

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Nezávislé zatáčení kol zadní nápravy experimentálního vozidla

Bc. Tomáš Hron

Diplomová práce

2019

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš Hron**
Osobní číslo: **D17375**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Dopravní prostředky: Silniční vozidla**
Název tématu: **Nezávislé zatáčení kol zadní nápravy experimentálního vozidla**
Zadávací katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

- 1) Úvod
- 2) Typy řízení kol zadní nápravy
- 3) Technické provedení řízení kol zadní nápravy
- 4) Ideový výpočet pólu otáčení u 4WS vozidla
- 5) Závěr

Rozsah grafických prací: **podle pokynů vedoucího práce**

Rozsah pracovní zprávy: **50 - 60 stran textu a přílohy**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

[1] VALA, M., TESAŘ, M.: **Teorie a konstrukce silničních vozidel I.** Pardubice: Univerzita Pardubice, 2003. ISBN 80-7194-503-X.

[2] VLK, F.: **Podvozky motorových vozidel. 3., přeprac., rozš. a aktualiz. vyd.** Brno: František Vlk, 2006. ISBN 80-239-6464-X.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Jilek, Ph.D.**

Katedra dopravních prostředků a diagnostiky

Datum zadání diplomové práce: **15. února 2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **20. května 2019**



doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.
děkan

L.S.



Ing. Jakub Vágner, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. února 2019

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012 Pravidla pro zveřejňování závěrečných prací a jejich základní jednotnou formální úpravu, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

Tato diplomová práce byla realizována s využitím technologií Výukového a výzkumného centra v dopravě.

V Pardubicích dne 20. 5. 2019

Bc. Tomáš Hron

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Petru Jilkovi, Ph.D., za cenné rady, věcné připomínky a vstřícný přístup při zpracovávání diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Nikole Hamplové za pomoc při gramatické kontrole práce. Poděkování patří též mé rodině, za podporu a možnost studií na vysoké škole.

ANOTACE

Práce se zaměřuje na výpočet pólu zatáčení a výpočet úhlů natočení kol experimentálního vozidla Dopravní fakulty Jana Pernera. V práci je zahrnut popis typů řízení zadních kol, technická provedení systémů řízení zadních kol, kinematika zatáčení vozidel 2WS a 4WS, rovnice pro natáčení kol vozidel se systémem 4WS, metodika měření poloměru zatáčení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Experimentální vozidlo, 4WS, vyšetření pólu zatáčení, natáčení zadních kol

TITLE

Independent cornering of the rear axle wheels the experimental vehicle

ANNOTATION

The work is focused on the calculation of the turning pole and calculation of wheel angles of the experimental vehicle of Jan Perner Transport Faculty. The thesis includes description of rear wheel steering types, technical design of rear wheel steering systems, 2WS and 4WS vehicle kinematics, 4WS wheel alignment equation, turning radius measurement methodology.

KEYWORDS

Experimental vehicle, 4WS, searching for a pole turn, rear wheel steering

Obsah

SEZNAM TABULEK	9
SEZNAM ILUSTRACÍ	10
SEZNAM ZKRATEK	12
ÚVOD	15
1. Typy řízení kol zadní nápravy	17
1.1. Pasivní řízení	17
1.1.1. Elastokinematické řízení zadních kol	17
1.1.2. Pomocí víceprvkového zavěšení zadních kol	17
1.2. Aktivní řízení	18
1.2.1. Nesouhlasné natáčení zadních kol	20
1.2.2. Souhlasné natáčení zadních kol	21
1.3. Závislost natočení zadních kol vůči předním a úhlu natočení volantu	22
1.4. Porovnání systému 4WS a 2WS	23
2. Technické provedení řízení kol zadní nápravy	24
2.1. Mechanické provedení řízení kol zadní nápravy	24
2.1.1. Vývoj a historie systému	24
2.1.2. Technické provedení mechanického systému natáčení kol zadní nápravy	25
2.2. Elektrohydraulické provedení řízení kol zadní nápravy	28
2.2.1. Systém AHK (Aktive Hinterachs kinematik)	29
2.2.2. Systém HICAS (High Capacity Actively Controlled Steering)	30
2.2.3. Systém SUPERHICAS (High Capacity Actively Controlled Steering)	31
2.3. Elektromechanické provedení řízení kol zadní nápravy	32
2.3.1. Systém Active Drive (Renault)	32
2.3.2. Systém Porsche	34
2.4. Speciální vozidla se řízením více náprav	36
2.4.1. Zemědělské stroje	36
2.4.2. Stavební stroje	37
2.4.3. Rozměrná nákladní vozidla	37
2.4.4. Autobusy	38
2.4.5. Monster trucky	38
2.4.6. Terénní automobily	39
2.4.7. Vícenápravové přívěsy	39
3. Ideový výpočet pólu otáčení u 4WS vozidla	40
3.1. Řízení směru jízdy rejdovnými koly dvounápravových vozidel	40

3.2. Rovinný model zatáčení dvounápravového vozidla 2WS	40
3.3. Jednostopý model zatáčení dvounápravového vozidla 2WS	41
3.4. Řízení vozidel 4WS.....	45
3.5. Jednostopý model zatáčení dvounápravového vozidla 4WS	47
3.5. Zatáčení dvounápravového vozidla 4WS v prostoru	50
3.6. Aplikace poznatků a výpočet ideového pólu zatáčení experimentálního vozidla.....	52
3.6.1. Základní parametry experimentálního vozidla	52
3.6.2. Výpočet převodového poměru řízení	53
3.6.3. Odvození vztahů pro výpočet pólu souhlasného natáčení zadních kol vozidla 4WS	55
3.6.4. Odvození vztahů pro výpočet pólu nesouhlasného natáčení zadních kol vozidla 4WS	58
3.6.5. Sestavení algoritmu pro systém 4WS.....	60
3.6.6. Sestavení rovnic a algoritmu pro výpočet ideového pólu zatáčení experimentálního vozidla	61
3.6.7. Symetrické natáčení předních a zadních kol	66
3.6.8. Úpravy pro stávající experimentální vozidlo Dopravní fakulty	68
3.7. Měření poloměru zatáčení vozidel	69
ZÁVĚR	70
POUŽITÁ LITERATURA	72
SEZNAM PŘÍLOH.....	75

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Základní vybrané parametry experimentálního vozidla.....	52
Tabulka 2 Velikost úhlu natočení kol do rejdu v závislosti na úhlu natočení volantu	53
Tabulka 3 Program pro výpočet úhlů natočení kol ideového vozidla 4WS	60
Tabulka 4 Program pro výpočet úhlů natočení kol experimentálního vozidla.....	65

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obrázek 1 Zadní náprava Mitsubishi Sigma s víceprvkovým zavěšením kol.....	18
Obrázek 2 Zatačení dvounápravového vozidla rejdrovními koly	19
Obrázek 3 Nesouhlasné natáčení kol zadní nápravy	20
Obrázek 4 Souhlasné natáčení kol zadní nápravy	21
Obrázek 5 Závislost úhlu natočení kol na úhlu natočení volantu Honda Prelude	22
Obrázek 6 Porovnání chování vozidla se systémem 4WS a 2WS.....	23
Obrázek 7 Schéma mechanického řízení natáčení zadních kol	25
Obrázek 8 Zadní převodka řízení mechanického systému 4WS Honda v řezu	25
Obrázek 9 Dekomponovaná zadní mechanická převodka řízení	26
Obrázek 10 Schéma elektrohydraulického řízení kol zadní nápravy	28
Obrázek 11 Schéma systému AHK na BMW 8	29
Obrázek 12 Schéma systému HICAS	30
Obrázek 13 Systém SUPERHICAS ve vozidle Nissan 240 SX	31
Obrázek 14 Zadní náprava Renaultu Laguna Active Drive	32
Obrázek 15 Detail zadní nápravy Renaultu Laguna s Active Drive	33
Obrázek 16 Část zadní nápravy vozu Porsche se systémem 4WS při pohledu shora	34
Obrázek 17 Elektromechanická jednotka natáčení zadních kol Porsche	35
Obrázek 18 Traktor Caldwell první 4WS vozidlo	36
Obrázek 19 John Deere X304	36
Obrázek 20 Rypadlonakladač Venieri	37
Obrázek 21 Nákladní automobil Tatra	37
Obrázek 22 Podvozek autobusu Scania 4WS	38
Obrázek 23 Nejdelší monster truck světa	38
Obrázek 24 Jeep Hurricane	39
Obrázek 25 Natočení přívěsu tahače	39
Obrázek 26 Rovinný model dvounápravového vozidla	40
Obrázek 27 Jednostopý rovinný model dvounápravového vozidla	41
Obrázek 28 Kinematika zatačení jednostopého modelu dvounápravového vozidla 2WS	42
Obrázek 29 Řízení dvounápravového vozidla 4WS	45
Obrázek 30 Jednostopý rovinný model dvounápravového vozidla 4WS	47
Obrázek 31 Kinematika zatačení jednostopého modelu dvounápravového vozidla 4WS	48
Obrázek 32 Prostorový model dvounápravového vozidla 4WS	50

Obrázek 33 Okamžité póly zatáčení vozidla	51
Obrázek 34 Experimentální vozidlo DFJP	52
Obrázek 35 Měření úhlu natočení předních kol experimentálního vozidla	53
Obrázek 36 Závislost natočení vnitřního a vnějšího kola na úhlu natočení volantu	54
Obrázek 37 Výpočtový model souhlasného natáčení zadních kol	55
Obrázek 38 Jednostopý model vozidla 4WS se souhlasným natáčením zadních kol	56
Obrázek 39 Výpočtový model nesouhlasného natáčení zadních kol	58
Obrázek 40 Závislost poloměru zatáčení na úhlech natočení kol při souhlasném natáčení zadních kol.....	59
Obrázek 41 Závislost poloměru zatáčení na úhlech natočení kol při nesouhlasném natáčení zadních kol.....	59
Obrázek 42 Schéma zatáčení experimentálního vozidla 4WS	61
Obrázek 43 Závislost úhlu natočení kol na teoretickém poloměru zatáčení	63
Obrázek 44 Závislost úhlu natočení volantu na teoretickém poloměru zatáčení	63
Obrázek 45 Symetrické natáčení předních a zadních kol.....	66
Obrázek 46 Závislost úhlu natočení vnitřního kola na poloměru zatáčení experimentálního vozidla	67
Obrázek 47 Měření poloměru zatáčení dle indické normy 12222	69

SEZNAM ZKRATEK

4WS		System zatáčení vozidel pomocí čtyř natáčecích kol
2WS		System zatáčení vozidel pomocí dvou natáčecích kol
O_s		Reálný střed zatáčení
O_t		Teoretický střed zatáčení
ESP		Elektronický stabilizační systém
ŘJ		Řídící jednotka
DSC		Dynamická kontrola stability
AHK		Elektrohydraulický systém 4WS vyvinutý automobilkou BMW
ABS		Protiblokovací systém brzdění
HICAS		Elektrohydraulický systém 4WS vyvinutý automobilkou Nissan
SUPERHICAS		Elektrohydraulický systém 4WS vyvinutý automobilkou Nissan
α	[°]	Úhel natočení vnitřního kola
β	[°]	Úhel natočení vnějšího kola
R	[m]	Teoretický poloměr zatáčení
L	[m]	Rozvor kol
B_0	[m]	Vzdálenost rejdových čepů
F_f	[N]	Odpor valení
M_z	[N·m]	Vratný moment pneumatik
F_V	[N]	Odpor vzduchu
A_y	[N]	Příčná aerodynamická síla
F_i	[N]	Setrvačná síla
F_0	[N]	Odstředivá síla
M_i	[N·m]	Setrvačný moment působící proti stáčení vozidla
Y_1	[N]	Boční síla na přední pneumatice
Y_2	[N]	Boční síla na zadní pneumatice
X_{T2}	[N]	Tečná síla na přední pneumatice
X_{T2}	[N]	Tečná síla na zadní pneumatice
α_s	[°]	Střední úhel natočení předních kol
δ	[°]	Směrová úchylka
k_1	[N/deg]	Směrová tuhost přední nápravy
k_2	[N/deg]	Směrová tuhost zadní nápravy
δ_1	[°]	Směrová úchylka přední nápravy

δ_2	[°]	Směrová úchylka zadní nápravy
$\dot{\epsilon}$	[deg/s]	Stáčivá rychlost
v	[m/s]	Rychlost
l_1	[m]	Vzdálenost přední nápravy od těžiště
l_2	[m]	Vzdálenost zadní nápravy od těžiště
m	[kg]	Hmotnost vozidla
a	[m/s ²]	Zrychlení vozidla
$\ddot{\epsilon}$	[deg/s ²]	Stáčivé zrychlení
I_z	[kg·m ²]	Moment setrvačnosti
R_s	[m]	Poloměr zakřivení dráhy těžiště
$\dot{\delta}$	[deg/s]	Úhlová rychlost stáčení
α_1	[°]	Úhel natočení vnitřního předního kola
α_2	[°]	Úhel natočení vnitřního zadního kola
β_1	[°]	Úhel natočení vnějšího předního kola
β_2	[°]	Úhel natočení vnějšího zadního kola
L_1	[m]	Vzdálenost přední nápravy a pólu zatačení
L_2	[m]	Vzdálenost zadní nápravy a pólu zatačení
D_1	[m]	Stopový poloměr zatačení vnějších kol
D_2	[m]	Stopový poloměr zatačení vnitřních kol
H	[m]	Šířka jízdní dráhy
c	[m]	Vzdálenost rejdového čepu a středu pneumatiky
β_P	[°]	Střední úhel natočení předních kol
β_Z	[°]	Střední úhel natočení zadních kol
e	[m]	Přesazení těžiště od aerodynamického středu
l_p	[m]	Vzdálenost těžiště od přední nápravy
l_z	[m]	Vzdálenost těžiště od zadní nápravy
α_p	[°]	Směrová úchylka přední nápravy
α_z	[°]	Směrová úchylka zadní nápravy
$i_{\dot{r}}$	[1]	Převodový poměr převodky řízení
β_v	[°]	Úhel natočení volantu
α_p	[°]	Natočení vnitřního předního kola
β_p	[°]	Natočení vnějšího předního kola
α_z	[°]	Natočení vnitřního zadního kola

β_z	[°]	Natočení vnějšího zadního kola
c_1	[m]	Vzdálenost středu zatáčení od přední nápravy
c_2	[m]	Vzdálenost středu zatáčení od zadní nápravy
x	[m]	Odsazení pólů zatáčení
c_l	[m]	Vzdálenost středu otáčení zadních kol od zadní nápravy
α_{p1}	[°]	Střední úhel natočení předních kol
α_{z1}	[°]	Střední úhel natočení zadních kol

ÚVOD

Cílem mé práce je sestavení programu pro výpočet úhlů natočení kol vozidla 4WS doplněného odvozením vztahů pro výpočet úhlů natočení kol. Program je vztažen na experimentální vozidlo Dopravní fakulty Jana Pernera, které je sice koncepce 4WS, avšak kola zadní nápravy se natáčeji nezávisle na kolech přední nápravy. Tento systém v praxi nadměrně opotřebovává pneumatiky a jízda s experimentálním vozidlem neodpovídá kinematice jízdy vozidla zatáčkou. Pro odstranění neduhů předešlé koncepce nezávislého natáčení kol zadní nápravy jsem se sestavil algoritmus, který bude zadní kola natáčet v závislosti na úhlu natočení kol předních.

Má práce vznikla z tématu navrženého katedrou dopravních prostředků a diagnostiky, která experimentální vozidlo vyvinula a nadále ho konstrukčně inovuje a zlepšuje. Toto téma diplomové práce jsem si zvolil, jelikož mi tato problematika přišla zajímavá a bude mít svůj přínos i v praxi, při použití mých poznatků na experimentálním vozidle Dopravní fakulty. Koncepce a základní parametry experimentálního vozidla Dopravní fakulty byly navrženy již v roce 2005, kdy z tehdy dostupných technologií převzatých ze Škoda Auto a.s. začalo vznikat experimentální vozidlo. Vozidlo využívá přední nápravu z osobního automobilu Škoda Fabia první generace, jako zadní náprava je použita taktéž přední náprava z téhož vozidla. Převodky řízení jsou taktéž použity z Fabie, kola zadní nápravy natáčí elektromotor přes šnekovou převodovku. Pohonné ústrojí včetně převodového ústrojí experimentálního vozidla je opět převzato ze Škody Fabia. Ve vozidle je zastavěn motor 1,2 HTP, ovšem oproti Fabii, ze které pochází, je zde hnací agregát včetně převodového ústrojí uložen podélně. Jelikož je experimentální vozidlo také koncepce 4WD, přibyl oproti Fabii mezinápravový diferenciál. Diferenciály experimentálního vozidla nemají zvýšenou svornost ani funkci uzamčení, tudíž se nemůže počítat s provozem ve zhoršených adhezních podmínkách, jelikož při prokluzu jednoho kola se přeruší přenos hnací síly na všechna ostatní kola.

Má práce je strukturovaná do tří hlavních kapitol, ve kterých jsou realizovány jednotlivé podkapitoly. V první části jsem se zaměřil na typy řízení kol zadní nápravy, které byly použity v minulosti až po dnešní dobu. Ve druhé kapitole je pojednáváno o technických provedeních systémů 4WS předních výrobců automobilů s těmito systémy. Dále jsou zde uvedena speciální vozidla, která využívají systém natáčení zadních kol. Ve třetí kapitole je objasněna kinematika zatáčení vozidel 2WS a 4WS, dále již pojednávám o experimentálním vozidle, na které jsou vztaženy všechny mé nové poznatky. Ilustroval jsem zde grafy pro natáčení kol v různých

situacích vozidla 4WS, dále jsou zde uvedeny programy pro výpočet úhlů natočení kol. V neposlední řadě je nutno uvést úpravy pro zlepšení stávajícího konstrukčního provedení experimentálního vozidla. Pro úplnost je zde ještě popsána metodika pro měření poloměru zatáčení.

Při tvorbě práce jsem zpočátku čerpal z tištěné odborné literatury, ve které bych bohužel nenalezl všechny potřebné informace. Množství odborné literatury zaměřené na mnou zkoumanou problematiku je poměrně malé a dohledat technické informace o systémech 4WS je problematické. Proto jsem musel dále čerpat z různých webových článků v několika jazycích, ve kterých jsem dohledal další podklady nezbytné pro tvorbu své práce.

1. Typy řízení kol zadní nápravy

U osobních automobilů rozlišujeme natáčení kol zadní nápravy:

- pasivní,
- aktivní.

Dále se rozlišuje natáčení zadních kol dle směru:

- nesouhlasné natáčení zadních kol,
- souhlasné natáčení zadních kol.

Novější generace systémů 4WS rozlišují natáčení zadních kol dle dopředné rychlosti vozidla:

- při vysokých rychlostech,
- při nízkých rychlostech,
- trvalé.

1.1. Pasivní řízení

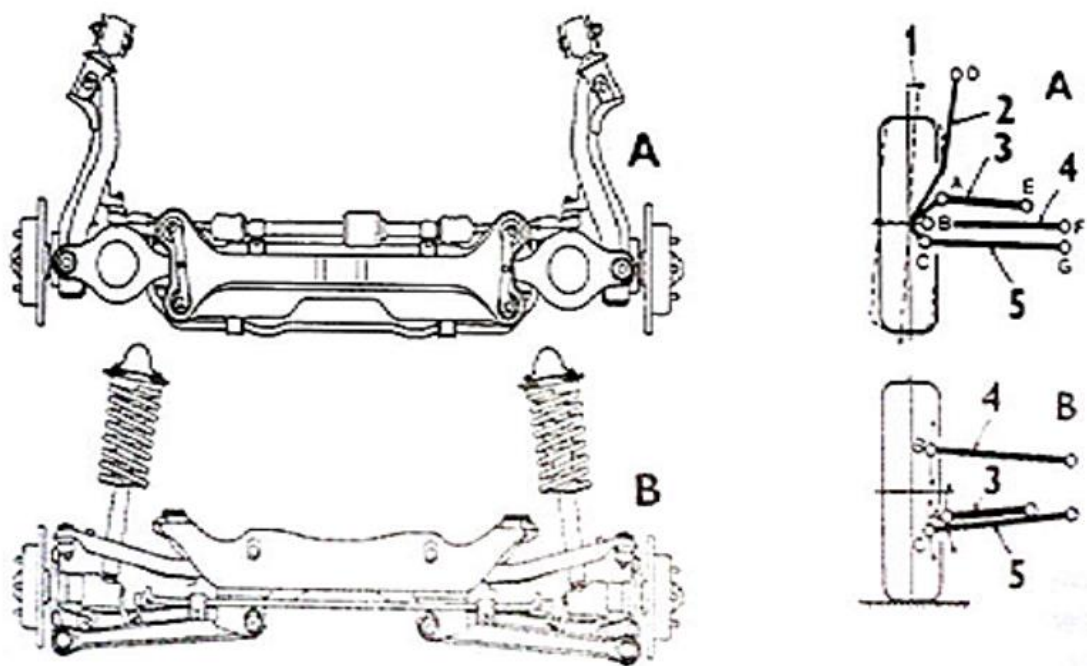
- Elastokinematické (Opel),
- Pomocí víceprvkového zavěšení zadních kol (Mitsubishi).

1.1.1. Elastokinematické řízení zadních kol

Ramena zadní nápravy jsou spojena s karoserií pomocí pryžových pouzder. Elastokinematické řízení zadních kol dovoluje pouze souhlasné natáčení zadních kol. Zadní kola se natáčí při změně svislého zatížení (radiální reakce) zadních kol pomocí elastokinematických vazeb zadní nápravy. Toto natočení je velmi malé a je nezávislé na úhlu zatočení předních kol. Zavěšení zadních kol takto konstruovaných automobilů natáčí zadní kola maximálně o 3° . [28] Tudíž řidič přímo neovládá natočení zadních kol. Velkou nevýhodou tohoto systému je, že může docházet ke zhoršení stability vozidla při přímé jízdě, například při najetí na nerovnost. Zvýší-li se radiální reakce na jednom ze zadních kol, zadní kola se začnou natáčet, sice o malý úhel, ale přesto dochází k nepříznivému jevu zhoršení jízdní stability. [4]

1.1.2. Pomocí víceprvkového zavěšení zadních kol

Tento pasivní systém u svých automobilů s oblibou v minulosti využívala firma Mitsubishi, kde byla zadní kola uložena na víceprvkovém závěsu. Zavěšení je provedeno prostřednictvím jednoho podélně a tří příčně uložených zadních ramen. Kinematika takto uspořádaných ramen dosahuje přesného pasivního řízení zadních kol. V průběhu zdvihu kola se nepatrně mění sbíhavost a příklon.

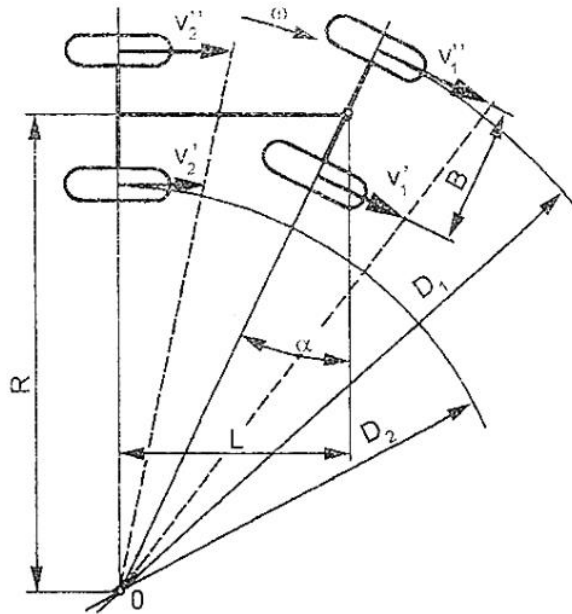


Obrázek 1 Zadní náprava Mitsubishi Sigma s víceprvkovým zavěšením kol. A - Pohled shora, B - Pohled zezadu 1-Řízená změna sbíhavosti, 2 - podélné rameno, 3 - spodní pomocné rameno, 4 - horní příčné rameno, 5 - spodní příčné rameno. [3]

1.2. Aktivní řízení

Aktivní natáčení kol zadní nápravy používají dražší automobily a označuje se jako 4WS. Jedním z nejlevnějších evropských automobilů s nezávislým zatáčením zadních kol je Renault Talisman. Další evropské vozy s tímto systémem jsou již poněkud dražší, lze jmenovat například Ferrari GTC4Lusso. Jako nejznámějšího zástupce asijských vozů z minulosti lze jmenovat Hondu Prelude, do které byl systém dodáván již od roku 1987. Honda Prelude třetí generace byl vůbec první sériově celosvětově prodáváný osobní automobil se systémem 4WS. V Americe se používá systém natáčení zadních kol například u pick-upů GMC Sierra, kde je dodáván s příplatkem 1000 dolarů. U těchto automobilů jde v první řadě o snazší parkování, dále je tento systém výhodný pro lepší stabilitu jízdy a manévrovatelnost s přívěsem.

Systém 4WS simuluje proměnlivou délku rozvoru náprav, kdy potřebujeme těžit výhody krátkého i dlouhého rozvoru automobilu zároveň. Pro lepší pochopení celé problematiky je zde odvozen vztah pro poloměr zatáčení dvounápravového vozidla řízeného předními rejdovnými koly v závislosti na rozvoru náprav. [5]



Obrázek 2 Zatáčení dvounápravového vozidla rejdovými koly [1]

$$\cotg\alpha = \frac{R - \frac{B_0}{2}}{L} \quad (1)$$

$$\cotg\beta = \frac{R + \frac{B_0}{2}}{L} \quad (2)$$

$$\cotg\beta - \cotg\alpha = \frac{B_0}{L} \quad (3)$$

$$R = L \cdot \cotg\alpha + \frac{B_0}{2} = L \cdot \cotg\beta - \frac{B_0}{2} \quad (4)$$

Kde:

α - úhel natočení vnitřního kola [°],

β - úhel natočení vnějšího kola [°],

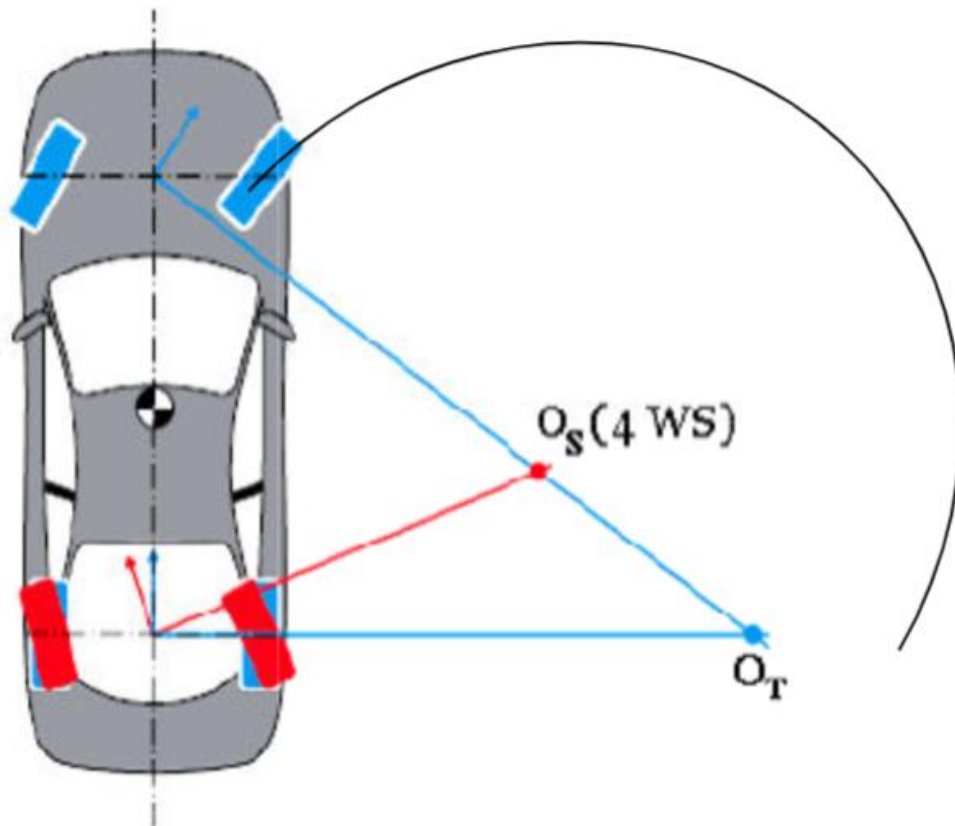
R - teoretický poloměr zatáčení [m],

B_0 - vzdálenost rejdových čepů [m].

Z výše uvedených vztahů vyplývá, že velikost teoretického poloměru zatáčení je přímo úměrná rozvoru náprav L a cotangentě α .

Dlouhý rozvor znamená lepší příčnou stabilitu při vyšších rychlostech, kdy se zvětšujícím se rozvorem, narůstá poloměr zatáčení. Dlouhý rozvor je systémem natáčení zadních kol simulován natočením zadních kol po směru jízdy. Naopak krátký rozvor znamená dobrou manévrovatelnost a zpětnou odezvu vozidla na pokyny řízení. Zadní kola se v tomto případě natáčí proti směru jízdy.

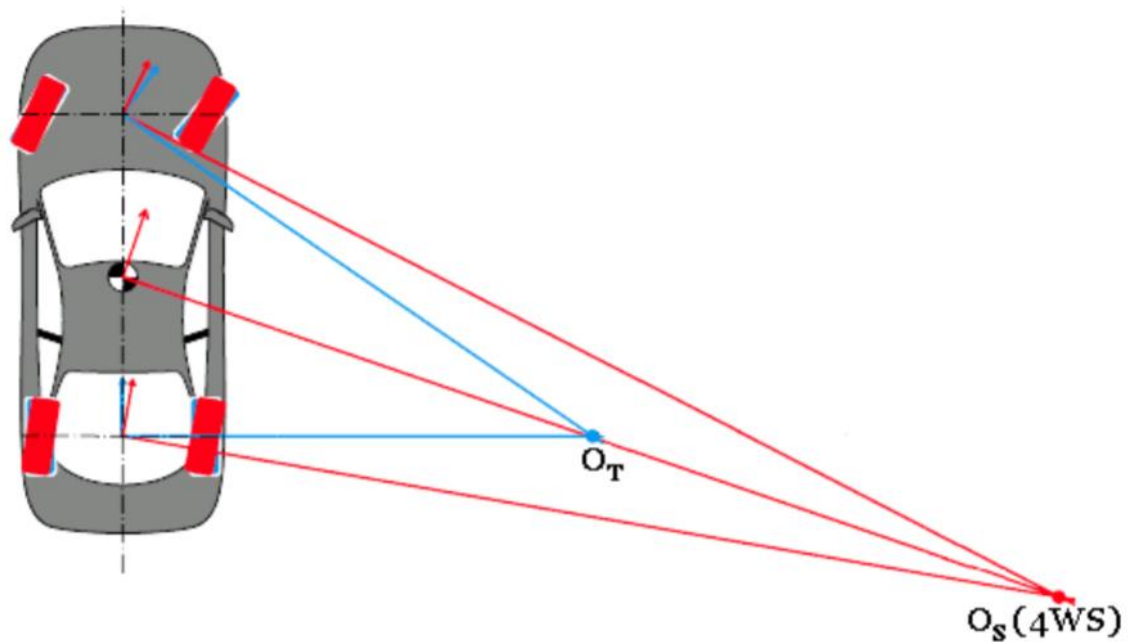
1.2.1. Nesouhlasné natáčení zadních kol



Obrázek 3 Nesouhlasné natáčení kol zadní nápravy [6]

Tímto způsobem se natáčí kola vozidel při nízkých rychlostech. Zadní kola se natáčí o mnohem menší úhel než kola přední. Například zatočení předních kol o 15 stupňů, vyvolá natočení zadních kol o jeden stupeň. Variabilita v úhlech natáčení zadních kol je velká, toto natočení je uvedeno jako příklad. Každý výrobce si závislost natočení zadních kol na natočení kol přední nápravy upravuje dle vlastních zkušeností z provozu. Nesouhlasné natáčení kol zadní nápravy údajně zmenší poloměr zatáčení až o čtvrtinu, oproti konvenčnímu 2WS vozidlu. Tento systém natáčení kol je velkým přínosem hlavně pro městský provoz a usnadnění parkování. Rozdíl mezi zatáčením vozidla 2WS a 4WS s nesouhlasným natáčením kol zadní nápravy je především v posunutí středu zatáčení (O_s) blíže směrem k vozidlu a před zadní nápravu, oproti teoretickému středu zatáčení (O_t), čímž zmenšíme poloměr zatáčení. [5]

1.2.2 Souhlasné natáčení zadních kol

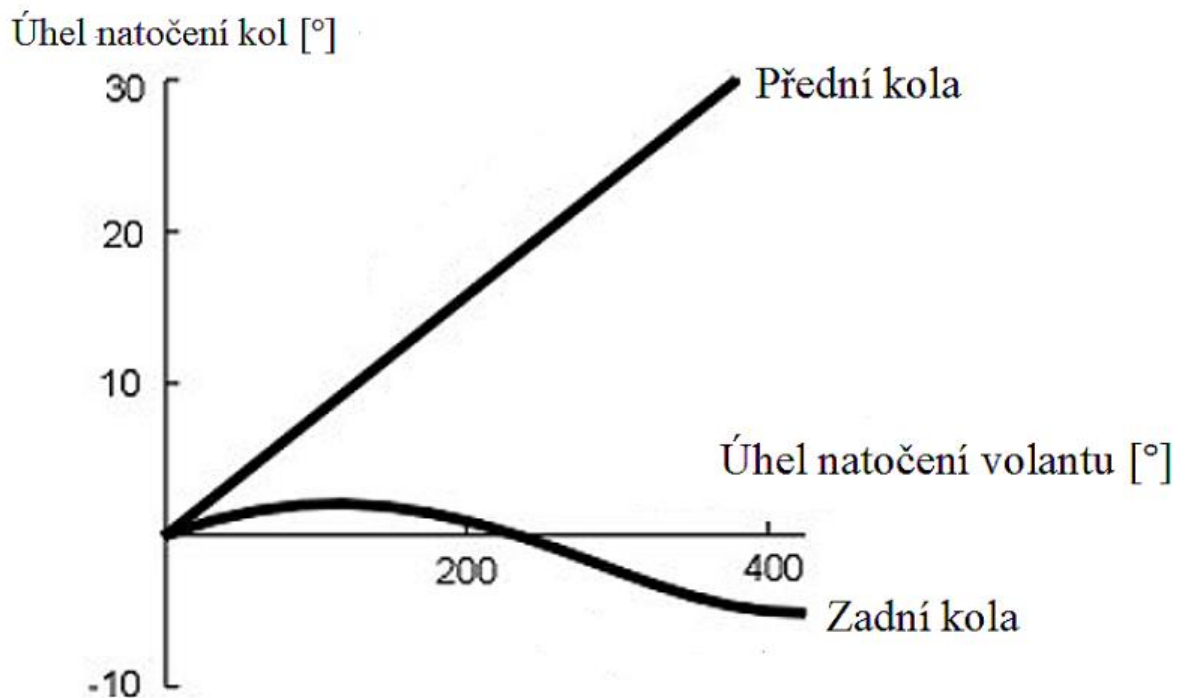


Obrázek 4 Souhlasné natáčení kol zadní nápravy [6]

Na výše uvedeném schématu je uveden způsob souhlasného natočení zadních kol, který je využíván při vyšších rychlostech. Zadní kola se natáčí v poměru natočení k předním kolům ještě o poznání méně, než je tomu u protisměrného systému natáčení kol zadní nápravy. Jako příklad souhlasného natočení zadních kol lze uvést změnu jízdního pruhu v dálničním provozu, kdy je při vyšších rychlostech zapotřebí lepší směrová stabilita vozidla. Tento jev je způsoben tím, že skutečný střed zatáčení (O_S) je oproti teoretickému středu zatáčení (O_T) posunut za vozidlo a dále směrem od vozidla. Jako pozitivum, při souhlasném natáčení kol zadní nápravy, lze uvést snížení stáčivé rychlosti vozidla. [5]

1.3. Závislost natočení zadních kol vůči předním a úhlu natočení volantu

Na obrázku číslo 5 je uvedena závislost mezi úhlem natočení kol a úhlem natočení volantu. Tato závislost je převzata z automobilu Honda Prelude roku výroby 1987, kde ještě byl použit čistě mechanický systém natáčení kol zadní nápravy. Natáčení zadních kol u třetí generace Hondy Prelude záviselo pouze na úhlu natočení předních kol. Na rozdíl od modernějších systémů 4WS, nebyl mechanický systém řízen dle aktuální dopředné rychlosti vozidla. Při malém úhlu natočení volantu se zadní kola natáčejí ve stejném směru jako kola přední, avšak ne o více jak 1,7 stupně. Při zvětšujícím se úhlu natočení volantu se již zadní kola začnou natáčet protisměrně vůči kolům předním, maximální natočení zadních kol v negativním směru je 5 stupňů. Dle dobových poznámek řidičů bylo řízení tohoto vozu naprosto odlišné od všech jiných automobilů téže doby a vyžadovalo praxi s tímto systémem. Mechanický systém 4WS byl neobvyklý a používal se pouze u 3. generace Prelude. Nastupující čtvrtá generace Hondy Prelude přišla v roce 1992 s elektronickým systémem řízení zadních kol. [7]

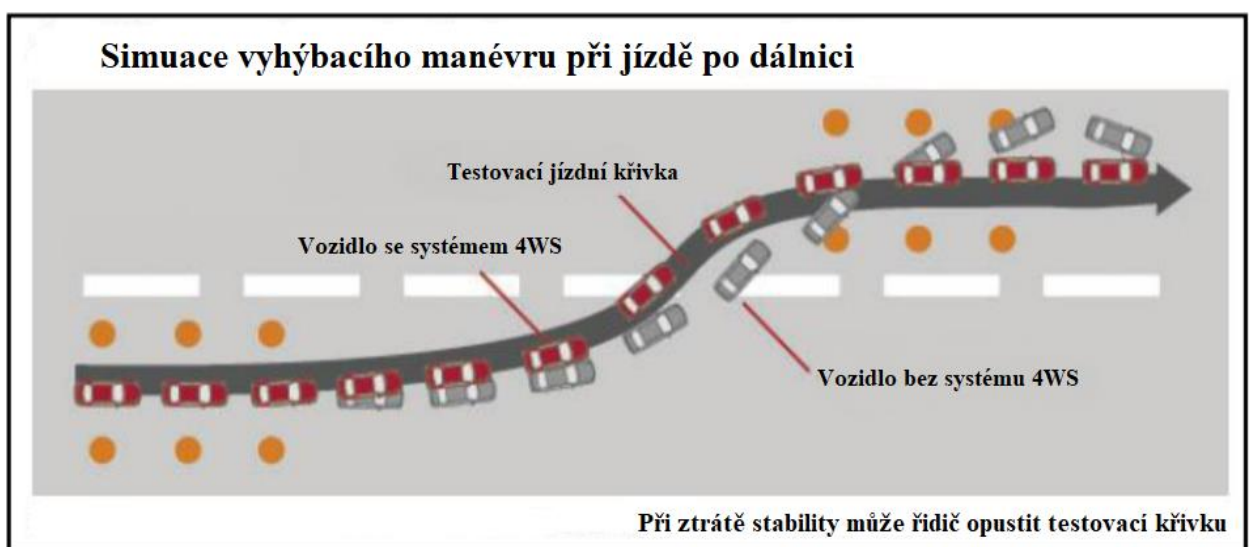


Obrázek 5 Závislost úhlu natočení kol na úhlu natočení volantu Honda Prelude 3. generace. [6]

1.4. Porovnání systému 4WS a 2WS

Na obrázku číslo 6 je patrné, jak se pomocí systému natáčení zadních kol zlepšila směrová stabilita vozidla. Vozidlo 4WS projede testovací dráhu bez výrazného směrového vybočení. Řidiči ve vozidle se systémem 4WS je ulehčeno manévrování, oproti řidiči konvenčního vozidla 2WS, kdy řidič běžného automobilu bez natáčení zadních kol má zhoršenou kvalitu jízdy vlivem nadjíždění a následného stáčení na požadovanou trajektorii. Pro porovnání a lepší vypovídající schopnost výsledků, byla vybrána dvě shodná vozidla Infiniti G37. První z vozidel ve vrcholné verzi Sport bylo vybaveno systémem 4WS, kdežto druhé vozidlo bylo nižší výbavy bez tohoto systému.

U nynějších automobilů se již systém 4WS používá pouze zřídka, jelikož od 1. listopadu 2011 je u nově homologovaných automobilů povinný elektronický stabilizační program ESP, který napomáhá proti ztrátě stability vozidla. Jízdní trajektorie je ovšem stejná s konvenčním 2WS vozidlem. [8]



Obrázek 6 Porovnání chování vozidla se systémem 4WS a 2WS. [8]

2. Technické provedení řízení kol zadní nápravy

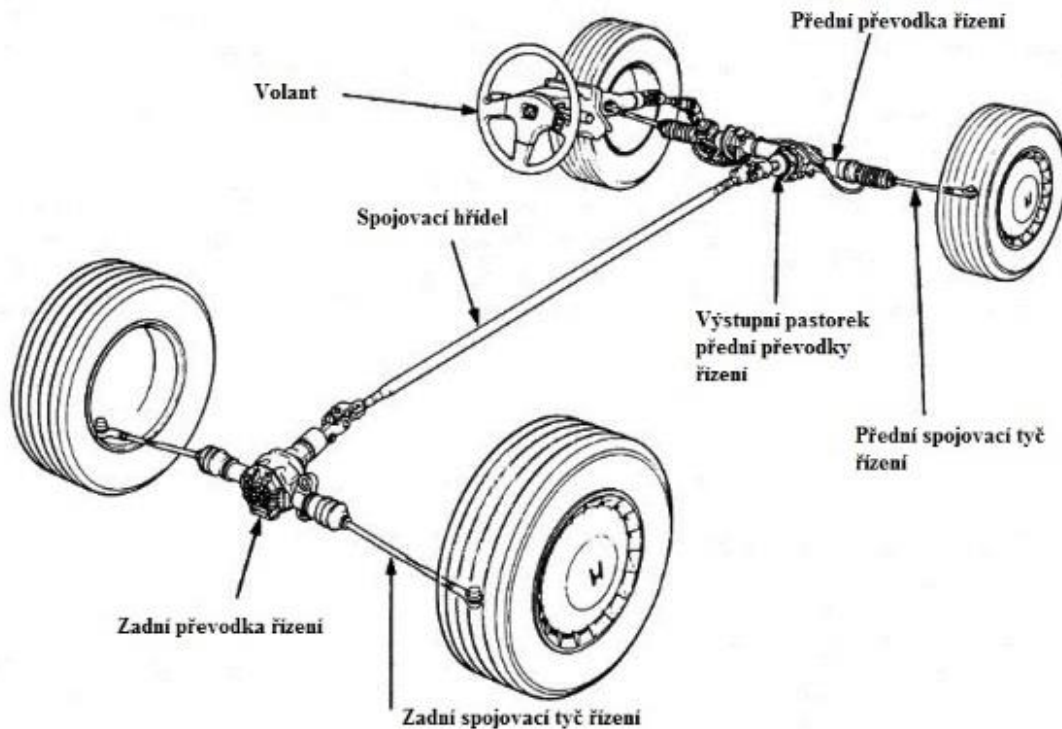
2.1. Mechanické provedení řízení kol zadní nápravy

Způsobem mechanického provedení řízení kol zadní nápravy byl řešen systém 4WS ve 3. generaci Hondy Prelude, která byla zkonstruována jako vůbec první sériově vyráběný automobil se systémem 4WS. Veškeré vazby mezi volantem a řízenými koly jsou řešeny pouze mechanicky. Jedná se o nejjednodušší systém natáčení zadních kol, který je závislý pouze na úhlu natočení volantu. Tento systém si díky mechanické konstrukci zachovává vysokou spolehlivost, kdy později vyvinuté japonské systémy 4WS již takto vysokou spolehlivost nevykazují. Vozidlo mělo dvě převodky řízení použité pro každou nápravu zvlášť. Výstup z přední převodky řízení roztáčí pomocí dlouhého spojovacího hřídele zadní převodku řízení.

2.1.1. Vývoj a historie systému

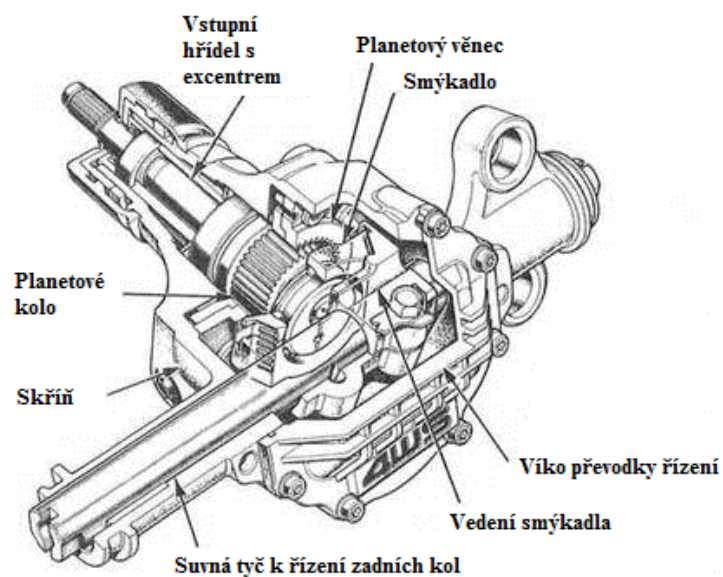
Tento systém začali inženýři od Hondy vyvíjet již v roce 1977. Jejich hlavním úkolem bylo navržení systému 4WS a maximálně využít stávající již existující techniku Honda. Pro vývojové centrum Hondy byla rozhodující otázka, zda zvolit možnost stejnosměrného, nebo protisměrného natáčení zadních kol. Konečné rozhodnutí učinili inženýři ve prospěch protisměrného natáčení zadních kol. Hlavní inspirací pro použití protisměrného systému se staly zemědělské a stavební stroje. Ovšem tato myšlenka je pro silniční provoz s vysokými rychlostmi nevhodná. Systém s protisměrným natáčením zadních kol neobstál před japonskou státní komisí ministerstva dopravy. Hlavním argumentem byla nízká směrová stabilita při projíždění zatáček vysokými rychlostmi. Tudíž Honda musela celý systém přepracovat s tím, že vozidlo bude natáčet zadní kola jak stejnosměrně, tak protisměrně vůči kolům předním. Cílem vývojářů bylo určit optimální poměr vychýlení zadních kol ve vztahu ke kolům předním. Tento systém si Honda nechala patentovat v roce 1977. V roce 1981 vzniklo testovací vozidlo, které technicky vycházelo z Accordu. Mula používala v podstatě dvě přední části tohoto vozidla spojené k sobě, avšak zadní část byla zrcadlově otočena vůči té přední. Systém 4WS v testovací mule byl příliš složitý a sériové výroby se bohužel nedočkal. Do sériové výroby se mechanický systém řízení zadních kol dostal až po dlouhých deseti letech. [7]

2.1.2. Technické provedení mechanického systému natáčení kol zadní nápravy



Obrázek 7 Schéma mechanického řízení natáčení zadních kol [9]

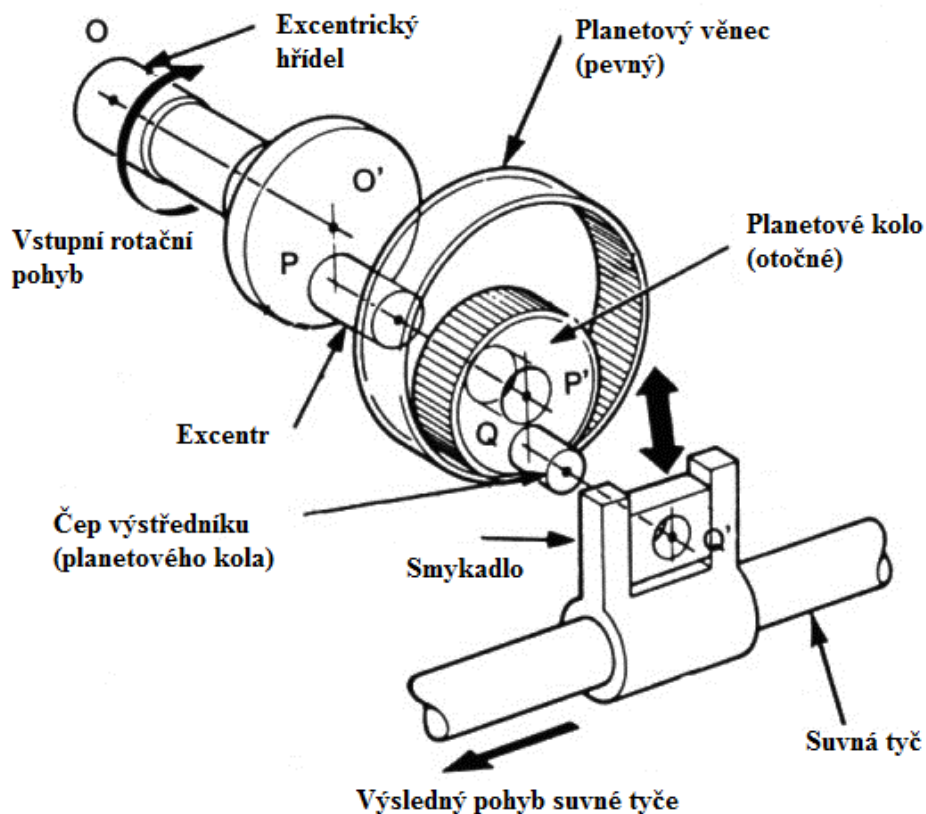
Převodka řízení přední nápravy je za pomoci spojovacího hřídele spojena s převodkou řízení zadní nápravy, která zadní kola vychýlí o požadovaný úhel a v požadovaném směru.



Obrázek 8 Zadní převodka řízení mechanického systému 4WS Honda v řezu [9]

Při zvětšujícím se úhlu natočení volantu se zvětšuje i úhel natočení vstupního excentrického hřídele. Natočení vstupního excentrického hřídele je závislé také na převodu přední převodky řízení. Tento excentrický hřídel je spojen s planetovým kolem, které se odvaluje po vnitřním ozubení planetového věnce. Smykadlo je pak pevně spojeno s planetovým kolem a pohybuje se složeným pohybem (hypocykloidním) a posouvá suvnými tyčemi, čímž vychyluje zadní kola.

Zadní kola se vychylují oproti předním, dle konstrukce zadní převodky řízení, jak stejnosměrně, tak protisměrně. Při malém úhlu natočení volantu do cca 230° se zadní kola natáčejí stejnosměrně, při větším úhlu natočení volantu se již zadní kola natáčí protisměrně.



Obrázek 9 Dekomponovaná zadní mechanická převodka řízení [9]

Fáze natočení zadních kol

Natočení volantu přes převod v přední převodce řízení vyvolá pomocí spojovacího hřídele rotační pohyb i na vstupním excentrickém hřídeli zadní převodky řízení. Vstupní excentrický hřídel je pomocí excentru spojen s planetovým kolem, které se za pomoci této vazby začne také otáčet. S planetovým kolem je pomocí čepu výstředníku spojeno smykadlo, které koná pohyb přímočarý a zároveň tento pohyb koná i suvná tyč ve stejném směru jako spojovací tyč přední

převodky řízení. Zadní kola se natáčí do stejného směru jako ta přední. Maximální vychýlení suvné tyče je při cca 140° natočení volantu, což přibližně odpovídá úhlu natočení zadních kol o 1,7°.

Při natočení volantu o více jak 140° se vlivem planetového převodu a excentrických uložení zmenšuje úhel natočení zadních kol až na 0°, při úhlu natočení volantu přibližně 240°. Při tomto úhlu natočení volantu jsou kola opět v přímém směru.

Větší natočení volantu než o úhel 240° vyvolá pohyb suvné tyče opačným směrem, než tomu bylo dosud. To vyvolá nestejnsměrné natočení zadních kol o maximálním úhlu až -5° při úhlu natočení volantu cca 450°.

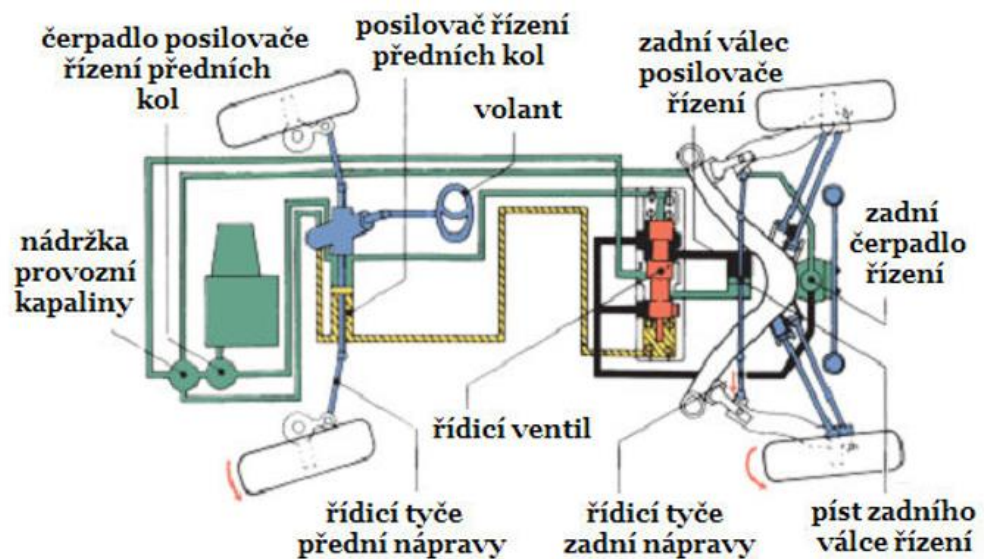
2.2. Elektrohydraulické provedení řízení kol zadní nápravy

- Systém AHK (BMW)
- Systém HICAS (Nissan)
- Systém SUPERHICAS (Nissan)

Základními prvky elektrohydraulického systému jsou čerpadlo, akční člen v podobě hydraulického válce a řídicí jednotka. Pro funkci elektrohydraulického řízení zadních jsou systémy vybaveny snímači. Signál ze snímačů slouží jako vstupní data pro ŘJ.

V praxi se používají snímače:

- snímač natočení úhlu volantu,
- snímač rychlosti vozidla,
- snímač příčného zrychlení,
- snímač otáček.



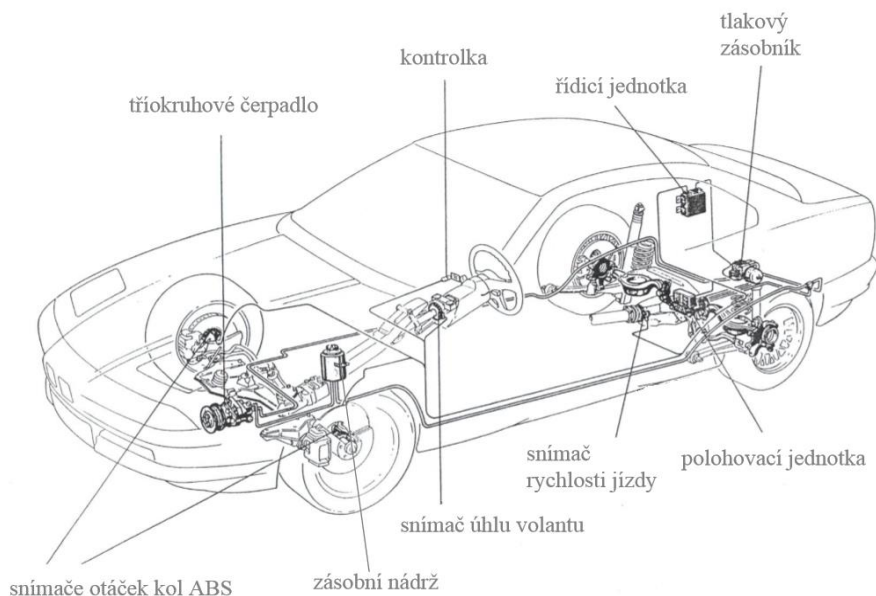
Obrázek 10 Schéma elektrohydraulického řízení kol zadní nápravy [3]

Řídicí jednotka zpracovává signály ze snímačů, pro zjištění potřebného úhlu natočení zadních kol. Při potřebě vychýlení zadních kol řídicí jednotka sepne zadní čerpadlo řízení. Kapalina od čerpadla putuje přes řídicí ventil do zadního válce řízení, kde zapůsobí svým tlakem na píst pracovního válce, který je spojen s řídicími tyčemi řízení zadní nápravy a vychýlí zadní kola o požadovaný úhel. [3]

2.2.1. Systém AHK (Aktive Hinterachs kinematik)

Systém AHK vyvinula automobilka BMW a byl použit hlavně pro řadu 8. Začátek produkce tohoto systému je v generaci E31 od roku 1992, kde se zprvu objevil jako příplatková výbava. V roce 1994 přivedl BOSCH na trh dynamickou kontrolu stability DSC, čímž předznamenal konec systému AHK, který svou cenou nemohl konkurovat levnějšímu DSC.

Pro systém řízení zadních kol AHK jsou vyhodnocovány veličiny: úhel natočení volantu a dopředná rychlost jízdy. Pomocí těchto dvou veličin řídící jednotka automobilu vyhodnotí vhodné natočení zadních kol pro danou jízdní situaci. Úhel natočení volantu je snímán přímo z převodky řízení, ve které je integrován snímač natočení volantu. Dopředná rychlost vozidla se vyhodnocuje z přední i zadní nápravy. Na přední nápravě je snímána rychlost pro každé kolo zvlášť pomocí snímačů ABS. Na zadní nápravě je snímač umístěn v převodovce (tachodynamo). Pro kontrolu je použit snímač polohy akčního členu, aby řídící jednotka měla údaj o tom, jak jsou zadní kola natočena. Pro bezpečnost posádky vozidla je systém AHK vybaven dvěma zámkami akčního členu (hydraulickým a mechanickým). Systém je navržen tak, aby při poruše, jak na hydraulické části, tak na elektronice, zamkl akční člen a vozidlo se následně chovalo jako 2WS. [10]

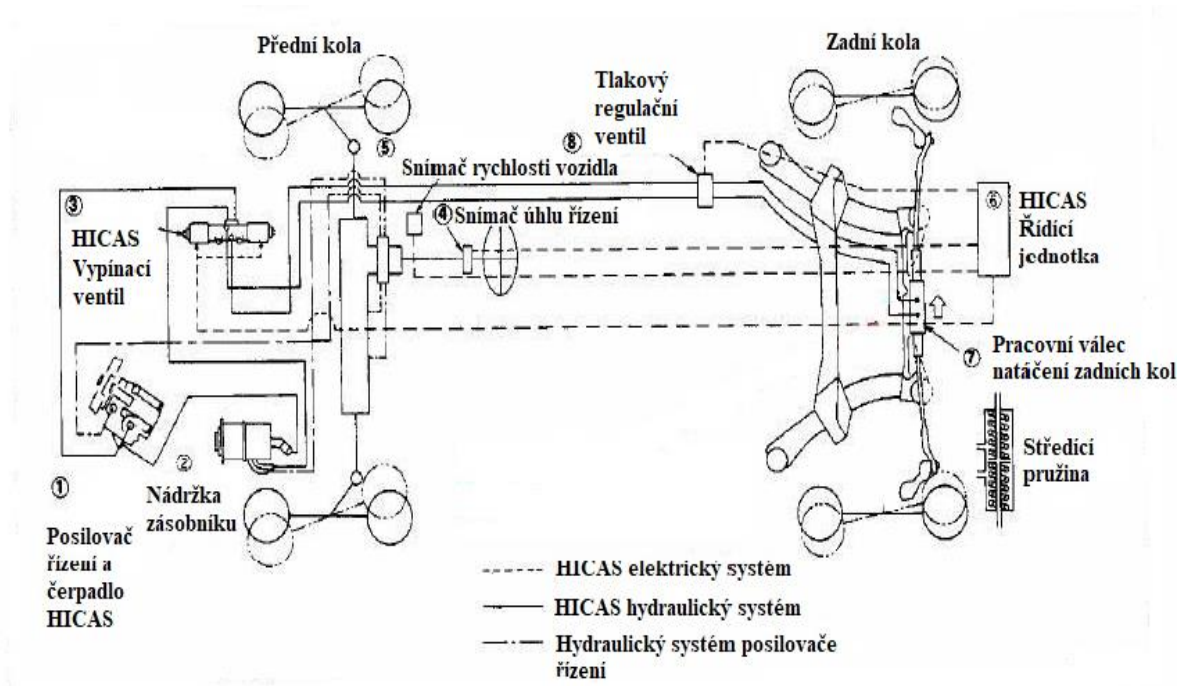


Obrázek 11 Schéma systému AHK na BMW 8 [11]

Zadní kola jsou natáčena pomocí akčního členu (hydraulického válce). Potřebný tlak pro hydraulický systém je vytvořen radiálním pístovým čerpadlem poháněným od hnacího agregátu vozidla.

2.2.2. Systém HICAS (High Capacity Actively Controlled Steering)

Systém HICAS byl vyvinut automobilkou Nissan v roce 1986. Jako první byl použit ve vozidle Nissan Skyline GTS. Tento systém byl postupem času modifikován pro lepší zástavbu do dalších modelů značky. Systém HICAS řízení zadních kol se také objevoval ve vozech Infiniti.



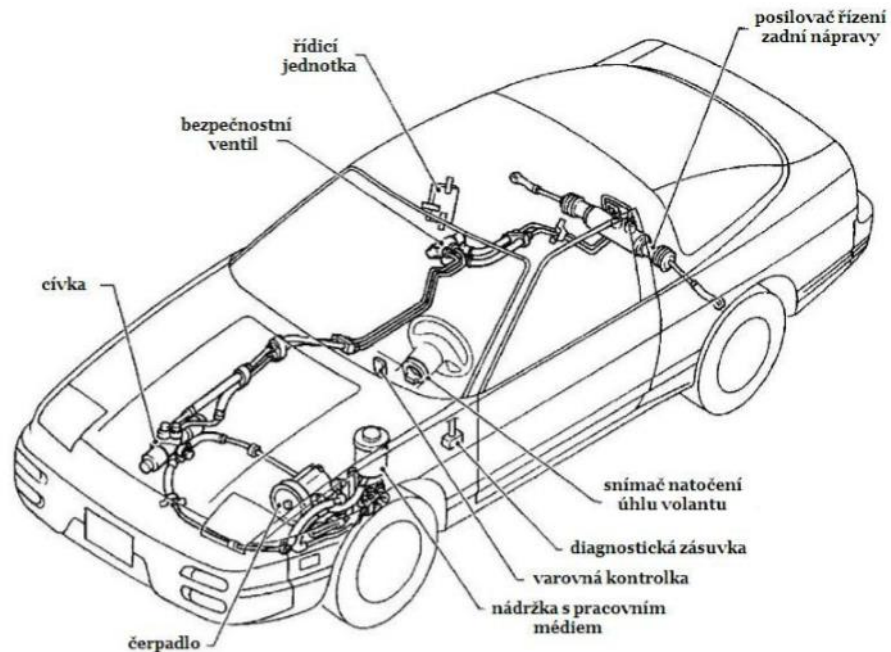
Obrázek 12 Schéma systému HICAS [12]

Vychýlení zadních kol řídí řídicí jednotka, která vyhodnotí natočení zadních kol dle hodnot ze snímače příčného zrychlení (bez ohledu na natočení volantu). Mezní hodnotou pro natočení zadních kol je 0,5g.

- Při nízkých rychlostech se zadní kola natáčí nesouhlasně vůči kolům předním. Maximální úhel natočení zadních kol pro nesouhlasné natočení je 7°.
- Při vysokých rychlostech se zadní kola natáčí souhlasně vůči kolům předním. Maximální úhel natočení pro tento případ je cca 0,5°. [13]

2.2.3. Systém SUPERHICAS (High Capacity Actively Controlled Steering)

Systém SUPERHICAS se oproti svému předchůdci (HICAS) liší pouze v tom, že novější systém je vybaven dynamickou kompenzací úhlu směrové úchyly těžiště vozidla (úhel mezi vektorem rychlosti těžiště vozidla a podélnou osou vozidla).



Obrázek 13 Systém SUPERHICAS ve vozidle Nissan 240 SX [14]

Hlavní nevýhodou tohoto systému bylo, že vyžadoval naprosto odlišnou techniku jízdy. Vozidlo se snažilo regulovat pomocí natočení zadních kol stáčení vozidla, tudíž automobil nedával při bočním smyku potřebnou odezvu. V případě ztráty trakce zadních kol při průjezdu zatáčkou se řízení takového automobilu stávalo nepředvídatelným. Změna přišla až v GT-R R34, kde byla přidána sada zatáčkových řad do řídicí jednotky pro optimalizaci natáčení zadních kol. Celý systém byl pro tuto generaci SUPERHICAS odladěn na Nürburgringu. [12]

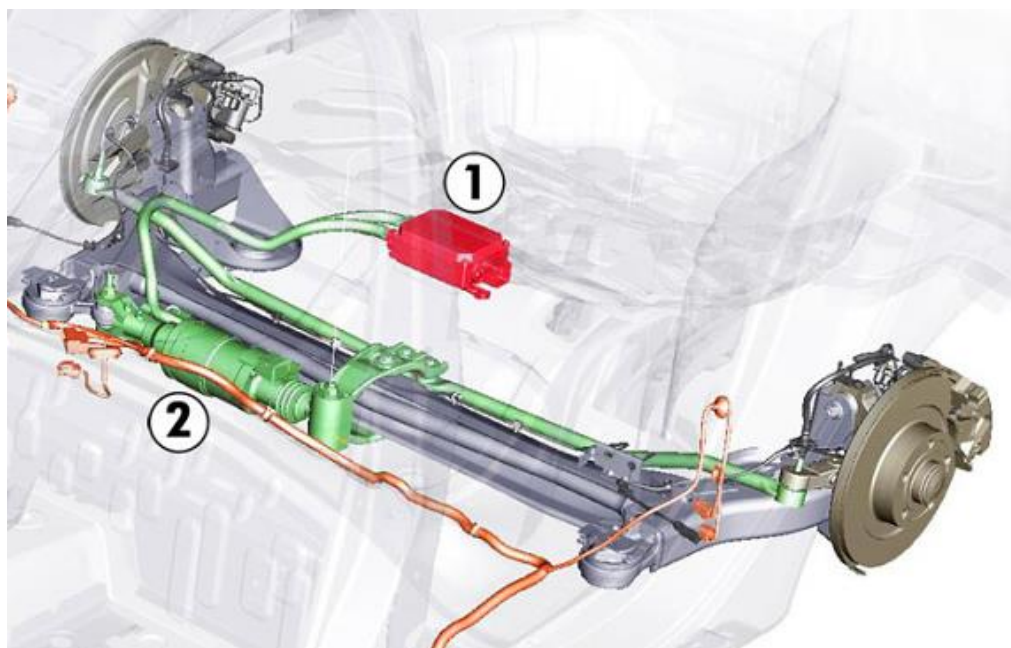
2.3. Elektromechanické provedení řízení kol zadní nápravy

Jedná se o dnes nejpoužívanější řešení systému 4WS. Hlavní výhodou oproti elektrohydraulickému systému je, že zde nejsou užity vysokotlaké čerpadlo a vysokotlaký okruh vedení oleje. Elektrohydraulické systémy vykazovaly vysoké nároky na těsnost soustavy a docházelo k defektům na vedení tlakového oleje.

2.3.1. Systém Active Drive (Renault)

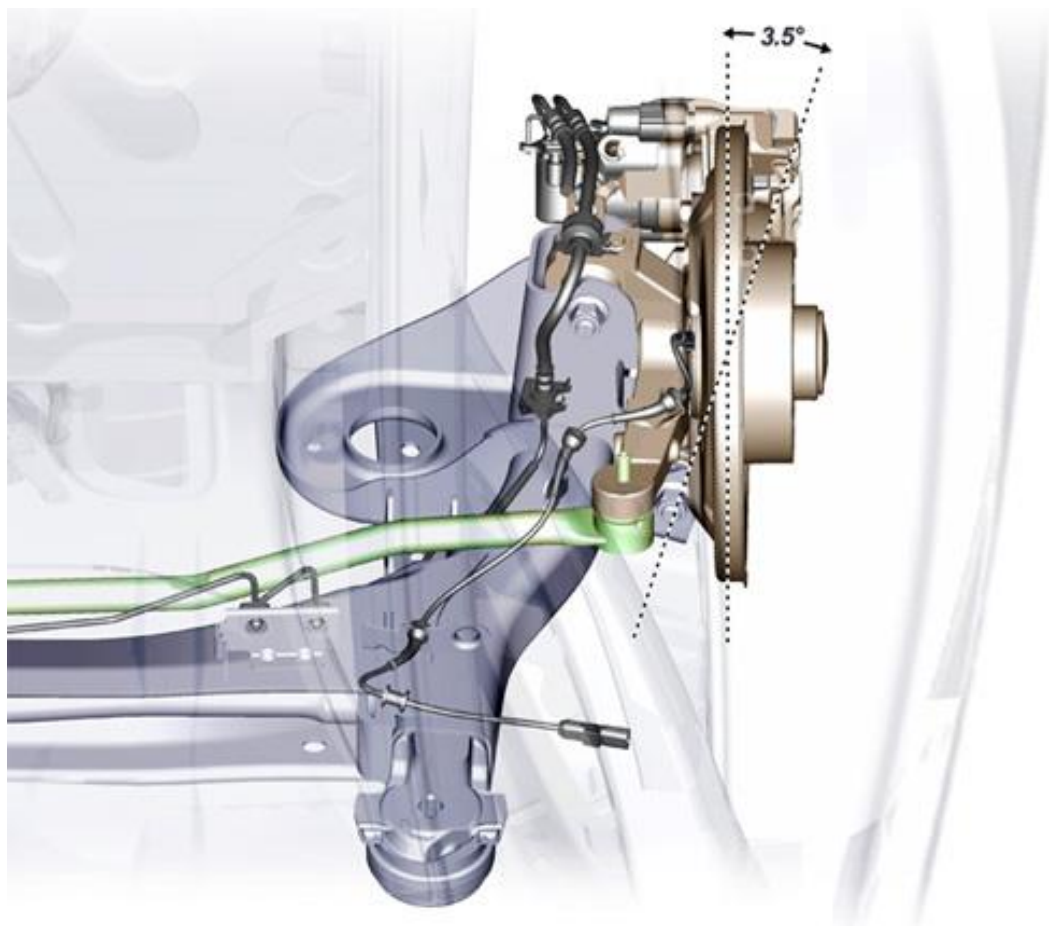
Mezi přední výrobce elektromechanického natáčení zadních kol patří automobilka Renault. V roce 2008 se jejich nový systém Active Drive poprvé dostal do sériové výroby. Jako vůbec první automobil od Renaultu se systémem 4WS byla Laguna Coupé. Systém 4WS vznikl spoluprací automobilky Renault a její sportovní divize Renault Sport Technologies. V průběhu let se systém dodával do Laguny, ale také například Méganu RS. V roce 2015 přišla nová vlajková loď Renaultu se systémem Active Drive Renault Talisman.

Celý systém používá informace od řídicí jednotky stabilizačního systému ESP. Jako nejdůležitější údaje jsou vyhodnocovány: úhel natočení volantu a dopředná rychlost vozidla. Podle úhlu natočení volantu a dopředné rychlosti vozidla řídicí jednotka vyhodnotí, o jaký úhel je zadní kola třeba natočit. Řídicí jednotka pošle signál do elektromotoru umístěného na zadní nápravě, který za pomoci spojovacích tyčí řízení natáčí zadní kola.



Obrázek 14 Zadní náprava Renaultu Laguna Active Drive 1.Řídicí jednotka; 2.Elektromotor pro natáčení zadních kol [15]

Nejdůležitějším prvkem celého systému je řídicí jednotka a elektromotor pro natáčení zadních kol. Toto vybavení dodala pro Renault japonská firma Aisin, která má se systémy 4WS bohaté zkušenosti. Pozice zadních kol se mění každých 10ms. Jak tomu již bylo u všech předchozích systémů, zadní kola se natáčí jak stejnosměrně, tak protisměrně vůči těm předním. Pro lepší manévrovatelnost s vozidlem, se do rychlosti 60 km/h zadní kola natáčejí nesouhlasně. Poloměr zatáčení Laguny GT je pak přibližně stejný jako poloměr zatáčení Clia s mnohem menším rozvorem. Při vyšších rychlostech se však zadní kola natáčí souhlasně vůči předním, čímž se výrazně zvyšuje stabilita vozidla. Maximální úhel natočení zadních kol je pro většinu jízdních situací volen řídicí jednotkou do 2° , avšak maximální možný úhel vychýlení zadních kol systému Active Drive je $3,5^\circ$. V neposlední řadě je nutno podotknout, že Renault sportovní auta prostě umí. Renault Mégane RS 265 Trophy byl držitelem nejrychlejšího času v kategorii automobilů s předním pohonem na severní smyčce Nürburgringu v roce 2014. [15]



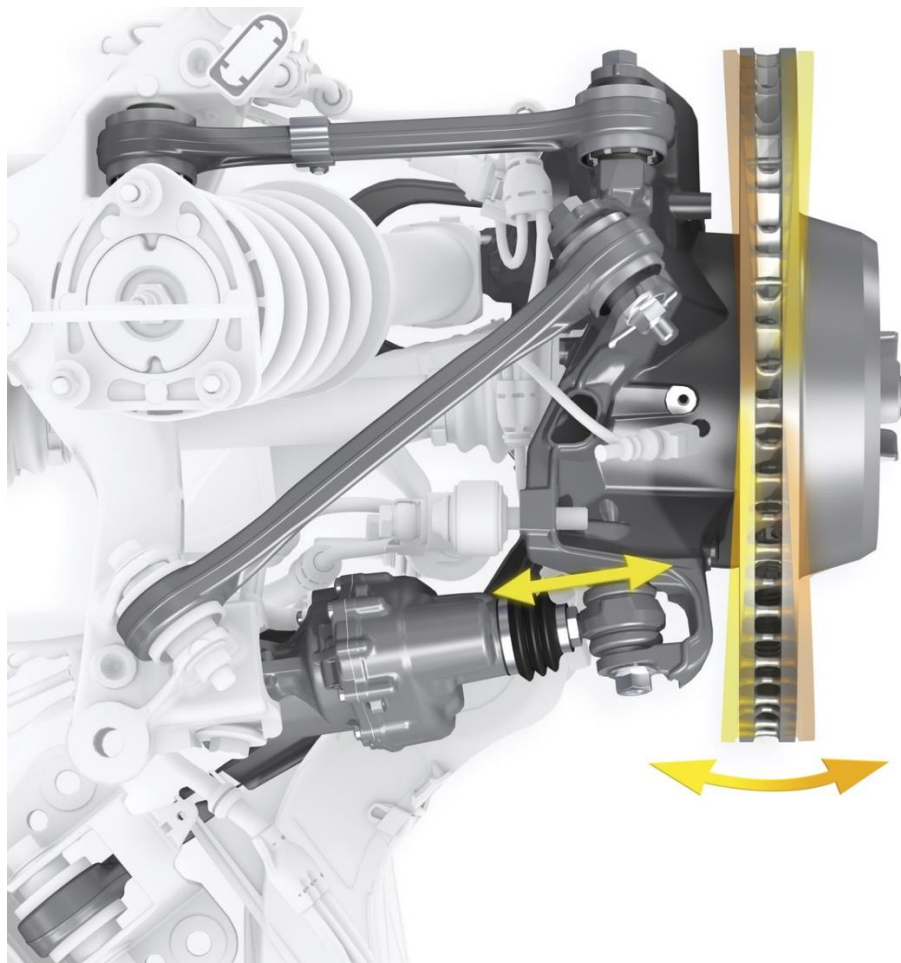
Obrázek 15 Detail zadní nápravy Renaultu Laguna s Active Drive [15]

2.3.2. Systém Porsche

Jako první automobil značky Porsche s aktivním natáčením zadních kol se stal Porsche 918 Spyder. Dále se pak systém montoval do Porsche 911 generace 991 GT3 a Turbo. Automobily značky Porsche 911, s motory za zadní nápravou, mají nedostatečnou radiální reakci na přední nápravě, tudíž se při nízké adhezi zhoršuje říditelnost. Aby se zvýšila radiální reakce na předních kolech, byl u generace 991 zvětšen rozvor kol, avšak při použití většího rozvoru kol se zvětšuje poloměr zatáčení, což je pro sportovní automobil nevhodné, tudíž se jako nejvhodnější řešení pro zlepšení manévrovatelnosti a příčné stability jevil nápad s aktivním řízením zadních kol, které poloměr zatáčení přímo ovlivňuje.

Při rychlostech do 50 km/h se zadní kola natáčí nesouhlasně vůči předním, maximální úhel vychýlení zadního kola v tomto případě činí $2,8^\circ$.

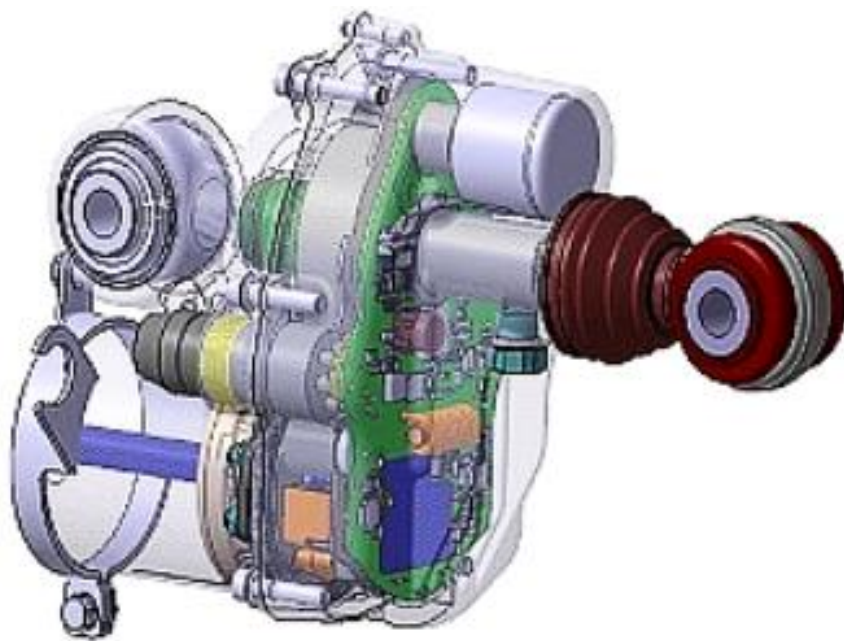
Nad 80 km/h se zadní kola natáčí souhlasně vůči předním. Maximální natočení zadních kol v tomto směru je $1,5^\circ$. [16]



Obrázek 16 Část zadní nápravy vozu Porsche se systémem 4WS při pohledu shora [16]

System 4WS automobilky Porsche je odlišný oproti konkurenci. Při návrhu systému 4WS byli inženýři limitováni malými rozměry, jelikož mezi zadními koly se nachází motor s převodovkou. Jako další problém lze zmínit vysoké tepelné zatížení od brzd a výfukového potrubí. Z těchto důvodů musí být mechanismus řízení zadních kol malý a musí vzdorovat vysokému tepelnému namáhání. V neposlední řadě hraje u sportovního automobilu roli hmotnost. Hmotnost celého systému 4WS Porsche je pouhých 7 kilogramů.

Spojovací tyče řízení zadní nápravy byly nahrazeny dvojicí elektromechanických jednotek, kdy tato kompaktní jednotka v sobě ukrývá elektromotor a současně i řídicí jednotku systému a mechanický převod pro řízení zadních kol. Porsche tyto jednotky nazývá jako aktuátory. Aktuátor mění svůj zdvih od 1 mm až po – 13,5 mm, čímž natáčí zadní kola. Řídící jednotky jsou mezi sebou propojeny a ovládány pomocí sběrnice P-CAN. Pro bezpečnost posádky se při poruše systému natáčení zadních kol celý systém 4WS zablokuje. [17]



Obrázek 17 Elektromechanická jednotka natáčení zadních kol Porsche [17]

2.4. Speciální vozidla se řízením více náprav

2.4.1. Zemědělské stroje

První vyrobené vozidlo se řízením zadní nápravy pocházelo překvapivě z agroprůmyslu. Jednalo se o traktor Caldwell australské výroby. Traktor natáčel zadní kola pouze nesouhlasně vůči předním, což bylo přínosné pro obratnost stroje při práci na polích. Snímek vozidla se datuje k roku 1910. Bohužel počátek výroby Caldwellu není přesně znám, avšak v Austrálii lze tato vozidla stále vídat na výstavách po renovaci ve výborném stavu. [18]



Obrázek 18 Traktor Caldwell první 4WS vozidlo [18]

Na dnešní zemědělské stroje jsou kladeny stále vyšší požadavky týkající se manévrovatelnosti, proto se systémy 4WS s oblibou nadále používají v agrotechnice. Řízení zadních kol je obvykle řešeno pomocí hydraulického převodu. Systém natáčení zadních kol není u zemědělské techniky tak sofistikovaný jako v automobilech. Ve většině případů si zde řidič volí, zda - li se zadní kola budou natáčet souhlasně, nebo nesouhlasně vůči kolům předním.



Obrázek 19 John Deere X304 [19]

2.4.2. Stavební stroje

Pro stavební stroje je obzvláště důležitá jejich manévrovatelnost. Například při nakládání materiálu, nebo při práci s těžkými břemeny. Proto jsou systémem 4WS vybaveny například bagry a kolové nakladače. Opět je volba režimu natáčení zadních kol ponechána na řidiči. Natáčet zadní kola dle algoritmu, který vyhodnocuje natočení volantu a dopřednou rychlost jako u automobilů, je zde zcela nevhodné.



Obrázek 20 Rypadlonakladač Venieri [20]

2.4.3. Rozměrná nákladní vozidla

Jako další vozidla, u kterých je realizováno zatáčení více nápravami jsou rozměrná nákladní vozidla, pro které je manévrování velmi složité, například při průjezdu kruhovým objezdem o malém poloměru. V neposlední řadě se zde systém natáčení více náprav užívá pro snížení opotřebení pneumatik. Automobil Tatra z obrázku 21 je typu 6WS. Váží cca 90 tun a jeho výkon dosahuje 1200 koní. Délka tohoto nákladního automobilu je 18 metrů a jedná se o nejdelší nákladní automobil vyrobený v Čechách. Poloměr zatáčení dosahuje 30 metrů. [21]



Obrázek 21 Nákladní automobil Tatra [21]

2.4.4. Autobusy

V přepravě osob lze také nalézt vozidla se systémem natačení více náprav. Pro větší přepravní schopnost se autobusy stále prodlužují, což je přínosné z hlediska přepravní kapacity. Další výhodou je úleva životního prostředí při využití autobusů namísto většího množství osobních automobilů, ve kterých většinou cestuje pouze řidič. Jako problém se u dlouhých autobusů jeví poloměr zatačení, který je za pomoci natačení více náprav minimalizován.



Obrázek 22 Podvozek autobusu Scania 4WS [22]

2.4.5. Monster trucky

Monster trucky se těší velké oblibě převážně v zámoří. Pro nás Evropany je tento sport netradiční. Automobily jezdí v halách přes překážky, nebo přeskakují staré vyřazené osobní automobily. Jako základ ke stavbě monster trucku slouží staré americké pick-upy. Tyto karoserie jsou připevněny k rámu s velice účinným pérováním a obrovskými koly.



Obrázek 23 Nejdelší monster truck světa [23]

2.4.6. Terénní automobily

System 4WS se těší oblibě také u terénních automobilů, u kterých je manévrovatelnost v terénu velice důležitá. System 4WS je zde užitečný například k objetí překážky, okolo které konvenční vozidlo 2WS již nedokáže zatočit. Nejvýznamnějším terénním automobilem se stal bezesporu Jeep Hurricane. Hurricane dokáže natáčet zadní kola jak souhlasně, tak nesouhlasně vůči kolům předním. Dokáže natáčet kola nezávisle vůči sobě jak na nápravě, tak mezi sebou vůči nápravám, tudíž se všechna kola natáčí nezávisle na sobě. Do sériové výroby se Hurricane bohužel nedostal, avšak koncept to byl velice zdařilý. [24]



Obrázek 24 Jeep Hurricane [24]

2.4.7. Vícenápravové přívěsy

Řízení více náprav je nezbytně nutné především pro velmi dlouhé nákladní soupravy, které slouží pro dopravu nadměrných nákladů. Tento systém je důležitý například při zjednodušení najíždění k vykládacímu stání nebo při průjezdu koridorem. Dále je systém přínosný ekonomicky, jelikož snižuje opotřebení pneumatik, jejichž pořízení je nákladné.



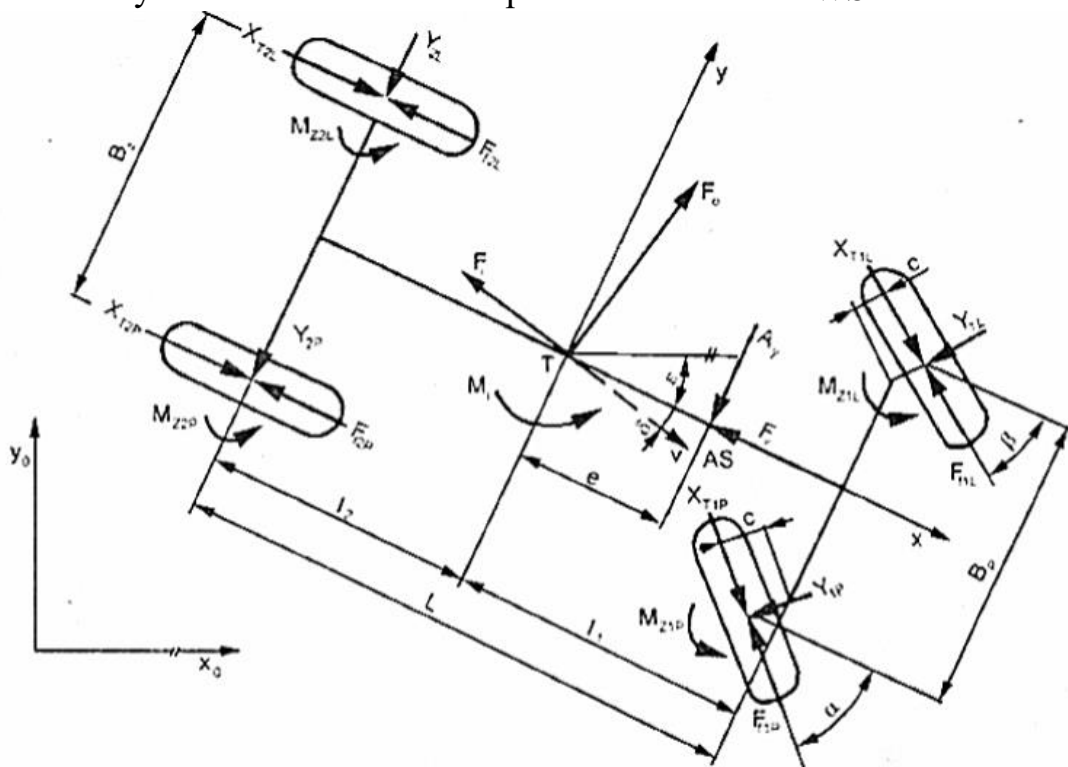
Obrázek 25 Natočení přívěsu tahače [25]

3. Ideový výpočet pólu otáčení u 4WS vozidla

3.1. Řízení směru jízdy rejdovnými koly dvounápravových vozidel

“Chceme-li, aby při zatáčení dvounápravového vozidla docházelo k ideálnímu odvalování kol, musí vektory rychlostí pohybu kol opět ležet ve středních rovinách rotace kol. K tomu dojde v případě, že se osy rotace všech vozidlových kol protínají na ose, okolo které vozidlo zatáčí.“ (cit. dle VALA, TESAŘ, 2003, s. 126)

3.2. Rovinný model zatáčení dvounápravového vozidla 2WS



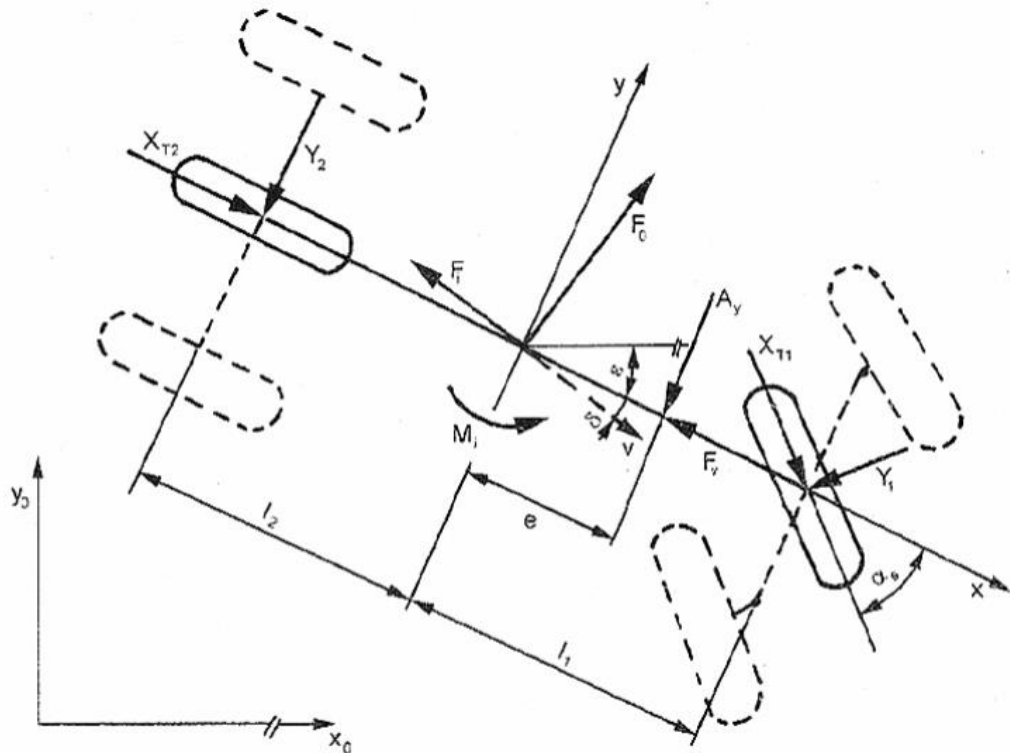
Obrázek 26 Rovinný model dvounápravového vozidla [1]

Na kolech působí tečné hnací síly X_T , odpory valení F_f , boční síly Y a vratné momenty pneumatik M_z .

V aerodynamickém středu vozidla působí odpor vzduchu F_V a příčná aerodynamická síla A_y . Dále ještě v těžišti působí setrvačná a odstředivá síla F_i a F_0 . Vychýlení z požadovaného směru jízdy je vyjadřováno úhlem ε . Proti stáčení vozidla působí setrvačný moment M_i .

Pro snazší pochopení problematiky lze celý model zjednodušit do dílčích modelů. Pro vyšetření říditelnosti lze s výhodou využít jednostopý model.

3.3. Jednostopý model zatáčení dvounápravového vozidla 2WS



Obrázek 27 Jednostopý rovinný model dvounápravového vozidla [1]

$$\sum F_x = 0; -F_i \cdot \cos(\delta) + F_0 \cdot \sin(\delta) - Y_1 \cdot \sin(\alpha_s) + X_{T1} \cdot \cos(\alpha_s) + X_{T2} - F_V = 0 \quad (5)$$

$$\sum F_y = 0; F_i \cdot \sin(\delta) + F_0 \cdot \cos(\delta) - Y_1 \cdot \cos(\alpha_s) - X_{T1} \cdot \sin(\alpha_s) + Y_2 - A_Y = 0 \quad (6)$$

$$\sum M_Z = 0; M_i - Y_1 \cdot l_1 \cdot \cos(\alpha_s) + Y_2 \cdot l_2 - X_{T1} \cdot l_1 \cdot \sin(\alpha_s) - A_Y \cdot e = 0 \quad (7)$$

Pro malé hodnoty úhlů α_s a δ za pomoci linearizace soustavy rovnic (5-7) dostaneme zjednodušenou soustavu rovnic. To znamená dosazením úhlů α_s a δ přibližně rovných nule.

$$-F_i + X_{T1} + X_{T2} - F_V = 0 \quad (8)$$

$$F_0 - Y_1 - Y_2 - A_Y = 0 \quad (9)$$

$$M_i - Y_1 \cdot l_1 + Y_2 \cdot l_2 - A_Y \cdot e = 0 \quad (10)$$

Kde:

F_i - setrvačná síla [N],

F_o - odstředivá síla [N],

Výsledná rychlost předního kola v_1 je dána vektorovým součtem rychlosti těžiště v a rychlosti středu otáčení středu přední nápravy vzhledem k těžišti.

Pro malé úhly platí vztahy:

$$\delta_1 = \alpha_s - \delta - \frac{l_1}{v} \cdot \dot{\epsilon} \quad (13)$$

$$\delta_2 = \frac{l_2}{v} \cdot \dot{\epsilon} - \delta \quad (14)$$

Kde:

δ_1 - směrová úchylka přední nápravy [°],

α_s - střední úhel natočení kol [°],

δ - směrová úchylka těžiště [°],

v - rychlost [m/s],

$\dot{\epsilon}$ - stáčivá rychlost [deg/s],

l_1 - vzdálenost přední nápravy od těžiště [m],

l_2 - vzdálenost zadní nápravy od těžiště [m].

Vyjádří se známé setrvačné momenty:

$$F_i = m \cdot a \quad (15)$$

$$M_i = I_z \cdot \ddot{\epsilon} \quad (16)$$

$$F_o = m \cdot \frac{v^2}{R_s} \quad (17)$$

Kde:

F_i - setrvačná síla [N],

m - hmotnost vozidla [kg],

a - zrychlení vozidla [m/s²],

M_i - setrvačný moment [N/m],

$\ddot{\epsilon}$ - stáčivé zrychlení [deg/s²],

I_z - moment setrvačnosti [kg·m²],

F_o - odstředivá síla [N],

R_s - poloměr zakřivení dráhy těžiště [m].

R_s je okamžitý poloměr zakřivení dráhy těžiště. Tento poloměr není známý, tudíž je nutné vyjádřit dostředivé zrychlení za pomoci rychlosti těžiště a úhlové rychlosti stáčení:

$$F_o = m \cdot v(\dot{\epsilon} + \dot{\delta}) \quad (18)$$

Kde:

$\dot{\delta}$ - úhlová rychlost stáčení [deg/s].

Po dosazení do zlinearizované soustavy rovnic rovnováhy rovinného modelu (8-10) dvounápravového vozidla vznikne soustava rovnic:

$$-m \cdot a + X_{T1} + X_{T2} - F_V = 0 \quad (19)$$

$$m \cdot v(\dot{\varepsilon} + \dot{\delta}) - k_1 \left(\alpha_s - \delta - \frac{l_1}{v} \cdot \dot{\varepsilon} \right) - k_2 \left(\frac{l_2}{v} \cdot \dot{\varepsilon} - \delta \right) - A_Y = 0 \quad (20)$$

$$I_z \cdot \ddot{\varepsilon} - k_1 \cdot l_1 \left(\alpha_s - \delta - \frac{l_1}{v} \cdot \dot{\varepsilon} \right) + k_2 \cdot l_2 \left(\frac{l_2}{v} \cdot \dot{\varepsilon} - \delta \right) - A_Y \cdot e = 0 \quad (21)$$

Pro řidiče není střední úhel natočení kol důležitý. Dále se již v rovnicích bude uvažovat úhel natočení volantu β_v , kterým řidič přímo ovládá vozidlo. Dalším předpokladem je absolutně tuhé řízení a znalost převodu řízení $i_{\ddot{r}}$. [1]

$$\alpha_s = \frac{\beta_v}{i_{\ddot{r}}} \quad (22)$$

Dále bude vyšetřována jízda konstantní rychlostí ($a=0$), poté přejde soustava rovnic (19-21) při použití úhlu natočení volantu a úpravě v soustavu dvou rovnic, které popisují vybočování vozidla a rotaci vozidla kolem svislé osy.

$$m \cdot v \cdot \dot{\delta} + \delta(k_1 + k_2) + \frac{\dot{\varepsilon}}{v} [m \cdot v^2 + (k_1 \cdot l_1 - k_2 \cdot l_2)] = k_1 \frac{\beta_v}{i_{\ddot{r}}} + A_Y \quad (23)$$

$$I_z \cdot \ddot{\varepsilon} + \delta(k_1 \cdot l_1 - k_2 \cdot l_2) + \frac{\dot{\varepsilon}}{v} (k_1 \cdot l_1^2 - k_2 \cdot l_2^2) = k_1 \cdot l_1 \frac{\beta_v}{i_{\ddot{r}}} + A_Y \cdot e \quad (24)$$

Dále bude zanedbán vliv proudění okolního vzduchu. Výsledná soustava rovnic popisující pohyb vozidla přejde poté do tvaru:

$$m \cdot v \cdot \dot{\delta} + \delta(k_1 + k_2) + \frac{\dot{\varepsilon}}{v} [m \cdot v^2 + (k_1 \cdot l_1 - k_2 \cdot l_2)] = k_1 \frac{\beta_v}{i_{\ddot{r}}} \quad (24)$$

$$I_z \cdot \ddot{\varepsilon} + \delta(k_1 \cdot l_1 - k_2 \cdot l_2) + \frac{\dot{\varepsilon}}{v} (k_1 \cdot l_1^2 - k_2 \cdot l_2^2) = k_1 \cdot l_1 \frac{\beta_v}{i_{\ddot{r}}} \quad (25)$$

Kde:

α_1 - úhel natočení vnitřního předního kola [°], α_2 - úhel natočení vnitřního zadního kola [°],
 β_1 - úhel natočení vnějšího předního kola [°], β_2 - úhel natočení vnějšího zadního kola [°],
 B_0 - rozteč rejdových čepů [m], L_1 - vzdálenost přední nápravy a pólu [m],
 L_2 - vzdálenost zadní nápravy a pólu [m], R - poloměr zatáčení [m].

Z obrázku 21 je zřetelné, že zadní kola se natáčí protisměrně vůči předním. Tento způsob natočení zadních kol slouží v praxi pro zmenšení poloměru zatáčení. Poté se velikost poloměru zatáčení určí například takto:

$$R = L_1 \cdot \cot(\alpha_1) + \frac{B_0}{2} = L_1 \cdot \cot(\alpha_1) \quad (29)$$

D_1 a D_2 jsou stopové poloměry zatáčení. Dále je důležité znát šířku jízdního pruhu vozidla 4WS s nesouhlasným natočením zadních kol:

$$D_1 = \frac{L}{\sin(\beta_{1 \max})} + 2c \quad (30)$$

$$D_2 = \frac{L}{\sin(\alpha_{1 \max})} + 2c \quad (31)$$

Kde:

D_1 - stopový poloměr zatáčení vnějších kol
[m],

H - šířka jízdní dráhy [m],

D_2 - stopový poloměr zatáčení vnitřních kol
[m],

c - vzdálenost rejdového čepu a středu pneumatiky [m].

$$H = \frac{D_1 - D_2}{2} = \frac{L}{2} \cdot \left(\frac{1}{\sin(\beta_{1 \max})} - \frac{1}{\sin(\alpha_{1 \max})} \right) + 2c \quad (32)$$

Vozidlo 4WS se stejným rozvorem i rozchodem kol potřebuje oproti vozidlu 2WS užší jízdní dráhu při zatáčení. Při nesouhlasném natočení zadních kol se zmenší poloměr zatáčení až o polovinu. [1]

Kde:

F_i - setrvačná síla [N],

Y_1 - boční síla na přední pneumatice [N],

X_{T1} - tečná síla na přední pneumatice [N],

F_V - odpor vzduchu [N],

α - směrová úchylka [°],

β_z - střední úhel natočení zadních kol [°],

M_i - setrvačný moment [N·m],

l_z - vzdálenost těžiště od zadní nápravy [m].

F_o - odstředivá síla [N],

Y_2 - boční síla na zadní pneumatice [N],

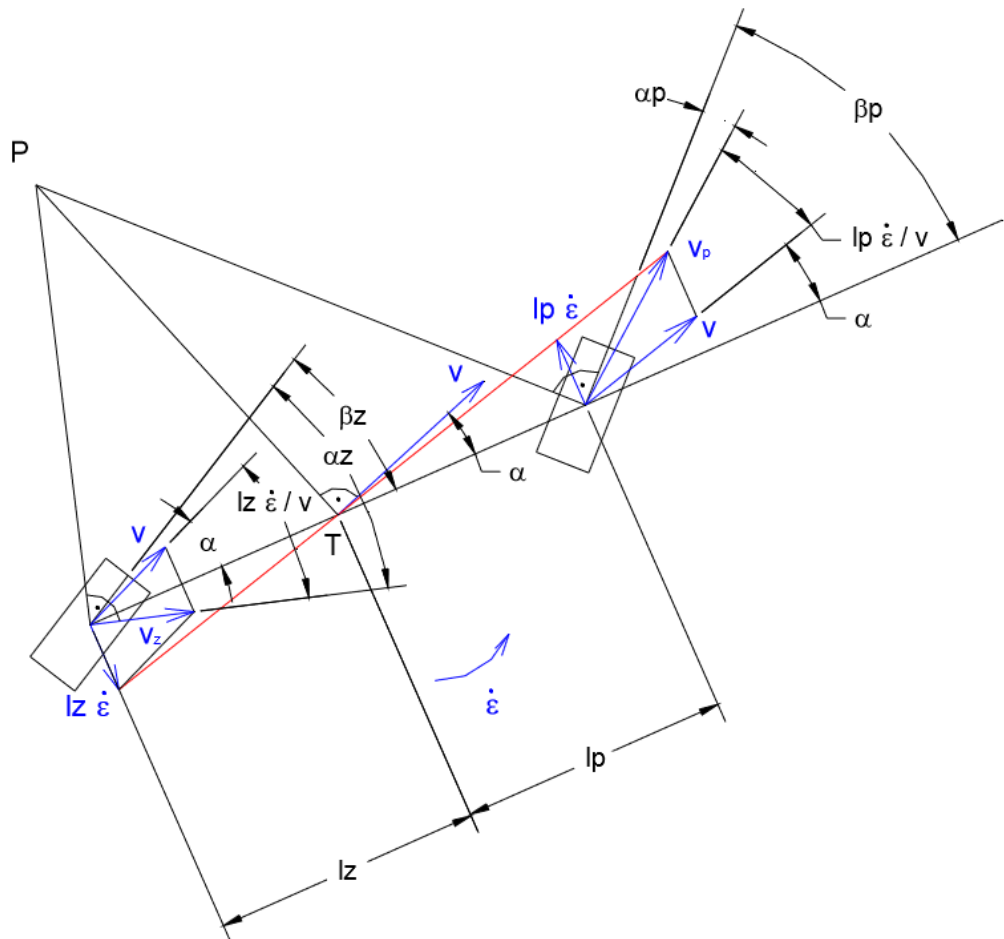
X_{T2} - tečná síla na zadní pneumatice [N],

A_y - příčná aerodynamická síla [N],

β_p - střední úhel natočení předních kol [°],

e - přesazení těžiště od aero-středu [m],

l_p - vzdálenost těžiště od přední nápravy [m].



Obrázek 31 Kinematika zatáčení jednostopého modelu dvounápravového vozidla 4WS [11]

Vozidlo zatáčí kolem bodu P (okamžitého pólu zatáčení). Pro případ z obrázku 31 je pól pohybu oproti vozidlu 2WS posunut v podélném směru blíže k těžišti vozu a v příčném směru se pól posouvá blíže k vozidlu. Ve výsledku má vozidlo 4WS vlivem natáčení zadních kol proměnný poloměr zatáčení.

$$Y_1 = k_1 \cdot \alpha_p \quad (36)$$

$$Y_2 = k_2 \cdot \alpha_z \quad (37)$$

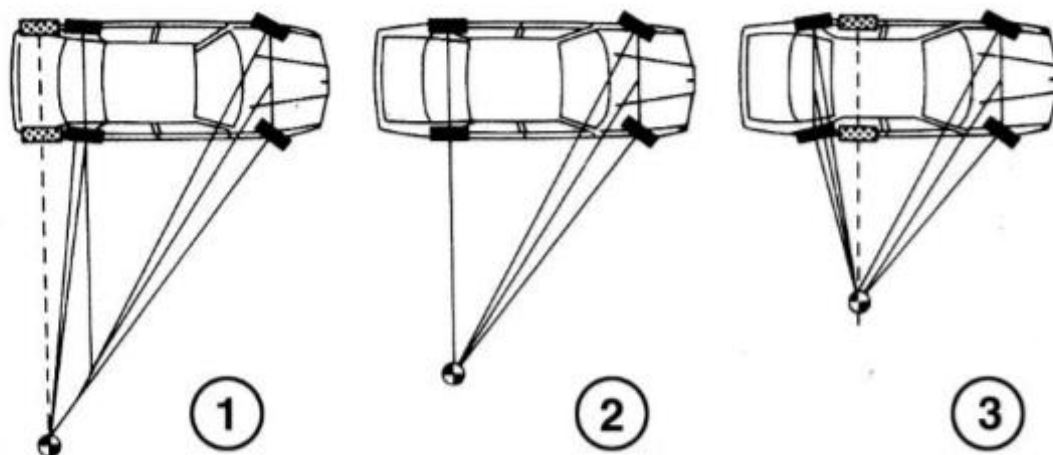
Boční síly na nápravách Y_1 a Y_2 se vypočítají stejně jako u vozidla 2WS. Dále je třeba uvést úhly směrových úchylek pro vozidlo 4WS. Postup výpočtu je opět analogický s vozidlem 2WS. Úhel směrové úchylky kola je definován jako úhel mezi podélnou rovinou kola a směrem pohybu kola. [11] Směrové úchylky pro malé úhly natočení lze vyjádřit jako:

$$\alpha_p = -\alpha - \frac{l_p}{v} \cdot \dot{\epsilon} + \beta_p \quad (38)$$

$$\alpha_z = -\alpha + \frac{l_z}{v} \cdot \dot{\epsilon} + \beta_z \quad (39)$$

Kde:

k_1 - směrová tuhost přední nápravy [N/deg], k_2 - směrová tuhost přední nápravy [N/deg],
 α_p - směrová úchylka přední nápravy [°], α_z - směrová úchylka zadní nápravy [°],
 $\dot{\epsilon}$ - stáčivá rychlost [deg/s], α - směrová úchylka těžiště [°].



Obrázek 33 Okamžité póly zatáčení vozidla [14]

Vozidlo 1 natáčí zadní kola stejnosměrně vůči předním, okamžitý pól zatáčení se posouvá za zadní nápravu. Takto se zvětšuje poloměr zatáčení. Tento systém natočení zadních kol užívají moderní systémy při jízdě vyšší rychlostí, pro zvýšení směrové stability vozidla.

Vozidlo 2 je konvenční vozidlo 2WS. Zadní kola se nemohou natáčet, okamžitý pól zatáčení leží na prodloužené ose zadní nápravy. Tuto koncepci používá většina vozidel. Všechny spojnice od středů kol se musí setkat v jednom bodě (pól zatáčení), jinak se kola při zatáčení nebudou volně odvalovat.

Vozidlo 3 natáčí zadní kola protisměrně vůči předním. Pólová přímka se posouvá před zadní nápravu, tímto jevem je způsobeno zmenšení poloměru zatáčení. Protisměrný systém natočení zadních kol používají moderní vozidla při nízkých rychlostech pro zlepšení obratnosti a manévrovatelnosti. Zadní kola automobilů se natáčí v opačném smyslu než ta přední převážně v městském provozu.

3.6. Aplikace poznatků a výpočet ideového pólu zatáčení experimentálního vozidla

Experimentální vozidlo je odlišné tím, že má oproti vozidlu koncipovanému od výroby jako 4WS dva póly zatáčení. Po odvození vztahů pro ideové vozidlo by nebylo možné tyto vztahy na experimentálním vozidle použít. V dalším textu bude rozlišováno natáčení zadních kol ideového vozidla a experimentálního vozidla.

3.6.1. Základní parametry experimentálního vozidla



Obrázek 34 Experimentální vozidlo DFJP

Experimentální vozidlo slouží k ověřování jízdní stability a realizaci jízdních zkoušek pro Dopravní fakultu Jana Pernera. Základní návrh byl realizován diplomovou prací již v roce 2005. Koncepce vozidla je navržena tak, aby byla hmotnost vozidla rozložena rovnoměrně mezi oběma nápravami. Vozidlo využívá systémy 4WD + 4WS. Přední náprava je převzata z automobilu Škoda Fabia první generace. Jako zadní náprava experimentálního vozidla je použita opět přední náprava z Fabie první generace, tudíž lze natáčet také zadní kola. [26] Pro další výpočty bude třeba znát vybrané parametry experimentálního vozidla. Výčet hlavních rozměrových parametrů se nachází v příloze E.

Tabulka 1 Základní vybrané parametry experimentálního vozidla

Parametr	Označení	Rozměr [mm]
Rozchod předních kol	B_1	1435
Rozchod zadních kol	B_2	1435
Rozvor náprav	L	2580
Rozteč rejdových čepů	B_0	1400

3.6.2. Výpočet převodového poměru řízení

Ve Výukovém a výzkumném centru v dopravě v Doubravících jsem provedl měření velikosti natočení úhlu rejdu kola v závislosti na úhlu natočení volantu. Rozsah měření jsem zvolil od střední polohy volantu až po jeho maximální natočení. Přírůstek úhlu natočení volantu jsem volil 90° pro snadnější určení přírůstku úhlu natočení volantu v průběhu měření. Pro výpočet převodového poměru převodky řízení je třeba znát střední úhel natočení předních rejdových kol.

$$\alpha_s = \frac{\alpha + \beta}{2} \quad (40)$$

Kde:

α_s - střední úhel natočení kol [°],

α - úhel natočení vnitřního kola [°],

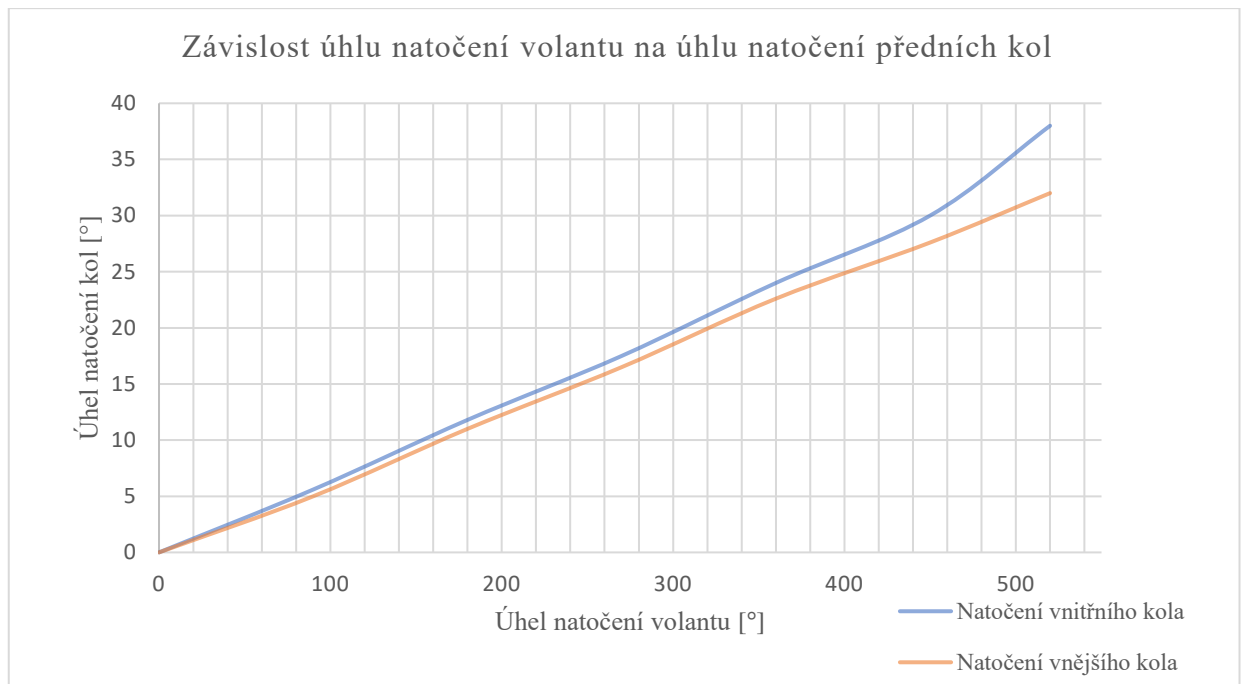
β - úhel natočení vnějšího kola [°].



Obrázek 35 Měření úhlu natočení předních kol experimentálního vozidla

Tabulka 2 Velikost úhlu natočení kol do rejdu v závislosti na úhlu natočení volantu

Úhel natočení volantu [°]	Úhel natočení předních kol [°]		
	Vnitřní kolo	Vnější kolo	Střední úhel
0	0,0	0,0	0,0
90	5,6	5,0	5,3
180	11,8	11,0	11,4
270	17,5	16,5	17,0
360	24,0	22,6	23,3
450	30,0	27,6	28,8
520	38,0	32,0	35,0



Obrázek 36 Závislost natočení vnitřního a vnějšího kola na úhlu natočení volantu

Převodový poměr převodky řízení se určí dle vztahu (22).

$$i_{\tilde{r}} = \frac{\beta_v}{\alpha_s} \quad (41)$$

$$i_{\tilde{r}} = \frac{520}{35}$$

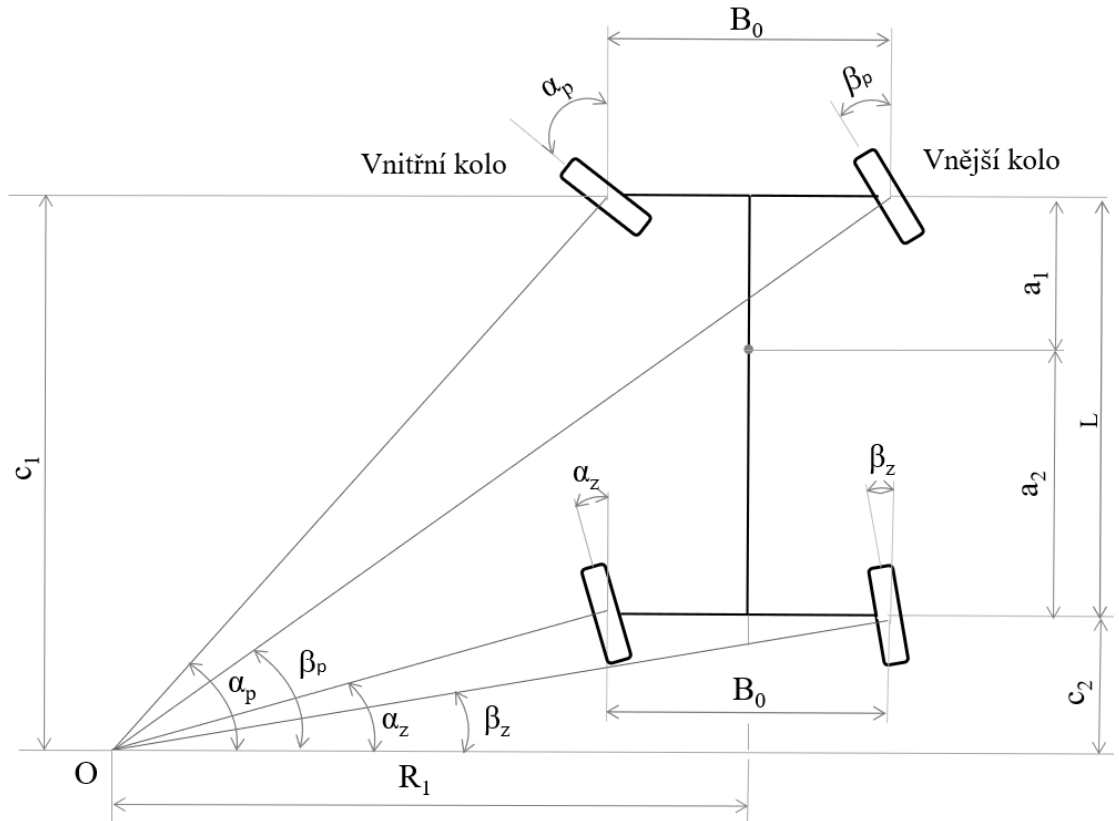
$$i_{\tilde{r}} = 14,857 [1]$$

Kde:

$i_{\tilde{r}}$ - převodový poměr převodky řízení [1], β_v - úhel natočení volantu [°],
 α_s - úhel natočení volantu [°].

Pro vyšetření pólu pohybu experimentálního vozidla bude dále využito předchozích poznatků z této kapitoly.

3.6.3. Odvození vztahů pro výpočet pólu souhlasného natáčení zadních kol vozidla 4WS



Obrázek 37 Výpočtový model souhlasného natáčení zadních kol

$$\tan(\alpha_p) = \frac{c_1}{R_1 - \frac{B_0}{2}} \quad (42)$$

$$\tan(\beta_p) = \frac{c_1}{R_1 + \frac{B_0}{2}} \quad (43)$$

$$\tan(\alpha_z) = \frac{c_2}{R_1 - \frac{B_0}{2}} \quad (44)$$

$$\tan(\beta_z) = \frac{c_2}{R_1 + \frac{B_0}{2}} \quad (45)$$

$$\cot(\beta_p) - \cot(\alpha_p) = \frac{B_0}{c_1} \quad (46)$$

$$\cot(\beta_z) - \cot(\alpha_z) = \frac{B_0}{c_2} \quad (47)$$

$$c_1 - c_2 = L \quad (48)$$

$$\frac{B_0}{\cot(\beta_p) - \cot(\alpha_p)} - \frac{B_0}{\cot(\beta_z) - \cot(\alpha_z)} = L \quad (49)$$

Kde:

α_p - natočení levého předního kola [°],

β_p - natočení pravého předního kola [°],

α_z - natočení levého zadního kola [°],

β_z - natočení pravého zadního kola [°],

R_1 - poloměr zatačení [m],

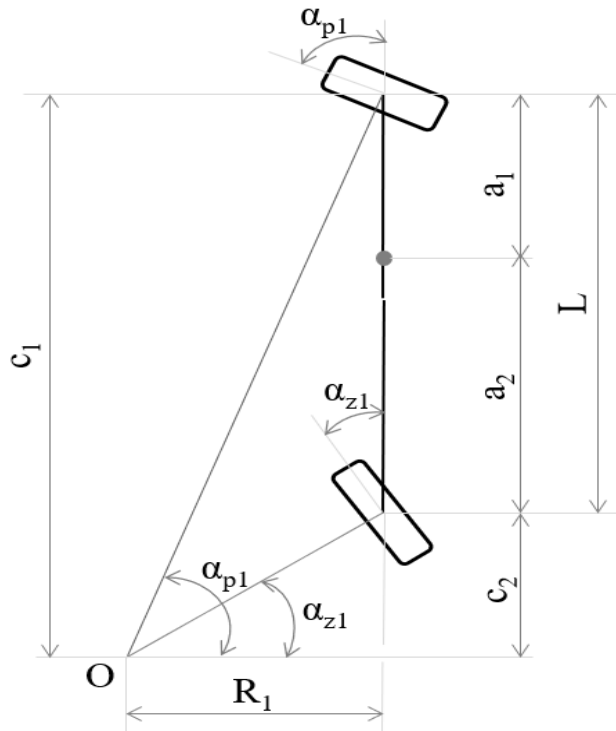
B_0 - vzdálenost rejdových čepů [m],

β_z - natočení zadního vnějšího kola [°],

c_1 - vzdálenost O od přední nápravy [m],

c_2 - vzdálenost O od zadní nápravy [m],

L - rozvor náprav [m].



Obrázek 38 Jednostopý model vozidla 4WS se souhlasným natáčením zadních kol

Pro úplnost je zde uveden i jednostopý model, který je ovšem pro vyšetření pólu pohybu experimentálního vozidla nepřesný. Tento model počítá se středními úhly natočení předních i zadních kol α_{p1} a α_{z1} . Jednostopý model je zde uveden z důvodu lepší přehlednosti a pro snazší výpočet určené polohy vozidla od pólu zatačení R_1 . Například pro vozidla s návěsem se počítá s polohou těžiště a u osobních vozidel se počítá s polohou středu vozidla. Experimentální vozidlo má obě nápravy stejné, proto je rozteč rejdových čepů B_0 stejná pro přední i zadní nápravu.

$$\tan(\alpha_{p1}) = \frac{c_1}{R_1} \quad (50)$$

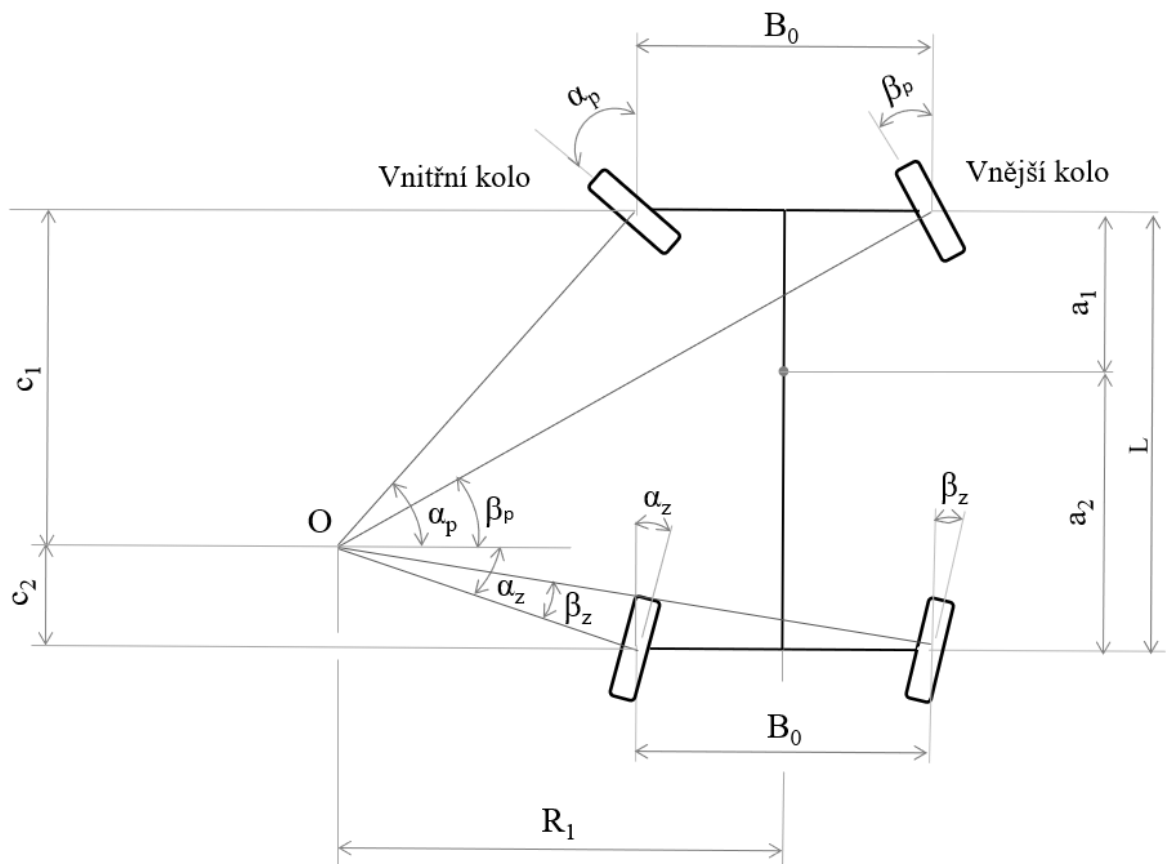
$$\tan(\alpha_{z1}) = \frac{c_2}{R_1} \quad (51)$$

Kde:

α_{p1} - střední úhel natočení předních kol [°], α_{z1} - střední úhel natočení zadních kol [°].

Rovnice (50-51) nejsou užity v programu pro výpočet úhlů natočení kol, jelikož se počítá s úhly natočení jak vnějších, tak vnitřních kol daných náprav. Jednostopý model lze s výhodou využít pro výpočet středních úhlů natočení kol náprav, kdy ze středních úhlů natočení kol dané nápravy lze dopočítat úhly natočení jak vnějšího, tak vnitřního kola dané nápravy. Řešení natočení kol vozidla 4WS pomocí jednostopého modelu může sloužit pro prvotní návrh koncepce řízení, kdy bude znám střední úhel natočení kol dané nápravy. Po vyšetření středních úhlů natočení kol lze dopočítat pól zatáčení vozidla.

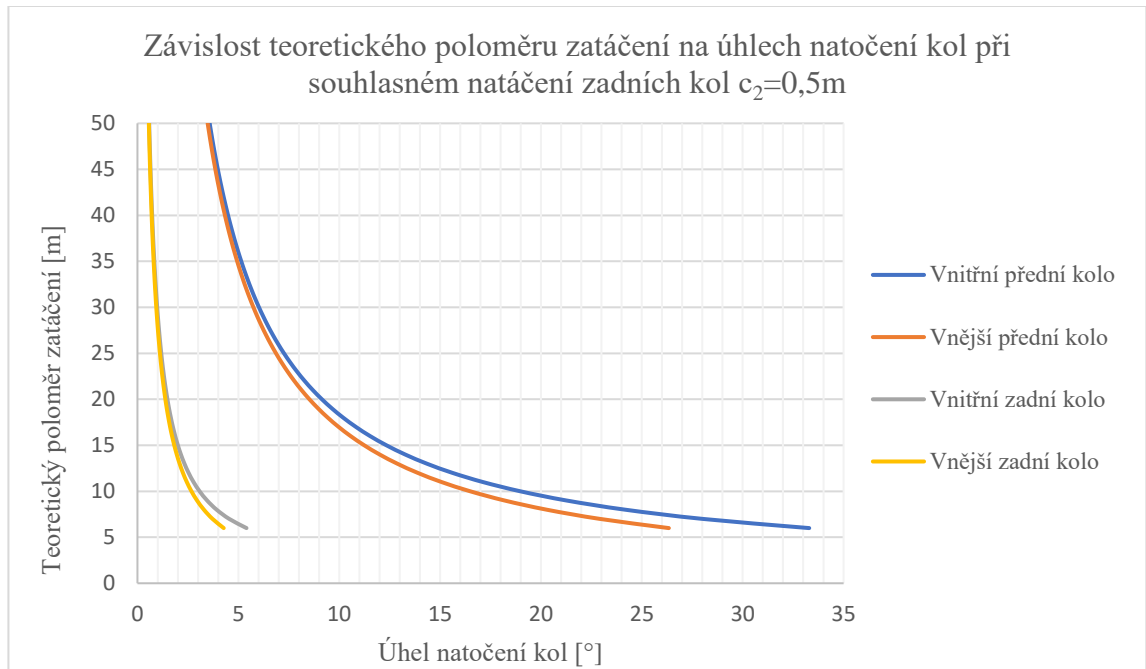
3.6.4. Odvození vztahů pro výpočet pólu nesouhlasného natáčení zadních kol vozidla 4WS



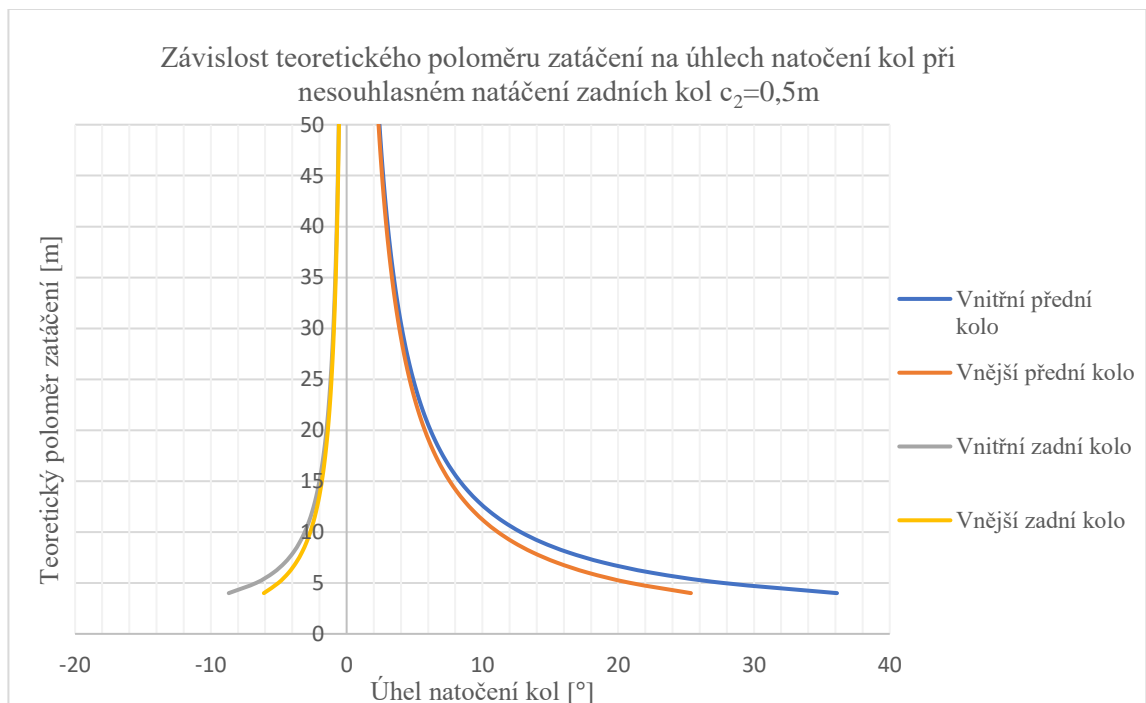
Obrázek 39 Výpočtový model nesouhlasného natáčení zadních kol

Vztahy pro natočení úhlů kol do rejdu jsou analogické se vztahy z předchozí podkapitoly, tudíž výrazy (42-47) z vyjádření pro model se souhlasným natáčením zadních kol platí i pro model s nesouhlasným natáčením kol zadní nápravy. Zbylý výraz (49) je opět analogický, platí též i pro model nesouhlasného natáčení zadních kol. Liší se polohy pólů pohybu, kdy u souhlasného natáčení zadních kol je pól pohybu posunut směrem za vozidlo, což zvětšuje velikost poloměru zatáčení. U modelu nesouhlasného natáčení zadních kol se pól pohybu posunuje směrem do středu vozidla, čímž se poloměr zatáčení zmenšuje.

Na následujících grafech je znázorněna závislost natáčení kol experimentálního vozidla při ideovém výpočtu natáčení kol. Tento výpočtový model by bylo možné uplatnit při kompletní přestavbě převodek řízení experimentálního vozidla, při zachování rozvoru a rozteče rejdových čepů. Pro grafy jsem použil přesazení pólu zatáčení od zadní nápravy o 500 mm.



Obrázek 40 Závislost poloměru zatáčení na úhlech natočení kol při souhlasném natáčení zadních kol



Obrázek 41 Závislost poloměru zatáčení na úhlech natočení kol při nesouhlasném natáčení zadních kol

3.6.5. Sestavení algoritmu pro systém 4WS

Sestavil jsem algoritmus, který vypočítává úhly natočení kol ideálního vozidla 4WS se stejnými rozměrovými parametry, jako jsou použity pro experimentální vozidlo. V programu jsou pevně zadané hodnoty rozvoru náprav L a rozteče rejdových čepů B_0 experimentálního vozidla. V hodnotách zadaných uživatelem pro výpočet úhlů natočení kol se vyskytují proměnné: poloměr zatáčení R a natočení předního vnitřního kola α_p . Vycházím z běžných dopravních situací, z kterých mohou být voleny hodnoty poloměru zatáčení R , který by měl ležet v intervalu od 4 m do 50 m. Natočení předního vnitřního kola α_p by mělo být ze škály od 0° po 38° , jelikož tento maximálního úhel natočení vnitřního kola jsem naměřil na experimentálním vozidle. Program dále vypočte hodnoty: přesazení pólu zatáčení od přední nápravy c_1 , přesazení pólu zatáčení od zadní nápravy c_2 , natočení vnějšího předního kola β_p , střední úhel natočení předních kol α_s , natočení vnitřního zadního kola α_z a natočení vnějšího zadního kola β_z .

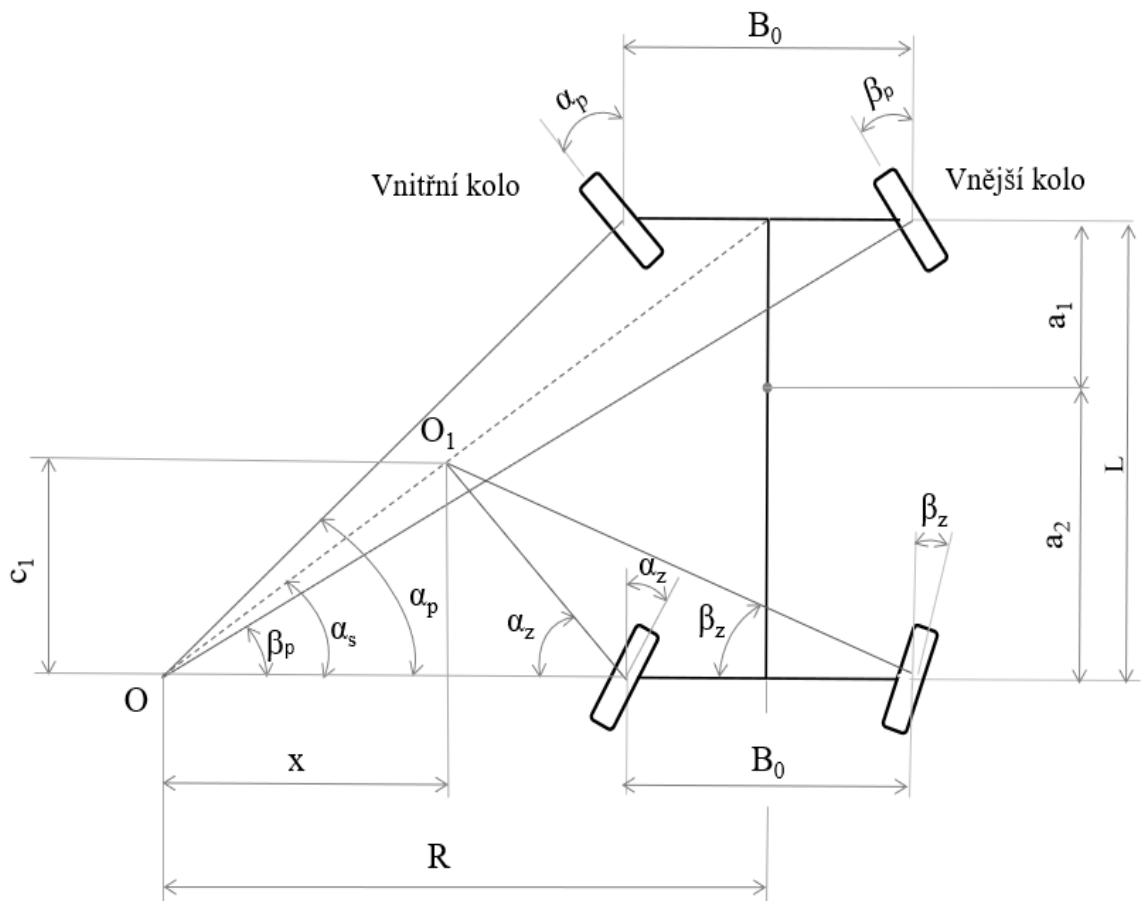
Program vypočte přesazení pólu zatáčení od přední nápravy c_1 za pomoci upravené rovnice (42), dále dopočte rozměr přesazení pólu zatáčení od zadní nápravy pomocí rovnice (48). Natočení předního vnějšího kola je ve výpočtu realizováno pomocí rovnice (43). Střední úhel natočení předních kol je vypočten dle rovnice (43). Úhly natočení zadního vnitřního a zadního vnějšího kola jsou vypočteny dle rovnic (44-45).

Tabulka 3 Program pro výpočet úhlů natočení kol ideového vozidla 4WS

Hodnoty zadané uživatelem			
Poloměr zatáčení	4	[m]	Zadaný poloměr zatáčení vyhovuje.
Natočení předního vnitřního kola	35	[deg]	Úhel natočení kola lze použít.
Algoritmem vypočtené hodnoty			
Přesazení pólu zatáčení od přední nápravy	2,3	[m]	Souhlasné natočení
Přesazení pólu zatáčení od zadní nápravy	0,3	[m]	
Natočení předního vnějšího kola	26,1	[deg]	
Střední úhel natočení předních kol	30,6	[deg]	
Natočení vnitřního zadního kola	4,7	[deg]	
Natočení vnějšího zadního kola	3,3	[deg]	
Rozměry experimentálního vozidla			
Rozteč rejdových čepů	1,4	[m]	
Rozvor náprav	2,58	[m]	

3.6.6. Sestavení rovnic a algoritmu pro výpočet ideového pólu zatáčení experimentálního vozidla

Pro vozidla, která jsou od počátku navrhována jako 4WS, lze použít předchozí rovnice (42-49), kdy přední převodka řízení je konstruována dle předchozích rovnic. Jiná situace ovšem nastává u mnou navrhovaného systému 4WS pro experimentální vozidlo Dopravní fakulty. Experimentální vozidlo je ojedinělé, jelikož má pro každou nápravu vlastní pól zatáčení. Pól zatáčení přední nápravy leží na prodloužené ose zadní nápravy. Poloha pólu zatáčení zadní nápravy se pohybuje po přímce. Jak již bylo zmíněno, vozidlo používá lichoběžník řízení z první generace Škody Fabia vpředu i vzadu. Pro natáčení zadních kol je lichoběžník řízení přední nápravy nevyhovující, tudíž zde bude uvažováno s na sobě nezávislým natáčením zadních kol, kdy se bude každé kolo natáčet dle algoritmem vypočtených úhlů. Každá náprava bude mít svůj pól otáčení, přední náprava bod O , zadní náprava bod O_1 . Umístění pólu otáčení zadní nápravy budu uvažovat ve středu spojnic mezi pólem otáčení přední nápravy a rejdových čepů předních kol. Jedná se o spojnici pólu otáčení přední nápravy a středu přední nápravy.



Obrázek 42 Schéma zatáčení experimentálního vozidla 4WS

Pro natáčení kol přední nápravy platí vztahy jako pro vozidlo 2WS. Do algoritmu je zadáván úhel natočení předního vnitřního kola α_p , poloměr zatáčení R , dopředná rychlost v a rozměr přesazení pólu zatáčení od zadní nápravy c_1 . Pro natočení vnějšího předního kola v závislosti na natočení vnitřního předního kola platí vztah (3). Pro střední úhel natočení předních kol platí vztah (40). Dále lze uvažovat, že pól otáčení zadní nápravy bude ležet na spojnici středu přední nápravy a pólu otáčení přední nápravy O . Tato spojnice je skloněna o úhel α_s , který odpovídá střednímu natočení předních kol. Pro přesné určení středu otáčení zadní nápravy je třeba ještě znát rozměr přesazení pólu zatáčení od zadní nápravy c_1 . Pro natočení zadních kol budou platit vztahy:

$$x = \frac{c_1}{\tan(\alpha_s)} \quad (52)$$

$$\tan(\alpha_z) = \frac{c_1}{R - x - \frac{B_0}{2}} \quad (53)$$

$$\tan(\beta_z) = \frac{c_1}{R - x + \frac{B_0}{2}} \quad (54)$$

Kde:

x - odsazení pólů zatáčení [m],

c_1 - vzdálenost O_1 od zadní nápravy [m],

α_s - střední úhel natočení předních kol [°],

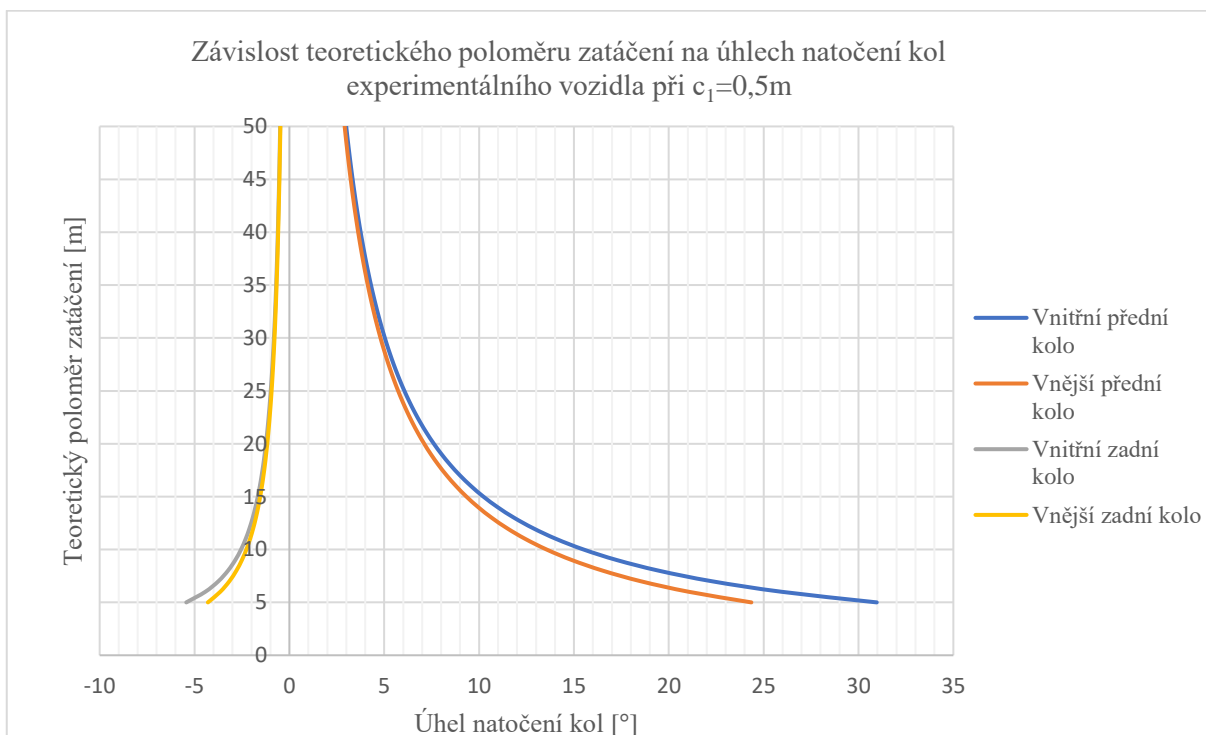
B_0 - vzdálenost rejdových čepů [m],

R - poloměr zatáčení [m],

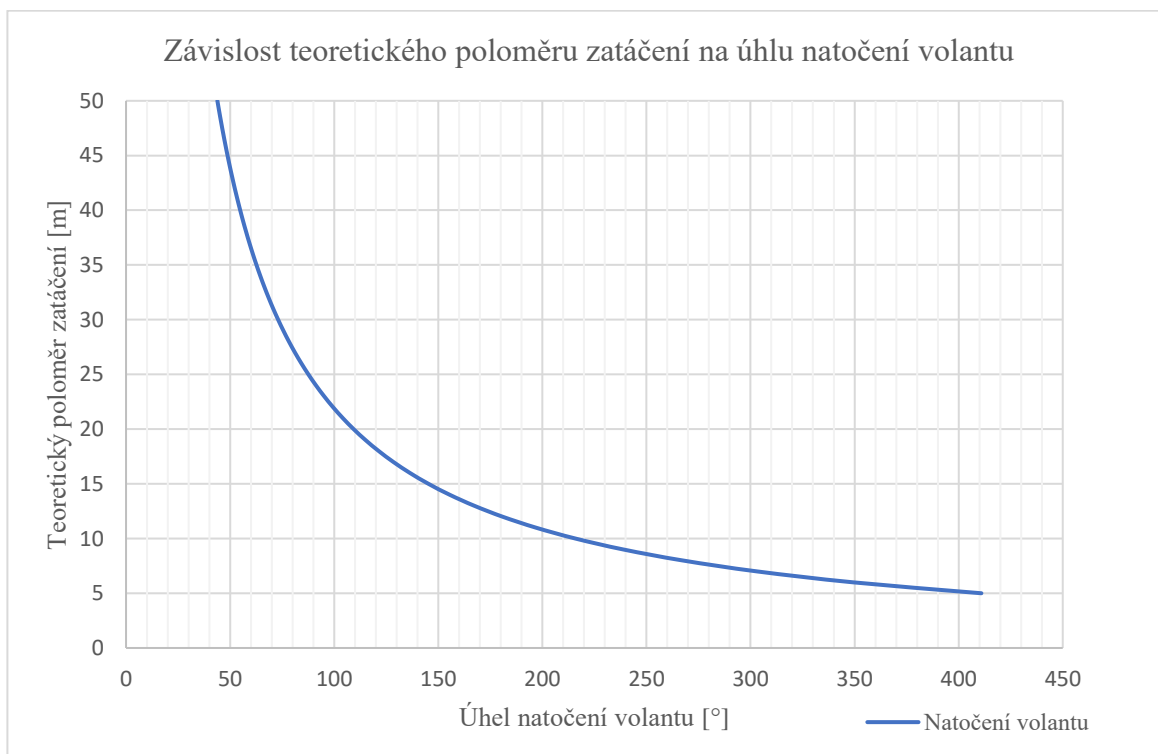
α_z - natočení zadního vnitřního kola [°],

β_z - natočení zadního vnějšího kola [°].

Pro kompletnost je uvedena závislost natáčení zadních kol experimentálního vozidla na teoretickém poloměru zatáčení, při přesazení pólu zatáčení zadních kol od zadní nápravy $c_1 = 0,5\text{m}$. Pro tuto závislost bylo použito rovnic (52-54) odvozených přímo pro experimentální vozidlo.



Obrázek 43 Závislost úhlu natočení kol na teoretickém poloměru zatáčení



Obrázek 44 Závislost úhlu natočení volantu na teoretickém poloměru zatáčení

Pro řidiče je v praxi důležitější závislost teoretického poloměru zatáčení na úhlu natočení volantu, kterým vozidlo přímo ovládá. Experimentální vozidlo po úpravě bude natáčet zadní kola v závislosti na předních kolech, tudíž je v této závislosti zahrnuto natáčení kol přední a zároveň zadní nápravy.

V algoritmu pro určení úhlů natočení kol experimentálního vozidla jsou pevně zadány hodnoty rozvoru náprav L a rozteče rejdových čepů B_0 . V hodnotách zadaných uživatelem pro výpočet úhlů natočení kol se vyskytují proměnné: poloměr zatáčení R , který by neměl přesahovat 50m a natočení předního vnitřního kola α_p , které by mělo být maximálně 38° , jelikož tento maximálního úhel natočení vnitřního kola byl naměřen. Mezi další hodnoty zadané uživatelem patří přesazení pólu zatáčení od zadní nápravy c_1 a rychlost dopředného pohybu vozidla v , dle které se má řídit natočení zadních kol buď do souhlasného nebo nesouhlasného směru vůči kolům předním. Nutno podotknout, že v praxi se zadní kola experimentálního vozidla budou natáčet výhradně do nesouhlasného směru vůči kolům přední nápravy. Následně program vypočte hodnoty: natočení předního vnějšího kola β_p , střední úhel natočení předních kol α_s , natočení vnitřního zadního kola α_z , natočení vnějšího zadního kola β_z , vzdálenost pólu zatáčení vozidla 2WS a ideového pólu experimentálního vozidla 4WS x .

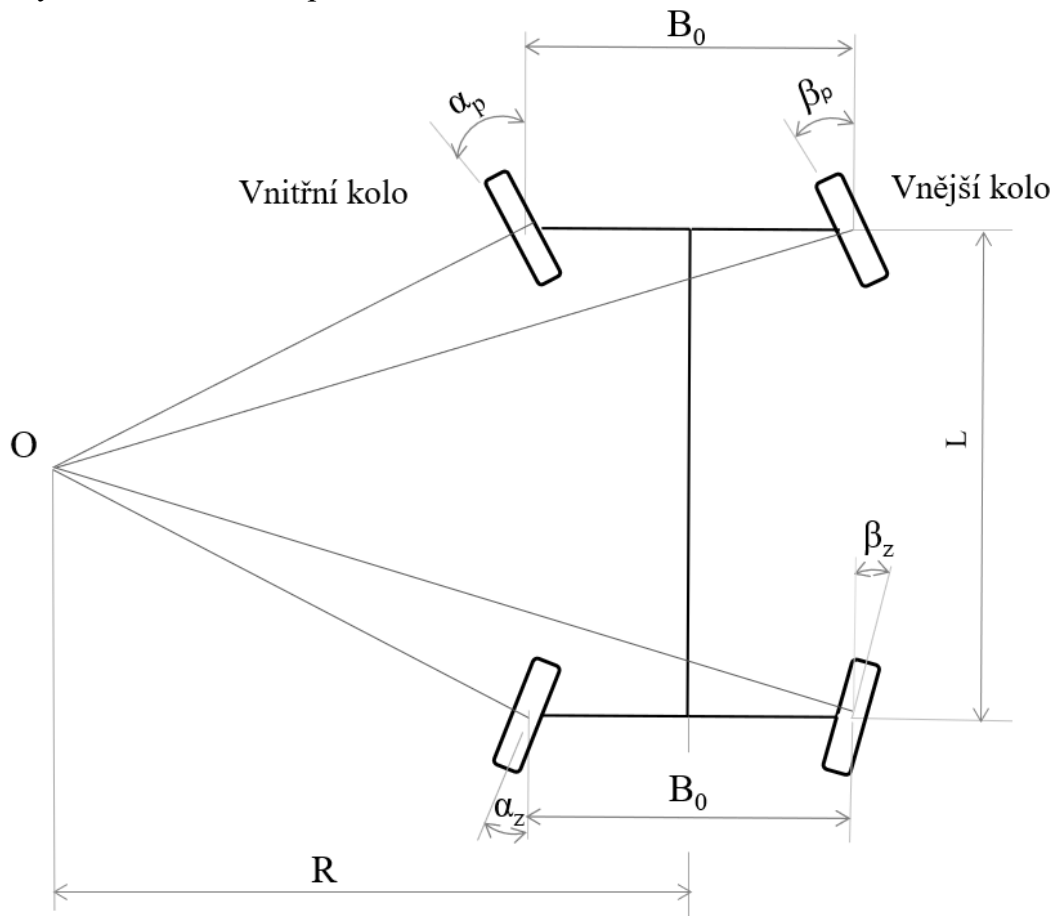
Algoritmus vypočte úhel natočení předního vnějšího kola dle rovnice (3). Jelikož je v experimentálním vozidle použita přední náprava ze Škody Fabia první generace, natočení vnějšího předního kola je závislé na vnitřním předním kole přes převodku řízení, která je taktéž převzata ze Škody Fabia. Tento automobil byl od počátku konstruovaný jako 2WS, tudíž se přední kola natáčí dle této závislosti. Do budoucna se neplánuje úprava řízení předních kol experimentálního vozidla, proto je v algoritmu počítáno se stávajícím technickým řešením řízení předních kol. Střední úhel natočení předních kol se vypočte dle rovnice (40). Pro vypočtení úhlů natočení zadních kol je střední úhel natočení předních kol důležitý, jelikož na spojnici pólu zatáčení O a středu přední nápravy vozidla leží ideový pól zatáčení experimentálního vozidla 4WS. Tato spojnice je od prodloužené osy zadní nápravy skloněna právě o úhel α_s . Pro přesné určení ideového pólu zatáčení experimentálního vozidla algoritmus dopočte hodnotu odsazení pólů zatáčení x dle rovnice (52). Natočení vnitřního zadního kola algoritmus počítá dle rovnice (53), natočení vnějšího zadního kola je vypočteno za pomoci vztahu (54). Výpočet ideového pólu zatáčení experimentálního vozidla je přesný pro nízké rychlosti nepřesahující cca 5 km/h. Při vyšších rychlostech se zvětšují úhly směrových úchylek a výpočet již nemůže být přesný.

Tabulka 4 Program pro výpočet úhlů natočení kol experimentálního vozidla

Hodnoty zadané uživatelem			
Poloměr zatáčení	45	[m]	Zadaný poloměr zatáčení vyhovuje.
Natočení předního vnitřního kola	36	[deg]	Úhel natočení kola lze použít.
Rychlost dopředného pohybu vozidla	39	[km/h]	Zadní kola se natáčí
Přesazení pólu zatáčení od zadní nápravy	2,1	[m]	nesouhlasně. Přesazení je vyhovující.
Algoritmem vypočtené hodnoty			
Natočení předního vnějšího kola	27,5	[deg]	
Střední úhel natočení předních kol	31,8	[deg]	
Natočení vnitřního zadního kola	-2,9	[deg]	
Natočení vnějšího zadního kola	-2,8	[deg]	
Přesazení pólů zatáčení x	3,4	[m]	
Rozměry experimentálního vozidla			
Rozteč rejdových čepů	1,4	[m]	
Rozvor náprav	2,58	[m]	

Výše zmíněný program vychází z běžných dopravních situací, ve kterých se může vozidlo vyskytnout, tudíž lze do programu volit poloměr zatáčení od 4 m po 50 m, natočení předního vnitřního kola od 0° po 38° (naměřená maximální hodnota natočení vnitřního kola). Jelikož experimentální vozidlo není homologováno pro provoz na pozemních komunikacích a používá se pro potřeby experimentální podpory teoretické výuky, lze předpokládat maximální rychlost do 60 km/h. Vstupní hodnota rychlosti do algoritmu je volena od 0 km/h po 60 km/h. Hodnota přesazení pólu zatáčení od zadní nápravy by měla být volena v rozmezí od 0,1m po hodnotu rozvoru náprav 2,58m.

3.6.7. Symetrické natáčení předních a zadních kol



Obrázek 45 Symetrické natáčení předních a zadních kol

Hlavním znakem symetrického systému natáčení kol je, že se vnitřní a vnější kola obou náprav natáčí o stejný úhel, což je u současné koncepce experimentálního vozidla možné. Sériově vyráběná vozidla tuto podmínku při úhlech natočení předních kol od cca 7° bohužel nemohou splnit, jelikož se kola zadní nápravy nenatáčí o tak velké úhly jako kola přední nápravy. Jako největší pozitivum symetrického natáčení kol lze označit, že se při tomto typu natáčení kol zmenší poloměr zatačení na minimum. Poloměr zatačení se vypočte dle vztahu:

$$R = \frac{L/2}{\tan(\alpha_p)} + \frac{B_0}{2} \quad (55)$$

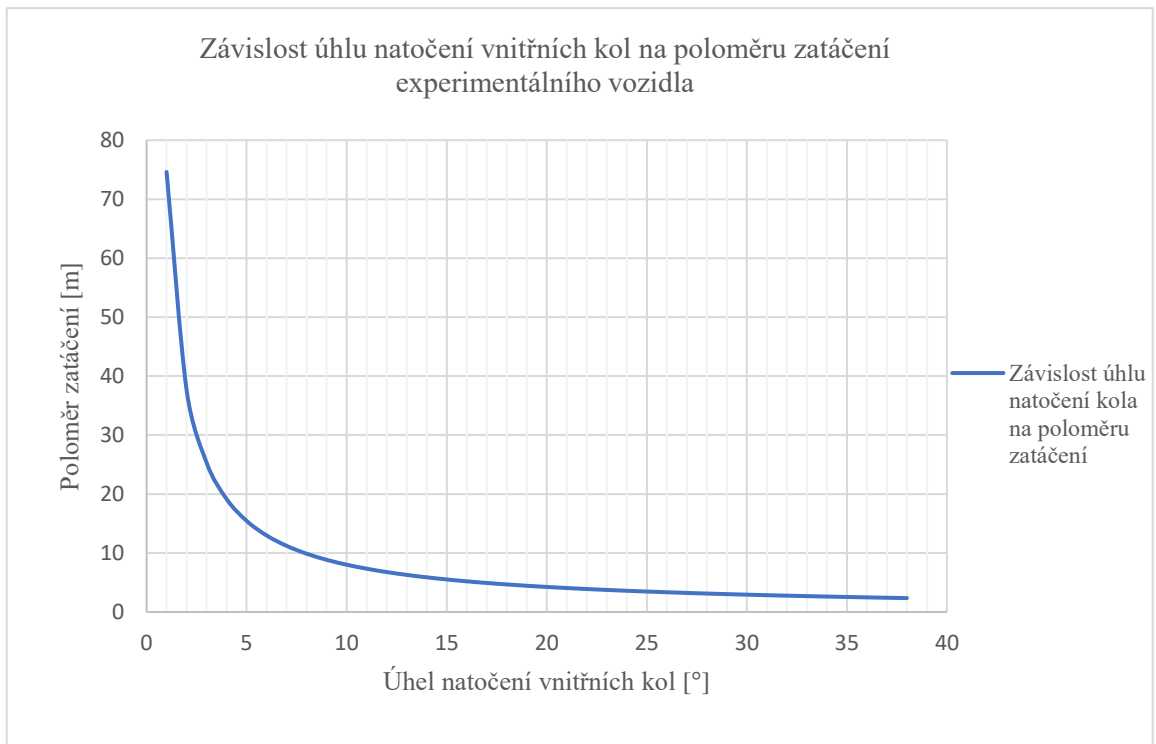
Kde:

R - Poloměr zatačení [m],

L - rozvor kol [m],

α_p - úhel natočení vnitřního předního kola [$^\circ$],

B_0 - vzdálenost rejdových čepů [m].



Obrázek 46 Závislost úhlu natočení vnitřního kola na poloměru zatáčení experimentálního vozidla

Na experimentálním vozidle lze tento systém s výhodou použít, avšak v osobních automobilech se jedná o nevídaný systém. Pro experimentální vozidlo by systém symetrického natáčení kol mohl fungovat pro velmi nízké rychlosti, například do 10 km/h, při které by se ještě více zvýšila jeho obratnost. V druhém případě by se funkce symetrického natáčení kol dala pomocí tlačítka aktivovat trvale, což shledávám jako lepší variantu, například pro zkoušku vozidla po kruhové dráze s konstantním natočením volantu, kdy při tomto systému natáčení kol dosáhneme mnohem menšího poloměru zatáčení.

3.6.8. Úpravy pro stávající experimentální vozidlo Dopravní fakulty

Pro experimentální vozidlo Dopravní fakulty jsou nutné především změny v konstrukci natáčení zadních kol. Na místo elektromotoru se šnekovou převodovkou, který ovládá natáčení zadních kol přes stejnou převodku řízení, jako je použita pro přední nápravu, je nutno použít modernější systém natáčení zadních kol. Při stávajícím nezávislém systému 4WS je hlavní nevýhodou samosvornost šnekové převodovky, kdy při poruše elektronického okruhu řízení zadní nápravy zůstanou zadní kola stále natočena, což je nežádoucí. U moderních systémů 4WS použitých v osobních automobilech se při poruše řízení zadní nápravy automaticky uzamknou zadní kola do přímého směru. Vozidlo se poté chová jako 2WS a jízda s poruchou na zatáčení zadní nápravy se stane bezpečnou. Aby bylo možné aplikovat algoritmus pro natáčení zadních kol, musí nový systém natáčet kola zadní nápravy v závislosti na kolech přední nápravy. Údaj o natočení předních kol lze získat ze snímače úhlu natočení volantu, jímž je experimentální vozidlo vybaveno. Při znalosti úhlu natočení volantu lze dopočítat úhly natočení kol přední nápravy a dle těchto údajů lze natáčet kola zadní nápravy. Další veličinou, kterou je nutno sledovat, je dopředná rychlost vozidla, podle které budeme natáčet zadní kola. Pro rychlosti nižší jak 60 km/h se zadní kola budou natáčet nesouhlasně vůči předním. Pro rychlosti nad 60 km/h se zadní kola budou natáčet naopak souhlasně vůči předním. Experimentální vozidlo není homologováno a slouží převážně pro propagaci fakulty. Je používáno pouze v uzavřených areálech a nepřekračuje rychlost 60 km/h, tudíž se kola zadní nápravy v praxi budou natáčet výhradně nesouhlasně.

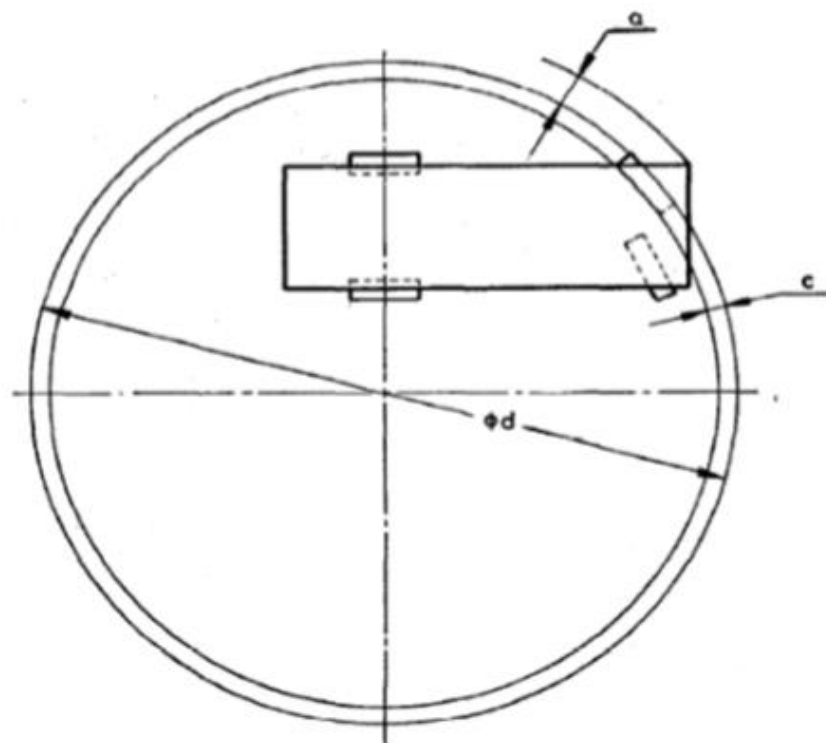
Co se týče konstrukce systému natáčení kol zadní nápravy, lze výhodně použít elektrohydraulický systém, jelikož je tlakový olej přiveden k zadní nápravě. Oproti elektromechanickému systému je elektrohydraulický systém pomalejší a méně přesný, ovšem pro nízké rychlosti experimentálního vozidla je tento systém plně dostačující. Ve vozidle by musela přibýt řídicí jednotka, která by řídila natáčení kol zadní nápravy. Dále by bylo třeba vozidlo vybavit hydraulickými pracovními válci pro natáčení zadních kol a řídicím ventilem pro řízení množství kapaliny vstupující do pracovního válce. Samozřejmě je třeba použít hydraulický zámek tak, aby se v případě poruchy natočila zadní kola do přímého směru. Elektrohydraulický systém shledávám jako nejvhodnější pro experimentální vozidlo.

Další poměrně složitou úpravu pro zlepšení manévrovatelnosti a zmenšení poloměru zatáčení lze učinit zmenšením rozvoru náprav, popřípadě zmenšením rozteče rejdových čepů. Pro zkrácení rozvoru náprav by byla nutná změna konstrukce rámu a zavěšení kol, což je velice náročné a zmenšení poloměru zatáčení při zkrácení rozvoru náprav o 20 % není nijak

významné. Změny natočení kol na poloměru zatáčení jsou uvedeny v příloze A-D. Při změně rozteče rejdových čepů je změna natočení kol v závislosti na poloměru zatáčení nepatrná.

3.7. Měření poloměru zatáčení vozidel

Metodik, jakými se měří poloměry zatáčení vozidel existuje více druhů. Jednou z nejpoužívanějších je Indická metoda, která má dle indické normy číslo 12222. Dle této indické normy se poloměr zatáčení měří při kroužení vozidla po zpevněné ploše při rychlosti nepřesahující 5 km/h. Sleduje se dráha (kružnice) po které se pohybuje přední vnější kolo. Měření se provádí v obou krajních polohách volantu. Z průměrů obou kružnic se vypočte průměrná hodnota, ze které se následně vypočte poloměr zatáčení vozidla. Přidáme-li k průměru otáčení vozidla hodnotu $2a$, dostaneme prostor potřebný k tomu, aby se vozidlo otočilo na cestě a nenarazilo na překážku. Obvykle se toto měření neprovádí a je spíše jako dodatek této indické normy. [27] Měření poloměru zatáčení je za pomoci této metodiky jednoduché, levné a relativně přesné. Z těchto důvodů je tato metodika s oblibou využívána při testování automobilů asijských výrobců vozidel.



Obrázek 47 Měření poloměru zatáčení [27]

ZÁVĚR

Tématem, kterým se zabývala tato diplomová práce, bylo nezávislé zatáčení kol zadní nápravy experimentálního vozidla.

V první kapitole byly podrobně vysvětleny typy řízení zadních náprav, které se nejčastěji používaly v osobních automobilech. Dále zde byly popsány pozice pólů zatáčení souhlasného a nesouhlasného natáčení zadních kol vůči kolům předním, což je důležité pro určení teoretického poloměru zatáčení vozidla. V poslední řadě bylo v této kapitole ilustrováno porovnání vozidla 4WS a 2WS při vyhýbacím manévru.

Ve druhé kapitole se objasnilo technické provedení řízení kol zadní nápravy. Od mechanického systému vyvinutého automobilkou Honda v osmdesátých letech, přes elektrohydraulické systémy natáčení zadních kol, které používala především automobilka Nissan. Posledním popsaným systémem v této kapitole je elektromechanický systém, který je používán v současnosti automobilkami Renault a Porsche. Na závěr této kapitoly byla uvedena speciální vozidla s natáčením kol zadní nápravy.

Ve třetí kapitole se pojednávalo o modelech zatáčení dvounápravových vozidel, ať již o jednostopých, či dvoustopých modelech. Byly uvedeny rovnovážné rovnice pro výpočet kinematiky zatáčení vozidel. V praktické části byly uvedeny rozměry experimentálního vozidla nezbytné pro další výpočtovou část. Dále byl proveden výpočet převodového poměru převodky řízení. Jedním z nejdůležitějších úkolů diplomové práce bylo odvození a sestavení vztahů pro výpočet pólu zatáčení souhlasného a nesouhlasného natáčení zadních kol. V dalších podkapitolách byly vyobrazeny závislosti teoretického poloměru zatáčení na úhlu natočení kol. Následovalo sestavení algoritmu pro výpočet úhlů natočení kol při různých poloměrech zatáčení. Pro experimentální vozidlo byly odvozeny vztahy pro úhly natočení zadních kol v závislosti na poloměru zatáčení. Byla uvedena závislost teoretického poloměru zatáčení na úhlu natočení kol. V poslední řadě byl pro experimentální vozidlo sestaven algoritmus a program, který vypočítává právě úhly natočení zadních kol. Práce pokračovala symetrickým natočením vnitřních a vnějších kol, při kterém vozidla dosahují nejmenšího teoretického poloměru zatáčení čímž byla ukončena výpočtová část této kapitoly. Následoval nutný seznam úprav řízení pro experimentální vozidlo. Na závěr byla uvedena metodika měření poloměru zatáčení.

Cílem práce bylo vytvořit program pro úhly natočení zadních kol v závislosti na úhlech natočení kol předních. Nejprve jsem odvodil vztahy a pro snazší aplikaci poznatků na experimentální vozidlo jsem vytvořil program, který dopočítává úhly natočení zadních kol při proměnném poloměru zatáčení a natočení předního vnitřního kola. Jelikož současné experimentální vozidlo nenatáčí kola zadní nápravy závisle na kolech přední nápravy, zadní náprava se řídí zvláště joystickem. Do budoucna se počítá se změnou koncepce natáčení zadních kol, kdy kola zadní nápravy budou ovládána v závislosti na kolech předních. Proto zpracovaná diplomová práce slouží jako podklad pro experimentální provedení natočení kol zadní nápravy dle aktuálních jízdních podmínek. Jako návrh pro další zlepšování experimentálního vozidla bych volil odlišnou konstrukci systému natáčení zadních kol.

POUŽITÁ LITERATURA

1. VALA, Miroslav a Miroslav TESAŘ. *Teorie a konstrukce silničních vozidel I.* Pardubice: Univerzita Pardubice, 2003. ISBN 80-7194-503-x.
2. VLK, František. *Podvozky motorových vozidel.* 3., přeprac., rozš. a aktualiz. vyd. Brno: František Vlk, 2006. ISBN 80-239-6464-x.
3. VLK, František. *Elektronické systémy motorových vozidel.* Brno: František Vlk, 2002. ISBN 80-238-7282-6.
4. 4WS (Four Wheel Steering). *AutoKlinika.cz* [online]. Ostrava, 2017, 8.6.2017 [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <http://autoklinika.cz/glossary/4ws-four-wheel-steering.html>
5. Jak funguje natáčení zadních kol, čemu pomáhá a proč je stále tak výjimečné?. *Autoforum.cz* [online]. Praha, 2016, 26.3.2016 [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <http://www.autoforum.cz/technika/jak-funguje-nataceni-zadnich-kol-cemu-pomaha-a-proc-je-stale-tak-vyjimecne/>
6. Mechanické řízení zadní nápravy Honda Prelude 4WS. *Antholonet.com* [online]. Londýn, 2009, 15.11.2009 [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <http://antholonet.com/EngineersCars/3GPrelude/3gprelude.html>
7. Aktivní řízení 4WS slaví 30 let: Všemi čtyřmi brzdit, všemi čtyřmi řídit!. *Auto.cz* [online]. Praha, 2017, 18.7.2017 [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/aktivni-rizeni-4ws-slavi-30-let-vsemi-ctyrimi-brzdit-vsemi-ctyrimi-ridit-108507>
8. Steering. *Autozine.org* [online]. 2016, 17.1.2016 [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: https://www.autozine.org/technical_school/traction/Steering_3.html
9. Four-wheel steering demystified. *Autoweek.com* [online]. Detroit, 2015, 12.6.2015 [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <https://autoweek.com/article/car-life/four-wheel-steering-demystified>
10. DONGES. *Funktion und Sicherheitskonzept der Aktiven Hinterachskinematik von BMW* [online]. 1995, , 22 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <http://www.d3dhemmer.com/Patente+Versuche/4WS/Funktion%20und%20Sicherheit%20skonzept%20der%20Aktiven%20Hinterachskinematik%20von%20BMW.pdf>

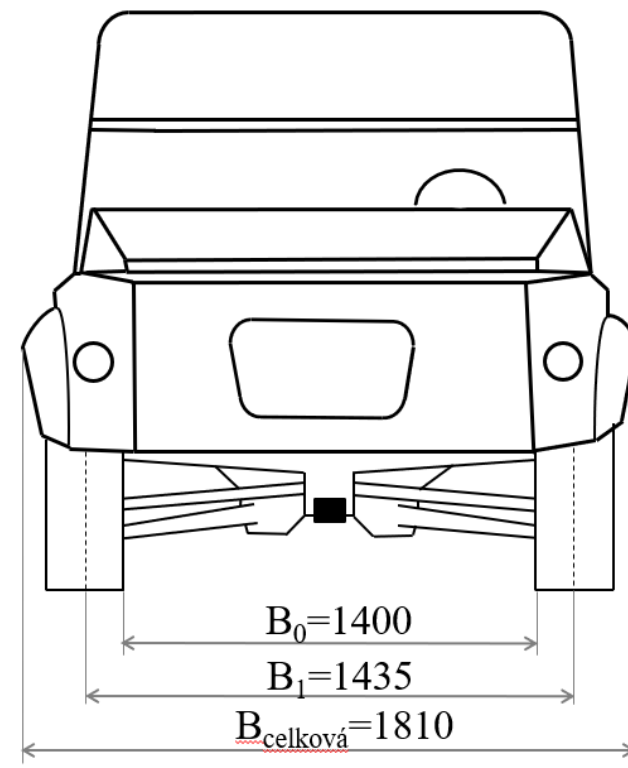
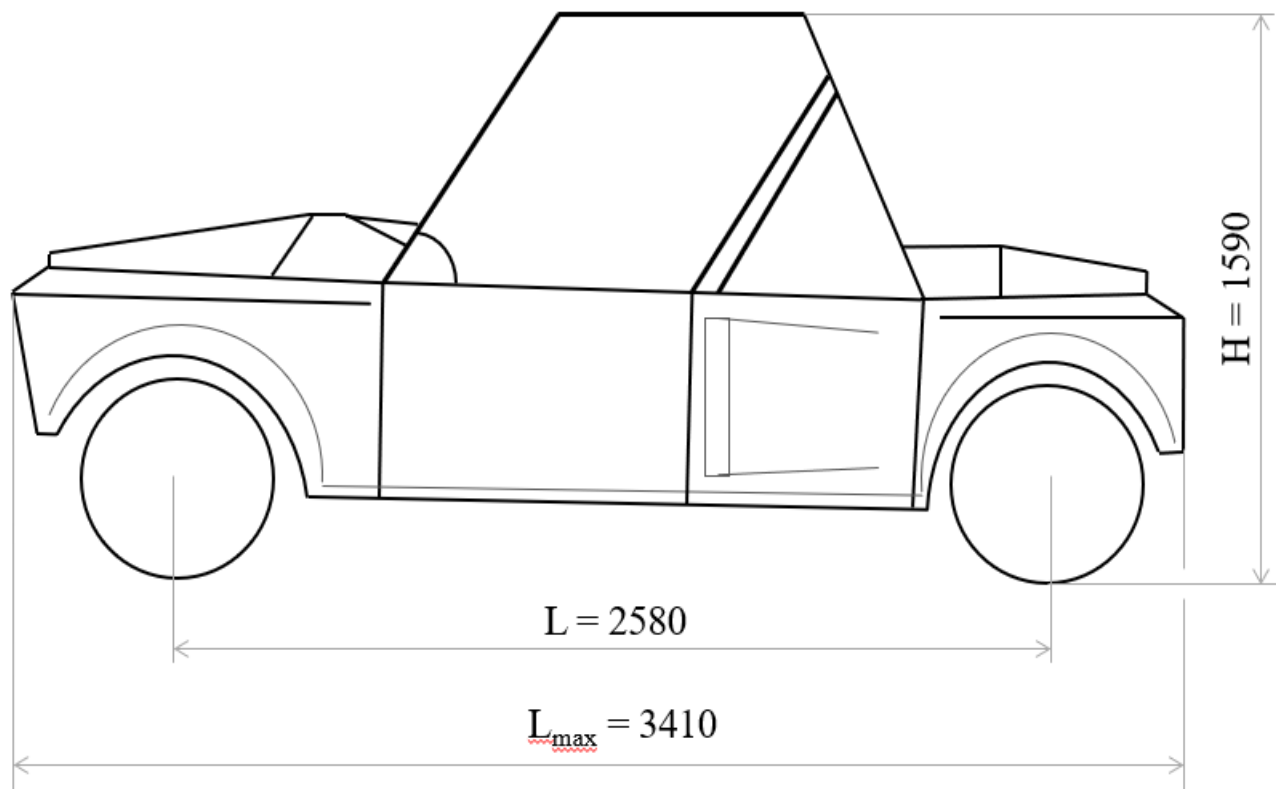
11. BRABEC, Pavel. Systémy řízení zadních kol automobilu [online]. Liberec, 2010 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: http://intech2.tul.cz/dokumenty/vystupy_z_projektu/01~TUL/002_In-TECH%20_Brabec_Syst%C3%A9my%20%C5%99%C3%ADzen%C3%AD%20zadn%C3%ADch%20kol%20automobilu_2010.pdf. Projekt. Technická univerzita v Liberci.
12. How to Remove HICAS on R32 GTR [online]. 2006, , 1 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <http://forums.gtrcanada.com/forum/all-things-skyline/faq/4652-how-to-remove-hicas-on-r32-gtr>
13. FLEIŠMAN, Luděk. Diagnostika II [online]. 2013, , 11 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: https://www.spszengrova.cz/texty/texty/PRA/Diagnostika_II.%204.%20ro%C4%8Dn%C3%ADk_zkratky%203-UT.pdf
14. Elektrohydraulický systém řízení Nissan HICAS [online] [cit. 2019-04-20] dostupné z: <http://www.240edge.com/basics/super-hicas.html>
15. SAJDL, Jan. *Active Drive (4Control)* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <http://www.autolexicon.net/cs/articles/active-drive/>
16. BAMETT, Josh. *TECHNOLOGY EXPLAINED: REAR-AXLE STEERING* [online]. 2016, , 1 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.total911.com/technology-explained-rear-axle-steering/>
17. RYBECKÝ, Vladimír. *Aktivní řízení zadních kol Porsche 4WS* [online]. 2014, , 1 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/1549>
18. Steering. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 2019 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Steering>
19. *ZAHRADNÍ TRAKTOR JOHN DEERE X304* [online]. 2018 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.stromshop.cz/zahradni-traktor-john-deere-x304-vcetne-zaciho-ustroji>
20. *Stroje pro průmysl a stavebnictví* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.netcz.cz/venieri/rypadlonakladace-4ws/vf-10-33b/1033c-tre Quarti-600x400>
21. *Tatra vyrobila největší český vůz historie* [online]. 2015, , 1 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/auto/zpravodajstvi/nejvetsi-ceske-auto-tatra.A150818_121401_automoto_hig

22. Konstrukce podvozku autobusů Scania [online] [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: http://www.scania.cz/bus/chassis_range
23. BRASHEAR, Eric. *The Worlds Longest Monster Truck Throttles onto The Trade Show Floor* [online]. 2018, , 1 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.businesswire.com/news/home/20180222006398/en/Worlds-Longest-Monster-Truck-Throttles-Trade-Show>
24. DUGLAS, Nick. *2005 JEEP HURRICANE* [online]. 2016, , 1 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.supercars.net/blog/2005-jeep-hurricane/>
25. Natočení přívěsu tahače [online] [cit. 2019-04-20] <http://krakertrailers.eu/ujdonsagokestermekfejleszt/?id=932>
26. Experimentální vozidlo (4WD + 4WS) Oddělení silničních vozidel. Univerzita Pardubice [online]. Pardubice [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <https://dfjp.upce.cz/dfjp/kdpd/o-katedre/experimentalni-vozdlo.html>
27. IS 12222: AUTOMOTIVE VEHICLES — TURNING CIRCLE. *Archive.org* [online]. India, 2011, 2011 [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <https://archive.org/details/gov.in.is.12222.2011/page/n3>
28. VILLEGAS, Carlos a Robert SHORTEN. *Public State of the Art of Integrated Chassis Control Deliverable* [online]. 2005, , 36 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: http://www.hamilton.ie/cemacs/reports/CEmACS_D2.pdf

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha A** Závislost teoretického poloměru zatáčení na úhlech natočení kol ideového vozidla 4WS při nesouhlasném natáčení kol zadní nápravy a zmenšení rozvoru náprav o 20 %
- Příloha B** Závislost teoretického poloměru zatáčení na úhlech natočení kol ideového vozidla 4WS při nesouhlasném natáčení kol zadní nápravy a zmenšení rozteče rejdových čepů o 20 %
- Příloha C** Závislost teoretického poloměru zatáčení na úhlech natočení kol experimentálního vozidla 4WS při nesouhlasném natáčení kol zadní nápravy a zmenšení rozvoru náprav o 20 %
- Příloha D** Závislost teoretického poloměru zatáčení na úhlech natočení kol experimentálního vozidla 4WS při nesouhlasném natáčení kol zadní nápravy a zmenšení rozteče rejdových čepů o 20 %
- Příloha E** Základní a výpočtové rozměry experimentálního vozidla v [mm]
- Příloha F** Současná koncepce natáčení kol zadní nápravy

Příloha E Základní a výpočtové rozměry experimentálního vozidla v [mm]



Příloha F Současná koncepce natáčení kol zadní nápravy

