozidlo zavěsí a musí se dbát na to, aby při měření nedošlo k jeho poškození či případné destrukci vozidla. Mezi další negativa této metody patří ustálení vozidla (dlouhá doba ustálení) a zjištění polohy těžnice. Zde by se dalo využít systému Tritop, přičemž může nastat problém v následném postprocesingu. [2]

Obrázek 7 Metoda postupného zavěšování [2]

**METODA VÁŽENÍ VOZIDLA PŘI NAKLÁNĚNÍ NA BOK**

Metoda vážení vozidla při naklápění na bok má podobný princip jako metoda vážení vozidla při naklápění na nápravu. Zde je ovšem vozidlo umístěno na plošině, která umožňuje naklápění na jednotlivou nápravu. Vozidlo musí být na naklápěcí plošině řádně zajištěno proti posuvu do jakéhokoli směru a také jako při měření vozidla při naklápění na nápravu se musí zajistit, aby při měření nedošlo ke změně zdvihu tlumičů. Dále také se nesmí zapomenout na deformace pneumatik při naklápění, které mohou ovlivnit výsledky měření. Měřicí váhy jsou umístěny pod stranu, která není zvedána (obrázek 7), přičemž se měří úhel naklopení a přírůstek hmotnosti na vahách vlivem naklopení plošiny. Jelikož se naklápí s vozidlem i plošina, nesmí se zapomenout na hmotnost a polohu těžiště samotné plošiny, která zde také způsobí přírůstek hmotnosti na vahách. Proto se plošina musí odečíst od vypočítané hodnoty výšky těžiště. Jestliže se zde srovnává metoda překlápění vozidla na bok s překlápěním vozidla na nápravu, tak lze říci, že tato metoda je vhodnější pro měření výškové složky těžiště u vozidel s nízkou výškou těžiště. [2, 5]



Obrázek 8 Metoda vážení vozidla při naklápění na bok [2]



Z rovnice momentové rovnováhy kolem bodu A je zjištěna výšková složka těžiště:

$$\sum M_A = 0 \quad (29)$$

$$G_{vy} * T_2 = G_{vx} * h + F_{1y} * T \quad (30)$$

$$G_v = m_v * g \quad (31)$$

$$F_1 = m_1 * g \quad (32)$$

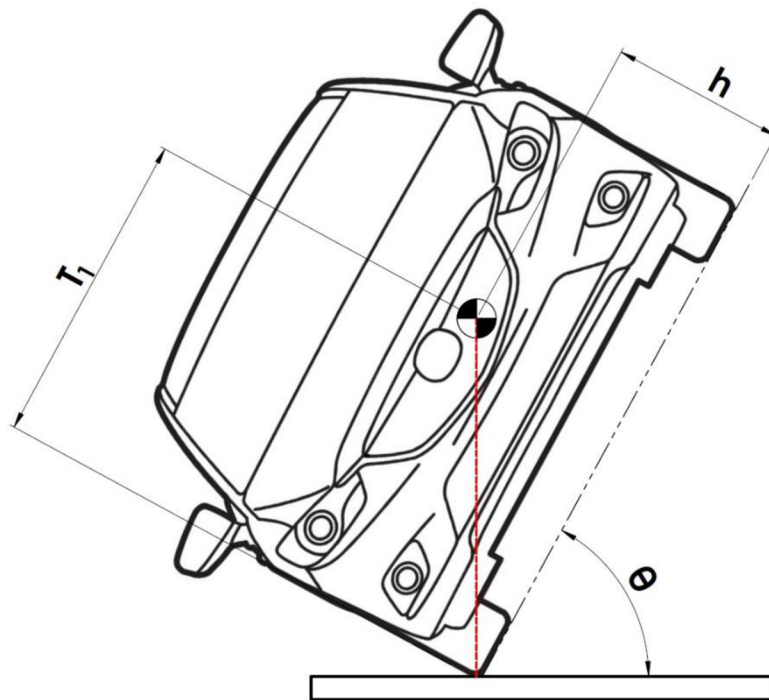
kde G_v je celková tíha vozidla, T je rozchod kol vozidla a T_2 je vzdálenost pravého kola k těžišti. Výšková složka těžiště h je tedy spočítána:

$$h = \frac{m_1 * T}{m_v} * \cotg(\theta) - T_2 * \cotg(\theta) \quad (33)$$

[2]

METODA ZJIŠTĚNÍ ÚHLU PŘEKLOPENÍ

Tato metoda je založena na principu postupného zavěšování a metody vážení vozidla při naklápění na bok. Z metody postupného zavěšování je zřejmé, že při zavěšení a po ustálení vozidla do klidové polohy se bod závěsu s těžištěm nachází na svislici. Vozidlo je překlápěno tak, aby se bod těžiště a bod, kolem kterého se vozidlo otáčí, nacházel na shodné svislici (obrázek 8). [2]



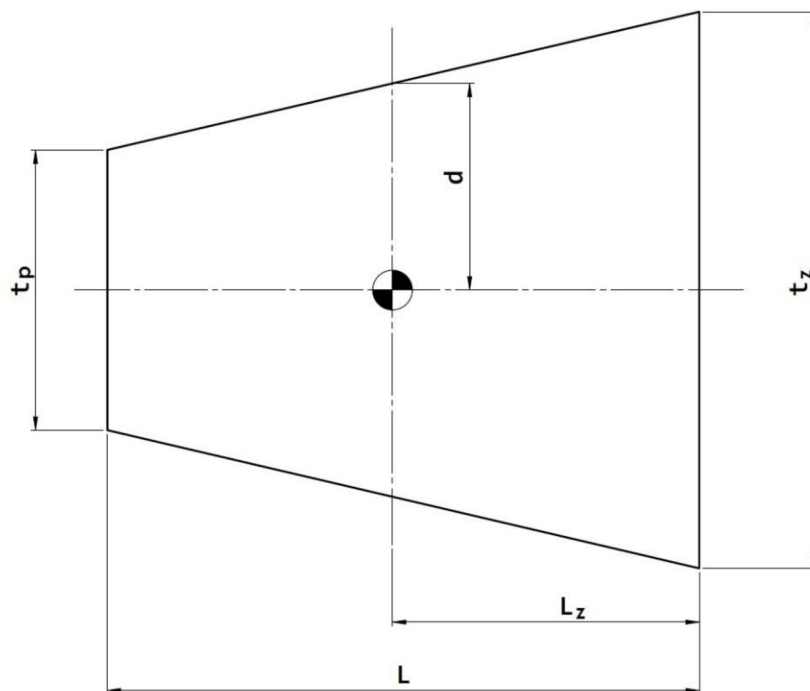
Obrázek 9 Metoda zjištění úhlu překlopení [2]



U této metody se zjišťuje pouze svislice. Musí se tedy znát poloha příčné a podélné složky těžiště, aby bylo možné určit i výškovou složku těžiště z naměřené svislice. U vozidla, kde je přední a zadní rozchod kol stejný, je třeba znát pouze příčnou složku těžiště a ta se vypočte dle vztahu:

$$h = T_1 * tg(90 - \theta) \quad (34)$$

Jestliže vozidlo nemá rozchod kol na obou nápravách stejný (většina vozidel), musí se k přesnému určení výškové složky těžiště znát jeho podélná tak i příčná složka těžiště. Určení těchto složek těžiště je popsáno v kapitole 1.1.1.



Obrázek 10 Vozidlo s rozdílnými rozchody [11]

Musí se tedy spočítat vzdálenost d (obrázek 9) z následujících vztahů:

$$d = t_p + ((t_z - t_p) * m_z) \quad (35)$$

kde m_z je hmotnost na zadní nápravě:

$$h = \frac{d}{2} * tg(90 - \theta) \quad (36)$$

Metoda je určena spíše pro lehká vozidla, kdy se k ustálení vozidla do rovnovážné polohy použijí lidské ruce. V případě těžšího vozidla (např. 1,5 tuny) není vyvažování jednoduché, protože se musí vozidlo zajistit tak, aby nedošlo k převrácení vozidla a jeho destrukci. Dále se musí zajistit poloha tlumičů. [2]



1.2 MOMENT SETRVAČNOSTI VOZIDLA

Vozidlo je prostorové těleso, které má obtížně definovatelný tvar a každá část vozidla má jiné rozměry a hustotu. Proto stanovení momentu setrvačnosti vozidla na základě základních matematicky popsanych tvarů a Steinerovy věty je nemožné.

Pro stanovení momentu setrvačnosti vozidla se tedy přistupuje dvěma způsoby. A to buď experimentálně, nebo přes CAD systém (výpočtem). Experimentální metody jsou založeny na principu kývavého rotačního pohybu, tedy v závislosti na momentu setrvačnosti vozidla a frekvencí vlastního kmitání kývavého rotačního pohybu.

Pro zjištění momentu setrvačnosti vozidla se mohou využít následující metody:

- torzní kyvadlo
- fyzikální kyvadlo (volně zavěšené)
- fyzikální kyvadlo (podepřené pružinou)
- bifilární, trojvláknový nebo čtyřvláknový závěs

Hlavní veličina, která se měří, je perioda kmitu. Jedna z možností jak stanovit periodu kmitu je ta, že měříme určitý časový úsek a počet kmitů za tuto dobu. Takto změřená perioda kmitu je velmi nepřesná. Proto se na ÚADI měří průběh úhlové rychlosti a pomocí nelineární regrese se zjistí perioda kmitu. U měření se předpokládá, že se nikde neztrácí kinetická energie.

[2, 3]

1.2.1 TORZNÍ KYVADLO

Tento způsob měření momentu setrvačnosti spočívá v rozkmitu torzního kyvadla resp. kyvného rámu s vozidlem v ose Z (obrázek 10), přičemž maximální výchylka plošiny s vozidlem by neměla přesáhnout $\pm 3^\circ$. Torzní tyč o známé tuhosti je spojena se základním rámem a kyvným rámem. Když je známa tuhost pružiny (C_t - torzní tyče) a perioda kmitu, může se spočítat moment setrvačnosti.

Pro moment setrvačnosti kyvného rámu s vozidlem platí:

$$I_{v+r} = T_{v+r}^2 * \frac{C_t}{4 * \pi^2} \quad (37)$$

Po zjištění momentu setrvačnosti, se musí také zjistit moment setrvačnosti samotného kyvného rámu. Pro moment setrvačnosti kyvného rámu platí:

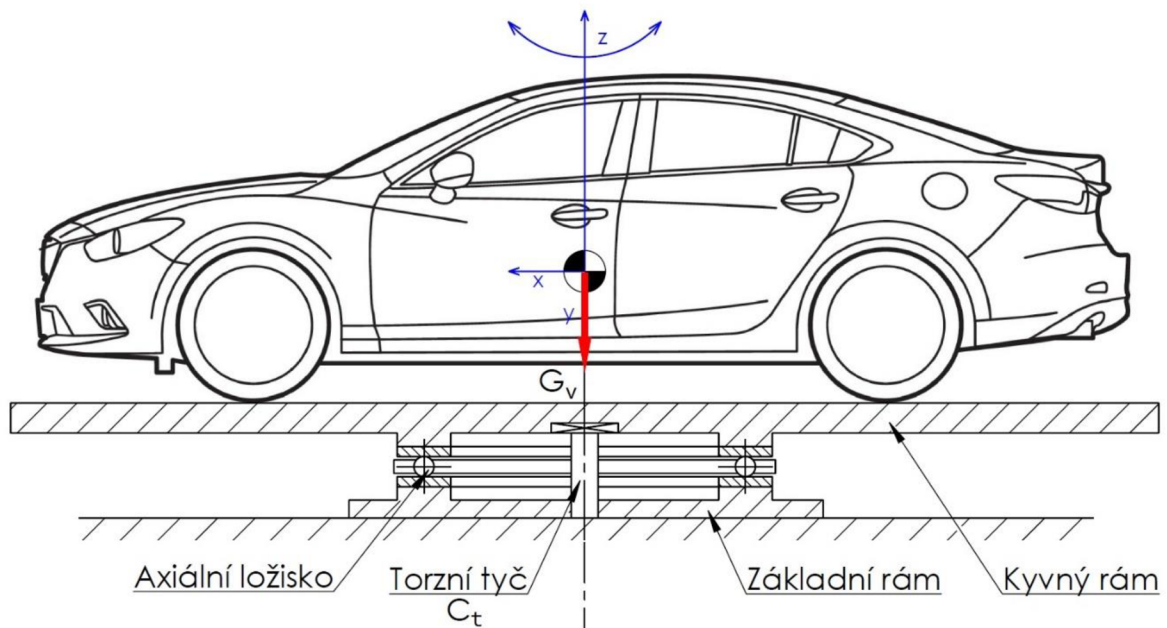
$$I_r = T_r^2 * \frac{C_t}{4 * \pi^2} \quad (38)$$



Tento moment setrvačnosti se pak odečte od momentu setrvačnosti kyvného rámu s vozidlem. Tím se zjistí samotný moment setrvačnosti vozidla, tedy:

$$I_v = I_{v+r} - I_r \quad (39)$$

kde T_{v+r} je perioda kmitu kyvného rámu s vozidlem a T_r je perioda kmitu kyvného rámu.



Obrázek 11 Schéma měření momentu setrvačnosti pomocí torzního kyvadla [2]

Pro měření a následný výpočet momentu setrvačnosti je vhodné vozidlo umístit tak, že osa kývání (osa umístění torzní tyče) a těžiště leží na společné svislici - výsledný moment setrvačnosti se pak už nemusí přepočítávat dle Steinerovy věty. [2, 6]

1.2.2 FYZIKÁLNÍ KYVADLO (VOLNĚ ZAVĚŠENÉ)

Tato metoda není vhodná pro určení momentu setrvačnosti vozidla. Je to metoda určená spíše k teoretickému odvození momentu setrvačnosti jednoduchého tělesa umožňující zavěsit těleso za závěs. Zvláštní případ fyzikálního kyvadla je matematické kyvadlo, kde se zkoumá hmotný bod na konci tenkého vlákna zanedbatelné hmotnosti. V tomto případě je však zkoumáno gravitační zrychlení.

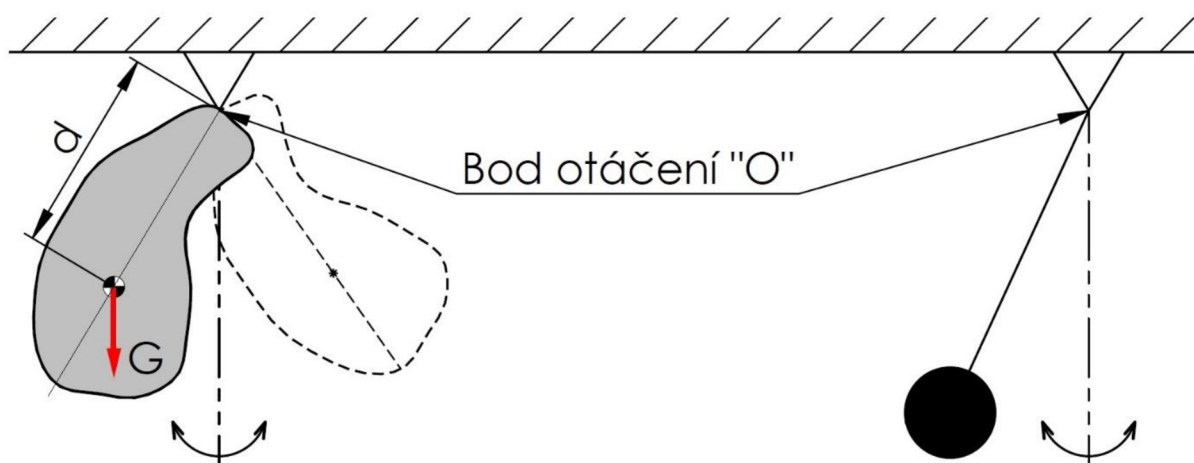


V případě fyzikálního kyvadla se moment setrvačnosti spočítá dle rovnice netlumeného kmitání k ose O, platí tedy vztah:

$$I_O = T^2 * \frac{G * d}{4 * \pi} \quad (40)$$

Zde se musí přepočítat pomocí Steinerovy věty moment setrvačnosti k ose O, proto platí vztah:

$$I = I_O - m * d^2 \quad (41)$$

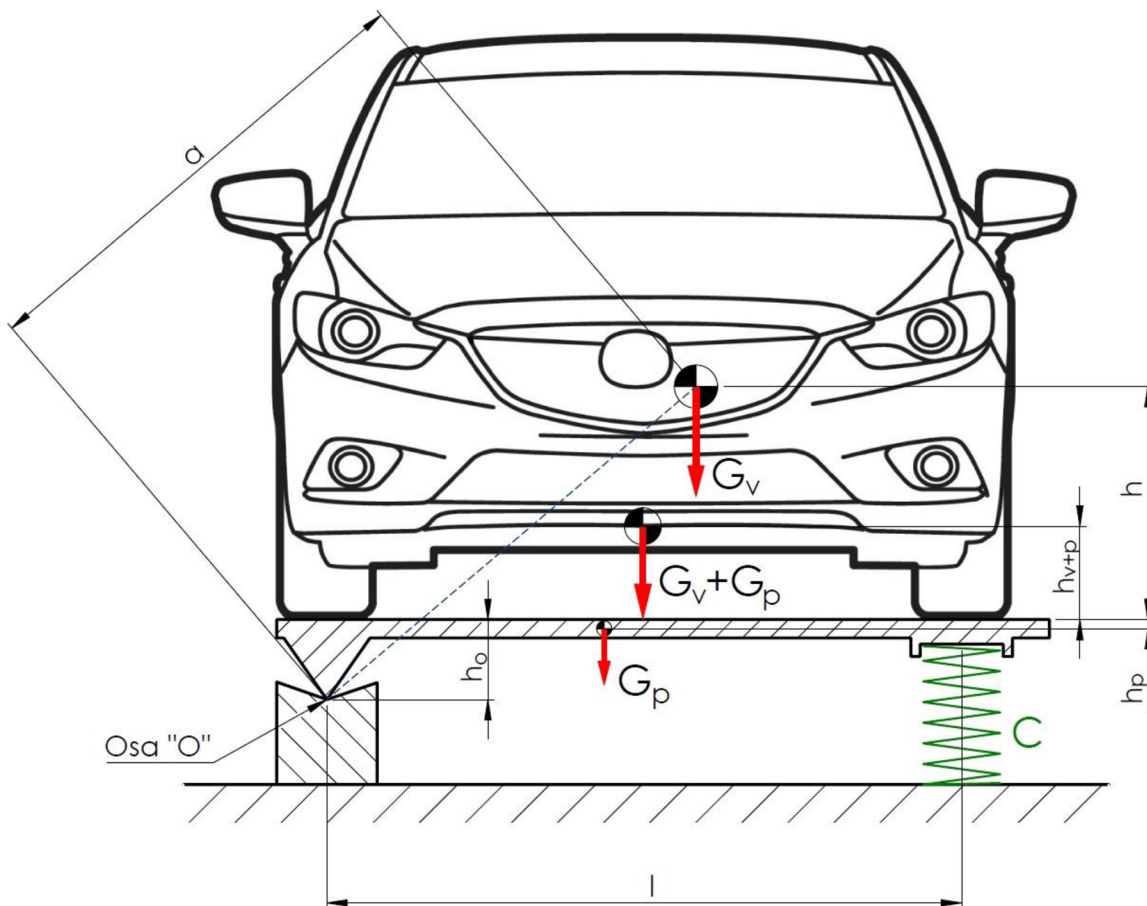


Obrázek 12 Fyzikální kyvadlo volně zavěšené (vlevo) a matematické kyvadlo [1, 2]

[1, 2]

1.2.3 FYZIKÁLNÍ KYVADLO (PODEPŘENÉ PRUŽINOU)

Tato metoda je určena pro měření příčné nebo podélné složky těžiště. Princip této metody je podobný jako u torzního kyvadla. Spočívá v tom, že kyvadlo (obrázek 13) je podepřeno pružinou o známé tuhosti C, ze změřené periody kmitu plošiny s vozidlem se spočítá moment setrvačnosti této skupiny a odečte se moment setrvačnosti samotné plošiny. Jako v případě volně zavěšeného fyzikálního kyvadla je zde rovnice taktéž odvozena z pohybové rovnice netlumeného kmitání.



Obrázek 13 Fyzikální kyvadlo podepřené pružinou [2]

Moment setrvačnosti celé skupiny (vozidlo + kyvná plošina) vzhledem k ose O, platí:

$$I_{v+p} = T_{v+p}^2 * \frac{C * l^2 - (G_v + G_p) * (h_{v+p} + h_o)}{4 * \pi^2} \quad (42)$$

kde T_{v+p} je perioda kmitu vozidla s kyvnou plošinou, C je celková tuhost pružin, l je vzdálenost osy O od středu pružin, G_v je tíha vozidla, G_p je tíha kyvné plošiny, h_{v+p} je vzdálenost kyvné plošiny ke společnému těžišti vozidla s plošinou a h_o je vzdálenost od osy otáčení O k nájezdové ploše kyvné plošiny.

Od tohoto momentu setrvačnosti se musí odečíst moment setrvačnosti samotné kyvné plošiny, a platí tedy:

$$I_p = T_p^2 * \frac{C * l^2 - G_p * (h_o - h_p)}{4 * \pi^2} \quad (43)$$

kde T_p je perioda kmitu kyvné plošiny a h_p je vzdálenost těžiště kyvné plošiny k nájezdové ploše kyvné plošiny.



Moment setrvačnosti vozidla je potom vypočítán z těchto momentů setrvačnosti, tedy:

$$I_{vo} = I_{v+p} - I_p \quad (44)$$

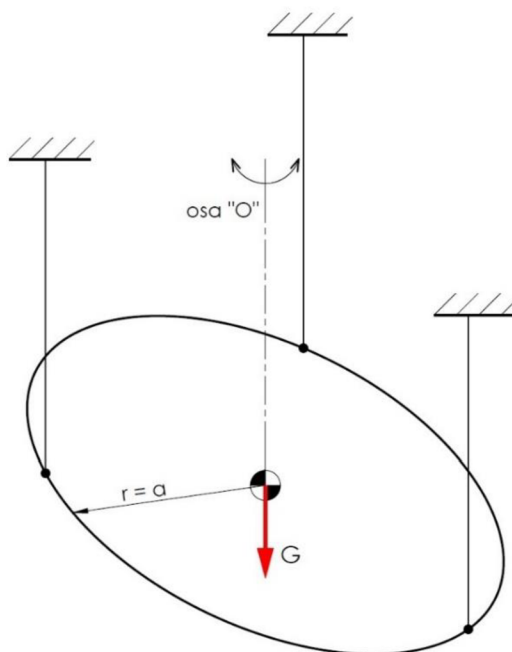
Zde se ovšem určí moment setrvačnosti vozidla k ose O a pro zjištění samotného momentu setrvačnosti vozidla vzhledem k jeho těžišti se musí použít Steinerova věta. Musí se zde ovšem znát vzdálenost a (vzdálenost těžiště vozidla k ose O) a hmotnost samotného vozidla - m_v .

$$I_v = I_{vo} - m_v * a^2 \quad (45)$$

[1, 2, 6]

1.2.4 BIFILÁRNÍ, TROJVLÁKNOVÝ NEBO ČTYŘVLÁKNOVÝ ZÁVĚS

Touto metodou se dokáže určit příčná, podélná, ale také i svislá hodnota momentu setrvačnosti procházející těžištěm. Princip této metody je velmi podobný jako předchozí měření momentu setrvačnosti. Zde se měří perioda kmitu při vychýlení plošiny z rovnovážné polohy. Změří se perioda kmitu plošiny s vozidlem a následně se vypočítá moment setrvačnosti tohoto celku. Pro určení momentu setrvačnosti samotného vozidla se musí změřit perioda kmitu samotné plošiny a vypočítat hodnota momentu setrvačnosti a odečíst od momentu setrvačnosti vozidla s plošinou. Pro následný výpočet je vhodné součást ustavit tak, aby jeho těžiště procházelo osou O, aby se nemusel přepočítávat moment setrvačnosti pomocí Steinerovy věty. Rozdíl mezi jednotlivými závěsy je pouze v počtu uchycení jednotlivých závěsů.



Obrázek 14 Trojvláknový závěs [1, 2]



$$I = T^2 * \frac{G * a^2}{4 * \pi^2 * l} \quad (46)$$

kde T je perioda kmitu, G je celková tíha, a je poloměr kruhu, přičemž střed protíná osu rotace a l je délka závěsu.

[1, 2]



2 STÁVAJÍCÍ ZAŘÍZENÍ A JEHO MODIFIKACE

V dnešní době automobilky dbají na bezpečnost vozidla. S bezpečností vozidla souvisí také jeho ovladatelnost. Jak je již výše zmíněno, parametry jako moment setrvačnosti, hmotnost vozu a poloha těžiště nesmírně ovlivňují jeho stabilitu jak při podélném tak i příčném zrychlení. Proto přesné měření těchto veličin je pro vývoj vozidla velice důležité. Firmy se proto pro automobilky snaží vyrobit zařízení, která budou přesně vyhodnocovat daná měření.

V současné době automobilky využívají zařízení dvou firem:

- CFM Schiller - Vehicle inertia measuring machine
- S-E-A - Vehicle inertia measurement facility

Na Ústavu automobilního a dopravního inženýrství (dále jen ÚADI) fakulty strojního inženýrství VUT v Brně se nachází zařízení, které umí měřit moment setrvačnosti a výšku těžiště vozidla. [18]

2.1 ZAŘÍZENÍ VYVINUTÉ FIRMAMI

2.1.1 VEHICLE INERTIA MEASURING MACHINE (VIMM)

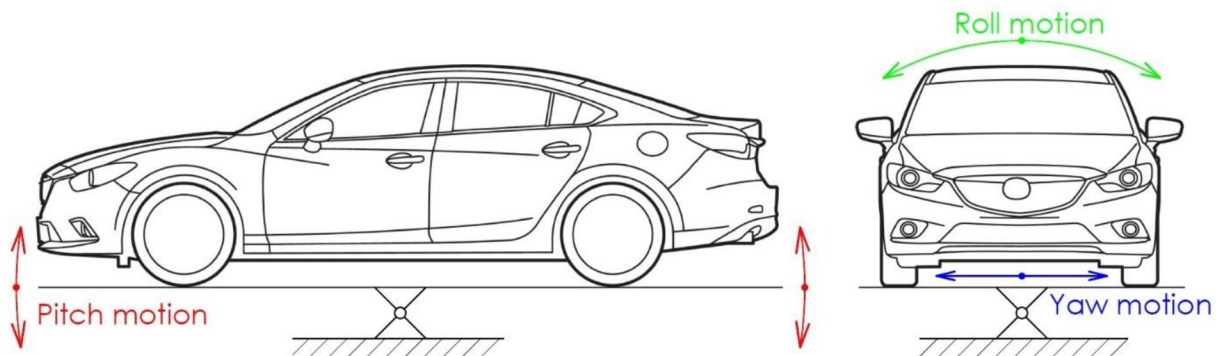
Vehicle inertia measuring machine (dále jen VIMM) je zařízení pro měření momentu setrvačnosti vozidla a vyrábí ho německá firma CFM Schiller. Měření momentu setrvačnosti však není jediným parametrem vystupujícím z měření na tomto zařízení. Za jeden měřicí cyklus je zařízení schopno vyhodnotit 10 parametrů. Tyto parametry jsou hmotnost, poloha těžiště pro všechny osy (X, Y, Z), moment setrvačnosti k těžišti (I_{xx} , I_{yy} , I_{zz}) a deviační momenty (I_{xy} , I_{yz} , I_{xz}) vozidla. [13]



Obrázek 15 Vehicle inertia measuring machine [13]



Zařízení VIMM se skládá ze základního rámu a ocelové konstrukce s nájezdy. Rám a ocelová konstrukce s nájezdy jsou připevněny speciálním kardanovým kloubem. Zařízení má tři hydraulické pohony, které se starají o pohyb nosu vozidla nahoru a dolů (pitch motion), doleva a doprava – ze strany na stranu (yaw motion) a kývání vozidla z jednoho boku na druhý bok (roll motion). [9, 10]



Obrázek 16 Pohyby zařízení VIMM a VIMF [12]

Měření příčné a podélné složky těžiště probíhá staticky, kde zařízení vozidlu zváží zatížení na obou nápravách a dopočítá tak podélnou a příčnou složku těžiště (stejný princip jako zde je popsán v kapitole 1.1.1).

Měření výškové polohy těžiště probíhá pomocí kývání vozidla z jednoho boku na druhý bok, kdy je potřeba znát moment setrvačnosti vozidla (toto měření je velice podobné metodě popsané v kapitole 1.2.3).

Momenty setrvačnosti k těžišti vozidla a deviační momenty jsou zjištěny pomocí dynamického měření, o které se starají zmíněné hydraulické pohony a pohyby s nimi související (pitch, roll, yaw motions). [9, 10]



Obrázek 17 VIMM při měření [14]



2.1.2 VEHICLE INERTIA MEASUREMENT FACILITY (VIMF)

Vehicle inertia measurement facility (dále jen VIMF) je zařízení pro měření momentu setrvačnosti vozidla vyrobené firmou S-E-A. Tak jako u VIMM dokáže VIMF určit rozložení hmotnosti mezi nápravy a s tím související těžiště vozidla (X, Y, Z), momenty setrvačnosti k těžišti (I_{xx} , I_{yy} , I_{zz}) a deviační momenty (I_{xy} , I_{yz} , I_{xz}) vozidla, jelikož zařízení pracuje jako fyzikální kyvadlo popsané v kapitole 1.2.3, kde v průběhu měření dochází ke změně periody kmitu. Zařízení ke zjištění výše uvedených veličin využívá kývání vozidla popsané v kapitole 2.1.1 a vysvětlené na obrázku 15.

Zařízení je používáno americkou agenturou National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA – národní úřad pro bezpečnost silničního provozu), jelikož bylo navrženo tak, aby měření vykazovalo minimální chybovost a krátkou dobu měření. Zařízení VIMF totiž NHTSA využívá k vyhodnocení vozidel na základě výšky těžiště a rozchodu kol statickou stabilitou vozidla (SSF – static stability factor). Dle změřených parametrů vozidlo dostane počet hvězdiček (podobné jako u Euro NCAP), přičemž nejvyšší hodnocení je pět hvězdiček. [12, 13, 14]



Obrázek 18 VIMF při měření [16]



2.2 ZAŘÍZENÍ POUŽÍVANÉ NA VUT V BRNĚ FSI ÚADI

2.2.1 ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ MOMENTU SETRVAČNOSTI KOLEM SVISLÉ OSY VOZIDLA

Ústav automobilního a dopravního inženýrství používá kurčení momentu setrvačnosti kolem svislé osy vozidla zařízení, které pracuje na principu torzního kyvadla, které je popsáno v kapitole 1.2.1. Na ÚADI byla ovšem nahrazena torzní tyč dvěma páry vinutých pružin. Páry pružin jsou uloženy v dané vzdálenosti od osy rotace. Zařízení je tvořeno měřicí stolicí, měřícím řetězcem, hardwarem a softwarem pro záznam dat k následnému vyhodnocení měřící zkoušky. [18]



Obrázek 19 Zařízení pro měření momentu setrvačnosti kolem svislé osy na ÚADI [18]

Jelikož toto zařízení dokáže měřit moment setrvačnosti pouze kolem svislé osy, vyrobilo se zařízení, které zvládá určit momenty setrvačnosti okolo příčné, podélné i svislé osy.

2.2.2 ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ MOMENTŮ SETRVAČNOSTI KOLEM TŘÍ NAVZÁJEM KOLMÝCH OS

Toto zařízení používá k určení podélné a příčné složky momentu setrvačnosti vozidla 4 pružiny, které jsou umístěny v rozích podlaží 2 a podlaží 3. U tohoto měření využívá zařízení principu fyzikálního kyvadla podepřeného pružinou (tato metoda je popsána v kapitole 1.2.3). Pro určení svislé složky momentu setrvačnosti, zařízení používá principu torzního kyvadla (kapitola 1.2.1). Oproti předchozímu zařízení, které nalezneme na ÚADI je zde místo vinutých pružin použito torzní tyče. Toto zařízení dokáže určit také výšku těžiště vozidla.



Zařízení je navrženo tak, aby se při měření nemuselo dále manipulovat s vozidlem. Zařízení se skládá ze základny, podlaží 2, 3 a 4. Základna je spojena pomocí torzní tyče s podlažím 2 a rotace je zajištěna pomocí axiálního ložiska. Jelikož je podlaží 3 a 4 zajištěno také pomocí axiálního ložiska, může se změny měření z podélné složky momentu setrvačnosti na příčnou složku docílit tak, že se podlaží 4 pouze otočí vůči celému zařízení a zajistí se kolíky proti pootočení. [7]

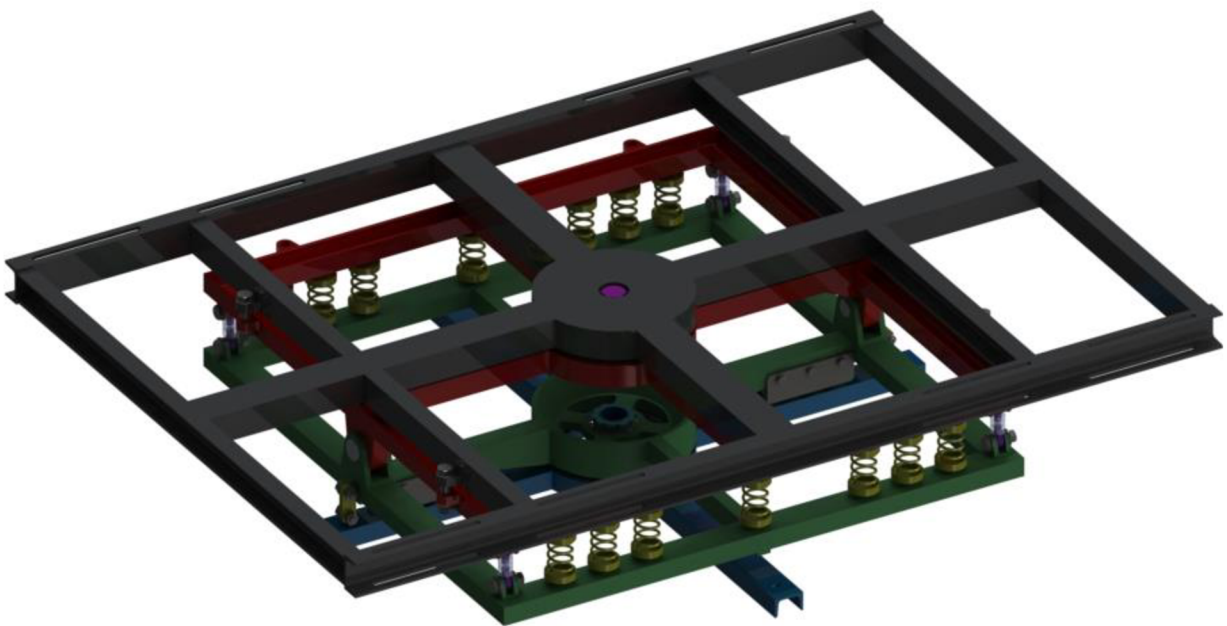


Obrázek 20 Stávající zařízení na ÚADI pro měření momentů setrvačnosti kolem tří navzájem kolmých os [7]



3 MODIFIKACE ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ MOMENTŮ SETRVAČNOSTI KOLEM TŘÍ NAVZÁJEM KOLMÝCH OS

Cílem této práce je vytvořit konstrukční návrh, který vychází ze stávajícího zařízení. Jedním z cílů je snížit světlou výšku zařízení tak, aby mohlo zkoušené vozidlo na zařízení najet bez problémů. Snížení světlé výšky se docílilo tak, že se nahradila torzní tyč vinutými pružinami. Výhoda torzní tyče je v tom, že se tuhost tyče může určit resp. vyrobit, jak je třeba. Její nevýhoda je již zmíněné zvýšení světlé výšky zařízení, vytlačování v drážkování uložení tyče, nutná kontrola tyče (vruby mohou způsobit nehodu vozidla při měření) a nemožnost změnit velikost tuhosti tyče. Ke snížení zařízení bylo potřeba upravit/snížit uchycení dvou bočních ložisek umožňujících pohyb roll a pitch (obrázek 15). U stávajícího zařízení jsou k dispozici pouze 4 pružiny v každém rohu podlaží 2 a 3. Pro měření více typů vozidel (od 300 kg po 2500 kg) je potřeba tyto pružiny buď přemístit blíže či dále od středu rotace. Bylo proto rozhodnuto umístit více pružin na zařízení a podle potřeby je zapojit či odpojit.



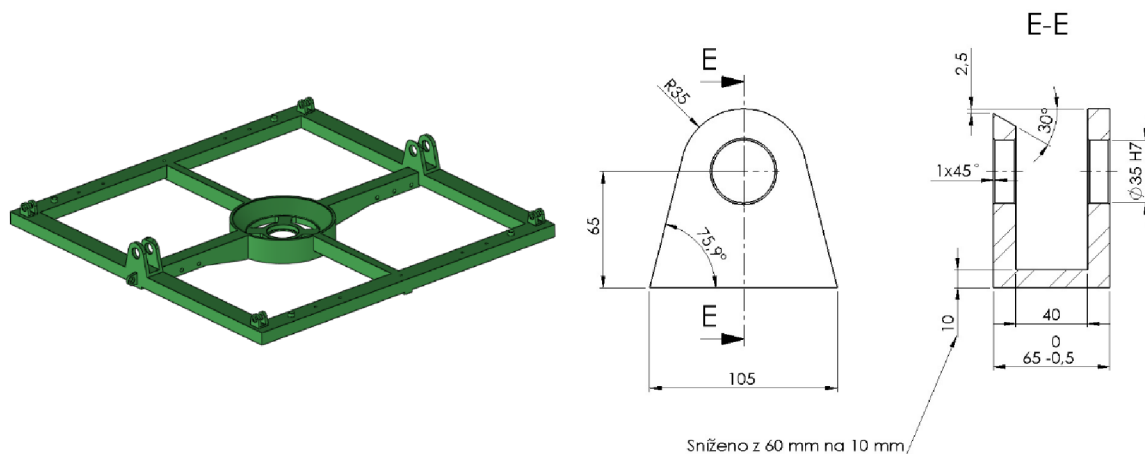
Obrázek 21 Modifikace zařízení



3.1 POPIS MODIFIKACÍ NA ZAŘÍZENÍ

3.1.1 SNÍŽENÍ SVĚTLÉ VÝŠKY ZAŘÍZENÍ

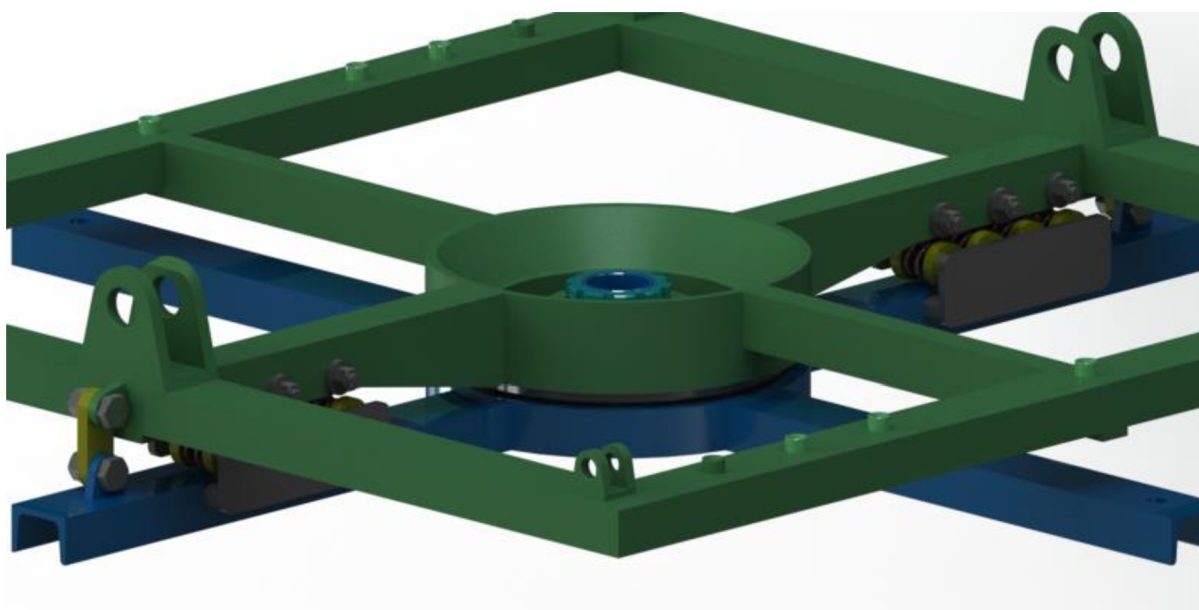
Původní zařízení mělo světlu výšku 525 mm. Po odstranění torzní tyče se muselo upravit uchycení podlaží 2 a 3. Došlo tedy k celkovému snížení o 70 mm. Nyní má zařízení světlu výšku 455 mm.



Obrázek 22 Úprava světlé výšky na podlaží 2

Na obrázku 22 jde vidět, že u podlaží 2 se podařilo snížit uchycení o 50 mm, přičemž se snížilo pouze původní uchycení. Na podlaží 3 se upravil protikus k uchycení a snížil se tak o 10 mm.

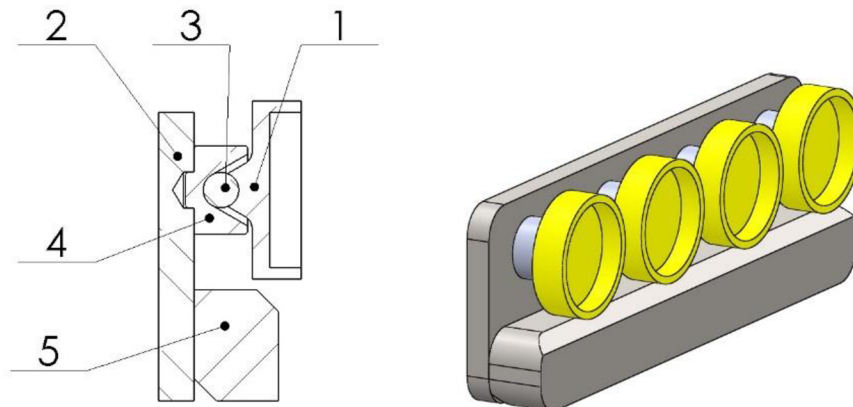
Jak již bylo řečeno, torzní tyč byla nahrazena vinutými pružinami mezi základnou a podlažím 1.



Obrázek 23 Nahrazení torzní tyče vinutými pružinami mezi základnou a podlažím 2



Na obrázku 23 jde vidět uložení vinutých pružin, které se nachází mezi základnou a podlažím 2. Vinuté pružiny byly vybrány z katalogu výrobce pružin Hennlich s.r.o. a jejich parametry jsou: průměr drátu 3,6 mm, vnější průměr pružiny 29 mm, délka pružiny 42,4 mm a tuhost pružiny $21,29 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$. Vinuté pružiny jsou umístěny od středu otáčení ve vzdálenosti 510 mm, 460 mm, 410 mm a 360 mm. O uchycení se starají držáky pružin. K základně je svařen držák pružin pro měření Z složky momentu setrvačnosti, který je vidět na obrázku 24.

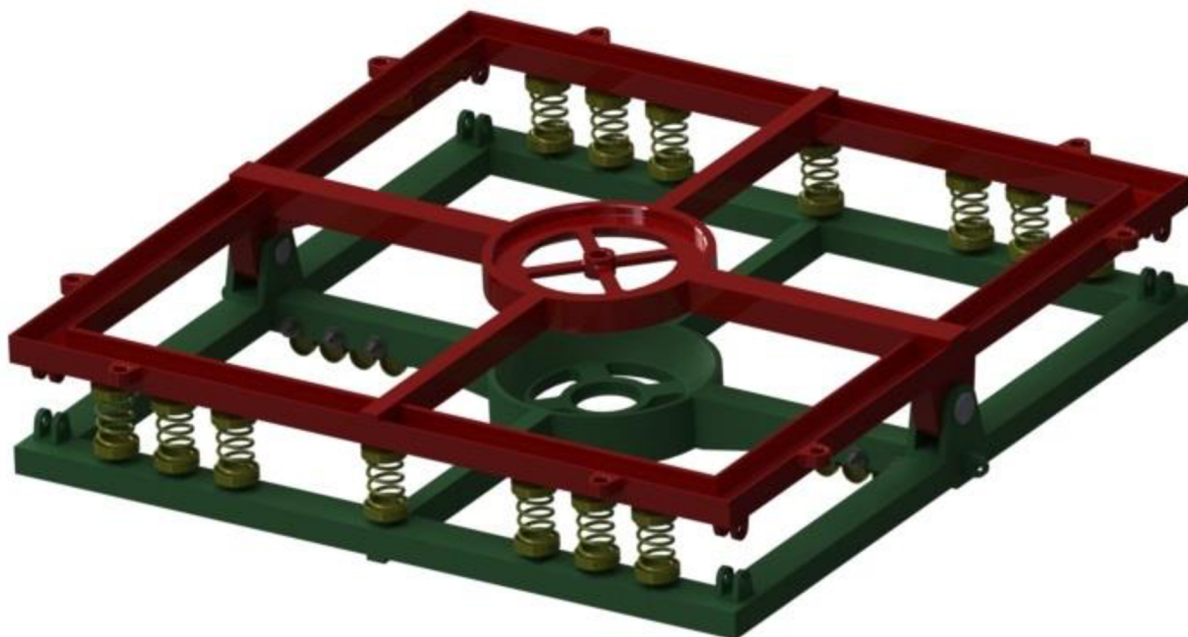


Obrázek 24 Držák pružin umístěný na základně

Na obrázku 24 je vidět držák pružin, který je svařen k základně pomocí vymežovací podložky (pozice 5). K této podložce je navařena deska (pozice 2), ve které jsou vyvrtány 4 díry pro následné uchycení pouzder pro kuličku (pozice 4). Tato pouzdra jsou také svařena k desce. Pozice 3 představuje kuličku, která nám zaručí stále kolmý směr pružiny k misce (pozice 1). U podlaží 2 je držák pružin uchycen přes 3 šrouby M12, jak jsou vidět na obrázku 23. Takto umístěné pružiny mají oproti torzní tyči tu výhodu, že jednotlivé páry pružin lze při změně typu vozidla zapojit či odpojit.

3.1.2 ROLL, PITCH POHYB PRO VÍCE TYPŮ VOZIDEL

Jedním z dalších požadavků při zadání byla schopnost zařízení měřit výškovou polohu těžiště pro více typů vozidel. Na ÚADI se nachází formule Ford, která váží 400 kg a výšková složka těžiště má hodnotu 237 mm. Zařízení by však mělo dokázat učit momenty setrvačnosti a polohu těžiště pro daleko větší a těžší vozidla. Asi největší požadavek na zařízení, které je určeno k měření, je opakovatelnost daných měření. Při modifikaci se dbalo na to, aby se vyhnulo posuvným částem, které by zajišťovaly přesun pružin do jiného místa na zařízení, a které se nikdy neumístí do stejné polohy jako v předchozím měření. Bylo postupováno stejně jako v případě nahrazení torzní tyče vinutými pružinami, které jsou vidět na obrázku 25.



Obrázek 25 Podlaží 2 a 3 spojené 14-ti pružinami

Na obrázku 25 jsou vidět podlaží 2 (zelené) a podlaží 3 (červené), která jsou spojena pomocí dvou čepů a 14-ti pružinami. Původní zařízení má pouze 4 pružiny, které jsou vidět na obrázku 20. Vinuté pružiny byly vybrány z katalogu výrobce pružin Hennlich s.r.o. a jejich parametry jsou: průměr drátu 6 mm, vnější průměr pružiny 48,5 mm, délka pružiny 88 mm a tuhost pružiny $26,95 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$. Vinuté pružiny jsou umístěny od středu otáčení ve vzdálenosti 565 mm.



4 KINEMATIKA A DYNAMIKA MODIFIKOVANÉHO ZAŘÍZENÍ

Pro správnou funkci zařízení je potřeba zařízení řádně otestovat ve virtuálním prostředí. Díky ověření funkčnosti se dokáže zjistit, zda tento návrh uspokojuje naše představy či je potřeba zařízení upravit pro správnou funkčnost. Pro tento typ ověření byl použit software firmy MSC software, konkrétně program Adams/View. Jedná se o tzv. MultiBody Systém (dále jen MBS). Protože se nechtělo spoléhat pouze na výpočet v programu Adams/View, rozhodlo se výpočet provést dle vztahů odvozených pro toto zařízení z principů, které jsou uvedeny v kapitole 1.

Jelikož byla u zařízení změněna světlá výška (změna kinematiky), torzní tyč byla nahrazena vinutými pružinami a původní 4 vinuté pružiny byly nahrazeny 14-ti novými, muselo se zjistit, zda zařízení bude pracovat správně. V tabulce 1 jsou vypsány fyzikální vlastnosti jednotlivých částí zařízení, které jsou potřebné ke zjištění dynamiky zařízení.

Tabulka 1 Fyzikální vlastnosti zařízení

	Výška těžiště od podložky [mm]	Hmotnost [kg]	Momenty setrvačnosti k těžišti části zařízení		
			I_{xx} [kg * m ²]	I_{yy} [kg * m ²]	I_{zz} [kg * m ²]
Základna	25,9	34,48	2,57	1,79	4,28
Podlaží 2	113,7	97	14,73	11,54	23,55
Podlaží 3	281,9	81,44	18,74	17,1	22,81
Podlaží 4	365,8	149,76	63,14	42,2	66,22
Nájezdy	459,4	75,12	62,89	120,41	151,43

Pro následnou simulaci byly zvoleny tři typy vozidel, které mají tyto fyzikální vlastnosti (tabulka 2).

Tabulka 2 Fyzikální vlastnosti simulovaných vozidel

	Výška těžiště [mm]	Hmotnost [kg]	Momenty setrvačnosti		
			I_{xx} [kg * m ²]	I_{yy} [kg * m ²]	I_{zz} [kg * m ²]
Vozidlo 1	550	900	1000	1200	1200
Vozidlo 2	600	1800	2000	3000	3000
Vozidlo 3	700	2200	2500	5500	5500

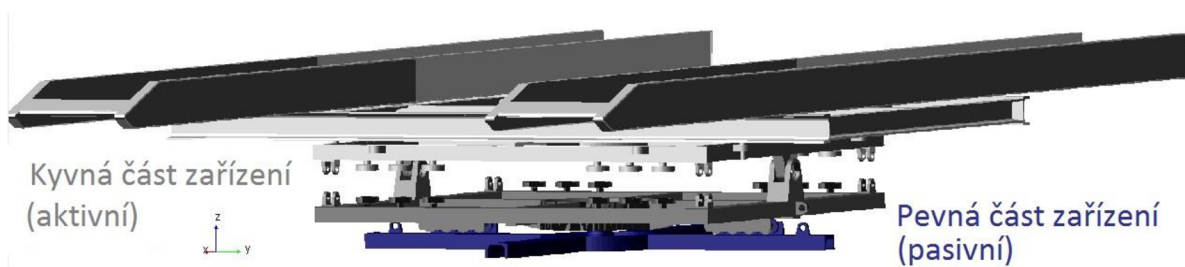


4.1 MBS – KONTROLA KINEMATIKY A ZJIŠTĚNÍ DYNAMIKY ZAŘÍZENÍ

Pro kontrolu správnosti se muselo nejprve převést výše namodelované zařízení do formátu STEP, který je nutný pro import 3D modelů do systému Adams/View. Následně se musely k příslušným importovaným částím přiřadit fyzikální vlastnosti. Tato data, která jsou uvedena v tabulce 1, se zjistila z programu SolidWorks, ve kterém je celé toto zařízení konstruováno.

Pro příslušnou simulaci periody kmitu v příslušných osách je třeba si uvědomit, které části zařízení budou aktivní (kyvná část zařízení) a budou ovlivňovat moment setrvačnosti, resp. periodu kmitu a ty které budou pasivní (pevná část zařízení).

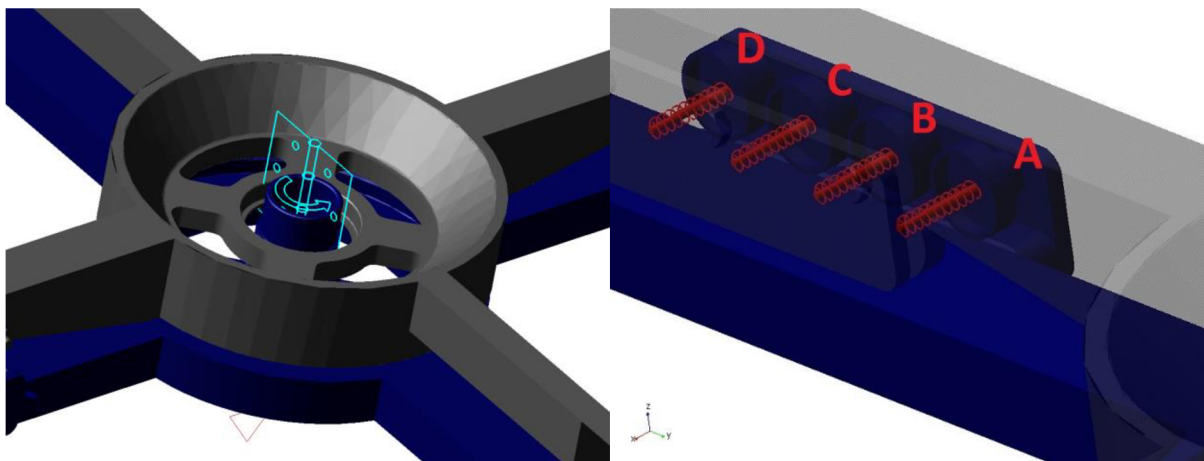
4.1.1 MĚŘENÍ DYNAMICKÝCH SIMULACÍ KOLEM SVISLÉ OSY VOZIDLA



Obrázek 26 Aktivní a pasivní části zařízení pro měření dynamických simulací kolem svislé osy vozidla

V případě simulace periody kmitu/momentu setrvačnosti kolem svislé osy vozidla (osa Z) bude v tomto případě pasivní složkou pouze základna zařízení, která je v programu Adams/View uchycena ke groudnou pevnou vazbou. U základny se tedy nemusí znát hmotnost, příslušná hodnota polohy těžiště a momenty setrvačnosti. V činnosti bude však podlaží 2, 3, 4 a nájezdy pro vozidlo. Všechny tyto zmíněné části jsou mezi sebou spojeny pevnou vazbou, která umožňuje brát tuto část zařízení jako celek. Podlaží 2 je uchyceno k základně vazbou typu joint (rotační vazba), která umožní otáčet kyvnou částí zařízení kolem osy Z vůči základně.

Pro simulaci se musely zvolit počáteční podmínky pootočení kyvné části zařízení, které se zadaly do rotační vazby (obrázek 27 vlevo). Zvolila se tedy počáteční podmínka pootočení o 2°. V postprocesoru Adams/View se poté odečetla perioda kmitu.



Obrázek 27 Použití rotační vazby mezi základnou a podlažím 2 a umístění pružin v Adams/View

Jak je již popsáno v kapitole 3.1.1, pružiny jsou od sebe vzdáleny o 50 mm a jsou ve vzdálenosti od 360 mm do 510 mm od středu otáčení. Pružiny musí vždy pracovat v páru. Proto se zvolilo označení páru pružin A, B, C a D viz obrázek 26.

Tabulka 3 Perioda kmitu zařízení kolem svislé osy vozidla (osa Z), simulované v Adams/View

Pružiny v činnosti	Perioda kmitu T_z [s]					
	A, B, C, D	B, C, D	C, D	D	A, B	B, C
Vozidlo 1	1,35	1,47	1,72	2,31	2,16	1,91
Vozidlo 2	1,99	2,18	2,54	3,42	3,21	2,83
Vozidlo 3	2,64	2,9	3,37	4,54	4,24	3,76

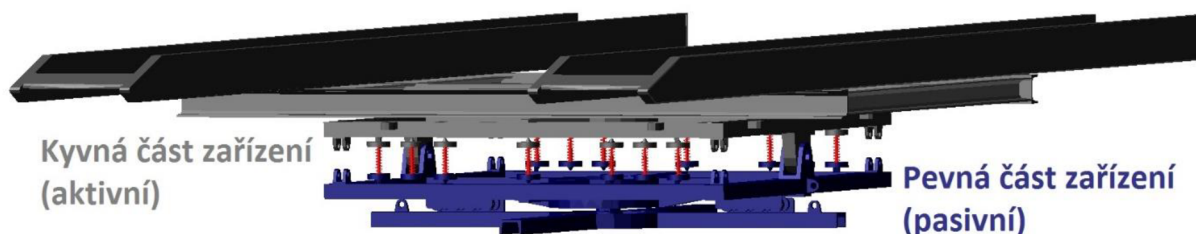
V tabulce 3 jde vidět perioda kmitu zařízení s jednotlivými typy vozidel při zapojení různých párů pružin.

Při měření by neměla perioda kmitu T přesáhnout 3 vteřiny. V tabulce 3 tak je vidět, že při použití této konstrukce se mohou měřit všechny typy vozidel, které jsou uvedeny v tabulce 2, jelikož tato konstrukce umožňuje dle potřeby zapojit různé kombinace pružin.



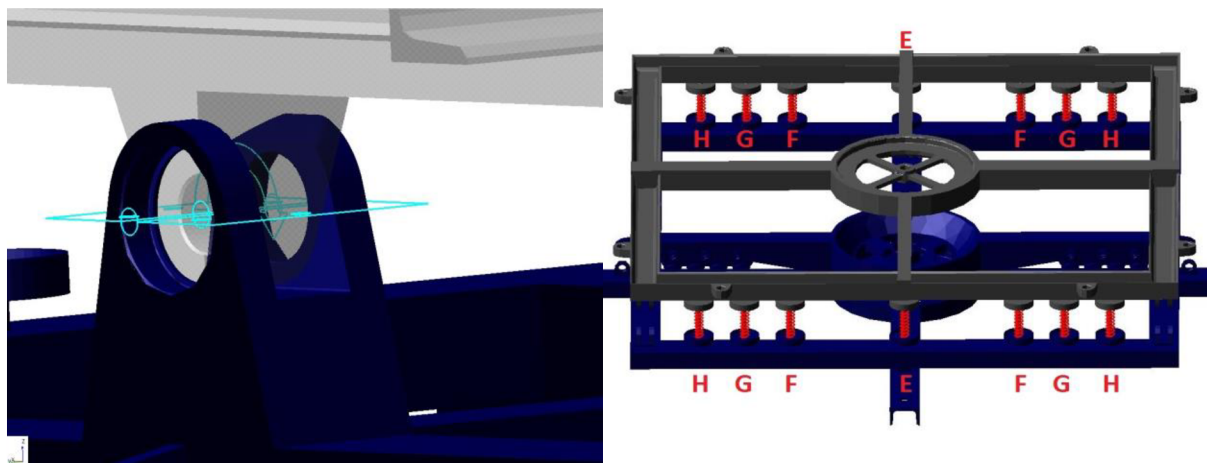
4.1.2 MĚŘENÍ DYNAMICKÝCH SIMULACÍ KOLEM PŘÍČNÉ OSY VOZIDLA

Měření dynamických simulací kolem příčné osy vozidla probíhá odlišným způsobem než měření dynamických simulací kolem svislé osy vozidla. Zařízení se musí zajistit tak, aby základna a podlaží 2 bylo pevně spojeno. Toto zajištění lze vidět na obrázku 23.



Obrázek 28 Aktivní a pasivní části zařízení pro měření dynamických simulací kolem příčné osy vozidla

Jak je vidět na obrázku 28, pevná část zařízení není nyní pouze základna, ale také podlaží 2. Tyto dvě části zařízení jsou mezi sebou spojeny pevnou vazbou a stejně jako u předchozího případu je základna uchycena ke groundu pevnou vazbou. Kyvná část zařízení se skládá z podlaží 3 a 4 spolu s nájezdy pro vozidlo. Mezi sebou jsou tyto části spojeny také pevnou vazbou. Podlaží 2 a podlaží 3 jsou spolu spojena vazbou typu joint (rotační vazba), která umožňuje otáčet kyvnou částí zařízení kolem osy Y vůči základně.



Obrázek 29 Použití rotační vazby mezi podlažím 2 a 3 a umístění/označení pružin v Adams/View

Počáteční podmínkou pro rotační vazbu (obrázek 29) bylo zvoleno tříступňové pootočení kyvné části vůči pevné části zařízení. Následně se v postprocesoru Adams/View odečetly příslušné periody kmitu zařízení na zvoleném vozidle a počtu zapojených pružin.



V tabulce 4 je vidět perioda kmitu zařízení s jednotlivými typy vozidel při zapojení různých párů pružin pro simulaci kolem příčné osy vozidla (osa Y). Jednotlivé pružiny jsou označeny písmeny E, F, G, H (obrázek 29 vpravo).

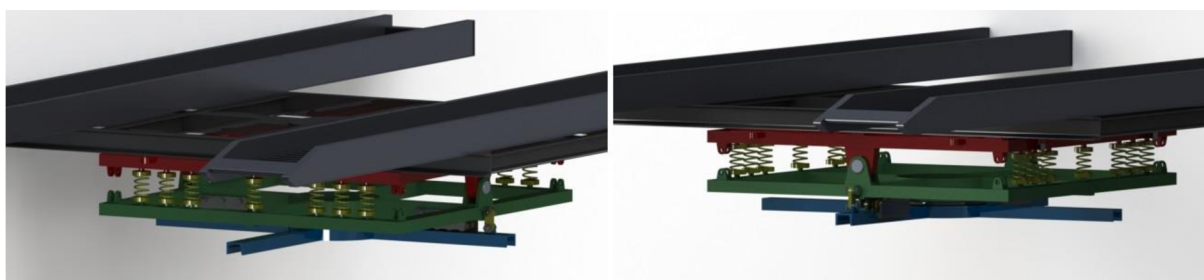
Tabulka 4 Periody kmitu zařízení kolem příčné osy vozidla (osa Y), simulované v Adams/View

Pružiny v činnosti	Perioda kmitu T_y [s]						
	E, F, G, H	F, G, H	E, G, H	G, H	E, H	H	E
Vozidlo 1	0,825	0,9	0,985	1,12	1,325	1,695	2,83
Vozidlo 2	1,3	1,42	1,585	1,83	2,2	3,055	10,35
Vozidlo 3	1,745	1,925	2,15	2,51	3,14	4,775	-

Jako v případě měření periody kmitu kolem svislé osy vozidla (osa Z), by perioda T neměla přesáhnout 3 vteřiny. Z tabulky 4 lze vyčíst, že zde je i rezerva pro měření vozidel s vyšší výškou těžiště či vyšší hmotností. Pružiny E pomohly lépe optimalizovat měření z toho důvodu, že tyto pružiny jsou na zařízení dvě a mohou se použít při měření samostatně nebo se mohou zapojit k jednotlivým čtyřčlenným skupinám pružin F, G, H. V tabulce schází hodnota u vozidla 3 při zapojení pouze pružin E. Důvod je ten, že tyto dvě pružiny neudrží vozidlo (vozidlo přepadlo na jednu stranu) při počáteční podmínce pootočení o 3° a při reálném měření by hrozilo poničení zkoušeného vozidla a samotného zařízení.

4.1.3 MĚŘENÍ DYNAMICKÝCH SIMULACÍ KOLEM PODÉLNÉ OSY VOZIDLA

Měření dynamických simulací kolem podélné osy vozidla probíhá shodným způsobem jako měření dynamických simulací kolem příčné osy vozidla. Jediná změna je ta, že podlaží 4 se musí pootočit o 90° .



Obrázek 30 Rozdíl mezi měřením kolem příčné a podélné osy vozidla



Na obrázku 30 je vidět rozdíl mezi měřením momentu setrvačnosti kolem příčné a podélné osy vozidla. Označení pružin a počáteční podmínky se použily stejné jako v kapitole 4.1.2. Tabulka 5 ukazuje periodu kmitu zařízení pro příslušné vozidlo dle zapojení pružin.

Tabulka 5 Periody kmitu zařízení kolem podélné osy vozidla (osa X), simulované v Adams/View

Pružiny v činnosti	Perioda kmitu T_x [s]						
	E, F, G, H	F, G, H	E, G, H	G, H	E, H	H	E
Vozidlo 1	0,78	0,85	0,93	1,06	1,25	1,6	2,67
Vozidlo 2	1,14	1,25	1,39	1,59	1,93	2,68	9,1
Vozidlo 3	1,36	1,48	1,69	1,95	2,44	3,71	-

Stejně jako v předešlém měření není u vozidla 3 při zapojení pružin E uvedena hodnota periody, neboť dvě pružiny neumožní kývání na měřícím zařízení.

4.2 KONTROLA PERIODY KMITU

Pro kontrolu periody kmitu a tedy vhodnosti užitých pružin se vycházelo ze vztahů uvedených v kapitole 1. Pro výpočet se použil program MathCad 15, který zamezil numerickou chybu ve výpočtu. Pro výpočet bylo třeba znát parametry jako tíha, moment setrvačnosti, výška těžiště, vzdálenost pružin od středu rotace, tuhost pružin, výška/vzdálenost osy rotace od podložky a výška nájezdů na zařízení všech částí, které by ovlivnily konečný výsledek.

Fyzikální vlastnosti zařízení a simulovaných vozidel najdeme v tabulce 1 a tabulce 2.

4.2.1 KONTROLA PERIODY KMITU KOLEM SVISLÉ OSY VOZIDLA

Pro výpočet periody kmitu se vycházelo ze vztahu z kapitoly 1.2.1.

$$I_{v+r} = T_{v+r}^2 * \frac{C_t}{4 * \pi^2} \quad (47)$$



Pro toto zařízení se však musel doplnit vztah o vzdálenost pružin od středu rotace. Po upravení a doplnění o vzdálenost pružin od středu rotace poté platí:

$$T_z = \sqrt{\frac{I_{cz} * 4 * \pi^2}{2 * C_{vpz} * (l_A^2 + l_B^2 + l_C^2 + l_D^2)}} \quad (48)$$

$$I_{cz} = I_{vz} + I_{zz} \quad (49)$$

$$I_{zz} = I_{l2oz} + I_{l3oz} + I_{l4oz} + I_{noz} \quad (50)$$

kde I_{cz} je celkový moment setrvačnosti, I_{vz} je moment setrvačnosti vozidla v ose Z, I_{zz} je moment setrvačnosti zařízení v ose Z, I_{l2oz} je moment setrvačnosti podlaží 2 v ose Z, I_{l3oz} je moment setrvačnosti podlaží 3 v ose Z, I_{l4oz} je moment setrvačnosti podlaží 4 v ose Z, I_{noz} je moment setrvačnosti nájezdů v ose Z, C_{vpz} je tuhost pružin použitá pro měření kolem k svislé osy vozidla a l_A, l_B, l_C, l_D je vzdálenost pružin od středu rotace.

Jelikož těžiště jednotlivých podlaží prochází osou rotace, nemusíme momenty setrvačnosti jednotlivých dílců přepočítávat dle Steinerovy věty. Momenty setrvačnosti jednotlivých částí zařízení jsou uvedeny v tabulce 1, momenty setrvačnosti vozidla jsou uvedeny v tabulce 2, tuhost vinutých pružin C_{vpz} je $21\,290\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$, vzdálenost $l_A = 0,36\text{ m}$, $l_B = 0,41\text{ m}$, $l_C = 0,46\text{ m}$ a $l_D = 0,51\text{ m}$. Vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6.

Tabulka 6 Vypočítané periody kmitu zařízení kolem svislé osy vozidla (osa Z)

Pružiny v činnosti	Perioda kmitu T_z [s]					
	A, B, C, D	B, C, D	C, D	D	A, B	B, C
Vozidlo 1	1,328	1,457	1,696	2,284	2,135	1,891
Vozidlo 2	1,983	2,175	2,533	3,411	3,188	2,823
Vozidlo 3	2,636	2,89	3,366	4,533	4,237	3,752

4.2.2 KONTROLA PERIODY KMITU KOLEM PŘÍČNÉ OSY VOZIDLA

Pro výpočet periody kmitu se vychází ze vztahu z kapitoly 1.2.3.

$$I_{v+p} = T_{v+p}^2 * \frac{C * l^2 - (G_v + G_p) * (h_{v+p} + h_o)}{4 * \pi^2} \quad (51)$$



U tohoto zařízení je však osa otáčení uprostřed zařízení, oproti fyzikálnímu kyvadlu podepřené pružinou, kde je osa otáčení pod jednou stranou vozidla. Proto po upravení a doplnění vztahu platí:

$$T_y = \sqrt{\frac{I_{cy} * 4 * \pi^2}{X_p * C_{vp} * l_y^2 - (G_v * h_{vtoy} + G_{l3} * h_{l3toy} + G_{l4} * h_{l4toy} + G_N * h_{Ntoy})}} \quad (52)$$

$$I_{cy} = I_{vy} + I_{zy} \quad (53)$$

$$I_{zy} = I_{l3yy} + I_{l4yy} + I_{Nyy} \quad (54)$$

kde I_{cy} je celkový moment setrvačnosti vozidla a aktivních částí zařízení pro osu Y, I_{vy} je moment setrvačnosti vozidla pro osu Y, I_{zy} je celkový moment setrvačnosti všech aktivních částí zařízení k ose Y, I_{l3y} je moment setrvačnosti podlaží 3 pro osu Y, I_{l4y} je moment setrvačnosti podlaží 4 pro osu Y, I_{Ny} je moment setrvačnosti nájezdů k ose Y, X_p je počet aktivních pružin, C_{vp} je tuhost pružin použitých pro měření kolem příčné a podélné osy vozidla, l_y je vzdálenost pružin od osy rotace, G_v je tíha vozidla, h_{vtoy} je vzdálenost těžiště vozidla po osu rotace, G_{l3} je tíha podlaží 3, h_{l3toy} je vzdálenost těžiště podlaží 3 po osu rotace, G_{l4} je tíha podlaží 4, h_{l4toy} je vzdálenost těžiště podlaží 4 po osu rotace, G_N je tíha nájezdů, G_{Ntoy} je vzdálenost těžiště nájezdů po osu rotace.

Zde se přepočítával moment setrvačnosti vozidla a jednotlivých částí zařízení, které vstupují do vztahu pro výpočet periody kmitu pomocí Steinerovy věty, jelikož osa rotace neprochází těžištěm jednotlivých částí. Tuhost vinutých pružin použitých při výpočtu je $26\,960 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$, vzdálenost $l_y = 0,565 \text{ m}$. Vzdálenost h_o tedy osy rotace od podložky je 202 mm a vzdálenost těžiště vozidla od podložky je 1056 mm . Vzdálenosti těžišť jednotlivých částí zařízení od podložky nalezneme v tabulce 1.

Tabulka 7 Vypočítané periody kmitu zařízení kolem příčné osy vozidla (osa Y)

Pružiny v činnosti	Perioda kmitu T_y [s]						
	E, F, G, H	F, G, H	E, G, H	G, H	E, H	H	E
Vozidlo 1	0,83	0,902	0,996	1,127	1,329	1,703	2,843
Vozidlo 2	1,302	1,423	1,588	1,826	2,22	3,07	10,376
Vozidlo 3	1,748	1,922	2,162	2,521	3,152	4,768	8,874i



4.2.3 KONTROLA PERIODY KMITU KOLEM PODÉLNÉ OSY VOZIDLA

Pro výpočet periody kmitu kolem podélné osy vozidla byl použit stejný vztah jako v předešlé kapitole (4.2.2). Po úpravách tedy platí:

$$T_x = \sqrt{\frac{I_{cx} * 4 * \pi^2}{X_p * C_{vp} * l_y^2 - (G_v * h_{vtoy} + G_{l3} * h_{l3toy} + G_{l4} * h_{l4toy} + G_N * h_{Ntoy})}} \quad (55)$$

$$I_{cx} = I_{vx} + I_{zx} \quad (56)$$

$$I_{zx} = I_{l3yx} + I_{l4yx} + I_{Nyx} \quad (57)$$

kde I_{cx} je celkový moment setrvačnosti vozidla a aktivních částí zařízení pro osu X, I_{vx} je moment setrvačnosti vozidla pro osu X, I_{zx} je celkový moment setrvačnosti všech aktivních částí zařízení k ose X, I_{l3x} je moment setrvačnosti podlaží 3 pro osu X, I_{l4y} je moment setrvačnosti podlaží 4 pro osu X, I_{Nx} je moment setrvačnosti nájezdů k ose X.

Tabulka 8 Vypočítané periody kmitu zařízení kolem podélné osy vozidla (osa X)

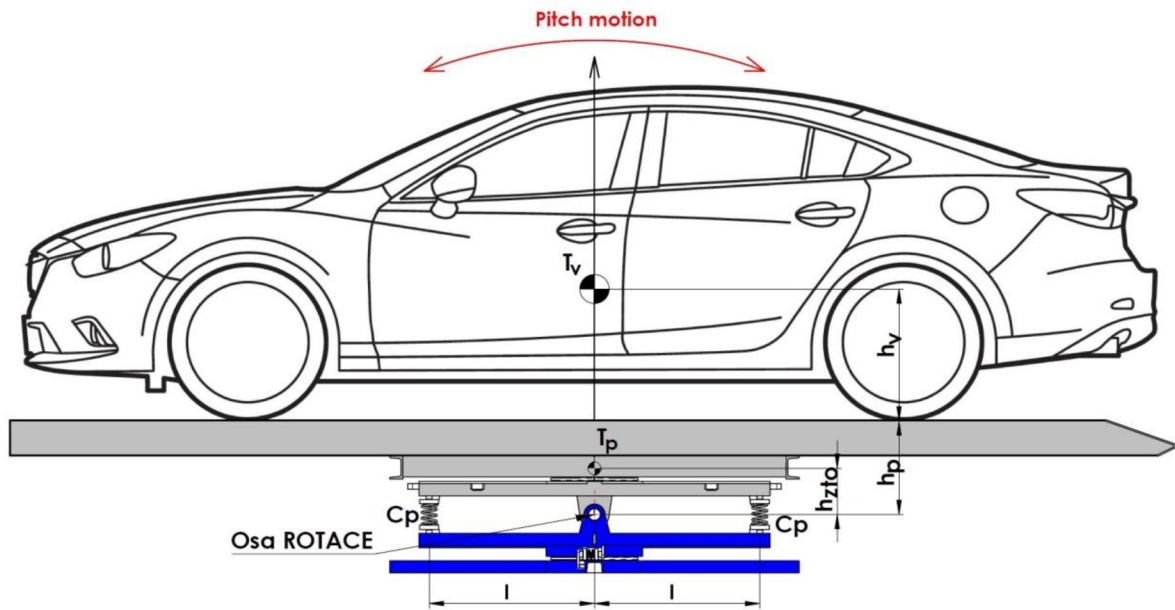
Pružiny v činnosti	Perioda kmitu T_x [s]						
	E, F, G, H	F, G, H	E, G, H	G, H	E, H	H	E
Vozidlo 1	0,778	0,845	0,933	1,056	1,245	1,595	2,663
Vozidlo 2	1,141	1,248	1,392	1,601	1,946	2,691	9,096
Vozidlo 3	1,359	1,494	1,681	1,96	2,451	3,707	6,899i

Po porovnání hodnot, které se odečetly z postprocesingu programu Adams/View a vypočítaných výsledků, spočtených pomocí pohybové rovnice, se zjistilo, že maximální odchylka mezi těmito způsoby určení periody kmitu je 0,026 s. Přičemž u odečítání periody kmitu v programu Adams/View byl použit krok 0,01 sekundy. Z těchto výsledků vyplývá, že návrh dynamiky měřícího zařízení je správný.



5 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA ZAŘÍZENÍ

Citlivostní analýzou zařízení se myslí to, jak je zařízení citlivé na jednotlivé vstupní parametry, tedy jak se projeví na výsledku - výstupu ze vztahu. Parametry potřebné k určení citlivosti zařízení na výškovou složku těžiště vozidla jsou: perioda kmitu T , tuhost pružin C_p , hmotnost vozidla m_v , vzdálenost od osy rotace k ploše nájezdů vozidla h_p , hmotnost aktivních částí zařízení m_z (obrázek 31 - šedé části) a vzdálenost od osy rotace k těžišti aktivních částí zařízení h_{zto} .



Obrázek 31 Schéma citlivostní analýzy zařízení

Pro výpočet citlivostní analýzy zařízení se použije vztah pro výpočet periody kmitu z kapitoly 4.2.2, resp. daný vztah se upraví pro výpočet momentu setrvačnosti vozidla. Pro stanovení citlivosti výškové polohy těžiště vozidla na jednotlivých parametrech se potřebují dvě rovnice, protože zde jsou dvě neznámé - výška těžiště h_v a moment setrvačnosti zařízení s vozidlem I . Rovnice se od sebe liší pouze v parametru x_1 a x_2 , které znamenají počet aktivních pružin v případě 1 a 2.

$$I_1 = \frac{T_1^2}{4 * \pi^2} * [x_1 * C_t - G_v * (h_v + h_p) - G_z * h_{zto}] \quad (58)$$

$$I_2 = \frac{T_2^2}{4 * \pi^2} * [x_2 * C_t - G_v * (h_v + h_p) - G_z * h_{zto}] \quad (59)$$

$$C_t = C_{vp} * l^2 \quad (60)$$

kde G_z je tíha aktivních částí zařízení a h_{zto} je vzdálenost těžiště aktivních částí zařízení od osy rotace.



Jestliže se při těchto dvou měřeních manipuluje pouze s pružinami, tak se moment setrvačnosti zařízení a vozidla téměř nezmění. Z tohoto předpokladu je zanedbána změna momentu setrvačnosti a může se tedy říci, že:

$$I_1 = I_2 \quad (61)$$

Po úpravě těchto rovnic se dostane vztah pro výšku těžiště vozidla:

$$h_v = \frac{C_t * (T_1^2 - x * T_2^2) + G_v * h_p (T_2^2 - T_1^2) + G_z * h_{zto} * (T_2^2 - T_1^2)}{G_v * (T_1^2 - T_2^2)} \quad (62)$$

Pro posouzení citlivosti zařízení na nesprávně naměřené hodnoty se zvolilo vozidlo 2 (vlastnosti vozidla jsou uvedeny v tabulce 2). Všechny vstupující parametry do vztahu 62 se vyhodnotí pro vstupní chybu 0%, ± 2% a ± 5%.

Citlivostní analýza na nesprávně změřené periody kmitu T_1 a T_2 se provede pro několik konfigurací, protože bylo zjištěno, že periody T_1 a T_2 mají významný vliv na konečné stanovení výšky těžiště. Jelikož se ověřilo, že výpočet dle vztahu 52 v programu MathCad odpovídá periodám kmitu zjištěným v MBS Adams/View, budou se proto do vztahu 62 dosazovat výsledky vypočítané ze vztahu 52, z důvodu přesnosti daného výpočtu.

Na následujících stranách jsou uvedeny tabulky s grafy pro jednotlivé vstupní parametry vztahu 62. V tabulkách jsou uvedeny hodnoty, které se dosadily do vztahu 62 se vstupní chybou 0%, ± 2% a ± 5%. Pro tyto hodnoty pak byly vypočteny výšky těžiště, které se následně porovnávaly s hodnotou vstupní chyby 0%.



5.1 CITLIVOST ZAŘÍZENÍ NA NESPRÁVNÉ ZMĚŘENÍ PERIODY KMITU T_1

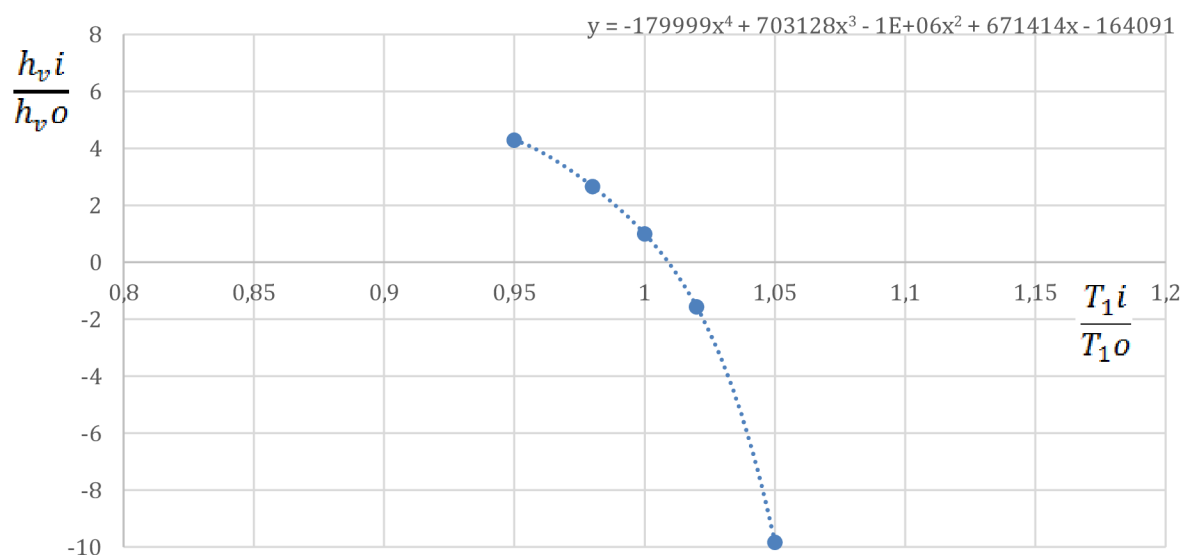
5.1.1 PŘÍPAD 1

$T_1 = 1,30151$ s, 14 pružin v činnosti; $T_2 = 1,4235$ s, 12 pružin v činnosti

Tabulka 9 Hodnoty výšky těžiště v závislosti na periodě kmitu T_1

Perioda kmitu T_{1i} [s]	$\frac{T_{1i}}{T_{1o}}$	Vypočítaná výšková poloha těžiště h_{vi} [mm]	$\frac{h_{vi}}{h_{vo}}$
1,23643	0,95	2572,2	4,287
1,27548	0,98	1597,7	2,663
1,30151	1	600	1
1,32754	1,02	-940,3	-1,567
1,36659	1,05	-5897,7	-9,830

Graf 1 Závislost poměrné výšky těžiště vozidla na poměrné periodě kmitu T_1 při konstantní T_2





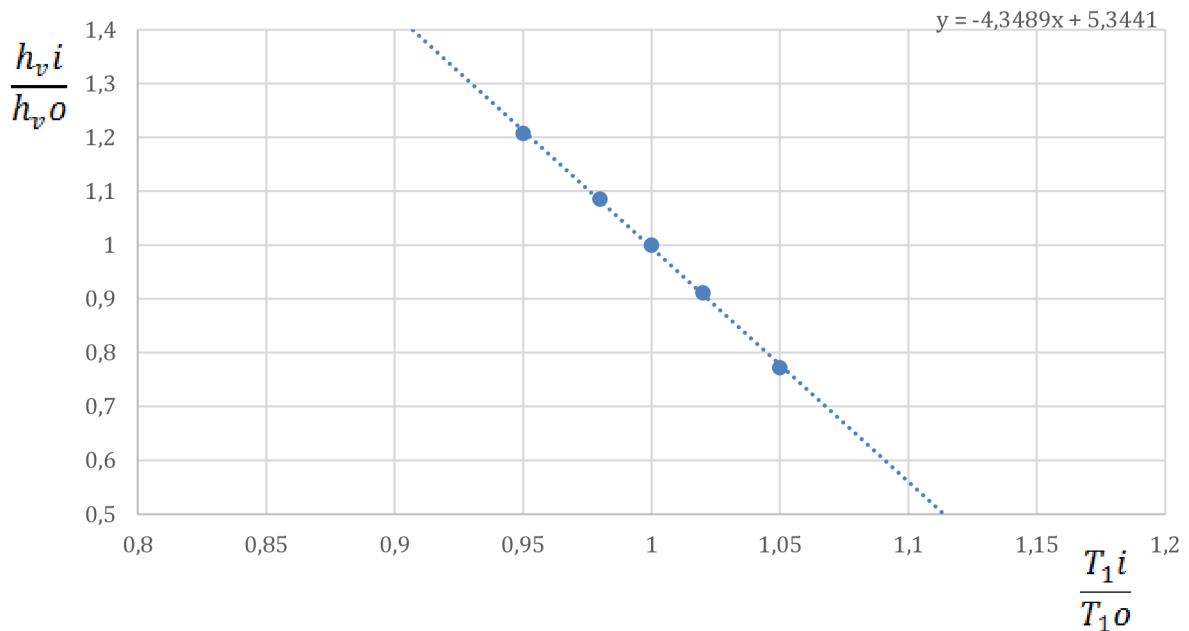
5.1.2 PŘÍPAD 2

$T_1 = 1,30151$ s, 14 pružin v činnosti; $T_2 = 3,06959$ s, 4 pružiny v činnosti

Tabulka 10 Hodnoty výšky těžiště v závislosti na periodě kmitu T_1

Perioda kmitu T_{1i} [s]	$\frac{T_{1i}}{T_{1o}}$	Vypočítaná výšková poloha těžiště h_{vi} [mm]	$\frac{h_{vi}}{h_{vo}}$
1,23643	0,95	724,1	1,207
1,27548	0,98	650,9	1,085
1,30151	1	599,8	1
1,32754	1,02	546,7	0,911
1,36659	1,05	436,2	0,772

Graf 2 Závislost poměrné výšky těžiště vozidla na poměrné periodě kmitu T_1 při konstantní T_2





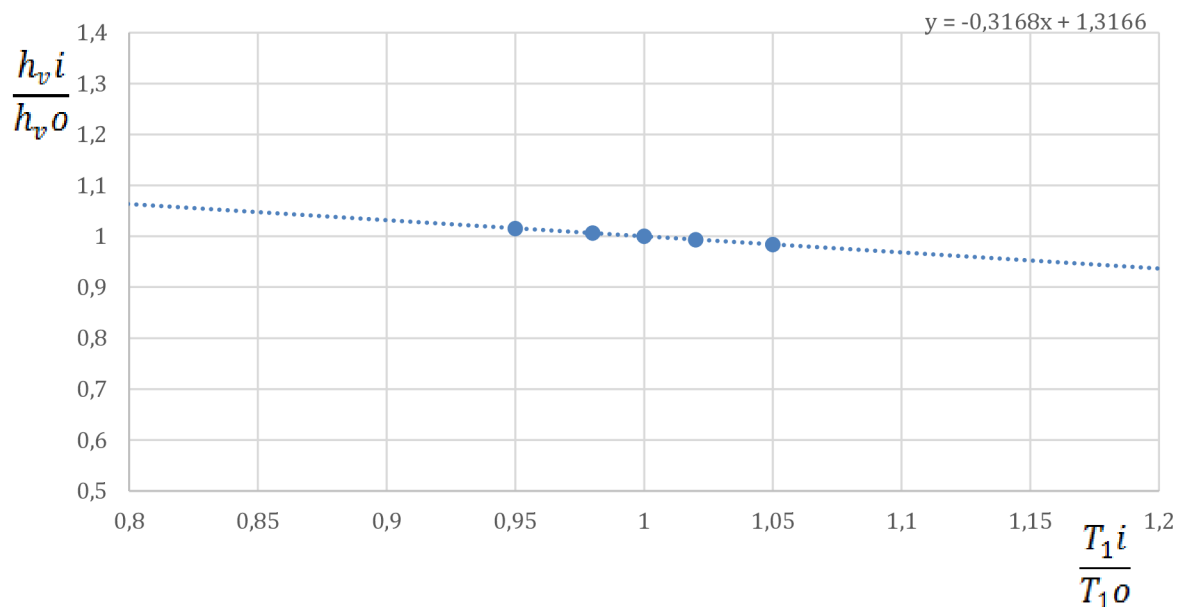
5.1.3 PŘÍPAD 3

$T_1 = 1,30151$ s, 14 pružin v činnosti; $T_2 = 10,37575$ s, 2 pružiny v činnosti

Tabulka 11 Hodnoty výšky těžiště v závislosti na periodě kmitu T_1

Perioda kmitu T_{1i} [s]	$\frac{T_{1i}}{T_{1o}}$	Vypočítaná výšková poloha těžiště h_{vi} [mm]	$\frac{h_{vi}}{h_{vo}}$
1,23643	0,95	609,0	1,015
1,27548	0,98	603,5	1,006
1,30151	1	599,8	1
1,32754	1,02	595,9	0,994
1,36659	1,05	590,0	0,984

Graf 3 Závislost poměrné výšky těžiště vozidla na poměrné periodě kmitu T_1 při konstantní T_2





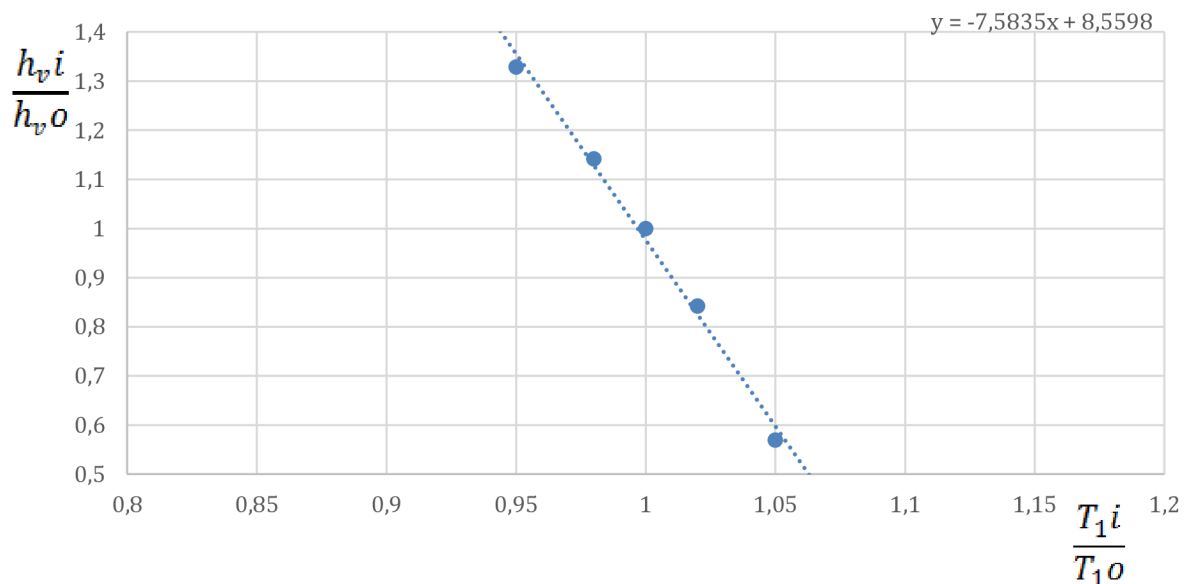
5.1.4 PŘÍPAD 4

$T_1 = 2,21964$ s, 6 pružin v činnosti; $T_2 = 3,06959$ s, 4 pružiny v činnosti

Tabulka 12 Hodnoty výšky těžiště v závislosti na periodě kmitu T_1

Perioda kmitu T_{1i} [s]	$\frac{T_{1i}}{T_{1o}}$	Vypočítaná výšková poloha těžiště h_{vi} [mm]	$\frac{h_{vi}}{h_{vo}}$
2,10865	0,95	797,0	1,329
2,17524	0,98	684,7	1,142
2,21964	1	599,8	1
2,26403	1,02	505,1	0,842
2,33062	1,05	341,2	0,569

Graf 4 Závislost poměrné výšky těžiště vozidla na poměrné periodě kmitu T_1 při konstantní T_2





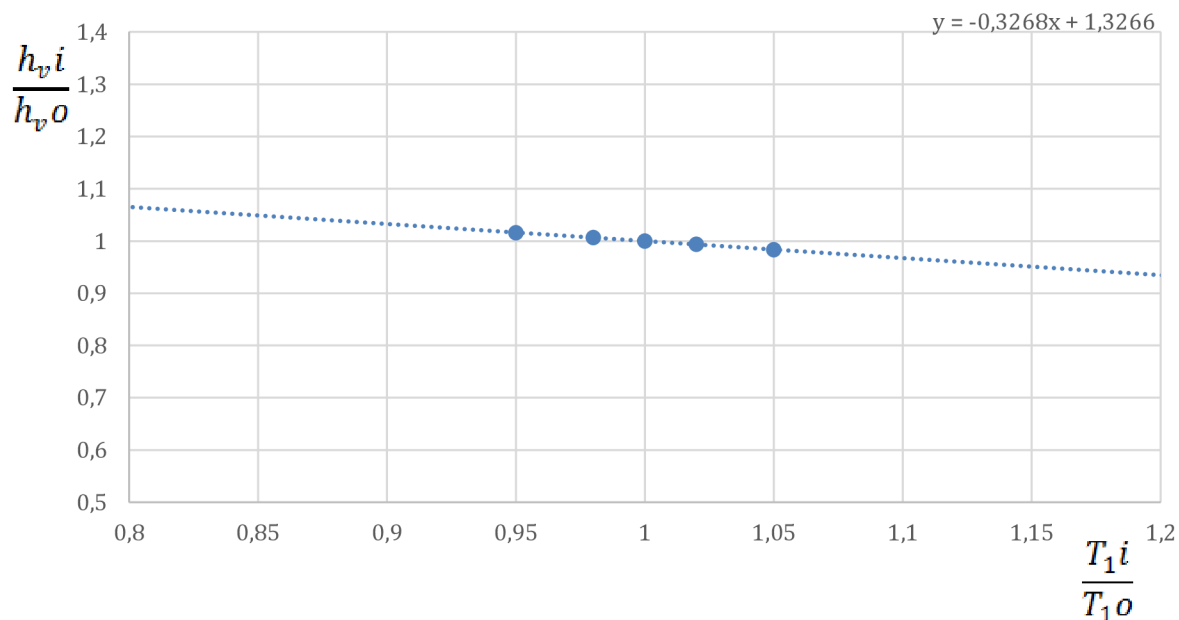
5.1.5 PŘÍPAD 5

$T_1 = 2,21964$ s, 6 pružin v činnosti; $T_2 = 10,37575$ s, 2 pružiny v činnosti

Tabulka 13 Hodnoty výšky těžiště v závislosti na periodě kmitu T_1

Perioda kmitu T_{1i} [s]	$\frac{T_{1i}}{T_{1o}}$	Vypočítaná výšková poloha těžiště h_{vi} [mm]	$\frac{h_{vi}}{h_{vo}}$
2,10865	0,95	609,3	1,016
2,17524	0,98	603,6	1,006
2,21964	1	599,8	1
2,26403	1,02	595,8	0,993
2,33062	1,05	589,7	0,983

Graf 5 Závislost poměrné výšky těžiště vozidla na poměrné periodě kmitu T_1 při konstantní T_2





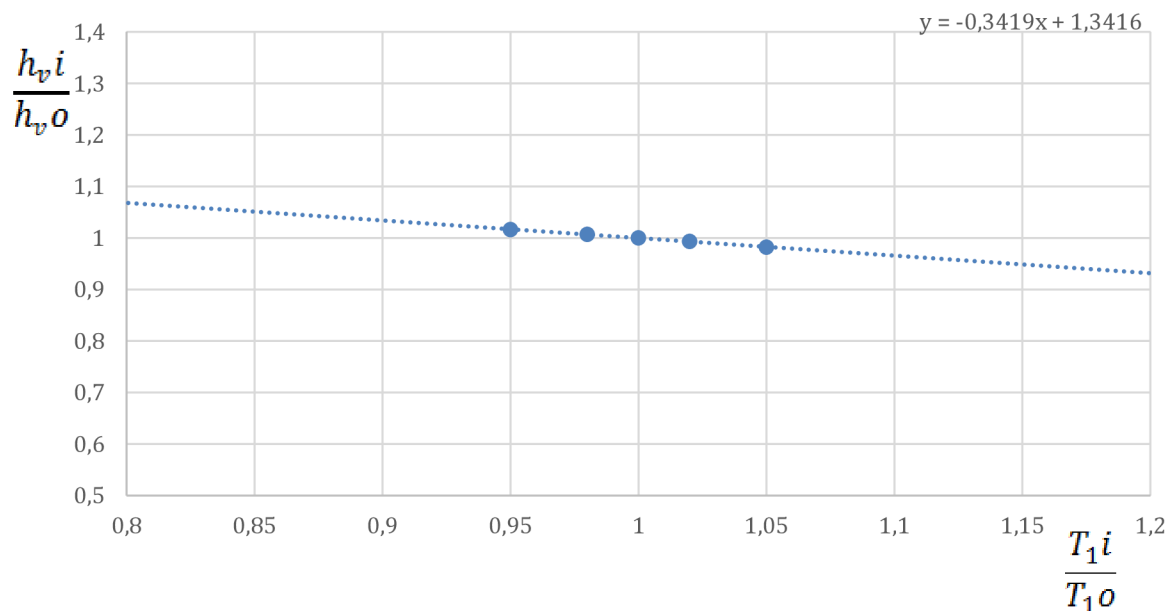
5.1.6 PŘÍPAD 6

$T_1 = 3,06959$ s, 4 pružiny v činnosti; $T_2 = 10,37575$ s, 2 pružiny v činnosti

Tabulka 14 Hodnoty výšky těžiště v závislosti na periodě kmitu T_1

Perioda kmitu T_{1i} [s]	$\frac{T_{1i}}{T_{1o}}$	Vypočítaná výšková poloha těžiště h_{vi} [mm]	$\frac{h_{vi}}{h_{vo}}$
2,10865	0,95	609,7	1,017
2,17524	0,98	603,8	1,007
3,06959	1	599,8	1
2,26403	1,02	595,6	0,993
2,33062	1,05	589,2	0,982

Graf 6 Závislost poměrné výšky těžiště vozidla na poměrné periodě kmitu T_1 při konstantní T_2





5.2 CITLIVOST ZAŘÍZENÍ NA NESPRÁVNÉ ZMĚŘENÍ PERIODY KMITU T_2

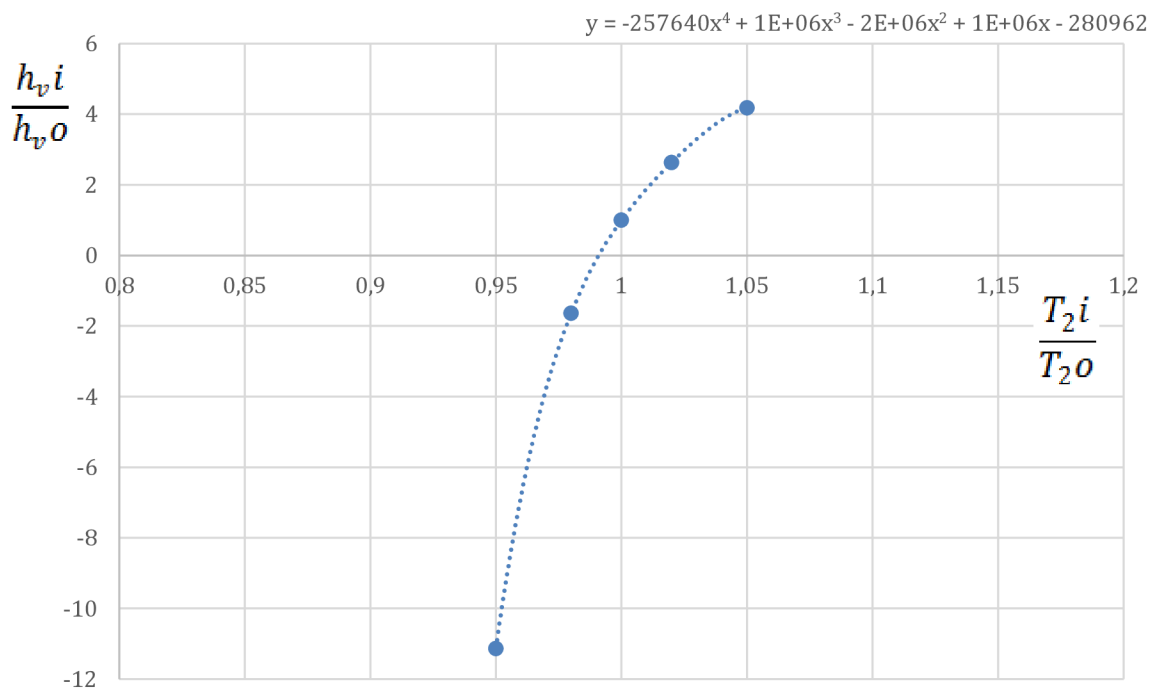
5.2.1 PŘÍPAD 7

$T_1 = 1,30151$ s, 14 pružin v činnosti; $T_2 = 1,4235$ s, 12 pružin v činnosti

Tabulka 15 Hodnoty výšky těžiště v závislosti na periodě kmitu T_2

Perioda kmitu T_{2i} [s]	$\frac{T_{2i}}{T_{2o}}$	Vypočítaná výšková poloha těžiště h_{vi} [mm]	$\frac{h_{vi}}{h_{vo}}$
1,35233	0,95	-6677,0	-11,128
1,39509	0,98	1597,7	2,663
1,4235	1	600	1
1,45197	1,02	1581,5	2,636
1,49468	1,05	2510,0	4,183

Graf 7 Závislost poměrné výšky těžiště vozidla na poměrné periodě kmitu T_2 při konstantní T_1





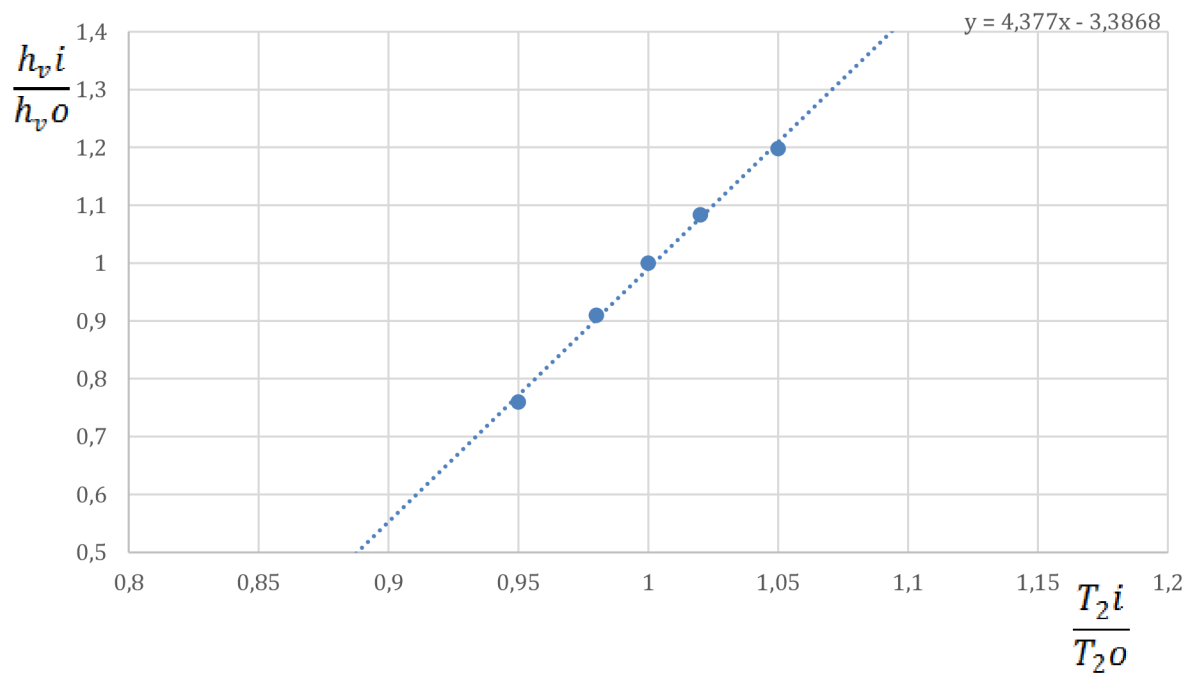
5.2.2 PŘÍPAD 8

$T_1 = 1,30151$ s, 14 pružin v činnosti; $T_2 = 3,06959$ s, 4 pružiny v činnosti

Tabulka 16 Hodnoty výšky těžiště v závislosti na periodě kmitu T_2

Perioda kmitu T_{2i} [s]	$\frac{T_{2i}}{T_{2o}}$	Vypočítaná výšková poloha těžiště h_{vi} [mm]	$\frac{h_{vi}}{h_{vo}}$
1,23643	0,95	455,7	0,760
1,27548	0,98	545,6	0,910
3,06959	1	599,8	1
1,32754	1,02	649,9	1,084
1,36659	1,05	718,4	1,198

Graf 8 Závislost poměrné výšky těžiště vozidla na poměrné periodě kmitu T_2 při konstantní T_1





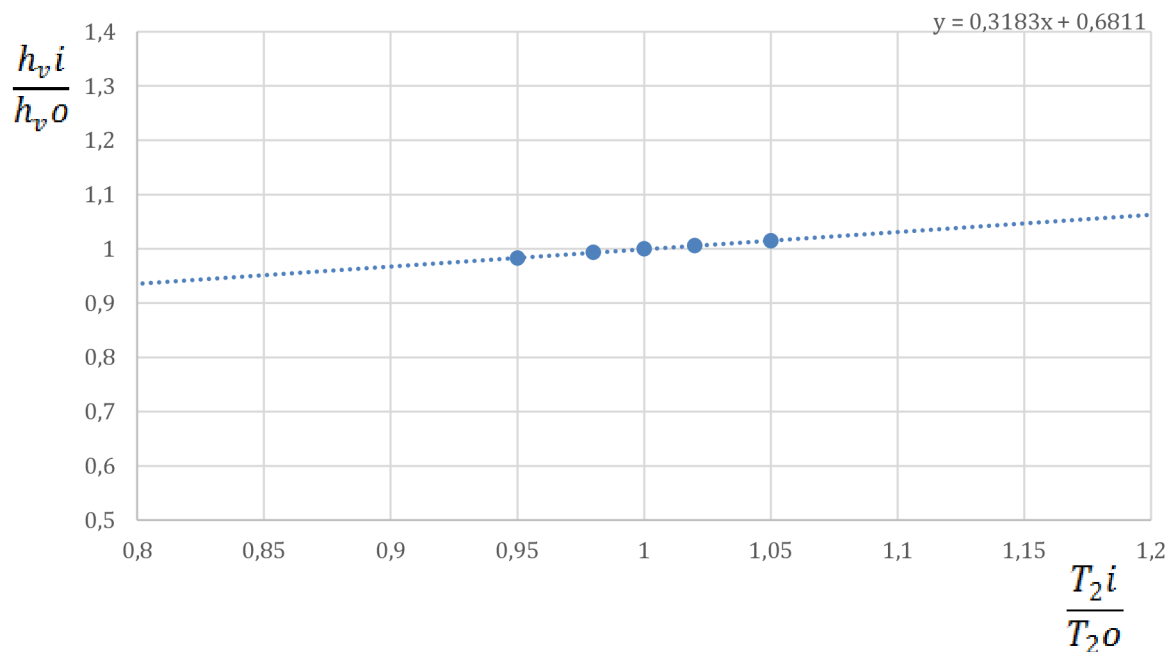
5.2.3 PŘÍPAD 9

$T_1 = 1,30151$ s, 14 pružin v činnosti; $T_2 = 10,37575$ s, 2 pružiny v činnosti

Tabulka 17 Hodnoty výšky těžiště v závislosti na periodě kmitu T_2

Perioda kmitu T_{2i} [s]	$\frac{T_{2i}}{T_{2o}}$	Vypočítaná výšková poloha těžiště h_{vi} [mm]	$\frac{h_{vi}}{h_{vo}}$
9,85696	0,95	589,5	0,983
10,16824	0,98	595,8	0,993
10,37575	1	599,8	1
10,58327	1,02	603,5	1,006
10,89454	1,05	608,6	1,015

Graf 9 Závislost poměrné výšky těžiště vozidla na poměrné periodě kmitu T_2 při konstantní T_1





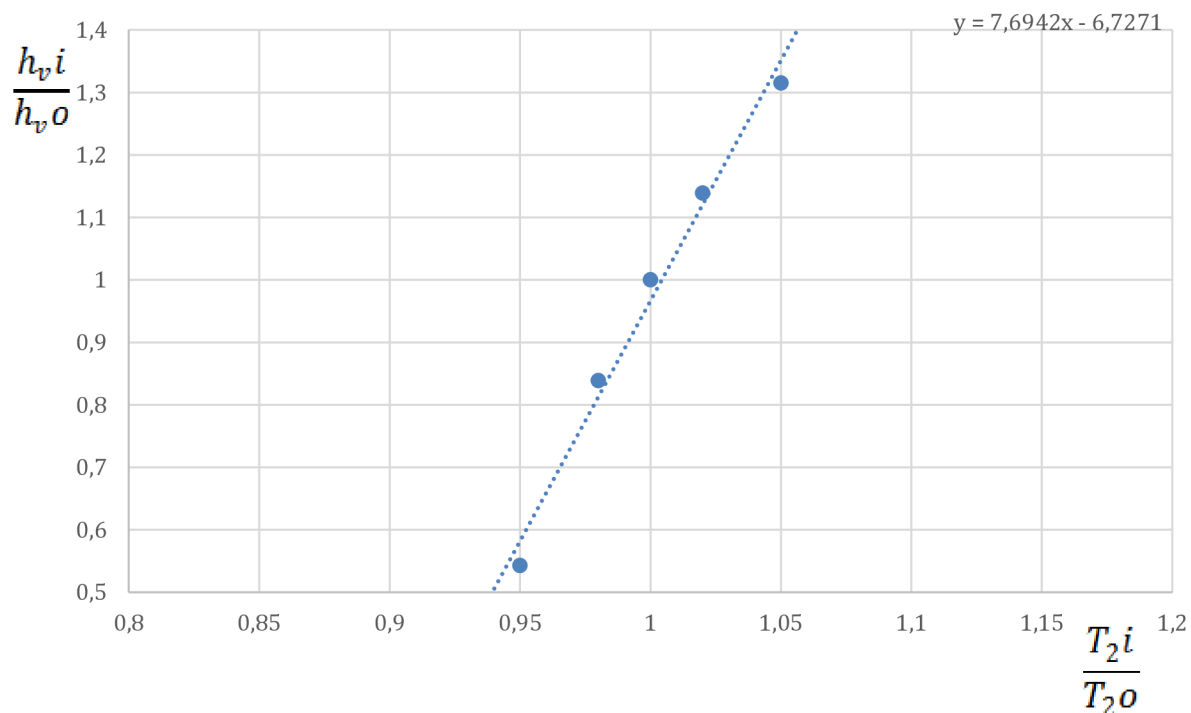
5.2.4 PŘÍPAD 10

$T_1 = 2,21964$ s, 6 pružin v činnosti; $T_2 = 3,06959$ s, 4 pružiny v činnosti

Tabulka 18 Hodnoty výšky těžiště v závislosti na periodě kmitu T_2

Perioda kmitu T_{2i} [s]	$\frac{T_{2i}}{T_{2o}}$	Vypočítaná výšková poloha těžiště h_{vi} [mm]	$\frac{h_{vi}}{h_{vo}}$
2,91611	0,95	325,4	0,543
3,00820	0,98	503,1	0,839
3,06959	1	599,8	1
3,13098	1,02	683,2	1,139
3,22307	1,05	788,7	1,315

Graf 10 Závislost poměrné výšky těžiště vozidla na poměrné periodě kmitu T_2 při konstantní T_1





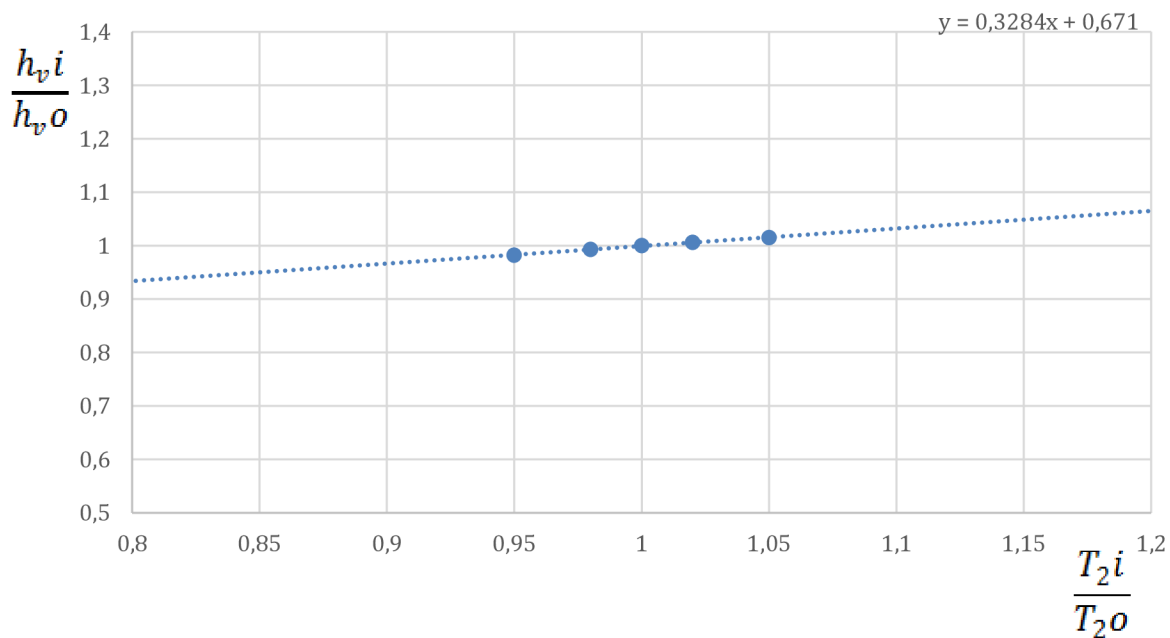
5.2.5 PŘÍPAD 11

$T_1 = 2,21964$ s, 6 pružin v činnosti; $T_2 = 10,37575$ s, 2 pružiny v činnosti

Tabulka 19 Hodnoty výšky těžiště v závislosti na periodě kmitu T_2

Perioda kmitu T_{2i} [s]	$\frac{T_{2i}}{T_{2o}}$	Vypočítaná výšková poloha těžiště h_{vi} [mm]	$\frac{h_{vi}}{h_{vo}}$
9,85696	0,95	589,1	0,982
10,16824	0,98	595,7	0,993
10,37575	1	599,8	1
10,58327	1,02	603,6	1,006
10,89454	1,05	608,8	1,015

Graf 11 Závislost poměrné výšky těžiště vozidla na poměrné periodě kmitu T_2 při konstantní T_1





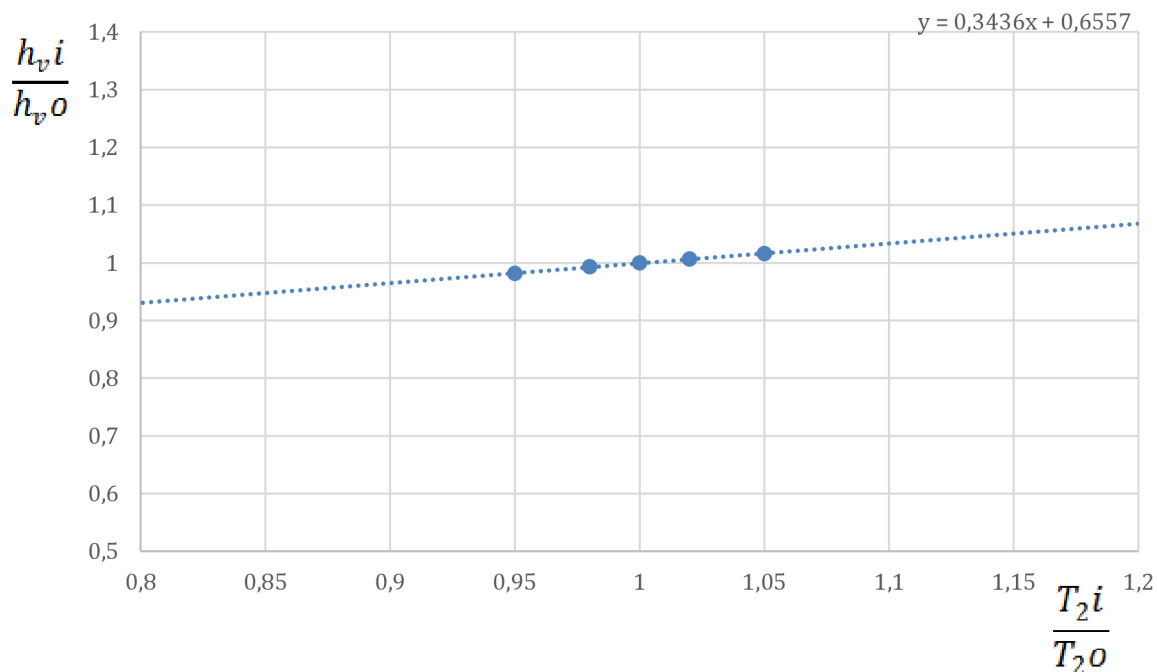
5.2.6 PŘÍPAD 12

$T_1 = 3,06959$ s, 4 pružiny v činnosti; $T_2 = 10,37575$ s, 2 pružiny v činnosti

Tabulka 20 Hodnoty výšky těžiště v závislosti na periodě kmitu T_2

Perioda kmitu T_{2i} [s]	$\frac{T_{2i}}{T_{2o}}$	Vypočítaná výšková poloha těžiště h_{vi} [mm]	$\frac{h_{vi}}{h_{vo}}$
9,85696	0,95	588,6	0,981
10,16824	0,98	595,5	0,993
10,37575	1	599,8	1
10,58327	1,02	603,7	1,007
10,89454	1,05	609,2	1,016

Graf 12 Závislost poměrné výšky těžiště vozidla na poměrné periodě kmitu T_2 při konstantní T_1





5.3 CITLIVOST ZAŘÍZENÍ NA NESPRÁVNÉ ZMĚŘENÍ JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ ZAŘÍZENÍ

5.3.1 CITLIVOST ZAŘÍZENÍ NA NESPRÁVNÉ ZMĚŘENÍ TUHOSTI PRUŽIN C_p

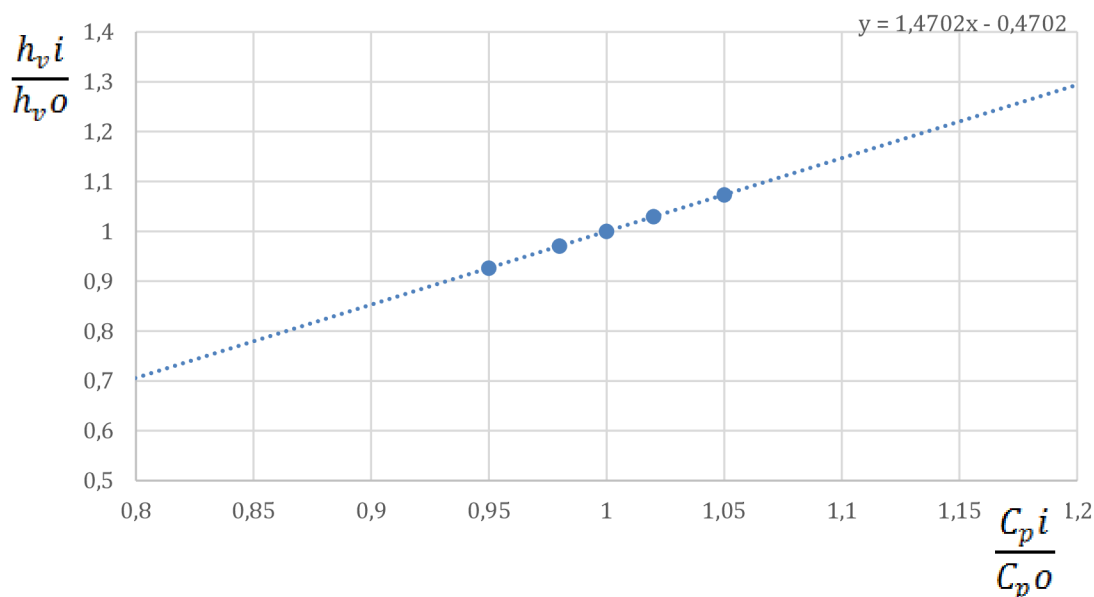
Dle katalogu výrobce Hennlich s.r.o. mají zvolené pružiny tuhost $C_{p0} = 26\,950\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$.

Tabulka 21 Hodnoty výšky těžiště v závislosti na tuhosti pružin C_p

Tuhost pružin C_{pi} [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$]	$\frac{C_{pi}}{C_{p0}}$	Vypočítaná výšková poloha těžiště h_{vi} [mm]	$\frac{h_{vi}}{h_{v0}}$
25602,5	0,95	555,9	0,9265
26411	0,98	582,3	0,9706
26950	1	600	1
27489	1,02	617,7	1,0294
28297,5	1,05	644,1	1,0735

V grafu 13 je vidět přímá úměra mezi poměrnou tuhostí pružin a z ní vypočítaná poměrná výšková poloha těžiště.

Graf 13 Závislost poměrné výšky těžiště vozidla na poměrné tuhosti pružin C_p





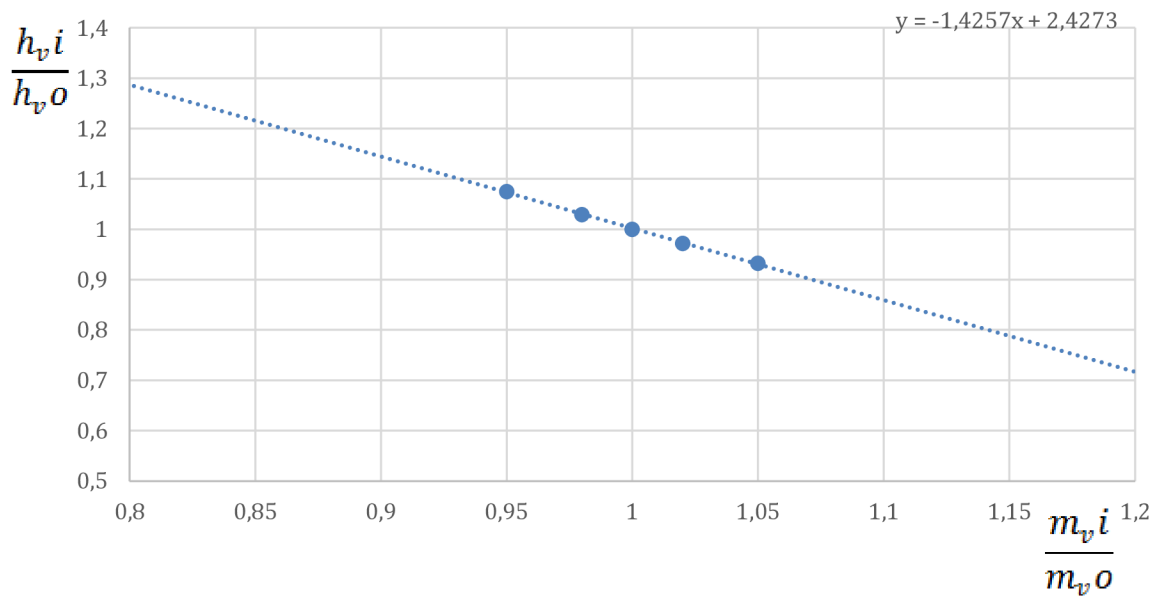
5.3.2 CITLIVOST ZAŘÍZENÍ NA NESPRÁVNÉ ZMĚŘENÍ HMOTNOSTI VOZIDLA m_v

Tabulka 22 Hodnoty výšky těžiště v závislosti na hmotnosti vozidla m_v

Hmotnost vozidla m_{vi} [kg]	$\frac{m_{vi}}{m_{vo}}$	Vypočítaná výšková poloha těžiště h_{vi} [mm]	$\frac{h_{vi}}{h_{vo}}$
1710	0,95	644,9	1,0749
1764	0,98	617,4	1,029
1800	1	600	1
1836	1,02	583,3	0,9721
1890	1,05	559,3	0,9323

Oproti předchozímu případu, kde se měnila tuhost pružin, je vidět z grafu 14 nepřímá úměrnost poměrné výšky těžiště vozidla na poměrné hmotnosti vozidla.

Graf 14 Závislost poměrné výšky těžiště vozidla na poměrné hmotnosti vozidla m_v





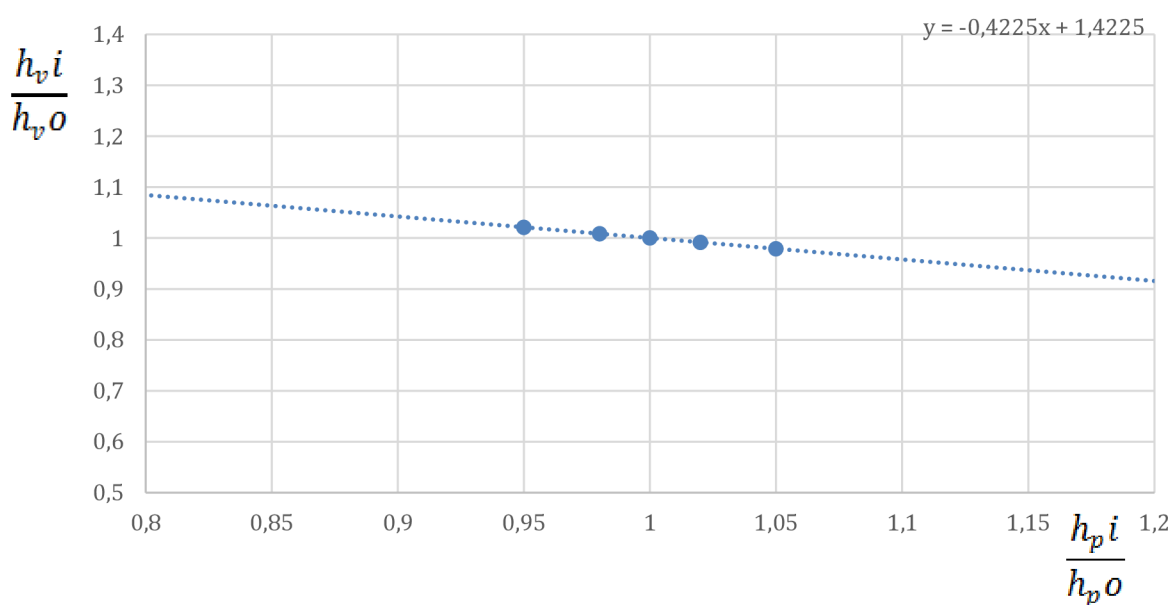
5.3.3 CITLIVOST ZAŘÍZENÍ NA NESPRÁVNÉ ZMĚŘENÍ VZDÁLENOSTI OD OSY ROTACE K PLOŠE NÁJEZDŮ PRO VOZIDLO - H_p

Z výkresové dokumentace vyplývá, že vzdálenost od osy rotace k horní ploše nájezdů h_p je 253,5 mm.

Tabulka 23 Hodnoty výšky těžiště v závislosti na vzdálenosti osy rotace od plochy nájezdů h_p

Vzdálenost od osy rotace k ploše nájezdů vozidla h_{pi} [mm]	$\frac{h_{pi}}{h_{po}}$	Vypočítaná výšková poloha těžiště h_{vi} [mm]	$\frac{h_{vi}}{h_{vo}}$
240,825	0,95	612,7	1,0211
248,43	0,98	605,1	1,0085
253,5	1	600	1
258,57	1,02	594,9	0,9916
266,175	1,05	587,3	0,9789

Graf 15 Závislost poměrné výšky těžiště vozidla na poměrné vzdálenosti h_p





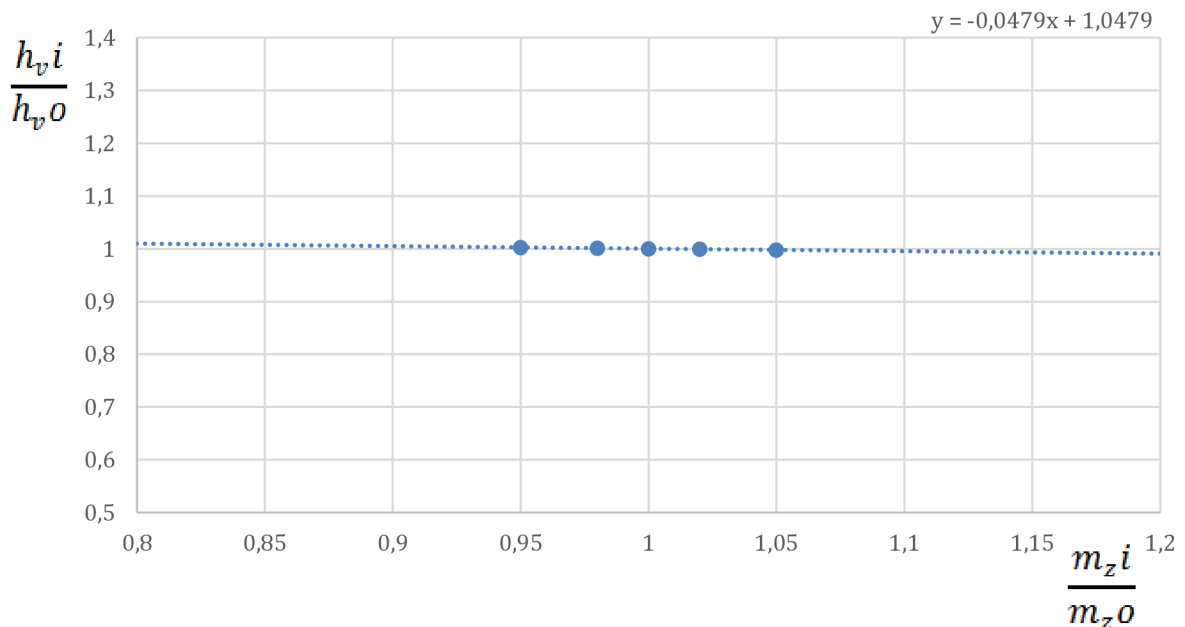
5.3.4 CITLIVOST ZAŘÍZENÍ NA NESPRÁVNÉ ZMĚŘENÍ HMOTNOSTI AKTIVNÍCH ČÁSTÍ ZAŘÍZENÍ m_z

V programu SolidWorks se odečetla hmotnost aktivních částí zařízení m_z , která činí 306,32 kg.

Tabulka 24 Hodnoty výšky těžiště v závislosti na hmotnosti aktivních částí zařízení m_z

Hmotnost aktivních částí zařízení m_{zi} [kg]	$\frac{m_z i}{m_z o}$	Vypočítaná výšková poloha těžiště h_{vi} [mm]	$\frac{h_v i}{h_v o}$
291	0,95	601,4	1,0024
300,19	0,98	600,6	1,001
306,32	1	600	1
312,45	1,02	599,4	0,999
321,64	1,05	598,6	0,9976

Graf 16 Závislost poměrné výšky těžiště vozidla na poměrné hmotnosti m_z





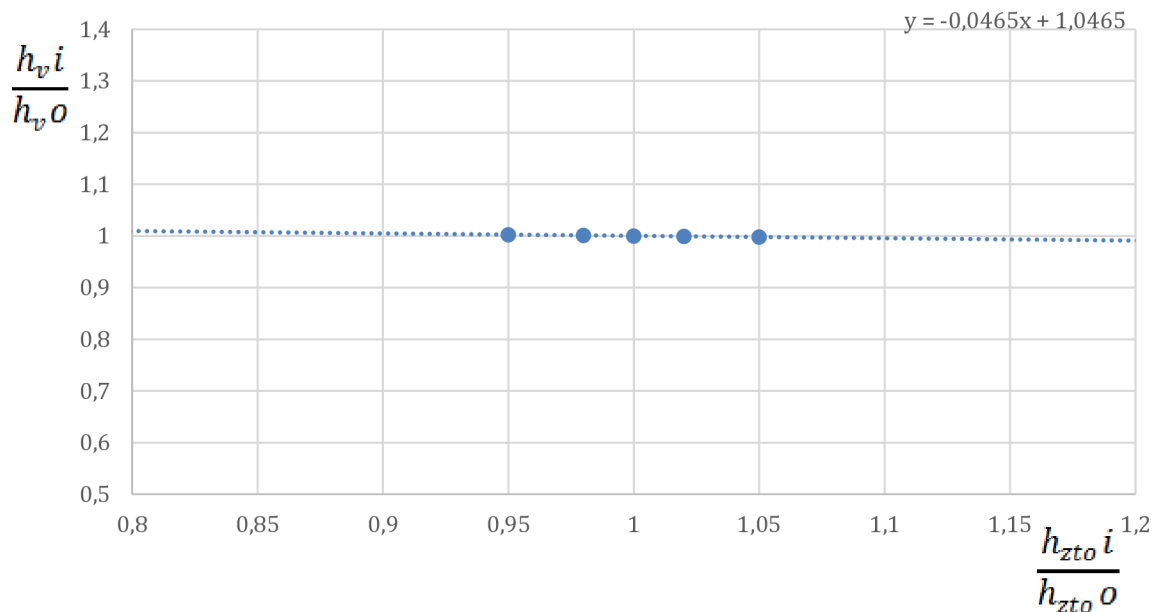
5.3.5 CITLIVOST ZAŘÍZENÍ NA NESPRÁVNÉ ZMĚŘENÍ VZDÁLENOSTI OD OSY ROTACE K TĚŽIŠTI AKTIVNÍCH ČÁSTÍ ZAŘÍZENÍ h_{zto}

V programu SolidWorks se odečetla vzdálenost od osy rotace k těžišti aktivních částí zařízení h_{zto} . Tato vzdálenost je 164,48 mm.

Tabulka 25 Hodnoty výšky těžiště v závislosti na hodnotě h_{zto}

Vzdálenost osy rotace k těžišti aktivních částí zařízení h_{zto} [mm]	$\frac{h_{zto i}}{h_{zto o}}$	Vypočítaná výšková poloha těžiště h_{vi} [mm]	$\frac{h_{vi}}{h_{vo}}$
156,26	0,95	601,4	1,0024
161,19	0,98	600,6	1,001
164,48	1	600	1
167,77	1,02	599,4	0,999
172,7	1,05	598,6	0,9976

Graf 17 Závislost poměrné výšky těžiště vozidla na poměrné vzdálenosti h_{zto}





5.4 ZHODNOCENÍ CITLIVOSTI ZAŘÍZENÍ NA JEDNOTLIVÉ VSTUPNÍ PARAMETRY

V případě 1 a 7 radikálně ovlivňuje nesprávné změření periody kmitu výškovou polohu těžiště. Dokonce až tak, že když se změří daná perioda kmitu nesprávně o $\pm 5\%$, dojde se k výsledkům, které jsou celými násobky (jak kladnými, tak zápornými) původní výšky těžiště. Proto tyto výsledky nebudou srovnávány s ostatními případy, které mohou nastat. Pro výpočet výšky těžiště vozidla je třeba se vyhnout měřením, kdy perioda kmitu T_1 bude určena na základě 14 aktivních pružin a perioda kmitu T_2 bude určena na základě 12 aktivních pružin (malá hodnota ΔT) a to i u vozidel dosahujících maximální nosnosti tohoto zařízení (2500 kg). Je to z důvodu velmi malých period kmitů T_1 a T_2 , které by bylo nutno změřit na jednu tisícinu přesně. Při chybě o 1 ‰ obou period u vozidla 3 se zjistilo, že tato chyba ovlivnila výškovou polohu těžiště o 98 mm (dosazeno do vztahu 62, hodnoty z tabulky 7).

V grafech 1 - 17 je možno si všimnout, jak je zařízení citlivé na jednotlivé vstupní parametry. V tabulkách 26, 27 a 28 jsou uvedeny absolutní hodnoty směrnic přímk, které charakterizují danou citlivost.

V grafech 18 - 20 je možno srovnat absolutní hodnoty směrnic přímk, které jsou vidět v grafech 1 - 17.

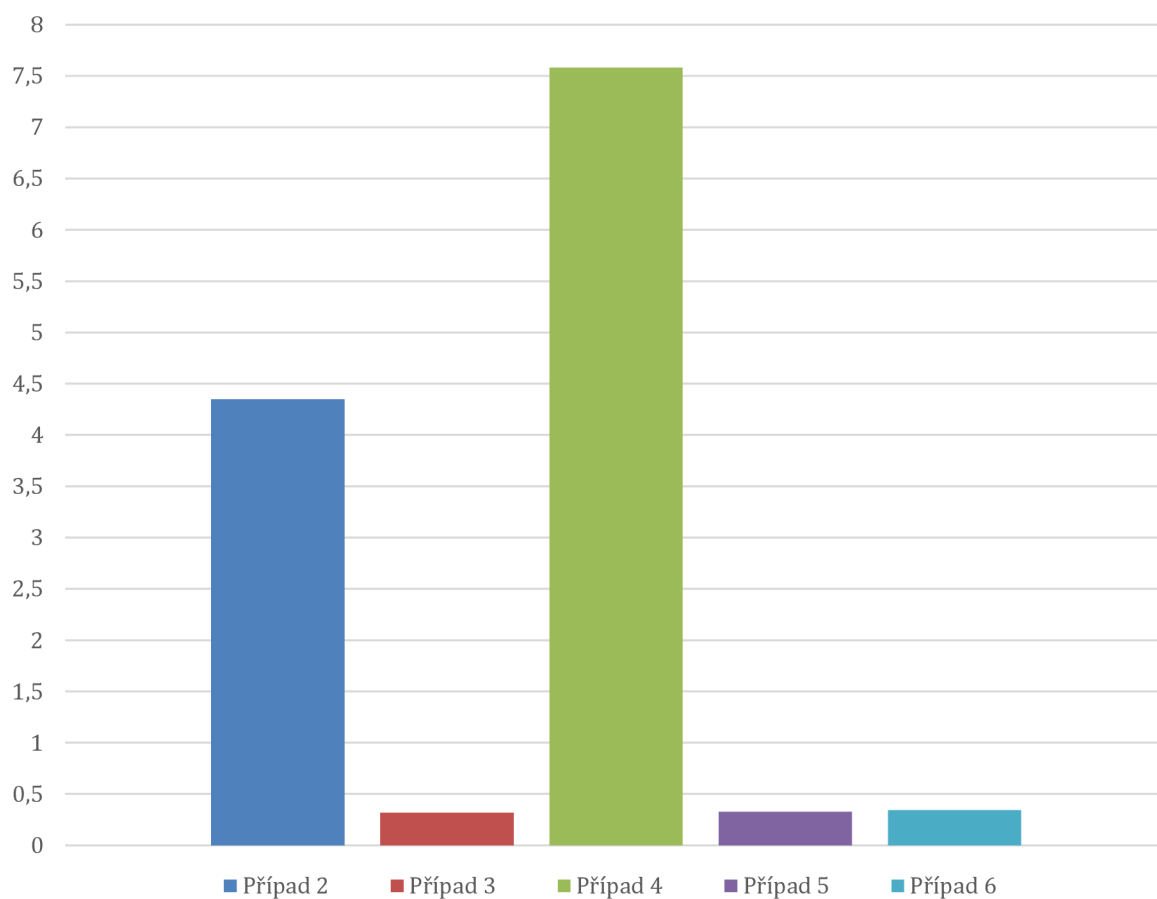


5.4.1 ZHODNOCENÍ CITLIVOSTI ZAŘÍZENÍ NA NESPRÁVNĚ ZMĚŘENÝ PARAMETR PERIODY T₁

Tabulka 26 Porovnání absolutních hodnot směrnic přímek grafů z kapitoly 5.1

	Případ 2	Případ 3	Případ 4	Případ 5	Případ 6
Absolutní hodnota směrnic přímk	4,3489	0,3168	7,5835	0,3268	0,3419

Graf 18 Porovnání absolutních hodnot směrnic přímek grafů z kapitoly 5.1



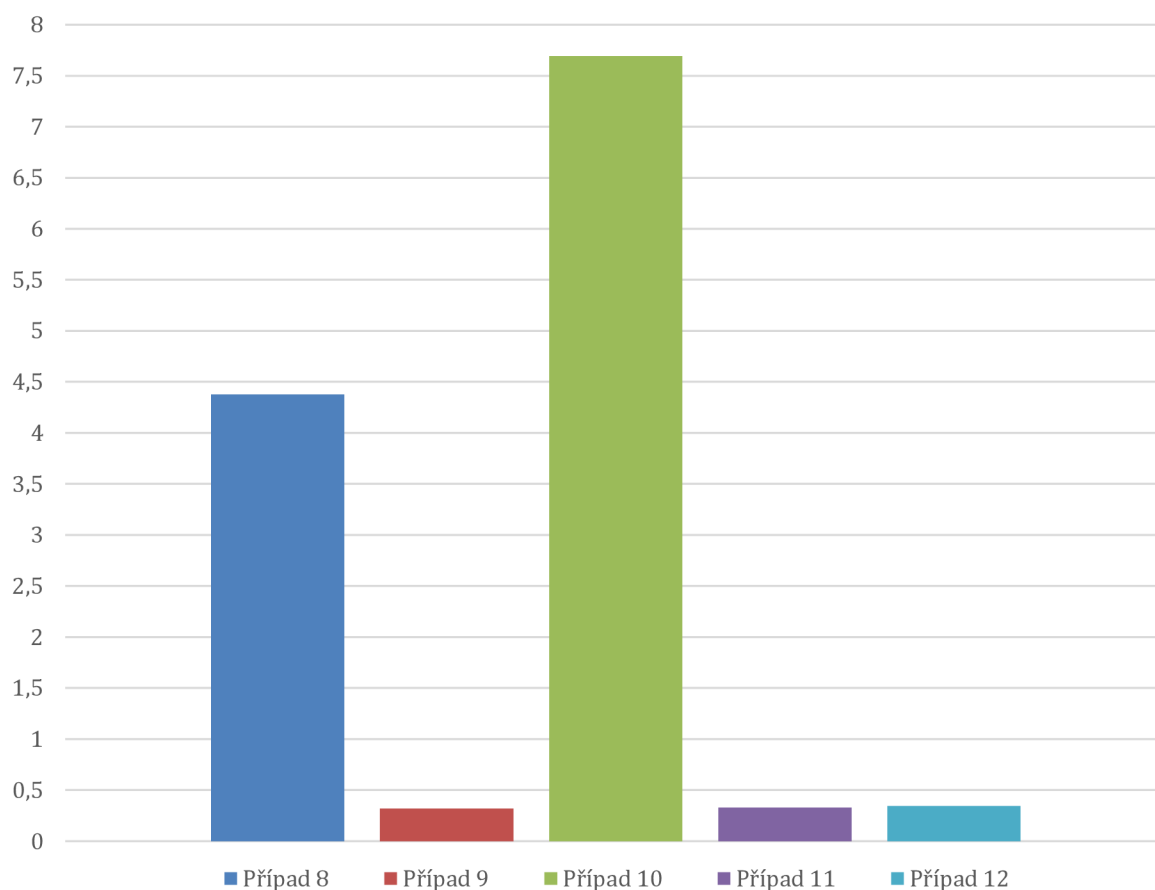


5.4.2 ZHODNOCENÍ CITLIVOSTI ZAŘÍZENÍ NA NESPRÁVNĚ ZMĚŘENÝ PARAMETR PERIODY T_2

Tabulka 27 Porovnání absolutních hodnot směrnic přímk grafů z kapitoly 5.2

	Případ 8	Případ 9	Případ 10	Případ 11	Případ 12
Absolutní hodnota směrnic přímk	4,377	0,3183	7,6942	0,3284	0,3436

Graf 19 Porovnání absolutních hodnot směrnic přímk grafů z kapitoly 5.2



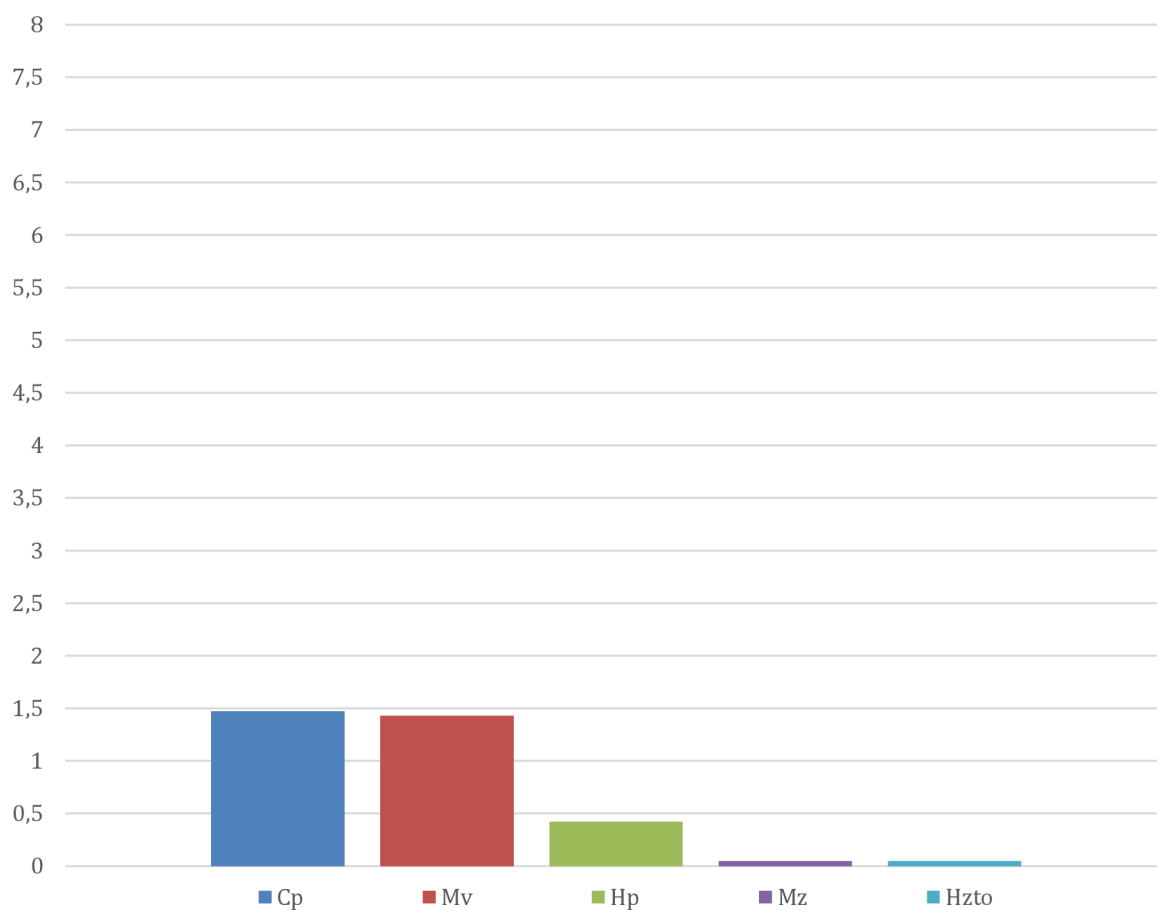


5.4.3 ZHODNOCENÍ CITLIVOSTI ZAŘÍZENÍ NA NESPRÁVNÉ ZMĚŘENÍ JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ ZAŘÍZENÍ

Tabulka 28 Porovnání absolutních hodnot směrnic přímků z kapitoly 5.3

	$C_{p(i)}$	$m_{v(i)}$	$h_{p(i)}$	$m_{z(i)}$	$h_{zto(i)}$
Absolutní hodnota směrnic přímků	1,4702	1,4275	0,4225	0,0479	0,0465

Graf 20 Porovnání absolutních hodnot směrnic přímků z kapitoly 5.3





5.5 CELKOVÉ ZHODNOCENÍ CITLIVOSTI ZAŘÍZENÍ NA VSTUPNÍ PARAMETRY

V grafech 18 – 20 a tabulkách 26 – 28, jsou uvedeny vstupní parametry, které ovlivňují výslednou hodnotu výškové polohy těžiště. V případě samotného zařízení ovlivňuje nejvíce výškovou polohu těžiště hmotnost vozidla a tuhost pružin. Pružiny by se proto měly kontrolovat, zda se nezměnila jejich tuhost a charakteristika. Hmotnost vozidla se musí změřit při každém novém měření. Ostatní parametry, jako je vzdálenost od osy rotace k nájezdové ploše, hmotnost aktivních částí zařízení a vzdálenost od osy rotace k těžišti aktivních částí zařízení, neovlivňují konečnou polohu těžiště tak výrazně. Navíc tyto parametry se mohou dokázat určit velmi přesně a do vztahů budou vstupovat nezměněny a při dalších měřeních se s nimi bude pracovat pouze jako s konstantami.

Při řešení výpočtu výškové polohy těžiště se musí brát v úvahu to, že se žádný měřený parametr nedokáže změřit úplně přesně. Proto se zde provede výpočet, který bude zahrnovat chyby v měření. Tyto chyby se dosadí do vztahu 62 tak, aby nám vyšly dva extrémy.

Z grafů v kapitole 5 je vidět, že vstupní parametr T_1 a hmotnost vozidla m_v jsou charakterizovány nepřímou úměrností a parametr T_2 spolu s tuhostí pružin jsou charakterizovány přímou úměrností, proto se musí zvolit správně příslušné hodnoty vstupní chyby.

Pro periody kmitu byla zvolena nepřesnost měření 0,01 s (14 aktivních pružin v případě T_1 a 2 aktivní pružiny v případě T_2), pro tuhost pružin 2% a pro hmotnost vozidla ± 4 kg (vozidlo se bude vážit na 4 vahách a každá může mít nepřesnost 1 kg).

Tabulka 29 Předpokládané nepřesnosti při měření a jejich referenční hodnoty

T_1 [s]	T_2 [s]	m_v [kg]	C_p [$N \cdot m^{-1}$]
1,30151 \pm 0,01	10,37575 \pm 0,01	1800 \pm 4	26950 \pm 539

V tabulce 30 je možno vidět, jak se změnila výsledná výška těžiště při dosazení vstupních chyb z tabulky 29 do vztahu 62.

Tabulka 30 Závislost poměrné výšky těžiště vozidla při extrémech

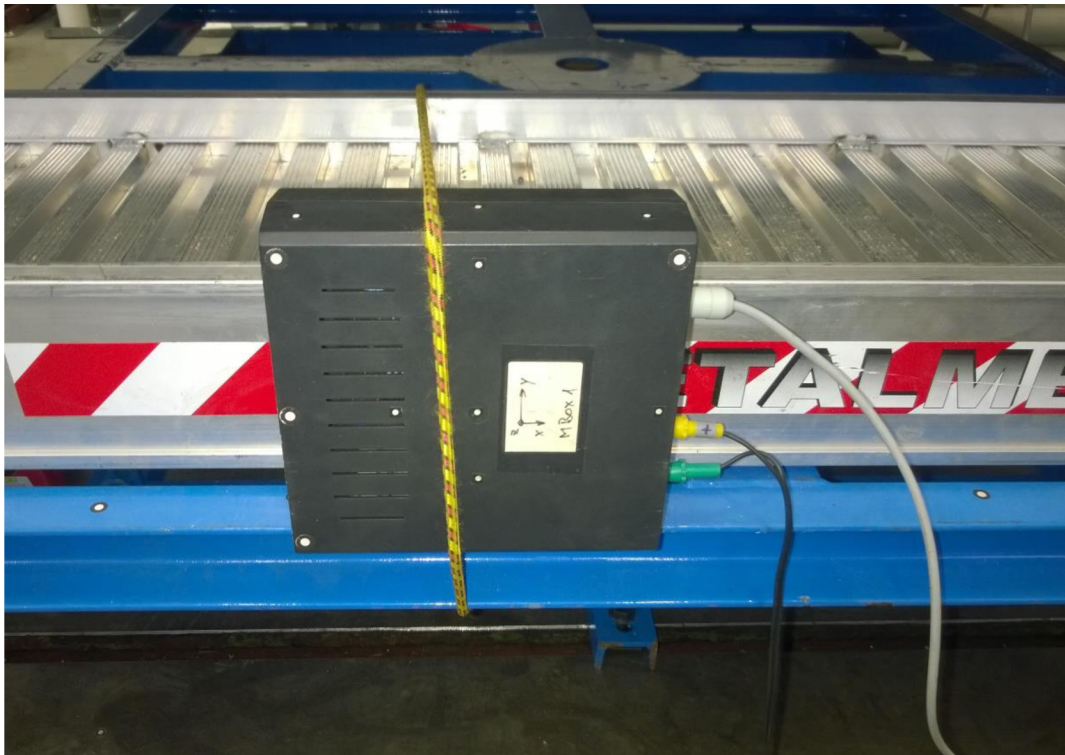
	Vypočítaná výšková poloha těžiště h_{vi} [mm]	$\frac{h_{vi}}{h_{v0}}$
98% $C_p \wedge$ 99% $T_2 \wedge$ 101% $T_2 \wedge$ +4kg m_v	579	0,9654
99% $T_1 \wedge$ 101% $T_2 \wedge$ 102% $C_p \wedge$ -4 kg m_v	620,6	1,0347



6 NÁVRH MĚŘÍCIHO ŘETĚZCE

Při návrhu měřícího řetězce se vycházelo z potřeby splnění požadavků pro toto zařízení. Měřící člen by měl být takový, aby se zaručila opakovatelnost a spolehlivost měření. Snímače by měly být cenově dostupné a snadno kalibrovatelné.

Pro měření periody kmitu bude použito zařízení MBox. Toto zařízení bylo vyvinuto na Ústavu konstruování VUT FSI v Brně. Zařízení se skládá ze tří kapacitních snímačů zrychlení a tří snímačů úhlové rychlosti. V MBoxu je možno nalézt jednoosé snímače zrychlení ADXL105 od firmy Analog Devices a snímače úhlové rychlosti Gyrostar ENV - 05D od firmy Murata.



Obrázek 32 Měřící zařízení Mbox

Kapacitní snímače fungují na principu změny kapacity kondenzátoru. Toho je dosaženo buď:

- proměnlivou tloušťkou nebo plochou dielektrika
- změnou plochy elektrod
- změnou vzdálenosti elektrod

[8, 9]



Snímač ADXL105 pracuje s čidlem jako diferenciální kondenzátor, který se skládá ze střední pohyblivé elektrody tvořené pružným nosníkem a dvěma pevnými elektrodami. Tento snímač je přesný akcelerometr s rozsahem ± 5 g. Snímač má nízký šum a při snížení šířky pásma lze dosáhnout rozlišení 2 mg.

Tabulka 31 Parametry snímače ADXL105

Rozsah (dle nastavení)	± 1 g (± 5 g)
Analogový výstup	od 250 mV/g po 1,5 V/g
Odolnost proti zrychlení	1000 g
Napájení	2,7 – 5 V

Snímač úhlové rychlosti Gyrostar ENV - 05D využívá Coriolisovy síly. Tato síla vzniká, jestliže na vibrující objekt působí úhlová rychlost kolmo na směr kmitání. Tento snímač má měřicí rozsah $\pm 80^\circ/\text{s}$.

Pro vyhodnocení periody kmitu bude použit program pana Ing. Petra Hejtmánka, Ph.D., který tuto aplikaci vytvořil v programu LabVIEW, který měří průběh úhlové rychlosti a pomocí nelineární regrese se zjistí perioda kmitu.

[8, 9]



7 MĚŘENÍ NA ÚADI

V rámci této diplomové práce bylo provedeno měření v laboratoři ÚADI. Cílem tohoto měření bylo potvrdit správnost výpočtu výškové polohy těžiště, který se provedl v kapitole 4. Pro toto měření se použil vůz Škoda Yeti. Bylo použito zařízení, které je popsáno v kapitole 2.2.2 a byla provedena 4 měření.

Pro výpočet výšky těžiště se použije vztah 62 z kapitoly 5 – změna tuhosti C_t .

Na zařízení byly použity čtyři pružiny s tuhostí $17\,770\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ a dvě pružiny s tuhostí $22\,000\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$. Hmotnost vozidla je 1293 kg .



Obrázek 33 Měření hmotnosti vozidla na čtyřech vahách

Další členy rovnice 60, se odečetly z CAD modelu. Vzdálenost $h_p = 273,5\text{ mm}$, vzdálenost $h_{zto} = 181\text{ mm}$ a hmotnost aktivních částí zařízení je 308 kg .



7.1 MĚŘENÍ VÝŠKY TĚŽIŠTĚ PŘES PITCH MOTION

Vozidlem bylo najeto na zařízení, kde se ustavilo do rovnovážné polohy. Následně byla změřena perioda kmitu vozidla při použití čtyř vinutých pružin o tuhosti $17\,770\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$. Následně byla změněna tuhost tak, že se vložila na protilehlých stranách další pružina o tuhosti $22\,000\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$. Z důvodu zpřesnění měření se perioda kmitu v každém stavu změnila desetkrát. Pro změření periody kmitu byl použit Mbox (kapitola 6) a vyhodnocovací program, který určil periodu kmitu. Aritmetické průměry periody kmitu byly dosazeny do vztahu 62. V tabulce 31 je možno vidět tyto průměrné hodnoty se směrodatnými odchylkami.



Obrázek 34 Měření výškové polohy těžiště pomocí pitch motion

Tabulka 32 Výsledky měření pomocí pitch motion

	T_1	T_2
Periody kmitu [s]	$2,47368 \pm 0,0044$	$3,87967 \pm 0,0096$
Výška těžiště [mm]	714 ± 11	



7.2 MĚŘENÍ VÝŠKY TĚŽIŠTĚ PŘES ROLL MOTION

Konstrukce zařízení umožňuje vozidlo otočit, aniž by bylo nutno s vozidlem manipulovat (obrázek 21 a 30). Měření probíhalo stejně, jak se popisuje v kapitole 7.1. V tabulce 32 jsou uvedeny průměrné hodnoty měření a jejich směrodatné odchylky.



Obrázek 35 Měření výškové polohy těžiště pomocí roll motion

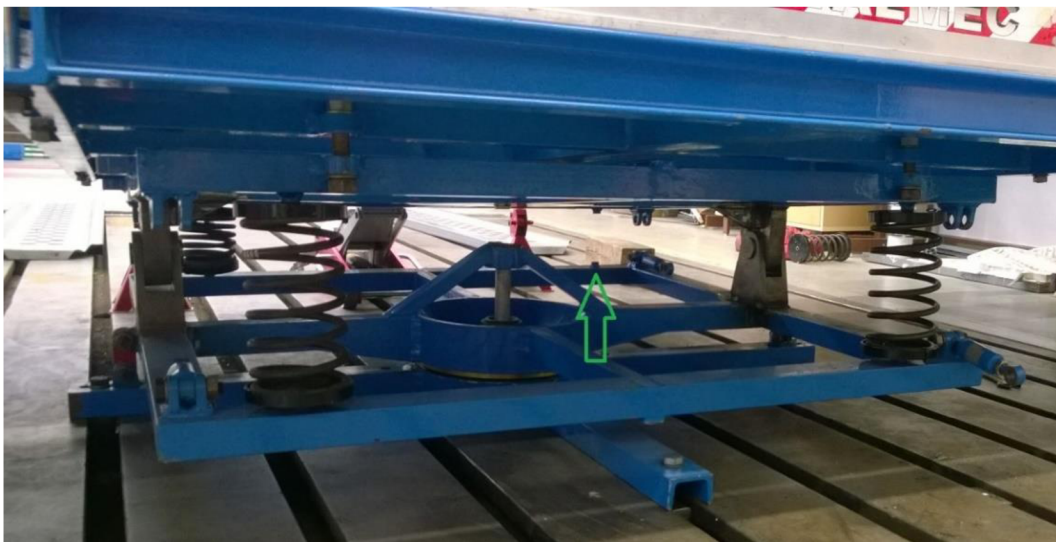
Tabulka 33 Výsledky měření pomocí roll motion

	T ₁	T ₂
Periody kmitu [s]	1,85208 ± 0,004	2,75896 ± 0,0056
Výška těžiště [mm]	564,2 ± 14	



7.3 ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ NA ÚADI

V tabulkách 32 a 33 vidíme vypočítanou hodnotu výšky těžiště pro daný pohyb. Výsledná hodnota výškové polohy těžiště pro pitch motion je $714 \text{ mm} \pm 11 \text{ mm}$ a pro roll motion je $564,2 \text{ mm} \pm 14 \text{ mm}$. Rozdíl těchto hodnot je $149,8 \text{ mm} \pm 25 \text{ mm}$. Protože se použila starší verze zařízení pro měření momentů setrvačnosti kolem tří navzájem kolmých os, nelze zkontrolovat správnost výsledků, tak jak se postupovalo v kapitole 5.1 a 5.2, kde by se mohla změřit perioda kmitu pro daný počet aktivních pružin. V tomto případě však bylo k dispozici pouze 6 pružin a muselo se k určení výšky těžiště postupovat přes 4 a 6 ks aktivních pružin. Když byla měřena perioda kmitu pouze se dvěma aktivními pružinami (obrázek 36), vozidlo přepadlo na jednu stranu a perioda kmitu nemohla být změřena. Pružiny v tomto případě neměly potřebnou tuhost.



Obrázek 36 Demontáž dvou pružin

V případě, že by zařízení bylo již modifikované, dokázalo by se pomocí více měření lépe stanovit výšku těžiště vozidla. Bohužel výšku těžiště nelze zjistit přesnějším způsobem. Dle katalogu výrobce je hmotnost vozidla 1420 kg vč. řidiče (75 kg). Vozidlo by tedy mělo vážit 1345 kg . Jenže na obrázku 33 lze vidět naměřenou hmotnost, která činila 1293 kg . Po kontaktování výrobce se zjistilo, že sériový vůz Škoda Yeti má výškovou polohu těžiště 593 mm až 614 mm v závislosti na konfiguraci vozidla.

Jak již je zmíněno v kapitole 7.1 s vozidlem se najelo do rovnovážné polohy v případě pitch motion. Vozidlo se tedy ustavilo tak, aby mělo podélnou složku těžiště nad osou rotace. S vozidlem se snažilo najet tak, aby bylo souměrně umístěno na nájezdech pro pozdější měření roll motion. Bohužel vozidlo nebylo na nájezdech pro případ roll motion souměrně postavené a po otočení podlaží 4, vozidlo na zařízení nepatrně přepadlo na jednu stranu. Při měření nebyla úplně prázdná/plná nádrž s palivem a dále vozidlu nebyly zabezpečeny tlumiče proti propružení. Toto nám také ovlivnilo měření.



Problém u tohoto měření spočívá v tom, že se nedokázalo zjistit, která hodnota se blíží skutečnosti více, protože byla provedena pouze 4 měření. Proto byly vypočteny pouze dva výsledky. Kdyby bylo provedeno ještě jedno měření, s jiným počtem pružin, získaly by se další čtyři výsledky. Z šesti výsledků by se tedy dokázala lépe určit výšková poloha těžiště u tohoto vozidla.

7.4 DOPORUČENÍ PRO MĚŘENÍ

Po upravení zařízení do podoby popsané v kapitole 3 se musí zařízení nejprve otestovat, zda jsou předpoklady z kapitoly 4 správné. Pro zjištění správné funkčnosti tohoto zařízení, je potřeba změřit výšku těžiště předmětu, u kterého se bude přesně znát výšková poloha těžiště. Mohou se použít např. sudy s pískem, ocelové kostky apod.

V kapitole 4 se uvádí, že perioda kmitu by neměla přesáhnout hodnotu tří vteřin. Tato skutečnost stojí za ověření, protože čím je hodnota ΔT (tedy $T_2 - T_1$) vyšší, tím je zařízení méně citlivé na nesprávně změřené periody kmitu. Proto při následném výpočtu ze vztahu 62 je potřeba dbát na to, aby ΔT byla vyšší než 1 s - viz příloha A. V této příloze je vidět výpočet výšky těžiště z period odečtených z programu Adams/View v závislosti na počtu použitých pružin při výpočtu. Je zde také vidět, jak je zařízení citlivé právě na nepřesné změření periody kmitu. Dále je zde vidět, že čím je větší ΔT , tím přesnější je výpočet výškové polohy těžiště. Proto bych doporučil změřit výše zmíněné součásti se známým těžištěm, pro všechny případy, které jsou uvedeny v příloze A.

Pro přesné měření a následný výpočet výškové složky těžiště vozidel doporučuji zabezpečit propružení tlumičů na vozidle způsobem uvedeným na obrázku 4. Tímto jednoduchým omezovačem zdvihu se dokáže jednoduše zabezpečit propružení, aniž by se musel tlumič nahrazovat stejně těžkou tyčí. Výsledek také ovlivňují veškeré provozní kapaliny, které se v průběhu měření přelévají v nádobách umístěných ve vozidle. Proto bych doporučil pro budoucí měření je doplnit do maximálních hodnot předepsaných výrobcem. Dále doporučuji měřit vozidlo s plnou nádrží. Toto nám zamezí přelévání paliva v nádrži, které pak také ovlivňuje výsledek měření.



ZÁVĚR

Účelem této diplomové práce bylo ověřit, zda navržené modifikace na původním zařízení, umožní vypočítat výšku těžiště vozidla pro více typů vozidel. Pro výpočet této výškové polohy těžiště se vycházelo z principu fyzikálního kyvadla podepřeného pružinou.

Byl vytvořen konstrukční návrh, který vycházel ze stávajícího zařízení. Tento návrh, který souvisí s určením výškové polohy těžiště, spočívá v umístění dalších deseti vinutých pružin a nahrazení stávajících pružin novými, protože původní svými rozměry nevyhovovaly modifikovanému zařízení. Aby se ověřila správnost předpokladů, se kterými se muselo při návrhu modifikací počítat, byly vybrány tři typy vozidel, na kterých se tato správnost simulovala.

V multibody systému Adams/View se vytvořil model celého zařízení a byly provedeny dynamické simulace. Souběžně s těmito simulacemi byl vytvořen vztah, který popisuje funkčnost tohoto zařízení. V programu MathCAD se následně porovnávala data, která byla zjištěna z programu Adams/View. Protože se porovnávané periody kmitu shodovaly, mohlo se přistoupit k citlivostní analýze tohoto zařízení.

Největší pozornost byla věnována citlivosti zařízení na nesprávné změření vstupujících parametrů. Bylo zjištěno, že nejdůležitější parametr pro následný výpočet výškové složky těžiště je perioda kmitu. Z této analýzy vyplynulo, že jestliže se nevhodně zvolila ΔT (nízká), výšková poloha těžiště vozidla byla ovlivněna o více než 50 %. Toto ale nastane pouze v případech, kdy obsluha nebude dodržovat předepsaná doporučení. V případech kdy se vhodně zvolila ΔT (vyšší než 1 sekunda), výsledné výšky těžiště vyšly korektně.

Na závěr se provedlo měření v laboratořích ÚADI a vozidle Škoda Yeti. Výsledné měření koresponduje s předpoklady, které byly stanoveny z citlivostní analýzy a z chyb provedených u měření (nesprávné ustavení vozidla, přelévání provozních kapalin apod.). Dále jsou zde uvedena doporučení, která by mohla tato měření více zpřesnit. U tohoto měření nebyly použity modifikace, které se v této práci objevují. Pokud by byly použity, dalo by se provést více měření a lépe by se tak určila výšková poloha těžiště zkoušeného vozidla.

Po provedení všech modifikací, které jsou uvedeny v této práci, je nutné provést odzkoušení tohoto zařízení na objektech, u kterých bude známá výška těžiště. Toto měření by se mělo odehrát pro více váhových skupin. Z poznatků, které jsou uvedeny v této práci a z měření provedených na novém zařízení, by se poté mělo určit, jaké kombinace pružin při měření je vhodné použít pro daný typ vozidla. Po určení těchto kombinací se tak na půdě ÚADI dokáže jednoduše a přesně určit výšková poloha těžiště vozidla.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky. 1. české vyd., 2. dotisk. Překlad Jan Obdržálek, Bohumila Lencová, Petr Dub. V Brně: Prometheus, 2006, ISBN 80-214-1868-0.
- [2] VLK, František. Zkoušení a diagnostika motorových vozidel. 1. vyd. Brno: Vlk, 2001, 576 s. ISBN 80-238-6573-0,
- [3] GILLESPIE, T. D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1992. ISBN 1-56091-199-9.
- [4] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G UDYNAS. Konstruování strojních součástí. 1. vyd. Editor Martin Hartl, Miloš Vlk. Brno: VUTIUM, 2010, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [5] REIMPELL, Jornsens. The Automotive Chassis. 2nd edition. Oxford: Butterworth – Heinemann, 2001. 444 s. ISBN 0 7506 5054 0.
- [6] MORELLO, L., ROSTI ROSSINI, L., PIA, G., TONOLI, A. The Automotive Body. Springer Verlag, 2011. ISBN 978-94-007-0512-8.
- [7] TOMAN, J. Zařízení pro měření výškové polohy těžiště vozidla. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 84 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Blatňák, Ph.D.
- [8] ZEHNULA, Karel. Čidla robotů. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990, 370 s. Automatizace a regulace. ISBN 80-030-0563-9.
- [9] DOČKAL, A., HÉDL, M., MAZÚREK, I., SINGULE, V.: Měřicí box pro diagnostiku dynamických parametrů vozidel při jízdě. In Inženýrská mechanika 2002, národní konference s mezinárodní účastí. Brno: UMT FSI VUT, 2002. s. 41-42. ISBN 80-214-2109-6.
- [10] Auto.cz: Proč nová auta nemají najetou nulu aneb Co se děje, než k vám přijede. [online]. [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/proc-nova-auta-nemaji-najetou-nulu-aneb-co-se-deje-nez-k-vam-prijede-85741>
- [11] HAKEWILL, James. Measuring center-of-gravity height on a Formula Car. [online]. 2007 [cit. 2015-03-11]. Dostupné z: <http://www.jameshakewill.com/cg-height.pdf>
- [12] NASA: Aircraft rotations body axes. [online]. [cit. 2015-02-14]. Dostupné z: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/rotations.html>



- [13] Schiller GmbH: Vehicle Inertia Measuring Machine. [online]. [cit. 2015-02-07]. Dostupné z: <http://cfm-schiller.de/pdf/CFM%20Schiller%20VIMM%20-%20Vehicle%20Inertia%20Measuring%20Machine%20en.pdf>
- [14] NSTITUT FÜR KRAFTFAHRZEUGE RWTHAACHEN UNIVERSITY: Testing Facilities. [online]. [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: <http://www.ika.rwth-aachen.de/en/research/equipment/testing-facilities/205-chassis/315-vimm-en.html>
- [15] Vehicle Dynamics: Scientific expert analysis. [online]. [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: <http://www.sealimited.com/vehicle-dynamics.html>
- [16] Safety Test System SEA: Vehicle Inertia Measurement Facility (VIMF). [online]. [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: http://sesystem.co.kr/english/pro_02_03_01.html
- [17] U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION: ROLLOVER STABILITY MEASUREMENT FOR NEW CAR ASSESSMENT PROGRAM. [online]. [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: http://www.safercar.gov/staticfiles/safercar/NCAP/SSF_Test_Procedure-March2013.pdf
- [18] VUT FSI ÚADI - Jz metr 1.0: měření momentu setrvačnosti kolem svislé osy. [online]. [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: <http://www.iae.fme.vutbr.cz/vyzkum-dynamika-vozidel-jz-metr-10>
- [19] Police ČR: Informace o nehodovosti na pozemních komunikacích České republiky za rok 2014. [online]. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.policie.cz/soubor/2014-12-informace-pdf.aspx>

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

a	[m]	Vzdálenost těžiště vozidla k ose O
C	[N*m ⁻¹]	Tuhost pružin
C_{cpz}	[kg*m ⁻¹]	Tuhost vinutých pružin pro osu Z
C_t	[N*m*rad ⁻¹]	Celková tuhost torzní tyče
C_t	[N*m]	Celková tuhost
C_{vp}	[N*m ⁻¹]	Tuhost vinutých pružin pro osu X a Y
d	[m]	Příčná vzdálenost těžiště vozidla od spojnice středů kol
F_1	[N]	Síla pod pravou stranou vozidla
F_p	[N]	Síla pod předními koly vozidla
G_{13}	[N]	Tíha podlaží 3
G_{14}	[N]	Tíha podlaží 4
G_N	[N]	Tíha nájezdů
G_p	[N]	Tíha plošiny
G_v	[N]	Tíha vozidla
G_z	[N]	Tíha závaží
G_z	[N]	Tíha aktivních částí zařízení
H	[m]	Výška těžiště vozidla
H_0	[m]	Výšková vzdálenost od středů kol k těžišti vozidla
h_A	[m]	Výšková vzdálenost od středů kol k bodu zavěšení
h_{13toy}	[m]	Vzdálenost těžiště podlaží 3 k ose rotace pro osu Y
h_{14toy}	[m]	Vzdálenost těžiště podlaží 4 k ose rotace pro osu Y
h_{Noty}	[m]	Vzdálenost těžiště nájezdů k ose rotace pro osu Y
h_p	[m]	Vzdálenost od osy rotace k ploše nájezdů
h_T	[m]	Výšková vzdálenost od bodu zavěšení k těžišti vozidla
h_v	[m]	Výška těžiště vozidla
h_{v+p}	[m]	Vzdálenost od kyvné plošiny k společnému těžišti vozidla s plošinou
h_{vtoy}	[m]	Vzdálenost těžiště vozidla k ose rotace pro osu Y
I_1	[kg*m ²]	Moment setrvačnosti pro stav 1
I_2	[kg*m ²]	Moment setrvačnosti pro stav 2
I_{cx}	[kg*m ²]	Celkový moment setrvačnosti pro osu X
I_{cy}	[kg*m ²]	Celkový moment setrvačnosti pro osu Y
I_{cz}	[kg*m ²]	Celkový moment setrvačnosti pro osu Z
I_{12oz}	[kg*m ²]	Moment setrvačnosti podlaží 2 pro osu Z
I_{13oz}	[kg*m ²]	Moment setrvačnosti podlaží 3 pro osu Z
I_{14oz}	[kg*m ²]	Moment setrvačnosti podlaží 4 pro osu Z
I_{noz}	[kg*m ²]	Moment setrvačnosti nájezdů pro osu Z



I_p	[kg*m ²]	Moment setrvačnosti plošiny
I_r	[kg*m ²]	Moment setrvačnosti kyvného rámu
I_v	[kg*m ²]	Moment setrvačnosti vozidla
I_{v+p}	[kg*m ²]	Moment setrvačnosti vozidla a plošiny
I_{v+r}	[kg*m ²]	Moment setrvačnosti vozidla a kyvného rámu
I_{v0}	[kg*m ²]	Moment setrvačnosti vozidla k ose O
I_{vx}	[kg*m ²]	Moment setrvačnosti vozidla pro osu X
I_{vy}	[kg*m ²]	Moment setrvačnosti vozidla pro osu Y
I_{vz}	[kg*m ²]	Moment setrvačnosti vozidla pro osu Z
I_{zx}	[kg*m ²]	Moment setrvačnosti aktivních částí zařízení pro osu X
I_{zy}	[kg*m ²]	Moment setrvačnosti aktivních částí zařízení pro osu Y
I_{zz}	[kg*m ²]	Moment setrvačnosti aktivních částí zařízení pro osu Z
L	[m]	Rozvor kol vozidla
l	[m]	Vzdálenost od osy rotace ke středu vinutých pružin
l	[m]	Vzdálenost vinutých pružin od osy rotace
L_1	[m]	Vzdálenost mezi přední a zadní nápravou při naklápění na nápravu
L_2	[m]	Vzdálenost mezi zadní nápravou a kolmicí směřující z těžiště k podložce
L_3	[m]	Vzdálenost mezi těžištěm a kolmicí směřující z těžiště k podložce
l_A	[m]	Vzdálenost pružin A od středu rotace
l_B	[m]	Vzdálenost pružin B od středu rotace
l_C	[m]	Vzdálenost pružin C od středu rotace
l_D	[m]	Vzdálenost pružin D od středu rotace
L_p	[m]	Vzdálenost těžiště od předních kol
L_z	[m]	Vzdálenost těžiště od zadních kol
m_1	[kg]	Hmotnost pod pravou stranou vozidla
m_{1p}	[kg]	Hmotnost pod pravým předním kolem
m_{1z}	[kg]	Hmotnost pod pravým zadním kolem
m_p	[kg]	Hmotnost pod přední nápravou
m_{p1}	[kg]	Hmotnost pod přední nápravou při naklápění na nápravu
m_v	[kg]	Hmotnost vozidla
m_z	[kg]	Hmotnost závaží
t_1	[m]	Vzdálenost těžiště od pravého kola
T_1	[s]	Perioda kmitu pro stav 1
t_2	[m]	Vzdálenost těžiště od levého kola
T_2	[s]	Perioda kmitu pro stav 2
t_p	[m]	Rozchod kol vozidla
t_p	[m]	Rozhod přední nápravy
T_p	[s]	Perioda kmitu plošiny



T_r	[s]	Perioda kmitu kyvného rámu
T_{v+p}	[s]	Perioda kmitu vozidla s kyvnou plošinou
T_{v+r}	[s]	Perioda kmitu vozidla a kyvného rámu
T_x	[s]	Perioda kmitu pro osu X
T_y	[s]	Perioda kmitu pro osu Z
t_z	[m]	Rozhod zadní nápravy
T_z	[s]	Perioda kmitu pro osu Z
x_1	[-]	Počet aktivních pružin pro stav 1
x_2	[-]	Počet aktivních pružin pro stav 2
X_p	[-]	Počet aktivních pružin
θ	[°]	Úhel naklopení vozidla



SEZNAM PŘÍLOH

- 1 Příloha A



PŘÍLOHY

Příloha A

Porovnání výšky těžiště při zapojení pružin (hodnoty periody kmitu jsou použity z programu Adams/View), všechny hodnoty uvedeny v tabulkách jsou v mm:

Tabulka 34 Vozidlo 1 - Tx

	F, G, H	E, G, H	G, H	E, H	H	E
E, F, G, H	992,46	189,86	582,02	566,47	550,8	548,62
F, G, H	-	-453,23	465,26	508,61	523,36	540,71
E, G, H	-	-	970,84	704,95	605,4	563,31
G, H	-	-	-	548,22	539,59	545,75
E, H	-	-	-	-	535,78	545,56
H	-	-	-	-	-	547,69

Tabulka 35 Vozidlo 1 - Ty

	F, G, H	E, G, H	G, H	E, H	H	E
E, F, G, H	1131,16	274,45	550,89	601,79	563,43	553,64
F, G, H	-	-417,47	381,88	529,33	527,81	543,25
E, G, H	-	-	832,57	722,48	607,4	565,12
G, H	-	-	-	660,06	567,87	553,87
E, H	-	-	-	-	526,52	545,36
H	-	-	-	-	-	549,46



Tabulka 36 Vozidlo 2 - Tx

	F, G, H	E, G, H	G, H	E, H	H	E
E, F, G, H	748,5	586,6	524,01	553,47	591,32	600,01
F, G, H	-	471,4	462,89	529,76	583,96	599,53
E, G, H	-	-	457,58	541,78	591,89	600,1
G, H	-	-	-	583,71	609,09	601,17
E, H	-	-	-	-	617,87	601,44
H	-	-	-	-	-	600,69

Tabulka 37 Vozidlo 2 - Ty

	F, G, H	E, G, H	G, H	E, H	H	E
E, F, G, H	520,05	585,26	638,43	550,91	590,34	599,51
F, G, H	-	628,18	667,43	554,48	593,47	599,75
E, G, H	-	-	690,7	538,78	599,95	599,62
G, H	-	-	-	453,54	577	598,89
E, H	-	-	-	-	617,98	601
H	-	-	-	-	-	600,23



Tabulka 38 Vozidlo 3 - Tx

	F, G, H	E, G, H	G, H	E, H	H	E
E, F, G, H	180,39	780,07	647,67	678,45	699,6	-
F, G, H	-	1087,06	746,46	723,55	714,9	-
E, G, H	-	-	506,87	645,43	692,18	-
G, H	-	-	-	706,38	709,78	-
E, H	-	-	-	-	710,7	-
H	-	-	-	-	-	-

Tabulka 39 Vozidlo 3 - Ty

	F, G, H	E, G, H	G, H	E, H	H	E
E, F, G, H	832,56	632,26	675,5	690,7	704,01	-
F, G, H	-	487,96	635,53	675,47	699,56	-
E, G, H	-	-	716,17	708,3	710,24	-
G, H	-	-	-	704,6	709,63	-
E, H	-	-	-	-	711,02	-
H	-	-	-	-	-	-