



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

# VLIV KINEMATIKY ZAVĚŠENÍ NA JÍZDNÍ VLASTNOSTI VOZIDLA

EFFECT OF SUSPENSION KINEMATICS ON VEHICLE HANDLING

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lucie Trnková

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Hejtmánek, Ph.D.

BRNO 2022



# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Studentka:	<b>Bc. Lucie Trnková</b>
Studijní program:	Automobilní a dopravní inženýrství
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	<b>Ing. Petr Hejtmánek, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2021/22

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:

## Vliv kinematiky zavěšení na jízdní vlastnosti vozidla

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Pozice jednotlivých kol vůči vozidlu či vozovce tvoří jeden z nejdůležitějších faktorů ovlivňujících chování vozidla. Kinematika zavěšení právě stanovuje změny pozice kol vlivem propružení či vlivem natočení volantu. Dále kinematika zavěšení kol ovlivňuje i velikost sil přenášených z kol na karoserii, definuje převod odpružení a další významné parametry. Kinematiku zavěšení lze měnit změnou poloh jednotlivých kinematických bodů, avšak mírnou změnou polohy byť jediného bodu se mohou změnit veškeré charakteristiky zavěšení a tím i chování vozidla v různých situacích. Pomocí simulačního multi-body modelu je možné detailně tyto vlivy kvalitativně i kvantitativně hodnotit.

### **Cíle diplomové práce:**

Sestavení MBS modelu pro analýzu vlivu kinematiky na jízdní vlastnosti vozu  
Volba jízdních manévrů a kritérií pro jejich hodnocení  
Výběr vhodných úprav kinematiky zavěšení a srovnání základních charakteristik  
Realizace simulací a detailní zhodnocení jejich výsledků

### **Seznam doporučené literatury:**

GILLESPIE, Thomas. D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1992. 519 s. ISBN 1-56091-199-9.

REIMPELL, Jornsens. The Automotive Chassis. 2nd edition. Oxford: Butterworth - Heinemann, 2001. 444 s. ISBN 0-7506-5054-0.

MILLIKEN, William a MILLIKEN, Douglas. Race Car Vehicle Dynamics. 1st edition. Warrendale: SAE, 1995. 857 s. ISBN 1-56091-526-9

DIXON, John C. Suspension Geometry and Computation. 1st Edition. John Wiley & Sons Ltd, 2009. 434 s. ISBN 978-0470510216.

DIXON, John C. The Shock Absorber Handbook. 2nd Edition. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2007. 432 s. ISBN 0-7680-0050-5.

BLUNDELL, Michael and HARTY, Damian. Multibody Systems Approach to Vehicle Dynamics. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. ISBN 0-7506-5112-1.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

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

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá vlivem kinematiky zavěšení na jízdní vlastnosti vozidla. V první části práce jsou představeny základní parametry kinematiky zavěšení a jejich teoretický vliv na jízdní vlastnosti vozidla. Za účelem provedení simulací jsou vytvořeny dva multibody modely vozidel, z nichž jeden vychází z off-roadového vozidla, u něhož došlo k výrazné změně zavěšení. Pro každý model je dále uveden popis a porovnání kinematických charakteristik různých variant nastavení jejich zavěšení. Hlavní část práce se zabývá analýzou vlivu jednotlivých změn zavěšení na jízdní vlastnosti při zvolených jízdních manévrech. Výsledky simulací jsou kvalitativně i kvantitativně zhodnoceny a výsledné poznatky jsou v závěru přehledně shrnuty.

## KLÍČOVÁ SLOVA

kinematické charakteristiky, lichoběžníkové zavěšení, multibody model vozidla, jízdní manévry, odklon, sbíhavost, výška středu klopení, záklon rejdové osy, anti-dive, anti-lift, anti-squat

## ABSTRACT

This diploma thesis deals with effect of suspension kinematics on vehicle handling. In the first part of the thesis, there are the basic parameters of suspension kinematics introduced. In order to perform the simulations, two multi-body vehicle models are created, one of which is derived from an off-road vehicle, for which there has been a significant change in suspension. For each model, there further is a description and comparison of the kinematic characteristics of different settings variants of their suspension introduced. The main part of the thesis deals with the analysis effect of individual suspension changes on vehicle handling during the selected driving maneuvers. The results of the simulations are qualitatively and quantitatively evaluated, and the resulting findings are in the conclusion summarized.

## KEYWORDS

kinematic characteristics, wishbone suspension, multibody vehicle model, driving maneuver, camber, toe angle, roll center high, caster angle, anti-dive, anti-lift, anti-squat

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

TRNKOVÁ, L. *Vliv kinematiky zavěšení na jízdní vlastnosti vozidla*. Brno, 2022. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí diplomová práce Petr Hejtmánek. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139729>.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Petra Hejtmánka, Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 20. května 2022

.....

Lucie Trnková

## PODĚKOVÁNÍ

Chtěla bych poděkovat vedoucímu práce panu Ing. Petru Hejtmánkovi, Ph.D. a také panu Ing. Janu Fojtáškoví, Ph.D. za rady, které mi během zpracovávání práce poskytovali. Také svým rodičům, kteří mi umožnili studovat. A děkuji svému příteli Martinovi, že stál celou dobu po mém boku a byl mi oporou.

# OBSAH

<b>Úvod</b>	<b>10</b>
<b>1 Kinematické parametry zavěšení</b>	<b>11</b>
1.1 Úhel odklonu kola	11
1.2 Sbíhavost	11
1.3 Příklon rejdové osy	12
1.4 Záklon rejdové osy	13
1.5 Ackermanova geometrie	14
1.6 Střed klopení	15
1.7 Anti-charakteristiky	16
<b>2 Lichoběžníkové zavěšení</b>	<b>19</b>
<b>3 Cross-country rally</b>	<b>20</b>
<b>4 Analýza kinematiky zavěšení</b>	<b>21</b>
4.1 Volba jízdnicích manévrů	21
4.2 Výchozí model automobilu	23
4.3 Kinematické charakteristiky výchozího modelu vozidla	24
4.4 Analýza simulací výchozího modelu vozidla	30
4.4.1 Akcelerace	30
4.4.2 Brzdění	32
4.4.3 Přejezd přes nerovnost	33
4.4.4 Jízda po kruhu s konstantním poloměrem	36
4.4.5 Skokové natočení volantu	41
4.5 Model off-roadového vozidla	44
4.6 Kinematické charakteristiky modelu off-roadového vozidla	45
4.7 Model pneumatik off-roadového vozidla	51
4.8 Analýza simulací off-roadového modelu vozidla	53
4.8.1 Akcelerace	53
4.8.2 Brzdění	55
4.8.3 Přejezd přes nerovnost	59
4.8.4 Jízda po kruhu s konstantním poloměrem	61
4.8.5 Skokové natočení volantu	68
4.9 Shrnutí poznatků	73
<b>Závěr</b>	<b>75</b>
<b>Použité informační zdroje</b>	<b>77</b>
<b>Seznam použitých zkratk a symbolů</b>	<b>78</b>

## ÚVOD

Problematika jízdních vlastností vozidla je velmi obsáhlá oblast zahrnující ovladatelnost vozu, stabilitu, bezpečnost, jízdní komfort a výkonnost. Je ovlivňována téměř všemi navrhovanými prvky automobilu, ať už jde o rozměry, rozložení hmoty nebo konstrukce podvozku. V případě zavěšení závisí na vlastnostech pneumatik, odpružení a nastavení kinematiky. Kinematika zavěšení nebo přesněji kinematické charakteristiky jsou nejčastěji prezentovány jako závislost polohy kol vůči vozovce nebo karoserii, polohy středů klonění a klopení, převodu odpružení a dalších na zdvihu kola. Jsou dány konstrukcí zavěšení, kterou lze popsat polohou kinematických bodů. Primární úlohou zavěšení je zajistit stálý kontakt pneumatiky s vozovkou a umožnit přes tento kontakt přenos sil, které mají přímý dopad na chování vozidla. Schopnost vyvinout potřebné síly a distribuce těchto sil přes odpružení nebo další prvky zavěšení na další části vozidla závisí na kinematice zavěšení. A právě analýza vlivu kinematických charakteristik na jízdní vlastnosti vozidla je cílem této práce. V první části práce je proto vytvořen přehled základních parametrů kinematiky zavěšení, jsou uvedeny jejich definice a obecně známý dopad na chování vozidla. Dále je představena konstrukce a vlastnosti lichoběžníkového zavěšení, jelikož analyzované modely vozidel toto zavěšení používají na přední i zadní nápravě.

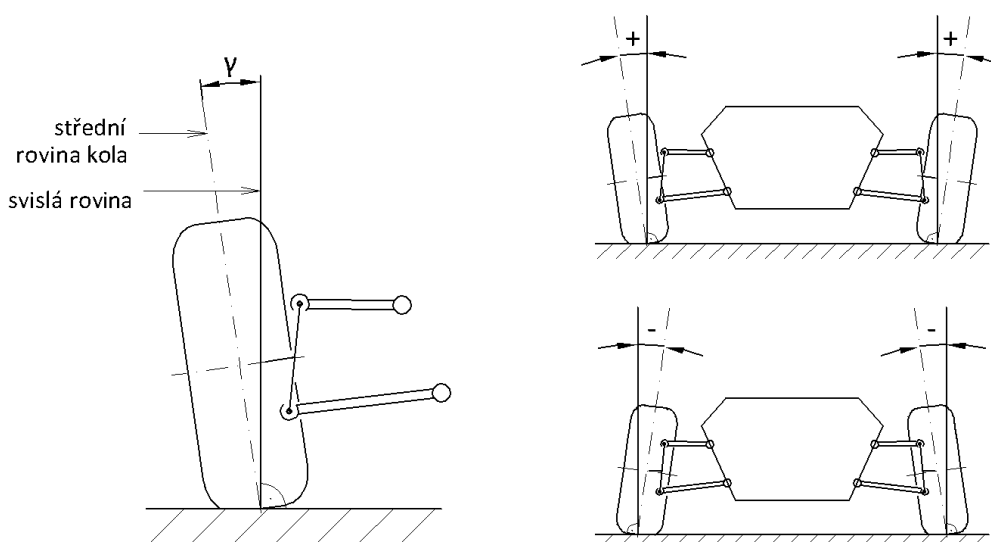
Impulsem pro vytvoření této analýzy je úprava regulací v závodech off-road rally, týkající se používaných pneumatik a rozměrů vozidla. Modifikace významně zasahují do konstrukce zavěšení a takto upravená vozidla, proto musí být zhodnocena z hlediska jízdních vlastností. Analyzovaný multibody model vozidla, je tudíž sestaven na základě off-roadového vozidla splňující nové požadavky. Konkrétní změny v pravidlech jsou představeny v řešeršní části této práce. Samotné analýze off-roadového modelu předchází analýza defaultního modelu vozidla, která nastiňuje, jakým způsobem vozidlo na změny kinematiky reaguje.

# 1 KINEMATICKÉ PARAMETRY ZAVĚŠENÍ

Konstrukce zavěšení určuje relativní pozici kol vůči vozovce a automobilu, čímž je ovlivňována schopnost pneumatik přenášet síly. Právě geometrická pozice kol a rejdové osy vůči dané referenci se nazývá geometrií kol. Popis základních parametrů a jejich vliv na jízdní vlastnosti vozidla je popsán v první části této kapitoly. Druhá část je věnována dalším parametrům zavěšení jako jsou střed klopení a klonění, které taktéž mají vliv na chování vozidla.

## 1.1 ÚHEL ODKLONU KOLA

Úhel odklonu kola  $\gamma$  je úhel mezi střední rovinou kola svislou rovinou viz *Obr. 1*. Je kladný, pokud se horní část kola oddaluje od vozidla a záporný, pokud se přibližuje.

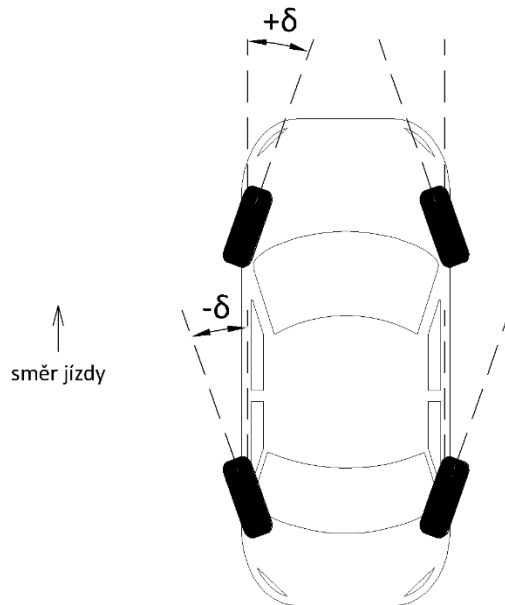


*Obr. 1* Úhel odklonu kola  $\gamma$ ; kladný a záporný úhel

Vlivem odklonu vzniká boční síla snažící se vyrovnat naklopení kola. Tato síla je podstatně menší než boční síla vyvolaná směrovou úchylkou. Pro vyvinutí stejně velké příčné síly, jakou vytvoří  $1^\circ$  směrové úchylky, je potřeba 10 až  $15^\circ$  odklonu v případě radiálních pneumatik. Diagonální pneumatiky, ačkoli mají větší tuhost v odklonu, stále vyžadují okolo 4 až  $6^\circ$  odklonu pro vytvoření stejně velké příčné síly. Každopádně boční síla způsobená odklonem se přidává k boční síle způsobené směrovou úchylkou a ovlivňuje tak stáčitost vozu. Její velikost závisí na zatížení, rychlosti a v případě diagonálních pneumatik i na tlaku v pneumatice. Úhel odklonu kola se mění s propružením kola a také s naklopením vozidla, proto má významný vliv na zatáčení vozidla. Během zatáčení se vzniklý úhel naklopení přičte k úhlu odklonu kol vůči karoserii, což dá celkový úhel odklonu. [1]

## 1.2 SBÍHAVOST

Úhel sbíhavosti  $\delta$  je úhel mezi rovinou kola a podélnou rovinou vozidla. Je-li přední část kola natočena k vozidlu, má úhel kladnou hodnotu (sbíhavost), pokud je natočena od vozidla, má úhel zápornou hodnotu (rozbíhavost) viz *Obr. 2*.



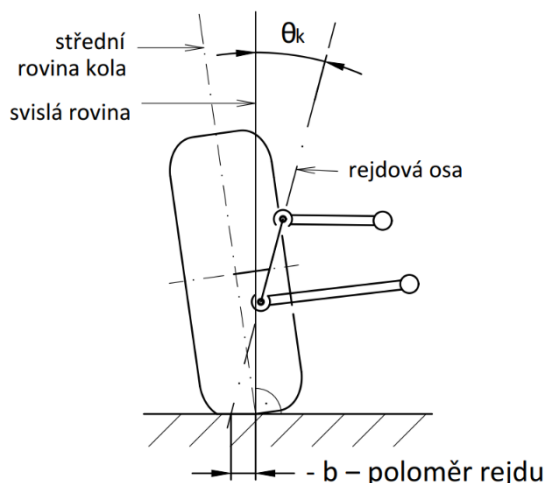
Obr. 2 Úhel sbíhavosti  $\delta$ , kladný a záporný úhel

Na správném nastavení změny sbíhavosti se zdvihem závisí, zda bude vozidlo směrově stabilní při přímé jízdě, chování bude předvídatelné a příjemné a jak bude citlivé na drobné změny natočení volantu. Mírná změna do rozbíhavosti při počátku stlačení kola umožňuje kolu ustoupit od hrbolu na vozovce a snižuje tak neklid v řízení na nerovných cestách. Jestliže se při zatáčení vnitřní kolo natáčí do sbíhavosti, zmenšuje se jeho směrová úchylka. Tím je zabráněno zbytečnému opotřebením pneumatiky, které by mohlo vzniknout v důsledku příliš velké směrové úchylky na méně zatíženém vnitřním kole. Rozbíhavost kol při zatáčení vyvolává tendenci nápravy vyjíždět ze zatáčky, což v případě přední nápravy způsobuje nedotáčivost a v případě zadní přetáčivost. Sbíhavost kol oproti tomu na přední nápravě způsobuje přetáčivost a na zadní nedotáčivost. [2]

Sbíhavost výrazně ovlivňuje opotřebením pneumatik, proto bývá statická sbíhavost nastavena na velmi malou hodnotu v rozmezí jednoho stupně. Pro nepoháněná kola je doporučena malá sbíhavost a pro poháněná kola malá rozbíhavost. [2]

### 1.3 PŘÍKLON REJDOVÉ OSY

Rejdová osa je přímka procházející kulovými klouby zavěšení, kolem které se kolo natáčí. V příčné rovině vozidla v pohledu zepředu lze nalézt příklon rejdové osy  $\theta_k$  Obr. 3, což je úhel, který svírá rejdová osa se svislicí. V závislosti na příklonu rejdové osy a také její poloze vzniká poloměr rejdu  $b$ . Je to vzdálenost mezi pomyslným průsečíkem rejdové osy s vozovkou a středem styku pneumatiky s vozovkou promítnutá do příčné roviny vozidla. Pokud je průsečík blíže středu vozidla než styk pneumatiky s vozovkou, je poloměr rejdu kladný, v opačném případě je záporný. Příklon rejdové osy bývá obvykle 0 až 20° tak, aby byl malý poloměr rejdu. [2]

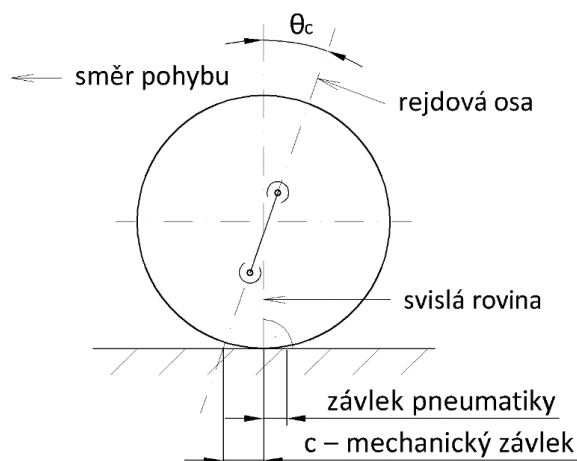


Obr. 3 Příklon rejdové osy  $\theta_k$  se záporným poloměrem rejdou

Podélné síly vznikající v kontaktu pneumatiky s vozovkou, působí na rameni poloměru rejdou a vytváří tak moment přenášející se do řízení. Nulový poloměr rejdou tento moment eliminuje. Záporný poloměr rejdou se využívá, jelikož napomáhá stabilizaci přímé jízdy vozidla při brzdění na vozovce s různou přilnavostí pod pravým a levým kolem. [2]

#### 1.4 ZÁKLON REJDOVÉ OSY

Při bočním pohledu na zavěšení Obr. 4 je možné pozorovat sklon rejdové osy vůči svislici, který se nazývá záklon rejdové osy  $\theta_c$ . Je vždy kladný a pohybuje se v rozmezí 0 až 5°. Se záklonem souvisí mechanický závlek  $c$ , což je vzdálenost v podélné rovině mezi pomyslným průsečíkem rejdové osy s rovinou vozovky a svislou rovinou procházející středem kola. Spolu se závlekiem pneumatiky tvoří rameno, na kterém působí boční síly. Takto vzniklý vratný moment navrácí kola do přímého směru a napomáhá ke stabilitě vozidla. Změna závleku s propružením kol je většinou nežádoucí. [2]



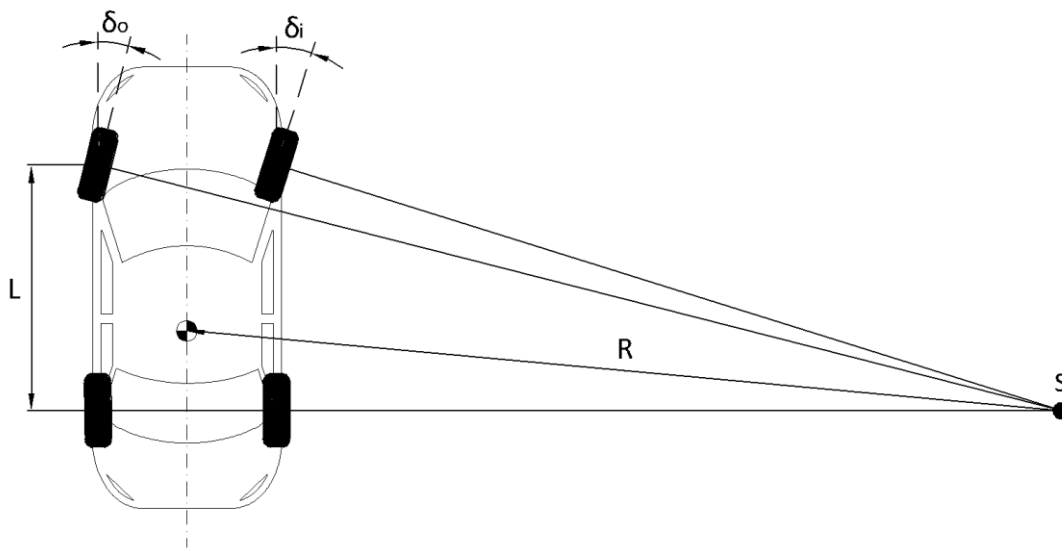
Obr. 4 Záklon rejdové osy  $\theta_c$  s vyznačeným závlekiem

Během zatáčení kol dochází kvůli příklonu a záklonu rejdové osy ke změně úhlu odklonu. Kladný příklon rejdové osy způsobuje při natočení kol zvětšení odklonu na vnějším kole.

Obvykle platí, že při natočení kol o  $30^\circ$  se za každý stupeň příklonu odklon zvýší o  $0,15^\circ$ . Kladný záklon rejdové osy způsobuje při natočení kol zmenšení odklonu na vnějším kole. Při natočení kol o  $30^\circ$  se za každý stupeň záklonu odklon zmenší o  $0,5^\circ$ . [2]

## 1.5 ACKERMANOVA GEOMETRIE

Úhel natočení předních kol při nízké rychlosti popisuje Ackermanova geometrie. Střed otáčení vozidla leží na prodloužené ose zadních kol. Přední kola jsou natočená tak, aby kolmice na roviny kol vedoucí z jejich středů se protnuly v jednom bodě ve středu otáčení viz *Obr. 5*. Jestliže se v jednom bodě neprotnou, bude docházet k bočnímu prokluzu pneumatik. Vnější kolo má menší úhel natočení než vnitřní kolo, jelikož opisuje dráhu o větším poloměru.



*Obr. 5* Natočení řízených kol v souladu s Ackermanovou geometrií

Průměrný úhel natočení předních kol (za předpokladu malých natočení) je označován jako Ackermanův úhel, jehož hodnota vychází ze vztahu, dle [1] str. 196:

$$\delta_A = \frac{L}{R}, \quad (1)$$

kde  $L$  je rozvor kol a  $R$  je poloměr zatáčení.

Odchylka od teoretických úhlů natočení předních kol výrazně zvyšuje opotřebení pneumatik a ovlivňuje velikost momentu vracející kola do přímého směru. Pokud je dodržena Ackermanova geometrie, tak se moment v řízení zvyšuje spolu s natočením kol. Jestliže jsou kola paralelně, moment se s rostoucím natočením kol nejprve zvyšuje, ale následně může klesnout, až do záporných hodnot. [1]

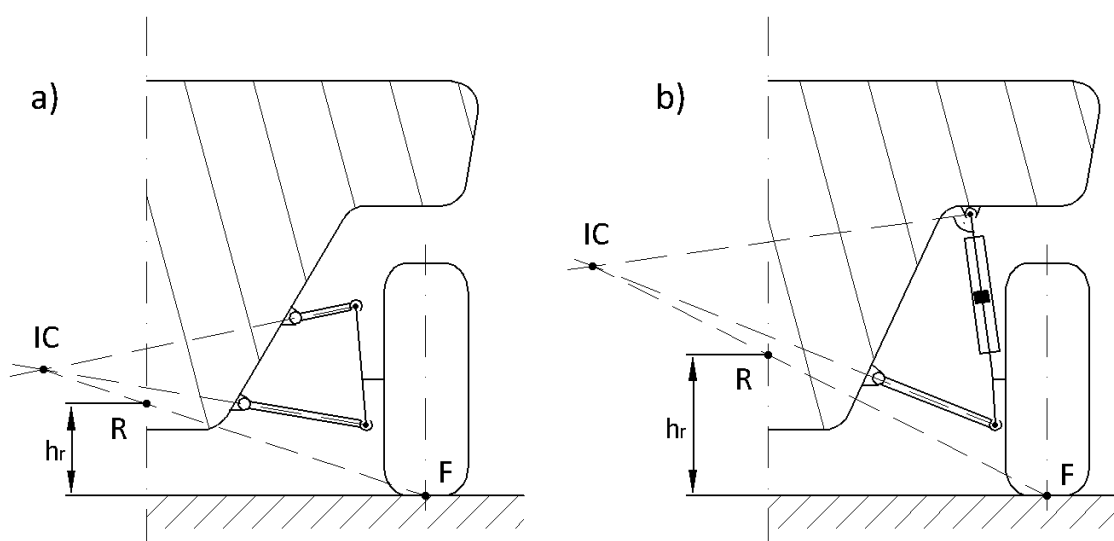
## 1.6 STŘED KLOPENÍ

Představa středu klopení je velmi nápomocný nástroj, jelikož výška středu klopení stručně shrnuje vliv uspořádání spojovacích prvků zavěšení především na zatáčení. Díky ní je možné jednoduše spočítat úhel klopení a příčný přenos zatížení zvláště pro přední i zadní nápravu. [2]

Střed klopení může být určen na základě silových účinků nebo kinematicky z geometrie zavěšení. Silově je střed klopení definován jako bod ve svislé rovině procházející středy dvojice kol, ve kterém boční síly působící na odpruženou hmotu nezpůsobují její klopení. Obvykle se uvažuje, že se střed klopení nachází v podélné rovině procházející středem vozidla, což platí, pokud je vozidlo symetrické a nedochází ke klopení. Během klopení či propružení kol se poloha středu klopení mění. [2]

Silové určení středu klopení je přesnější. Příčné síly vyvolané neodpruženou hmotou působící v kontaktu pneumatik s vozovkou směřují do středu klopení. Tyto síly lze rozložit na horizontální a vertikální složky. Vertikální složka této síly se nazývá „jacking force“. Neovlivňuje zatížení kol, ale nese váhu odpružené hmoty, způsobuje tak klesání nebo zvedání karoserie. [2]

Kinematické určení polohy středu klopení je zobrazeno na Obr. 6. Za předpokladu symetrie je kreslena pouze polovina vozidla. Nejprve je potřeba nalézt pól klopení kola (IC – instant center). V případě lichoběžníkového zavěšení se pól nachází v průsečíku dvou přímek procházející úchyty horního ramene a spodního ramene. Pro zavěšení MacPherson je využito prodloužení spodního ramene a kolmice na vzpěru (nikoli rejdovou osu), v bodě jejich průtnutí je pól. Následně sestavená přímka spojující pól klopení s bodem kontaktu pneumatiky s vozovkou (F) protíná osu symetrie vozidla právě v místě středu klopení (R – roll center). Výška středu klopení  $h_r$  je svislá vzdálenost středu klopení od roviny vozovky. Spojnice středů klopení předního a zadního zavěšení se nazývá osa klopení. Mnohdy je uvažováno, že se vozidlo během zatáčení naklápí kolem této osy, ale toto užitečné zjednodušení neplatí při působení velkých příčných zrychlení. [2]



Obr. 6 Určení výšky středu klopení a) pro lichoběžníkové zavěšení; b) pro zavěšení MacPherson

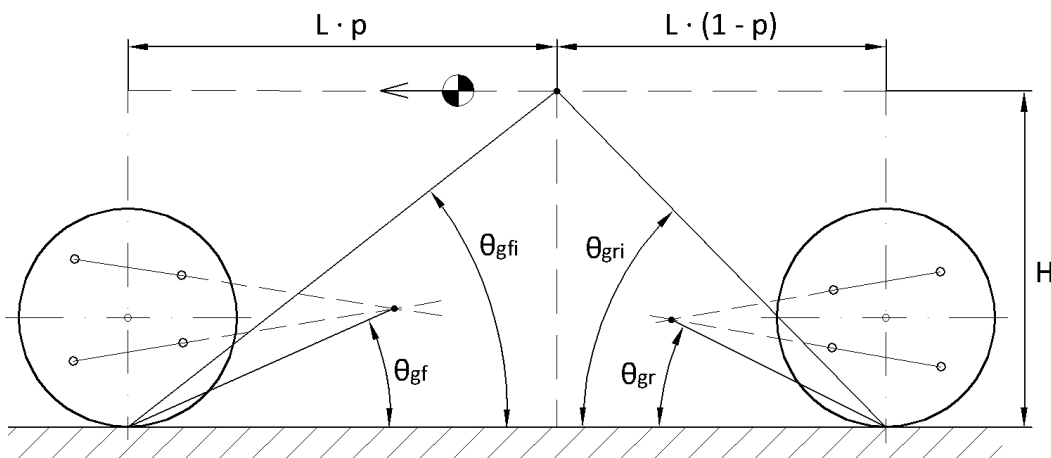
Klopení vozidla geometricky odpovídá tomu, jako by jedno kolo bylo stlačeno a druhé vyvšeno. Během toho běžně dochází ke změně natočení kol (roll steer), které má v případě nezávislého zavěšení stejný účinek jako natočení kol vlivem propružení (bump steer). Naklopení vozidla také způsobuje změnu odklonu kol vůči karoserii, ale především vůči vozovce. [2]

S větší výškou středu klopení se zvyšuje geometrický přenos zatížení (procházející ramena zavěšení), zmenšuje se elastický přenos zatížení (procházející přes pružiny), tudíž se zmenšuje i úhel klopení a natočení kol vlivem klopení, zároveň dochází k většímu příčnému posunutí bodu kontaktu pneumatiky s vozovkou. Výška středu klopení se obvykle pochybuje v rozmezí 50 až 200 mm. [2]

## 1.7 ANTI-CHARAKTERISTIKY

Stejně jako příčné zrychlení vyvolává příčný přenos zatížení, tak i podélné zrychlení způsobuje podélný přenos zatížení. Poloha středu klonění v podélné rovině, podobně jako poloha středu klopení v příčné rovině, ovlivňuje míru klonění a velikost přenosu zatížení procházejícího skrze ramena zavěšení nebo pružiny. Vhodné uspořádání zavěšení umožňuje přenos více zatížení přes pevnou konstrukci než přes pružiny, a tím dochází k menšímu klonění. Takové chování je považováno jako funkce anti-charakteristik. V případě brzdění se jedná o anti-dive na přední nápravě a anti-rise (v této práci označováno jako anti-lift) na zadní nápravě, v případě akcelerace jde o anti-lift na přední nápravě a anti-squat na zadní nápravě. Podobně lze tuto myšlenku převést i do příčné roviny, kde při působení bočních sil můžeme vliv výšky středu klopení nazvat jako anti-roll. [2]

Pro výpočet anti-charakteristik je potřeba znát sklon přímk spojujících působíště brzděné nebo hnací síly se středem klonění a „ideální“ přímkou představující působení 100 % anti-charakteristiky, kdy veškerý přenos zatížení je vedený skrz pevné prvky zavěšení. Princip určení anti-dive a anti-lift pro brzdění u lichoběžníkového zavěšení je zobrazen na Obr. 7. Střed klonění (E) se nachází v průsečíku přímk procházejících úchyty spodního a horního ramene. Působíště brzděné síly závisí na tom, zda je brzda v kole nebo mimo kolo. Pokud je brzda v kole, brzděná síla působí v kontaktu pneumatiky s vozovkou (G – ground) a platí úhel  $\theta_{gf}/\theta_{gr}$ , pokud je mimo kolo, působí síla ve středu kola (C – center) a platí úhel  $\theta_{cf}/\theta_{cr}$ . [2]



Obr. 7 Určení anti-dive na přední nápravě a anti-lift na zadní pro brzdy v kolech

Anti-dive na přední nápravě lze vypočítat ze vztahu, dle [2] str. 275:

$$J_{ad} = \frac{y_f}{x_f} \cdot \frac{L}{H} \cdot p \cdot 100 \% = \frac{\tan \theta_{gf}}{\tan \theta_{gfi}} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

kde  $p$  je podíl brzděné síly na přední nápravě,  $L$  je rozvor kol,  $H$  je výška těžiště,  $y_f$  a  $x_f$  je délka předního ramene kývání ve svislém a podélném směru,  $\theta_{gf}$  je úhel ramene kývání přední nápravy (brzda v kole) a  $\theta_{gfi}$  je ideální úhel ramene kývání přední nápravy.

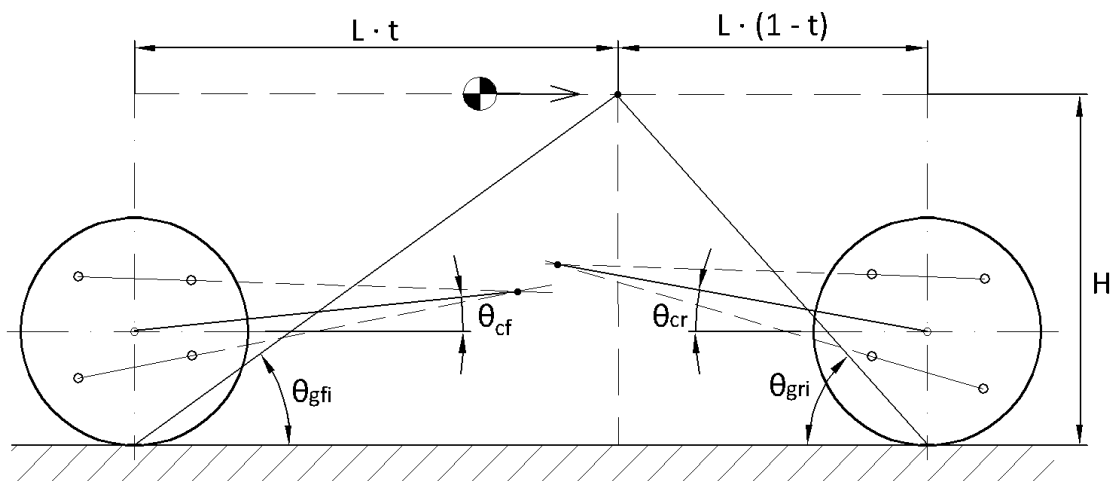
Anti-lift na zadní nápravě lze vypočítat ze vztahu, dle [2] str. 275:

$$J_{ar} = \frac{y_r}{x_r} \cdot \frac{L}{H} \cdot (1 - p) \cdot 100 \% = \frac{\tan \theta_{gr}}{\tan \theta_{gri}} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

kde  $y_r$  a  $x_r$  je délka zadního ramene kývání ve svislém a podélném směru,  $\theta_{gr}$  je úhel ramene kývání zadní nápravy (brzda v kole) a  $\theta_{gri}$  je ideální úhel ramene kývání zadní nápravy.

Běžně anti-dive a anti-lift nedosahují větších hodnot než 50 %. Z hlediska jízdních vlastností je příliš velká hodnota nežádoucí. Se 100 % by nedocházelo ke klonění při brzdění, což by pro řidiče mohlo být matoucí. Změna záklonu rejdové osy na předním zavěšení by mohla ztížit řízení během brzdění a vysoko položení střed klonění zadního zavěšení by mohl zvýšit přetáčivost. [1]

Způsob určení anti-lift a anti-squat pro akceleraci u lichoběžníkového zavěšení je zobrazen na Obr. 8. Postup je obdobný jako pro anti-dive a anti-lift během brzdění, který je popsán výše s tím rozdílem, že hnací síla působí vždy ve středu kola.



Obr. 8 Určení anti-lift na přední nápravě a anti-squat na zadní

Anti-lift na přední nápravě lze vypočítat ze vztahu, dle [2] str. 276:

$$J_{al} = \frac{y_f - r_w}{x_f} \cdot \frac{L}{H} \cdot t \cdot 100 \% = \frac{\tan \theta_{cf}}{\tan \theta_{gfi}} \cdot 100 \%, \quad (4)$$

kde  $t$  je podíl hnací síly na přední nápravě,  $\theta_{cf}$  je úhel ramene kývání přední nápravy a  $r_w$  je poloměr kola.

Anti-squat na zadní nápravě lze vypočítat ze vztahu, dle [2] str. 276:

$$J_{as} = \frac{y_r - r_w}{x_r} \cdot \frac{L}{H} \cdot (1 - t) \cdot 100 \% = \frac{\tan \theta_{cr}}{\tan \theta_{gri}} \cdot 100 \%, \quad (5)$$

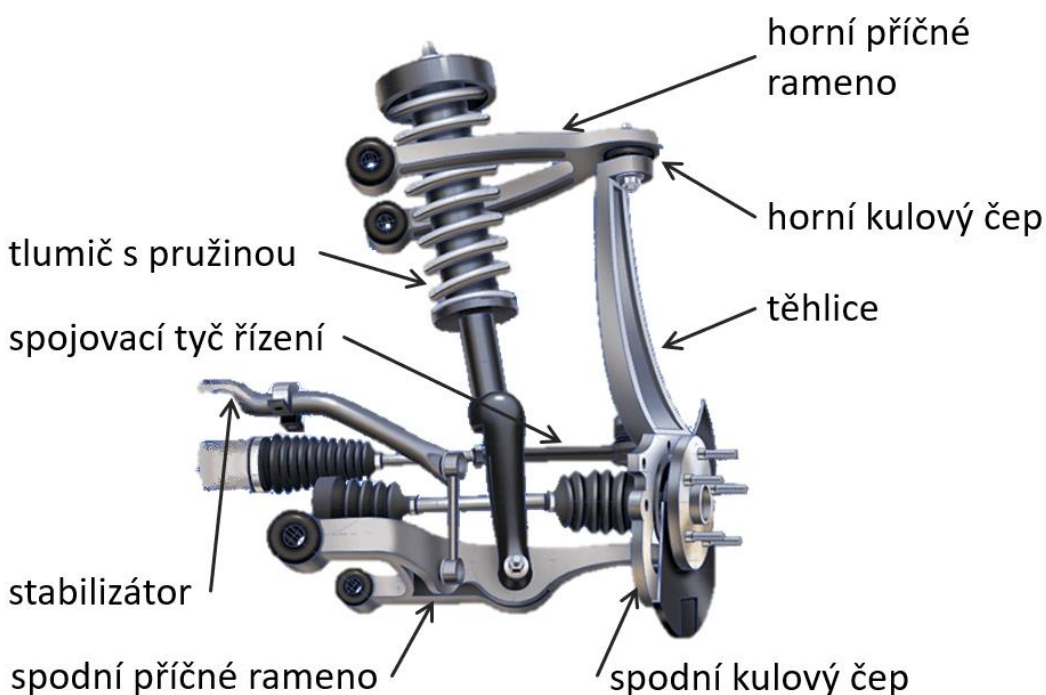
kde  $\theta_{cr}$  je úhel ramene kývání zadní nápravy.

Pokud náprava není hnaná, nemůže se na ní projevit ani anti-charakteristika. Pokud je poháněná pouze přední náprava  $t = 1 \Rightarrow J_{as} = 0$ , pokud pouze zadní  $t = 0 \Rightarrow J_{al} = 0$ .

## 2 LICHOBĚŽNÍKOVÉ ZAVĚŠENÍ

Zavěšení vozidel musí splňovat mnoho požadavků, ať už jde o přenesení sil, vhodnou geometrii kol, říditelnost nebo malé zástavbové rozměry a malou hmotnost. Nezávislé zavěšení v mnoha ohledech poráží tuhou nápravu, a tudíž je používáno jako přední zavěšení téměř u všech osobních automobilů a lehkých nákladních vozidel. [1]

Lichoběžníkové zavěšení *Obr. 9* je tvořeno dvěma příčnými trojúhelníkovými rameny, těhlicí spojující ramena s čepem kola a tlumič s pružinou připojený k jednomu z ramen nejčastěji ke spodnímu. Ramena jsou na vnitřní straně rotačně upevněna k rámu vozidla a většinou nemají stejnou délku, horní rameno bývá kratší. [1]



*Obr. 9* Popis konstrukce lichoběžníkového zavěšení [4]

Z hlediska kinematických vlastností je takové rozložení výhodné. Sklon ramen v příčné rovině určuje polohu středu klopení a v podélné rovině polohu středu klonění. Délka ramen ovlivňuje úhlové natočení kol při propružení a vyvěšení. Kratší horní rameno zajišťuje vhodnou změnu odklonu při propružení, která vyrovnává změnu odklonu způsobenou naklopením vozidla, tj. záporný odklon při stlačení a kladný odklon při vyvěšení. Na vzdálenosti mezi horním a spodním ramenem závisí velikost sil působících na ramena. Čím větší je vzdálenost, tím menší jsou síly, díky čemuž je i deformace zavěšení menší a řízení kol přesnější. [3]

Díky svým širokým možnostem nastavení se lichoběžníkové zavěšení používá pro přední nápravy osobních automobilů, kde se svou zástavbou nejlépe doplňuje podélně vepředu uložený motor s pohonem vedeným na zadní nápravu. Závodní automobily mívají lichoběžníkové zavěšení často vpředu i vzadu, kdežto u osobních aut bývá vzadu nahrazeno převážně kyvadlovou úhlovou nápravou, klikovou nápravou nebo víceprvkovým zavěšením. [1]

### 3 CROSS-COUNTRY RALLY

Cross-country rally také nazývané jako Rally raid jsou offroadové závody probíhající několik dní na území jednoho nebo více států. Organizace FIA rozděluje tyto závody do tří kategorií Cross-country Rally, Cross-country Baja a Cross-country Marathon Rally. Nejznámější maratonskou rally je Rally Dakar trvající až 15 dní, která je od roku 2022 zahrnuta do nového světového šampionátu FIA World Rally-Raid Championship. S novým ročníkem přišla také nová kategorie vozidel T1+ doplňující stávající kategorie automobilů skupiny T1. [5]

Kategorie T1+ umožňuje vozidlům s pohonem 4x4 využít především větší rozsah zdvihu a větší pneumatiky, které dříve mohly mít pouze vozidla s pohonem 4x2. Konkrétní změny jsou zvětšení maximálního zdvihu z původních 280 mm na 350 mm, použití pneumatik o větším průměru, původně max. 810 mm, nově 910 až 940 mm s šířkou stopy 320 mm a o hmotnosti minimálně 12 kg, zvětšení maximální šířky vozidla z původních 2000 mm na 2300 mm, dále výška vozidla a délka rozvoru není nově nijak omezená. [6]

Na start Rally Dakar 2022 bylo postaveno několik vozidel upravených podle nových regulací kategorie T1+. Jejimi zástupci jsou Toyota GR DKR Hilux *Obr. 10*, Prodrive Hunter *Obr. 11* a Ford Raptor RS Cross Country s českým řidičem Martinem Prokopem. Za zmínku stojí také prototyp Audi RS Q E-TRON, který díky hybridnímu pohonu spadá do nově vzniklé kategorie T1 Ultimate zahrnující vozy s alternativními pohony. Ačkoliv se prototyp Audi v mnohém liší, tak musí splňovat stejná pravidla vyjmenovaná v předchozím odstavci. [7]



*Obr. 10* Toyota GR DKR Hilux T1+ (vpravo) v porovnání s předchozí verzí (vlevo) [8]



*Obr. 11* Prodrive Hunter T1+ BRX [9]

## 4 ANALÝZA KINEMATIKY ZAVĚŠENÍ

Výsledky analýzy vlivu kinematiky zavěšení na jízdní vlastnosti vozidla jsou popsány v této kapitole. Nejprve jsou definovány jízdní manévry, na kterých je sledováno chování vozidla. Následuje představení dvou multibody modelů vozidel („výchozí“, „off-roadový“) sestavených pro analýzu. Každý model má několik variant zavěšení s různým průběhem kinematických charakteristik. Aby bylo možné sledovat přímý vliv kinematiky zavěšení, jsou simulace provedeny bez vlivu pružných elementů, ačkoliv v reálných automobilech se jich nachází mnoho. Veškeré výpočtové simulace jsou provedeny v programu Adams Car.

### 4.1 VOLBA JÍZDNÍCH MANÉVRŮ

Simulované jízdní manévry jsou vybrány tak, aby bylo možné zhodnotit jízdní vlastnosti vozidla. Důležité je chování vozidla při zatáčení, které je sledováno dvěma manévry. Další jsou zaměřeny na přímou jízdu, během které je vozidlo zrychlováno, brzděno nebo přejíždí nerovnost na vozovce. Bližší popis manévrů s upřesněním, jaké parametry byly sledovány, je uveden níže. Výběr manévrů je shodný pro oba modely vozidel, ale některé parametry simulace se pro druhý model liší.

- Akcelerace

Zrychlení vozidla je provedeno z určité ustálené rychlosti. Impulsem pro zrychlení je sešlápnutí plynového pedálu na danou úroveň. Vyhodnoceny jsou reakce vozidla, kterými jsou podélné zrychlení a vyvěšení/stlačení tlumičů. Parametry simulace jsou uvedeny v *Tab. 1*, pro simulace off-roadového modelu jsou kvůli dosažení většího zrychlení parametry upraveny.

*Tab. 1* Parametry nastavení simulace akcelerace

výchozí model/off-roadový model			
počáteční rychlost	10 km·h <sup>-1</sup>	doba manévru	20/10 s
škrťací klapka	70/100 %	doba zrychlování	5/0,5 s

- Brzdění

Podobně jako u akcelerace je vozidlo brzděno z počáteční ustálené rychlosti, až do zastavení. Sledovanými parametry jsou podélné zrychlení a vyvěšení/stlačení tlumičů. Parametry simulace jsou uvedeny v *Tab. 2*, pro off-roadový model je zvoleno větší „sešlápnutí“ brzděného pedálu, aby bylo dosaženo dostatečně velkého zpomalení.

*Tab. 2* Parametry nastavení simulace brzdění

výchozí model/off-roadový model			
počáteční rychlost	90 km·h <sup>-1</sup>	doba manévru	10 s
brzda	70/90 %	doba brzdění	3 s

- Přejezd přes nerovnost

Během tohoto manévru vozidlo jede v přímém směru a koly na jedné straně přejede přes vyvýšenou vozovku. Nerovnost má tvar půl periody sinus. Důležitým parametrem je potřebné natočení volantu pro zajištění přímé jízdy. Parametry manévru jsou uvedeny v *Tab. 3*.

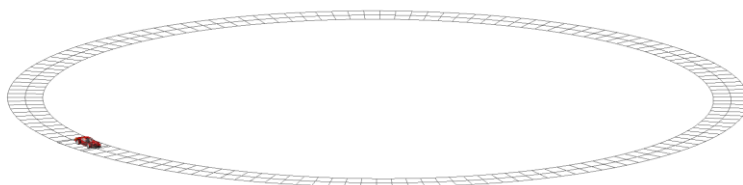
*Tab. 3* Parametry nastavení simulace přejezdu přes nerovnost

ustálená rychlost	30 km·h <sup>-1</sup>	výška nerovnosti	50 mm
-------------------	-----------------------	------------------	-------

- Jízda po kruhu s konstantním poloměrem

Kruhový test je vhodný pro určení stáčivosti vozidla. Vozidlo je nejprve uvedeno do ustáleného stavu zatáčení po kruhové dráze o daném poloměru a s konstantní rychlostí. Následně je rychlost vozidla zvyšována. Sledovanými parametry jsou úhel natočení volantu při zachování poloměru kruhu, stlačení/vyvěšení tlumičů a maximální dosažené příčné zrychlení. Parametry jízdního manévru jsou zapsány v *Tab. 4*, pro off-roadový model je použit větší poloměr kruhu, jelikož s původním nastavením docházelo k dosažení limitů vozidla, což je nežádoucí. Jízda po kruhu je vedena směrem doleva.

*Tab. 4* Parametry nastavení simulace jízdy po kruhu s konstantním poloměrem (vpravo) a obrázek dráhy manévru (vlevo)



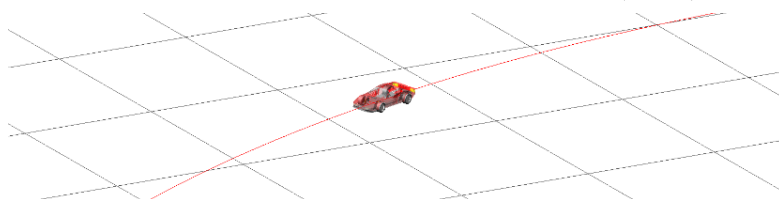
výchozí model/off-roadový model

počáteční rychlost	10 km·h <sup>-1</sup>
konečná rychlost	70 km·h <sup>-1</sup>
doba manévru	30 s
poloměr dráhy	50/55 m

- Skokové natočení volantu

Pomocí manévru se skokovým natočením volantu se zjišťuje, jak rychle vozidlo reaguje na natočení volantu. Z ustáleného stavu, kdy vozidlo jede konstantní rychlostí, je vyvedeno natočením volantu o daný úhel a vozidlo se začne stáčet v levotočivém manévru. Vyhodnocovanými parametry jsou vyvěšení/stlačení tlumičů, rychlost reakce vozidla a rychlost stáčení  $r$ . Nastavení manévru je uvedeno v *Tab. 5*.

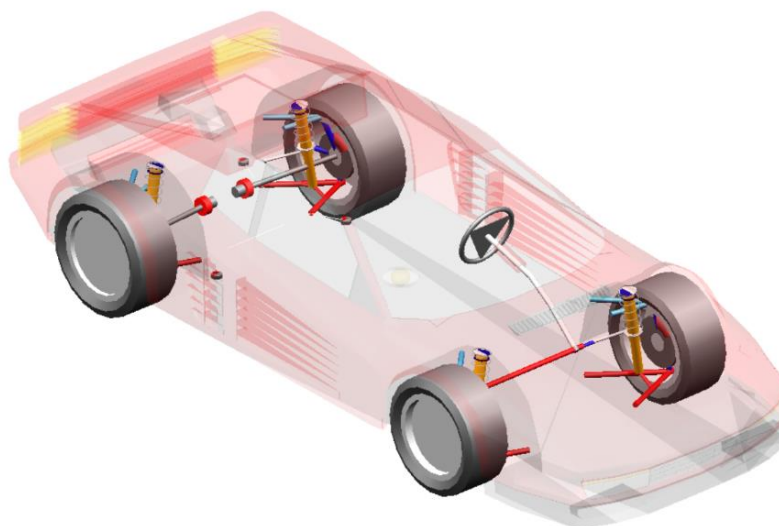
*Tab. 5* Parametry nastavení simulace skokové natočení volantu (vpravo) a obrázek části dráhy manévru (vlevo)



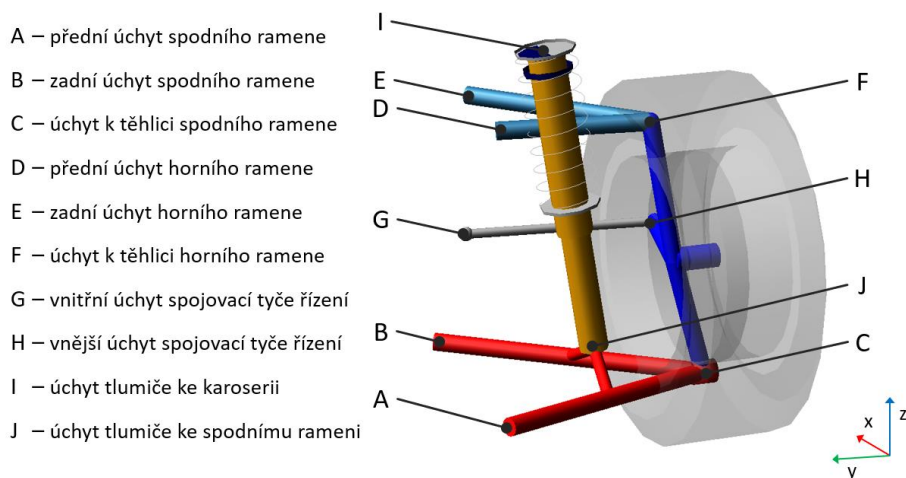
počáteční rychlost	90 km·h <sup>-1</sup>
natočení volantu	35°
doba natočení	2 s
doba manévru	10 s

## 4.2 VÝCHOZÍ MODEL AUTOMOBILU

Prvotní analýza vlivu kinematiky zavěšení na jízdní vlastnosti vozidla byla provedena na defaultním modelu vozidla programu Adams Car. Vybrán byl model MDI\_Demo\_Vehicle *Obr. 13* díky podobnosti zavěšení s reálným vozidlem, jehož analýza následuje. Sestava se skládá z pod systémů pneumatik, řízení, pohonné jednotky, karoserie a předního a zadního zavěšení, které je v obou případech lichoběžníkové. Model předního zavěšení levého kola spolu s popisem jednotlivých kinematických bodů je možné vidět na *Obr. 12*. Model zadního zavěšení je obdobný pouze s tím rozdílem, že navíc obsahuje hnací hřídel a poloha kinematických bodů je jiná. Rozložení brzdných sil je 65 % na přední nápravě a 35 % na zadní, pohon je veden na zadní nápravu. Výchozí varianta vozidla využívaná při simulacích má oproti defaultnímu modelu upravené polohy kinematických bodů viz *Tab. 6*. Pryžová lůžka modelu jsou odstraněna, aby se zamezilo jejich vlivu na chování vozu a mohl být sledován pouze vliv kinematiky. Ostatní parametry vozidla zůstaly zachovány.



*Obr. 13* Výchozí model vozidla MDI\_Demo\_Vehicle s upraveným zavěšením



*Obr. 12* Zavěšení levého předního kola výchozího modelu s popisem kinematických bodů

Tab. 6 Souřadnice kinematických bodů výchozího modelu vozidla

Poloha kinematických bodů výchozí varianty							
levé přední	x [mm]	y [mm]	z [mm]	levé zadní	x [mm]	y [mm]	z [mm]
A	74,21	-369,23	152,65	A	2625,65	-383,05	220,51
B	473,37	-372,02	162,70	B	3026,66	-381,45	220,65
C	251,20	-768,03	135,81	C	2818,62	-761,53	187,44
D	352,20	-443,33	550,39	D	2917,10	-449,04	578,33
E	518,20	-447,93	569,74	E	3076,91	-445,09	578,31
F	290,65	-685,43	559,76	F	2879,43	-680,84	579,85
G	462,39	-425,87	348,11	G	3026,35	-421,91	352,16
H	426,88	-748,42	347,93	H	2979,03	-728,40	336,14
I	295,21	-507,35	688,60	I	2856,32	-499,47	723,46
J	293,05	-590,50	183,92	J	2837,75	-588,19	220,09

### 4.3 KINEMATICKÉ CHARAKTERISTIKY VÝCHOZÍHO MODELU VOZIDLA

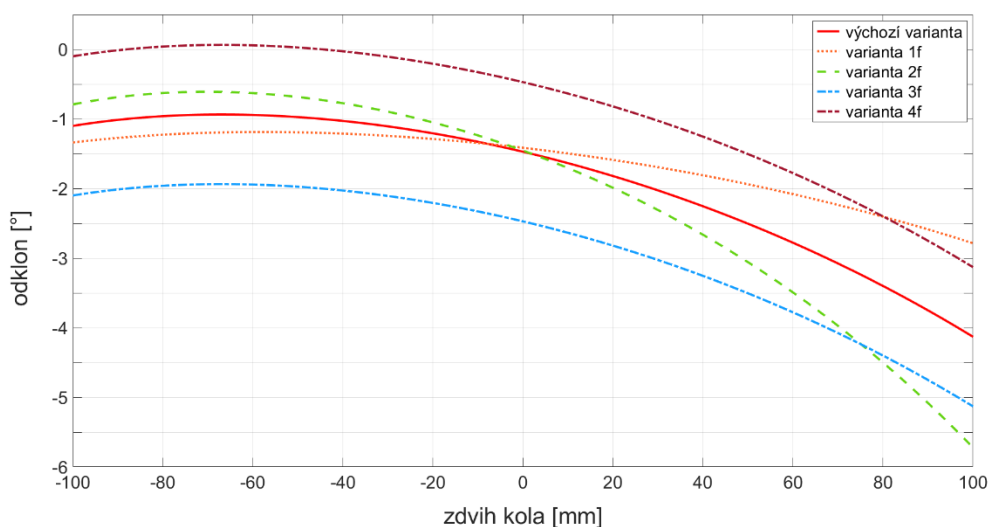
Vliv kinematiky zavěšení na jízdní vlastnosti je sledován pro vybrané parametry geometrie kol, kterými jsou úhel odklonu, úhel sbíhavosti, výška středu klopení, úhel záklonu rejdové osy a anti-dive předního zavěšení, anti-lift a anti-squat zadního zavěšení. Tyto parametry byly vybrány s ohledem na jejich vliv na jízdní vlastnosti vozidla jako klopení, klonění, natočení kol, které jsou sledovány během zvolených manévřů. Pro simulace bylo potřeba vytvořit různé varianty zavěšení tak, aby docházelo ke změně pouze jednoho parametru nebo jen minimální změně ostatních parametrů. Hledání takového nastavení zavěšení je zdlouhavé a není předmětem této práce, proto byly vhodné varianty pro analýzu sestaveny vedoucím práce.

Celkem bylo vytvořeno 28 variant, 14 pro přední zavěšení a 14 pro zadní. Označení jednotlivých variant je uvedeno v Tab. 7. Změny mezi variantami se týkají, jak průběhů charakteristik, tak také statických hodnot daných veličin. Kinematické charakteristiky jsou určeny pro souběžné propružení kol v rozsahu zdvihu od -100 mm do 100 mm. V následujících grafech zobrazujících kinematické charakteristiky pro jednotlivé parametry jsou vykresleny jen ty varianty, které způsobují významnější změny.

Tab. 7 Seznam jednotlivých variant zavěšení výchozího modelu vozidla a jejich označení

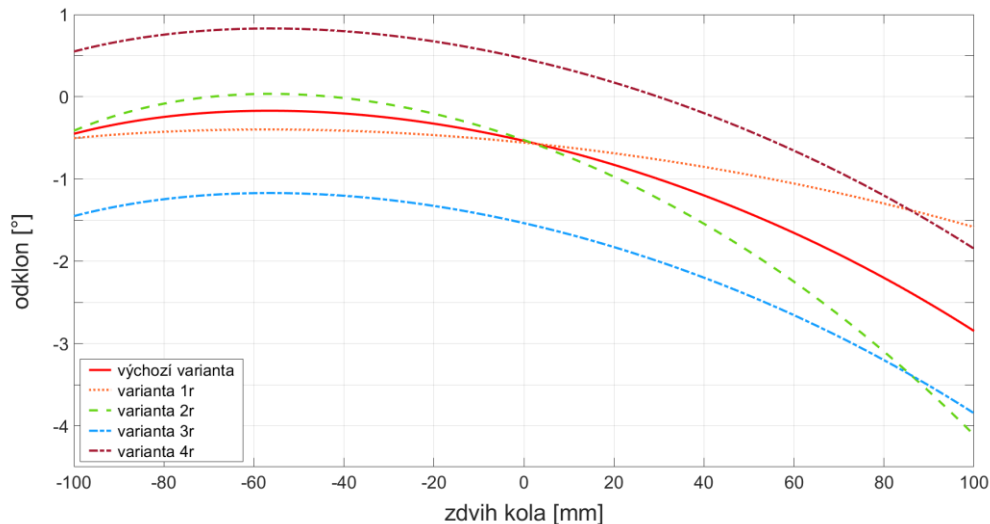
Označení variant		přední zavěšení	zadní zavěšení
výchozí stav		výchozí varianta	výchozí varianta
Úhel odklonu	menší změna	varianta 1f	varianta 1r
	větší změna	varianta 2f	varianta 2r
	menší	varianta 3f	varianta 3r
	větší	varianta 4f	varianta 4r
Úhel sbíhavosti	rostoucí	varianta 5f	varianta 5r
	klesající	varianta 6f	varianta 6r
	menší	varianta 7f	varianta 7r
	větší	varianta 8f	varianta 8r
Výška středu klopení	menší	varianta 9f	varianta 9r
	větší	varianta 10f	varianta 10r
Záklon rejdové osy	menší	varianta 11f	-
	větší	varianta 12f	-
Anti-dive	menší	varianta 13f	-
	větší	varianta 14f	-
Anti-lift	menší	-	varianta 15r
	větší	-	varianta 16r
Anti-squat	menší	-	varianta 17r
	větší	-	varianta 18r

Průběh odklonu v závislosti na zdvihu kola předního zavěšení pro výchozí a další 4 varianty je zobrazen na Obr. 14. Úhel odklonu výchozí varianty je záporný a s rostoucím zdvihem klesá. Varianta 1f s menší změnou odklonu má oproti výchozí variantě větší záporný odklon při vyvěšení kola a menší záporný odklon při stlačení. Přesně obráceně to platí pro variantu 2f s větší změnou odklonu. Další dvě varianty mají totožný průběh jako výchozí varianta, ale statická hodnota úhlu odklonu je změněna o  $-1^\circ$  varianta 3f a o  $+1^\circ$  varianta 4f.



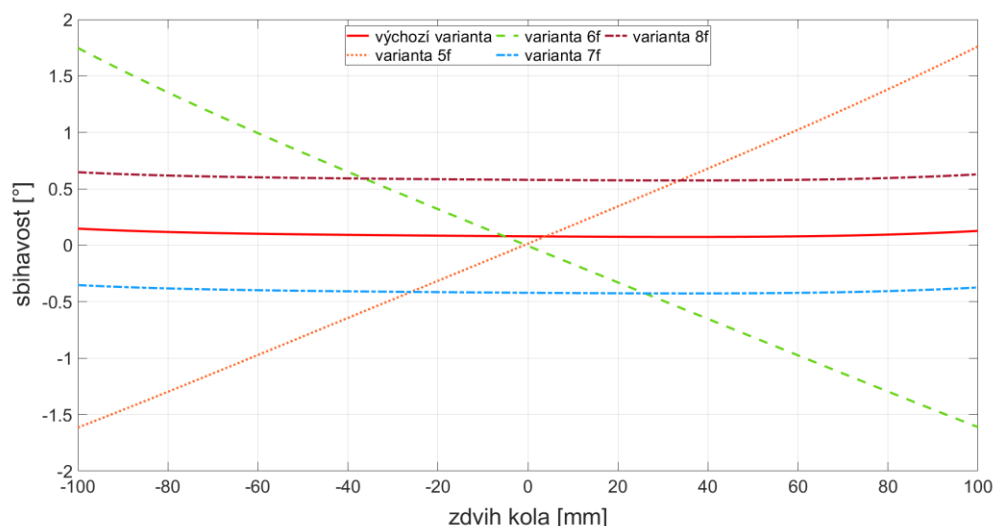
Obr. 14 Průběh úhlu odklonu v závislosti na zdvihu kola pro varianty předního zavěšení

Výchozí varianta zavěšení zadní nápravy má velice podobný průběh odklonu jako přední, jen je celá charakteristika posunutá blíže k nulové hodnotě. Tak jako pro přední zavěšení jsou i zde vytvořeny další 4 varianty, s menší/větší změnou odklonu při propružení kola, tj. varianta 1r/varianta 2r a s menší/větší statickou hodnotou odklonu tj. varianta 3r/varianta 4r. Všechny zmíněné průběhy jsou vykresleny na *Obr. 15*.



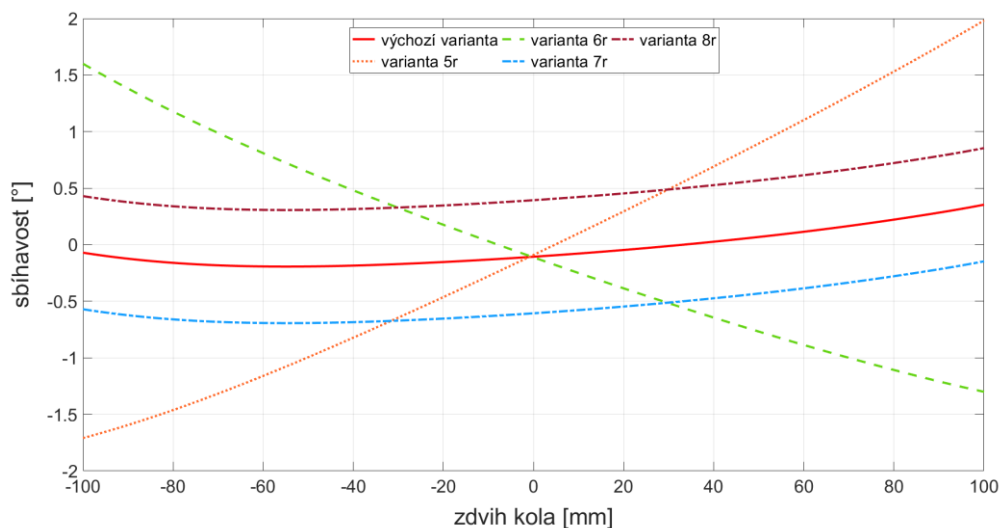
*Obr. 15* Průběh úhlu odklonu v závislosti na zdvihu kola pro varianty zadního zavěšení

Charakteristiky úhlu sbíhavosti pro zavěšení přední nápravy a jeho varianty jsou zobrazeny na *Obr. 16*. Úhel sbíhavosti výchozí varianty je v celém průběhu zdvihu konstantní s hodnotou  $0,1^\circ$ . Varianty 5f a 6f mají stejnou hodnotu sbíhavosti v nulovém zdvihu, ale s rostoucím zdvihem sbíhavost v celém rozsahu pro var. 5f roste, pro var. 6f naopak klesá. Stejný průběh jako výchozí nastavení mají varianty 7f a 8f, ale statická hodnota sbíhavosti se liší o  $-0,5^\circ/+0,5^\circ$  var. 7f/8f.



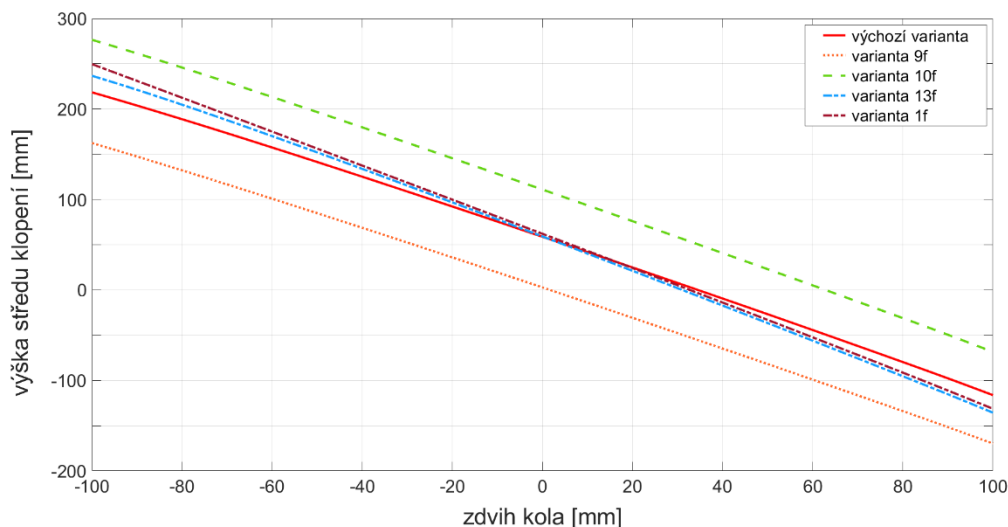
*Obr. 16* Průběh úhlu sbíhavosti v závislosti na zdvihu kola pro varianty předního zavěšení

Úhel sbíhavosti výchozího zavěšení zadní nápravy je zobrazen na *Obr. 17*. Průběh má mírně rostoucí charakter, kde hodnota sbíhavosti přechází ze záporných hodnot do kladných. Změny ve sbíhavosti dalších variant jsou opět obdobné jako u zavěšení přední nápravy. U varianty 5r úhel sbíhavosti s rostoucím zdvihem výrazně roste a u varianty 6f naopak klesá. Varianty 7r a 8r mají rozdíl v úhlu sbíhavosti oproti výchozí variantě  $-0,5^\circ/+0,5^\circ$ .



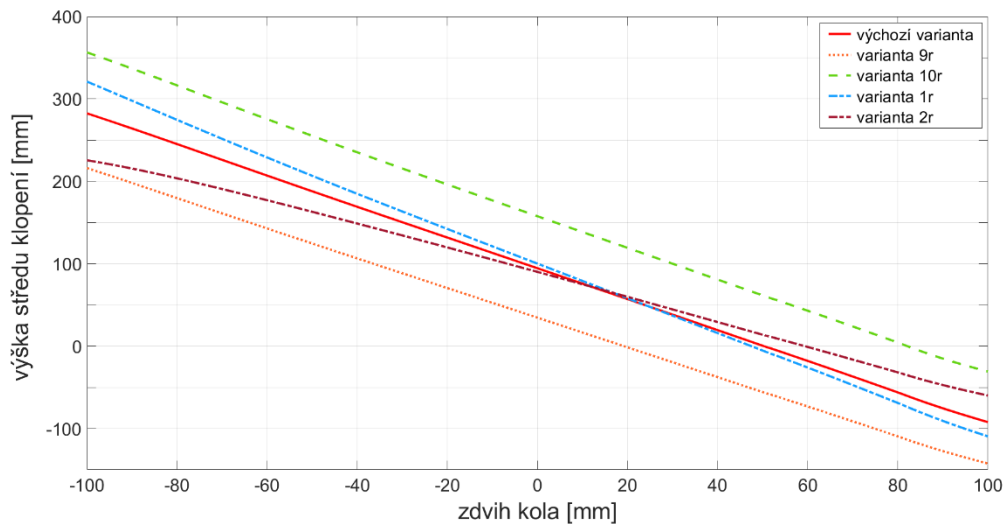
*Obr. 17* Průběh úhlu sbíhavosti v závislosti na zdvihu kola pro varianty zadního zavěšení

Výška středu klopení s rostoucím zdvihem kol klesá, až do záporných hodnot. To platí pro všechny varianty předního i zadního zavěšení. Výška středu klopení výchozí varianty v nulovém zdvihu je 58,7 mm. Varianta 9f má střed klopení položený níže průměrně o 55,7 mm, než výchozí zavěšení a varianta 10f naopak výše průměrně o 52,5 mm. V grafu *Obr. 18* jsou, kromě již zmíněných variant, vykresleny průběhy výšky středu klopení dalších dvou variant, které primárně mění jiný parametr, ale výška středu klopení není zcela zachována. Varianta 13f je nastavení zavěšení, které primárně způsobuje změnu v anti-dive. Nicméně je možné vidět, že výška středu klopení s rostoucím zdvihem klesá rychleji než u výchozí varianty, avšak hodnota v nulovém zdvihu je zachována. Obdobně je na tom i varianta 1f, která způsobuje hlavně změnu v odklonu.



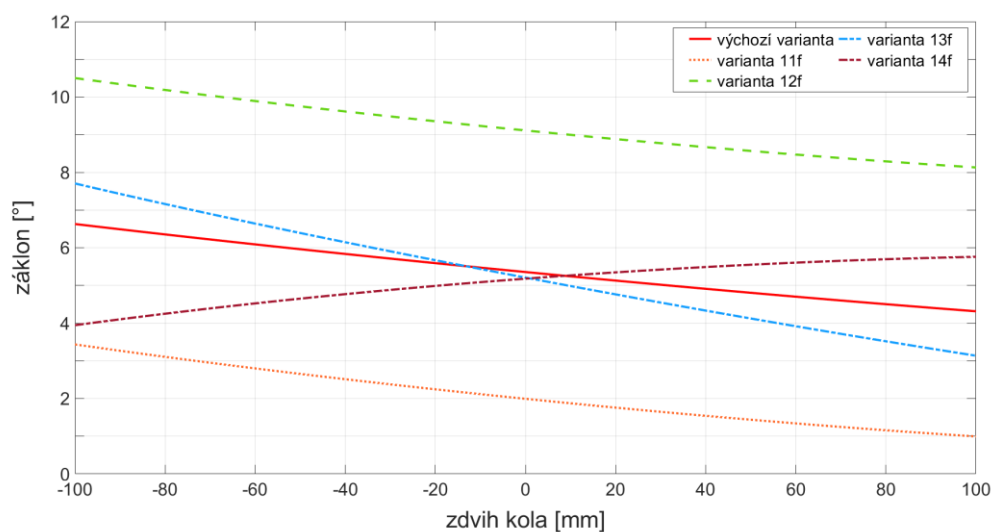
*Obr. 18* Průběh výšky středu klopení v závislosti na zdvihu kola pro varianty předního zavěšení

V grafu *Obr. 19* jsou zobrazeny charakteristiky variant zavěšení, které zmenšují výšku středu klopění o průměrnou hodnotu 59,6 mm varianta 9r a zvyšují o průměrnou hodnotu 64,6 mm varianta 10r vůči výchozímu nastavení. Dále jsou vykresleny i varianty 1r a 2r, jenž mají hlavní vliv na průběh odklonu, ale způsobují změnu i v průběhu výšky středu klopění. U varianty 1r je změna polohy středu klopění s propružením větší a naopak u varianty 2r je menší.



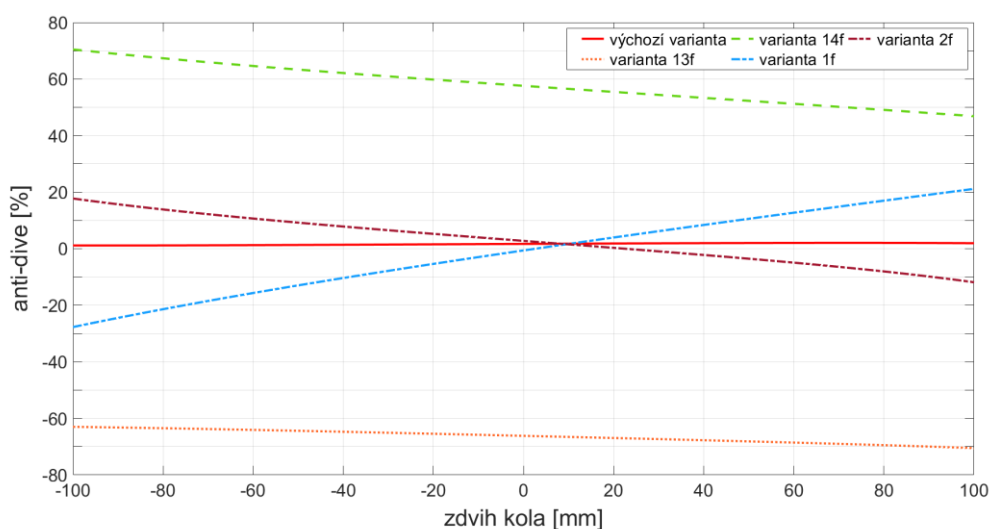
*Obr. 19* Průběh výšky středu klopění v závislosti na zdvihu kola pro varianty zadního zavěšení

Úhel záklonu rejdové osy je určován jen pro přední zavěšení, jelikož zadní nemá rejdovou osu. Průběh závislosti záklonu na zdvihu kola, viděný na *Obr. 20*, má pro variantu 11f stejný tvar jako pro výchozí variantu, ale hodnota záklonu je výrazně menší průměrně o  $3,3^\circ$ . Přesně opačný případ je varianta 12f, která má úhel záklonu větší průměrně o  $3,8^\circ$ . Varianty 13f a 14f způsobují především změnu anti-dive, nicméně záklon také podstatně ovlivňují. Varianta 13f má více klesající charakter průběhu závislosti záklonu na zdvihu kola. Oproti tomu varianta 14f má rostoucí charakter, čímž se liší od ostatních.



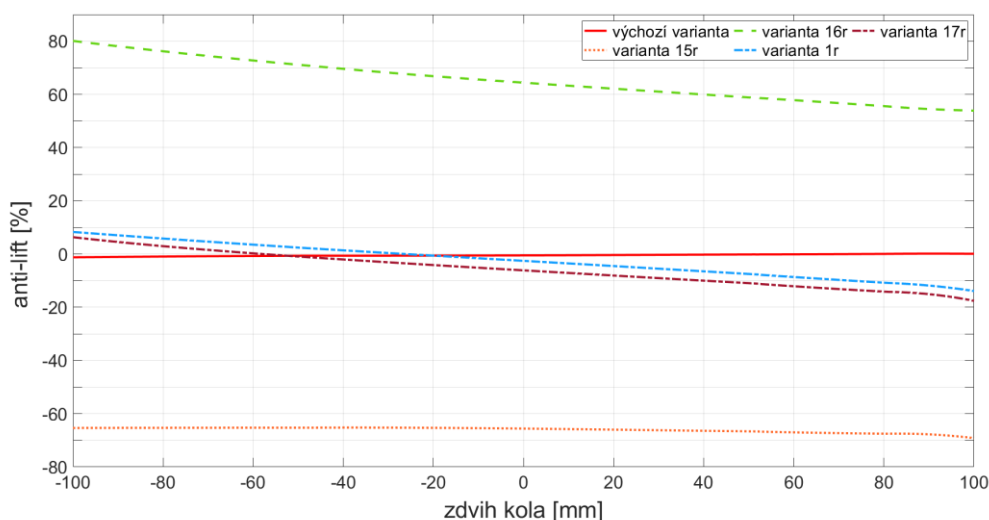
*Obr. 20* Průběh úhlu záklonu rejdové osy v závislosti na zdvihu kola pro varianty předního zavěšení

Anti-dive předního zavěšení výchozí varianty se se zdvihem kola nemění, zůstává konstantní na hodnotě 1,7 %, viz *Obr. 21*. Varianta 13f má výrazně menší, dokonce zápornou hodnotu anti-dive -66,2 % v nulovém zdvihu a s rostoucím zdvihem kola mírně klesá. Klesající je i průběh anti-dive varianty 14f, ale má naopak větší hodnotu 57,6 % v nulovém zdvihu. Varianty 1f/2f jsou, jak už bylo zmíněno, nastavení primárně pro změnu odklonu, ale v průběhu anti-dive způsobují také změnu. Anti-dive varianty 1f s rostoucím zdvihem kola roste ze záporných hodnot do kladných, u varianty 2f je průběh opačný.



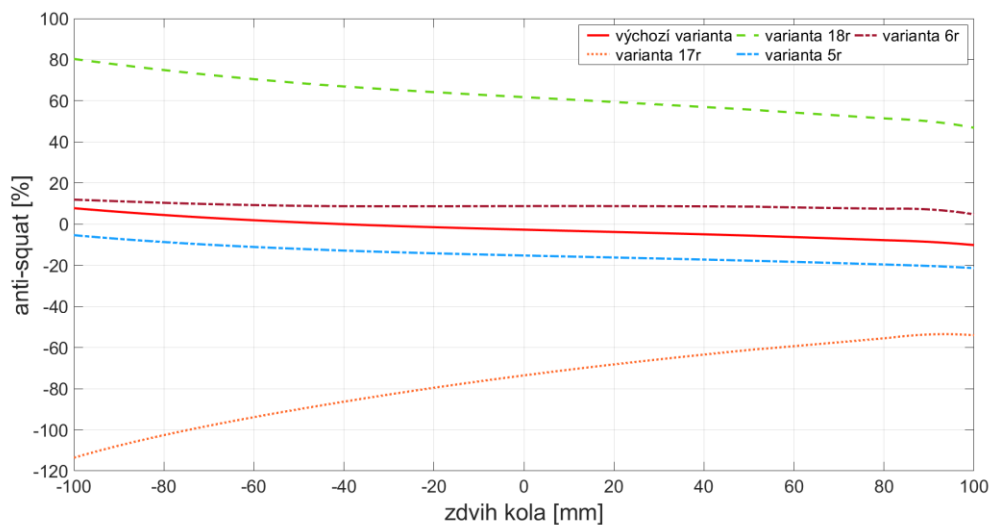
*Obr. 21* Průběh anti-dive v závislosti na zdvihu kola pro varianty předního zavěšení

Na zadním zavěšení je při brzdění důležitý anti-lift, jeho průběh v závislosti na zdvihu kola je zobrazen na *Obr. 22*. Výchozí varianta má téměř konstantní průběh tohoto parametru průměrná hodnota je -0,5 %. Varianta 15r má záporné hodnoty anti-lift v celém rozsahu zdvihu. Průměrně se drží na hodnotě -66,1 %. Naopak varianta 16r má kladné hodnoty a s rostoucím zdvihem mírně klesají. Hodnota anti-lift v nulovém zdvihu varianty 16r je 64,4 %. Stejně tak klesají hodnoty anti-lift variant 1r a 17r, ale změna oproti výchozí variantě je podstatně menší než u předchozích dvou.



*Obr. 22* Průběh anti-lift v závislosti na zdvihu kola pro varianty zadního zavěšení

Charakteristika anti-squat používaná pro hnanou zadní nápravu je důležitá při akceleraci vozidla. Její průběh pro výchozí variantu nastavení zavěšení je mírně klesající a v nulovém zdvihu dosahuje hodnoty  $-2,7\%$ . Varianta 17r má záporné hodnoty anti-squat, které se s rostoucím zdvihem zmenšují. Pro nulový zdvih je to  $-73,5\%$  anti-squat. Druhá varianta s výraznou změnou anti-squat je varianta 18r. Hodnoty anti-squat jsou kladné, mnohem větší než u výchozí varianty a s rostoucím zdvihem klesají. V nulovém zdvihu má varianta 18r  $61,8\%$  anti-squat. Na Obr. 23 jsou zobrazeny průběhy závislosti anti-squat na zdvihu kola dalších dvou variant 5r a 6r, které jsou primárně určeny pro změnu sbíhavosti. Nicméně v jejich případě dochází i k mírné změně anti-squat, ke zmenšení v případě varianty 5r a ke zvětšení u varianty 6r.



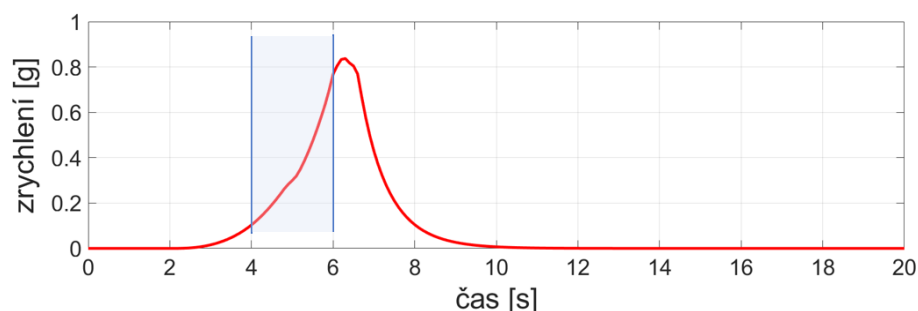
Obr. 23 Průběh anti-squat v závislosti na zdvihu kola pro varianty zadního zavěšení

## 4.4 ANALÝZA SIMULACÍ VÝCHOZÍHO MODELU VOZIDLA

Simulace vybraných jízdních manévřů byly provedeny na výchozím modelu vozidla a všech jeho variantách, u kterých byl předpokládán možný vliv na sledované parametry. Detailní zhodnocení výsledků je uvedeno v této kapitole.

### 4.4.1 AKCELERACE

Po provedení simulace akcelerace vozu bylo vyhodnocováno průměrné zrychlení mezi 4 až 6 s viz Obr. 24. Výsledná hodnota průměrného zrychlení pro výchozí variantu je  $0,3487\text{ g}$ . U ostatních variant se objevovali jen nepodstatné rozdíly. Největší změna nastala u varianty 7r, průměrné zrychlení je nižší o  $0,0011\text{ g}$ . Tato změna je způsobena snížením limitů zadních kol v důsledku větší hodnoty záporné sbíhavosti.

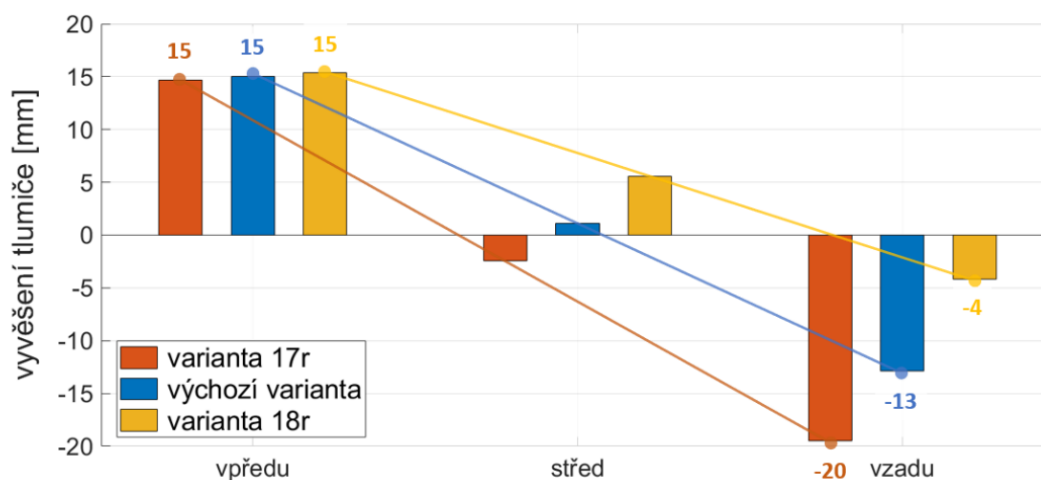


Obr. 25 Zrychlení vozidla během manévru s vyznačenou sledovanou oblastí

Naklonění během zrychlování u vozu s pohonem zadních kol závisí na hodnotě anti-squat. Přední tlumiče výchozího modelu vozidla se při zrychlení 0,82 g vyvěsí o 15 mm, zadní tlumiče se stlačí o 12,9 mm a střed vozu se mírně zvýší o 1,1 mm. V Tab. 8 jsou uvedeny změny vyvěšení tlumičů vůči výchozí variantě pro čtyři varianty zavěšení. Tyto varianty mají jinou charakteristiku anti-squat. K většímu stlačení zadních tlumičů dochází u variant 17r a 5r, které mají nižší hodnotu anti-squat. Zmenšení anti-squat o 70,8 p. b. v nulovém zdvihu zvětší stlačení zadních tlumičů o 6,6 mm (var. 17r). Varianty 18r a 6r s vyšší hodnotou anti-squat více odolávají snížení zádi vozu. Zvýšení hodnoty anti-squat o 64,5 p. b. způsobí, že se zadní tlumiče oproti výchozí variantě stlačí méně o 8,7 mm.

Tab. 8 Vyvěšení tlumičů vozu při akceleraci s rozdílným nastavením anti-squat

Vliv anti-squat na naklonění vozu		ANTI-SQUAT			vyvěšení tlumičů (zrychlení 0,82g)		
		$J_{as}$ [%]			vpředu	střed	vzadu
zdvih kola	[mm]	-20	0	20	[mm]	[mm]	[mm]
výchozí varianta		-1,5	-2,7	-3,8	15	1,1	-12,9
		změna vůči výchozí variantě			změna vůči výchozí variantě		
varianta 17r		-79,6	-70,8	-64,4	-0,3	-3,5	-6,6
varianta 18r		65,7	64,5	63,2	0,4	4,5	8,7
varianta 5r		-12,7	-12,5	-12,4	-0,1	-0,6	-1
varianta 6r		10,2	11,5	12,6	0,1	0,9	1,7



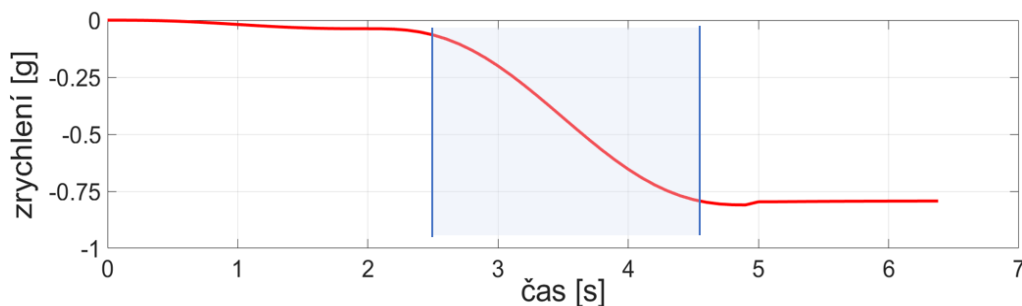
Obr. 24 Zrychlení vozidla během brzdění s vyznačenou sledovanou oblastí

Z Obr. 26 imitující naklonění vozu je patrné, že rozdílné hodnoty anti-squat mají vliv pouze na zadní zavěšení, nikoli na přední. Vyvěšení předních tlumičů zůstává téměř stejné, liší se pouze v desetinách milimetru.

Jak bylo očekáváno, při akceleraci se projevil vliv charakteristiky anti-squat. Její vyšší hodnota zabraňuje přílišnému stlačení zadních tlumičů a tím naklonění vozidla dozadu. Nižší hodnota naopak tento pohyb zvětšuje. Změnou polohy těžiště je vyvolán rozdíl v podélném přenosu zatížení. Zvýšením těžiště je dosaženo většího přenosu zatížení na zadní nápravu, nicméně na zrychlení se tato změna neprojevuje.

#### 4.4.2 BRZDĚNÍ

Zrychlení během brzdění, jehož průběh je vykreslen na Obr. 26, je vyhodnocováno obdobně jako u akcelerace. Průměrné zrychlení mezi 2,5 s až 4,5 s výchozí varianty je  $-0,4269 \text{ g}$ . Změny průměrného zrychlení ostatních variant byly nepodstatné. Největší rozdíl se objevil, podobně jako při akceleraci, u varianty 7r, zpomalení je větší o  $0,0012 \text{ g}$ .



Obr. 26 Grafické znázornění vyvěšení tlumičů vozu při akceleraci s rozdílným nastavením anti-squat

Stlačení tlumičů vpředu a vyvěšení tlumičů vzadu závisí výhradně na charakteristikách anti-lift a anti-dive. Hodnoty vyvěšení tlumičů jsou sledovány pro zrychlení  $-0,81 \text{ g}$ . U variant 13f a 14f se objevily největší změny ve stlačení předních tlumičů viz Tab. 9. Snížení hodnoty anti-dive o 67,9 p. b. vůči výchozí variantě při nulovém zdvihu způsobí větší stlačení tlumičů o 8,6 mm (var. 13f). Zvýšením hodnoty anti-dive z 1,7 % výchozí varianty o 55,9 p. b. (var. 14f) při nulovém zdvihu dojde k menšímu stlačení tlumičů o 8,4 mm. Vyvěšení zadních tlumičů zůstává stejné jako u výchozí varianty.

Tab. 9 Vyvěšení tlumičů vozu při brzdění s rozdílným nastavením anti-dive

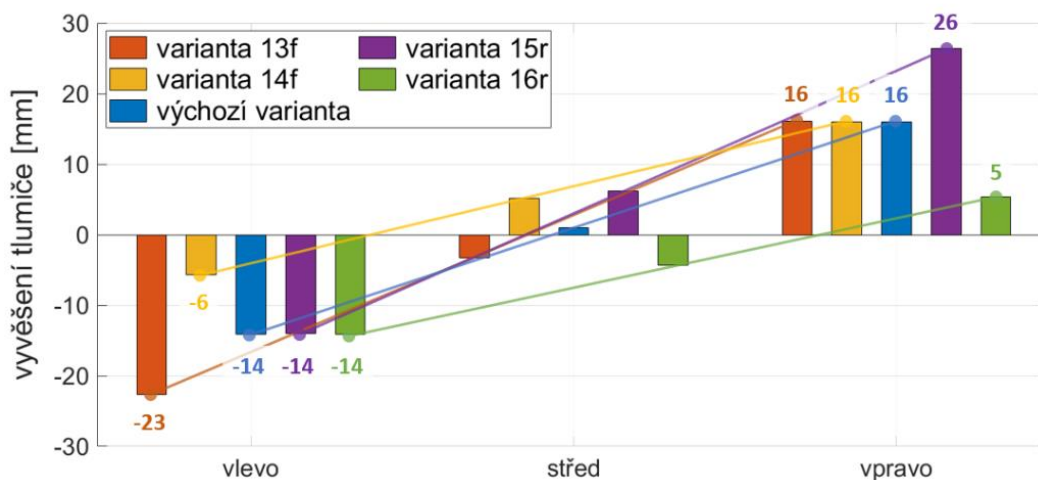
Vliv anti-dive na naklonění vozu		ANTI-DIVE			vyvěšení tlumičů (zrychlení $-0,81 \text{ g}$ )		
		$J_{ad} [\%]$			vpředu	střed	vzadu
zdvih kola	[mm]	-20	0	20	[mm]	[mm]	[mm]
výchozí varianta		1,6	1,7	1,8	-14,1	1	16
		změna vůči výchozí variantě			změna vůči výchozí variantě		
varianta 13f		-67	-67,9	-68,7	-8,6	-4,3	0,1
varianta 14f		58,2	55,9	53,7	8,4	4,2	0
varianta 1f		-7	-2,3	2,2	0,8	0,4	0,1
varianta 2f		3,7	1,1	-1,5	-0,3	-0,2	0

Změny ve vyvěšení zadních tlumičů jsou pozorovatelné u variant 15r a 16r, které mají rozdílné hodnoty anti-lift viz Tab. 10. U výchozí varianty je vyvěšení zadních tlumičů při zrychlení  $-0,81 g$  16 mm. U varianty 15r, která má při nulovém zdvihu o 65,1 p. b. menší anti-lift, je vyvěšení tlumičů větší o 10,4 mm. Naopak u varianty 16r, která má hodnotu anti-lift o 64,9 p. b. větší, je vyvěšení tlumičů menší o 10,6 mm.

Tab. 10 Vyvěšení tlumičů vozu při brzdění s rozdílným nastavením anti-lift

Vliv anti-lift na naklonění vozu		ANTI-LIFT			vyvěšení tlumičů (zrychlení $-0,81 g$ )		
		$J_{ar}$ [%]			vpředu	střed	vzadu
zdvih kola	[mm]	-20	0	20	[mm]	[mm]	[mm]
výchozí varianta		-0,6	-0,5	-0,4	-14,1	1	16
		změna vůči výchozí variantě			změna vůči výchozí variantě		
varianta 15r		-64,7	-65,1	-65,6	0,1	5,2	10,4
varianta 16r		67,4	64,9	62,5	0	-5,4	-10,6

Na Obr. 27 je zobrazeno naklonění vozu výše zmíněných variant během brzdění. Je možné si všimnout, že dochází k většímu/menšímu zvedání nebo klesání vždy pouze jedné části vozu přední nebo zadní, zatímco poloha druhé části vozu se vůči výchozí variantě nemění.



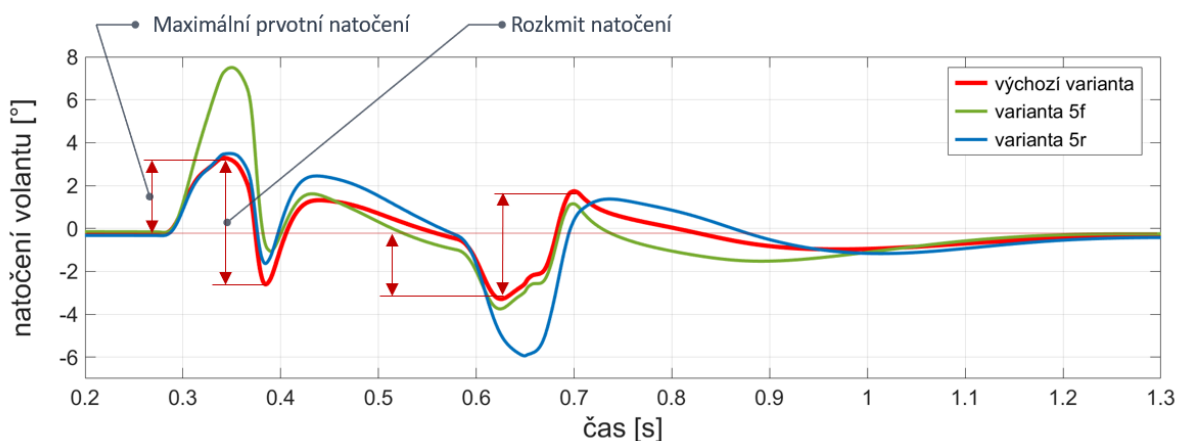
Obr. 27 Grafické znázornění vyvěšení tlumičů vozu při brzdění s rozdílným nastavením anti-dive a anti-lift

Při brzdění se dle předpokladů projevily vliv anti-dive a anti-lift, které omezují stlačení tlumičů vpředu, v případě větší hodnoty anti-dive, nebo vyvěšení tlumičů vzadu, v případě větší hodnoty anti-lift. Menší hodnota naopak tento pohyb podporuje.

#### 4.4.3 PŘEJEZD PŘES NEROVNOST

Při přejezdu nerovnosti jedním kolem je potřeba natočením předních kol korigovat směr jízdy. Sledovanou veličinou v průběhu manévru je úhel natočení volantu, její průběh mezi 0,2 s až 1,3 s je zobrazen na Obr. 28. První výchylka je způsobena přejezdem levého předního kola,

druhá potom levým zadním kolem. Kladný úhel natočení volantu znamená jeho natočení v proti směru hodinových ručiček (doleva). Jakmile tedy levé přední kolo překonává náhlé zvýšení vozovky, má vozidlo tendenci stáčet se doprava, a naopak doleva ve chvíli, kdy nerovnost překonává levé zadní kolo. Pro zhodnocení manévru jako celku je pro každou variantu spočítána směrodatná odchylka úhlu natočení volantu v celém rozsahu simulace 0-3 s. Směrodatná odchylka ukazuje, jak moc jsou hodnoty úhlu natočení rozptýleny od ustálené hodnoty natočení při přímé jízdě neboli jak moc je potřeba natáčet volant při přejezdu nerovnosti neohledě na směr natočení. Kromě toho je vyhodnoceno maximální prvotní natočení a rozkmit natočení pro přejezd předním a zadním kolem. Díky těmto hodnotám lze lépe popsat chování automobilu v závislosti na změnách předního nebo zadního zavěšení.



Obr. 28 Průběh natočení volantu při přejezdu nerovnosti

Podstatné rozdíly v chování vozu při přejezdu nerovnosti jsou pozorovatelné u variant zavěšení s odlišnou sbíhavostí viz Tab. 11. Nejvíce se však ukazuje změna u variant 5f a 5r, u kterých se sbíhavost s rostoucím zdvihem kola zvětšuje. Směrodatná odchylka natočení volantu výchozí varianty je  $0,72^\circ$ , varianty 5f je  $1,14^\circ$  a varianty 5r  $1,08^\circ$ .

Tab. 11 Natočení volantu při přejezdu nerovnosti s rozdílným nastavením sbíhavosti

Vliv sbíhavosti na natočení volantu		SBÍHAVOST			Úhel natočení volantu [°]				směrodatná odchylka
					přejezd předním kolem		přejezd zadním kolem		
		$\delta$ [°]			prvotní natočení	rozkmit natočení	prvotní natočení	rozkmit natočení	
zdvih kola	[mm]	-20	0	20					
výchozí varianta	vpředu	0,09	0,08	0,08	3,62	5,91	-2,97	5,02	0,72
	vzadu	-0,15	-0,11	-0,05					
		změna vůči výchozí variantě			změna	změna	změna	změna	
	varianta 5f	-0,41	-0,07	0,27	4,14	2,66	-0,53	-0,12	1,14
	varianta 6f	0,23	-0,09	-0,41	-2,28	-0,49	0,40	0,61	0,74
	varianta 5r	-0,31	0,02	0,34	0,31	-0,78	-2,54	2,29	1,08
	varianta 6r	0,33	0,00	-0,34	-0,05	1,10	1,07	-0,21	0,66
	varianta 7f	-0,50	-0,50	-0,50	0,34	-0,20	0,07	0,51	0,76
	varianta 8f	0,50	0,50	0,50	0,67	1,26	-0,15	-0,39	0,75
	varianta 7r	-0,50	-0,50	-0,50	0	0,32	0,77	-1,28	0,66
	varianta 8r	0,50	0,50	0,50	0,14	-0,26	-0,65	1,25	0,78

Pokud se sbíhavost předních kol se stlačením zvětšuje, konkrétně u varianty 5f se sbíhavost při propružení kola o +20 mm zvýší o  $0,2^\circ$ , je potřeba tuto sbíhavost kompenzovat natočením volantu, a tudíž i kol doleva. Oproti výchozí variantě s konstantní sbíhavostí při propružení je prvotní natočení volantu větší o  $4,14^\circ$ , a ačkoli natočení v opačném směru je menší než u výchozí varianty, tak celkový rozkmit je větší o  $2,66^\circ$ . Při přejezdu nerovnosti zadním kolem varianty 5f je potřeba natočit volant v záporném směru (doprava) o  $0,53^\circ$  více, což není příliš velký rozdíl.

V případě snižující se sbíhavosti předních kol s rostoucím zdvihem (var. 6f), dochází při přejezdu předním kolem ke snížení prvotního natočení volantu o  $2,28^\circ$ . Nicméně celkový rozkmit je jen o  $0,49^\circ$  menší, což naznačuje, že dochází k větší výchylce volantu v opačném směru. Přejezd zadním kolem má na natočení volantu opačný vliv, než je tomu u varianty 5f a rozkmit je o  $0,61^\circ$  větší než u výchozí varianty. Směrodatná odchylka popisující celý manévru je  $0,74^\circ$ , pouze o  $0,02^\circ$  větší než u výchozí varianty. Výsledkem je tedy sice výrazně odlišný průběh natočení volantu, ale celková korekce se téměř neliší.

Další variantou, která má významný vliv na chování vozidla, je var. 5r. Směrodatná odchylka je  $1,08^\circ$ , podobně jako u var. 5f. Jelikož u var. 5r změna sbíhavosti principiálně stejná jako u var. 5f s tím rozdílem, že týká zadního zavěšení, dochází k podstatné změně v natočení volantu během přejezdu nerovnosti zadním kolem. Sbíhavost zadního kola se při propružení o + 20 mm zvětší o  $0,32^\circ$ . Zvýšená sbíhavost způsobí větší stáčení vozu doleva, tudíž nutné natočení volantu musí působit v opačném směru a s větší výchylkou než u výchozí varianty. Prvotní natočení volantu záporným směrem je o  $2,54^\circ$  větší a rozkmit je také větší o  $2,29^\circ$ .

U varianty 6r dochází jen k mírné změně natočení volantu. Při přejezdu zadním kolem přes nerovnost je potřebné natočení volantu záporným směrem menší o  $1,07^\circ$  nicméně rozkmit se téměř nezmění. Celková směrodatná odchylka  $0,66^\circ$  je menší než u výchozí varianty.

Zmenšení či zvětšení statické hodnoty sbíhavosti, pokud je její průběh se zdvihem neměnný, nezpůsobuje oproti výchozí variantě významnou změnu v natočení volantu (var. 7f a 8f).

Stejná změna sbíhavosti jako u variant 7f a 8f na zadním zavěšení vyvolává mírně větší změnu v natočení volantu. Avšak je třeba brát v úvahu, že průběh sbíhavosti zadních kol výchozí varianty je lehce rostoucí a tento průběh je zachován i u variant 7r a 8r. Velikost úhlu natočení volantu se u těchto variant podstatně liší pouze při přejezdu zadního kola. V důsledku nižší sbíhavosti se rozkmit zmenší o  $1,28^\circ$  a sníží se i směrodatná odchylka na hodnotu  $0,66^\circ$ . Naopak s větší sbíhavostí se rozkmit korekce volantem zvětší o  $1,25^\circ$  a s tím i směrodatná odchylka na hodnotu  $0,78^\circ$ .

Tab. 12 Natočení volantu při přejezdu nerovnosti s rozdílným nastavením anti-dive

Vliv anti-dive na natočení volantu		ANTI-DIVE			Úhel natočení volantu [°]				směrodatná odchylka
					přejezd předním kolem		přejezd zadním kolem		
		$J_{ad}$ [%]			prvotní natočení	rozkmit natočení	prvotní natočení	rozkmit natočení	
zdvih kola	[mm]	-20	0	20					
výchozí varianta		1,6	1,7	1,8	3,62	5,91	-2,97	5,02	0,72
		změna vůči výchozí variantě			změna	změna	změna	změna	
varianta 13f		-67	-67,9	-68,7	-0,85	-1,40	0,44	-0,77	0,61
varianta 14f		58,2	55,9	53,7	0,13	0,22	0,01	0,2	0,74

Kromě sbíhavosti má na chování vozidla při přejezdu nerovnosti vliv charakteristika anti-dive, respektive pokud je hodnota výrazně nižší (var. 13f) viz *Tab. 12*. Směrodatná odchylka této varianty  $0,61^\circ$  je nižší než u výchozí varianty. Rozdílné nastavení kinematiky se projeví během přejezdu nerovnosti předním i zadním kolem, rozkmit se v obou případech zmenší, více však při přejezdu předním kolem a to o  $1,4^\circ$ .

Na natočení volantu mají vliv především změny charakteristiky sbíhavosti. Vozidlo má tendenci při přejezdu předním kolem stáčet se doprava, čemuž je zabráněno natočením volantu doleva. Pokud se sbíhavost se stlačením kola zvětšuje, je potřeba i zvýšit natočení volantu. Při přejezdu zadním kolem se vozidlo naopak stáčí doleva, je proto potřeba provést korekci natočením volantu doprava. V případě, že na zadním zavěšení dochází při stlačení kola ke sbíhavosti, vozidlo se více stočí doleva a korekce volantem je potřeba větší. U dalších variant nastavení sbíhavosti nejsou rozdíly tolik znatelné, ačkoliv dojde například ke zmenšení výchylky při přejezdu předním nebo zadním kolem, tak se celková směrodatná odchylka výrazně nezmění. Dopad na natočení volantu má také varianta zavěšení s menší hodnotou odklonu, kde při stlačení kola dochází k jeho pohybu od nerovnosti, čímž je zmenšena potřebná korekce natočením volantu.

#### 4.4.4 JÍZDA PO KRUHU S KONSTANTNÍM POLOMĚREM

Maximální dosažené příčné zrychlení se mezi jednotlivými variantami v podstatě nemění. Největší změna byla zaznamenána u varianty 6r, příčné zrychlení bylo nižší o  $0,0013 g$ .

Pomocí sledování změny natočení volantu během manévru je vyhodnocována stáčivost vozu pro různé varianty zavěšení. Volant výchozí varianty je potřeba od počátku manévru natočit o  $24,2^\circ$ , aby vůz zůstal na předepsané dráze kruhu. Jestliže je potřebné natočení volantu větší, tak vozidlo s danou variantou zavěšení je více nedotáčivé, a naopak menší natočení indikuje vozidlo s menší nedotáčivostí.

*Tab. 13* Změna natočení volantu během manévru pro varianty s rozdílným nastavením sbíhavosti

Vliv sbíhavosti na stáčivost vozu		SBÍHAVOST			natočení volantu
		$\delta [^\circ]$			
zdvih kola	[mm]	-20	0	20	$[^\circ]$
výchozí varianta	vpředu	0,09	0,08	0,08	24,2
	vzadu	-0,15	-0,11	-0,05	
změna sbíhavosti vůči výchozí variantě					změna natočení
varianta 5f		-0,41	-0,07	0,27	-14,7
varianta 6f		0,23	-0,09	-0,41	16,6
varianta 5r		-0,31	0,02	0,34	18
varianta 6r		0,33	0,00	-0,34	-19
varianta 7f		-0,50	-0,50	-0,50	8,6
varianta 8f		0,50	0,50	0,50	-5,6
varianta 7r		-0,50	-0,50	-0,50	-9,3
varianta 8r		0,50	0,50	0,50	5,9

Ukázalo se, že na stáčivost vozidla má největší vliv nastavení úhlu sbíhavosti. V *Tab. 13* jsou uvedeny změny natočení volantu vůči výchozí variantě pro zavěšení s rozdílnou sbíhavostí. Snížení úhlu sbíhavosti předního zavěšení o  $0,5^\circ$  (var. 7f) způsobí zvětšení potřebného natočení volantu o  $8,6^\circ$  a tím i nedotáčivost. Stejná změna zadního zavěšení (var. 7r) vyvolá opačnou reakci a to zmenšení natočení volantu o  $9,3^\circ$ . Zvětšením úhlu sbíhavosti na předním zavěšení o  $0,5^\circ$  dojde ke snížení natočení volantu o  $5,6^\circ$ , v případě stejné změny na zadním zavěšení dojde ke zvýšení o  $5,9^\circ$ .

S rostoucím nebo klesajícím průběhem sbíhavosti se vliv tohoto parametru ještě zesílí. Naklopení vozidla během zatáčení má za následek souhlasné natočení kol do zatáčky nebo ze zatáčky. Rostoucí sbíhavost při stlačení kola předního zavěšení zajistí menší nedotáčivost, pro zadní zavěšení nedotáčivost zvětší. Varianta 5f má při zdvihu +20 mm o  $0,27^\circ$  větší sbíhavost a potřebné natočení volantu je o  $14,7^\circ$  menší. Varianta 5r má při stejném zdvihu o  $0,34^\circ$  větší sbíhavost a i natočení volantu je o  $18^\circ$  větší. Naopak klesající sbíhavost se stlačení kola vyvolává v případě předního zavěšení větší nedotáčivost (var. 6f) a menší nedotáčivost v případě zadního zavěšení (var. 6r). Je možné si všimnout, že stejné změny kinematiky mají mírně větší dopad na natočení volantu, pokud jsou provedeny na zadním zavěšení.

Vliv úhlu odklonu na stáčivost vozu je výrazně menší nicméně stále podstatný. Změny úhlu odklonu a natočení volantu během manévru jednotlivých variant je uvedeno v *Tab. 14*. Snížení statické hodnoty odklonu o  $1^\circ$  na předním zavěšení (var. 3f) zmenší nedotáčivost vozu, potřebné natočení volantu je o  $2,1^\circ$  menší než u výchozí varianty. Zvýšení odklonu o stejnou hodnotu (var. 4f) naopak zvětší nedotáčivost vozu tak, že je potřeba zvýšit natočení volantu o  $2,4^\circ$ . Změna odklonu na zadním zavěšení vyvolá reakci v opačném smyslu než stejná změna na předním zavěšení. Rozdíl odklonu  $-1^\circ/+1^\circ$  (var. 3r/4r) způsobí změnu v natočení volantu o  $+1,2^\circ/-1,2^\circ$ .

*Tab. 14* Změna natočení volantu během manévru pro varianty s rozdílným nastavením odklonu

Vliv odklonu na stáčivost vozu		ODKLON			natočení volantu
		$\gamma$ [°]			
zdvih kola	[mm]	-20	0	20	[°]
výchozí varianta	vpředu	-1,21	-1,47	-1,82	24,2
	vzadu	-0,33	-0,54	-0,83	
		změna odklonu vůči výchozí variantě			změna natočení
varianta 1f		-0,08	0,06	0,23	3,1
varianta 2f		0,16	0,01	-0,17	0,5
varianta 1r		-0,14	-0,02	0,14	-1,3
varianta 2r		0,12	0,01	-0,14	1,3
varianta 3f		-1	-1	-1	-2,1
varianta 4f		1	1	1	2,4
varianta 3r		-1	-1	-1	1,2
varianta 4r		1	1	1	-1,2

Varianty zadního zavěšení s rozdílným průběhem odklonu s rostoucím zdvihem způsobují podobně velkou změnu natočení volantu ( $\pm 1,3^\circ$ ) jako varianty s rozdílnou statickou hodnotou. Vozidlo s variantou zavěšení 1r, jehož změna odklonu s propružením je menší než u výchozí varianty, je méně nedotáčivé. Větší změna odklonu s propružením (var. 2r) naopak nedotáčivost vozu zvětšuje. Varianta 1f s méně klesajícím odklonem zvětšuje nedotáčivost vozu, nicméně ke zvýšení natočení volantu o  $3,1^\circ$  přispívá i změna sbíhavosti, která je oproti výchozí variantě menší průměrně o  $0,13^\circ$ . Dalo by se očekávat, že u varianty 2f s více klesajícím průběhem odklonu na předním zavěšení bude zachována analogii předchozích variant a nedotáčivost bude menší, ale není tomu tak. Natočení volantu se změní jen mírně a to o  $+0,5^\circ$ . Tato varianta je totiž také ovlivněna změnou sbíhavosti, která je menší průměrně o  $0,10^\circ$  a zvyšuje nedotáčivost.

Dalším parametrem majícím vliv na stáčívost vozidla je výška středu klopení viz *Tab. 15*. U variant s rozdílnou polohou středu klopení dochází i k mírné změně sbíhavosti. Potřebné natočení volantu u varianty zavěšení 9f s níže položeným středem klopení je o  $1^\circ$  větší. Sbíhavost této varianty je o  $0,14^\circ$  menší, což zvyšuje nedotáčivost. Výše položený střed klopení (var. 10f) způsobuje zvětšení nedotáčivosti a spolu s menší sbíhavostí o  $0,1^\circ$  je výsledná změna natočení volantu vůči výchozí variantě  $+1,4^\circ$ . Podstatně větší změny v natočení volantu vyvolává rozdílná výška středu klopení zadního zavěšení. Snížený střed klopení varianty 9r zvýší nedotáčivost vozu. Natočení volantu je o  $4,9^\circ$  větší, čemuž přispívá i zvětšená sbíhavost o  $0,1^\circ$ . Vyšší poloha středu klopení spolu s menší sbíhavostí o  $0,15^\circ$  (var. 10r) zmenšuje nedotáčivost, volant je potřeba natočit o  $7,2^\circ$  méně.

*Tab. 15* Změna natočení volantu během manévru pro varianty s rozdílnou výškou středou klopení

Vliv výšky středu klopení na stáčívost		VÝŠKA STŘEDU KLOPENÍ			natočení volantu
		$h_r$ [mm]			
zdvih kola	[mm]	-20	0	20	[°]
výchozí varianta	vpředu	92,2	58,7	24,8	24,2
	vzadu	131,8	94,5	57,1	
		změna výšky vůči výchozí variantě			změna natočení
varianta 9f		-56,2	-61,5	-53,9	1
varianta 10f		53,3	52,2	51,2	1,4
varianta 9r		-61,3	-59,9	-58,6	4,9
varianta 10r		64,4	63,2	62,2	-7,2

*Tab. 16* Změna natočení volantu během manévru pro varianty s rozdílným záklonem rejdové osy

Vliv záklonu rejdové osy na stáčívost		ZÁKLON REJDOVÉ OSY			natočení volantu
		$\theta_c$ [°]			
zdvih kola	[mm]	-20	0	20	[°]
výchozí varianta		5,6	5,4	5,1	24,2
		změna záklonu vůči výchozí variantě			změna natočení
varianta 11f		-3,4	-3,4	-3,3	2,7
varianta 12f		3,8	3,7	3,8	1,3

Vliv velikosti úhlu záklonu rejdové osy na stáčivost vozu je uveden v *Tab. 16*. Varianta zavěšení 11f s menším úhlem záklonu rejdové osy a menší sbíhavostí o  $0,13^\circ$  je více nedotáčivá, natočení volantu je potřeba zvětšit o  $2,7^\circ$ . Varianta 12f s větším záklonem rejdové osy, ale opět s menší sbíhavostí o  $0,12^\circ$  je taktéž více nedotáčivá se nárůstem natočení volantu  $1,3^\circ$ .

Další dvě varianty, které mají vliv na stáčivost vozu jsou 14f a 15r, u obou dochází ke zvýšení natočení volantu. V případě varianty 14f s větší hodnotou anti-dive a menší sbíhavostí průměrně o  $0,15^\circ$  je natočení volantu větší o  $2,9^\circ$ . Varianta 15r s nižší hodnotou anti-lift a také nižší sbíhavostí o  $0,10^\circ$  má změnu natočení volantu větší o  $2,3^\circ$ .

Naklopení vozu bylo sledováno pomocí stlačení a vyvěšení předních i zadních tlumičů při příčném zrychlení  $0,7 g$ . Rozdílné naklopení se objevilo u variant s rozdílnou výškou středu klopení viz *Tab. 17*. Kromě stlačení/vyvěšení jednotlivých tlumičů je vyhodnocována i poloha přední a zadní části vozu, aby bylo patrné, zda dochází k jejímu poklesu nebo vyvýšení. U výchozí varianty se přední část vozu zvedne o  $2,1 mm$  a zadní část klesne o  $0,2 mm$ .

*Tab. 17* Vyvěšení tlumičů při jízdě po kruhu pro varianty s rozdílnou výškou středou klopení

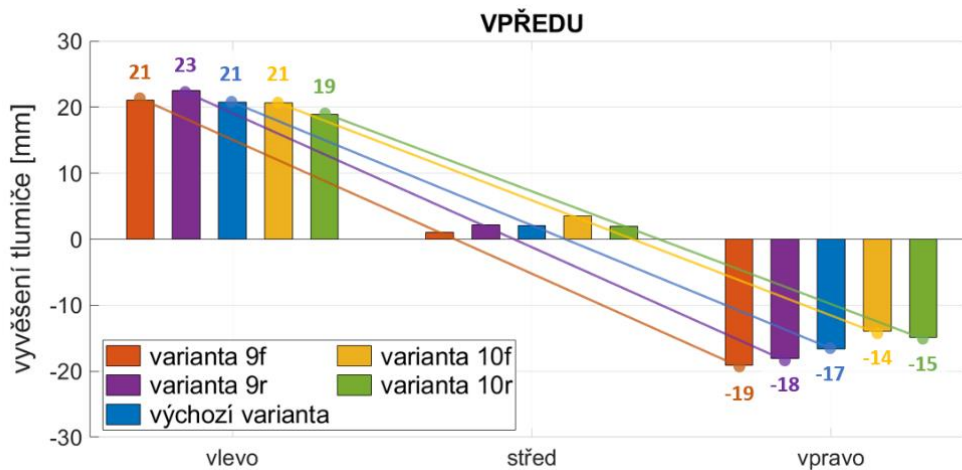
Vliv výšky středu klopení na naklopení vozu		VÝŠKA STŘEDU KLOPENÍ			vyvěšení tlumičů (boční zrychlení $0,7 g$ )					
					vpředu			vzadu		
		zdvih kola	[mm]	$h_r$	[mm]	vlevo	střed	vpravo	vlevo	střed
		-20	0	20	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
výchozí varianta	vpředu	92,2	58,7	24,8	20,8	2,1	-16,6	-	-	-
	vzadu	131,8	94,5	57,1	-	-	-	18,7	-0,2	-19,1
		změna vůči výchozí variantě			změna vůči výchozí variantě			změna vůči výchozí variantě		
	varianta 9f	-56,2	-61,5	-53,9	0,3	-1,1	-2,5	1,1	0,1	-0,9
	varianta 10f	53,3	52,2	51,2	-0,1	1,4	2,7	-1,1	0	1,1
	varianta 9r	-61,3	-59,9	-58,6	1,7	0,1	-1,5	0,7	-1,1	-2,9
	varianta 10r	64,4	63,2	62,2	-1,9	-0,1	1,7	-0,3	1,8	3,9

Snížení polohy středu klopení přední nápravy (var. 9f) má za následek větší naklopení vozidla. Pravý přední tlumič se stlačí o  $2,5 mm$  více a poloha přední části vozidla se zvedne o  $1,1 mm$  méně než je tomu u výchozí varianty. Naopak zvýšení polohy středu klopení (var. 10f) způsobí, že se vůz naklopí méně. Stlačení pravého předního tlumiče se zmenší o  $2,7 mm$  a přední část vozu se o  $1,4 mm$  více zvedne. Změna polohy středu klopení přední nápravy způsobí změnu naklopení i zadní části vozu ve stejném smyslu jako přední část. Avšak rozdíl ve stlačení či vyvěšení tlumičů není tak velké pohybuje se okolo  $1 mm$ .

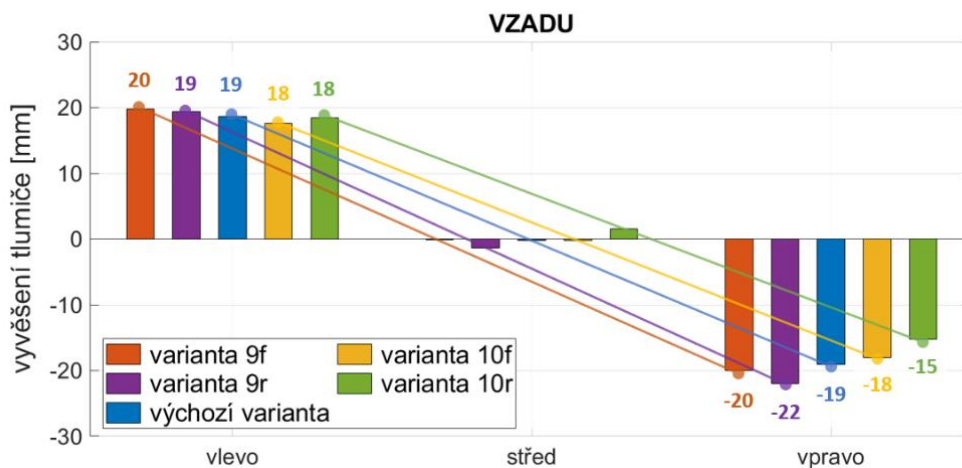
Změna výšky středu klopení na zadním zavěšení má na naklopení vozidlo stejný efekt jako obdobná změna na předním zavěšení. K většímu naklopení dojde u varianty 9r s níže položeným středem klopení. Pravý zadní tlumič se stlačí o  $2,9 mm$  více a zadní část vozu klesne o  $1,1 mm$  níže. Vyšší poloha středu klopení varianty 10r zajistí menší klopení vozidla a zvýšení polohy zadní části vozu o  $1,8 mm$ . Největší rozdíl ve stlačení tlumiče se objeví na pravém zadním kole, stlačení je o  $3,9 mm$  menší. Přední část vozu u obou variant se přizpůsobuje pohybu zadní části s tím, že změna stlačení i vyvěšení tlumičů se pohybuje okolo hodnoty  $1,7 mm$ .

Zavěšení s menším záklonem rejdové osy zvětšuje nedotáčivost, kterému přispívá i menší sbíhavost. Varianta zavěšení s větším záklonem má také menší sbíhavost, což ve výsledku způsobí větší nedotáčivost.

Obr. 29 a Obr. 30 ukazují naklonění přední a zadní části vozu pomocí sledované hodnoty vyvšení tlumičů. Zobrazeny jsou výše zmíněné varianty s rozdílnou výškou středu klopení v porovnání s výchozí variantou.



Obr. 29 Grafické znázornění vyvšení předních tlumičů vozu s rozdílnou výškou středu klopení při bočním zryhlení 0,7 g



Obr. 30 Grafické znázornění vyvšení zadních tlumičů vozu s rozdílnou výškou středu klopení při bočním zryhlení 0,7 g

Dominantní vliv na stáčivost tohoto vozidla má sbíhavost, a to především pokud je změněn její průběh v závislosti na zdvihu. Rostoucí sbíhavost se zdvihem na přední nápravě zmenšuje nedotáčivost. Klesající sbíhavost se zdvihem na přední nápravě naopak nedotáčivost zvětšuje. Na zadní nápravě rostoucí sbíhavost se zdvihem zvětšuje nedotáčivost a klesající sbíhavost nedotáčivost zmenšuje. Statická změna sbíhavosti na předním zavěšení směrem do kladných hodnot snižuje nedotáčivost a směrem do záporných hodnot nedotáčivost zvětšuje. Zvětšení statické hodnoty sbíhavosti na zadním zavěšení zvyšuje nedotáčivost, naopak její snížení zmenšuje nedotáčivost.

Varianty předního zavěšení s menší nebo větší změnou odklonu se zdvihem jsou ovlivněny malou změnou sbíhavosti. Menší změna odklonu se zdvihem zvyšuje nedotáčivost, k čemuž přispívá i menší sbíhavost. V případě varianty s větší změnou odklonu se zdvihem vliv menší sbíhavosti dokonce převáží a vozidlo je ve výsledku o trochu více nedotáčivé. Výsledky ostatních variant potvrdily předpoklady, kdy menší změna odklonu se zdvihem na zadním zavěšení zmenšuje nedotáčivost a větší změna odklonu se zdvihem nedotáčivost zvětšuje. Zvětšení statické hodnoty odklonu na předním zavěšení zvětšuje nedotáčivost a zmenšení statické hodnoty naopak nedotáčivost zmenšuje. Na zadním zavěšení způsobuje zvýšení odklonu zmenšení nedotáčivosti a zmenšení odklonu zvýšení nedotáčivosti.

Dopad změny výšky středu klopení na stáčivost je taktéž ovlivněna změnou sbíhavosti. Varianta předního zavěšení s níže položeným středem klopení je trochu více nedotáčivá, jelikož změna polohy není dostatečná na to, aby převážila vliv menší sbíhavosti. Výše položený střed klopení na přední nápravě způsobuje větší nedotáčivost, která je podpořena menší sbíhavostí. Menší výška středu klopení zadního zavěšení spolu s větší sbíhavostí způsobuje nedotáčivost. Zvýšená poloha středu klopení na zadním zavěšení zároveň s menší sbíhavostí zmenšuje nedotáčivost. Kromě stáčivosti má výška středu klopení vliv na naklopení vozu. Výše položený střed klopení zmenšuje klopení a níže položený střed klopení zvětšuje, ať už se jedná o změnu na přední nebo zadní nápravě. Jen v rámci dané nápravy se změna projeví víc a je s ní spojen i pokles středu vozidla nad daným zavěšením v případě nižší polohy nebo vyvýšení v případě vyšší polohy středu klopení.

Varianta s větší hodnotou anti-dive a také menší sbíhavostí je více nedotáčivá. Více nedotáčivá je i varianta s menší hodnotou anti-lift a menší sbíhavostí, u které dochází k menšímu zatížení zadní nápravy.

#### 4.4.5 SKOKOVÉ NATOČENÍ VOLANTU

Ze simulace tohoto manévru je vyhodnocována rychlost reakce vozidla na natočení volantu. Uvedené hodnoty stáčivé rychlosti platí pro ustálený stav. Pro jednotlivé varianty je také zjištěna doba dosažení 90 % ustálené hodnoty stáčivé rychlosti. Podstatný vliv na tyto parametry se projevil variant s rozdílnou sbíhavostí viz *Tab. 18*. Výchozí varianta má stáčivou rychlost  $9,86 \text{ }^\circ\cdot\text{s}^{-1}$  a 90 % dosáhne jí za 2,51 s.

Díky rostoucí sbíhavosti na předním zavěšení (var. 5f) se stáčivá rychlost zvýší o  $2,72 \text{ }^\circ\cdot\text{s}^{-1}$  a doba dosažení taktéž naroste. Přední zavěšení s klesajícím průběhem sbíhavosti (var. 6f) má menší stáčivou rychlost, rozdíl oproti výchozí variantě je  $-2 \text{ }^\circ\cdot\text{s}^{-1}$ , ale dosáhne jí o 0,04 s dříve. Zmenšení stáčivé rychlosti o  $2,07 \text{ }^\circ\cdot\text{s}^{-1}$  lze dosáhnout, i pokud se průběh sbíhavosti na zadním zavěšení změní tak, aby s rostoucím zdvihem také rostl (var. 5r). Doba dosažení se v tomto případě zkrátí jen o 0,01 s. Největší změna stáčivé rychlosti  $+3,36 \text{ }^\circ\cdot\text{s}^{-1}$  je vyvolána variantou 6r s klesající sbíhavostí na zadním zavěšení. Kromě rychlosti se prodlouží i doba, než vozidlo dosáhne 90 % této hodnoty o 0,06 s. Varianty zavěšení s nižší nebo vyšší statickou hodnotou sbíhavosti mají o něco menší vliv na stáčivou rychlost než předchozí varianty. Snížení sbíhavosti na předním zavěšení (var. 7f) způsobí i zmenšení stáčivé rychlosti o  $1,04 \text{ }^\circ\cdot\text{s}^{-1}$  a je jí dosaženo o 0,01 s rychleji. Stejnou změnou na zadním zavěšení (var. 7r) se naopak docílí zvýšení stáčivé rychlosti o  $1,37 \text{ }^\circ\cdot\text{s}^{-1}$  a to za stejný čas jako výchozí varianta.

Tab. 18 Stáčivá rychlost vozidla s rozdílným nastavením sbíhavosti

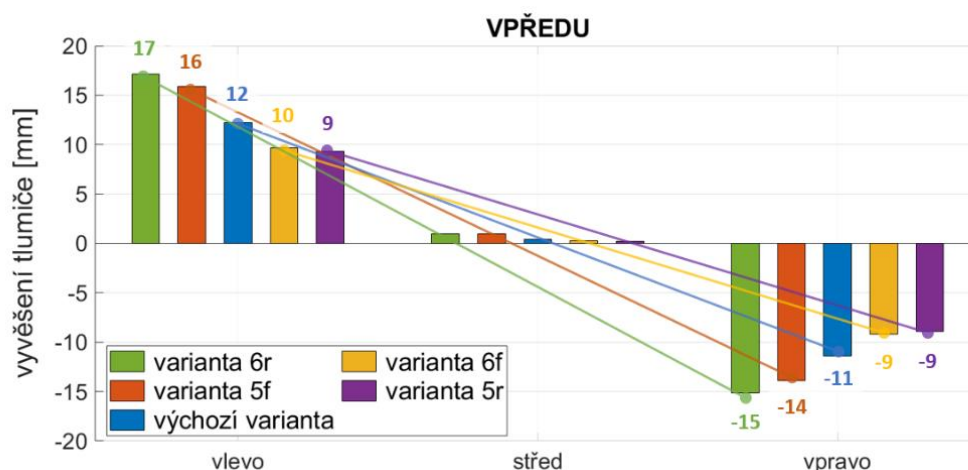
Vliv sbíhavosti na rychlost stáčení		SBÍHAVOST			stáčivá rychlost $r$ [ $^{\circ}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	doba dosažení 90 % $r$ $t_{0,9r}$ [s]
		$\delta$ [ $^{\circ}$ ]				
zdvih kola	[mm]	-20	0	20		
výchozí varianta	vpředu	0,09	0,08	0,08	9,86	2,51
	vzadu	-0,15	-0,11	-0,05		
		změna sbíhavosti vůči výchozí variantě			změna	změna
	varianta 5f	-0,41	-0,07	0,27	2,72	0,04
	varianta 6f	0,23	-0,09	-0,41	-2	-0,04
	varianta 5r	-0,31	0,02	0,34	-2,07	-0,01
	varianta 6r	0,33	0,00	-0,34	3,36	0,06
	varianta 7f	-0,50	-0,50	-0,50	-1,04	-0,01
	varianta 8f	0,50	0,50	0,50	0,63	0,06
	varianta 7r	-0,50	-0,50	-0,50	1,37	0
	varianta 8r	0,50	0,50	0,50	-0,58	0

Pro popis naklonění vozu je opět sledováno vyvěšení všech tlumičů při ustáleném stavu stáčení. Naklonění vozu je při tomto manévru ovlivněno pouze rozdílnou sbíhavostí viz Tab. 19. Větší vliv, než statická změna, má průběh sbíhavosti. Z porovnání vyvěšení tlumičů jednotlivých variant je patrné, že dochází k téměř stejné změně naklonění přední i zadní části vozu nehledě na to, zda se jedná o změnu předního či zadního zavěšení. S rostoucí sbíhavostí na předním zavěšení (var. 5f) se vozidlo více naklopí ze zatáčky. Zvýší se především vyvěšení vnitřních tlumičů vpředu o 3,7 mm a vzadu o 3,4 mm. Vozidlo s klesající sbíhavostí na předním zavěšení (var. 6f) se naklopí méně, změna stlačení či vyvěšení tlumičů se pohybuje mezi 2,2 až 2,5 mm. Změny sbíhavosti na zadním zavěšení mají opačný vliv než stejné změny na předním zavěšení. Rostoucí sbíhavost na zadním zavěšení (var. 5r) způsobí menší naklonění vozu, rozdíl ve stlačení/vyvěšení tlumičů je v rozmezí 2,5 až 2,9 mm. Kvůli klesající sbíhavosti na zadním zavěšení se vozidlo naklopí více. Nejvíce se zvýší vyvěšení vnitřních tlumičů, vpředu o 4,9 mm a vzadu o 4,6 mm.

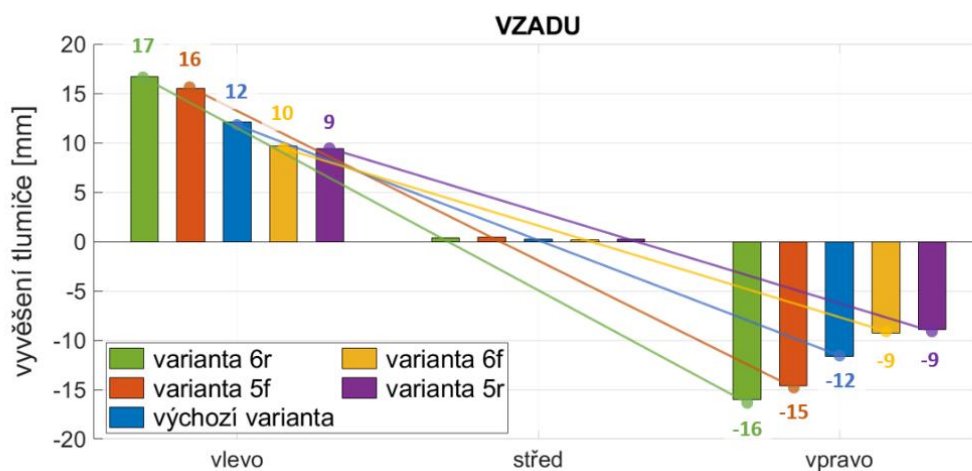
Tab. 19 Vyvěšení tlumičů po skokovém natočení volantu pro varianty s rozdílnou sbíhavostí

Vliv sbíhavosti na naklonění vozu		SBÍHAVOST			vyvěšení tlumičů					
		$\delta$ [ $^{\circ}$ ]			vpředu			vzadu		
zdvih kola	[mm]	-20	0	20	vlevo	střed	vpravo	vlevo	střed	vpravo
výchozí varianta	vpředu	0,09	0,08	0,08	12,2	0,4	-11,4	-	-	-
	vzadu	-0,15	-0,11	-0,05	-	-	-	12,1	0,3	-11,6
		změna vůči výchozí variantě			změna vůči výchozí variantě			změna vůči výchozí variantě		
	varianta 5f	-0,41	-0,07	0,27	3,7	0,6	-2,5	3,4	0,2	-3
	varianta 6f	0,23	-0,09	-0,41	-2,5	-0,2	2,2	-2,4	-0,1	2,3
	varianta 5r	-0,31	0,02	0,34	-2,9	-0,2	2,5	-2,7	0,0	2,7
	varianta 6r	0,33	0,00	-0,34	4,9	0,6	-3,7	4,6	0,1	-4,4
	varianta 7f	-0,50	-0,50	-0,50	-1,2	0,2	1,5	-1,3	0,0	1,3
	varianta 8f	0,50	0,50	0,50	0,7	-0,2	-1	0,9	0,1	-0,8
	varianta 7r	-0,50	-0,50	-0,50	1,8	0,3	-1,3	2,1	0,5	-1,1
	varianta 8r	0,50	0,50	0,50	-0,7	0,5	0,6	-0,9	-0,3	0,3

Pomocí grafů na *Obr. 31* a *Obr. 32* je graficky znázorněno naklopení vozu pro varianty zavěšení s rozdílným průběhem sbíhavosti. Je možné si všimnout, že na rozdíl od naklopení vozu během předchozího manévru se zde výška středu vozu téměř nemění. Varianty zavěšení, se kterými vozidlo dosahuje větší stáčivé rychlosti způsobují i větší naklopení vozu.



*Obr. 31* Grafické znázornění vyvššení předních tlumičů vozu s rozdílnou sbíhavostí po skokovém natočení volantu



*Obr. 32* Grafické znázornění vyvššení zadních tlumičů vozu s rozdílnou sbíhavostí po skokovém natočení volantu

Na stáčivou rychlost má vliv sbíhavost, změna ostatních kinematických parametrů se neprojevila pravděpodobně z toho důvodu, že jejich změna není dostatečně velká. Sbíhavost má na stáčivou rychlost stejný dopad jako na nedotáčivost. Změny kinematiky podporující snížení nedotáčivosti vyvolávají i větší stáčivou rychlost a naopak. Rozdíly v časech dosažení 90 % ustálené stáčivé rychlosti jsou velmi malé a závisí spíše na tom, jak velké stáčivé rychlosti vozidlo dosáhne.

Rozdíly v naklonění vozu taktéž závisí na sbíhavosti, jejich velikost se odvíjí podle toho, jaké stáčivé rychlosti vozidlo dosáhne.

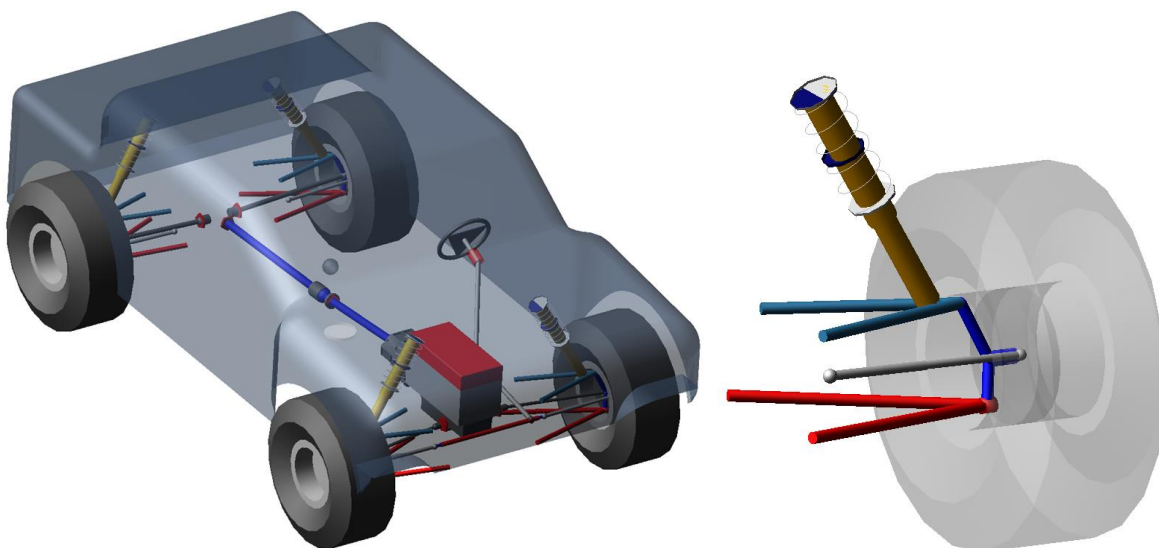
## 4.5 MODEL OFF-ROADOVÉHO VOZIDLA

Multibody model off-roadového vozidla vychází z vozu Ford F150 Evo upraveného tak, aby splňoval pravidla kategorie T1+. Vůz Ford F150 Evo týmu OFFROADSPORT na Obr. 33 má za sebou několik úspěšně zdořených závodů Rally Dakar. Nyní je snahou upravit vůz dle požadavků kategorie T1+. Vnitřní úchyty ramen zavěšení zůstávají sice ve stejné pozici jako v původním provedení, ale délka ramen se výrazně zvětšila. Využívají se větší 37" pneumatiky o šířce 12,5" a průměrem ráfku 17", zvětšil se i zdvih kola na 350 mm.



Obr. 33 Vůz kategorie T1 Ford F150 Evo týmu OFFROADSPORT [10]

Sestavený multibody model vozidla na Obr. 34 má oproti výchozímu modelu poháněná všechna čtyři kola, kvůli čemuž musel být modifikován model pohonu. Rozdělení hnacích sil je 38 % na přední nápravě, 62 % na zadní a brzdných sil 73 % vpředu, 27 % vzadu. Hmotnost vozidla je stanovena na maximální hranici 2300 kg. Některé parametry jako například momenty setrvačnosti bylo nutné, kvůli neexistujícím údajům, odhadnout. Nový model zavěšení je vytvořen z šablony „double\_wishbone“, kde bylo potřeba především upravit uchycení tlumičů k hornímu rameni a uzpůsobit jej pro nový pohon. Poloha kinematických bodů je změněna dle zadaných souřadnic, ramena jsou podstatně delší a tyč řízení je umístěna před osou kola. Tak jako výchozí model, i tento je bez pryžového uložení, obsahuje pouze kinematické vazby.



Obr. 34 Multibody model off-roadového vozidla (vlevo); detail zavěšení modelu off-roadového vozidla

#### 4.6 KINEMATICKÉ CHARAKTERISTIKY MODELU OFF-ROADOVÉHO VOZIDLA

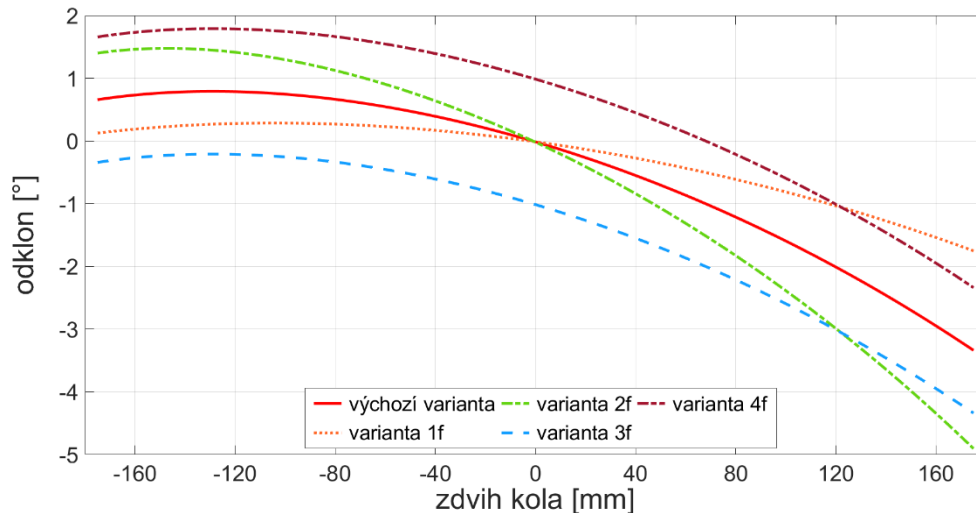
Tak jako u předchozího modelu je potřeba i pro off-roadový model vytvořit varianty zavěšení s rozdílnou kinematikou. Přední zavěšení má kromě výchozího stavu dalších 17 variant s rozdílným odklonem, sbíhavostí, výškou středu klopení, záklonem rejdové osy, anti-dive, a jelikož se jedná o vozidlo s pohonem všech čtyř kol i anti-lift. Dochází ke změnám statických hodnot parametrů, a u některých parametrů i ke změně průběhu charakteristiky. Zadní zavěšení má mimo výchozího stavu dalších 15 variant. To je o 2 méně než přední zavěšení, jelikož zadní zavěšení nemá rejdovou osu, a tudíž nemá varianty pro různý záklon rejdové osy. Co se týče anti-charakteristik pro zadní zavěšení jsou to anti-lift pro brzdění a anti-squat pro akceleraci. Tab. 20 obsahuje výpis všech variant zavěšení pro přední i zadní nápravu a jejich označení, které bude dále používáno.

Tab. 20 Seznam jednotlivých variant zavěšení off-roadového modelu a jejich označení

Označení variant		přední zavěšení	zadní zavěšení
výchozí stav		výchozí varianta	výchozí varianta
Úhel odklonu	menší změna	varianta 1f	varianta 1r
	větší změna	varianta 2f	varianta 2r
	menší	varianta 3f	varianta 3r
	větší	varianta 4f	varianta 4r
Úhel sbíhavosti	konstantní	varianta 5.1f	varianta 5.1r
	rostoucí	varianta 5f	varianta 5r
	klesající	varianta 6f	varianta 6r
	menší	varianta 7f	varianta 7r
Výška středu klopení	větší	varianta 8f	varianta 8r
	menší	varianta 9f	varianta 9r
Záklon rejdové osy	větší	varianta 10f	varianta 10r
	menší	varianta 11f	-
Anti-dive	větší	varianta 12f	-
	menší	varianta 13f	-
Anti-lift	větší	varianta 14f	-
	menší	varianta 15f	varianta 15r
Anti-squat	větší	varianta 16f	varianta 16r
	menší	-	varianta 17r
	větší	-	varianta 18r

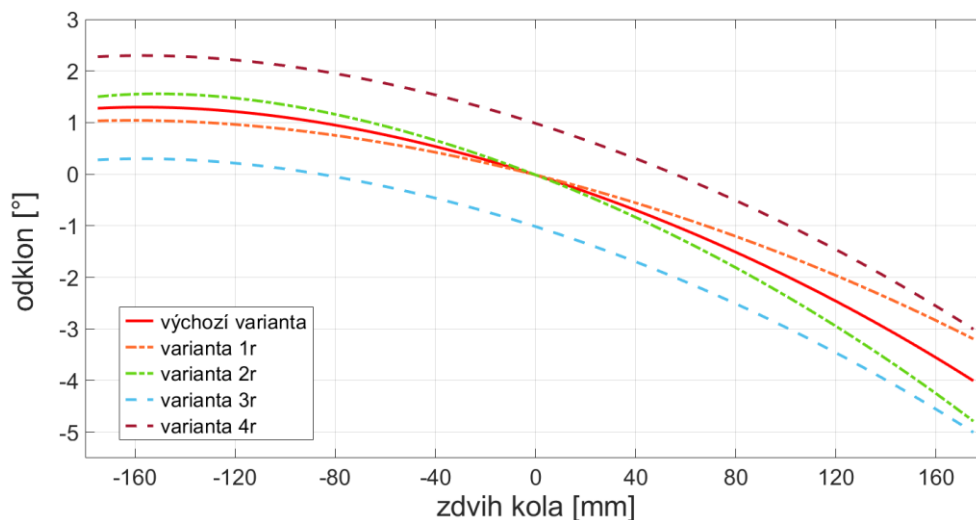
Na následujících grafech jsou zobrazeny průběhy vybraných kinematických charakteristik předního i zadního zavěšení off-roadového modelu vozidla. Vždy je vykreslen průběh výchozí varianty a dále variant, u kterých se průběh daného parametru nějak liší. Charakteristiky jsou výsledkem souběžného propuštění kol pro zdvih v rozsahu 350 mm (-175 až 175 mm).

Průběh úhlu odklonu pro varianty předního zavěšení je zobrazen na Obr. 36. Výchozí varianta má s rostoucím zdvihem klesající průběh odklonu. Ve statické poloze je hodnota odklonu nulová, tudíž při stlačení kola je odklon záporný, to platí i pro varianty 1f a 2f. Změna odklonu varianty 1f s propuštěním je podstatně menší než u výchozí varianty. Naopak varianta 2f má větší změnu odklonu se zdvihem při maximálním stlačení kola dosahuje hodnoty téměř  $-5^\circ$ . Další dvě varianty 3f a 4f představují statickou změnu odklonu o  $\pm 1^\circ$ . Úhel odklonu je tak u varianty 3f v rámci celého zdvihu záporný. Varianta 4f má potom větší odklon, který je kladný přibližně do zdvihu 70 mm.



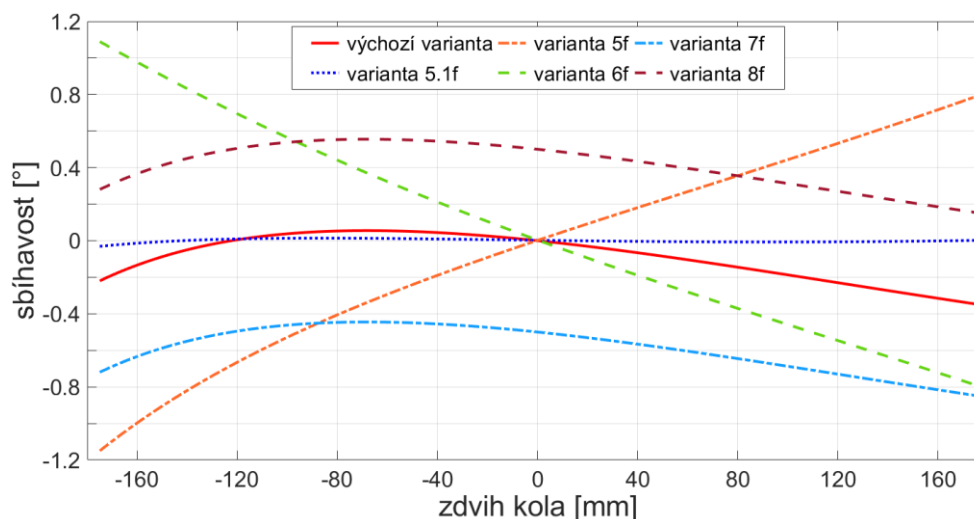
Obr. 36 Průběh úhlu odklonu v závislosti na zdvihu kola pro varianty předního zavěšení

Charakteristika odklonu zadního zavěšení je ukázána na Obr. 35. Tak jako pro přední zavěšení odklon klesá s rostoucím zdvihem kola a při nulovém zdvihu má nulovou hodnotu. Což taktéž platí pro varianty 1r a 2r, které se liší mírou změny odklonu s propružením kol. U varianty zavěšení 1r dochází k menší změně úhlu odklonu se změnou zdvihu kola a u varianty 2r dochází k větší změně. Statickou změnu odklonu o  $\pm 1^\circ$  zajišťují varianty 3r s menší hodnotou a 4r s větší hodnotou.



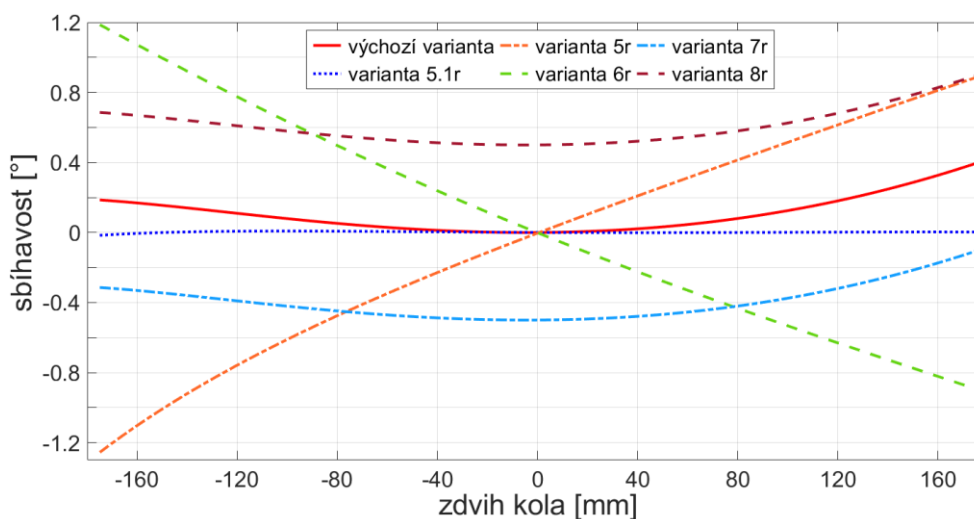
Obr. 35 Průběh úhlu odklonu v závislosti na zdvihu kola pro varianty zadního zavěšení

Charakteristiky sbíhavosti pro varianty předního zavěšení jsou vykresleny na Obr. 38. Sbíhavost výchozí varianty nemá konstantní charakter. Ve statické poloze je sbíhavost nulová, při vyvěšení se kolo stáčí do mírné sbíhavosti, ale ke konci rozsahu zdvihu se stočí do rozbíhavosti, při stlačení kola se zvětšuje rozbíhavost. Z toho důvodu je vytvořena navíc varianta 5.1f s konstantní nulovou sbíhavostí. Varianty 5f a 6f mají taktéž nulovou statickou sbíhavostí, která u var. 5f s rostoucím zdvihem roste a u var. 6f klesá. Tyto dvě charakteristiky jsou symetrické vůči horizontální ose procházející nulovou sbíhavostí, tudíž i vůči charakteristice varianty 5.1f. Statickou změnu sbíhavosti mají varianty 7f a 8f, hodnota sbíhavosti se vůči výchozí variantě liší o  $\pm 0,5^\circ$ . Sbíhavost varianty 7f je v celém rozsahu zdvihu záporná, naopak varianta 8f je v celém rozsahu kladná.



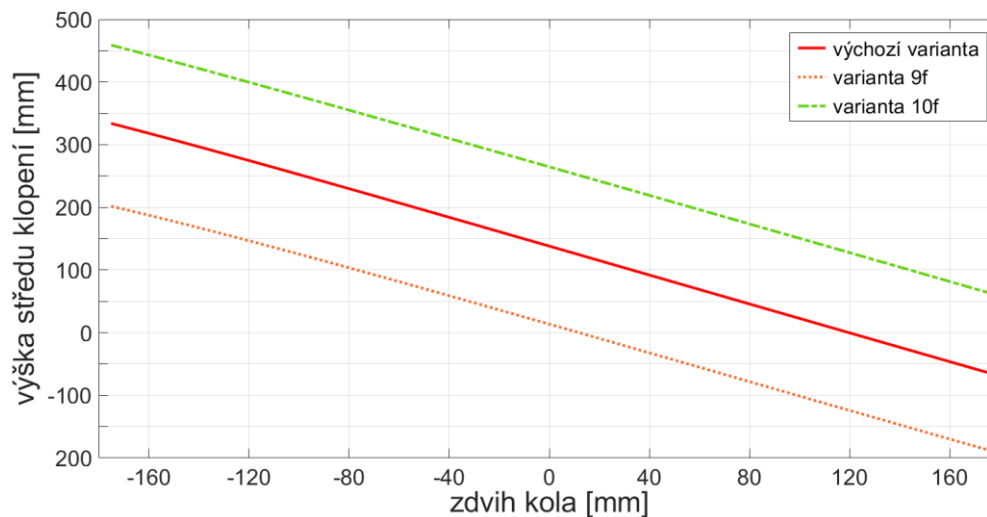
Obr. 38 Průběh úhlu sbíhavosti v závislosti na zdvihu kola pro varianty předního zavěšení

Jelikož výchozí varianta nemá neměnnou sbíhavost během propružení kola, je i pro zadní zavěšení vytvořeno dalších 5 variant s rozdílnou sbíhavostí, kde jedna z nich má konstantní víceméně nulovou sbíhavost (var. 5.1r) viz Obr. 37. Sbíhavost výchozí varianty je ve statické poloze nulová a s vyvěšením i stlačením kola se zvětšuje. Stejný průběh, ale rozdílnou statickou hodnotu o  $\pm 0,5^\circ$  mají varianty 7r a 8r. Charakteristika varianty 7r s menší sbíhavostí je v celém rozsahu v záporných hodnotách, jde tedy o rozbíhavost, naopak varianta 8r má větší kladnou sbíhavost. Dále jsou vytvořeny varianty 5r s rostoucí sbíhavostí se zdvihem a 6r s klesající sbíhavostí, obě varianty prochází v nulovém zdvihu nulovou sbíhavostí.



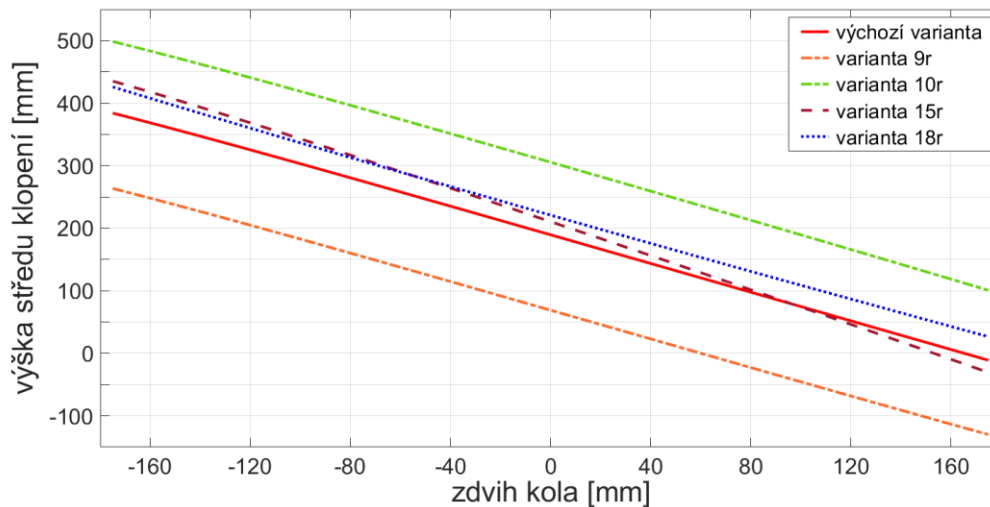
Obr. 37 Průběh úhlu sbíhavosti v závislosti na zdvihu kola pro varianty zadního zavěšení

Rozdílnou výšku středu klopění přední nápravy mají dvě varianty 9f a 10f viz Obr. 40. Výška středu klopění výchozího zavěšení s rostoucím zdvihem klesá a ve statické poloze její velikost je 138,1 mm. Varianta 9f má níže položený střed klopění průměrně o 126 mm vůči výchozí variantě. Naopak varianta 10f jej má výše průměrně taktéž o 126 mm než výchozí zavěšení.



Obr. 40 Průběh výšky středu klopení v závislosti na zdvihu kola pro varianty předního zavěšení

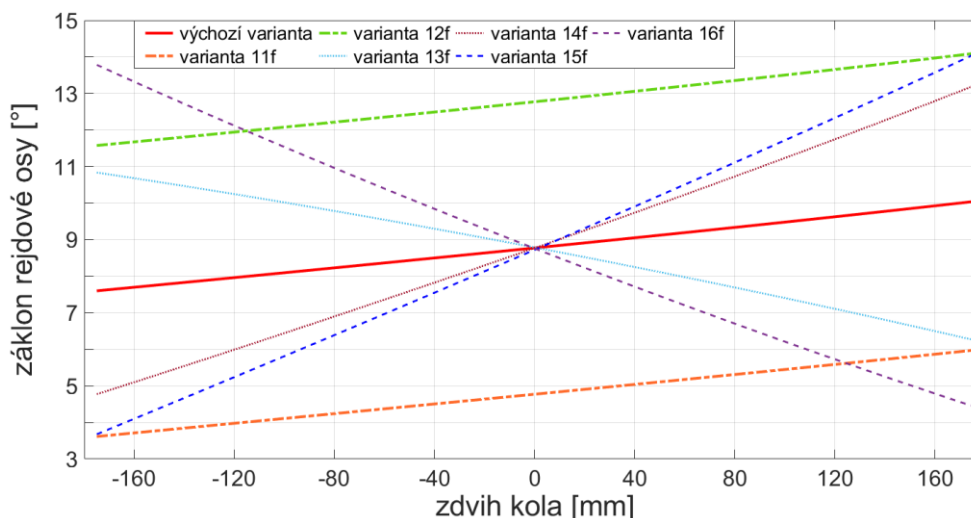
Střed klopení zadní nápravy výchozí varianty se nachází výše než přední nápravy, a to ve výšce 189,5 mm při nulovém zdvihu. Kromě varianty 9r s níže položeným středem klopení průměrně o 120 mm a var. 10r s výše položeným středem klopení průměrně o 115 mm se objevily změny ve výšce u dalších variant, které jsou vytvořeny za účelem změny jiného parametru viz Obr. 39. Jsou jimi varianty 15r (primárně s menší hodnotou anti-lift) a 18r (primárně s větší hodnotou anti-squat). Výška středu klopení je u var. 15r při vyvážení kol mírně větší než u výchozí varianty. Pro variantu 18r jde o zvýšení polohy středu klopení průměrně o 34 mm.



Obr. 39 Průběh výšky středu klopení v závislosti na zdvihu kola pro varianty zadního zavěšení

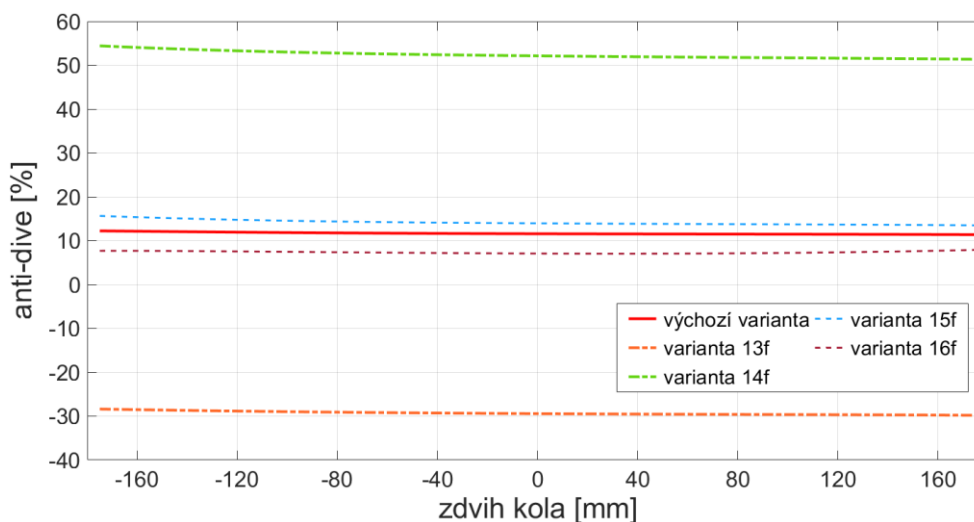
Charakteristiky úhlu záklonu rejdové osy pro varianty předního zavěšení, u kterých dochází k podstatné změně tohoto parametru jsou zobrazeny na Obr. 41. Záklon výchozí varianty se s rostoucím zdvihem mírně zvětšuje a v nulovém zdvihu má hodnotu  $8,8^\circ$ . Další dvě varianty zavěšení mají menší (var. 11f) a větší (var. 12f) statickou hodnotu záklonu o  $\pm 4^\circ$ . Nicméně nastavení záklonu není u všech variant ideální. Výraznou změnu záklonu mají i varianty 13f, 14f, 15f a 16f, což jsou zavěšení s rozdílnou hodnotou především anti-dive a anti-lift.

Ve statické poloze mají stejný úhel záklonu jako výchozí varianta, ale s rostoucím zdvihem více klesají (var. 13f, 16f) nebo rostou (var. 14f, 15f).



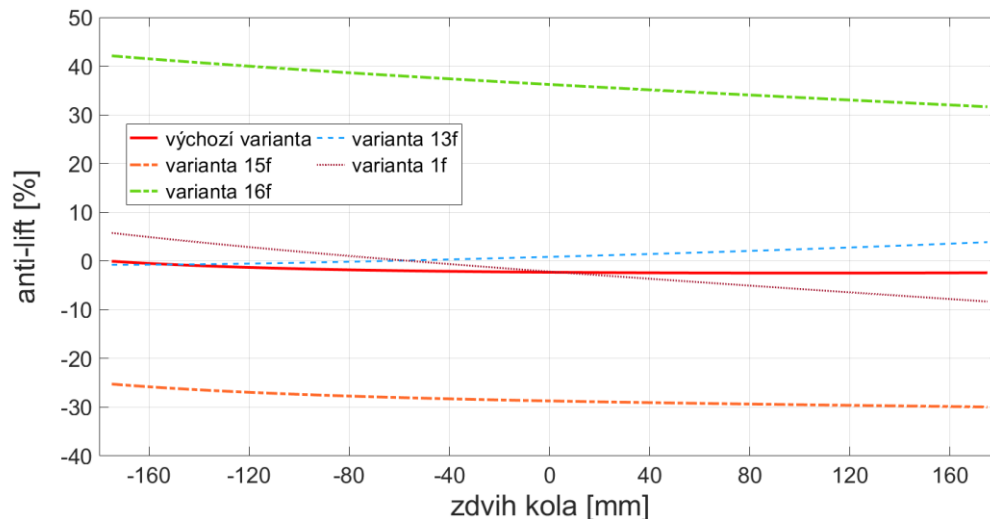
Obr. 41 Průběh úhlu záklonu rejdové osy v závislosti na zdvihu kola pro varianty předního zavěšení

Anti-dive předního zavěšení výchozí varianty se v průběhu propružení drží průměrně na hodnotě 11,7 % viz Obr. 42. Varianta 13f má hodnotu anti-dive v průběhu celého zdvihu menší než výchozí varianta průměrně o 41 p. b. a varianta 14f má anti-dive o stejnou hodnotu větší. Drobná změna v hodnotě anti-dive se objevila taktéž u variant 15f, kde je větší průměrně 2,5 p. b. a u var. 16f, kde je menší průměrně o 4,3 p. b..



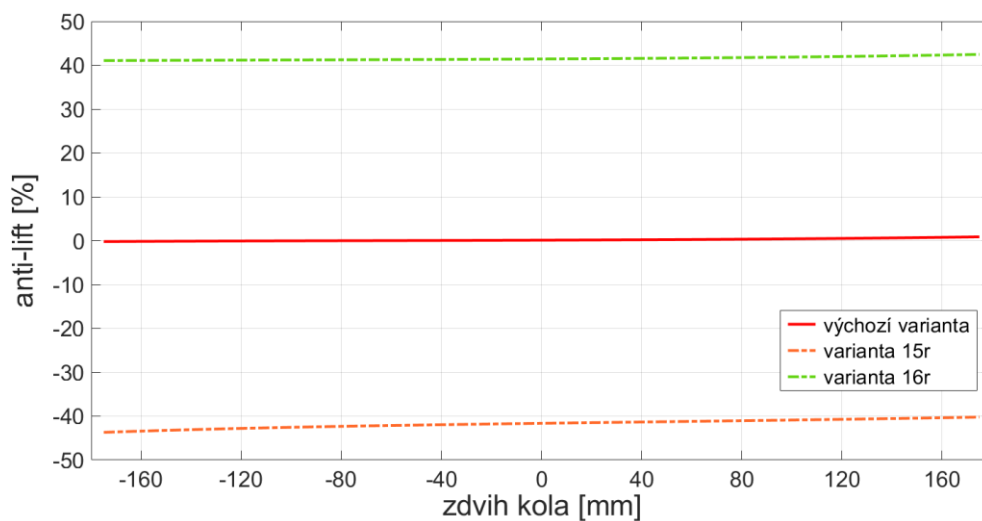
Obr. 42 Průběh anti-dive v závislosti na zdvihu kola pro varianty předního zavěšení

Charakteristika anti-lift předního zavěšení působící při zrychlování vozidla je, pro varianty zavěšení, u kterých dochází k její změně, zobrazena na Obr. 44. Hodnota anti-lift výchozí varianty se v celém rozsahu zdvihu pohybuje kolem -2 %. Varianta 15f má oproti výchozí variantě menší anti-lift v průměru o 26 p. b. Varianta 16f má naopak větší anti-lift, který zároveň s rostoucím zdvihem mírně klesá, nicméně průměrné zvýšení je 38 p. b.. V grafu je také vykreslený průběh anti-lift varianty 13f, jenž se s rostoucím zdvihem lehce zvedá. Anti-lift varianty 1r s rostoucím zdvihem klesá, ale jen drobně se liší od výchozí varianty.



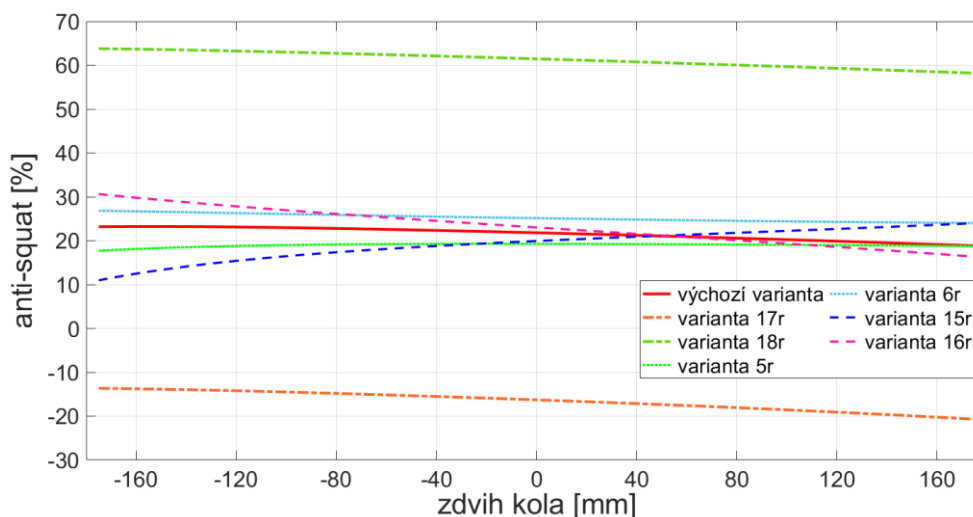
Obr. 44 Průběh anti-lift v závislosti na zdvihu kola pro varianty předního zavěšení

Na Obr. 43 jsou vykresleny průběhy anti-lift zadního zavěšení pro výchozí variantu a další dvě s menší a větší hodnotou parametru. Anti-lift výchozí varianty zůstává v celém rozsahu zdvihu na nulové hodnotě. Varianta 15r má menší hodnotu anti-lift, průměrná změna je 42 p. b.. U varianty 16r je anti-lift větší průměrně o 41 p. b..



Obr. 43 Průběh anti-lift v závislosti na zdvihu kola pro varianty zadního zavěšení

Průběhy charakteristiky anti-squat variant zadního zavěšení, u kterých se objevuje rozdíl oproti výchozí variantě, jsou zobrazeny na Obr. 45. Hodnota anti-squat výchozí varianty se drží téměř konstantně na 22 %. Záporný anti-squat zajišťuje varianta 17r, kde průměrný rozdíl vůči výchozí variantě je 38 p. b.. Průměrné zvýšení hodnoty anti-squat varianty zavěšení 18r je 40 p. b.. Odlišný průběh anti-squat se také objevil u dalších 4 variant, které primárně způsobují změnu jiného parametru. Jsou jimi var. 5r a 6r (změna sbíhavosti), 15r a 16r (změna anti-lift). Varianta 5r mírně snižuje anti-squat především při vyvěšení kola. Varianta 6r naopak anti-squat lehce zvětšuje. Důsledkem změn varianty 15r je rostoucí anti-squat a 16r klesající, oba průběhy protínají výchozí variantu při zdvihu přibližně 50 mm.



Obr. 45 Průběh anti-squat v závislosti na zdvihu kola pro varianty zadního zavěšení

#### 4.7 MODEL PNEUMATIK OFF-ROADOVÉHO VOZIDLA

Adams Car nabízí k použití několik různých modelů pneumatik. Jednotlivé modely se liší ve způsobu, jakým jsou počítány síly a momenty v kontaktu pneumatik s vozovkou. Každý model je vhodný pro jiné oblasti použití. Výběr správného modelu zajišťuje dosažení realistických výsledků.

Modely pneumatik určené pro analýzu jízdních vlastností vozidla tzv. „Handling Tire“ jsou popsány níže. Adams Car uvádí model PAC2002 jako vhodný pro široký rozsah aplikací. Nejprimitivnější zástupci modelů pneumatik pro analýzu jízdních vlastností je PAC89 a PAC94. Výpočet sil a momentů je založen na metodě „Magic Formula“ a platí pro ustálený stav zatěžování pneumatiky. Nicméně při jízdě se nějaké přechodové chování o nízké frekvenci přibližně do 8 Hz objevuje, pomocí těchto modelů je možné určit frekvenční odezvu 1. řádu. Model PAC2002 vychází taktéž z metody „Magic Formula“, ale je modernější a složitější než předchozí modely, tudíž je možné jej použít v širší oblasti. Popisuje chování pneumatiky na převážně hladké vozovce. Hodí se tak pro všechny běžné simulace jízdního chování a stability, kterými například jsou ustálený stav zatáčení, jednoduchá nebo dvojitá změna pruhu, brzdění nebo ztráta trakce při zatáčení a další. Ne příliš přesný je model pro simulaci překlopení, jelikož kromě charakteristik momentu klopení je potřeba správné modelování poloměru zatížené pneumatiky v čemž model ztrácí na přesnosti. Rozšíření modelu PAC2002 umožňuje jeho použití pro přejezd přes nerovnosti o malé vlnové délce a za vyšších frekvencí. Dalším složitějším modelem je PAC-TIME, který má přesnější rovnice pro výpočet bočních sil a vratného momentu za podmínek, kdy dochází ke skluzu pneumatik pouze v příčném směru. Pneumatika modelů Pacejka je modelována jako paralelní tlumič a pružina s jedním bodem kontaktu s vozovkou, který je vyhodnocován na základě náhrady pneumatiky a kola tuhým diskem. [11]

Model pneumatik Fiala používá fyzikální model pneumatiky. Kostra pneumatiky je tvořena prutem, který je uložen tak, aby se v příčném směru mohl elasticky deformovat. Kontakt

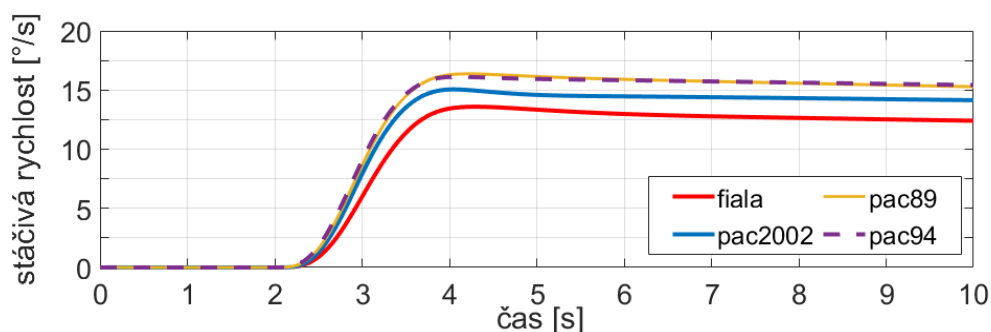
mezi vozovkou a kostrou je tvořen elastickými štetinami. Úhel odklonu nemá u tohoto modelu vliv na síly působící na pneumatiku. [11]

Model UA-Tire počítá síly a momenty v kontaktu pneumatiky s vozovkou jako funkci kinematických vlastností, kterými jsou podélný skluz, směrová úchylka, úhel odklonu, deformace pneumatiky a rychlost její deformace. [11]

Podstatně jednodušší, než předchozí modely je model 521-Tire, který pro své fungování nevyžaduje velké množství dat vlastností pneumatik, které by bylo potřeba měřit. Avšak tento model je již zastaralý a překonaný kvalitnějšími modely, proto jeho použití není doporučováno. [11]

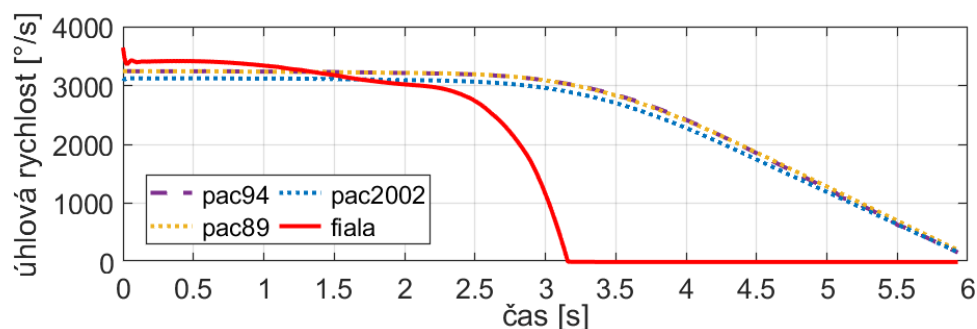
V následujících grafech jsou zobrazeny výsledky ze simulací off-roadového modelu vozidla s různými modely pneumatik (PAC89, PAC94, PAC2002, Fiala) při manévrech akcelerace, brzdění a skokové natočení volantu.

Na Obr. 46 je vykreslen průběh stáчивé rychlosti při manévru skokové natočení volantu. Rozdíl mezi pneumatikami PAC89 a PAC94 je minimální. Vozidlo s pneumatikami PAC2002 dosahuje menší stáчивé rychlosti. Vývin sil modelem Fiala je pomalejší a výsledná stáчивá rychlost je ještě menší.



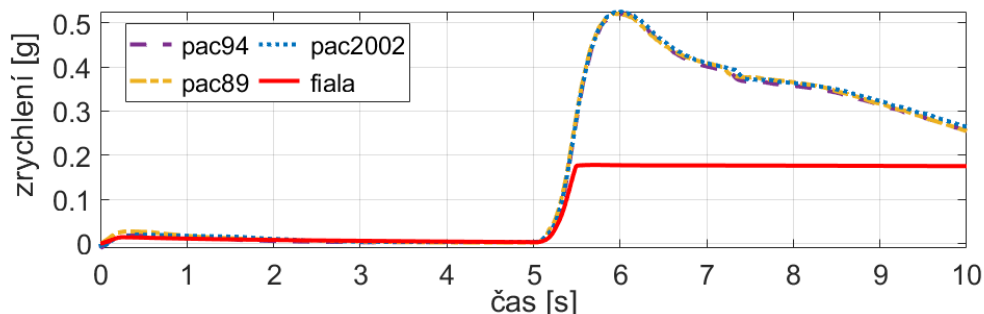
Obr. 46 Průběh stáчивé rychlosti při manévru skokové natočení volantu s různými modely pneumatik

Na Obr. 47 je zobrazen průběh úhlové rychlosti levého zadního kola při brzdění. Úhlová rychlost pneumatik modelu Fiala je zpočátku vyšší, ale následně prudce klesá a kolo se zablokuje. Pneumatiky PAC89 a PAC94 dávají stejný průběh rychlosti rotace kol, model pneumatik PAC2002 vykazuje téměř stejný průběh jen s trochu menší úhlovou rychlostí.



Obr. 47 Průběh úhlové rychlosti při manévru brzdění s různými modely pneumatik

Zrychlení vozidla při akceleraci s různými modely pneumatik je zobrazeno na *Obr. 48*. Průběh zrychlení s modely pneumatik PAC89, PAC94, PAC2002 se téměř neliší. Pneumatiky modelu Fiala opět nedokáží přenést síly vyvolané akcelerací a dochází k prokluzu pneumatik.



*Obr. 48* Průběh zrychlení při manévru akcelerace pro vozidla s různými modely pneumatik

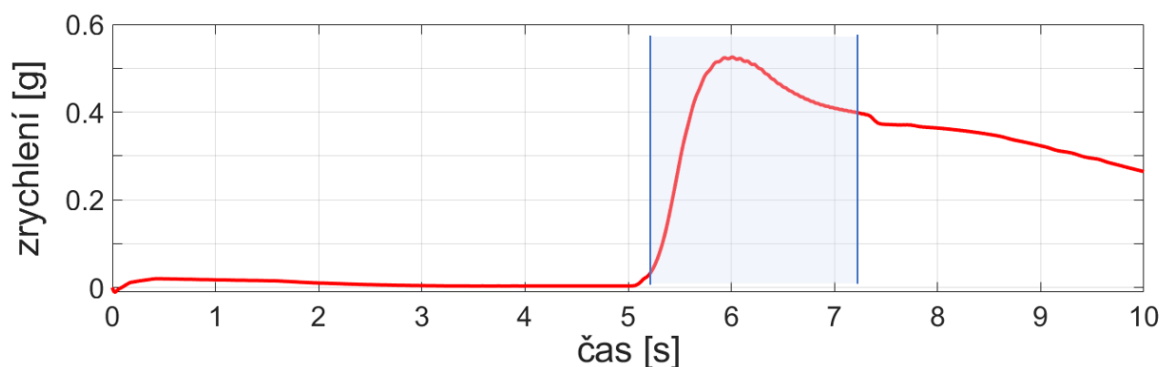
Simulace manévru s výchozím modelem vozidla je využíván model pneumatik PAC89 s defaultním nastavením parametrů. Pro simulace off-roadového modelu vozidla je vybrán model pneumatik PAC2002, jenž dává reálnější výsledky. Kromě rozměrových parametrů upravena také tuhost ve svislém směru na  $200 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$ .

## 4.8 ANALÝZA SIMULACÍ OFF-ROADOVÉHO MODELU VOZIDLA

V této kapitole se nachází detailní zhodnocení vlivu změn kinematiky zavěšení off-roadového modelu vozidla na jízdní vlastnosti. Analýza je provedena na stejných manévrech jako u předchozího modelu, jejich popis je uveden výše. Pro zhodnocení jízdních vlastností vozidla je vybráno několik parametrů, jejichž změna je u jednotlivých variant zavěšení s různou kinematikou sledována.

### 4.8.1 AKCELERACE

Průběh zrychlení během manévru akcelerace je zobrazen na *Obr. 49*, je v něm také vyznačená oblast mezi 5,2 a 7,2 s, ze které je vyhodnoceno průměrné zrychlení. Nicméně jeho hodnoty se mezi jednotlivými variantami zavěšení neliší.



*Obr. 49* Zrychlení off-roadového vozidla během manévru s vyznačenou sledovanou oblastí

Sledováním vyvěšení předních a zadních tlumičů se projevil vliv anti-charakteristik. Důsledek změny anti-lift předního zavěšení je uveden v *Tab. 21*, hodnoty platí pro zrychlení 0,52 g. Menší anti-lift o 26 p. b. varianty 15f se projeví zvětšením vyvěšení předních tlumičů o 5,3 mm oproti výchozí variantě. Větší anti-lift o 38 p. b. (var. 16f) zajistí zmenšení vyvěšení předních tlumičů o 8,9 mm. Rozdíl ve vyvěšení předních tlumičů je u varianty 15f menší, jelikož i změna charakteristiky je menší než u varianty 16f.

*Tab. 21* Vyvěšení tlumičů off-roadového vozu při akceleraci s rozdílným nastavením anti-lift předního zavěšení

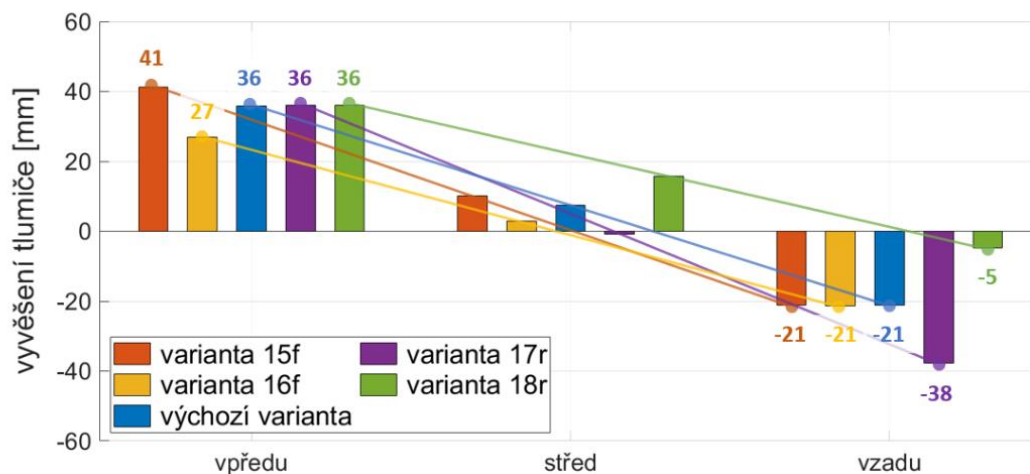
Vliv anti-lift na naklonění vozu		ANTI-LIFT			vyvěšení tlumičů (zrychlení 0,52 g)		
		$J_{al}$ [%]			vpředu	střed	vzadu
zdvih kola	[mm]	-80	0	80	[mm]	[mm]	[mm]
výchozí varianta		-1,8	-2,3	-2,5	35,9	7,4	-21,2
		změna vůči výchozí variantě			změna vůči výchozí variantě		
varianta 15f		-25,9	-26,4	-26,8	5,3	2,7	0,1
varianta 16f		40,4	38,5	36,6	-8,9	-4,5	-0,1

Vliv anti-squat zadního zavěšení na vyvěšení tlumičů ukazuje *Tab. 22*. Snížením hodnoty anti-squat o 38 p. b. (var. 17r) vůči výchozí variantě je dosaženo zvětšení stlačení zadních tlumičů o 16,5 mm. Stejně velkého rozdílu ve stlačení zadních tlumičů, ale v opačném smyslu, je vyvoláno zvýšením anti-squat o 40 p. b. (var. 18r). Drobné rozdíly v anti-squat, ale i anti-lift uvedené v popisu charakteristik výše nemají na naklonění významný vliv.

*Tab. 22* Vyvěšení tlumičů off-roadového vozu při akceleraci s rozdílným nastavením anti-squat

Vliv anti-squat na naklonění vozu		ANTI-SQUAT			vyvěšení tlumičů (zrychlení 0,52 g)		
		$J_{as}$ [%]			vpředu	střed	vzadu
zdvih kola	[mm]	-80	0	80	[mm]	[mm]	[mm]
výchozí varianta		22,8	21,8	20,6	35,9	7,4	-21,2
		změna vůči výchozí variantě			změna vůči výchozí variantě		
varianta 17r		-37,6	-38,1	-38,7	0,2	-8,2	-16,5
varianta 18r		39,9	39,7	39,4	0,2	8,3	16,5

Naklonění vozu během akcelerace je znázorněno na *Obr. 50*. Výchozí varianta má podstatně menší anti-lift než anti-squat, tím pádem vyvěšení tlumičů vpředu je větší než jejich stlačení vzadu. Na vyvěšení předních tlumičů má vliv pouze parametr anti-lift. Změna anti-squat zadního zavěšení způsobuje větší rozdíly ve stlačení zadních tlumičů, než obdobná změna anti-lift ve vyvěšení předních tlumičů. Vyvěšení předních tlumičů zůstává u variant 17r a 18r s rozdílným anti-squat stejné jako u výchozí varianty.

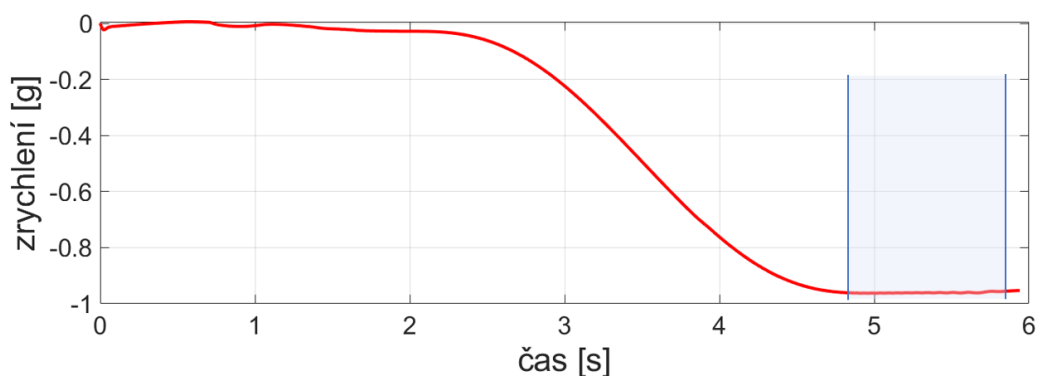


Obr. 50 Grafické znázornění vyvěšení tlumičů vozu při akceleraci s rozdílným nastavením anti-lift a anti-squat

Tak jako u předchozího modelu i zde se potvrdil vliv anti-charakteristik na naklonění vozu. Větší anti-squat snižuje pokles zadní části vozu. Navíc má off-roadový model charakteristiku anti-lift na přední nápravě, jejíž vyšší hodnota zmenšuje vyvěšení předních tlumičů.

#### 4.8.2 BRZDĚNÍ

Velikost zpomalení je vyhodnocována jako průměrná hodnota mezi 4,8 až 5,8 s. Průběh zpomalení spolu se sledovanou oblastí je vykreslen na Obr. 51. K drobné změně došlo u varianty 15r s menší hodnotou anti-lift, která dosáhla většího zpomalení o 0,0026 g a u varianty 16r s větší hodnotou anti-lift, která má zpomalení menší o 0,0022 g.



Obr. 51 Zrychlení off-roadového vozidla během brzdění s vyznačenou sledovanou oblastí

Stlačení předních tlumičů závisí na nastavení anti-dive. Velikost změny parametru anti-dive a s tím související změna ve vyvěšení tlumičů je uvedena v Tab. 24. Snížením anti-dive o 41 p. b. (var. 13f) se jejich stlačení zvětší o 13,9 mm. Naopak zvýšení anti-dive o stejnou hodnotu (var. 14f) se stlačení tlumičů zmenší o 16,1 mm. Vyvěšení zadních tlumičů zůstává pro obě varianty téměř beze změny.

Tab. 24 Vyvěšení tlumičů off-roadového vozu při brzdění s rozdílným nastavením anti-dive

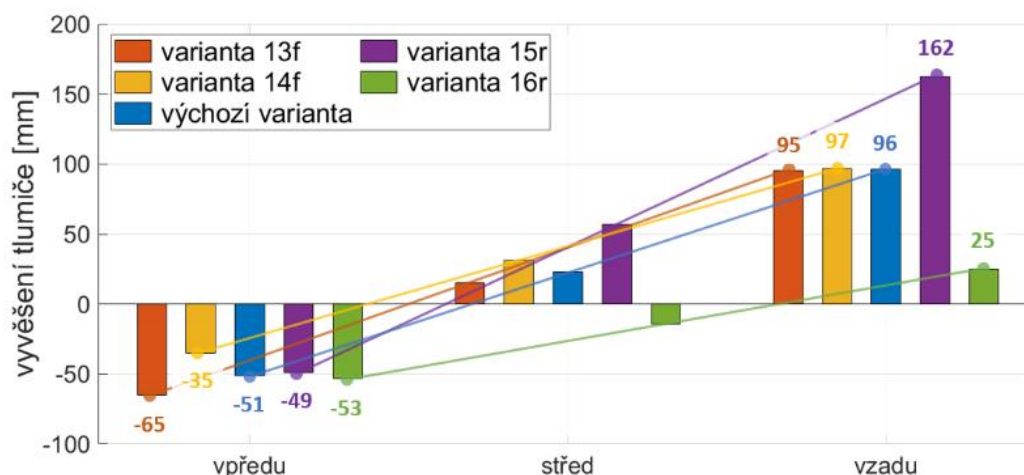
Vliv anti-dive na naklonění vozu		ANTI-DIVE			vyvěšení tlumičů (zrychlení -0,96 g)		
		$J_{ad}$ [%]			vpředu	střed	vzadu
zdvih kola	[mm]	-80	0	80	[mm]	[mm]	[mm]
výchozí varianta		11,8	11,6	11,5	-51	22,6	96,1
		změna vůči výchozí variantě			změna vůči výchozí variantě		
varianta 13f		-40,9	-41	-41,1	-13,9	-7,4	-0,9
varianta 14f		41	40,5	40,3	16,1	8,4	0,8

Anti-lift (neboli anti-rise) zadního zavěšení ovlivňuje při brzdění vyvěšení zadních tlumičů viz Tab. 23. Výchozí varianta zavěšení má téměř nulový anti-lift a vyvěšení zadních tlumičů při zpomalení 0,96 g činí 96,1 mm. Pokud se hodnota anti-lift zmenší o 42 p. b. (var. 15r), tak se dané vyvěšení zvětší o 66,3 mm. Při zvětšení anti-lift o 41 p. b. (var. 16r) dojde ke zmenšení vyvěšení o 71,4 mm.

Tab. 23 Vyvěšení tlumičů off-roadového vozu při brzdění s rozdílným nastavením anti-lift

Vliv anti-lift na naklonění vozu		ANTI-LIFT			vyvěšení tlumičů (zrychlení -0,96g)		
		$J_{ar}$ [%]			vpředu	střed	vzadu
zdvih kola	[mm]	-80	0	80	[mm]	[mm]	[mm]
výchozí varianta		0,0	0,1	0,3	-51	22,6	96,1
		změna vůči výchozí variantě			změna vůči výchozí variantě		
varianta 15r		-42,3	-41,7	-41,3	2,2	34,2	66,3
varianta 16r		41,2	41,3	41,4	-2	-36,8	-71,4

Na Obr. 52 je ukázáno klonění vozidla při brzdění pro varianty 13f a 14f, které mají jiné nastavení anti-dive, a dochází tak ke změně stlačení předních tlumičů s tím, že vyvěšení zadních tlumičů se vůči výchozí variantě nemění. Také je zde vyobrazeno klonění variant 15r a 16r s rozdílným nastavením anti-lift, přední tlumiče opět zůstávají ve stejné poloze jako u výchozí varianty.



Obr. 52 Grafické znázornění vyvššení tlumičů off-roadového vozu při brzdění s rozdílným nastavením anti-dive a anti-lift

Tab. 26 ukazuje klonění vozu při brzdění pro různé varianty anti-lift na přední nápravě. Změny vyvššení tlumičů jsou téměř totožné se změnami pro varianty 13f a 14f s rozdílným anti-dive. U varianty 15f s menší hodnotou anti-lift se objevuje větší stlačení předních tlumičů a u var. 16f s vyšší hodnotou se toto stlačení naopak zmenšuje.

Tab. 26 Vyvššení tlumičů off-roadového vozu při brzdění s rozdílným nastavením anti-lift na přední nápravě

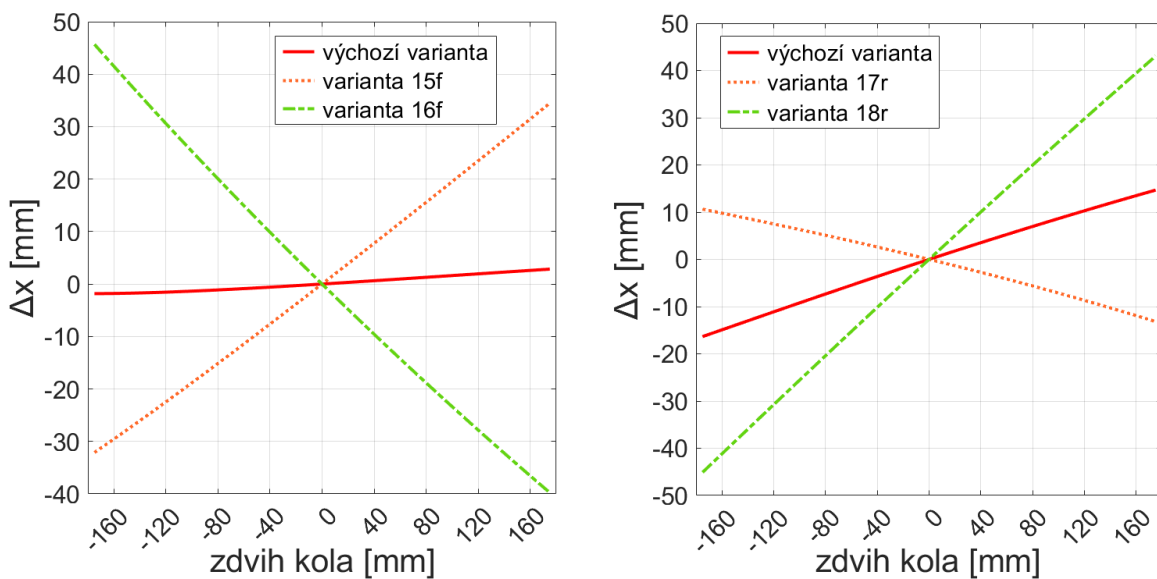
Vliv anti-lift na naklonění vozu		ANTI-LIFT			vyvššení tlumičů (zrychlení $-0,96 g$ )		
		$J_{al}$ [%]			vpředu	střed	vzadu
zdvih kola	[mm]	-80	0	80	[mm]	[mm]	[mm]
výchozí varianta		-1,8	-2,3	-2,5	-51	22,6	96,1
		změna vůči výchozí variantě			změna vůči výchozí variantě		
varianta 15f		-25,9	-26,4	-26,8	-13,2	-6,1	1,1
varianta 16f		40,4	38,5	36,6	16,3	7,8	-0,6

Tab. 25 Vyvššení tlumičů off-roadového vozu při brzdění s rozdílným nastavením anti-squat

Vliv anti-squat na naklonění vozu		ANTI-SQUAT			vyvššení tlumičů (zrychlení $-0,96 g$ )		
		$J_{as}$ [%]			vpředu	střed	vzadu
zdvih kola	[mm]	-80	0	80	[mm]	[mm]	[mm]
výchozí varianta		22,8	21,8	20,6	-51	22,6	96,1
		změna vůči výchozí variantě			změna vůči výchozí variantě		
varianta 17r		-37,6	-38,1	-38,7	-0,8	-7,6	-14,3
varianta 18r		39,9	39,7	39,4	0,9	6,6	12,3

Vyvěšení tlumičů vozidla pro různé varianty anti-squat je uvedeno v *Tab. 25*. Zavěšení s menší hodnotou anti-squat má menší vyvěšení zadních tlumičů a zavěšení s větší hodnotou má naopak vyvěšení větší. Změny ve vyvěšení tlumičů se velikostně přibližují změnám při rozdílném anti-dive a anti-lift na předním zavěšení.

Projevy vozidla se zavěšením s rozdílným anti-dive a anti-lift jsou podle předpokladů obdobně, jako u předchozího modelu. Avšak chování vozidla s rozdílným nastavením anti-lift na přední nápravě a anti-squat na zadní je poněkud nečekané, jelikož tyto charakteristiky působí především při akceleraci. Nicméně při změně nastavení kinematiky těchto variant zavěšení došlo také ke změně závislosti polohy bodu kontaktu pneumatiky s vozovkou v podélném směru na propružení. U varianty 15f se tento bod při stlačení kol posouvá pod auto, čímž se zmenšuje rozvor vozidla, a u varianty 16f se posouvá ve směru opačném (rozvor se zvětšuje) viz *Obr. 53* (vlevo). Kontakt pneumatiky s vozovkou varianty zadního zavěšení 17r se při vyvěšení posouvá v opačném směru než je jízda vozidla (rozvor se zvětšuje) a u varianty 18r se posouvá ve směru jízdy (rozvor se zmenšuje) viz *Obr. 53* (vpravo). Pokud je rozvor vozidla menší, zvýší se přenos zatížení na přední nápravu a zároveň se vůz více nakloní. V případě změny na předním zavěšení to znamená větší stlačení předních tlumičů a v případě zadního zavěšení dojde k většímu vyvěšení zadních tlumičů.

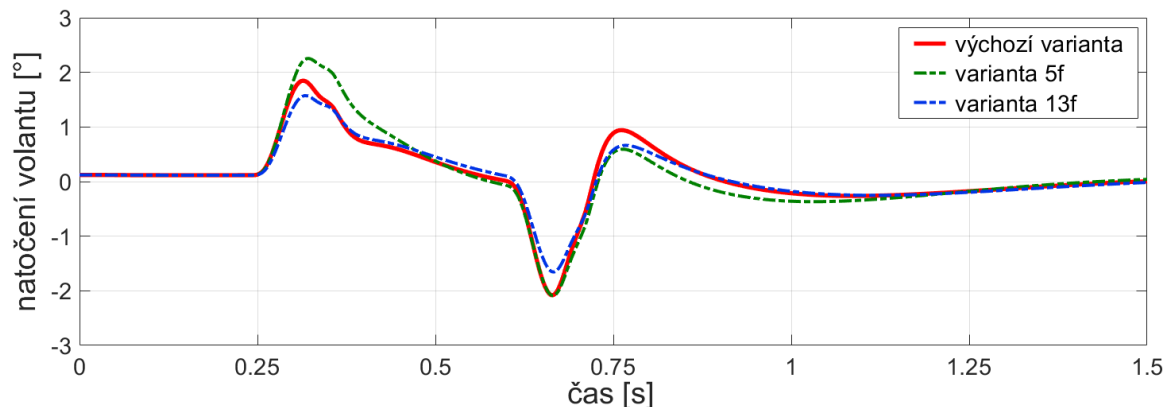


*Obr. 53* Průběh změny polohy bodu kontaktu pneumatiky s vozovkou v ose x  $\Delta x$  v závislosti na zdvihu kola pro varianty předního (vlevo) a zadního (vpravo) zavěšení off-roadového vozidla

Během brzdění dochází k podélnému přesunu zatížení na přední kola. Zvýšení těžiště tento jev ještě umocňuje. Proto varianta 15r, u které dochází k velkému zvýšení těžiště, má zároveň větší přenos zatížení na přední nápravu. Tím se zvýší i brzdná síla na předních kolech, a jelikož poměr brzdících sil je na předních kolech větší, celková brzdná síla vozidla je větší, což zajišťuje větší zpomalení. U varianty 16r se poloha těžiště sníží, tudíž výsledný efekt je přesně opačný. Varianty zavěšení s rozdílným anti-dive způsobují podstatně menší změnu polohy těžiště, takže, ačkoliv se její vliv projeví, není tak výrazný. Stejně tak u variant 15f, 16f, 17r a 18r, kde se navíc ještě přidá změna délky rozvoru.

### 4.8.3 PŘEJEZD PŘES NEROVNOST

Během přejezdu přes nerovnost je sledováno natočení volantu, které je nutné pro zachování přímé jízdy. Na *Obr. 54* je vykreslen průběh natočení volantu do 1,5 s pro výchozí variantu zavěšení a další dvě, 5f a 13f, které mají největší rozdíl natočení volantu.



*Obr. 54* Průběh natočení volantu při přejezdu nerovnosti

Vliv sbíhavosti na natočení volantu je uveden v *Tab. 27*. Z průběhu natočení volantu je vyhodnocována směrodatná odchylka, která je v tomto případě jasnějším ukazatelem. Zvýšení potřebného natočení volantu je nejvíce patrné u varianty 5f s rostoucí sbíhavostí se zdvihem na předním zavěšení. Výchylka natočení volantu při přejezdu předním kolem se zvýší o  $0,4^\circ$  a celková směrodatná odchylka se zvýší na hodnotu  $0,49^\circ$ . Největší pokles potřebné korekce volantem se objevuje u varianty 6r, která má klesající sbíhavost se zdvihem na zadním zavěšení. Maximální natočení volantu při přejezdu zadním kolem se zmenší o  $0,23^\circ$  a celková směrodatná odchylka klesne na hodnotu  $0,4^\circ$ . Zmenšení statické sbíhavosti na předním zavěšení zvýší směrodatnou odchylku, zvýšení sbíhavosti směrodatnou odchylku sníží. Na zadním zavěšení toto platí obráceně.

*Tab. 27* Natočení volantu při přejezdu nerovnosti s rozdílným nastavením sbíhavosti

Vliv sbíhavosti na natočení volantu		SBÍHAVOST			Úhel natočení volantu [°]			
					přejezd předním kolem	přejezd zadním kolem		směrodatná odchylka
zdvih kola	[mm]	-80	0	80		prvotní natočení	prvotní natočení	
výchozí varianta	vpředu	0,05	0	-0,15	1,73	-2,2	3,02	0,43
	vzadu	0,08	0	0,08				
		změna vůči výchozí variantě			změna	změna	změna	
	varianta 5.1f	-0,04	0,00	0,14	0,14	-0,04	-0,04	0,45
	varianta 5.1r	-0,07	0,00	-0,08	0,00	0,02	-0,02	0,42
	varianta 5f	-0,46	0,00	0,51	0,40	-0,01	-0,34	0,49
	varianta 6f	0,39	0,00	-0,22	-0,06	-0,27	0,66	0,44
	varianta 5r	-0,55	0,00	0,33	0,01	-0,17	0,11	0,45
	varianta 6r	0,42	0,00	-0,51	-0,02	0,23	-0,15	0,40
	varianta 7f	-0,50	-0,50	-0,50	0,05	0,02	0,07	0,47
	varianta 8f	0,50	0,50	0,50	0,24	-0,06	0,01	0,42
	varianta 7r	-0,50	-0,50	-0,50	0,00	0,20	-0,55	0,41
	varianta 8r	0,50	0,50	0,50	0,02	-0,17	0,56	0,45

Dalším parametrem majícím vliv na natočení volantu je anti-dive viz Tab. 28. Varianta 13f s menší hodnotou anti-dive zajišťuje největší pokles směrodatné odchylky, zmenší se na hodnotu  $0,37^\circ$ . Překvapivě i u varianty 14f s větší hodnotou anti-dive dojde také ke zmenšení směrodatné odchylky.

Tab. 28 Natočení volantu při přejezdu nerovnosti s rozdílným nastavením anti-dive

Vliv anti-dive na natočení volantu		ANTI-DIVE			Úhel natočení volantu [°]			směrodatná odchylka
					přejezd předním kolem		přejezd zadním kolem	
zdvih kola	[mm]	$J_{ad}$ [%]			prvotní natočení	prvotní natočení	rozkmít natočení	
		-80	0	80				
výchozí varianta		11,8	11,6	11,5	1,73	-2,2	3,02	0,43
		změna vůči výchozí variantě			změna	změna	změna	
varianta 13f		-40,9	-41	-41,1	-0,27	0,42	-0,7	0,37
varianta 14f		41	40,5	40,3	-0,37	0,53	-0,85	0,35

V Tab. 29 je uvedena směrodatná odchylka natočení volantu pro varianty zavěšení s rozdílnou hodnotou anti-lift na přední nápravě. U varianty 15f s menší hodnotou anti-lift se směrodatná odchylka sníží na hodnotu  $0,37^\circ$ . Avšak u varianty 16f s vyšší hodnotou anti-lift se téměř nezmění.

Tab. 29 Natočení volantu při přejezdu nerovnosti s rozdílným nastavením anti-lift

Vliv anti-lift na natočení volantu		ANTI-LIFT			Úhel natočení volantu [°]			směrodatná odchylka
					přejezd předním kolem		přejezd zadním kolem	
zdvih kola	[mm]	$J_{al}$ [%]			prvotní natočení	prvotní natočení	rozkmít natočení	
		-80	0	80				
výchozí varianta		-1,8	-2,3	-2,5	1,73	-2,2	3,02	0,43
		změna vůči výchozí variantě			změna	změna	změna	
varianta 15f		-25,9	-26,4	-26,8	-0,18	0,29	-0,4	0,37
varianta 16f		40,4	38,5	36,6	-0,01	0,27	-0,51	0,42

Natočení volantu během přejezdu přes nerovnost není ani pro výchozí variantu moc velké. U předchozího modelu byla nutnost korekce větší, což je pravděpodobně způsobené použitím pneumatik o větší tuhosti. Tím pádem jsou i rozdíly v průběhu velmi malé. Každopádně i tady se objevilo zvětšení směrodatné odchylky u varianty předního zavěšení se zvětšující se sbíhavostí se zdvihem. Varianta zadního zavěšení s rostoucí sbíhavostí při stlačení kola nemá tak velké navýšení směrodatné odchylky, jelikož i změna sbíhavosti vůči výchozí variantě je menší. Ke změně potřebného natočení volantu dochází také u variant s rozdílným nastavením anti-dive a anti-lift na přední nápravě. U varianty zavěšení s menší hodnotou anti-lift zároveň dochází při stlačení k pohybu kola od nerovnosti, což může napomáhat k snadnějšímu přejezdu přes nerovnost. U varianty s větší hodnotou anti-lift se naopak kolo při stlačení pohybuje proti nerovnosti.

#### 4.8.4 JÍZDA PO KRUHU S KONSTANTNÍM POLOMĚREM

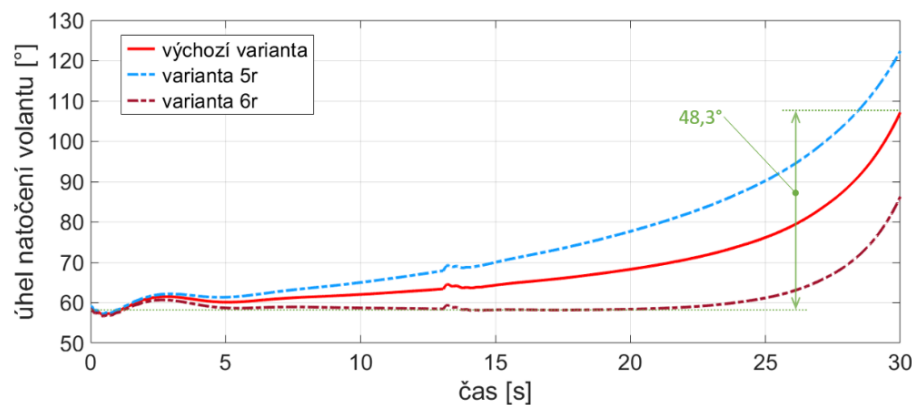
Vozidlo vykonávající tento manévř je zrychlováno do dané rychlosti, v tomto případě do  $70 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , a natočením volantu je udržováno na dráze o konstantním poloměru 55 m. Pokud je vozidlo nedotáčivé, je potřeba zvyšovat natočení volantu spolu s rostoucí rychlostí. U přetáčivého vozidla je naopak potřeba natočit kola v opačném směru ven ze zatáčky. Manévř začíná z rychlosti  $10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , potřebné navýšení natočení volantu pro udržení jízdy po kruhové dráze od počátečního natočení je  $48,3^\circ$ . Výchozí varianta off-roadového vozu je tedy nedotáčivá. Boční zrychlení při maximální rychlosti dosahuje  $0,686 \text{ g}$  a u ostatních variant se podstatně neliší. Změna natočení volantu sledovaných variant zavěšení uváděná v následujících tabulkách udává míru zvýšení či snížení nedotáčivosti.

Významný vliv na stáčivost vozu má nastavení sbíhavosti viz *Tab. 30*. Varianty zavěšení 5.1f a 5.1r zajišťují konstantní nulovou sbíhavost, kterou výchozí varianta předního i zadního zavěšení nemá. Na předním zavěšení (var. 5.1f) došlo ke zvýšení sbíhavosti při stlačení kola a snížení sbíhavosti při vyvěšení, jako kdyby byl vytvořen kladný „bump steer“ (natočení kol do sbíhavosti při jejich stlačení), což zmenšuje nedotáčivost vozu. Jinak řečeno, výchozí varianta s klesající sbíhavostí při rostoucím zdvihu, která činí  $-0,15^\circ$  při zdvihu 80 mm, vyžaduje větší natočení volantu o  $6,1^\circ$ , je více nedotáčivá než var. 5.1f. K vytvoření nulové sbíhavosti na zadním zavěšení (var. 5.1r) bylo potřeba snížit sbíhavost výchozí varianty při stlačení i vyvěšení kola, čímž je zmenšena nedotáčivost vozu. Výchozí varianta s kladnou sbíhavostí při vyvěšení i stlačení zadních kol potřebuje větší natočení volantu o  $1,5^\circ$ .

*Tab. 30* Změna natočení volantu off-roadového vozu během manévřu pro varianty s rozdílným nastavením sbíhavosti

Vliv sbíhavosti na stáčivost vozu		SBÍHAVOST			natočení volantu
		$\delta$ [°]			
zdvih kola	[mm]	-80	0	80	[°]
výchozí varianta	vpředu	0,05	0	-0,15	48,3
	vzadu	0,08	0	0,08	
		změna sbíhavosti vůči výchozí variantě			změna natočení
varianta 5.1f		-0,04	0,00	0,14	-6,1
varianta 5.1r		-0,07	0,00	-0,08	-1,5
varianta 5f		-0,46	0,00	0,51	-19,2
varianta 6f		0,39	0,00	-0,22	7,2
varianta 5r		-0,55	0,00	0,33	14,9
varianta 6r		0,42	0,00	-0,51	-20,5
varianta 7f		-0,50	-0,50	-0,50	9,5
varianta 8f		0,50	0,50	0,50	-8
varianta 7r		-0,50	-0,50	-0,50	-12,6
varianta 8r		0,50	0,50	0,50	8,3

Varianta předního zavěšení 5f s opravdu kladným „bump steerem“ způsobuje výrazné snížení nedotáčivosti, natočení volantu je menší o  $19,2^\circ$ . Podobně velké zmenšení natočení volantu  $20,5^\circ$  vyžaduje varianta zadního zavěšení 6r, jejíž kola se při stlačení natáčejí do rozbíhavosti a při vyvážení do sbíhavosti. U obou zmíněných variant je rozdíl ve sbíhavosti oproti výchozímu zavěšení při zdvihu  $+80$  mm  $0,51^\circ$ . Průběh natočení volantu varianty 6r je možné vidět na *Obr. 55*. Dalo by se říct, že vozidlo s touto variantou je neutrální, jelikož nevyžaduje větší natočení volantu při zvyšující se rychlosti. To platí přibližně prvních 22 s manévru, než příčné zrychlení dosáhne  $0,41$  g, od této hodnoty začne natočení pozvolně růst, až nakonec prudce vzroste na finální hodnotu. V grafu je také vykreslen průběh natočení volantu varianty 5r, která způsobuje výrazné zvýšení nedotáčivosti. V důsledku zvýšení sbíhavosti na vnějším kole a snížení na vnitřním je potřeba zvětšit natočení volantu o  $14,9^\circ$  vůči výchozí variantě. Opačná změna sbíhavosti na předním zavěšení (var. 6f) má obdobný vliv, zvýšení nedotáčivosti. Rozdíl ve sbíhavosti oproti výchozí variantě je při zdvihu  $-80$  mm  $+0,39^\circ$  a při zdvihu  $+80$  mm  $-0,22^\circ$ , tyto menší změny vyžadují zvýšení natočení volantu o  $7,2^\circ$ . Kdyby byl uvažován rozdíl mezi variantou 5.1f s konstantní sbíhavostí a variantami 5f a 6f, tak by rozdíl v natočení volantu byl pro obě varianty přibližně  $13^\circ$ .



*Obr. 55* Průběh natočení volantu pro varianty zadního zavěšení off-roadového vozu s odlišnou sbíhavostí

Statická změna sbíhavosti má o něco menší vliv na stáčitost vozidla, ale stále velmi podstatný. Snížení sbíhavosti na předním zavěšení (var. 7f) zvyšuje nedotáčivost, naopak na zadním zavěšení ji snižuje. V případě varianty 7r je v důsledku zmenšení sbíhavosti o  $0,5^\circ$  potřeba menší natočení volantu o  $12,6^\circ$ . Zvýšení sbíhavosti o  $0,5^\circ$  na předním zavěšení vyvolá snížení nedotáčivosti, změna potřebného natočení volantu je  $-8^\circ$ , naopak na zadním zavěšení způsobí zvýšení nedotáčivosti, a natočení volantu se tak zvýší o  $8,3^\circ$ .

Další podstatný vliv na ochotu vozu stáčet má nastavení úhlu odklonu, konkrétní hodnoty změny natočení volantu pro jednotlivé varianty jsou uvedeny v *Tab. 32*. Změna průběhu odklonu předního zavěšení směrem k většímu zmenšení odklonu při stlačení kola a zvětšení při vyvážení kola způsobuje snížení nedotáčivosti. Varianta 2f má o  $0,46^\circ$  větší odklon při zdvihu  $-80$  mm a o  $0,62^\circ$  menší odklon při zdvihu  $80$  mm, výsledkem je snížení potřebného natočení volantu o  $7,7^\circ$  vůči výchozí variantě. V případě opačné změny odklonu (var. 1f) se vozidlo stane více nedotáčivým a natočení volantu se zvýší o  $15^\circ$ . Průběh odklonu zadního zavěšení výchozí varianty má velký rozsah změny v závislosti na propružení. Rozdíly v nastavení úhlu odklonu variant 1r a 2r nejsou příliš velké, ale i tak je jejich vliv znatelný. Na zadním zavěšení způsobí zmenšení změny odklonu se zdvihem snížení nedotáčivosti. Naopak zvýšení změny taktéž zvýší nedotáčivost.

Tab. 32 Změna natočení volantu off-roadového vozu během manévru pro varianty s rozdílným nastavením odklonu

Vliv odklonu na stáčivost vozu		ODKLON			natočení volantu
		$\gamma$ [°]			
zdvih kola	[mm]	-80	0	80	[°]
výchozí varianta	vpředu	0,66	-0,01	-1,21	48,3
	vzadu	0,95	-0,02	-1,51	
		změna odklonu vůči výchozí variantě			změna natočení
varianta 1f		-0,39	0	0,6	15
varianta 2f		0,46	-0,01	-0,62	-7,7
varianta 1r		-0,2	0,01	0,31	-0,9
varianta 2r		0,21	0,01	-0,3	2,6
varianta 3f		-1	-1	-1	-10,2
varianta 4f		1	1	1	10,6
varianta 3r		-1	-1	-1	4,9
varianta 4r		1	1	1	-5,6

Varianta předního zavěšení 3f s menším odklonem o  $1^\circ$  je méně nedotáčivá, natočení volantu je tak nižší o  $10,2^\circ$ . Téměř stejně velká změna  $10,6^\circ$ , ale ke zvýšení natočení je potřeba u varianty 4f s větším odklonem o  $1^\circ$ . Stejně velká změna odklonu o  $\pm 1^\circ$  na zadním zavěšení vyvolá menší změnu natočení volantu a v opačném smyslu než v případě předního zavěšení. Menší odklon na zadním zavěšení (var. 3r) má za následek větší nedotáčivost vozidla a větší odklon (var. 4r) naopak zmenší nedotáčivost.

Tab. 31 Změna natočení volantu off-roadového vozu během manévru pro varianty s rozdílnou výškou středou klopení

Vliv výšky středu klopení na stáčivost		VÝŠKA STŘEDU KLOPENÍ			natočení volantu
		$h_r$ [mm]			
zdvih kola	[mm]	-80	0	80	[°]
výchozí varianta	vpředu	229,8	138,1	45,8	48,3
	vzadu	280,6	189,5	97,8	
		změna výšky vůči výchozí variantě			změna natočení
varianta 9f		-126,2	-124,5	-124	-16,2
varianta 10f		125,4	126,6	127,7	16,9
varianta 9r		-120,4	-123,9	-120,5	19
varianta 10r		115,9	116	115,1	-16,9
varianta 15r		36,3	21	3,8	-2
varianta 16r		-14,2	-2,8	2,9	1,1
varianta 18r		32,4	31,5	33,3	-5,7

Sledováním natočení volantu variant zavěšení s jinou výškou středu klopení se ukázalo, že níže položený střed klopení přední nápravy (var. 9f) vede ke snížení nedotáčivosti vozu. Pokud je střed klopení výš, v případě varianty 10f o 126 mm, potřebné natočení volantu se zvýší o 16,9 mm. Výška středu klopení zadní nápravy ovlivňuje nedotáčivost vozu přesně obráceně, než jak je tomu na přední nápravě. Snížení polohy (var. 9r) zvýší nedotáčivost a zvýšení polohy (var. 10r) sníží nedotáčivost. Konkrétní hodnoty změny natočení volantu pro zmíněné varianty jsou uvedeny v *Tab. 31*. Drobný rozdíl ve výšce středu klopení mají také varianty zadního zavěšení 15r a 16r s primární změnou anti-lift a 18r s primární změnou anti-squat. Změny natočení volantu jsou v souladu s předcházejícím tvrzením. U varianty 18r je poloha středu klopení zvýšena o 34 mm, což způsobí zmenšení potřebného natočení volantu o 5,7°.

V *Tab. 33* je uveden vliv záklonu na natočení volantu během manévru. Varianta 11f se zmenšeným úhlem záklonu o 4° vyvolá zvýšení natočení volantu o 3,3°. Zvýšení záklonu má podstatně menší vliv na nedotáčivost, stejně velký rozdíl 4° (var. 12f) způsobí zmenšení natočení volantu jen o 0,6°.

*Tab. 33* Změna natočení volantu off-roadového vozu během manévru pro varianty s rozdílným záklonem rejdové osy

Vliv záklonu rejdové osy na stáčivost		ZÁKLON REJDOVÉ OSY			natočení volantu
		$\theta_c$ [°]			
zdvih kola	[mm]	-80	0	80	[°]
výchozí varianta		8,2	8,8	9,3	48,3
		změna záklonu vůči výchozí variantě			změna natočení
varianta 11f		-4	-4	-4	3,3
varianta 12f		4	4	4,1	-0,6
varianta 13f		1,6	0	-1,6	3,2
varianta 14f		-1,3	0	1,4	5,3
varianta 15f		-1,8	-0,1	1,8	10,7
varianta 16f		2,8	0	-2,6	-3,3

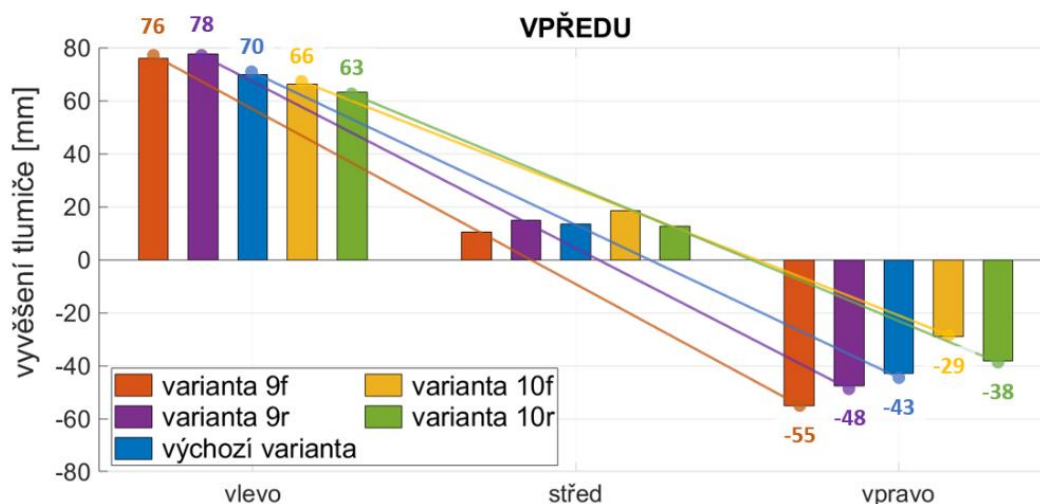
Další uvedené varianty 13f, 14f, 15f a 16f mají mírně rozdílný záklon než výchozí varianta, který se zároveň mění s propružením. Tyto rozdíly patrně přispívají ke změně nedotáčivosti, ale nejen ty, zhodnocení dalších vlivů je uvedeno na konci této kapitoly. Varianta 17r s menší hodnotou anti-squat, která dosud nebyla zmíněna nezpůsobuje změnu stáčivosti vozidla.

Kromě natočení volantu je také sledováno klopení vozidla. Toto chování nejvíce ovlivňuje výška středu klopení viz *Tab. 34*. Pokud je střed klopení níž, tak se vozidlo více naklopí ze zatáčky. Například pro variantu 9f to znamená, větší stlačení pravého předního tlumiče o 12,6 mm a zároveň větší vyvěšení levého předního tlumiče o 6,1 mm. Výše položený střed klopení naopak zmenšuje naklopení vozu. Tato reakce je stejná pro přední i zadní nápravu. U varianty 18r dochází taktéž k menšímu naklopení, ale mimo to se celá zadní část vozu v důsledku většího anti-squat vůči výchozí variantě zvýší.

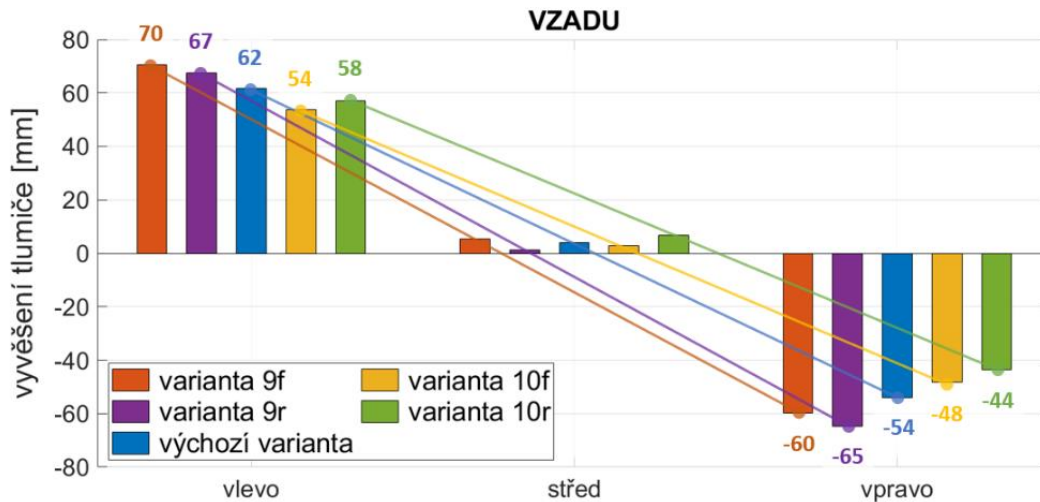
Tab. 34 Vyvěšení tlumičů off-roadového vozu při jízdě po kruhu pro varianty s rozdílnou výškou středou klopení

Vliv výšky středu klopení na naklopení vozu		VÝŠKA STŘEDU KLOPENÍ			vyvěšení tlumičů (boční zrychlení 0,65 g)					
					vpředu			vzadu		
		zdvih kola	[mm]	-80	0	80	vlevo	střed	vpravo	vlevo
výchozí	vpředu	229,8	138,1	45,8	70	13,6	-42,8	-	-	-
varianta	vzadu	280,6	189,5	97,8	-	-	-	61,8	4	-53,9
		změna vůči výchozí variantě			změna vůči výchozí variantě			změna vůči výchozí variantě		
varianta 9f		-126,2	-124,5	-124	6,1	-3,2	-12,4	8,6	1,3	-5,9
varianta 10f		125,4	126,6	127,7	-3,8	5,0	13,7	-8,1	-1,3	5,7
varianta 9r		-120,4	-123,9	-120,5	7,6	1,4	-4,9	5,6	-2,47	-10,8
varianta 10r		115,9	116	115,1	-6,8	-1	4,7	-4,8	2,7	10,3
varianta 18r		32,4	31,5	33,3	-1,9	-0,5	0,8	1,2	3,1	5,1

Na Obr. 56 a Obr. 57 je graficky znázorněno klopení vozu zvlášť vpředu a vzadu. Je možné si všimnout nejen samotného většího či menšího stlačení či vyvěšení tlumičů, ale také poklesu nebo vyvýšení karoserie. Vozidlo s variantou zavěšení 9f se více naklopí, vpředu zároveň klesne o 3,2 mm a vzadu se zvýší o 1,3 mm. Pro hodnocené varianty zavěšení platí, že pokud se daná část vozidla více naklopí, tak zároveň s tím poklesne a pokud se naklopí méně, tak také zvedne. Varianta 10f zajistí spolu s menším naklopením přední části vozu i její zvýšení o 5 mm. Větší nebo menší klopení se při tomto manévru projevuje především změnou stlačení vnějšího tlumiče, předního v případě úpravy předního zavěšení a zadního v případě zadního zavěšení.



Obr. 56 Grafické znázornění vyvěšení předních tlumičů off-roadového vozu s rozdílnou výškou středou klopení při bočním zrychlení 0,65 g



Obr. 57 Grafické znázornění vyvěšení zadních tlumičů off-roadového vozu s rozdílnou výškou středu klopení při bočním zrychlení 0,65 g

Jak už bylo naznačeno u varianty 18r s vyšší hodnotou anti-squat, ale zároveň i větší výškou středu klopení, tak na vyvěšení tlumičů během tohoto manévru mají vliv i anti-charakteristiky ovlivňující klonění vozu při akceleraci, viz Tab. 35 a Tab. 36. Menší hodnota anti-lift na předním zavěšení (var. 15f) způsobuje celkové zvýšení přední části vozu a větší hodnota (var. 16f) naopak její snížení o 4,3 mm. Varianta 17r s menší hodnotou anti-squat má opačný vliv než varianta 18r tím, že celá zadní část vozu klesá o 3,1 mm. Varianta 18r se zároveň vlivem výše položeného středu klopení méně naklopí, především nad zadní nápravou.

Tab. 35 Vyvěšení tlumičů off-roadového vozu při jízdě po kruhu pro varianty s rozdílnou hodnotou anti-lift

Vliv anti-lift na vyvěšení tlumičů		ANTI-LIFT			vyvěšení tlumičů (boční zrychlení 0,65 g)					
		$J_{al}$ [%]			vpředu			vzadu		
zdvih kola	[mm]	-80	0	80	vlevo	střed	vpravo	vlevo	střed	vpravo
výchozí varianta	vpředu	-1,8	-2,3	-2,5	70	13,6	-42,8	-	-	-
	vzadu				-	-	-	61,8	4	-53,9
		změna vůči výchozí variantě			změna vůči výchozí variantě			změna vůči výchozí variantě		
varianta 15f		-25,9	-26,4	-26,8	2,8	3,1	3,3	0	0,1	0,3
varianta 16f		40,4	38,5	36,6	-4,4	-4,3	-4,2	-0,7	-0,4	0

Tab. 36 Vyvěšení tlumičů off-roadového vozu při jízdě po kruhu pro varianty s rozdílnou hodnotou anti-squat

Vliv anti-squat na vyvěšení tlumičů		ANTI-SQUAT			vyvěšení tlumičů (boční zrychlení 0,65 g)					
		$J_{as}$ [%]			vpředu			vzadu		
zdvih kola	[mm]	-80	0	80	vlevo	střed	vpravo	vlevo	střed	vpravo
výchozí varianta	vpředu	22,8	21,8	20,6	70	13,6	-42,8	-	-	-
	vzadu				-	-	-	61,8	4	-53,9
		změna vůči výchozí variantě			změna vůči výchozí variantě			změna vůči výchozí variantě		
varianta 17r		-37,6	-38,1	-38,7	0,3	0,4	0,5	-3	-3,1	-3,1
varianta 18r		39,9	39,7	39,4	-1,9	-0,5	0,8	1,2	3,1	5,1

Předpoklad vlivu sbíhavosti na stáčivost vozidla se potvrdil. Přední zavěšení s rostoucí sbíhavostí se zdvihem způsobuje zmenšení nedotáčivosti, pokud sbíhavost s rostoucím zdvihem klesá, nedotáčivost se zvyšuje. Rostoucí sbíhavost se zdvihem na zadním zavěšení zvyšuje nedotáčivost, a naopak klesající sbíhavost nedotáčivost zmenšuje. Snížení statické hodnoty sbíhavosti na předním zavěšení vyvolá zvýšení nedotáčivosti, zvýšení sbíhavosti nedotáčivost sníží. V případě zadního zavěšení má zmenšení sbíhavosti za následek snížení nedotáčivosti, zvětšení sbíhavosti potom zvětšuje i nedotáčivost.

Menší změna odklonu s propružením na přední nápravě zvyšuje nedotáčivost. Varianta předního zavěšení s větší změnou odklonu s propružením nedotáčivost zmenšuje, u této varianty dochází k většímu zvýšení odklonu na vnitřním kole, čímž se zmenšuje rozchod kola zvětšuje se příčný přenos zatížení, který přispívá k nedotáčivosti. Výsledné snížení nedotáčivosti proto není tak velké. Varianta zadního zavěšení s menší změnou odklonu při propružení je méně nedotáčivá, avšak změna není příliš velká, jelikož přenos zatížení na zadní nápravě se zmenší. Větší změna odklonu na zadní nápravě zvyšuje nedotáčivost. Menší statický odklon na přední nápravě zmenšuje nedotáčivost, větší ji naopak zvyšuje. Menší statický odklon na zadní nápravě zvyšuje nedotáčivost a větší odklon ji snižuje.

Níže položený střed klopení předního zavěšení snižuje nedotáčivost vozu, vozidlo se více naklopí a přední část vozu poklesne. Vyšší střed klopení na přední nápravě naopak zvyšuje nedotáčivost, vůz se méně klopí a přední část vozu se zvedne. Snížení středu klopení na zadní nápravě zvýší nedotáčivost, zvýší se také klopení a zadní část vozu poklesne. Zvýšení středu klopení na zadní nápravě sníží nedotáčivost, zmenší se klopení a zadní část vozu se zvedne.

Menší záklon rejdové osy způsobuje nedotáčivost. Větší záklon naopak nedotáčivost snižuje, ale rozdíl v natočení volantu je menší, protože vliv záklonu závisí na natočení kol s větším natočením roste jeho vliv.

K podstatnému zvýšení nedotáčivosti dochází u varianty s menší hodnotou anti-lift na přední nápravě. Přední část vozu s touto variantou zavěšení se více zvedá a těžiště je tak výš. Na zvýšení nedotáčivosti má svůj podíl menší přenos zatížení na zadní nápravu. Vlivem změny polohy bodu kontaktu pneumatiky s vozovkou se pravé přední kolo posouvá proti směru jízdy a levé přední po směru jízdy, což zvyšuje nedotáčivost. Přední kola mají během manévru menší sbíhavost a menší odklon, na zadním zavěšení vzniká trochu větší „bump steer“, změna sbíhavosti může napomáhat k nedotáčivosti a změna odklonu naopak k přetáčivosti, avšak tyto změny jsou velmi malé.

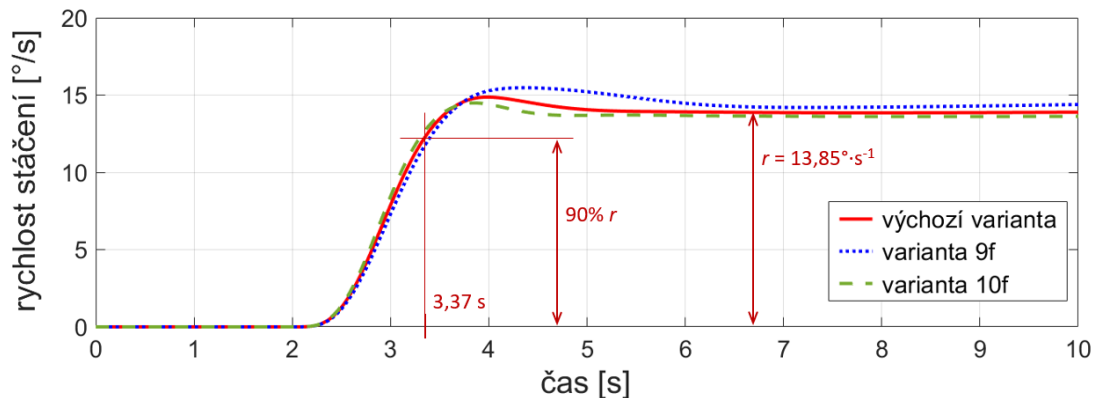
Vozidlo s variantou předního zavěšení s vyšší hodnotou anti-lift je méně nedotáčivé. Dochází k menšímu zvednutí přední části vozu, čímž se sníží i těžiště. Podélný přenos zatížení na zadní nápravu je větší než u výchozí varianty, ale tento rozdíl je menší než v případě varianty s menší hodnotou anti-lift. Propružením dochází ke změně polohy kol předního zavěšení v podélném směru, pravé přední kolo se pohybuje ve směru jízdy a levé opačným směrem, tím je vozidlo méně nedotáčivé. Proti sobě působící vlivy je menší změna odklonu vlivem klopení na přední i zadní nápravě. Dále se kola zadního zavěšení více natačí ze zatáčky a na předním zavěšení je větší sbíhavost, což napomáhá ke snížení nedotáčivosti.

Vliv menšího anti-dive se projevuje na větším stlačení pravého předního tlumiče, ale rozdíl je pouze přibližně 1 mm. Zavěšení má větší změnu odklonu, na pravém kole vniká menší odklon a na levém větší. Tento jev napomáhá ke zmenšení nedotáčivosti, ale je na předním zavěšení větší příčný přenos zatížení, který pravděpodobně převyšuje, jelikož vozidlo je

nedotáčivé. Vyvěšení předních tlumičů varianty s větším anti-dive je větší opět s rozdílem jen kolem 1,4 mm. Odklon pravého předního kola je větší a levého kola menší, což přispívá spolu s menší sbíhavostí a mírným zvýšením přenosu zatížení na přední nápravě k nedotáčivosti.

#### 4.8.5 SKOKOVÉ NATOČENÍ VOLANTU

Pomocí manévru skokové natočení volantu je sledována velikost a rychlost reakce vozidla na prudké natočení volantu. Průběh stáčivé rychlosti je možné vidět na *Obr. 58*. Výchozí varianta vozidla dosahuje stáčivé rychlosti  $13,85^{\circ}\cdot\text{s}^{-1}$  a 90 % této hodnoty dosáhne v čase 3,37 s.



*Obr. 58* Průběh stáčivé rychlosti off-roadového modelu vozidla při manévru skokové natočení volantu

*Tab. 37* Stáčivá rychlost off-roadového vozidla s rozdílným nastavením sbíhavosti

Vliv sbíhavosti na rychlost stáčení		SBÍHAVOST			stáčivá rychlost $r$ [ $^{\circ}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	doba dosažení 90 % $r$ $t_{0,9r}$ [s]
		$\delta$ [ $^{\circ}$ ]				
zdvih kola	[mm]	-80	0	80		
výchozí varianta	vpředu	0,05	0	-0,15	13,85	3,37
	vzadu	0,08	0	0,08		
		změna sbíhavosti vůči výchozí variantě			změna	změna
	varianta 5.1f	-0,04	0,00	0,14	0,14	0,01
	varianta 5.1r	-0,07	0,00	-0,08	0,14	0,01
	varianta 5f	-0,46	0,00	0,51	1,35	0
	varianta 6f	0,39	0,00	-0,22	-1,30	-0,01
	varianta 5r	-0,55	0,00	0,33	-1,61	0
	varianta 6r	0,42	0,00	-0,51	1,57	-0,02
	varianta 7f	-0,50	-0,50	-0,50	-0,68	0
	varianta 8f	0,50	0,50	0,50	0,41	-0,03
	varianta 7r	-0,50	-0,50	-0,50	0,96	-0,01
	varianta 8r	0,50	0,50	0,50	-0,57	0

Podstatný vliv na velikost stáčivé rychlosti má nastavení sbíhavosti vozidla viz *Tab. 37*. Růst nebo pokles stáčivé rychlosti souhlasí se snížením nebo zvýšením nedotáčivosti, jenž bylo

uvedeno výše. Stáčivá rychlost je větší, pokud je na předním zavěšení rostoucí sbíhavost se zdvihem (var. 5f) anebo klesající sbíhavost se zdvihem na zadním zavěšení (var. 6r). V případě klesající sbíhavosti na předním zavěšení (var. 6f) dochází ke snížení stáčivé rychlosti, stejně jako v případě rostoucí sbíhavosti na zadním zavěšení (var. 5r), kde pokles činí  $1,61^{\circ}\cdot\text{s}^{-1}$  vůči výchozí variantě. Rozdíl mezi stáčivou rychlostí výchozí varianty a variantami s konstantní sbíhavostí na předním zavěšení (var. 5.1f) a zadním zavěšení (var. 5.1r) je v obou případech  $+0,14^{\circ}\cdot\text{s}^{-1}$ . Statická změna sbíhavosti vyvolává o něco menší změny. Například u varianty 7f s menší sbíhavostí o  $0,5^{\circ}$  se stáčivá rychlost zmenší o  $0,68^{\circ}\cdot\text{s}^{-1}$ . Rychlost nástupu stáčivé rychlosti se pro varianty s rozdílnou sbíhavostí nemění nebo jsou změny velmi malé.

Za zmínku stojí i vliv odklonu na stáčivou rychlost, především tedy vliv statické změny odklonu, jelikož varianty s větší či menší změnou odklonu způsobují jen velmi malé rozdíly. Konkrétní hodnoty jsou uvedeny v Tab. 38. Pouze v případě varianty 1f s větší změnou odklonu s proružením, se díky nárůstu boční síly zkrátí čas pro dosažení 90 % stáčivé rychlosti o 0,07 s. Zmenšení odklonu na předním zavěšení o  $1^{\circ}$  (var. 1f) zvýší stáčivou rychlost o  $0,56^{\circ}\cdot\text{s}^{-1}$ , oproti tomu zvětšení o stejnou hodnotu (var. 2f) zmenší stáčivou rychlost o  $0,48^{\circ}\cdot\text{s}^{-1}$ . Stejná změna na zadním zavěšení má potom opačný vliv. Doba, za jakou vozidlo této rychlosti dosáhne se téměř nemění.

Tab. 38 Stáčivá rychlost off-roadového vozidla s rozdílným nastavením odklonu

Vliv odklonu na rychlost stáčení		ODKLON			stáčivá rychlost	doba dosažení 90 % $r$
		$\gamma$ [°]				
zdvih kola	[mm]	-80	0	80	$r$ [°·s <sup>-1</sup> ]	$t_{0,9r}$ [s]
výchozí varianta	vpředu	0,66	-0,01	-1,21	13,85	3,37
	vzadu	0,95	-0,02	-1,51		
		změna odklonu vůči výchozí variantě			změna	změna
varianta 1f		-0,39	0	0,6	0,19	-0,07
varianta 2f		-1,78	-0,01	-0,62	-0,13	0,04
varianta 1r		-0,2	0,01	0,31	0,08	0
varianta 2r		0,21	0,01	-0,3	-0,13	-0,01
varianta 3f		-1	-1	-1	0,56	0,02
varianta 4f		1	1	1	-0,48	-0,01
varianta 3r		-1	-1	-1	-0,28	0
varianta 4r		1	1	1	0,33	0,01

Při tomto manévru se projevil i vliv výšky středu klopení, který je uveden v Tab. 39. Tak jako u předešlých parametrů i zde varianty, které snižují nedotáčivost dosahují větší stáčivé rychlosti a naopak. Kromě toho dochází ke zpomalení nebo zrychlení reakce vozidla. Níže položený střed klopení na přední nápravě (var. 9f) zpomaluje reakci vozidla o 0,09 s, vyšší poloha středu (var. 10f) naopak reakci vozidla zrychluje o 0,07 s. Varianta 9r s nižším středem klopení na zadní nápravě zmenšuje stáčivou rychlost o  $0,73^{\circ}\cdot\text{s}^{-1}$  a tím i dobu, za jakou dosáhne jejích 90 %, o 0,06 s. Vyšší poloha středu klopení varianty 10r zvyšuje stáčivou rychlost o  $0,92^{\circ}\cdot\text{s}^{-1}$  a také dobu dosažení o 0,07 s. Pozdější nástup reakce u varianty předního zavěšení 9f je způsoben opožděným snížením přenosu zatížení na přední nápravě, který musí procházet přes odpružení. Vozidlo s variantou zadního zavěšení 9r má střed klopení níž a dala by se

očekávat taktéž zpožděná reakce. Nicméně stáčivá rychlost je dána především poklesem přenosu zatížení na zadní nápravě, které lze dosáhnout rychle a drobné rozdíly se tak neprojeví. U varianty 10r jde o podobný případ, kdy musí dosáhnout velkého přenosu zatížení pro dosažení dané stáčivé rychlosti.

Tab. 39 Stáčivá rychlost off-roadového vozidla s rozdílným nastavením výšky středu klopění

Vliv výšky středu klopění na rychlost stáčení		VÝŠKA STŘEDU KLOPENÍ			stáčivá rychlost	doba dosažení 90 % $r$
		$h_r$ [mm]				
zdvih kola	[mm]	-80	0	80	$r$ [ $^{\circ}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	$t_{0,9r}$ [s]
výchozí varianta	vpředu	229,8	138,1	45,8	13,85	3,37
	vzadu	280,6	189,5	97,8		
		změna odklonu vůči výchozí variantě			změna	změna
varianta 9f		-126,2	-124,5	-124	0,37	0,09
varianta 10f		125,4	126,6	127,7	-0,24	-0,07
varianta 9r		-120,4	-123,9	-120,5	-0,73	-0,06
varianta 10r		115,9	116	115,1	0,92	0,07
varianta 18r		32,4	31,5	33,3	0,26	0,02

Sledováno bylo také vyvěšení tlumičů, které je pro různé varianty sbíhavosti uvedeno v Tab. 40. Naklopení se odvíjí podle toho, jaké stáčivé rychlosti vozidlo dosáhne. Tudíž varianty 5f, 6r a 7r se naklopí podstatně více než výchozí varianta. Větší naklopení se projevuje především zvětšením vyvěšení vnitřních (levých) tlumičů, vnější (pravé) tlumiče se také více stlačí, ale změna není tak velká. Varianty 6f, 5r, 7f a 8r se naklopí méně, opět se změna projeví hlavně na vnitřních tlumičích.

Tab. 40 Vyvěšení tlumičů po skokovém natočení volantu pro varianty off-roadového vozidla s rozdílnou sbíhavostí

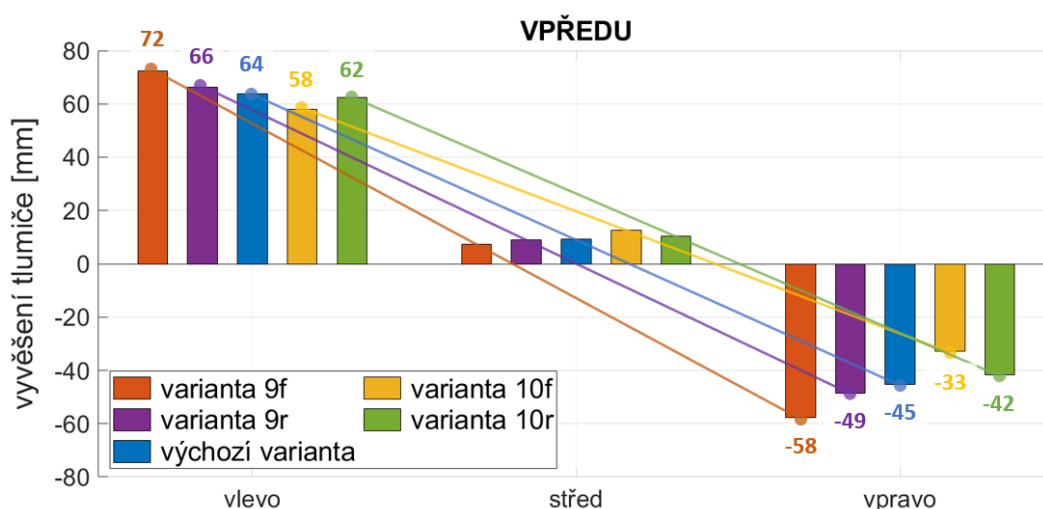
Vliv sbíhavosti na naklopení vozu		SBÍHAVOST			vyvěšení tlumičů					
					vpředu			vzadu		
		$\delta$ [ $^{\circ}$ ]			влево	стřed	вправо	влево	стřed	вправо
zdvih kola	[mm]	-80	0	80	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
výchozí varianta	vpředu	0,05	0	-0,15	63,7	9,3	-45,2	-	-	-
	vzadu	0,08	0	0,08	-	-	-	60,8	5,2	-50,5
		změna vůči výchozí variantě			změna vůči výchozí variantě			změna vůči výchozí variantě		
varianta 5.1f		-0,04	0,00	0,14	1,5	0,9	0,3	0,6	0,1	-0,4
varianta 5.1r		-0,07	0,00	-0,08	1,5	0,9	0,3	0,6	0,1	-0,4
varianta 5f		-0,46	0,00	0,51	8,3	3,7	-0,9	5,8	0,9	-4,0
varianta 6f		0,39	0,00	-0,22	-6,2	-1,8	2,7	-5,5	-0,9	3,8
varianta 5r		-0,55	0,00	0,33	-9,3	-3,0	3,3	-7,9	-1,5	5,0
varianta 6r		0,42	0,00	-0,51	10,4	4,2	-1,9	6,9	0,4	-6,1
varianta 7f		-0,50	-0,50	-0,50	-2,2	0,4	3,0	-3,3	-0,5	2,3
varianta 8f		0,50	0,50	0,50	0,4	-1,3	-2,9	1,8	0,3	-1,2
varianta 7r		-0,50	-0,50	-0,50	6,2	2,4	-1,3	7,0	3,3	-0,4
varianta 8r		0,50	0,50	0,50	-3,4	-1,2	1,1	-4,5	-2,4	-0,2

Rozdíly ve vyvěšení tlumičů variant zavěšení s rozdílným odklonem jsou podstatně menší, pohybují se do 3 mm a závisí na velikosti změny stáčivé rychlosti. Oproti tomu vliv výšky středu klopení na vyvěšení tlumičů je znatelně větší viz *Tab. 41*. Jak už bylo popsáno výše u manévru jízdy po kruhu, níže položený střed klopení způsobuje větší naklonění vozidla. Při změně polohy středu klopení přední nápravy se podstatně změní stlačení či vyvěšení všech tlumičů, nejvíce však pravých předních. Varianty zadního zavěšení s jinou polohou středu klopení způsobují největší změnu ve stlačení pravých (vnějších) zadních tlumičů.

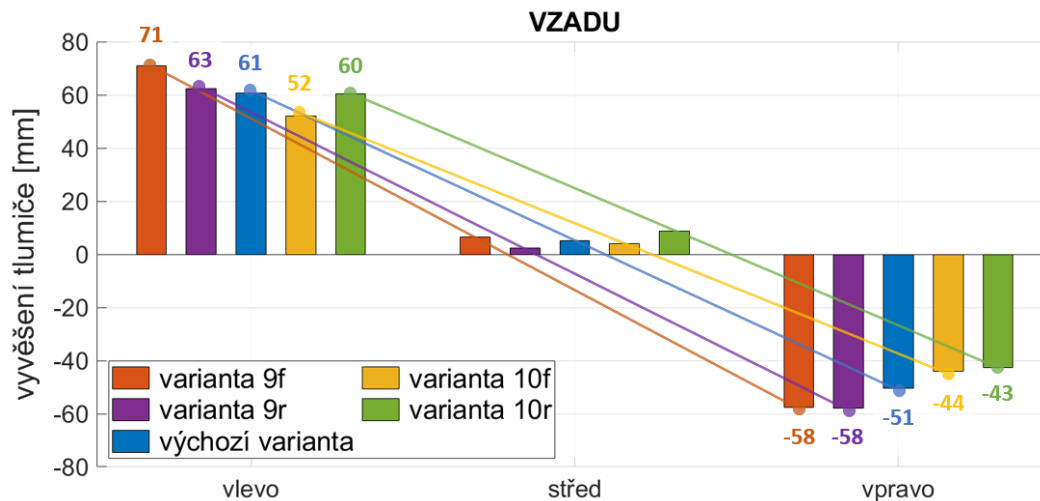
*Tab. 41* Vyvěšení tlumičů po skokovém natočení volantu pro varianty off-roadového vozidla s rozdílnou výškou středu klopení

Vliv výšky středu klopení na naklonění vozu		VÝŠKA STŘEDU KLOPENÍ			vyvěšení tlumičů					
					vpředu			vzadu		
zdvih kola	[mm]	$h_r$ [mm]			vlevo	střed	vpravo	vlevo	střed	vpravo
		-80	0	80	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
výchozí varianta	vpředu	229,8	138,1	45,8	63,7	9,3	-45,2	-	-	-
	vzadu	280,6	189,5	97,8	-	-	-	60,8	5,2	-50,5
		změna vůči výchozí variantě			změna vůči výchozí variantě			změna vůči výchozí variantě		
varianta 9f		-126,2	-124,5	-124	8,7	-1,9	-12,4	10,1	1,4	-7,2
varianta 10f		125,4	126,6	127,7	-5,8	3,3	12,5	-8,8	-1,2	6,4
varianta 9r		-120,4	-123,9	-120,5	2,6	-0,4	-3,3	1,7	-2,8	-7,3
varianta 10r		115,9	116	115,1	-1,4	1,1	3,6	-0,4	3,7	7,8
varianta 18r		32,4	31,5	33,3	-0,4	0,0	0,4	0,8	1,7	2,6

Na *Obr. 59* a *Obr. 59* je graficky znázorněno klopení vozidla s rozdílným nastavením výšky středu klopení. Je možné si všimnout, že u všech variant dochází k vyvěšení vozidla vpředu i zadu. Větší vyvěšení přední části nastává u varianty 10f s výše položeným středem klopení na přední nápravě, zadní část vozidla se vyvýší méně. Celkově u této varianty dochází k menšímu klopení. Největší klopení se objevuje u varianty 9f s níže položeným středem klopení na přední nápravě. Výrazně více se stlačí pravý přední tlumič a více se vyvěsí levý zadní tlumič. Přední část vozu se méně zvedne.



*Obr. 59* Grafické znázornění vyvěšení předních tlumičů off-roadového vozidla s rozdílnou sbíhavostí po skokovém natočení volantu



Obr. 60 Grafické znázornění vyvěšení zadních tlumičů off-roadového vozu s rozdílnou sbíhavostí po skokovém natočení volantu

K rozdílnému vyvěšení tlumičů dochází také u varianty předního zavěšení s rozdílným anti-lift viz Tab. 42. Varianta 15f s menší hodnotou anti-lift více zvedá přední část vozu viz tab., čímž se zvedá i těžiště. Kola se zároveň více natáčí do zatáčky, čímž se zvýší výsledná stáčivá rychlost o  $0,56^{\circ}\cdot s^{-1}$ . Varianta 16f s větší hodnotou anti-lift způsobí větší snížení vozu. Kola se trochu méně natáčí do zatáčky a stáčivá rychlost klesne o  $0,22^{\circ}\cdot s^{-1}$ .

Tab. 42 Vyvěšení tlumičů po skokovém natočení volantu pro varianty off-roadového vozidla s rozdílným nastavením anti-lift na přední nápravě

Vliv anti-lift na vyvěšení tlumičů		ANTI-LIFT			vyvěšení tlumičů					
					vpředu			vzadu		
		$J_{al}$ [%]	vlevo	střed	vpravo	vlevo	střed	vpravo		
zdvih kola	[mm]	-80	0	80	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
výchozí varianta		-1,8	-2,3	-2,5	63,7	9,3	-45,2	-	-	-
					-	-	-	60,8	5,2	-50,5
		změna vůči výchozí variantě			změna vůči výchozí variantě			změna vůči výchozí variantě		
varianta 15f		-25,9	-26,4	-26,8	5,2	3,2	1,3	2,8	0,6	-1,5
varianta 16f		40,4	38,5	36,6	-3,6	-2,8	-1,9	-1,7	-0,5	0,7

Na stáčivou rychlost má největší vliv, tak jako u předchozího modelu, sbíhavost, ale u tady se projevil vliv i dalších kinematických charakteristik, odklonu a výšky středu klopení. Rostoucí sbíhavost při zdvihu kola na předním zavěšení zvyšuje stáčivou rychlost, klesající sbíhavost při zdvihu ji naopak snižuje. Rostoucí sbíhavost při zdvihu na zadním zavěšení zmenšuje stáčivou rychlost a klesající sbíhavost se zdvihem kola ji zvětšuje. Menší statická sbíhavost na předním zavěšení stáčivou rychlost zmenšuje a větší ji zvětšuje. Na zadním zavěšení platí opak, menší sbíhavost zvyšuje stáčivou rychlost a větší hodnota ji zvětšuje. Rozdíly ve stlačení či vyvěšení tlumičů u variant s odlišnou sbíhavostí jsou způsobené jinou stáčivou rychlostí, kterou vozidlo dosáhne. Větší stáčivá rychlost znamená větší příčné zrychlení a tím i naklopení.

Drobné rozdíly v stáčivé rychlosti nastaly u variant s jiným nastavením odklonu. Významnější dopad mají statické změny odklonu, jelikož není třeba čekat na jejich náběh. Zmenšení odklonu na přední nápravě způsobí zvýšení stáčivé rychlosti, zvětšení odklonu pak její snížení. Zmenšení odklonu na zadní nápravě vyvolá snížení stáčivé rychlosti a zvýšení odklonu její

zvýšení. Varianta s menší změnou odklonu na předním zavěšení má vyšší stáčivou rychlost, dosahuje jí díky tomu, že se kola více natačí do zatáčky (vzniká kladný „bump steer“). Varianta s větší změnou odklonu na předním zavěšení dosahuje menší stáčivé rychlosti, jelikož se kola mírně natačí ze zatáčky. Zadní zavěšení s menší změnou odklonu vyvolává navýšení stáčivé rychlosti, kdežto zavěšení s větší změnou odklonu snižuje stáčivou rychlost.

Výška středu klopení má větší dopad na rychlost reakce. Snížení středu klopení na přední nápravě vyvolá větší stáčivou rychlost, které je dosaženo později, jelikož náběh sil je pomalejší, kvůli přenosu sil přes odpružení. Opačný případ je zvýšení výšky středu klopení na přední nápravě, kdy stáčivá rychlost je menší a rychlost reakce se zvýší. Snížení výšky středu klopení na zadní nápravě má za následek snížení stáčivé rychlosti, zvýšení polohy středu klopení stáčivou rychlost zvýší. Rozdíly v rychlosti reakce jsou dány velikostí ustálené stáčivé rychlosti, náběh stáčivé rychlosti se neopoždí ani nezrychluje, tak jako v případě změny výšky středu klopení na přední nápravě, čehož si lze všimnout i na *Obr. 58*. Výška středu klopení ovlivňuje také klopení, které se zvýší, pokud je střed klopení níž, a naopak.

## 4.9 SHRUTÍ POZNATKŮ

Parametry kinematiky zavěšení, které se projevují v podélné dynamice vozidla jsou anti-charakteristiky. V případě prvního modelu jde o anti-dive na přední nápravě, anti-lift a anti-squat na zadní nápravě, druhý model má navíc anti-lift na přední nápravě. Tyto charakteristiky ovlivňují jak klonění vozidla, tak také přenos zatížení. Při akceleraci mají největší vliv anti-lift a anti-squat. Větší hodnota anti-lift zmenšuje zvedání přední části vozidla. Větší hodnota anti-squat zase zmenšuje klesání zadní části vozidla. Tím se podstatně mění poloha těžiště a podélný přenos zatížení. Nicméně v případě analyzovaných modelů, neměly tyto změny dopad na výkonnost vozidla, ta primárně závisí na pohonném ústrojí.

Během brzdění způsobuje větší hodnota anti-dive menší klesání přední části vozidla a větší hodnota anti-lift na zadní nápravě její menší zvedání. Zároveň se změnou polohy těžiště souvisí podélný přenos zatížení, čím výš těžiště je tím víc se přitíží přední náprava. V případě off-roadového vozidla se tato změna dokonce projevila na velikosti zpomalení, které se zvýšilo právě z důvodu většího přitížení přední nápravy. Změny v klonění se u off-rodového vozidla objevily také u varianty s rozdílným anti-lift na přední nápravě a anti-squat na zadní. Avšak toto chování souvisí se změnou polohy bodu kontaktu pneumatiky s vozovkou v podélné ose.

Při zatáčení způsobují anti-charakteristiky odlišné stlačení/vyvěšení tlumičů a změnu polohy těžiště, čímž dochází k v rozdílu přenosu zatížení, ať už v podélném směru nebo příčném. Tyto odlišnosti potom mohou zmenšovat nebo zvětšovat nedotáčivost.

Při přejezdu nerovnosti je vozidlo více nestabilní, pokud se kolo při stlačení natačí do sbíhavosti. Natočení do rozbíhavosti snižuje nutnost korekce směru natočením volantu. Anti-charakteristiky na předním zavěšení mohou zlepšovat plynulost přejezdu, jestliže dochází k oddálení kola od nerovnosti při jeho stlačení.

Chování vozidla během zatáčení závisí především na jeho schopnosti vyvinout příčné síly a také přerozdělení této síly v rámci přední a zadní nápravy. Směrová úchylka, díky které boční síla vzniká je dána natočením kol. Pokud se přední kola vlivem sbíhavosti natačí do zatáčky, potřebné natočení volantu se zmenší. Zadní kola se naopak musí pohybovat ze zatáčky, aby se vozidlo více stáčelo a natočení volantu mohlo být menší. Kladný „bump steer“, při zatáčení

a tedy klopení, nazývaný také jako „roll steer“ na předním zavěšení zajišťuje, že se obě kola natáčí víc do zatáčky, což napomáhá snížit nedotáčivost. Pro obdobný efekt musí být na zadním zavěšení záporný „bump steer“, který při klopení vozidla natáčí kola ze zatáčky. Statická změna sbíhavosti má také podstatný vliv, ale s takovou změnou je spojená nepříjemnost v podobě většího opotřebování pneumatik a snížení jejich limitů, jelikož jsou kola natočena i při přímé jízdě. Na snížení nedotáčivosti má potom pozitivní vliv sbíhavost vpředu a rozbíhavost vzadu. Ochota vozidla ke stáčení vlivem rozdílné sbíhavosti se projeví i při manévru skokové natočení volantu, kde varianty s menší nedotáčivostí dosahují také větší stáčivé rychlosti.

Boční síla vzniká také díky odklonu, kladný odklon na vnějším kole vytváří příčnou sílu působící směrem ze zatáčky. Klopení vozidla zmenšuje odklon na vnitřním kole a zvětšuje jej na vnějším kole. Proto je snahou vytvořit charakteristiku s kladným odklonem při vyvěšení a záporným při stlačení kola, která změnu odklonu vlivem klopení sníží. Zvýší-li se u takové charakteristiky předního zavěšení změna odklonu se zdvihem, sníží se tím nedotáčivost vozidla. Na zadním zavěšení je pro snížení nedotáčivosti potřeba naopak zmenšit její změnu se zdvihem. Ukazuje se, že výsledná změna stáčivosti je větší, pokud je charakteristika odklonu upravena směrem k nedotáčivosti než k přetáčivosti. Statická změna odklonu se zdá jako efektivnější, jelikož má větší dopad na stáčivost vozidla. Zmenšení odklonu na předním zavěšení sníží nedotáčivost. Na zadním zavěšení je pro snížení nedotáčivosti potřeba odklon zvýšit. Stáčivá rychlost, které vozidlo dosáhne při manévru skokové natočení volantu, se výrazněji liší u variant se statickou změnou odklonu, protože není prodleva mezi tím, než dojde ke změně odklonu vlivem klopení vozidla. A tak jako u sbíhavosti zvýšení stáčivé rychlosti souhlasí se snížením nedotáčivosti.

Poloha středu klopení určuje míru klopení vozidla a přerozdělení příčného přenosu zatížení mezi přední a zadní nápravu. Výše položený střed klopení zvyšuje přenos zatížení na dané nápravě a na druhé jej zmenšuje. Zvýšení příčného přenosu zatížení na přední nápravě zvyšuje nedotáčivost, zvýšení na zadní nápravě nedotáčivost zmenšuje. Z toho důvodu snížení polohy středu klopení předního zavěšení snižuje nedotáčivost a pro dosažení stejného výsledku v rámci zadního zavěšení je potřeba polohu středu zvýšit. Za předpokladu, že se těžiště nachází výš než střed klopení, což platí pro oba modely, tak zvýšení výšky středu klopení způsobí menší klopení vozu, ať už jde o přední nebo zadní nápravu. Mimo samotné klopení se vozidlo zvedá či klesá podle působení „jacking forces“. Pokud je střed klopení výš, tak se nad danou nápravou při klopení nadzvedne karoserie.

Jakmile přenos zatížení prochází převážně přes odpružení, což se děje v případě níže položeného středu klopení, je tlumen a nastupuje později, než kdyby přenos probíhal přes ramena zavěšení. To se projeví při manévru skokové natočení volantu, kdy vozidlo s menší výškou středu klopení na přední nápravě reaguje pomaleji. Tento vliv je patrný jen pro změnu přední nápravy, provedené úpravy na zadním zavěšení nemají stejný dopad.

Záklon rejdové osy ovlivňuje při zatáčení kol jejich odklon, na vnějším kole se odklon zmenšuje a na vnitřním zvětšuje. Toto chování snižuje naklopení kol během zatáčení a ovlivňuje stáčivost vozidla. Menší záklon zvyšuje nedotáčivost, větší ji naopak zmenšuje, ale podstatně méně, protože míra změny odklonu vlivem záklonu závisí na velikosti natočení kol. Pokud jsou kola natočena méně, význam záklonu je menší. Změna odklonu způsobená rozdílným záklonem není moc velká, proto ani dopad není příliš výrazný, například v rychlosti reakce vozidla na natočení volantu se neprojevívá.

## ZÁVĚR

Cílem práce je zhodnotit vliv kinematiky zavěšení na jízdní vlastnosti vozidla. Za tímto účelem je zpracována rešerše kinematických parametrů, jejich chování a přínos během jízdy vozidla. Dále je představena nová kategorie off-roadových vozidel T1+, jelikož jedním z analyzovaných modelů je vozidlo, které bylo upraveno pro tuto kategorii a je snahou vyhodnotit chování tohoto vozidla s různým nastavením kinematiky zavěšení. Součástí rešerše je také popis konstrukce a vlastností lichoběžníkového zavěšení, které je u modelů používáno jak pro přední, tak i pro zadní nápravu.

Na základě rešerše jsou vybrány kinematické parametry, jejichž vliv na chování vozidla je dále sledován. Jsou jimi odklon kola, sbíhavost, výška středu klopení, záklon rejdové osy a anti-charakteristiky. Pro přední i zadní zavěšení obou modelů jsou následně vytvořeny varianty s odlišnými hodnotami těchto parametrů nebo i průběhem charakteristik. Průběh charakteristik je vykreslen v závislosti na zdvihu kola a rozdíly mezi jednotlivými variantami jsou detailně popsány.

Pro provedení analýzy bylo potřeba nejprve sestavit multibody model vozidla. Model je vytvořen na základě skutečného off-roadového vozidla a požadavků kategorie T1+. Analýze tohoto modelu předcházela ještě jedna, jenž je provedena na defaultním modelu sportovního vozidla softwaru Adams Car, pomocí kterého jsou realizovány i samotné simulace. Prvotní analýza nastínila, jakým způsobem by se vozidlo mohlo chovat. Avšak srovnání výsledků z obou modelů může být pouze velmi obecné, jelikož se vozidla v mnohém liší.

Analýza je provedena pomocí simulací zvolených manévru, kterými jsou akcelerace, brzdění, přejezd přes nerovnost, jízda po kruhu s konstantním poloměrem a skokové natočení volantu. Hodnocení jízdních vlastností je postaveno na základě porovnávání sledovaných parametrů, jako je např. natočení volantu, vyvěšení tlumičů a další, vozidel s odlišným nastavením kinematiky zavěšení vůči vozidlu s výchozí variantou zavěšení. Změny v kinematice se projevují na schopnosti pneumatik vytvářet v kontaktu s vozovkou síly a na možnostech zavěšení tyto síly dál přenášet přes rám nebo odpružení. V rámci každého manévru je uvedeno, které charakteristiky a jakým způsobem ovlivňují jízdní vlastnosti. Následně jsou na konci práce získaná zjištění shrnuta.

Obecně lze říct, že se potvrdil předpokládaný vliv kinematiky zavěšení na jízdní vlastnosti vozidla. Avšak například u prvního modelu je působení některých charakteristik na stáčitost vozidla zastíněno dominantním vlivem sbíhavosti. Dochází k tomu u variant, kde je primárně měněn jiný parametr, ale nepodařilo se zachovat stejnou sbíhavost jako u výchozí varianty zavěšení, a jelikož změna daného parametru není dostatečně velká, převládá vliv sbíhavosti. V případě druhého modelu, již tento problém nenastal. U variant, kde není požadována změna sbíhavosti, zůstává zachován její průběh a zároveň změny ostatních kinematických parametrů jsou dostatečně velké na to, aby měl jejich vliv převahu. Simulace manévru jízdy po kruhu s off-roadovým vozidlem potom ukázal citlivost stáčitosti vozidla na další vlivy, jako je změna podélného a příčného přenosu zatížení nebo změna stlačení či vyvěšení tlumičů způsobená rozdílným nastavením anti-charakteristik.

Další výjimkou je kinematika varianty zavěšení off-roadového vozidla s rozdílnou hodnotou anti-squat a anti-lift na přední nápravě, jenž způsobuje změnu i dalšího parametru, který není primárně sledován. Změna polohy bodu kontaktu pneumatiky s vozovkou v podélném směru se tak projevila při brzdění.

Co se týče simulace manévru skokové natočení volantu, tak v případě prvního modelu se neprojevil žádný vliv výšky středu klopení. To může být způsobeno příliš malou změnou této charakteristiky nebo malou rychlostí natočení volantu, bylo by vhodnější provést tento manévr s rychlejším natočením volantu, aby se mohlo lépe projevit dynamické chování. Práce by mohla být dále rozšířena o analýzy dalších manévrů, jako je například brzdění při zatáčení či akcelerace při zatáčení, případně o simulace na jiném například písčitém povrchu, jelikož se jedná o off-roadové vozidlo.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] GILLESPIE, Thomas D. *Fundamentals of vehicle dynamics*. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1992, xxii, 495 stran : ilustrace. ISBN 1-56091-199-9.
- [2] DIXON, John C. *Tires, suspension and handling*. 2nd ed. Warrendale: SAE International, 1996, 621 s. ISBN 1-56091-831-4.
- [3] REIMPELL, Jornsens, Helmut STOLL a Jurgen W. BETZLER. *The Automotive Chassis: Engineering Principles*. Second edition. Warrendale: Society of Automotive Engineers, c 2001. ISBN 0-7680-06570.
- [4] Double wishbone suspension. In: *MOOG Parts* [online]. United States: MOOG, c2022 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://www.moogparts.eu/blog/double-wishbone-suspension.html>
- [5] *2022 CROSS-COUNTRY RALLY SPORTING REGULATIONS*. Ženeva, 2021. Dostupné také z: [https://www.fia.com/sites/default/files/211229\\_-\\_2022\\_fia\\_cross-country\\_rally\\_sporting\\_regulations.pdf](https://www.fia.com/sites/default/files/211229_-_2022_fia_cross-country_rally_sporting_regulations.pdf)
- [6] *ARTICEL 285 - Specific regulations for Prototype Cross-Country Cars (Group T1)*. Ženeva, 2021. Dostupné také z: [https://www.fia.com/sites/default/files/285\\_2022\\_wmsc\\_2021.12.15\\_updated\\_2022.01.07.pdf](https://www.fia.com/sites/default/files/285_2022_wmsc_2021.12.15_updated_2022.01.07.pdf)
- [7] The technical and regulatory battle of Dakar 2022. *Motosport.com* [online]. Miami: Motorsport, c2022 [cit. 2022-02-21]. Dostupné z: <https://www.motorsport.com/dakar/news/the-technical-and-regulatory-battle-of-the-dakar-2022/7057880/>
- [8] Toyota Hilux. *CarExpert* [online]. Sydney: CarExpert, c2020-2021 [cit. 2022-02-21]. Dostupné z: <https://www.carexpert.com.au/car-news/toyota-hilux-gets-landcruiser-twin-turbo-v6-for-dakar>
- [9] Bahrain Raid Xtreme confirms its driver line-up for Dakar 2022. *Bullfrag* [online]. 2021 [cit. 2022-02-21]. Dostupné z: <https://www.bullfrag.com/bahrain-raid-xtreme-confirms-its-driver-line-up-for-dakar-2022/>
- [10] Rally Dakar 2022, OFFROADSPORTCZ. In: *Facebook* [online]. Dublin: Meta, c2022 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://www.facebook.com/OFFROADSPORTCZ-159963687166/photos/10158192271712167>
- [11] *Adams Help: Adams Tire*. Irvine, 2019.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$b$	[mm]	Poloměr rejdu
$c$	[mm]	Mechanický závlek
$g$	[m·s <sup>-2</sup> ]	Konstanta gravitačního zrychlení (9,81 m·s <sup>-2</sup> )
$H$	[mm]	Výška těžiště
$h_r$	[mm]	Výška středu klopení
$J_{ad}$	[%]	Anti-dive přední nápravy
$J_{al}$	[%]	Anti-lift přední nápravy
$J_{ar}$	[%]	Anti-lift zadní nápravy
$J_{as}$	[%]	Anti-squat zadní nápravy
$K$	[°·g <sup>-1</sup> ]	Gradient nedotáčivosti
$L$	[mm]	Rozvor kol
$p$	[-]	Podíl brzdné síly na přední nápravě
$r$	[°·s <sup>-1</sup> ]	Rychlost stáčení
$R$	[mm]	Poloměr zatáčení
$r_w$	[mm]	Poloměr kola
$t$	[-]	Podíl hnací síly na přední nápravě
$x_{f/r}$	[mm]	Délka předního/zadního ramene kývání v podélném směru
$y_{f/r}$	[mm]	Délka předního/zadního ramene kývání ve svislém směru
$\gamma$	[°]	Úhel odklonu
$\delta$	[°]	Úhel sbíhavosti
$\delta_A$	[rad]	Ackermanův úhel
$\Delta x$	[mm]	Změna polohy bodu kontaktu pneumatiky s vozovkou v ose x
$\theta_c$	[°]	Úhel záklonu rejdové osy
$\theta_{cf}$	[°]	Úhel ramene kývání přední nápravy (brzda mimo kolo)
$\theta_{cr}$	[°]	Úhel ramene kývání zadní nápravy (brzda mimo kolo)
$\theta_{gf}$	[°]	Úhel ramene kývání přední nápravy (brzda v kole)
$\theta_{gfi}$	[°]	Ideální úhel ramene kývání přední nápravy
$\theta_{gr}$	[°]	Úhel ramene kývání zadní nápravy (brzda v kole)
$\theta_{gri}$	[°]	Ideální úhel ramene kývání zadní nápravy
$\theta_k$	[°]	Úhel příklonu rejdové osy