



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

# NÁVRH PŘÍPRAVKU PRO ZKOUŠENÍ TUHOSTI ZAVĚŠENÍ KOL FORMULE STUDENT

TOOL DESIGN FOR FORMULA STUDENT SUSPENSION STIFFNESS MEASUREMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

JAN POLÁŠEK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

ING. PAVEL RAMÍK

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Děkanát

Akademický rok: 2012/13

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Jan Polášek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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 bakalářské práce:

### **Návrh přípravku pro zkoušení tuhosti zavěšení kol Formule Student**

v anglickém jazyce:

### **Tool Design for Formula Student Suspension Stiffness Measurement**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Proveďte konstrukční návrh přípravku pro zkoušení tuhosti zavěšení kol studentské formule.

Cíle bakalářské práce:

1. Proveďte rešerši současného stavu konstrukčního provedení zavěšení kol vozidel Formule Student.
2. Proveďte návrh dostupného měření tuhosti zavěšení kol a potřebného přípravku. Navrhněte vhodné příslušenství pro měření.
3. Navrhněte vhodný přípravek pro měření tuhosti a vytvořte 3D model k jeho výrobě.
4. Zhodnoťte navrženou konstrukci a vyslovte se k možnostem jejího použití.

Seznam odborné literatury:

- [1] Formula Student web page [online], 2012, poslední revize 22. 10. 2012. Dostupné z:  
<<http://www.formulastudent.com/>>
- [2] JANÍČEK, P., ONDRÁČEK, E., VRBKA, J. Pružnost a pevnost I, VUT v Brně 1992
- [3] Formula SAE web page [online], 2012, poslední revize 19. 10. 2012. Dostupné z:  
<<http://students.sae.org/competitions/formulaseries>>

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Ramík

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 21.11.2012



Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan



## **ABSTRAKT**

Tato práce se zabývá návrhem dostupného zařízení pro zkoušení tuhosti zavěšení primárně určeného pro vozidlo Formule Student. Předpokládá se však i využití pro osobní vozidla. Práce také obsahuje popis problematiky zkoušení tuhosti zavěšení a popisuje vybraná zařízení používaná pro tyto zkoušky.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

tuhost zavěšení, elastokinematika, zavěšení kol, návrh přípravku, formule student

## **ABSTRACT**

The goal of this work is to design available facility for testing of suspension stiffness primarily intended for Formula Student vehicle. Moreover, it is expected to be used for passenger vehicles as well. This work also contains description of issues of suspension stiffness testing and describes some of the facilities currently used for this kind of tests.

## **KEYWORDS**

suspension stiffness, kinematics and compliance, suspension, design tool, formula student



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

POLÁŠEK, J. *Návrh přípravku pro zkoušení tuhosti zavěšení kol Formule Student*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 47 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Ramík.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 24. května 2013

.....

Jan Polášek



## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych rád poděkoval panu Ing. Pavlu Ramíkovi za vedení bakalářské práce a konzultace, panu Ing. Petru Portešovi za věcné připomínky a náměty a v neposlední řadě mým rodičům za podporu po celou dobu studia.



## OBSAH

Úvod .....	10
1 Definice základních pojmů .....	11
1.1 Formule SAE/Student .....	11
1.2 Zavěšení kol .....	12
1.3 Tuhost .....	13
2 Zavěšení kol vozidel Formule SAE/Student .....	14
3 Zkoušení tuhosti zavěšení kol .....	16
3.1 Metodika zkoušení .....	16
3.2 Simulované jízdní stavy .....	16
3.3 Výsledky zkoušek tuhosti zavěšení .....	18
3.4 používaná zařízení .....	19
3.4.1 SPMM 4000 from Anthony Best Dynamics .....	19
3.4.2 MTS K&C System .....	21
3.4.3 Měření elastokinematiky na ČVUT.....	23
4 Návrh .....	25
4.1 Návrh přípravků .....	25
4.1.1 Varianta č. 1 .....	25
4.1.2 Varianta č. 2.....	26
4.1.3 Varianta č. 3.....	27
4.2 Návrh zatěžování .....	28
4.2.1 Mechanické.....	28
4.2.2 Elektromechanické .....	28
4.2.3 Hydraulické .....	29
4.3 Návrh měření zatížení .....	30
4.4 Návrh měření polohy .....	31
4.4.1 Kontaktní .....	31
4.4.2 Bezkontaktní.....	31
4.5 Zpracování dat .....	33
5 Konstrukční řešení .....	34
5.1 Pracovní stůl .....	34
5.1.1 Točna pracovního stolu .....	35
5.1.2 Stůl Y.....	35
5.1.3 Pojezd stolu Y.....	36
5.1.4 Stůl X.....	37
5.1.5 Pojezd stolu X.....	38





---

5.2	Pohon .....	39
5.2.1	Rám pohonu.....	40
5.2.2	Šroubový mechanismus .....	40
5.2.3	Klika pohonu .....	41
	Závěr.....	42
	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	46
	Seznam příloh.....	47



## ÚVOD

Zavěšení kol je prvek spojující kolo s karoserií vozidla a přenášející mezi nimi silová působení. Pod vlivem tohoto zatížení dochází k jeho deformaci, což má za následek změnu konečného postavení kola vůči vozovce. Geometrie podvozku významným způsobem ovlivňuje jízdní stabilitu, komfort a ovladatelnost vozidla.

Zkoušení tuhosti má tedy velký význam pro vývoj vozidel, protože umožňuje nalézt slabá místa v konstrukci a porozumět změnám parametrů podvozku, k nimž dochází za provozu.

Cílem této práce je navrhnout dostupné zařízení pro zkoušení tuhosti zavěšení kol pro účely Formule Student. Do budoucna se předpokládá i využití pro osobní automobily.



# 1 DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ

## 1.1 FORMULE SAE/STUDENT

Od roku 1981 se v USA pořádá motoristická soutěž univerzitních týmů Formula SAE. V roce 1998 vznikla Evropská obdoba této soutěže - Formula Student. V současné době se soutěže Formula SAE/Student konají také v Austrálii, Brazílii, Itálii, Německu a Japonsku a účastní se jich týmy z celého světa.

Úkolem každého týmu je navrhnout a vyrobit jednosedadlový závodní automobil formulového typu v souladu s platnými závaznými pravidly pro příslušný ročník soutěže. *„Dle pravidel by měl být potenciálním zákazníkem víkendový neprofesionální závodník autokrosu nebo sprintu. Předpokládá se vývoj a výroba 1000 takovýchto vozů ročně.“* [13] S takto postaveným vozem se tým účastní závodů. Konečné umístění je dáno počtem získaných bodů za jednotlivé závodní disciplíny.

Závodní disciplíny: [13]

- Static Events (Statické disciplíny)
  - Design (150 bodů)
  - Price (Cena - 100 bodů)
  - Presentation (Prezentace - 75 bodů)
- Dynamic Events (Dynamické disciplíny)
  - Skid-Pad („Osmička“ - 50 bodů)
  - 1 km Sprint (150 bodů)
  - 75 m Acceleration (Zrychlení - 75 bodů)
  - 22 km Endurance & Fuel Economy (Výdrž a spotřeba - 300 + 100 bodů)

Celkem je možno získat 1000 bodů.

Pro vstup do dynamických disciplín je nutné úspěšné absolvování následujících bezpečnostních testů:

- Technical & Safety Scrutineering (Technika a bezpečnost)
- Tilt Test (Náklonová zkouška)
- Brake & Noise Test (Zkouška brzd a hluku)



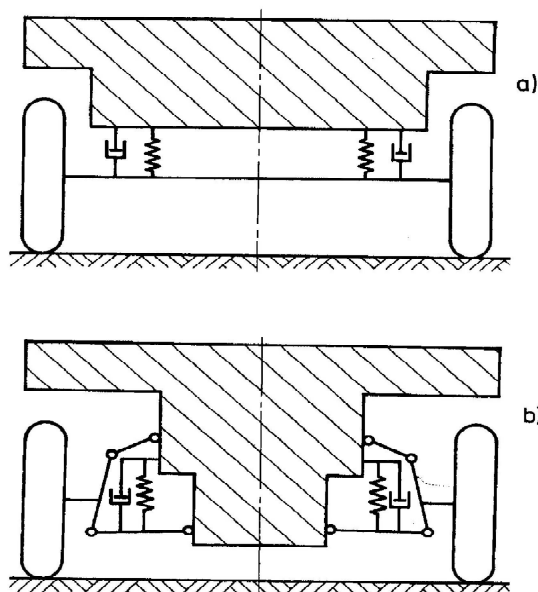
Obrázek 1: Formule Dragon 2 týmu TU Brno Racing. [21]



## 1.2 ZAVĚŠENÍ KOL

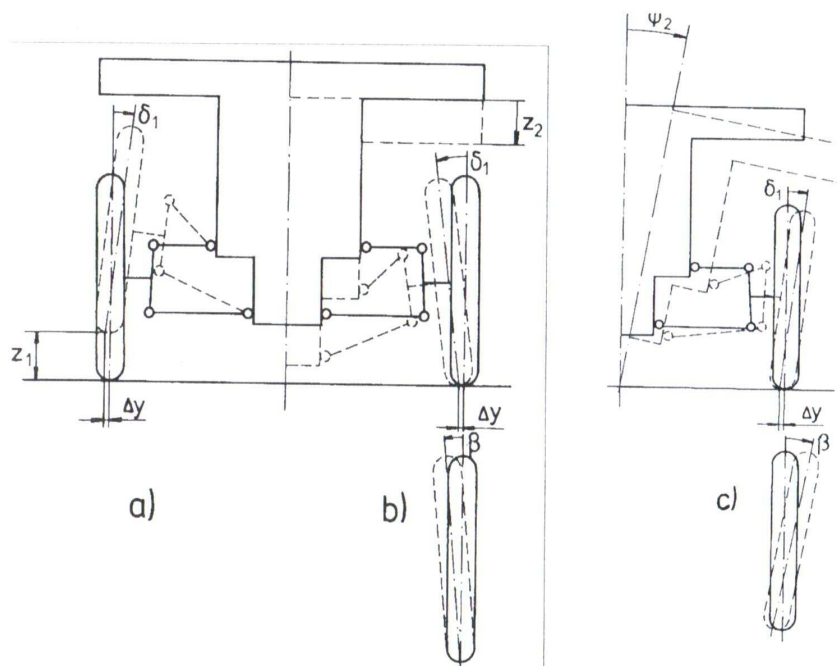
„Pod pojmem „zavěšení kol“ rozumíme způsob připojení kol k rámu nebo karoserii vozidla.“ [2] Z hlediska konstrukce se rozlišují dva základní druhy zavěšení, a to zavěšení **závislé** a **nezávislé** (viz Obrázek 2). Rozdíl mezi nimi spočívá v tom, že v případě závislého zavěšení pohyb kola na levé straně nápravy přímo ovlivňuje pohyb kola na straně pravé, neboť jsou navzájem spojena. V případě nezávislého zavěšení jsou, jak již z názvu vyplývá, kola na levé a pravé straně na sobě nezávislá. Každé kolo je ke karoserii (rámu) připojeno samostatně a ovlivnit se mohou jen nepřímo prostřednictvím karoserie (rámu) vozidla. K představitelům jednotlivých druhů zavěšení patří následující typy konstrukcí:

- **závislé zavěšení**
  - tuhá náprava
- **nezávislé zavěšení**
  - lichoběžníková náprava
  - náprava McPherson
  - kyvadlová úhlová náprava
  - kliková náprava
  - víceprvková náprava



Obrázek 2: Porovnání tuhé nápravy (a) a nezávislého zavěšení (b). [2]

Z funkčního hlediska zavěšení přesně určuje vzájemnou polohu kola a karoserie (rámu), přenáší mezi nimi silové působení a umožňuje propružení (tj. svislý pohyb) kola vůči karoserii. Teoreticky má kolo neřízené nápravy dva stupně volnosti, a to zmiňovaný svislý pohyb a rotaci kolem vlastní osy. Pro kolo řízené nápravy je třeba přičíst ještě rotaci kolem svislé osy. V tomto případě tedy tři stupně volnosti. Ve skutečnosti se však při propružení kola vůči karoserii mění i jeho poloha v příčném směru, jeho odklon od karoserie a další parametry. Skutečná trajektorie kola je tedy prostorovou křivkou a jejím popisem se zabývá kinematika zavěšení. Kinematické změny při propružení lichoběžníkové nápravy jsou znázorněny na následujícím obrázku (Obrázek 3).



Obrázek 3: Kinematické změny vznikající při propružení lichoběžníkové nápravy: a) propružení kola, b) propružení karoserie, c) klopení karoserie a kola. [2]

Význam symbolů na obrázku:  $z_1$  - propružení kola vůči karoserii,  $z_2$  - propružení karoserie vůči kolu,  $\delta_1$  - odklon kola,  $\Delta y$  - boční posuv kola,  $\beta$  - samořízení.

### 1.3 TUHOST

Tuhost (nebo také pružnost či elasticita) je charakteristická vlastnost těles, která se pod zatížením deformují. Její význam lze názorně demonstrovat na příkladu vinuté tlačné pružiny. Tuhost pružiny  $k$  je definována vztahem

$$k = \frac{F}{\Delta l} \quad [N \cdot m^{-1}]$$

kde  $F$  [N] je síla působící na pružinu a  $\Delta l$  [m] je rozdíl délek pružiny před a po zatížení. Z tohoto vztahu je zřejmé, že tuhost pružiny bude tím větší, čím větší bude síla a/nebo čím menší bude deformace pružiny. Dokonale tuhé (ideální) těleso se pod libovolně velkým zatížením vůbec nedeformuje ( $\Delta l=0$ ) a jeho tuhost je tedy nekonečně velká. U reálných těles vyrobených z reálných materiálů toto ovšem neplatí a tuhost má vždy konečnou hodnotu.

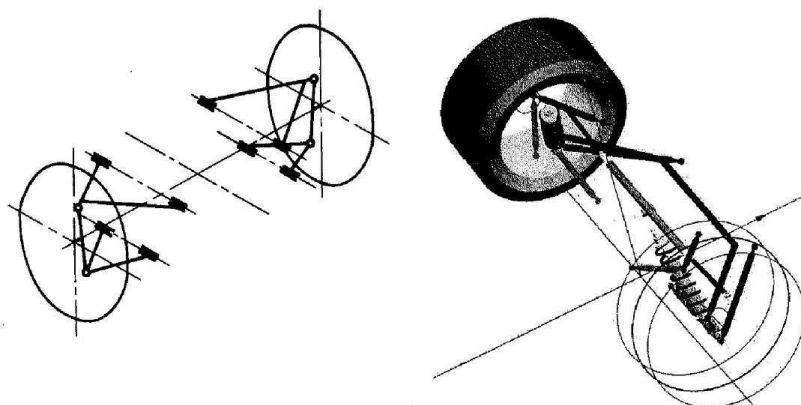
V praxi rozlišujeme tři druhy pružin, a to:

- lineární - tuhost je konstantní v celém průběhu zatěžování
- progresivní - tuhost se s rostoucím zatížením zvětšuje
- degresivní - tuhost se s rostoucím zatížením zmenšuje



## 2 ZAVĚŠENÍ KOL VOZIDEL FORMULE SAE/STUDENT

Pravidla Formule SAE [8] říkají, že vůz musí být vybaven plně funkčním systémem zavěšení, ale použití konkrétního typu zde není nijak nařízeno ani zakázáno. V praxi se využívá nezávislého zavěšení kol, konkrétně lichoběžníková náprava (viz Obrázek 4). Výhoda tohoto typu spočívá v tom, že při správné konstrukci dochází jen k malým změnám geometrie v závislosti na propružení kol (viz Obrázek 3).



Obrázek 4: Lichoběžníková náprava [2]

Konstrukčně je lichoběžníková náprava tvořena dvojicí příčných ramen většinou různé délky, kdy horní rameno bývá kratší. Tvar a provedení ramen může být různé. Nejčastější jsou trojúhelníková ramena a také případ, kdy je rameno tvořeno samostatnými tyčemi připojenými k těhlici. Materiály používané pro ramena jsou ocel, slitiny hliníku a kompozity.

Na následujících obrázcích jsou příklady zavěšení kol používaných na vozech Formule SAE/Student.



Obrázek 5: Ramena tvořená tyčemi z kompozitního materiálu [20]



Obrázek 6: Svařovaná trojúhelníková ramena z oceli [20]



*Obrázek 7: Zvláštní případ svařovaných trojúhelníkových ramen [20]*



*Obrázek 8: Trojúhelníková ramena z kompozitních materiálů [20]*



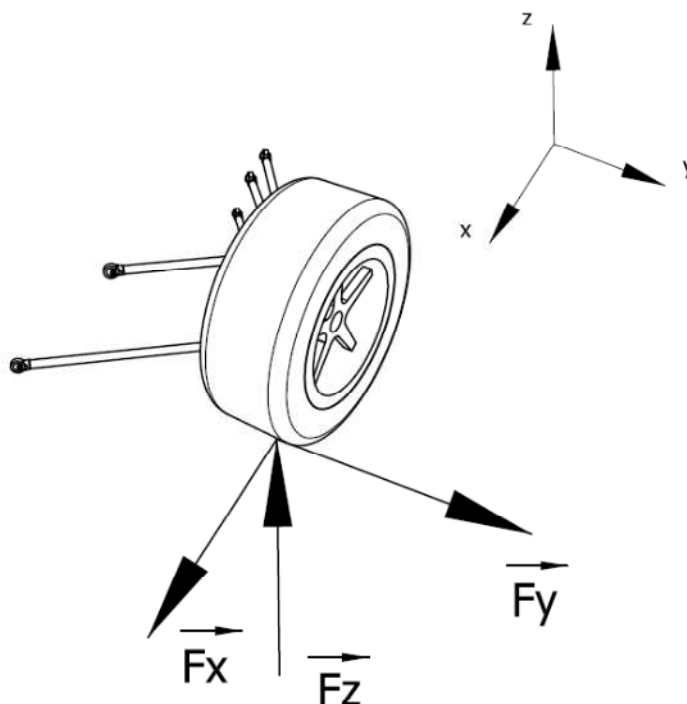
### 3 ZKOUŠENÍ TUHOSTI ZAVĚŠENÍ KOL

Zkoušení tuhosti zavěšení (také označované jako měření elastokinematiky) spadá do kategorie laboratorních zkoušek. Tuhost zavěšení můžeme chápat jako schopnost kola zachovat si svou pozici, působí-li na něj zatížení. Zavěšení kola se skládá z více komponent, a proto zde mluvíme o tuhosti soustavy těles, kde každá z těchto komponent má svůj podíl na výsledné hodnotě tuhosti. Významnou roli tedy hrají i prvky řízení, pohonu, odpružení a tlumení, prvky mechanické stabilizace podvozku a také způsob uložení zavěšení v karoserii (rámu). V konstrukci moderních osobních vozidel je za účelem snížení přenosu vibrací používáno pružného uložení dílů zavěšení do tzv. silentbloků. Tuhost tohoto prvku má na změně polohy kola největší podíl.

#### 3.1 METODIKA ZKOUŠENÍ

Pro konstrukci automobilu a jeho částí je velmi důležitá schopnost predikce chování v podmínkách reálného provozu. Cílem a základním předpokladem pro získání relevantních výsledků je tedy co nejpřesnější simulace jízdních stavů a měření jim odpovídající polohy kol. Důležité je také simulovat reálný kontakt kola s vozovkou. Během zkoušky musí být pevně ukotvena buďto karoserie nebo kolo.

#### 3.2 SIMULOVANÉ JÍZDNÍ STAVY



Obrázek 9: Síly působící na kolo vozidla (na obrázku kolo na levé straně vozidla)



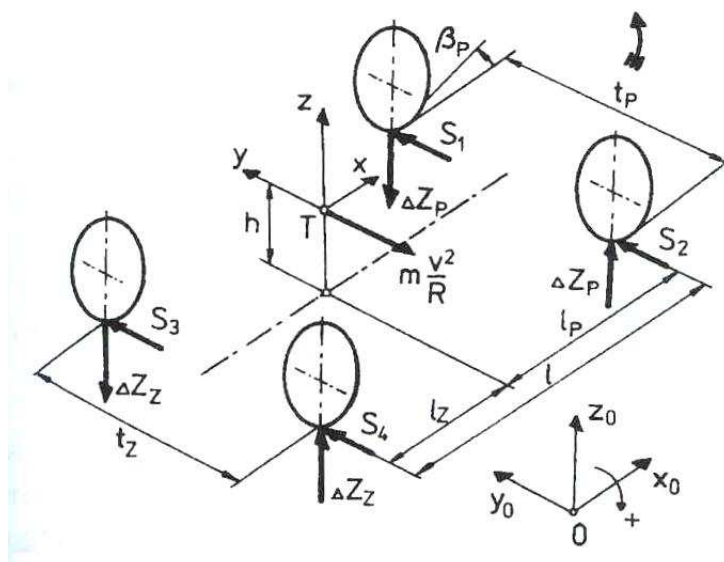


### Přímá jízda konstantní rychlostí

Při jízdě konstantní rychlostí v přímém směru působí na kolo pouze vertikální síla  $F_z$  coby reakce na zatížení kola. Rozložení hmotnosti (tíhy) vozidla na jednotlivá kola je stejné jako za klidu vozidla. Ostatní síly jsou nulové. Simulace tohoto jízdního stavu není složitá, je totiž stejný jako stání (klid) vozidla.

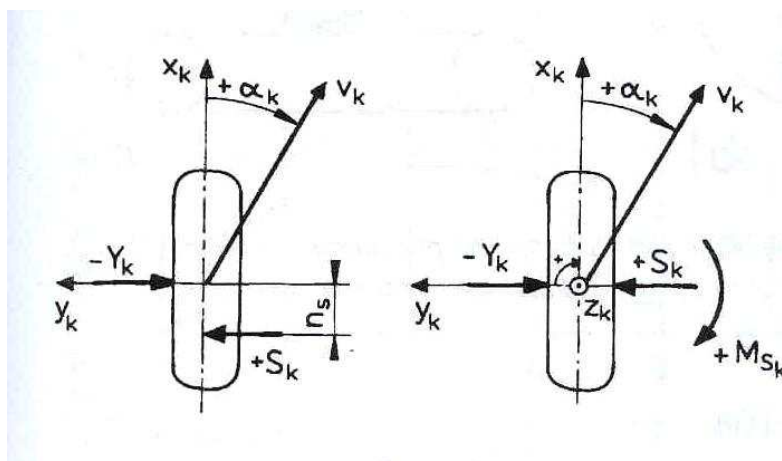
### Průjezd zatáčkou konstantní rychlostí

Při zatáčení působí na vozidlo dostředivé zrychlení. Reakcí na něj je odstředivá (setrvačná) síla, která působí na vozidlo v opačném směru. Má-li vozidlo skutečně zatočit, musí být tato reakce vyrovnána příčnými silami  $F_y$  (viz Obrázek 10, značeny  $S_1, S_2, S_3$  a  $S_4$ ). Současně dochází ke změně vertikálního zatížení jednotlivých kol, a sice zatížení kola na vnější straně vzroste o hodnotu  $\Delta Z_p$  pro kolo přední nápravy resp.  $\Delta Z_z$  pro kolo zadní nápravy. O stejnou hodnotu se naopak zmenší zatížení kola na vnitřní straně. Toto je doprovázeno nakloněním karoserie o úhel  $\psi$ .



Obrázek 10: Boční síly a změny radiálních reakcí vznikající účinkem odstředivé síly [3]

Při odvalování kola po vozovce dochází k posuvu působíště příčné síly  $F_y$  směrem od středu kontaktní plochy – tzv. závlek pneumatiky  $n_s$  (viz Obrázek 11). Síla na vzniklém rameni vytváří tzv. vratný moment pneumatiky  $M_{Sk}$  (viz Obrázek 11).



Obrázek 11: Vratný moment a závlek pneumatiky na valcím se kole se směrovou úchylkou. [3]

**Akcelerace v přímém směru**

Při akceleraci na kolo působí podélná síla  $F_x$  jako reakce na hnací moment přenášený kolem. Příčná síla  $F_y=0$ . I v tomto případě dochází k přerozdělení vertikálního zatížení kol – obdobně, jako tomu bylo u zatáčení. Zatížení zadních kol se zvětší a přední kola jsou o stejnou hodnotu odlehčena. Toto je doprovázeno zakláněním karoserie.

**Brzdění v přímém směru**

Brzdění je obdobou akcelerace. Podélná síla  $F_x$  působí tentokrát opačným směrem, zatížení se přesune na přední nápravu a celá akce je doplněna nořením karoserie.

A případné kombinace těchto jízdních stavů.

**3.3 VÝSLEDKY ZKOUŠEK TUHOSTI ZAVĚŠENÍ**

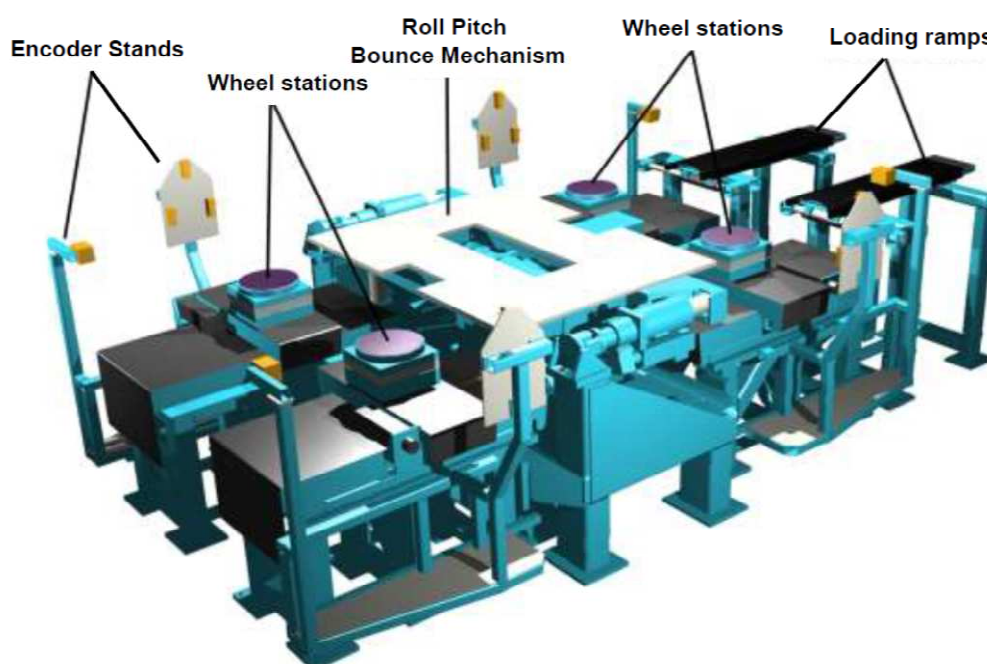
Výsledkem zkoušek tuhosti zavěšení je funkční závislost polohy kola na zatížení. Sleduje se především změna parametrů geometrie podvozku (odklon kola, sbíhavost atd.), jelikož správné nastavení geometrie má zásadní vliv na ovladatelnost vozidla, jízdní stabilitu, opotřebení pneumatik a také životnost komponent podvozku. Získané výsledky se používají pro optimalizaci konstrukce jednotlivých prvků, porovnání vlastností různých konstrukčních řešení, pro nastavení optimální geometrie kol a také pro ověření virtuálních modelů.



### 3.4 POUŽÍVANÁ ZAŘÍZENÍ

#### 3.4.1 SPMM 4000 FROM ANTHONY BEST DYNAMICS

SPMM neboli Suspension Parameter Measuring Machine (v překladu „stroj pro měření parametrů zavěšení“) od společnosti Anthony Best Dynamics (UK) je zařízení [5] určené pro kvazi-statické měření parametrů zavěšení kol. Umožňuje testování širokého spektra vozidel od monopostů F1 a závodních speciálů až po mikrobusy. Je dostupné v provedení se čtyřmi základnami kol (pro současné měření obou náprav), ale také v provedení se dvěma základnami (pro měření pouze jedné nápravy vozidla). Model tohoto zařízení s popisem základních částí je na obrázku níže (Obrázek 12).



Obrázek 12: SPMM 4000 - popis základních částí [5]

**Encoder Stands** – stojany potenciometrů – slouží k uchycení zařízení pro odměrování polohy kol. To se skládá z pěti digitálních lankových potenciometrů, jež jsou připojeny k vyvážené desce připevněné na kolo prostřednictvím matic kol (viz. Obrázek 13). Deska se pohybuje spolu s kolem, kromě rotace kolem jeho osy (uložena otočně).



Obrázek 13: Připojení lankových potenciometrů k vyvážené desce [23]

**Wheel stations** – základny kol – umožňují posuvy v podélném a příčném směru za účelem přizpůsobení pro různé hodnoty rozvoru náprav a rozchodu kol. Tyto pohyby rovněž slouží



pro simulaci zatížení při brzdění, akceleraci a zatáčení vozidla. K simulaci vratného momentu slouží vrchní otočná část základny. Pohonem jsou zde servomotory.

**Pro měření zatížení** působícího na kolo je použito víceprvkových piezoelektrických tenzometrů. Ty umožňují měřit síly a momenty ve všech třech osách. Navíc je možné určit X-ovou a Y-ovou polohu středu kontaktní plochy.

**Roll Pitch Bounce Mechanism** – mechanismus pro klopení, klonění a pružení – je tvořen pohyblivým stolem, k němuž je pevně přichycena karoserie vozidla. Pohon stolu zajišťuje 6 lineárních elektromechanických pohonů. Tento mechanismus slouží k simulaci pohybů karoserie vozidla při reálných jízdních situacích.

**Loading ramps** – nájezdové rampy – slouží pro najetí vozidla na zkušební zařízení.

#### **Možnosti testování:**

SPMM 4000 umožňuje jako vstupní (řídící) veličinu testu použít

- svislý pohyb karoserie (propružení)
- klopení karoserie
- podélné zatížení kola
- příčné zatížení kola
- vratný moment kola
- řízení volantem vozidla

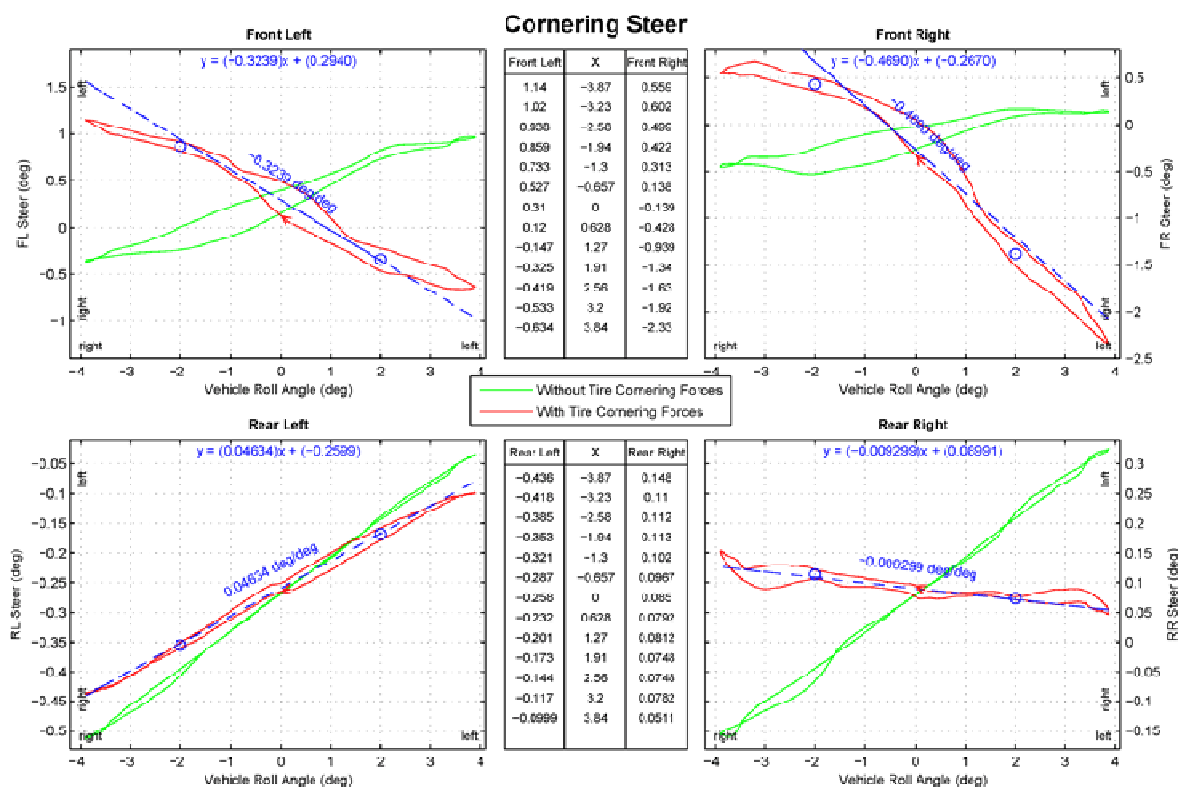
a měřit při tom

- úhel řízení (sbíhavosti)
- úhel odklonu kola
- vertikální posuv
- podélný posuv
- příčný posuv

Hodnoty sil a momentů působících na kolo jsou pochopitelně také zaznamenávány.

Výsledkem testů je grafické zobrazení funkční závislosti libovolné měřené veličiny na vstupní veličině. Za tímto účelem je SPMM 4000 vybaveno interaktivním zobrazovacím zařízením, které umožňuje zobrazení více grafů najednou a také proložení výsledků různých testů do jednoho grafu. Automaticky je počítána hystereze křivek.

Stejné zařízení používají mimo Antony Best Dynamics (UK) také společnosti Morse Measurement LLC (USA) a MIRA (UK).



Obrázek 14: Příklad grafického zobrazení výsledků testu [22]

### 3.4.2 MTS K&C SYSTEM

Společnost MTS (USA) používá pro měření kinematiky zavěšení a zkoušky tuhosti zařízení [6], které je konstrukčně velmi podobné výše uvedenému (viz. Obrázek 15). Rovněž je dostupné v provedení se čtyřmi nebo jen dvěma platformami kol a umožňuje tak kompletní test se zatěžováním obou náprav nebo jen jedné. Zásadní rozdíl spočívá v tom, že je zde karoserie automobilu nehybná během celého testu. Pomocí hydraulicky a elektromagneticky ovládaného upínacího zařízení je pevně fixována k základně, zatímco simulaci veškerých pohybů, posuvů a náklonů provádějí platformy kol.

**Měření zatížení** zajišťuje, stejně jako v předchozím případě, šestiosý tenzometrický člen. Zaznamenávají jsou hodnoty sil a momentů pro všechny tři osy.

**Měření polohy kol** je realizováno šestiosým optickým zařízením.

**Možnosti testování** jsou shodné s SPMM 4000. Opět je možné měřit závislost parametrů zavěšení na vertikálním pohybu karoserie a jejím náklonu, podélném zatížení, příčném zatížení, vratném momentu a řízení kol.

**Řídící systém** zpracovává (v případě „čtyřkolové“ varianty) 79 kanálů měřených dat a 25 kanálů pro řízení servopohonů. Průběh měřených hodnot lze sledovat na zobrazovacím zařízení a naměřená data se ukládají na pevný disk pro pozdější zpracování a analýzu.



Obrázek 15: MTS K&C System [6]

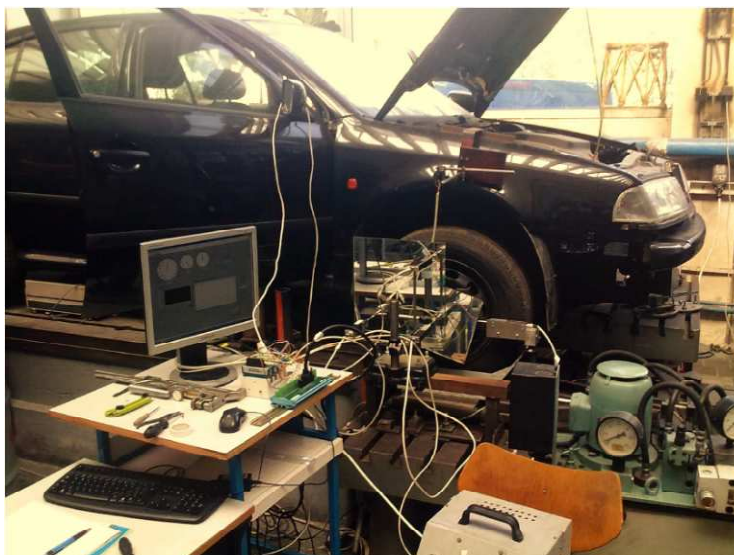
Obě výše popsaná zařízení jsou si konstrukcí a svými možnostmi velmi podobná. Liší se jen v druhu použitých systémů měření a pohonů. Jejich výhodou je velmi sofistikované řešení simulace reálných jízdních stavů, velké množství měřených parametrů a tím pádem i získaných dat a také úroveň jejich automatizace, která usnadňuje provádění testů.

Naopak nevýhodou bude složitost, prostorová náročnost a zejména pak jejich vysoká cena.



### 3.4.3 MĚŘENÍ ELASTOKINEMATIKY NA ČVUT

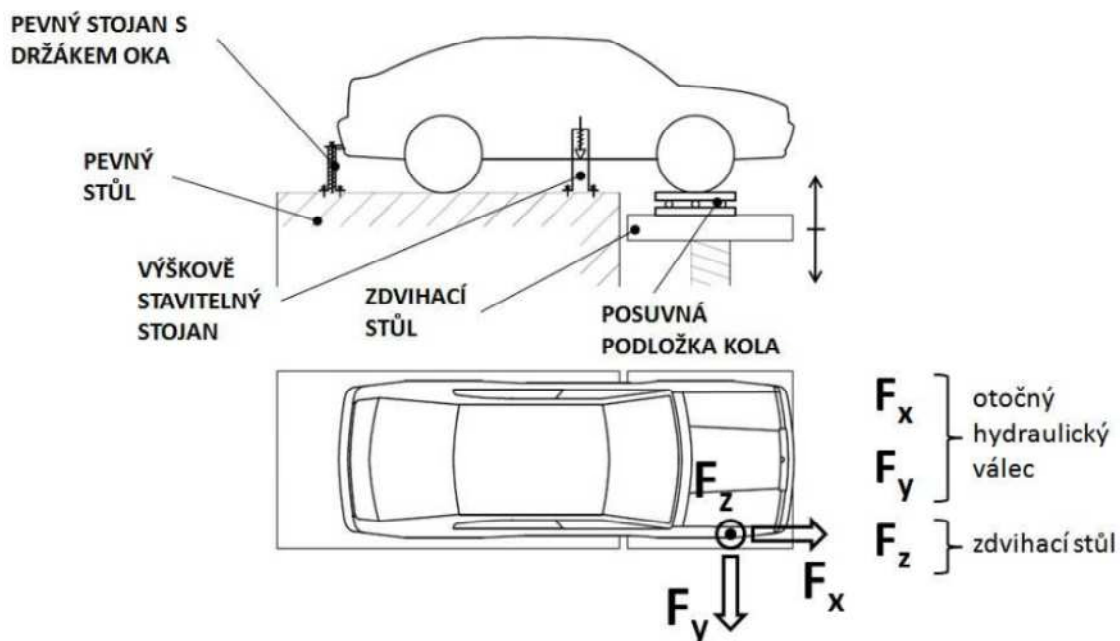
Zkoušením tuhosti (měřením elastokinematiky) zavěšení se zabývají i odborní pracovníci FS ČVUT v Praze. „V roce 1993 bylo na základě objednávky automobilové společnosti Škoda, a.s. vyvinuto kolektivem pod vedením doc. Ing. Jiřího Svobody prototypové zařízení určené pro měření elastokinematických a kinematických vlastností náprav osobních vozů.“ [7]



Obrázek 16: Stav pro měření elastokinematiky, FS ČVUT v Praze [7]

**Kotvení karoserie** zajišťují speciální stojany a podpěry umístěné na základové desce.

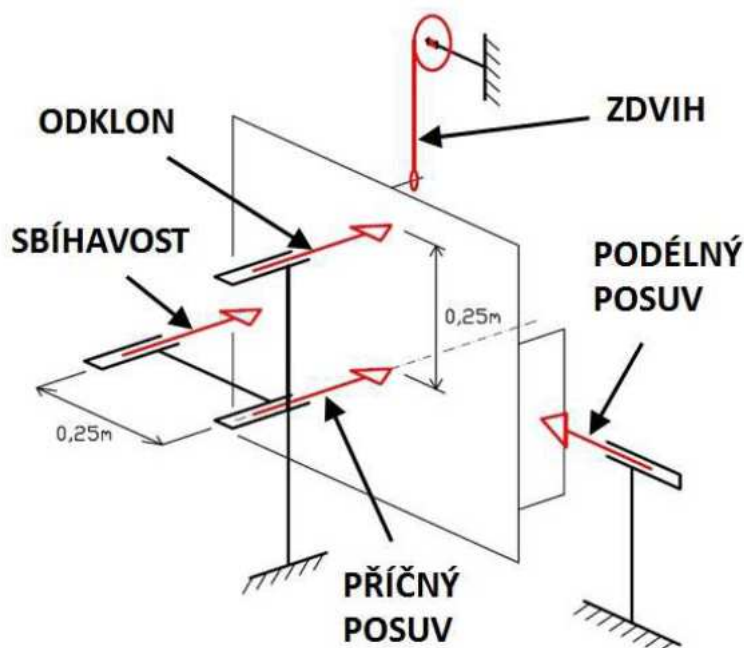
**Zatěžování kola** provádí pracovní stůl vybavený držákem, do něž je kolo upevněno. Vertikální pohyby stolu realizuje elektromechanický pohon a aplikaci sil působících v podélném a příčném směru slouží otočný hydraulický válec. Tyto síly jsou měřeny tenzometrickým snímačem.



Obrázek 17: Schéma měřícího stavu [7]



Pro měření změn geometrie kola se používá speciálně vyvinutá měřící hlava (viz Obrázek 18) kotvená k pracovnímu stolu. Ta je vybavena třemi lineárními snímači polohy. První z nich je umístěn do osy kola a zbylé dva slouží pro měření změny odklonu a sbíhavosti kola. Hroty snímačů se opírají o skleněnou desku připevněnou na kolo. Tato deska udává rovinu kola. Posuv kola, resp. pracovního stolu, je měřen dalším lineárním snímačem polohy. Pro měření zdvihu kola je použit lankový potenciometrický snímač.



Obrázek 18: Schéma měřící hlavy [7]

Tento měřící stav je poměrně jednoduchý, ale nevýhodou může být nepřesnost či spíše nereálnost získaných dat. Zejména kotvení kola v přípravku pracovního stolu příliš neodpovídá reálnému kontaktu kola s vozovkou. Dále pak možnost zatěžování pouze jednoho kola nedává dostatečnou představu o změnách geometrie celé nápravy. Velikost změn totiž nemusí být (pro stejně velké zatížení) stejná na obou kolech nápravy. Při zatížení kola příčnou silou vzniká při jeho odvalování také vratný moment, jehož simulaci toto zařízení neumožňuje.





## 4 NÁVRH

Cílem je navrhnout dostupný způsob zkoušení tuhosti zavěšení. Hlavními kritérii jsou jednoduchost a nízké náklady na výrobu. Navrnuté řešení by tedy mělo maximálně využívat běžně dostupné prvky. Zakázková výroba speciálních komponent by celkové řešení nežádoucím způsobem prodražovala.

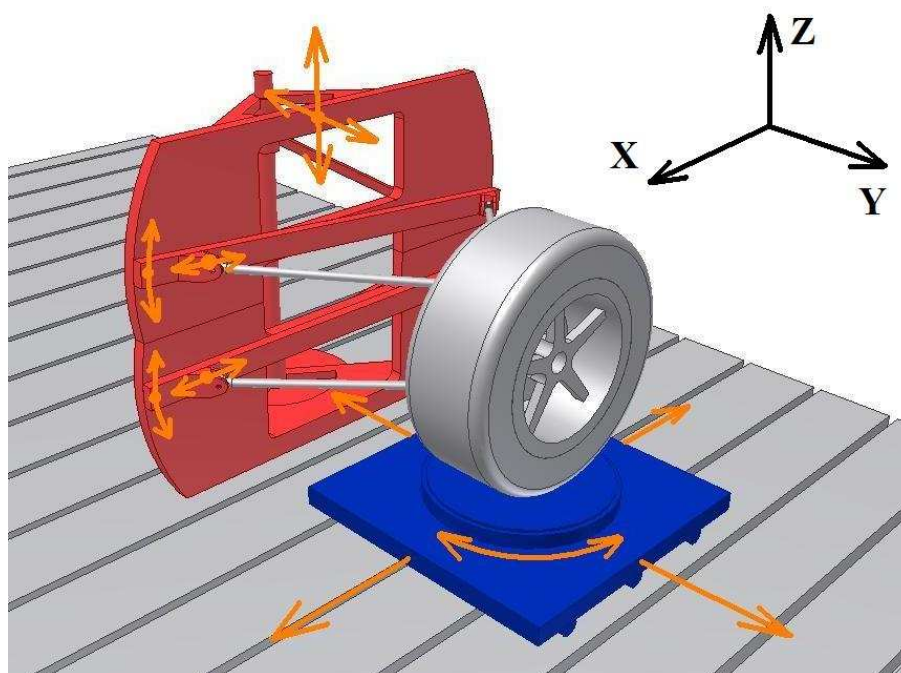
Hlavní části zařízení pro zkoušení tuhosti zavěšení jsou:

- potřebné přípravky
- mechanismus zatěžování
- mechanismy měření
  - zatížení
  - polohy kol
- mechanismus zpracování měřených dat

V následujících podkapitolách jsou rozebrána možná řešení jednotlivých částí.

### 4.1 NÁVRH PŘÍPRAVKŮ

#### 4.1.1 VARIANTA Č. 1



Obrázek 19: Varianta č. 1

Tato varianta se skládá z kotvících desek a pracovního stolu a umožňuje testování samotného zavěšení s kolem. Každé z ramen zavěšení je upnuto v bodech uložení, které jsou posuvné vůči kolejnici. Kolejnice je vůči kotvící desce uložena otočně a umožňuje tak nastavení libovolného sklonu kyvné osy ramena. Obě desky je možno nastavit ve směru os Y a Z a natočit kolem osy Z. Kolo je umístěno na pracovním stole, který vyvozuje zatížení kola.



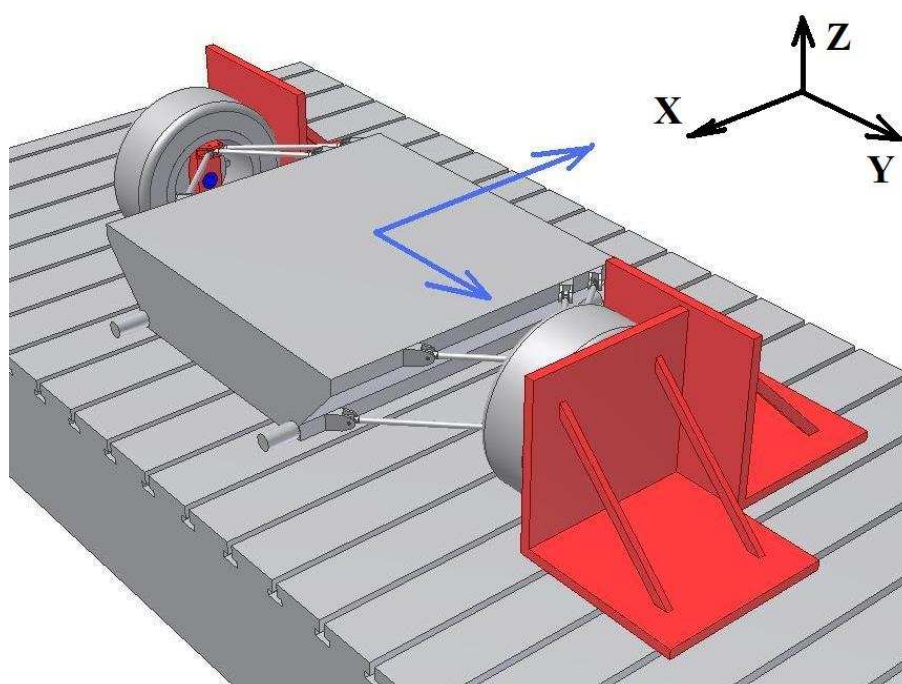
### VÝHODY

- kompatibilita s rameny různých rozměrů
- možnost testování vlivu různé geometrie zavěšení na jeho tuhost
- prostorová nenáročnost

### NEVÝHODY

- omezená použitelnost – pouze pro lichoběžníkové zavěšení
- nereálnost výsledků – nezahrnuje vliv ostatních prvků nápravy (řízení, odpružení a tlumení, pohon, mechanická stabilizace)
- vyšší cena

#### 4.1.2 VARIANTA Č. 2



Obrázek 20: Varianta č. 2

Tato varianta již testuje zavěšení na vozidle. Kotvena jsou zde kola a zatěžována je karoserie (rám) vozidla.

### VÝHODY

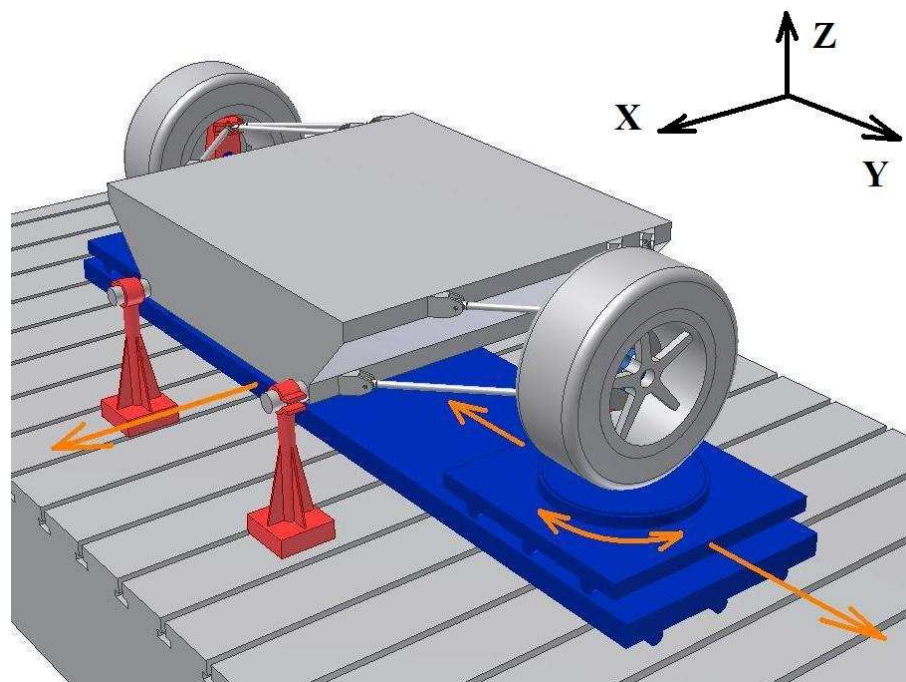
- jednoduchost řešení
- snadnost výroby
- nízká cena
- variabilita – pro různé velikosti rozvoru náprav a rozchodu kol

### NEVÝHODY

- nereálnost výsledků měření – působí síly není v kontaktu kola s vozovkou
- obtížné či zcela nemožné měření změn geometrie kola



### 4.1.3 VARIANTA Č. 3



Obrázek 21: Varianta č. 3

V tomto případě je kotvena karoserie (rám) vozu a zatěžováno je kolo v místě kontaktu s vozovkou, což nejvíce odpovídá reálnému stavu. Přípravek se skládá z prvků kotvení karoserie (rámu) a pracovního stolu. Ten umožňuje pohyby kola ve směru os X a Y a rotaci kolem osy Z.

#### VÝHODY

- variabilita – pro různé velikosti rozvoru náprav a rozchodu kol
- simulace reálného kontaktu kola s vozovkou
- větší reálnost naměřených dat

#### NEVÝHODY

- složitější konstrukce
- vyšší cena

Po konzultaci s vedoucím práce byla vybrána varianta č. 3.



## 4.2 NÁVRH ZATĚŽOVÁNÍ

U zvolené varianty přípravku je potřeba zatěžovat stůl ve směru os X a Y. Toho je možné docílit jednoduše použitím lineárních pohonů. Na trhu je dostupná řada lineárních pohonů lišících se typem pohonu. V následujících podkapitolách jsou nastíněny jednotlivé typy.

### 4.2.1 MECHANICKÉ

Čistě mechanické vyvození jednoosého zatížení umožňují pohybové šrouby. Jedná se o běžně dostupnou strojní součást. Šroub v kombinaci s maticí převádí rotační pohyb na translační. Pro účely pohonu pracovního stolu přípravku není rozhodující přesnost polohování, proto není nutné použití přesných kuličkových šroubů nebo předepnutých matic. Zde si vystačíme s běžným trapézovým závitem. Pohon (rotační pohyb) by v tomto provedení zajišťovala obsluha testu.



Obrázek 22: Trapézový šroub s maticí [24]



Obrázek 23: Přírubová trapézová matice [25]

### VÝHODY

- jednoduchost
- nízká cena

### NEVÝHODY

- plynulost chodu závisí na obsluze
- nelze automatizovat

### 4.2.2 ELEKTROMECHANICKÉ

Elektromechanické lineární aktuátory (viz. Obrázek 24) kombinují mechanismus pohybového šroubu s elektrickým pohonem. Jako pohon jsou používány jak DC, tak AC motory, a výjimkou není ani použití servomotorů. Mezi pohon a pohybový šroub je často vložen ještě převodový mechanismus pro dosažení lepších výstupních parametrů aktuátoru (tažná/tlačná síla, rychlost posuvu apod.).

Na trhu je dostupná pestrá škála různých konstrukčních řešení a variant od celé řady výrobců. Hlavním kritériem výběru je požadovaná tažná/tlačná síla.



Obrázek 24: Lineární šroubový pohon řady LZ80, výrobce PHOENIX MECANO [26]

### VÝHODY

- možnost automatizace testu
- široká škála variant – velký výběr

### NEVÝHODY

- vyšší cena

### 4.2.3 HYDRAULICKÉ

Hydraulické lineární pohony (viz. Obrázek 25) mají pracovní komoru s pístem. Síla je vyvozena působením tlaku kapaliny v pracovní komoře na plochu pístu. Tento typ pohonu je součástí hydraulického okruhu, který dále obsahuje čerpadlo a zásobník pracovní kapaliny, regulační prvky a propojovací komponenty (hadice, potrubí).



Obrázek 25: Hydraulický válec od firmy Jihostroj [27]

### VÝHODY

- možnost automatizace testu
- velké pracovní síly



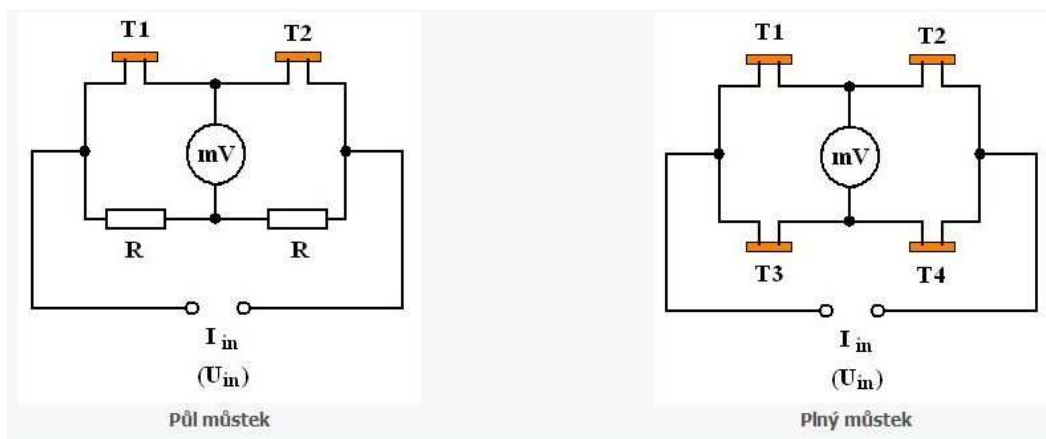
## NEVÝHODY

- vyšší cena
- složitost systému
- prostorová náročnost systému

**Zvolená varianta: mechanický pohon trapézovým šroubem a maticí.**

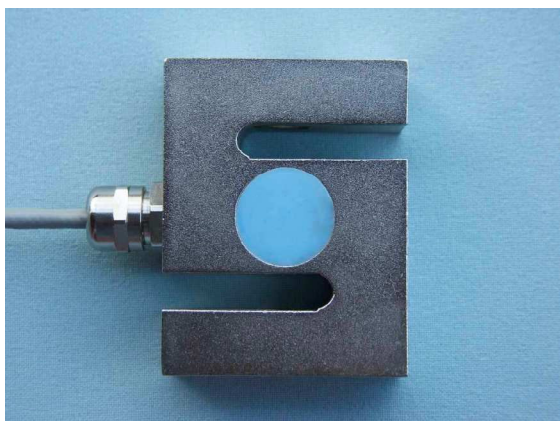
## 4.3 NÁVRH MĚŘENÍ ZATÍŽENÍ

Pro zvolenou kombinaci přípravku a způsobu zatěžování je vhodným měřidlem tenzometrický snímač umístěný mezi pracovní stůl a pohon. Konkrétně bude použit snímač tahové síly. „Podstata polovodičového tenzometru spočívá ve výrazné změně jeho odporu s mechanickou deformací.“ [18] Tenzometry bývají zapojeny do půlmůstku nebo celého Wheatstoneova můstku, což při statických měřeních kompenzuje vliv teploty (viz Obrázek 26).



Obrázek 26: Způsoby zapojení tenzometrů [28]

Výstupním signálem tenzometrického snímače je napětí v měřícím obvodu (viz Obrázek 26, značeno mV). Tento napěťový signál je zesílen a dále zpracován vyhodnocovacím zařízením. Příklady snímačů tahové/tlakové síly jsou na obrázcích níže (viz Obrázek 27 a Obrázek 28).



Obrázek 27: Snímač tahové/tlakové síly F031, výrobce VTS Zlín [9]



Obrázek 28: Snímač tahové/tlakové síly S9, výrobce HBM [10]



Výběr konkrétního snímače bude proveden až při konečné realizaci testovacího zařízení, kdy bude možno zvážit aktuální ceny.

## 4.4 NÁVRH MĚŘENÍ POLOHY

### 4.4.1 KONTAKTNÍ

Vhodný způsob kontaktního měření polohy kola představuje použití lankových snímačů (jako v případě SPMM 4000). Při tomto způsobu měření však musí být dodržena podmínka dostatečné vzdálenosti snímače od měřeného objektu, aby byla změna vysunutí lanka při posuvu kola v podélném směru zanedbatelná. Tato varianta vyžaduje konstrukci dalších přípravků jednak pro upnutí samotných snímačů a dále přípravek na kolo k uchycení konců lanek.



Obrázek 29: Lankový snímač polohy SG10, výrobce SIKO [31]

### VÝHODY

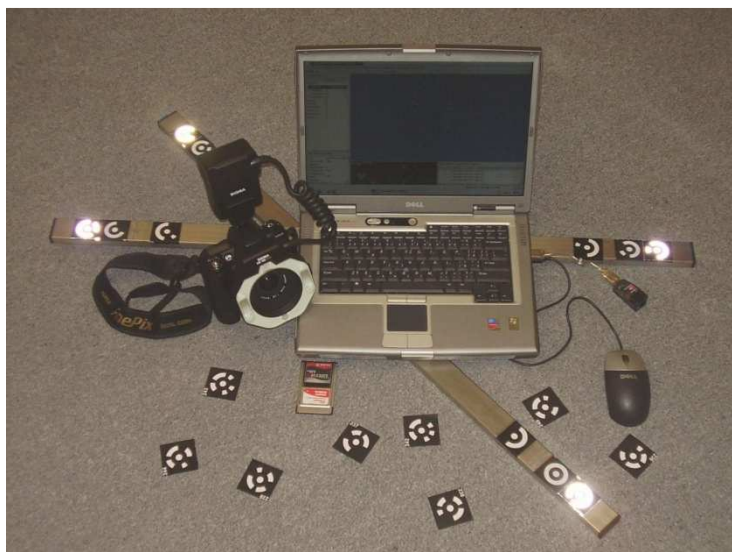
- možnost kontinuálního měření

### NEVÝHODY

- cena (5 snímačů pro 1 kolo)
- nutnost konstrukce dalších přípravků

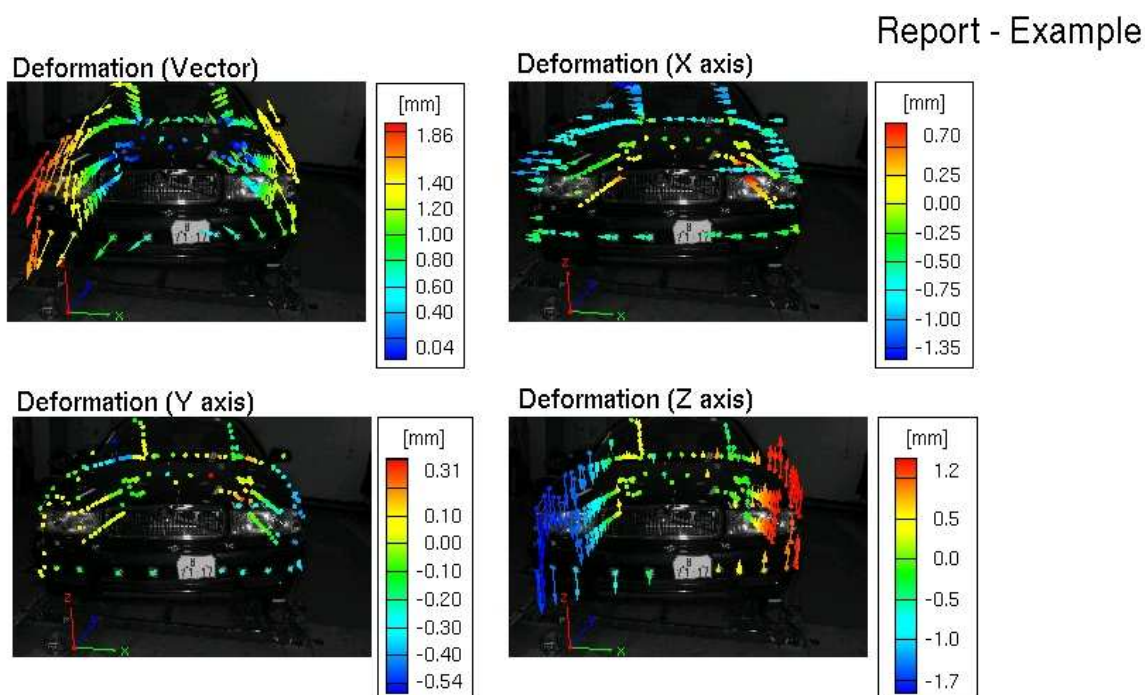
### 4.4.2 BEZKONTAKTNÍ

Pro bezkontaktní měření je možné využít fotogrammetrické zařízení TRITOP (viz. Obrázek 30). Toto řešení se běžně používá pro deformační analýzy. Skládá se z digitálního fotoaparátu, značek umístěovaných na měřený objekt, etalonů (tyče známých rozměrů) a programu na vyhodnocení fotografií.



Obrázek 30: Měřicí systém TRITOP na ÚADI<sup>1</sup> [29]

Analyzovaný předmět se opatří značkami a poté je focen z různých míst v prostoru. Pro každý stav zatížení je třeba pořídit sadu fotografií analyzovaného objektu. Fotografie jsou následně automaticky vyhodnoceny programem a výstupem jsou 3D souřadnice jednotlivých bodů a také grafické zobrazení jejich posunu na fotografii měřeného objektu (viz. Obrázek 31).



TRITOP

gom  
www.gom.com

Obrázek 31: Příklad použití systému TRITOP pro měření deformace karoserie vozidla [30]

<sup>1</sup> Ústav automobilního a dopravního inženýrství FSI VUT v Brně





## VÝHODY

- možnost podrobnější analýzy deformace v konkrétních bodech zavěšení (ne jen změna polohy kola)
- nulové náklady<sup>2</sup>

## NEVÝHODY

- časová náročnost měření
- nemožnost automatizace testu

Po konzultaci s vedoucím práce byla zvolena bezkontaktní varianta - systém TRITOP. Tato metoda měření je sice zdoluhavá, ale vzhledem k předpokládané nízké četnosti testů se investice do varianty s lankovými snímači jeví jako zbytečná.

## 4.5 ZPRACOVÁNÍ DAT

Pro zpracování dat se předpokládá použití měřicí karty a počítačového programu v Lab View. Konkrétní řešení otázky zpracování dat není předmětem této práce.

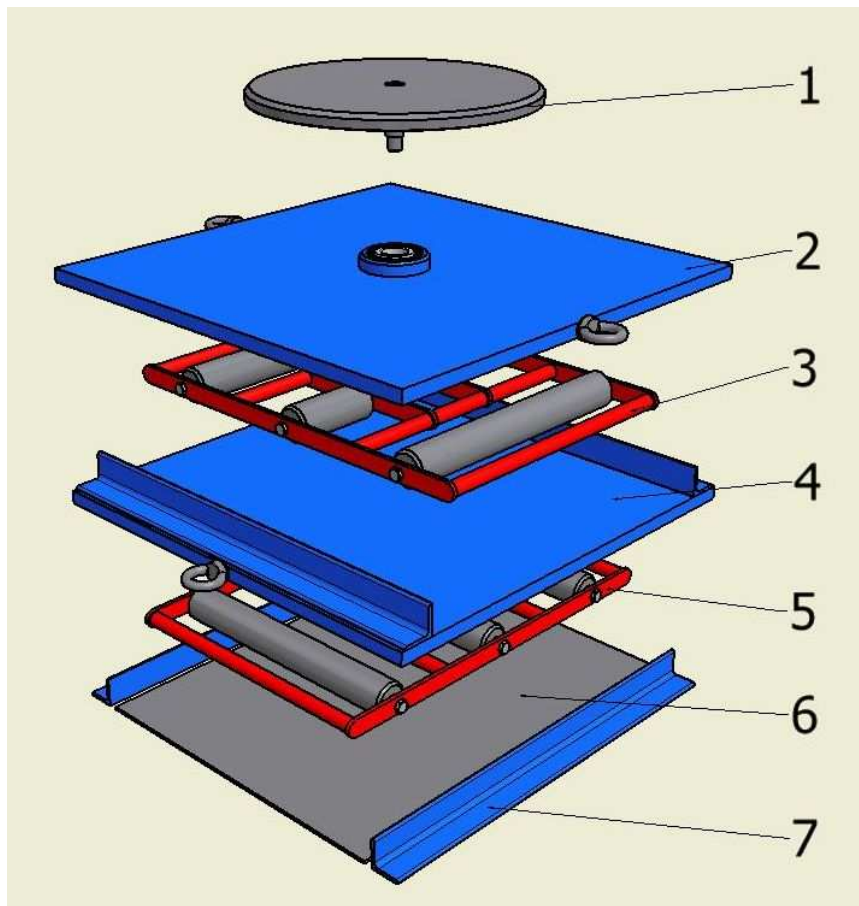
---

<sup>2</sup> Myšleno náklady na pořízení. Systém TRITOP je již k dispozici v laboratořích ÚADI, a proto jsou tyto náklady nulové.



## 5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

### 5.1 PRACOVNÍ STŮL



Obrázek 32: Hlavní části pracovního stolu

Pracovní stůl je umístěn pod kolem testovaného vozidla a přenáší na něj zatížení a posuvy vyvozené pohonem. V návrhu variant byl u Varianty č. 3 (Obrázek 21) pracovní stůl navržen pro celou jednu nápravu. Toto řešení bylo však ještě přepracováno a výsledkem je samostatný pracovní stůl pro každé kolo. Výhodou tohoto řešení je úspora materiálu a větší variabilita, kdy je v případě potřeby možno zatížit každé kolo jedné nápravy různě velkou podélnou silou.

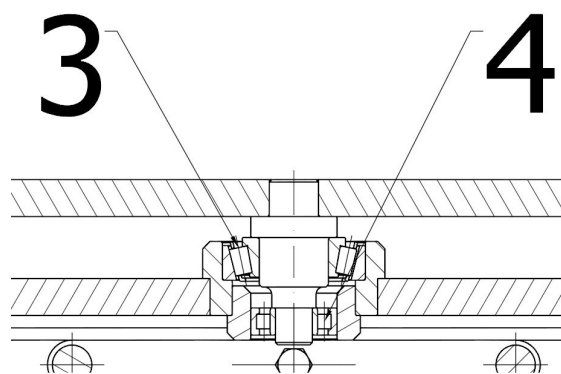
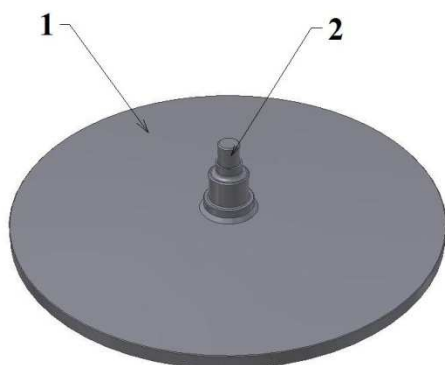
Hlavní části pracovního stolu (viz Obrázek 32) jsou:

- 1 - točna
- 2 - stůl Y
- 3 - pojezd stolu Y
- 4 - stůl X
- 5 - pojezd stolu X
- 6 - plotna pro pojezd stolu X
- 7 - vedení stolu X

Konstrukční řešení těchto podsestav je popsáno v následujících podkapitolách.



### 5.1.1 TOČNA PRACOVNÍHO STOLU



Obrázek 34: Detail uložení točny

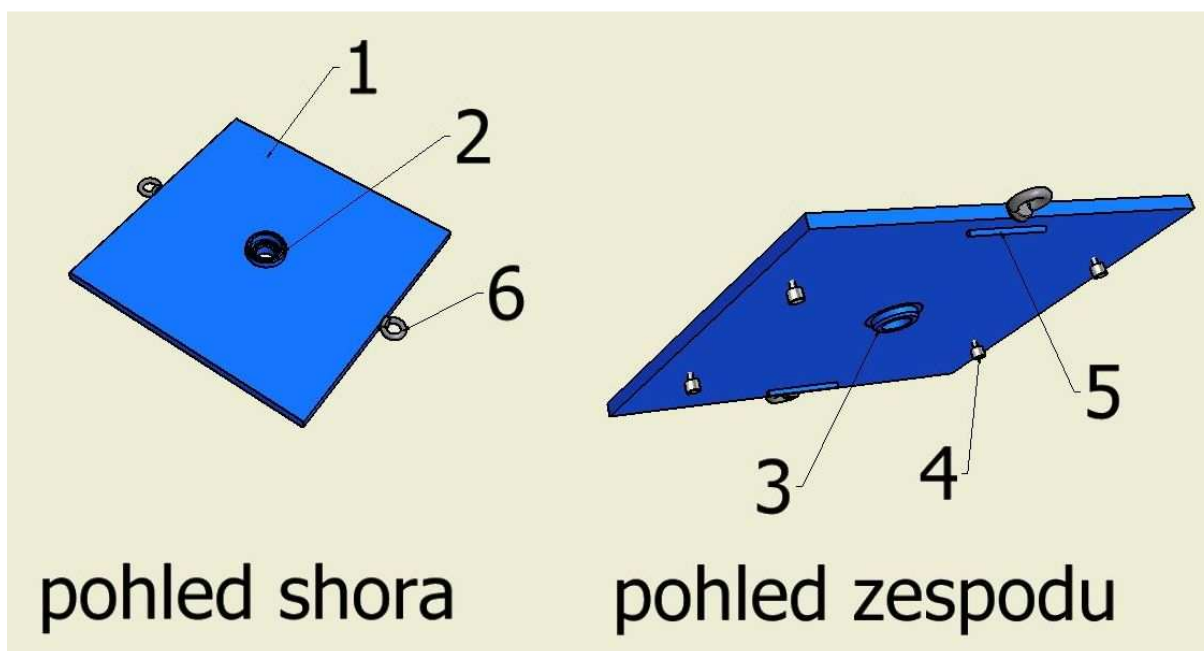
Obrázek 33: Točna pracovního stolu

Části točny pracovního stolu (viz. Obrázek 33 a Obrázek 34):

- 1 - deska točny
- 2 - čep točny
- 3 - kuželíkové ložisko 302/28 J2
- 4 - radiální válečkové ložisko NU 202 ECP

Točna je svařencem desky točny a čepu točny a je uložena otočně ve stolu Y. K uložení je použito kombinace kuželíkového a radiálního válečkového ložiska.

### 5.1.2 STŮL Y

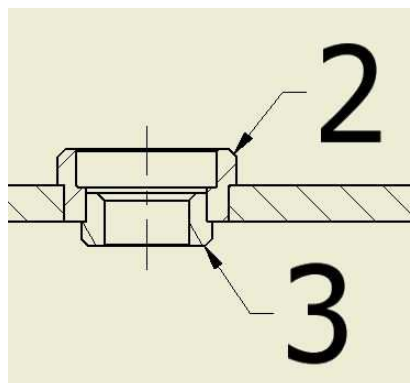


Obrázek 35: Stůl Y



### Části stolu Y:

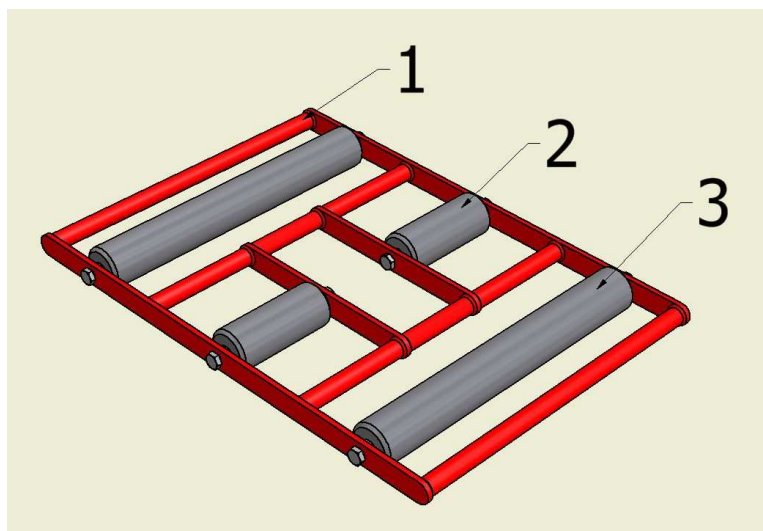
- 1 - deska stolu X
- 2 - náboj ložiska A
- 3 - náboj ložiska B
- 4 - pojezdová rolna
- 5 - doraz pojezdu
- 6 - tažné oko



Obrázek 36: Detail uložení nábojů ložisek

Náboj ložiska A je přivařen k desce stolu a ze spodní části je do něj nalisován náboj ložiska B (detail viz Obrázek 36). Ke spodní straně desky jsou přivařeny dorazy pojezdu, které omezují maximální možný posuv stolu. Axiální vedení zajišťují pojezdové rolny. Tažná oka slouží pro připojení snímače zatížení a pohonu. Stůl Y má jeden stupeň volnosti (pohyb ve směru osy Y) a vůči stolu X je uložen valivě, aby byl zajištěn co nejmenší odpor proti pohybu stolu. V případě kluzného uložení by byl třecí odpor větší, čímž by se do měření vnášela nepřesnost.

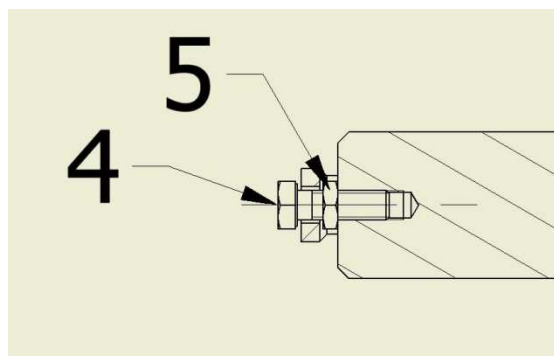
### 5.1.3 POJEZD STOLU Y



Obrázek 37: Pojezd stolu Y

### Části pojezdu stolu Y:

- 1 - klec pojezdu
- 2 - válec pojezdu (malý)
- 3 - válec pojezdu (velký)
- 4 - šroub
- 5 - matice

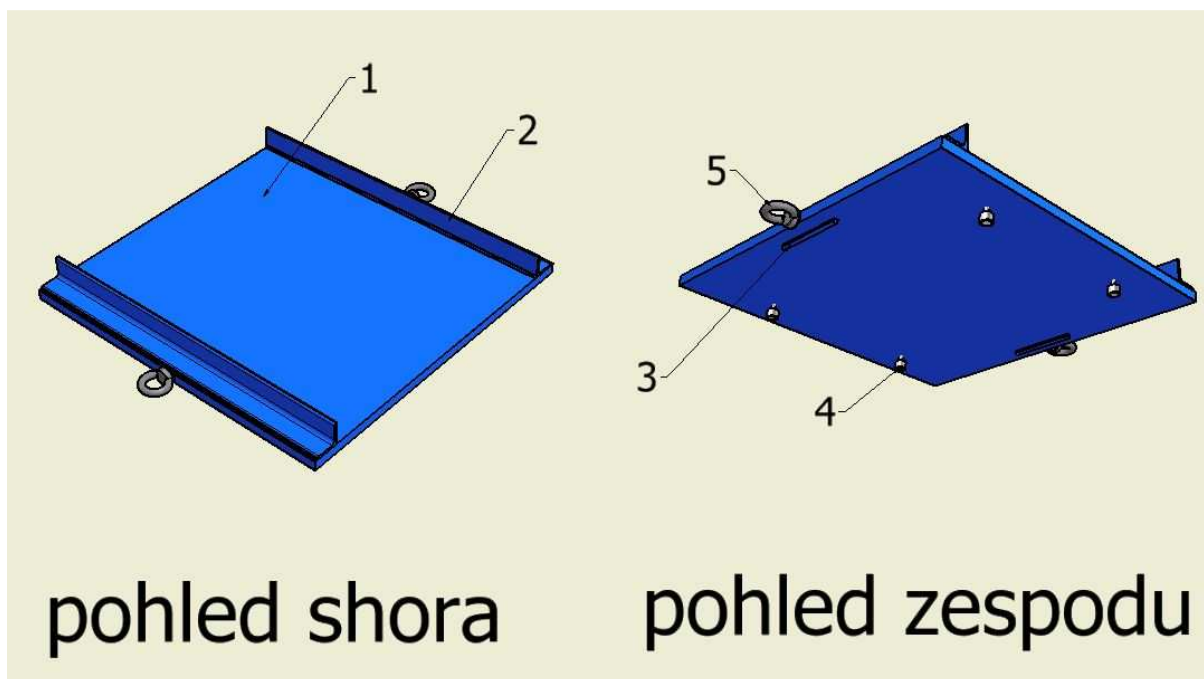


Obrázek 38: Detail uložení válce pojezdu



Válce pojezdu jsou uloženy v kleci pomocí šroubů jištěných kontra maticemi. Klec je vyrobena jako svařenec a slouží pro vymezení vzájemné polohy jednotlivých válců pojezdu.

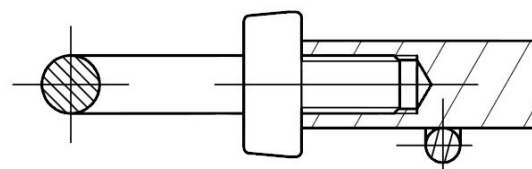
#### 5.1.4 STŮL X



Obrázek 39: Stůl X

#### Části stolu X:

- 1 - deska stolu X
- 2 - vedení stolu Y
- 3 - doraz pojezdu
- 4 - pojezdová rolna
- 5 - tažné oko

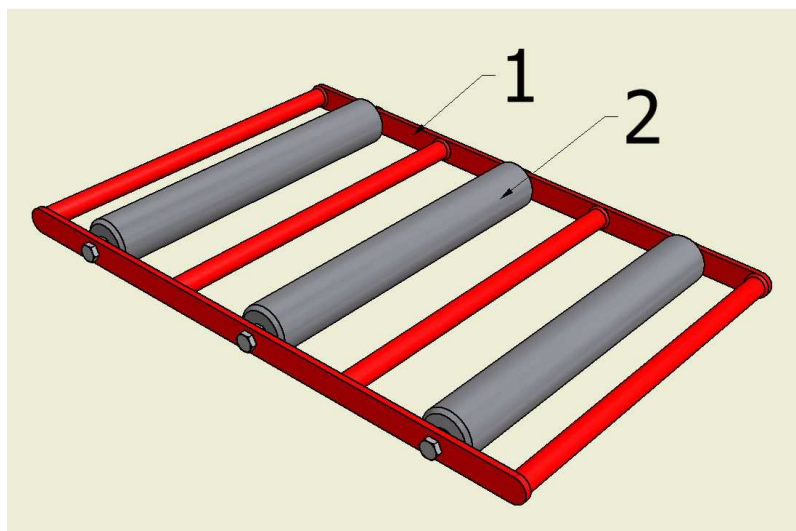


Obrázek 40: Detail uložení tažného oka

K desce stolu X je přivařeno vedení stolu Y, po němž se odvalují pojezdové rolny stolu Y. Toto vedení zajišťuje přenos síly ve směru osy X na stůl Y. Ke spodní straně desky jsou přivařeny dorazy pojezdu, které (stejně jako u stolu Y) omezují maximální možný posuv stolu. Stůl X má jeden stupeň volnosti (pohyb ve směru osy X) a vůči plotně pro pojezd stolu X (viz Obrázek 32 pozice 6, strana 34) je uložen valivě. Axiální vedení stolu zajišťují pojezdové rolny na spodní straně desky stolu. Rolny se odvalují po vedení stolu X (viz Obrázek 32 pozice 7, strana 34). Jedná se o stejný díl, jako v případě vedení stolu Y, ale v tomto případě je vedení pomocí úpinek kotveno k základové desce. Pro připojení snímače zatížení a pohonu slouží tažná oka zašroubovaná do desky stolu (viz Obrázek 40).



### 5.1.5 POJEZD STOLU X



Obrázek 41: Pojezd stolu X

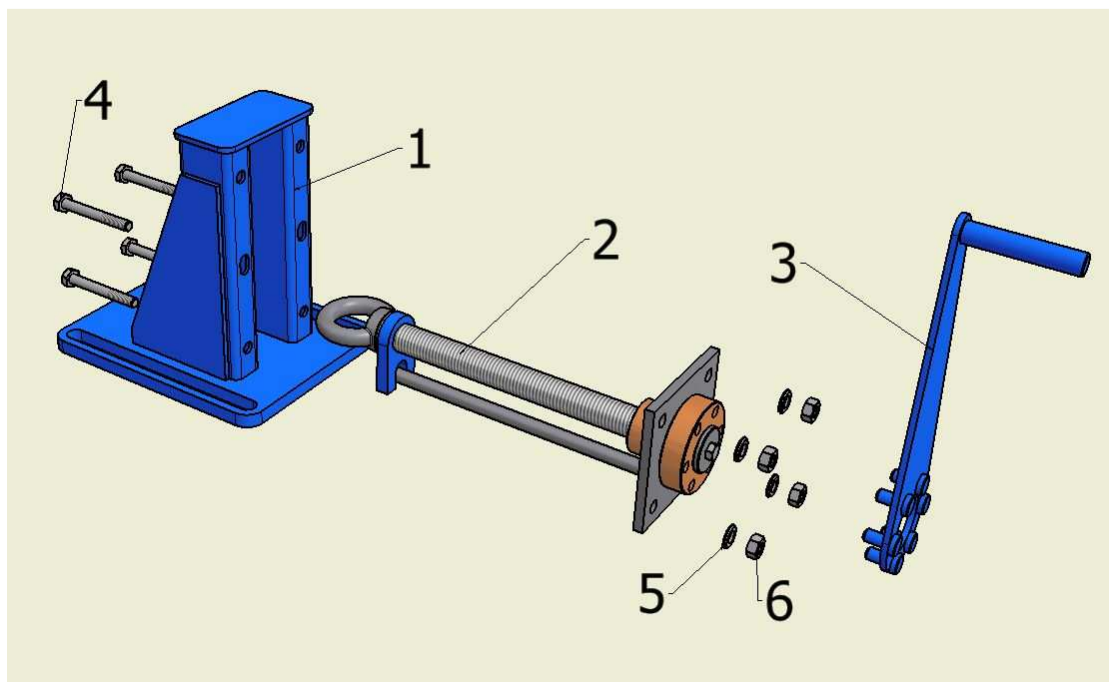
#### Části pojezdu stolu X:

- 1 - klec pojezdu
- 2 - válec pojezdu (velký)

Popis této podstavy pracovního stolu je obdobou popisu pojezdu stolu Y. Klec je opět vyrobena jako svařenec a pojezdové válce jsou v ní opět uloženy pomocí šroubů jištěných kontra maticí (viz Obrázek 38, strana 36). Pod pojezdem stolu X je umístěna plechová plotna (viz Obrázek 32 pozice 6, strana 34), která zajišťuje rovnou a hladkou plochu.



## 5.2 POHON



Obrázek 42: Pohon

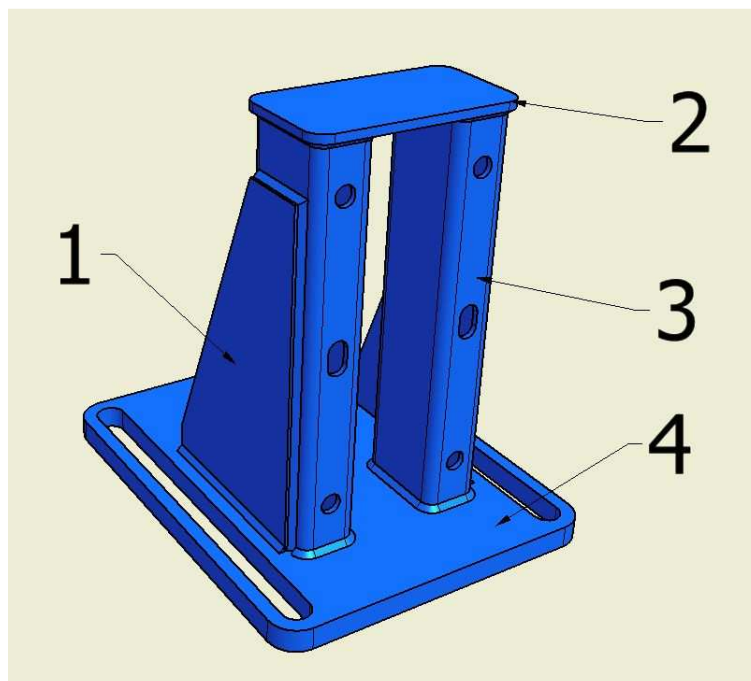
Hlavní části pohonu (viz Obrázek 42):

- 1 - rám pohonu
- 2 - šroubový mechanismus
- 3 - klika pohonu
- 4 - šroub
- 5 - podložka
- 6 - matice

Šroubový mechanismus je v rámu pohonu kotven pomocí šroubů a matic s podložkami. Rám pohonu umožňuje nastavení šroubového mechanismu do dvou výškových poloh, které odpovídají výšce tažných ok stolů X a Y. Šroubový mechanismus je poháněn otáčením kliky. Konstruktivní řešení jednotlivých podsestav je popsáno v následujících podkapitolách.



### 5.2.1 RÁM POHONU



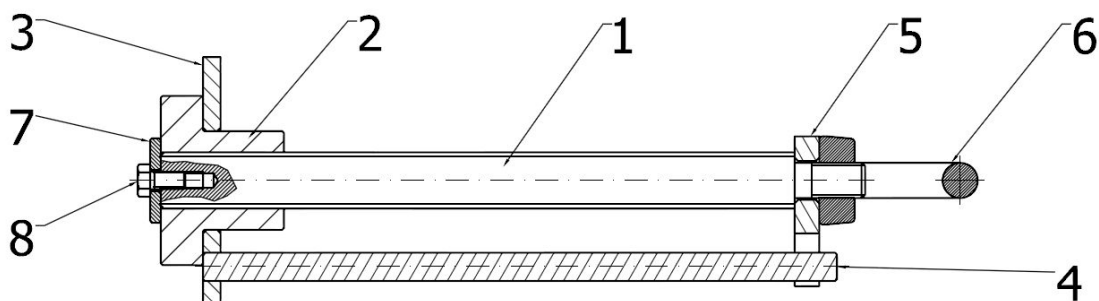
Obrázek 43: Rám pohonu

Části rámu pohonu (viz Obrázek 43):

- 1 - žebro
- 2 - vrchní deska
- 3 - stojka
- 4 - spodní deska

Rám pohonu je vyroben jako svařenec.

### 5.2.2 ŠROUBOVÝ MECHANISMUS



Obrázek 44: Šroubový mechanismus



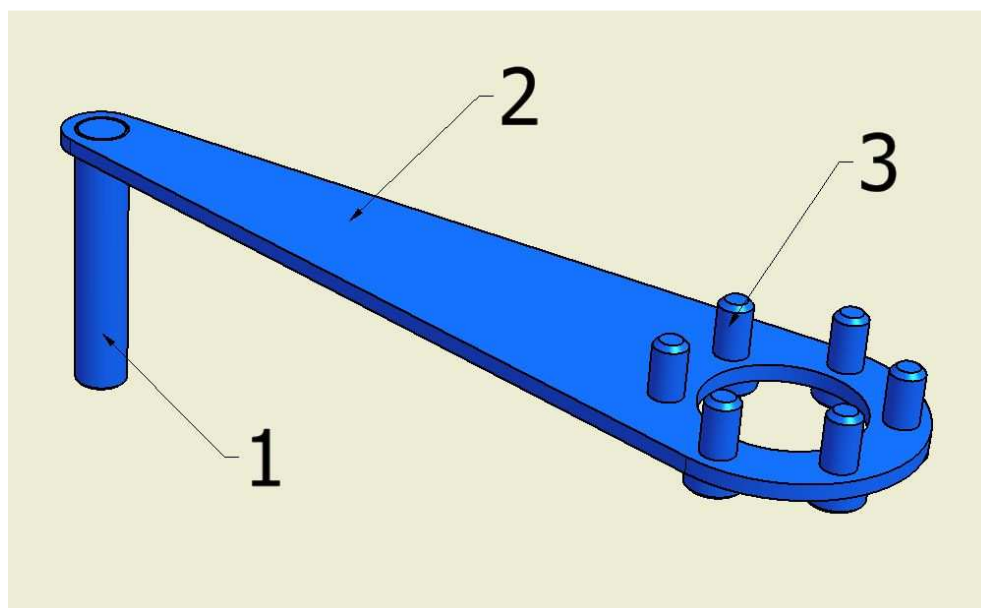


Části šroubového mechanismu (viz Obrázek 44):

- 1 - trapézový šroub
- 2 - přírubová trapézová matice
- 3 - rám matice
- 4 - vedení šroubu
- 5 - vodící kámen
- 6 - tažné oko
- 7 - doraz šroubu
- 8 - šroub dorazu

Trapézový šroub a přírubová trapézová matice jsou na trhu běžně dostupné strojní součásti. Šrouby jsou dodávány v různých rozměrech i délkách a výrobci jsou schopni upravit konce šroubu podle požadavků zákazníka. Matice je uložena v rámu matice a do něj je nalisováno vedení šroubu. Na pravém konci trapézového šroubu (viz Obrázek 44) je navlečen vodící kámen a našroubováno tažné oko. Vodící kámen je svou drážkou nasazen na vedení šroubu, čímž je znemožněno otáčení tažného oka. Toto otáčení by bylo nežádoucí. Trapézový šroub je proti vyšroubování z matice jištěn dorazem. Ten je k němu přišroubován šroubem dorazu.

### 5.2.3 KLIKA POHONU



Obrázek 45: Klika pohonu

Části klinky pohonu (viz Obrázek 45):

- 1 - madlo klinky
- 2 - tělo klinky
- 3 - čep klinky

Tělo klinky je navrženo jako výstřížek z plechu, madlo a čepy jsou soustružené z polotovaru kruhového průřezu a poté jsou nalisovány do těla klinky.



## ZÁVĚR

V rámci této bakalářské práce byla rozebrána problematika zkoušení tuhosti zavěšení kol. Byly popsány kinematické změny, ke kterým dochází v důsledku vzájemných pohybů kola a karoserie automobilu a byly popsány parametry ovlivňující výslednou tuhost zavěšení. Na popisu funkce používaných zařízení byl vysvětlen princip zkoušek a vhodnost či nevhodnost konkrétních řešení.

Na základě tohoto rozboru bylo navrženo zkušební zařízení pro účely vozidla Formule Student. Byl proveden konstrukční návrh pracovního stolu a jeho pohonu. Zvolená varianta řešení je díky samostatnému pracovnímu stolu pro každé kolo dostatečně variabilní a může se přizpůsobit různým velikostem rozvoru náprav a rozchodu kol. V této podobě je možné zkoušení zavěšení pod zatížením podélnými a příčnými silami. V případě, že bude dořešen pohon točny pracovního stolu, bude možné kolo zatížit i vratným momentem. Ani v nejmenším však tato konstrukce nemůže simulovat reálné jízdní manévry, jako současné moderní měřicí stavy. Před konečnou realizací je nutná pevnostní kontrola navržené konstrukce a také vyřešení přípravků pro kotvení rámu (karoserie).

Zvolená metoda měření deformace pomocí systému TRITOP má svou výhodu v podobě momentálně nulových nákladů na měřicí systém. V neprospěch této varianty však hovoří časová náročnost testu. Tato skutečnost může být do budoucna při vyšší četnosti testů velkým negativem.

Možnosti dalšího vývoje jsou tedy zjevné. Prvním krokem zřejmě bude změna systému měření deformace, což umožní v kombinaci se systémem pro zpracování měřených dat kontinuální měření. Stále však bude průběh testu a také jeho výsledek záviset na zručnosti obsluhy. Dalším vývojovým krokem tedy zcela jistě bude náhrada manuálního pohonu mechanizovaným. To umožní i automatizaci testu. No a v posledním stádiu vývoje by mohl být implementován mechanismus simulující pohyby karoserie a propružení kol. Nelze však vyloučit, že v této fázi už bude momentálně navržená konstrukce pracovního stolu nevyhovující.



## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] JANÍČEK, Přemysl et al. *Mechanika těles: pružnost a pevnost*. 3. přeprac. vyd. Brno: CERM, 2004, 287 s. ISBN 80-214-2592-x.
- [2] VLK, František. *Podvozky motorových vozidel*. 3. přeprac., rozš., aktualiz. vyd. Brno: Prof.Ing.František Vlk, DrSc, 2006, 464 s. ISBN 80-239-6464-x.
- [3] VLK, František. *Dynamika motorových vozidel /.* vyd. 2. Brno: Prof.Ing.František Vlk,DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2006, 432 s. ISBN 80-239-0024-2.
- [4] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 1. vyd. Úvaly: ALBRA, 2003, 865 s. ISBN 80-86490-74-2.
- [5] *SPMM 4000 from Anthony Best Dynamics: OUTLINE SPECIFICATION SP20010 issue 4*. [online dokument]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: [http://www.abd.uk.com/upload/files/2011-11-17\\_16-44-39\\_SP20010%20-%20issue%204%20\(SPMM%20Outline\).pdf](http://www.abd.uk.com/upload/files/2011-11-17_16-44-39_SP20010%20-%20issue%204%20(SPMM%20Outline).pdf)
- [6] *MTS Kinematic and Compliance Deflection Measurement System Provides Information On Suspension Performance*. [online dokument]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: [http://www.mts.com/ucm/groups/public/documents/library/dev\\_002253.pdf](http://www.mts.com/ucm/groups/public/documents/library/dev_002253.pdf)
- [7] *Měření elastokinematiky zavěšení kola vozidla*. [online dokument]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: [https://docs.google.com/viewer?url=http%3A%2F%2Fstc.fs.cvut.cz%2FHistory%2F2012%2FSbornik%2Fpapers%2Fpdf%2F2533.pdf%3F\\_%3D1331898561](https://docs.google.com/viewer?url=http%3A%2F%2Fstc.fs.cvut.cz%2FHistory%2F2012%2FSbornik%2Fpapers%2Fpdf%2F2533.pdf%3F_%3D1331898561)
- [8] *2013 Formula SAE Rules*. [online dokument]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://students.sae.org/competitions/formulaseries/rules/2013fsaerules.pdf>
- [9] *VTS Zlín: Výroba tenzometrů a snímačů*. [online dokument]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://vtsz-px.rtrk.cz/files/vts-katalog-cze.pdf>
- [10] *S9: Force Transducer*. [online dokument]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: [http://www.hbm.cz/Prospekty/Sila/S9/p\\_S9\\_e.pdf](http://www.hbm.cz/Prospekty/Sila/S9/p_S9_e.pdf)
- [11] *Formula Student web page [online], 2012, poslední revize 22. 10. 2012*. Dostupné z: <http://www.formulastudent.com/>
- [12] *Formula SAE web page [online], 2012, poslední revize 19. 10. 2012*. Dostupné z: <http://students.sae.org/competitions/formulaseries>
- [13] *Formula SAE/Student*. [online]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.tubnracing.cz/cs/fornule-student-sae>
- [14] *Kinematics & Compliance Test Machines*. [online]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: [http://www.abd.uk.com/en/kinematics\\_&\\_compliance/spmm4000](http://www.abd.uk.com/en/kinematics_&_compliance/spmm4000)



- [15] *Description of K&C Tests*. [online]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.morsemeasurements.com/technical/description-of-kc-tests/>
- [16] *Kinematics & Compliance Facility*. [online]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.mira.co.uk/our-services/k-and-c-rig>
- [17] *3D Laboratoř*. [online]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.uadi.fme.vutbr.cz/vyzkum-dynamika-vozidel-3d-laborator>
- [18] *Tenzometry: Princip a výroba*. [online]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: [http://vtsz.rtrk.cz/?scid=36746&kw=8364293&pub\\_cr\\_id=20863623637](http://vtsz.rtrk.cz/?scid=36746&kw=8364293&pub_cr_id=20863623637)
- [19] *HBM - Měřicí technika*. [online]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.hbm.cz/>
- [20] Fotodokumentace týmu TU Brno Racing
- [21] *Formule Dragon 2*. [online obrázek]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: [http://www.tubnracing.cz/images/phocagallery/2012/dragon\\_2.jpg](http://www.tubnracing.cz/images/phocagallery/2012/dragon_2.jpg)
- [22] *Cornering Steer*. [online obrázek]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: [http://www.morsemeasurements.com/wp-content/uploads/2012/10/Pull\\_Down\\_Cornering\\_Steer\\_lg.gif](http://www.morsemeasurements.com/wp-content/uploads/2012/10/Pull_Down_Cornering_Steer_lg.gif)
- [23] *Attaching encoders for wheel position*. [online obrázek]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.mira.co.uk/MIRA/media/MIRA/our-services/facilities/kinematics-and-compliance/k-and-c-rig-160.jpg>
- [24] *Trapézové šrouby*. [online obrázek]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: [http://www.teatechnik.cz/+thumbnail/img/produkty/pohybove\\_srouby/trapezove\\_srouby/trapezove\\_srouby.jpg?w=200&h=200&p=1&ne=1](http://www.teatechnik.cz/+thumbnail/img/produkty/pohybove_srouby/trapezove_srouby/trapezove_srouby.jpg?w=200&h=200&p=1&ne=1)
- [25] *Přírubové matice*. [online obrázek]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: [http://www.teatechnik.cz/+thumbnail/img/produkty/pohybove\\_srouby/trapezove\\_srouby/p\\_rirubova\\_matice.jpg?w=200&h=200&p=1&ne=1](http://www.teatechnik.cz/+thumbnail/img/produkty/pohybove_srouby/trapezove_srouby/p_rirubova_matice.jpg?w=200&h=200&p=1&ne=1)
- [26] *Lineární šroubové pohony - řada LZ80*. [online obrázek]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: [http://www.regulacni-pohony.cz/images/sroub/PM\\_LZ80.jpg](http://www.regulacni-pohony.cz/images/sroub/PM_LZ80.jpg)
- [27] *Hydraulické válce*. [online obrázek]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.jihostroj.com/u-images/valce.jpg>
- [28] *Zapojení tenzometrů*. [online obrázek]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://vtsz-px.rtrk.cz/images/pulmustek.png>
- [29] *Tritop*. [online obrázek]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.uadi.fme.vutbr.cz/userfiles/blatak/images/tritop.JPG>



- [30] *Report - Example*. [online obrázek]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z:  
[http://www.uadi.fme.vutbr.cz/userfiles/blatak/images/deformacni\\_mereni1.jpg](http://www.uadi.fme.vutbr.cz/userfiles/blatak/images/deformacni_mereni1.jpg)
- [31] *Wire-actuated Encoder SG10*. [online obrázek]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z:  
<http://www.siko.de/typo3temp/pics/b17a164d9b.jpg>



## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$z_1$	[m]	propružení kola vůči karoserii
$z_2$	[m]	propružení karoserie vůči kolu
$\delta_1$	[°]	odklon kola
$\Delta y$	[m]	boční posuv kola
$\beta$	[°]	samořízení
$k$	$[N \cdot m^{-1}]$	tuhost pružiny
$F$	[N]	síla
$\Delta l$	[m]	rozdíl délek
$F_x$	[N]	podélná síla
$F_y$	[N]	příčná síla
$F_z$	[N]	vertikální síla
$\Delta Z_p$	[N]	změna vertikálního zatížení předního kola
$\Delta Z_z$	[N]	změna vertikálního zatížení zadního kola
$\psi$	[°]	úhel naklonění karoserie
$n_s$	[m]	závlek pneumatiky
$M_{Sk}$	$[N \cdot m]$	vratný moment pneumatiky



---

## SEZNAM PŘÍLOH