



**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

Ústav automobilů, spalovacích motorů  
a kolejových vozidel

Integrace lehkého pomocného trakčního  
motoru do kolové skupiny osobního automobilu

Integration of "assist power" light-weight  
electric motor into the wheel assembly of  
passenger vehicle

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2024

Bc. Terézia ĎURKOVIČOVÁ

**Studijní program:** N0716A270001 DOPRAVNÍ A TRANSPORTNÍ TECHNIKA

**Studijní obor:** Motorová vozidla

**Vedoucí práce:** Ing. Michal Vašíček, Ph.D.



# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ďurkovičová** Jméno: **Terézia** Osobní číslo: **475096**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**  
Studijní program: **Dopravní a transportní technika**  
Specializace: **Motorová vozidla**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Integrace lehkého pomocného trakčního motoru do kolové skupiny osobního automobilu**

Název diplomové práce anglicky:

**Integration of "assist power" light-weight electric motor into the wheel assembly of passenger vehicle**

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je studie proveditelnosti integrace pomocného trakčního elektromotoru do kolové skupiny automobilu, jehož hlavní pohon je realizován na opačné nápravě.

- Proveďte rešerši možných řešení
- Proveďte „package“ studii rozmístění komponent pro dodané konvenční typy náprav s cílem na minimalizaci zástavbového prostoru
- Zjistěte přínos s ohledem na trakční a rekuperační charakteristiky vozidla dle dodaných parametrů (SUV + sedan)
- Navrhněte pro jaký typ vozidla je které z dříve navržených řešení vhodné

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Michal Vašíček, Ph.D. ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **19.10.2023** Termín odevzdání diplomové práce: **10.01.2024**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Ing. Michal Vašíček, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Oldřich Vítek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studentky



## Anotačný záznam

Meno autora:	Terézia Ďurkovičová
Názov práce:	Integrace lehkého pomocného trakčního motoru do kolové skupiny osobního automobilu
Názov práce v angličtine:	Integration of "assist power" light-weight electric motor into the wheel assembly of passenger vehicle
Rozsah práce:	79 strán 55 obrázkov 12 tabuliek
Akademický rok:	2023/2024
Ústav:	12 120 Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel
Študijný program:	N0716A270001 DOPRAVNÍ A TRANSPORTNÍ TECHNIKA
Vedúci práce:	Ing. Michal Vašíček, Ph.D.
Klíčové slová:	kolová skupina, elektromotor, simulace podélné dynamiky
Keywords:	wheel assembly, electric motor, longitudinal dynamics simulation



## **Abstrakt**

Cílem této diplomové práce je vytvořit vhodné konstrukční řešení integrace lehkého elektromotoru do kolové skupiny zadaných náprav. Záměrem je použití tohoto pohonu jako doplňkového na nehnané nápravě osobního automobilu. V práci jsou rozebrány výhody a nevýhody tohoto typu pohonu a na základě daných kritérií jsou zvoleny vhodné elektromotory. Pomocí simulací akcelerace a brzdění je zkoumán přínos doplňkového pohonu na podélnou dynamiku vozidla. Zvolené elektromotory jsou následně zakomponovány do zadaných náprav různých konstrukcí.

## **Abstract**

This diploma thesis aims to create design solutions of specific types of suspension with integrated lightweight electric motor as a hub motor. The idea is to use this as an assisting traction motor for non-driven axle in passenger cars. The thesis discusses advantages and disadvantages of this type of propulsion. Based on specified criteria suitable electric motors are selected. Simulations of acceleration and braking are used to examine the benefits of assisting traction motors on longitudinal dynamics. Chosen electric motors are then incorporated into the given types of suspension designs.



## Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že som diplomovú prácu na tému: „Integrace lehkého pomocného trakčního motoru do kolové skupiny osobního automobilu“ vypracovala samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených v zozname zdrojov, ktorý sa nachádza v poslednej kapitole tejto práce.

V Prahe dňa

Terézia Ďurkovičová



## Pod'akovanie

Ďakujem Ing. Ondřejovi Fricovi a jeho týmu za možnosť pracovať na tejto diplomovej práci a za ochotu a cenné rady pri jej vypracovaní.

Ďalej by som chcela poďakovať Ing. Michalu Vašíčkovi, Ph.D. za vedenie práce.

A v neposlednom rade ďakujem svojej rodine, ktorá mi umožnila študovať na vysokej škole a po celý čas štúdia ma podporovala.



# Obsah

Úvod .....	9
Zadanie .....	10
<b>1 Typy pohonného ústrojenstva u elektromobilov .....</b>	<b>12</b>
1.1 Pohon pomocou tzv. „in-wheel“ motorov.....	14
1.1.1 Elaphe.....	14
1.1.2 Protean Electric.....	15
1.2 Výhody a nevýhody pohonu pomocou elektromotorov umiestnených v kolesách.....	16
1.2.1 Analýza vplyvu neodpružených hmot na dynamické vlastnosti vozidla .....	18
<b>2 Návrh.....</b>	<b>22</b>
2.1 Určenie okrajových podmienok pre výber elektromotorov.....	22
2.2 Výber vhodných elektromotorov .....	25
2.2.1 Plettenberg Motors.....	25
2.2.2 Emrax .....	26
2.2.3 AMK Motion.....	27
2.3 Návrh prevodoviek .....	28
<b>3 Simulácie pozdĺžnej dynamiky .....</b>	<b>31</b>
3.1 Simulácia akcelerácie .....	31
3.2 Simulácia brzdenia s využitím brzdného momentu elektromotoru.....	34
3.3 Výsledky simulácií.....	36
<b>4 Konštrukčné prevedenie.....</b>	<b>40</b>
4.1 Zadanie .....	40
4.2 Predná lichobežníková náprava.....	41
4.2.1 Lichobežníková náprava – koncept č.1.....	44
4.2.2 Lichobežníková náprava – koncept č.2.....	47



4.2.3	Kontrola ložísiiek .....	49
4.2.4	Záver k lichobežníkovej náprave .....	51
4.3	Predná náprava typu McPherson .....	53
4.3.1	Náprava typu McPherson – koncept č.1 .....	55
4.3.2	Náprava typu McPherson – koncept č.2 .....	57
4.3.3	Kontrola ložísiiek .....	59
4.3.4	Záver k náprave typu McPherson .....	60
4.4	Zadná náprava s vlečnými ramenami a torznou tyčou.....	61
4.4.1	Náprava s vlečnými ramenami a torznou tyčou – koncept č.1 .....	63
4.4.2	Náprava s vlečnými ramenami a torznou tyčou – koncept č.2 .....	66
4.4.3	Kontrola ložísiiek .....	68
4.4.4	Záver k náprave s vlečnými ramenami a torznou tyčou.....	69
	<b>Záver .....</b>	<b>70</b>
	<b>Prehľad použitej literatúry .....</b>	<b>72</b>
	<b>Zoznam obrázkov.....</b>	<b>74</b>
	<b>Zoznam tabuliek .....</b>	<b>76</b>
	<b>Prehľad použitých skratiek a symbolov .....</b>	<b>77</b>
	<b>Zoznam príloh .....</b>	<b>79</b>





## Úvod

S elektromobilitou sa experimentovalo už v 19. storočí, kedy v rôznych častiach sveta prichádzali vynálezcovia nezávisle na sebe s prvými vozidlami poháňanými elektrinou uloženou v batérií. S postupným vývojom spaľovacích motorov a ich použitím u masovo produkovaných vozidiel počiatkom 20. storočia, však začali postupne prevládať nad elektromobilmi. Vozidlá so spaľovacími motormi mali výrazne nižšiu cenu a palivá boli dostupnejšie než elektrina, ktorá sa najmä do odľahlejších častí dostala až pozdejšie. Elektromobily tak upadli na dlhšiu dobu do zabudnutia, a to až do počiatku 21. storočia, kedy prišla Toyota s prvým hybridným modelom Prius. S rastúcim záujmom o environmentálny dopad vozidiel sa, najmä v Európe, čoraz viac sprísňujú nároky na vozidlá so spaľovacími motormi. Zároveň so znižujúcimi sa zásobami fosílnych palív, sa začali hľadať nové možnosti pohonu vozidiel.

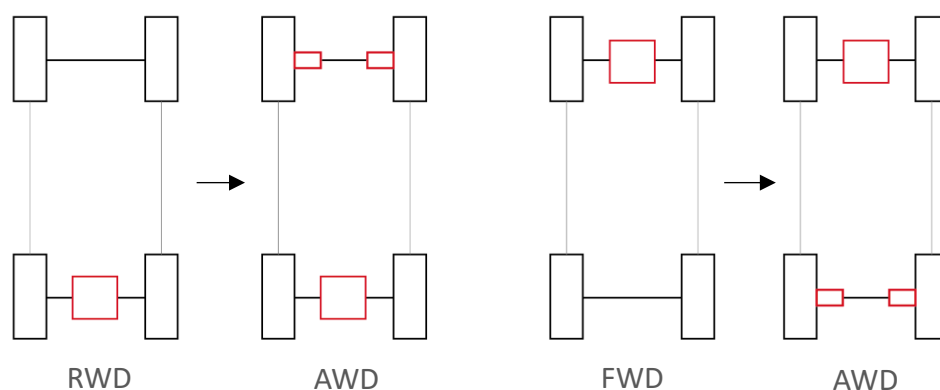
Technológia batérií sa od 19. storočia posunula natoľko, že elektromobily začali svojím výkonom doháňať vozidlá so spaľovacími motormi. Problémom bol príliš malý dojazd vozidiel na čisto elektrický pohon, a preto sa na začiatku používal len ako pomocný u hybridných vozidiel. S postupným vývojom batérií sa dojazd u vozidiel s čisto elektrickým pohonom zvýšil natoľko, že sa začínajú blížiť vozidlám so spaľovacími motormi a stávajú sa tak čoraz viac obľúbenými. Takmer všetci výrobcovia automobilov už majú vo svojej ponuke elektromobil, a keďže sa väčšinou jedná o vozidlá ponúkané taktiež s pohonom spaľovacím motorom, je snaha pri výmene pohonu zachovať čo najviac okolitých častí. Koncepcia elektromobilov je preto podobná ako u vozidiel so spaľovacími motormi, pretože vyvinúť novú architektúru pre elektromobily je pre mnohých výrobcov príliš nákladné.

Keďže majú elektromotory v porovnaní so spaľovacími motormi vyšší pomer výkonu na jednotku hmotnosti, experimentuje sa s ich uložením nielen v odpruženej hmote vozidla, ako je tomu klasicky u vozidiel so spaľovacím motorom, ale taktiež v neodpružených hmotách, kde slúžia ako priamy pohon kolies. Práve týmto konceptom sa zaoberá táto práca, ktorej hlavnou časťou bude zástavba elektromotorov do troch rôznych typov zadaných náprav.



## Zadanie

Ako napovedá názov práce, jej cieľom je zistiť možnosť integrácie prídavného pohonu riešeného pomocou ľahkých elektromotorov umiestnených v kolesách nehnanej nápravy. Pohon by tak slúžil len ako doplnkový k hlavnému pohonu, ktorým je poháňaná druhá náprava. Hlavný pohon tak môže byť umiestnený buď na prednej alebo na zadnej náprave. Myšlienkou je použiť pomocný pohon na prednej náprave u športových vozidiel alebo vozidiel typu EREV, ktoré majú hlavný pohon umiestnený vzadu a na zadnej náprave u elektrických, prípadne hybridných vozidiel typu MPV.



Obrázok 1 Umiestnenie doplnkového pohonu pre pohon RWD a FWD

Pretože sa jedná o doplnkový pohon, zámerom je využívať ho hlavne pre zlepšenie akcelerácie v nižších rýchlostiach. Hlavný pohon by potom mohol byť podľa toho upravený tak, aby dosahoval maximálny výkon vo vyšších rýchlostiach. Jeho ďalšou výhodou je oproti vozidlu s pohonom jednej nápravy zlepšenie celkovej trakcie vozidla pri znížených adhézných podmienkach. Doplnkový pohon by tak mal pozitívny vplyv nielen na pozdĺžnu dynamiku vozidla, ale umiestnenie elektromotoru v každom kolese nápravy poháňanej pomocným pohonom by zároveň prinieslo možnosť nezávislého dávkovania výkonu v oboch elektromotoroch, čo by taktiež ovplyvnilo priečnu dynamiku vozidla.

Možným prínosom konceptu s týmto typom pohonu sa už zaoberá viacero výrobcov elektromotorov. Na začiatku práce sú uvedené niektoré z týchto riešení a rozobraté najpoužívanejšie typy pohonného ústrojenstva u elektromobilov. Zároveň sú tu detailnejšie popísané už spomenuté výhody, ale aj nevýhody tohto typu pohonu. V ďalšej časti práci je snaha



nájsť podľa stanovených okrajových podmienok elektromotory, ktoré by sa pre túto aplikáciu najviac hodili. Je požadované vybrať aspoň jeden motor zo skupiny tzv. „pancake“ motorov - s priemerom väčším než je jeho dĺžka a aspoň jeden motor s malým priemerom, ale väčšou dĺžkou. Zvolené motory sú následne použité v simulácii pozdĺžnej dynamiky vozidla, pomocou ktorej je možné zistiť rozdiel medzi vozidlom s pohonom jednej nápravy a vozidlom s doplnkovým pohonom pri akcelerácií a brzdení pomocou rekuperácie. Simulácia je zostavená pre dva typy vozidiel – pre ľahšie vozidlo typu sedan a ťažšie vozidlo typu SUV.

V praktickej časti práce je snahou zakomponovať vybrané elektromotory do troch zadaných náprav s rôznou konštrukciou, z čoho dve sú predné a jedna zadná náprava. Požiadavkou je integrovať motory tak, aby zaberali čo najmenší zástavbový priestor a aby sa zachovali kinematické body náprav, aby sa nezmenila ich návrhová funkčnosť.



## 1 Typy pohonného ústrojenstva u elektromobilov

Kedže sa elektromobilita začala výrazne vyvíjať pomerne v nedávnej dobe, prevažná väčšina výrobcov automobilov používa koncepciu zástavby s pohonnou jednotkou uloženou v odpruženej hmote vozidla a hnací moment je vyvedený ku kolesám pomocou poloos, ako je tomu u vozidiel so spaľovacími motormi. Elektromotory vsadené do kolies tak stále zostávajú používané len u koncepčných a experimentálnych vozidiel. Avšak s rastúcim vývojom v oblasti elektrických pohonov a so znižujúcimi sa rozmermi a hmotnosťou elektromotorov a zvyšujúcimi sa ich výkonovými charakteristikami by sa tento typ pohonu mohol v nasledujúcich rokoch dostať do masovej produkcie.

Klasická koncepcia elektromobilov je založená na tzv. skateboardovej platforme, ktorá tvorí kostru vozidla. Je v nej uložená pohonná jednotka vozidla s baterkou, čo znižuje ťažisko vozidla a zlepšuje tak jeho dynamické vlastnosti. Táto platforma je modulárna a väčšinou je zdieľaná medzi niekoľkými modelovými typmi, v niektorých prípadoch dokonca medzi rôznymi výrobcami.



Obrázok 2 Platforma elektromobilov Hyundai [1]

Existuje mnoho typov elektromotorov, ktoré sa vďaka ich vlastnostiam používajú pre pohon osobných automobilov. V minulosti sa používali prevažne jednosmerné motory, ktoré postupom času nahradili striedavé. U striedavých motorov je potrebné premieňať jednosmerný prúd z baterky na striedavý, čo zaisťujú meniče. Tie sa však pre špecifické potreby vozidiel vyvinuli až pozdejšie, a preto sa spočiatku používali jednosmerné elektromotory. Vo všeobecnosti majú striedavé motory oproti jednosmerným vyššiu životnosť, výkonovú hustotu a taktiež účinnosť. [2]



S príchodom elektromobility sa výrobcovia začali vracat' k pohonu zadných kolies. Vďaka tomu, že elektromotor je menší než spaľovací motor a nepotrebuje viacstupňovú prevodovku, môže byť umiestnený v osi nápravy. Výkon sa tak nemusí prenášať mechanickou väzbou z prednej časti vozidla k zadným kolesám, ako tomu bolo u vozidiel so spaľovacím motorom, ale je vedený poloosami priamo na zadné kolesá. Tento typ pohonu je dnes najpoužívanejším v základných modeloch. Pohon všetkých kolies je dostupný často v príplatkových verziách, u vozidiel vyšších tried alebo u prémiových značiek. Tento typ pohonu sa často označuje ako „dual-motor“ – tzn. že v každej náprave je umiestnený jeden elektromotor, pričom nemusí platiť, že oba motory sú rovnakého typu. U športovo ladených vozidiel môžu byť použité pre lepšie dynamické vlastnosti vozu tri motory – dva na zadnej náprave a jeden na prednej náprave. Naopak pohon predných kolies sa používa zriedkavo. Môžeme ho nájsť napr. u elektromobilov značky Volvo. [3]



Obrázok 3 Elektrická pohonná jednotka vozu Smart EQ [4]



V nasledujúcej tabuľke je prehľad rôznych typov pohonu u vybraných elektrických vozidiel.

Tabuľka 1 Typy pohonu u vybraných elektrických vozidiel

Výrobca	Model	Typ pohonu, typ motoru
Tesla	Model Y, Model 3 Model S	RWD – PMSM*, AWD - PMSM vzadu, asynchrónny motor vpredu AWD - PMSM (3 motory u verzie Plaid S)
Volkswagen	ID.3 ID.4, ID.5	RWD - PMSM RWD/AWD - PMSM
EQS	450	RWD/AWD - PMSM
Audi	e-tron	AWD - asynchrónne motory (2 alebo 3 motory)
Nio	ER5	AWD - asynchrónny motor vpredu, PMSM vzadu
Hyundai	Ioniq 5	RWD/AWD - PMSM
Porsche	Taycan	RWD/AWD - PMSM
BMW	i3	RWD - PMSM
Volvo	XC40	FWD/AWD - PMSM

\*PMSM = synchrónny motor s permanentnými magnetmi

## 1.1 Pohon pomocou tzv. „in-wheel“ motorov

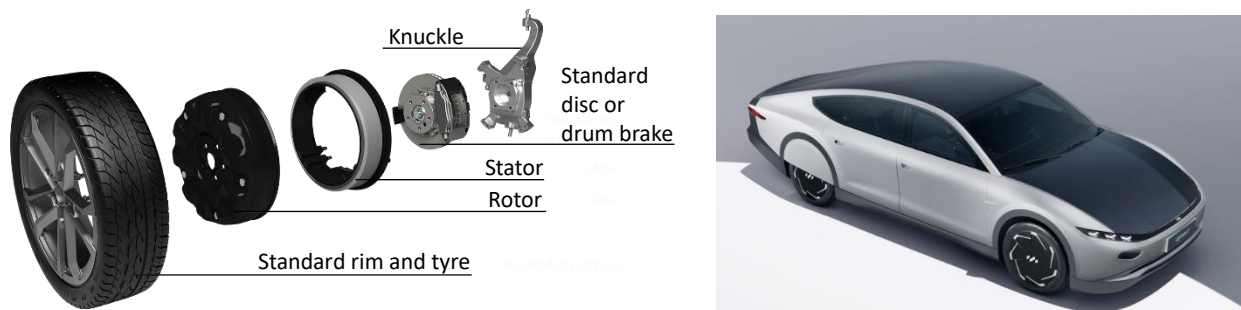
S prvým vozidlom na elektrický pohon využívajúcim elektromotory umiestnené v kolesách prišiel na začiatku 20. storočia Ferdinand Porsche, ale kvôli vzrastajúcej popularite spaľovacích motorov padla táto technológia do úzadia. S nástupom elektromobility a jej pokročilým vývojom však v posledných rokoch vzniká čoraz viac koncepčných vozidiel využívajúcich tento typ pohonu. [5]

### 1.1.1 Elaphe

Jednou z firiem zaoberajúcou sa konštrukciou vlastných elektromotorov umiestnených priamo v kolese je výrobca Elaphe. Tieto elektromotory sú typu „out-runner“, čo znamená, že ich rotorom je vonkajšia časť, ku ktorej je priamo pripojené koleso. Stator je pripevnený k tehlici a je v ňom integrovaná klasická kotúčová alebo bubnová brzda. Takto riešená zástavba je kompaktná a vyžaduje relatívne malý zástavbový priestor. Tým zostáva celý priestor v karosérii, kde by bol inak uložený elektromotor, voľný pre kufror alebo pre zväčšenie veľkosti batérie a tým dojazdu vozidla.[6]



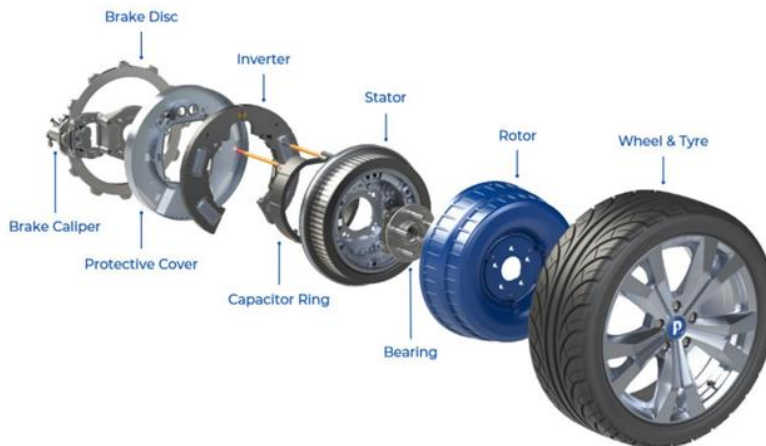
Výrobca túto technológiu testuje u rôznych prototypových vozidiel, ako napríklad Lightyear 0, ktorý kombinuje elektrickú energiu získanú dobíjaním zo siete s energiou získanou zo slnečného žiarenia. Zatiaľ je ale len jedno vozidlo s pohonom od tohto výrobcu, u ktorého je potvrdený vstup na trh. Prekvapivo nejde o malé auto s kompaktnými rozmermi, ale pick-up, ktorý sa bude predávať na americkom trhu. [7]



Obrázok 4 vľavo: Rozpad kolovej skupiny s využitím in-wheel motoru výrobcu Elaphe [6], vpravo: Vozidlo Lightyear 0 [8]

### 1.1.2 Protean Electric

Je ďalšou firmou, ktorá vyvíja „in-wheel“ motory na princípe konštrukcie podobne ako u Elaphe s kolesom pripevneným k rotoru elektromotoru. Tento pohon je taktiež vo fáze testovania u mnohých prototypových vozidiel.



Obrázok 5 Rozpad kolovej skupiny s využitím in-wheel motoru výrobcu Protean Electric [9]

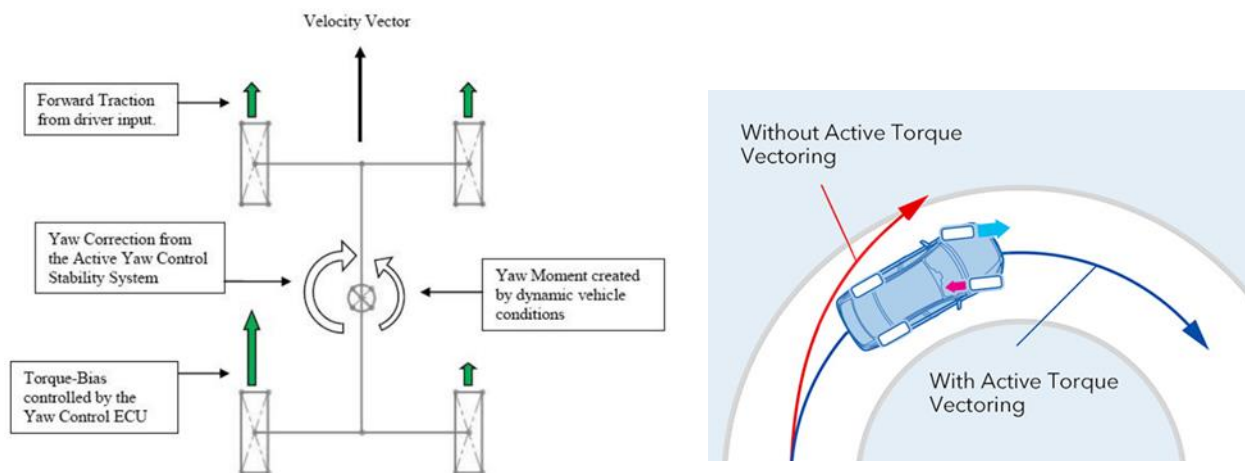
Pri pohľade na tieto riešenia by sa mohlo zdať, že typ pohonu pre rozpracovanie možností zástavby do zadaných náprav je vyriešený, avšak výrobca tu počíta s použitím pre hlavný pohon. Elektromotory majú preto vysoké výkonové charakteristiky, a tým aj vysokú hmotnosť. Zakomponovanie tohto typu pohonu taktiež vyžaduje konštrukciu nápravy a kolovej skupiny úplne od nuly, zatiaľ čo zadaním tejto práce je integrovať elektromotory do už existujúcich náprav. Preto je pre našu aplikáciu potrebné zvoliť vhodnejšie elektromotory.



## 1.2 Výhody a nevýhody pohonu pomocou elektromotorov umiestnených v kolesách

Jednou z už uvedených výhod pri použití „in-wheel“ motorov ako doplnkového pohonu je zlepšenie pozdĺžnej dynamiky vozidla využitím dostupného trakčného potenciálu na nehnanej náprave, a to nielen pri akcelerácií, ale aj pri brzdení využitím rekuperácie doplnkového pohonu. To znamená väčšiu regeneráciu energie do batérie, tým menej časté použitie mechanických brzd, ktoré by potenciálne mohli byť menšie a dochádzalo by k ich nižšiemu opotrebeniu. Zisteniu možného zlepšenia vlastností pozdĺžnej dynamiky vozu je venovaná časť [Simulácie pozdĺžnej dynamiky](#).

Z pohľadu priečnej dynamiky vozidla, stability, a tým aj bezpečnosti vozu je prínosom možnosť regulácie momentu dodávaného elektromotormi na každom kolese samostatne. To ovplyvňuje stáčavú rýchlosť vozidla, čím pri strate stability pri určitom dynamickom jave vzniká točivý moment snažiaci sa dostať vozidlo späť do stabilného stavu, ako je to vidieť na obr. 6. U bežných vozidiel s pohonom jednej nápravy vzniká stáčavá rýchlosť vozidla na základe vstupu na volante. Využitím prídavnej stáčavej rýchlosti reguláciou momentu medzi pravým a ľavým kolesom je preto možné predísť stavu, kedy je napr. vozidlo nedotáčavé a hrozilo by nezvládnutie prejazdu zákruty.



Obrázok 6 Ovplyvnenie stability vozidla využitím vektorovania momentu [10] [11]

Ďalším vplyvom toho je, že sa pri zatáčaní vozidla môže zvýšiť celková priečna sila  $F_y$  na danej náprave. Pretože je pri zatáčaní každému kolesu dodávaný taký moment, aký je schopné preniesť, potenciál  $F_y$  celej nápravy je vyšší, pretože nie je obmedzený maximálnym momentom, ktorý preniesie odľahčené vnútorné koleso, ako je tomu u vozidiel s otvoreným diferenciálom. [10]





Zároveň je tak v porovnaní s otvoreným diferenciálom, ktorý sa používa u bežných vozidiel, zabezpečená lepšia stabilita vozu aj v prípade, keď sa jedno z kolies nápravy ocitne na povrchu so zníženými adhéznymi podmienkami. V súčasnosti sa síce u vozidiel určité „delenie“ toku výkonu medzi pravým a ľavým kolesom používa, ale jedná sa o systém, kedy je koleso, ktoré je na povrchu s nižšou adhéziou brzdené, čím dochádza k mareniu energie na teplo. V prípade „in-wheel“ motorov je tak účinnosť pohonu vyššia, a to taktiež vďaka tomu, že medzi motorom a kolesom je menší počet mechanických častí, takže sú nižšie aj mechanické straty.

Ďalšou výhodou tohto typu pohonu je, že u klasického pohonného ústrojenstva, kde je výkon z motoru na kolesá prenášaný poloosami musí byť v prípade prednej nápravy použitý homokinetický kĺb, ktorý má určité maximálne dovolené natočenie (typicky 30 - 40°). Presunutím pohonu do kolies je tak možné zvýšiť rozsah ich natočenia, čo je výhodné pri manévrovaní s vozidlom v nízkej rýchlosti. [12]

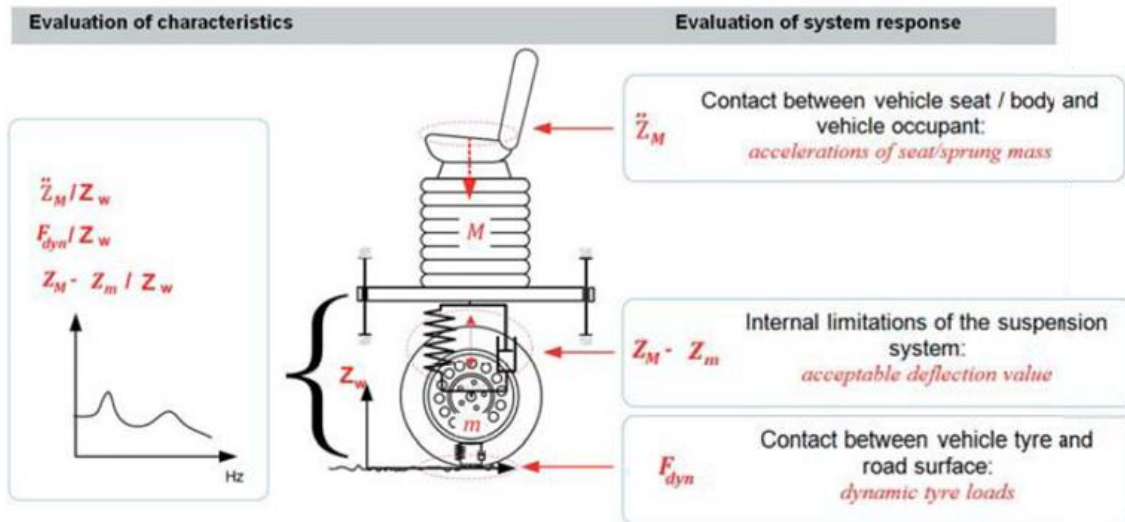
Vozidlá využívajúce hlavný pohon na jednej náprave a doplnkový pohon na druhej náprave by sa tak mohli zaradiť medzi vozidlá 2WD a 4WD, kde doplnkový pohon čiastočne nahrádza druhý motor u vozidla 4WD. Síce dosahuje nižšie výkonové parametre, ale vďaka umiestneniu motorov v kolesách vzniká v karosérii viac batožinového priestoru, ktorý môže byť taktiež využitý pre rozšírenie batérie (malú časť uvoľneného priestoru samozrejme zaberie výkonová elektronika „in-wheel“ motorov). Zároveň by mal byť tento typ pohonu v porovnaní s pohonom 4WD lacnejší.

Najväčšia nevýhoda tohto konceptu pohonu plynie z uloženia elektromotorov v neodpruženej hmote vozidla. To môže mať za následok zhoršenie dynamických vlastností vozidla – negatívny vplyv správania sa systému na pasažierov, ovládateľnosť vozidla a s tým súvisiacej bezpečnosti.



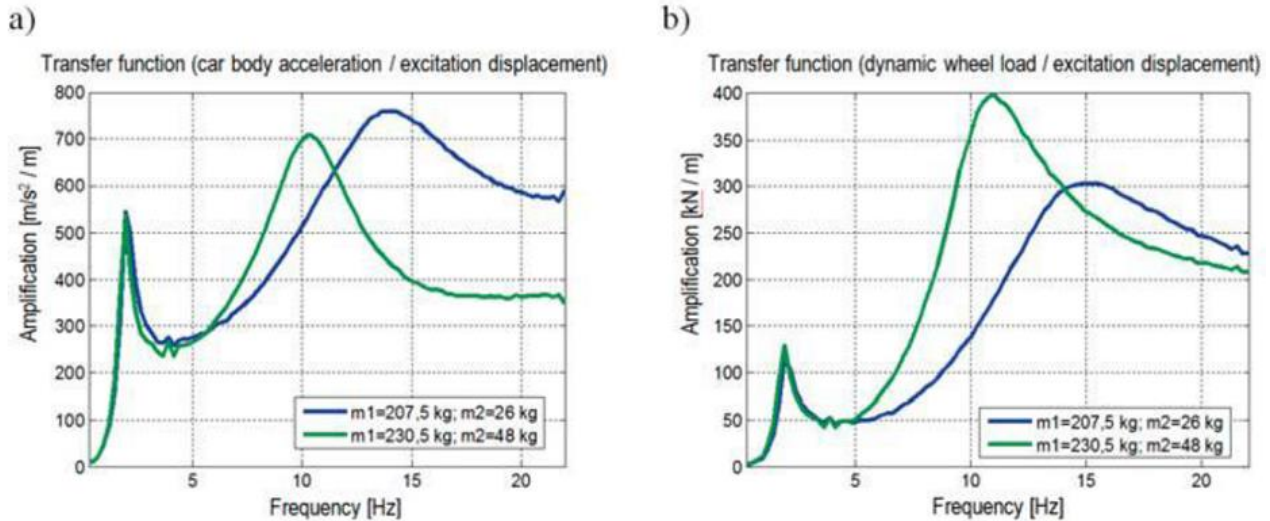
### 1.2.1 Analýza vplyvu neodpružených hmot na dynamické vlastnosti vozidla

Z hľadiska vertikálnej dynamiky môžeme tento vplyv hodnotiť na zjednodušenom štvrtinovom modeli auta s dvojhmotovou sústavou (obr.7). Vplyv na pasažierov popisujeme pomocou zrýchlenia odpruženej hmoty a ovládateľnosť vozidla (resp. stabilitu) pomocou dynamického zaťaženia pneumatiky.



Obrázok 7 Zjednodušený model vozu pre hodnotenie vertikálnej dynamiky [13]

Výsledky simulácie vertikálnej dynamiky, ktorá bola súčasťou experimentu [13], v ktorom sa skúmalo správanie dvoch vozidiel – jedného referenčného a druhého so zvýšenou neodpruženou hmotou o 22kg a zároveň zvýšenou odpruženou hmotou o 23kg je možné vidieť na obr. 8. Graf naľavo zobrazuje zosilnenie zrýchlenia odpružených hmot voči budeniu a graf napravo zosilnenie dynamického zaťaženia pneumatiky voči budeniu, oboje pri rôznych budiacich frekvenciách. Je zrejmé, že zvýšenie neodpružených hmot má výrazný vplyv na vertikálnu dynamiku vozidla.



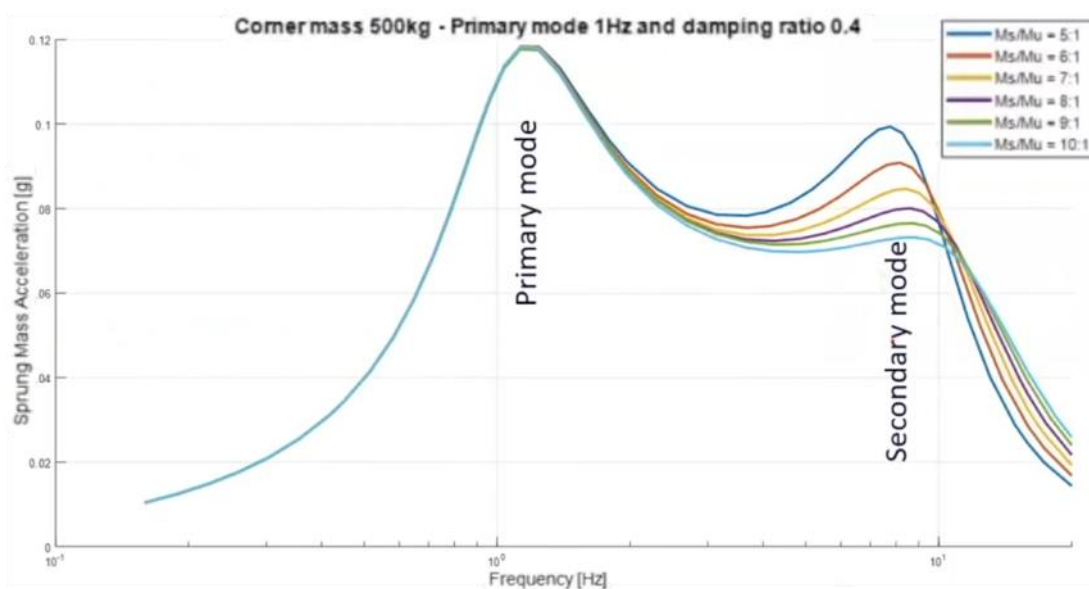
Obrázok 8 Výsledky simulácie vertikálnej dynamiky pre referenčné vozidlo a vozidlo so zvýšenou neodpruženou hmotou o 22kg a odpruženou hmotou o 23kg [13]

Z grafu zosilnenia zrýchlenia odpružených hmot **a)** je vidieť, že v oblasti rezonancie neodpružených hmot sa maximálna hodnota znížila, zároveň sa rezonančná oblasť zúžila a vo frekvenciách vyšších než rezonancia neodpružených hmot sú hodnoty zrýchlenia dokonca výrazne nižšie. Naopak u nižších frekvencií môžeme v dôsledku posunu rezonančnej frekvencie vidieť nárast hodnôt zrýchlenia. Celkový dopad na pasažierov vplyvom zvýšenia neodpružených hmot, ale môžeme zhodnotiť len na základe doby, po ktorú boli určitým hodnotám zrýchlenia vystavení. Výsledné namerané hodnoty z experimentu vykonanom na odpovedajúcom reálnom vozidle pri prejazde rozličných typov nerovností vozovky s vyznačenými hranicami vplyvu na človeka je vidieť na grafoch priložených v Prílohe 1.

U zosilnenia dynamického zaťaženia **b)** je najväčšiu zmenu vidieť taktiež v oblasti rezonančnej frekvencie neodpružených hmot, kde v určitých frekvenciách dochádza k viac než 100% zvýšeniu hodnôt. Celkovo tak vidíme u dynamického zaťaženia výrazné zhoršenie správania sa systému v oblasti vyšších frekvencií. To môže mať v realite za následok, že pri prejazde vozidla so zvýšenými neodpruženými hmotami zákrutou, a zároveň nerovnosťou určitou rýchlosťou, môže dôjsť k zníženiu dynamického zaťaženia pneumatiky na nulu, a tým k strate stability vozidla. [13]



Z teórie je teda zrejmé, že zvýšenie neodpružených hmot má negatívny vplyv na dynamiku vozidla, a to najmä v oblasti vyšších frekvencií. Pri hodnotení vplyvu ich zvýšenia je taktiež dôležité si uvedomiť, že záleží na pomere odpruženej hmoty k neodpruženej - čím vyššia je odpružená hmota vozidla, tým menší je negatívny efekt zvýšenia neodpruženej hmoty. U vozidla, ktoré váži napr. 1500kg (pomer odpruženej hmoty k neodpruženej  $\approx 9:1$ ) bude mať prídanie 120kg celkovej neodpruženej hmoty (v tomto prípade 30kg na jedno koleso, výsledný pomer hmotností  $\approx 5:1$ ) výraznejší vplyv než u auta s hmotnosťou 2200kg (pomer hmotností  $\approx 10:1$ , po zvýšení neodpružených hmot o 120kg pomer  $\approx 7:1$ ) (obr. 9). [14]



Obrázok 9 Závislosť zrýchlenia odpružených hmot na frekvencii pre rôzne pomery odpruženej hmoty k neodpruženej [14]

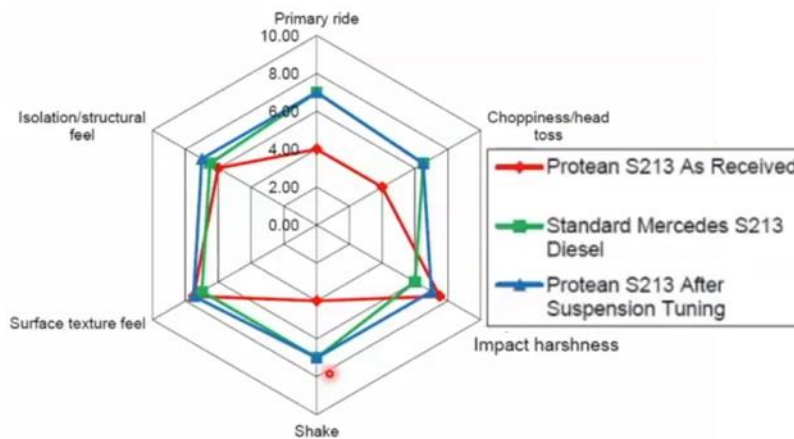
Výrobcovia „in-wheel“ motorov preto vynakladajú veľké úsilie na analýzu tejto problematiky v praxi.

Protean Electric vykonal test na vozidle strednej triedy, u ktorého bola na každom kolese zvýšená neodpružená hmota o 30kg (tj. 120kg na celom aute) formou balastu rozdeleného medzi statickú a rotačnú hmotu tak, aby to odpovedalo elektromotoru. Cieľom experimentu bolo na základe hodnotiacich parametrov zistiť subjektívny a objektívny vplyv prídavnej neodpruženej hmoty. Pri objektívnom posúdení vplyvu boli vyhodnotené namerané dáta pri prejazde referenčného vozidla a vozidla so zvýšenou neodpruženou hmotou nerovnomernou vozovkou. Výsledky potvrdili principiálne to, čo sa ukázalo v teórii.



V subjektívnej časti experimentu boli profesionálnymi vodičmi skúmané rozdiely v ovládateľnosti vozu, stability a zatáčania pri rôznych jazdných stavoch. Výsledkom bolo, že v niektorých jazdných stavoch bol cítiť určitý rozdiel medzi referenčným vozidlom a vozidlom s prídavnou neodpruženou hmotou, dôležité však je, že dynamické vlastnosti auta by malo byť možné získať z veľkej časti späť, ak by sa už pri návrhu odpruženia počítalo so zvýšenou neodpruženou hmotou. [15]

Výrobca následne zakomponoval do vozidla pohon pomocou „in-wheel“ motorov a upravil odpruženie na základe prídavných neodpružených hmot. Následné testy ukázali rovnaké, dokonca v niektorých prípadoch lepšie dynamické vlastnosti oproti štandardnému vozidlu. Je dôležité si uvedomiť, že vozidlo s „in-wheel“ pohonom zároveň umožňuje rozdeľovať moment nezávisle v každom kolese, čo ako bolo popísané, prispieva k zlepšeniu dynamických vlastností vozidla. [14]



Obrázok 10 Výsledky subjektívneho hodnotenia [14]



## 2 Návrh

### 2.1 Určenie okrajových podmienok pre výber elektromotorov

Pre účel tejto práce sú najdôležitejšie tieto okrajové podmienky:

- Minimálny moment elektromotoru
- Hmotnosť
- Rozmery

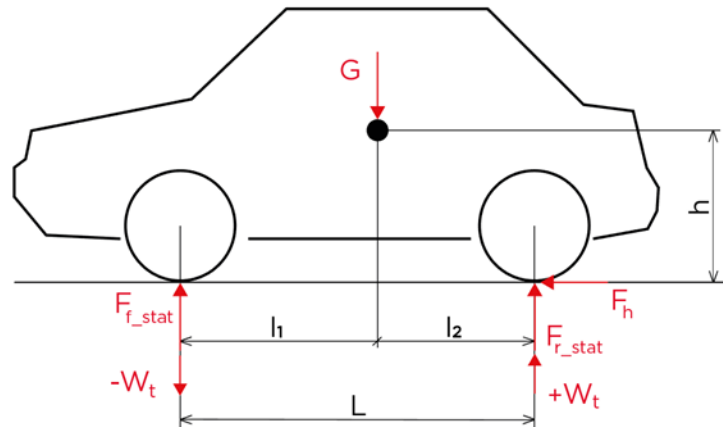
Pri výbere vhodných elektromotorov bolo potrebné približne stanoviť, aký moment je možné preniesť na nehnanej náprave. Zadané boli dva typy vozidiel – menšie vozidlo typu sedan a väčšie vozidlo typu SUV. Ich rozmery a hmotnosti sú spolu s parametrami pohonného ústrojenstva v prípade hnanej prednej alebo zadnej nápravy uvedené v tab. 2 .

Tabuľka 2 Parametre zadaných vozidiel a pohonného ústrojenstva

	Sedan	SUV
Hmotnosť m [kg]	1600	2200
Podiel hmotnosti na zadnej náprave	52%	52%
Rozmer pneumatiky	235/45 R18	235/60 R18
Dynamický polomer pneumatiky [m]	0,318	0,3695
Výška ťažiska h [m]	0,508	0,558
Rázvor L [m]	2,75	2,85
<b>Pohonné ústrojenstvo - hlavný pohon zadný</b>		
Maximálny hnací moment elektromotoru [Nm]	440	
Prevodový pomer i	9,59	
Hnací moment na zadných kolesách [Nm]	4219,6	
<b>Pohonné ústrojenstvo - hlavný pohon predný</b>		
Maximálny hnací moment elektromotoru [Nm]	220	
Prevodový pomer i	11,18	
Hnací moment na predných kolesách [Nm]	2459,6	



Prenositelný moment bol spočítaný pre kolesá prednej nápravy vozidla s pohonom zadných kolies pri akcelerácii z nulovej rýchlosti. Z maximálnej hnacej sily na zadnej náprave sa určí pozdĺžny prenos hmotnosti  $W_t$ .



Obrázok 11 Zobrazenie pôsobiacich síl pri akcelerácii vozu

$$W_t = \frac{F_h \cdot h}{L} \quad (1)$$

O túto hodnotu sa zníži statické zaťaženie  $F_{f\_stat}$ , čím získame dynamické zaťaženie na prednej náprave.

$$F_{f\_dyn} = m \cdot g \cdot 0,48 - W_t \quad (2)$$

Maximálny prenositeľný moment získame pomocou vzťahu

$$M_F = F_{f\_dyn} \cdot \mu \cdot r_{dyn} , \quad (3)$$

kde pre súčiniteľ adhézie  $\mu$  sú uvažované dva prípady - pre suchú vozovku  $\mu = 1$  a za znížených adhézných podmienok  $\mu = 0,5$ <sup>1</sup>. Spočítané hodnoty prenositeľného momentu pre oba typy vozidiel sú uvedené v tab. 3. [16]

<sup>1</sup>  $\mu = 0,5$  odpovedá podľa tabuľky v Prílohe 2 priemernej hodnote súčiniteľu adhézie na mokrom asfalte [17]



Tabuľka 3 Prenositeľný moment na prednej náprave pre rôzne hodnoty súčiniteľa adhézie

Typ vozidla	Sedan	SUV
Hnacia sila na zadných kolesách $F_h$ [N]	13278,58	11419,76
Dynamický prenos hmotnosti $W_t$ [N]	2452,92	2235,87
Dynamické zaťaženie vpredu $F_{f\_dyn}$ [N]	5081,16	8123,49
$\mu$ - suchá vozovka	1	
Prenositeľný moment na predných kolesách [Nm]	1614,6	3001,6
$\mu$ - znížené adhézne podmienky	0,5	
Prenositeľný moment na predných kolesách [Nm]	807,4	1500,8
Minimálny moment doplnkového pohonu [Nm]	403,7	750,4

Z vypočítaných hodnôt vyplýva, že minimálny potrebný moment jedného elektromotoru doplnkového pohonu je pre sedan približne 400Nm a pre vozidlo SUV 750Nm.

Kedže majú elektromotory rôzny priebeh výkonu a momentu v závislosti na ich konštrukcii a dosahujú tak maximálny moment v rôznych otáčkach, bude pravdepodobne potrebná prevodovka s určitým prevodovým pomerom závislým na maximálnych otáčkach kolies, a teda na maximálnej rýchlosti vozidla. Elektromobily v dnešnej dobe dosahujú maximálnu rýchlosť približne 160km/h, čo odpovedá otáčkam kolesa u sedanu 1335ot/min a u vozidla SUV 1150ot/min. Pri výpočte prevodových pomerov jednotlivých elektromotorov preto budem uvažovať maximálne otáčky kolesa  $n_k = 1300\text{ot}/\text{min}$ .

Maximálna prípustná hmotnosť elektromotoru bola stanovená na základe simulácií a experimentov popísaných v časti Analýza vplyvu neodpružených hmot na dynamické vlastnosti vozidla, kde z výsledkov plynie, že už pri zvýšení neodpruženej hmoty na jednom kolese o 22kg bolo zrejme zhoršenie dynamických vlastností vozu. Napriek tomu, že zadané vozidlá majú vyššiu odpruženú hmotnosť v porovnaní s vozidlom použitým v uvedenom experimente, a zvýšenie neodpružených hmot by preto nemalo mať tak veľký vplyv, maximálna prípustná hmotnosť elektromotoru bola zvolená 20kg.

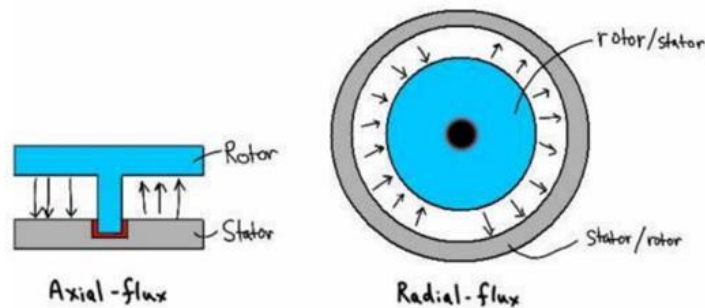




Elektromotor sa zároveň musí zmestiť do obálky s priemerom 300mm a dĺžkou 350mm. Rozmery obálky boli určené na základe dostupného zástavbového priestoru vo vnútri kolesa a medzi karosériou a kolesom.

## 2.2 Výber vhodných elektromotorov

Pri výbere elektromotorov bol kladený dôraz na to, aby vo všetkých ohľadoch spĺňali stanovené okrajové podmienky. Najmä kvôli nízkej prípustnej hmotnosti bolo medzi klasickými elektromotormi s radiálnym magnetickým tokom náročné nájsť motor, ktorý by tomu vyhovoval. Najvhodnejším typom elektromotorov pre integráciu do kolesa sú motory s axiálnym magnetickým tokom, ktoré v porovnaní s klasickými elektromotormi dosahujú výrazne vyššiu výkonovú hustotu. [18]

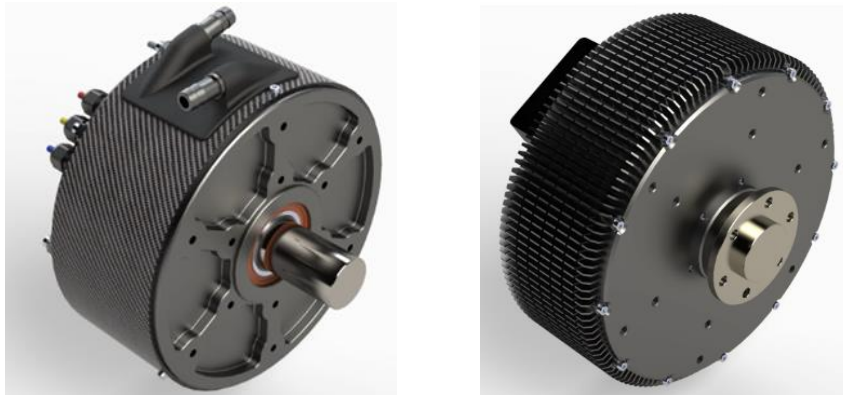


Obrázok 12 Usporiadanie statoru a rotoru u elektromotorov s axiálnym a radiálnym magnetickým tokom [18]

V nasledujúcej časti sú uvedené elektromotory, ktoré boli zvolené ako najvhodnejšie pre doplnkový pohon.

### 2.2.1 Plettenberg Motors

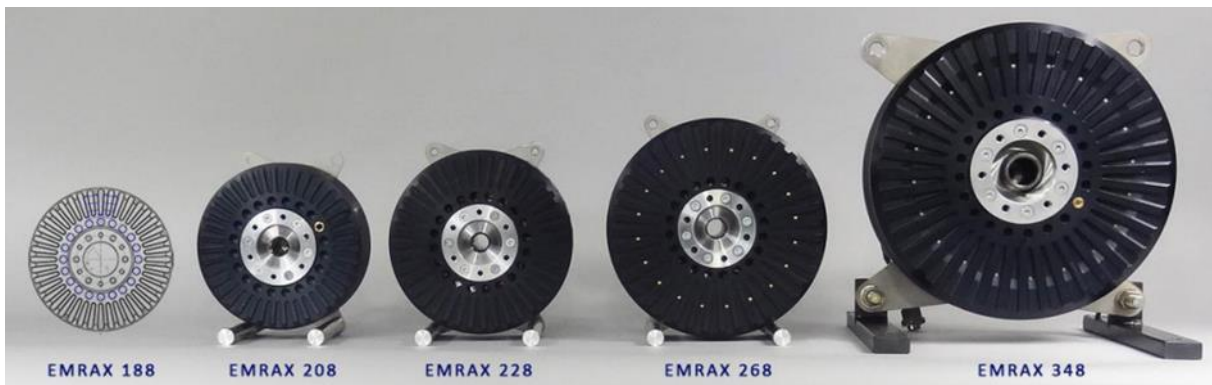
Elektromotory skupiny Nova od tohto výrobcu sú zástupcom klasických radiálnych elektromotorov. Sú to bezkefkové jednosmerné motory s rotorom vo vnútri. Vyznačujú sa robustnou konštrukciou, vysokým pomerom výkonu k hmotnosti a môžu byť použité v aplikáciách s nepriaznivým prostredím, napr. u bezpilotných lietadiel, v priemyselných aplikáciách, atď. Z dostupných výkonových variant vyhovujú motory Nova 30 a Nova 50. Chladenie je u týchto motorov možné vzduchom alebo vodou. Výkresy elektromotorov sú spolu s výkonovými krivkami uvedené v Prílohe 3. [19] [20]



Obrázok 13 Elektromotory Nova 30 vľavo a Nova 50 vpravo [19] [20]

### 2.2.2 Emrax

Spoločnosť Emrax ponúka kompaktné elektromotory typu „axial-flux“ s vysokými výkonovými parametrami v porovnaní s ostatnými vybranými motormi. Tieto motory sú typu „out-runner“, čo znamená, že rotor je vonkajšou časťou a stator je umiestnený vo vnútri. S ohľadom na dané okrajové podmienky boli zvolené motory Emrax 188, 208 a 228. Chladenie elektromotorov závisí na aplikácii a chladiacim médiom môže byť vzduch, kvapalina alebo ich kombinácia. Katalógové listy elektromotorov sú uvedené v Prílohe 4. [21]

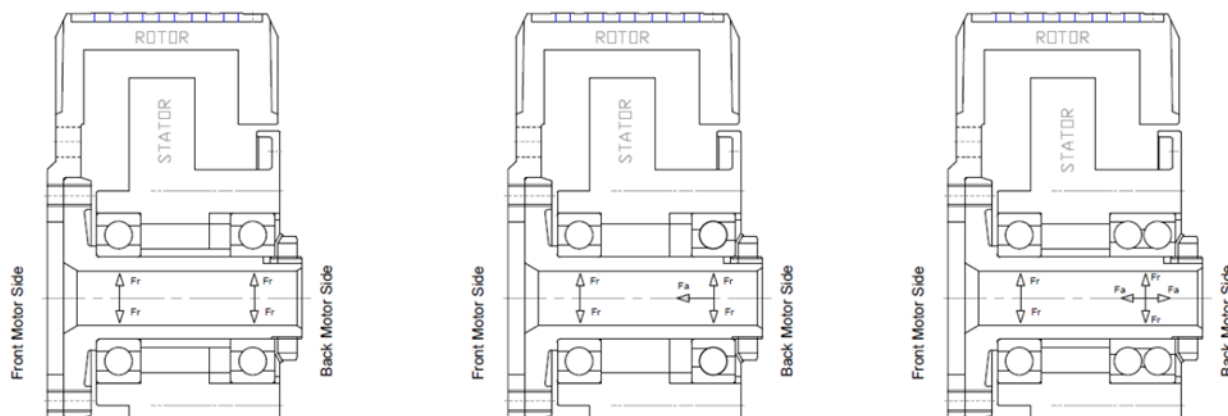


Obrázok 14 Celá výkonová rada elektromotorov Emrax [22]

Výrobca ponúka konštrukcie s rôznymi typmi ložísk v závislosti na druhu zaťaženia. Na obr. 15 je vidieť, že varianta **a)** s dvomi guľičkovými ložiskami je vhodná pre radiálne zaťaženie, varianta **b)** s jedným guľičkovým ložiskom s kosouhlým stykom dokáže okrem radiálnych síl zachytávať aj axiálnu silu v jednom smere a varianta **c)** zachytáva axiálne sily v oboch smeroch. V prípade, že by



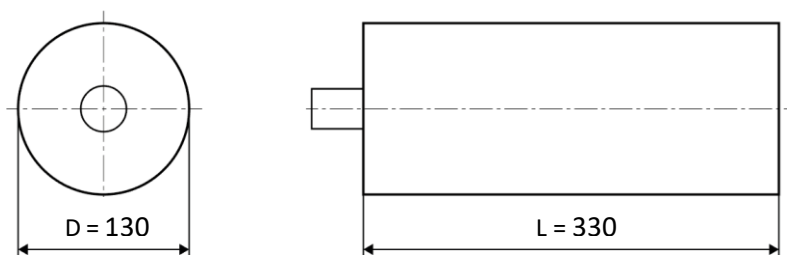
bolo k motoru potrebné pripojiť prevodovku so šikmým ozubením, ktoré generuje axiálne sily, musela by sa použiť varianta b) alebo c). [22]



Obrázok 15 Možné kombinácie usporiadania ložísk u elektromotorov Emrax [22]

### 2.2.3 AMK Motion

Na základe požiadavky elektromotoru s malým priemerom a väčšou osovou dĺžkou bol ako zástupca tejto kategórie vybraný motor podľa možných výkonových parametrov elektromotorov od výrobcu AMK. V katalógu výrobcu sú uvedené buď motory s nedostatočným maximálnym momentom alebo naopak dostatočne silné, ale výrazne presahujúce stanovenú prípustnú hmotnosť. Na základe toho, som určila priemerné hodnoty elektromotoru, ktorý výkonovo spadá medzi motory uvádzané výrobcom. Tento motor už spĺňa všetky stanovené okrajové podmienky. Motor je chladený kvapalinou. Výkonové krivky elektromotoru sú uvedené v Prílohe 5. [23]



Obrázok 16 Elektromotor s malým priemerom a väčšou dĺžkou



V nasledujúcej tabuľke je uvedený prehľad základných parametrov vybraných elektromotorov.

Tabuľka 4 Parametre zvolených elektromotorov

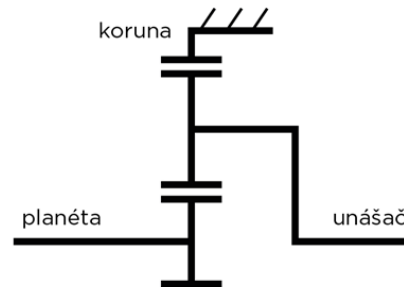
Výrobca	Plettenberg		Emrax			AMK
Typ motoru	Nova 30	Nova 50	188	208	228	DT7
Maximálny výkon [kW]	30	50	60	86	124	61,25
Menovitý výkon [kW]	-	-	37	56	75	5,3
Maximálny moment [Nm]	80	142	100	150	230	146
Menovitý moment [Nm]	-	-	56	90	130	25,5
Maximálne otáčky [ot/min]	7000	5600	8000	7000	6500	4000
Hmotnosť [kg]	5	12	8	10	13,5	20
Maximálna výkonová hustota [kW/kg]	6	4,2	7,5	8,6	9,2	2
Prevodový pomer $i^*$	5,38	4,31	6,15	5,38	5	3,08
Maximálny výstupný moment [Nm]	430,8	611,7	615	807,7	1150	422,2
Rozmery $**$ [mm]	D197, L93	D274, L135	D188, L79	D208, L85	D228, L86	D130, L330

\* Určený ako pomer maximálnych otáčok elektromotoru k maximálnym otáčkam koleša

\*\* D = priemer elektromotoru, L = dĺžka elektromotoru

### 2.3 Návrh prevodoviek

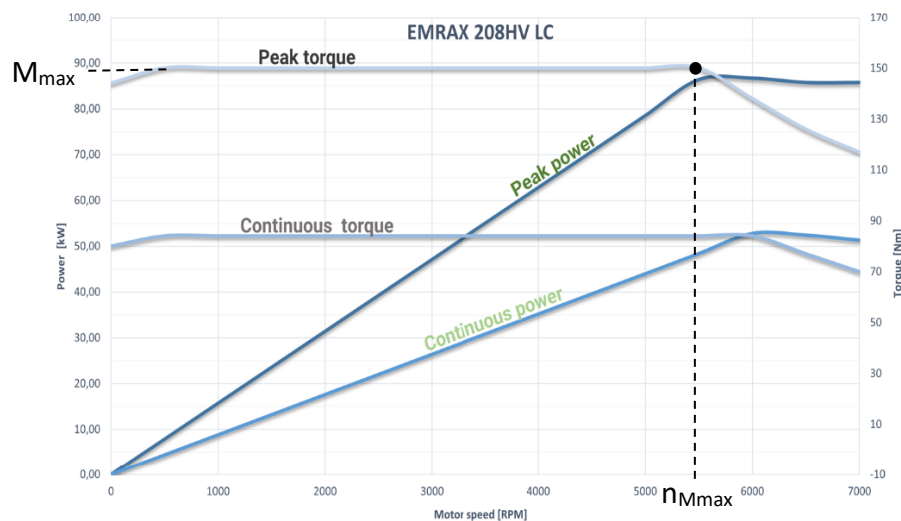
Pri návrhu prevodoviek nebol kladený dôraz na dôkladnú analýzu geometrie, namáhania prevodu, jeho účinnosti atď., ale na zistenie približných rozmerov a hmotností prevodoviek, s ktorými je potrebné počítať pri konštrukčnom riešení a pri dynamických simuláciách. Keďže má byť motor uložený v kolese, použijem planétový prevod, u ktorého je vstupný člen súosí s výstupným členom, takže motor bude v ležať v osi koleša. U všetkých motorov je uvažovaný jeden typ planétového prevodu, kde hnacím členom je planéta, ktorá je napojená na výstupný hriadeľ elektromotoru a výstupným členom prevodovky je unášač, pričom koruna je zastavená. Schéma prevodu je naznačená na obr. 17.



Obrázok 17 Schéma planétového prevodu

Pre návrh bol použitý program KISSsoft od spoločnosti KISSsoft AG. Postup výpočtu je uvedený pre názornosť len pre jeden elektromotor. Pre ostatné motory sú uvedené len výsledky výpočtov, pričom postup je u všetkých rovnaký.

Vstupnou hodnotou pre výpočet prevodovky je maximálny moment elektromotoru a maximálne otáčky, pri ktorých tento moment motor ešte dosahuje.



Obrázok 18 Výkonové a momentové krivky elektromotoru Emrax 208. Zdroj: Príloha 4

Metóda výpočtu odpovedá norme DIN 3990-41:1990, ktorá je zameraná na výpočet prevodov u automobilov. Súčiniteľ vonkajších dynamických síl je určený podľa tabuľky v Prílohe 2  $K_A = 1,25$  pre plynulé zaťažovanie hnacím strojom a zaťažovanie hnaným strojom s malou nerovnomernosťou. Materiál ozubených kolies je tvrdená oceľ 15NiCr13 a počet satelitov bol zvolený ako maximálny možný s ohľadom na to, aby bolo súkolesie možné zmontovať. U všetkých prevodoviek je použité šikmé ozubenie s uhlom sklonu zubov  $\beta = 20^\circ$ .



Pri výpočte bol braný ohľad na to, aby hodnoty základných bezpečností – bezpečnosť pre ohyb v päte zubu a bezpečnosť v dotyku, nepresiahli minimálne dovolené hodnoty. Pre príklad sú v tab.5 uvedené výsledné hodnoty bezpečnosti u prevodovky elektromotoru Emrax 208.

Tabuľka 5 Hodnoty bezpečnosti pre ohyb v päte zubu a bezpečnosti v dotyku planétového prevodu pre motor Emrax 208

	Planéta	Satelit	Koruna
Minimálna požadovaná bezpečnosť v päte zubu $S_{Fmin}$ (ohyb)	1,27		
Vypočítaná bezpečnosť $S_F$	2,04	1,31	2,2
Minimálna požadovaná bezpečnosť v dotyku na boku zubu $S_{Hmin}$	0,94		
Vypočítaná bezpečnosť $S_H$	1,11	1,11	2,14

V nasledujúcej tabuľke sú pre jednotlivé elektromotory uvedené výsledné parametre planétových prevodoviek.

Tabuľka 6 Parametre planétových prevodoviek

Elektromotor	Prevodový pomer $i$	Rozmery prevodovky* [mm]	Hmotnosť prevodovky [kg]
Nova 30	5,39	D =154, L = 18,5	1,7
Nova 50	4,35	D =110, L =23,5	1,4
Emrax 188	6,15	D =142, L =35	3
Emrax 208	5,4	D = 136, L = 27,5	2,6
Emrax 228	5	D = 170, L = 26,5	3,1
DT7	3,16	D = 167, L = 19,5	2

\* D = najväčší priemer prevodovky, L = šírka ozubenia



### 3 Simulácie pozdĺžnej dynamiky

Nasledujúca časť práce sa zaoberá možným prínosom pohonu využívajúceho „in-wheel“ motory. Na základe zjednodušenej simulácie pozdĺžnej dynamiky je vozidlo s pohonom jednej nápravy porovnané s vozidlom s oboma poháňanými nápravami – s hlavným pohonom na prednej, resp. zadnej náprave a doplnkovým pohonom na zadnej, resp. prednej náprave. Sledovanými dejmi sú akcelerácia a brzdenie s využitím brzdných síly elektromotoru, a to na rovinnom povrchu, bez stúpania, s uvažovaním valivého odporu a odporu vzduchu. Simulácia bola uskutočnená pre oba typy zadaných vozidiel – pre sedan a vozidlo SUV.

V nasledujúcej tabuľke sú uvedené parametre oboch vozidiel. Vstupnými hodnotami pre elektromotory sú ich momentové krivky.

Tabuľka 7 Vstupné hodnoty pre simulačné modely

	Sedan	SUV
m [kg]	1600	2200
m <sub>zadná_náprava</sub>	52%	
r [m]	0,318	0,37
h [m]	0,508	0,558
L [m]	2,75	2,85
l1 [m]	1,43	1,482
l2 [m]	1,32	1,368
C <sub>x</sub> [-]	0,25	0,25
S <sub>x</sub> [m <sup>2</sup> ]	2,4	2,6
ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	1,17	
μ [-]	1	
f [-]	0,01	

#### 3.1 Simulácia akcelerácie

Diferenciálna rovnica popisujúca tento dej má tvar:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F_F + F_R - R_a - R_v \quad (4)$$



Po úprave:

$$\frac{d^2x}{dt^2} - \frac{F_F}{m} - \frac{F_R}{m} + \frac{R_a}{m} + \frac{R_v}{m} = 0, \quad (5)$$

kde jednotlivé členy rovnice predstavujú:

$$F_F = \mu \cdot \left[ \frac{l_2}{L} m \cdot g - \frac{h}{L} (F_{mf} + F_{mr}) \right] \dots \text{hnacia sila na prednej náprave} \quad (6)$$

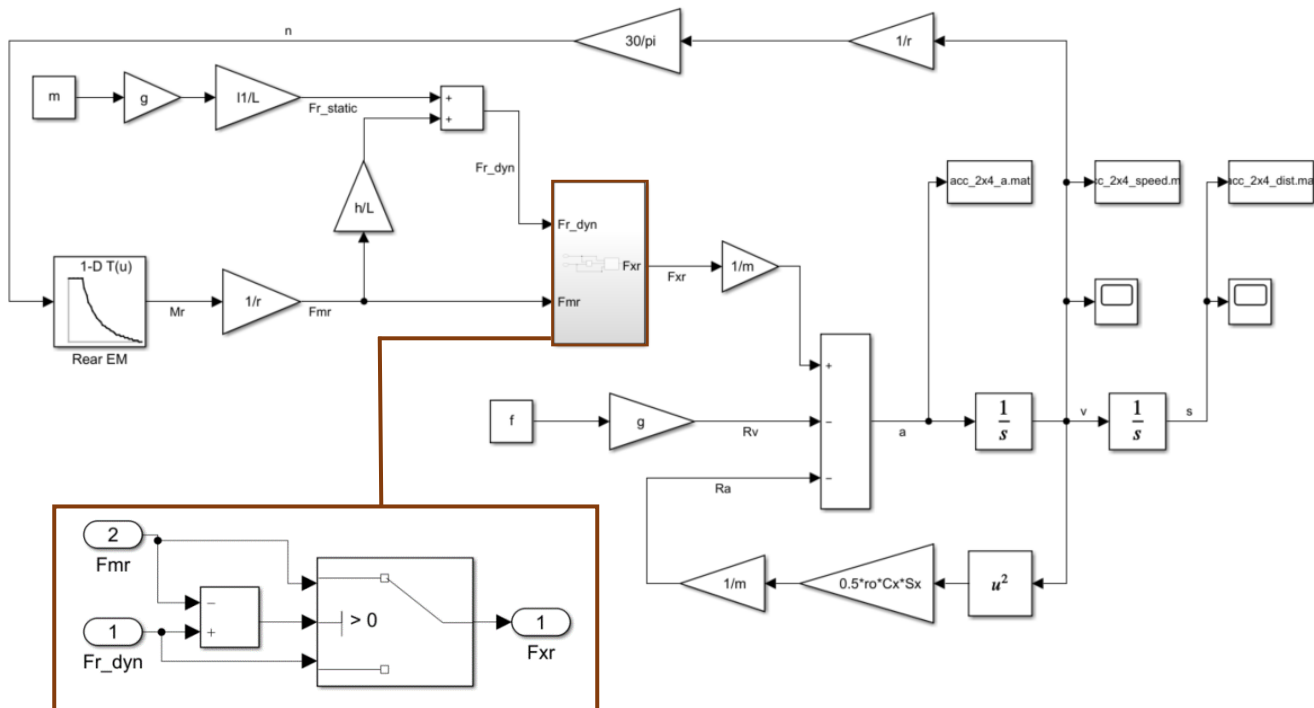
$$F_R = \mu \cdot \left[ \frac{l_1}{L} m \cdot g + \frac{h}{L} (F_{mf} + F_{mr}) \right] \dots \text{hnacia sila na zadnej náprave}, \quad (7)$$

kde  $F_{mf}$  a  $F_{mr}$  sú hnacie sily od elektromotorov a člen v hranatej zátvorke predstavuje dynamické zaťaženie. [24]

$$R_a = \frac{1}{2} \rho \cdot C_x \cdot S_x \cdot v^2 \dots \text{odpor vzduchu}, \quad (8)$$

$$R_v = f \cdot m \cdot g \dots \text{valivý odpor vozidla}, \quad (9)$$

Na základe vzťahov uvedených vyššie bol zostavený simulačný model uvedený na obr. 19, ktorý platí pre vozidlo s pohonom jednej nápravy, v tomto prípade zadnej.



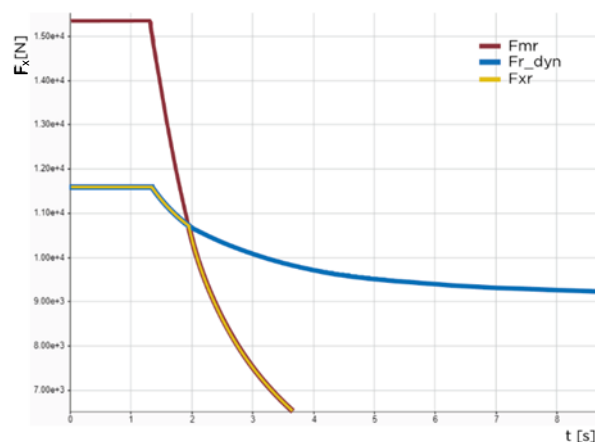
Obrázok 19 Simulačný model akcelerácie pre vozidlo s pohonom zadnej nápravy





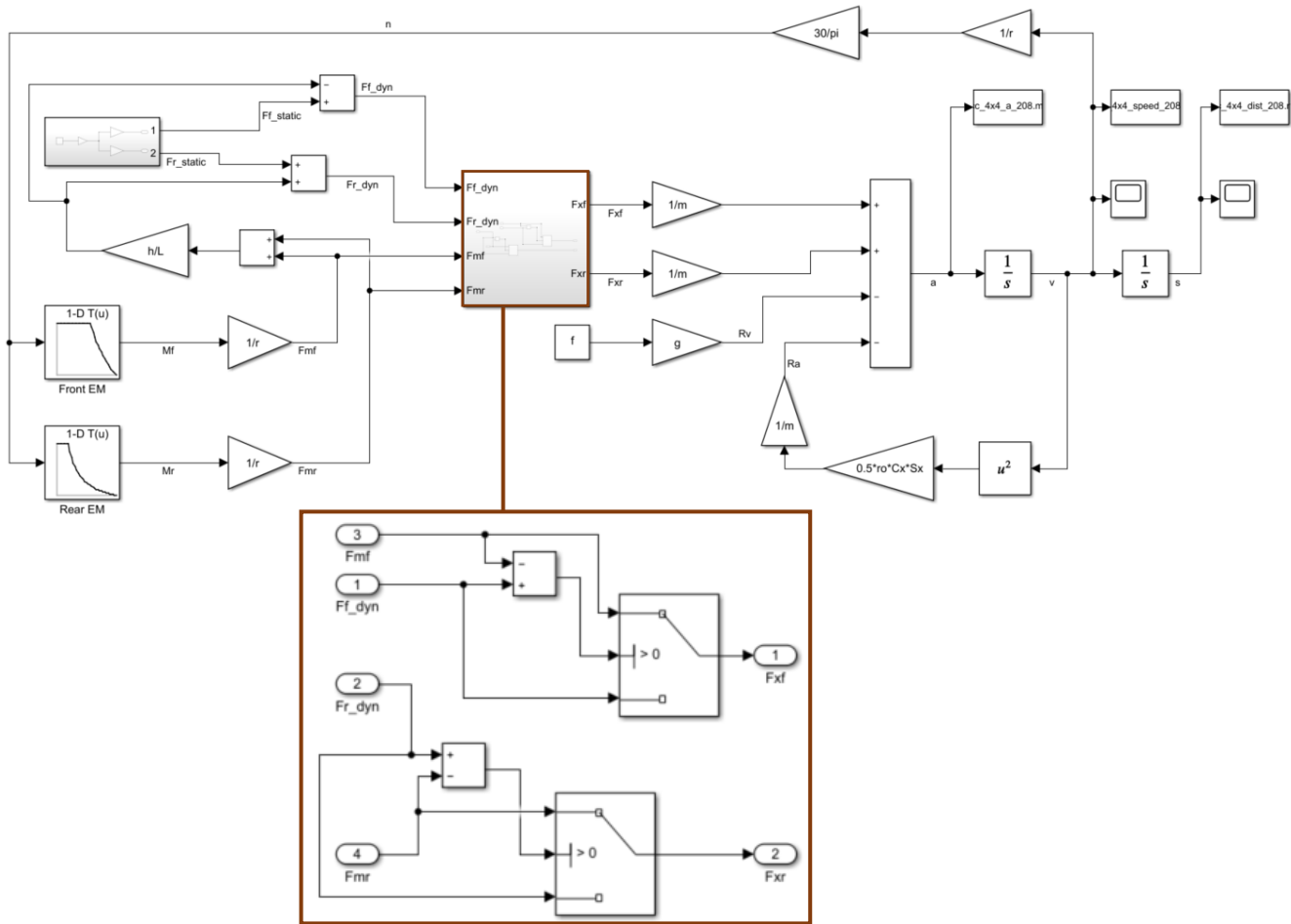
V prípade, že by bol hnací moment elektromotoru tak vysoký, že pneumatiky by ho už nedokázali preniesť, došlo by k preklzu. Aby táto situácia nenastala, v modeli je vložená podmienka obmedzenia hnacej sily maximálnou adhéziou, ktorá je daná dynamickým zaťažením  $F_{z\_dyn}$  a súčiniteľom trenia  $\mu$ . Ak nastane stav, že hnacia sila  $F_x$  bude vyššia než maximálna prenesiteľná sila, hnacia sila sa obmedzí tak, aby platil vzťah (10). Pribeh hnacej sily  $F_{xr}$  je vidieť na obr. 20. V prvej časti je obmedzená maximálnou silou  $F_{r\_dyn}$ , ktorú je možné preniesť, v ďalšej časti už elektromotor nemá dostatočný moment na prekonanie trakcie a hnacia sila odpovedá sile elektromotoru.

$$F_x = \mu \cdot F_{z\_dyn} \quad (10)$$



Obrázok 20 Pribeh hnacej sily pri akcelerácii vozu

Simulačný model pre vozidlo s pohonom oboch náprav (obr. 21) je o niečo zložitejší. Do pôvodne nehnanej nápravy je zakomponovaný doplnkový pohon. Model je na oboch nápravách doplnený adhéznym obmedzením (zobrazené v detaile). K hmotnosti vozidla je pripočítaná hmotnosť elektromotorov s prevodovkami.



Obrázok 21 Simulačný model akcelerácie pre vozidlo s pohonom oboch náprav

### 3.2 Simulácia brzdenia s využitím brzdného momentu elektromotoru

Simulačný model vychádza z modelu akcelerácie a platia preň rovnaké predpoklady. K brzdению dochádza pri rýchlosti 100km/h a brzdí sa do úplného zastavenia. Predpokladám, že batarka je schopná rekuperovať všetok výkon a hodnota brzdného momentu je preto rovná hnaciemu momentu elektromotoru. V modeli je taktiež vložené adhézne obmedzenie.

Je potrebné poznamenať, že situácia, v ktorej by vozidlo využívalo k čo najrýchlejšiemu zastaveniu len rekuperačné brzdění je čisto teoretická a v reálnej prevádzke by sa v prípade nutnosti v krízových situáciách samozrejme použili k úplnému zastaveniu vozidla mechanické brzdy. Cieľom tejto simulácie je porovnať, aký prínos má prídavný pohon v porovnaní s využitím rekuperácie samotného hlavného pohonu.



Diferenciálna rovnica popisujúca tento dej:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -F_F - F_R - R_a - R_v \quad (11)$$

Po úprave:

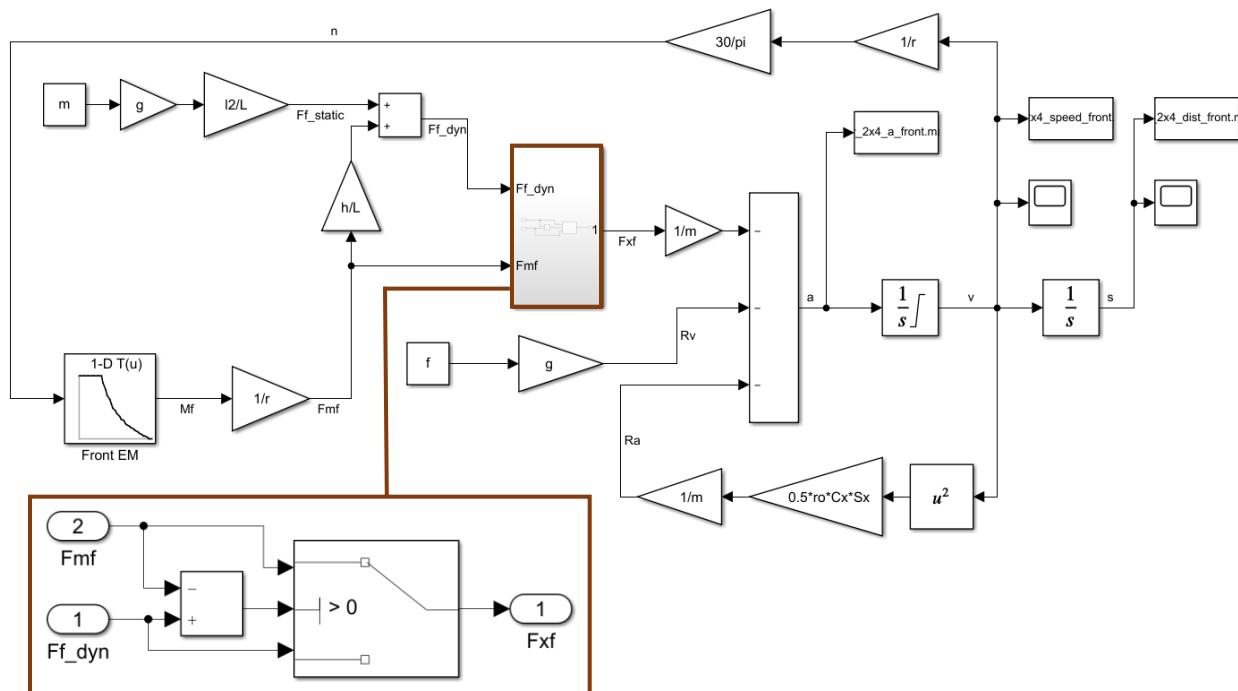
$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{F_F}{m} + \frac{F_R}{m} + \frac{R_a}{m} + \frac{R_v}{m} = 0, \quad (12)$$

kde hnacie, resp. brzdné sily majú tvar:

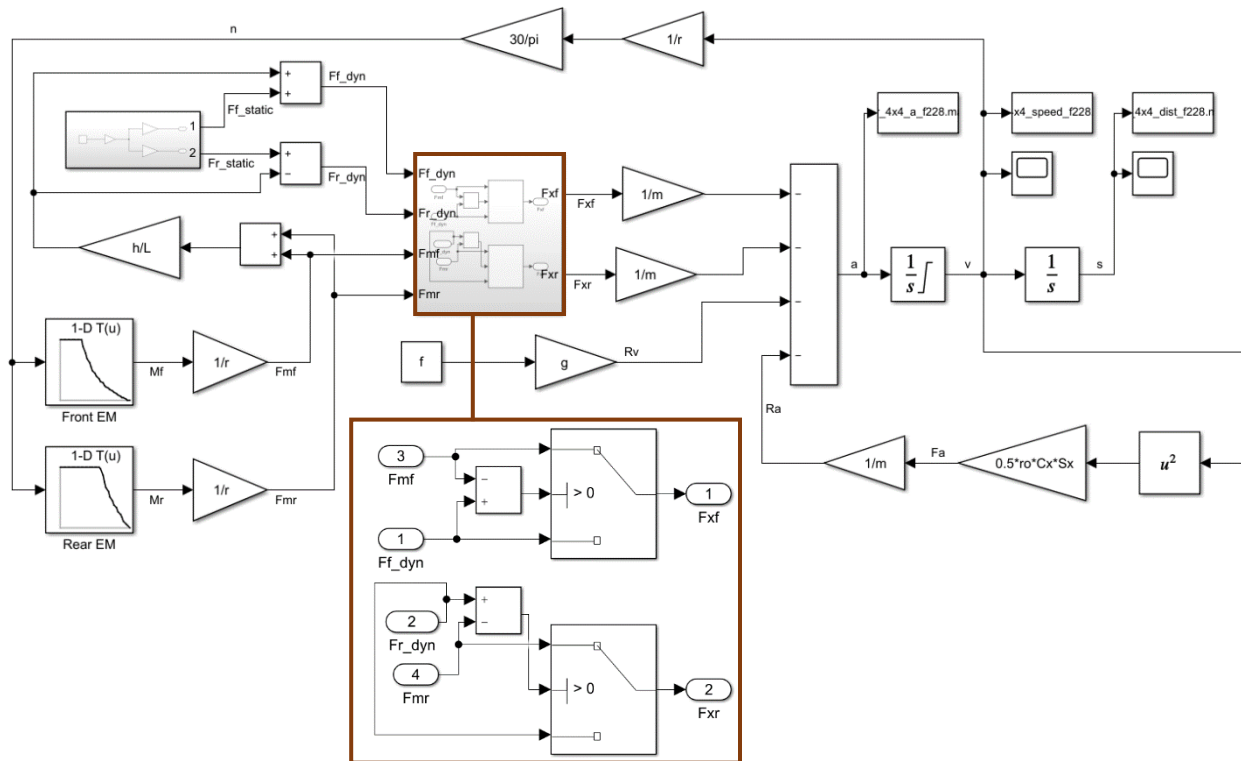
$$F_F = \mu \cdot \left[ \frac{l_2}{L} m \cdot g + \frac{h}{L} (F_{mf} + F_{mr}) \right] \quad \dots \text{brzdná sila na prednej náprave} \quad (13)$$

$$F_R = \mu \cdot \left[ \frac{l_1}{L} m \cdot g - \frac{h}{L} (F_{mf} + F_{mr}) \right] \quad \dots \text{brzdná sila na zadnej náprave}, \quad (14)$$

Na obr. 22 je zobrazený simulačný model pre vozidlo s poháňanou jednou nápravou, s hlavným pohonom na prednej náprave a na obr. 23 simulačný model pre vozidlo s obomi poháňanými nápravami, s hlavným pohonom na prednej náprave a doplnkovým pohonom na zadnej náprave. V detaile je znázornená adhézna podmienka. [24]



Obrázok 22 Simulačný model brzdenia pre vozidlo s pohonom prednej nápravy



Obrázok 23 Simulačný model brzdenia pre vozidlo s pohonom oboch náprav

### 3.3 Výsledky simulácií

Pri vyhodnotení vypočítaných dát je dôležité myslieť na to, že použité výpočtové modely sú zjednodušené a slúžia len pre porovnanie niekoľkých variant medzi sebou.

Pri tvorení modelov sa zanedbala citlivosť pneumatiky na zmenu vertikálneho zaťaženia. Z dodaných dát k pneumatikám bola v danom rozsahu vertikálneho zaťaženia pri dynamických i statických stavoch zistená zmena súčiniteľa trenia pneumatiky v rozsahu v ráde stotín. Takáto presnosť nebola pre výpočet potrebná, a preto sa pre zachovanie jednoduchosti modelu tento jav zanedbal.

Vplyv doplnkového pohonu na pozdĺžnu dynamiku vozidla je hodnotený na základe toho, za aký čas a vzdialenosť dosiahne vozidlo pri akcelerácii z nulovej rýchlosti rýchlosť 100km/h a pri brzdení, za aký čas a vzdialenosť z tejto rýchlosti vozidlo zastaví. Výsledné hodnoty akcelerácie pre jednotlivé typy pohonu a zvolené elektromotory sú uvedené v nasledujúcej tabuľke. Grafy závislostí dráhy, rýchlosti a zrýchlenia na čase pre oba deje sa nachádzajú v Prílohe 6.



Tabuľka 8 Výsledné hodnoty simulácií akcelerácie

Akcelerácia - hlavný pohon <u>vzadu</u>								
	Elektromotor	2x4	4x4 Emrax 188	4x4 Emrax 208	4x4 Emrax 228	4x4 Nova 30	4x4 Nova 50	4x4 DT7
Sedan	Dráha [m]	74,9	50,4	46,4	46,9	56,5	50,7	55,9
	Percentuálne zlepšenie* [%]		32,7	38	37,3	24,5	32,2	25,4
	Čas [s]	4,92	3,37	3,15	3,17	3,74	3,39	3,71
	Percentuálne zlepšenie* [%]		31,6	36,1	35,6	24	31,2	24,6
SUV	Dráha [m]	101,3	72,4	66,6	58,3	79,3	72,9	79,3
	Percentuálne zlepšenie* [%]		28,5	34,3	42,4	21,7	28	21,8
	Čas [s]	6,54	4,82	4,46	3,94	5,24	4,85	5,24
	Percentuálne zlepšenie* [%]		26,3	31,8	39,8	20	25,8	19,9
Akcelerácia - hlavný pohon <u>vpredu</u>								
Sedan	Dráha [m]	109,2	68,7	61,9	52,5	78,3	69,1	76,5
	Percentuálne zlepšenie* [%]		37,1	43,3	51,9	28,3	36,7	29,9
	Čas [s]	7,69	4,93	4,45	3,79	5,56	4,96	5,47
	Percentuálne zlepšenie* [%]		35,9	42,1	50,7	27,7	35,6	28,9
SUV	Dráha [m]	144,8	93,1	83,7	71,2	104,3	93,7	103,5
	Percentuálne zlepšenie* [%]		35,7	42,2	50,9	28	35,3	28,5
	Čas [s]	10,03	6,54	5,9	5,03	7,3	6,58	7,26
	Percentuálne zlepšenie* [%]		34,8	41,2	49,9	27,2	34,4	27,6

\*Percentuálne zlepšenie v porovnaní s pohonom 2x4 (tj. vozidlom s jednou poháňanou nápravou)

Z uvedených hodnôt je zrejmé, že doplnkový pohon má výrazný vplyv na zlepšenie pozdĺžnej dynamiky vozidla. Všeobecne najvýraznejšie je to vidieť u vozidiel s hlavným pohonom vpredu, kde najväčšia zmena nastáva očakávane u elektromotoru s najvyšším výkonom. Vozidlo s hlavným pohonom vpredu využívajúce v doplnkovom pohone elektromotor Emrax 228 môže oproti variante s jednou poháňanou nápravou dosiahnuť rýchlosť 100km/h už za polovičný čas a vzdialenosť. Ďalej môžeme vidieť, že motory Emrax dosahujú v porovnaní s ostatnými motormi lepšie výsledky, čo bude dôležitým parametrom pri výbere motorov pre konštrukčné riešenie.



Naopak najslabšie výsledky dosahujú motory Nova 30 a DT7. Zvýšenú hmotnosť u vozidiel SUV je vidieť na dlhších dráhach a časových intervaloch pre dosiahnutie rýchlosti 100km/h, ale pri pohľade na percentuálne zlepšenie pri použití doplnkového pohonu je zmena podobná ako u sedanu. Využitie doplnkového pohonu je teda vhodné pre oba typy vozidiel.

Výsledné hodnoty simulácií rekuperačného brzdzenia sú uvedené v tab. 9.

Tabuľka 9 Výsledné hodnoty simulácií brzdzenia

Brzdzenie - hlavný pohon <u>vzadu</u>								
	Elektromotor	2x4	4x4 Emrax 188	4x4 Emrax 208	4x4 Emrax 228	4x4 Nova 30	4x4 Nova 50	4x4 DT7
Sedan	Dráha (0-100) [m]	93,8	63,3	57,5	49,6	70,6	63,5	69,3
	Percentuálne zlepšenie* [%]		32,5	38,7	47,2	24,7	32,3	26,1
	Čas ( 0-100) [s]	7,05	4,7	4,26	3,66	5,24	4,72	5,16
	Percentuálne zlepšenie* [%]		33,3	39,6	48,1	25,7	33	26,8
SUV	Dráha (0-100) [m]	99,5	73,6	68,1	60,3	79,8	73,8	79,4
	Percentuálne zlepšenie* [%]		26,1	31,5	39,5	19,8	25,8	20,2
	Čas ( 0-100) [s]	6,92	5,22	4,86	4,32	5,63	5,24	5,6
	Percentuálne zlepšenie* [%]		24,6	29,8	37,6	18,6	24,3	19,1
Brzdzenie - hlavný pohon <u>vpredu</u>								
Sedan	Dráha (0-100) [m]	88,2	57,4	51,9	49,1	65	57,9	64
	Percentuálne zlepšenie* [%]		34,9	41,2	44,3	26,3	34,4	27,5
	Čas ( 0-100) [s]	6,05	4,01	3,63	3,47	4,49	4,04	4,45
	Percentuálne zlepšenie* [%]		33,7	40	42,6	25,8	33,2	26,4
SUV	Dráha (0-100) [m]	128,2	86	78,1	67	95,5	86,5	95
	Percentuálne zlepšenie* [%]		32,9	39,1	47,8	25,5	32,5	25,9
	Čas ( 0-100) [s]	9,06	6,12	5,56	4,78	6,78	6,16	6,75
	Percentuálne zlepšenie* [%]		32,5	38,6	47,2	25,2	32	25,5

\*Percentuálne zlepšenie v porovnaní s pohonom 2x4 (tj. vozidlom s jednou poháňanou nápravou)



Podobne ako u akcelerácie, i pri brzdení vidíme výrazné zlepšenie dynamických vlastností v dôsledku využitia rekuperácie doplnkovým pohonom. V tomto prípade je u oboch vozidiel výhodnejšie použiť doplnkový pohon na zadnej náprave. Vozidlo s hlavným pohonom vzadu nedokáže kvôli odľahčeniu zadnej nápravy preniesť všetok brzdný moment motoru, aby nedošlo k zablokovaniu kolies a doplnkový pohon umiestnený na prednej náprave má nízky výkon, takže nie je využitý celý potenciál pneumatiky. Naopak u vozidla s hlavným pohonom vpredu sa nedostaneme na limit trakcie ani na jednej náprave a môžeme tak využívať plný brzdný moment všetkých motorov. U vozidla SUV je možné všimnúť si rozdiel medzi hlavným pohonom v zadnej a prednej náprave u motoru Emrax 228 až 10%, a to aj napriek tomu, že hlavný pohon na prednej náprave má takmer o polovicu nižší maximálny moment než na zadnej náprave.

Medzi výhodami doplnkového pohonu v úvode práce bol v porovnaní s pohonom 4WD spomenutý väčší batožinový priestor, ktorý by sa taktiež mohol použiť na rozšírenie batérie. Z výsledkov simulácií je vidieť, že rekuperácia prídavným pohonom má nezanedbateľný prínos na celkovú rekuperovanú energiu. Tým, že by sa do baterky regenerovalo viac energie, mohla by sa teoreticky jej kapacita naopak znížiť, čím by sa znížila aj jej hmotnosť a rozmery. To však závisí na parametroch samotnej batérie a na tom, koľko energie je do nej možné regenerovať.



## 4 Konštrukčné prevedenie

### 4.1 Zadanie

Na základe návrhových výpočtov a simulácií pozdĺžnej dynamiky boli vybrané elektromotory zakomponované do modelov zadaných náprav. Pre konštrukčné prevedenie boli zadané tri typy náprav - predná náprava lichobežníková, predná náprava typu McPherson a zadná náprava s vlečenými ramenami a torznou tyčou. Je požadované, aby sa jednotlivé diely zadaných náprav menili čo najmenej, ako to je možné. Cieľom je vytvoriť jednotku, ktorá by sa pripojila k už existujúcej kolovej skupine bez toho, aby bolo nutné meniť jej okolité časti. Ďalej je požadované, aby sa nemenila poloha kinematických bodov nápravy, aby bola zachovaná jej návrhová funkčnosť.

V návrhovej časti sa zvolilo šesť elektromotorov, ktoré by mohli byť vhodné pre túto aplikáciu. Vzhľadom na to by bolo na mieste vytvoriť si rozhodovaciu tabuľku, pomocou ktorej by sa na základe rozhodovacích kritérií, ako napr. výsledky pozdĺžnych simulácií, výkonové parametre motorov, ich hmotnosť a rozmery, vybral najvhodnejší motor. Po vložení jednotlivých elektromotorov do zadaných náprav sa však dospelo k názoru, že toto nie je potrebné, pretože pre každý typ nápravy je vhodný iný typ elektromotoru a výber pre každú nápravu sa tak zúžil na pár motorov. Vo všeobecnosti sa stačí pozrieť na zvolené motory, ktoré možno rozdeliť na dve skupiny – tzv. „pancake motory“ s väčším priemerom a menšou dĺžkou (motory Emrax a Nova) a motor s malým priemerom, ale väčšou dĺžkou (DT7).

Elektromotory od výrobcu Emrax sú tzv. „out-runners“ a ich zástavba je z pohľadu uchytenia motoru zložitejšia než u motorov Nova, ktoré sú naopak tzv. „in-runners“. Napriek tomu motory Emrax dosahujú podstatne vyššie výkonové parametre pri nižších alebo rovnakých rozmerových a hmotnostných parametroch ako motory Nova. Preto sa v prípade použitia „pancake motoru“ zvolil na základe dostupného zástavbového priestoru vhodný motor Emrax a len v prípadoch, v ktorých to nebolo konštrukčne možné, sa použili motory Nova.

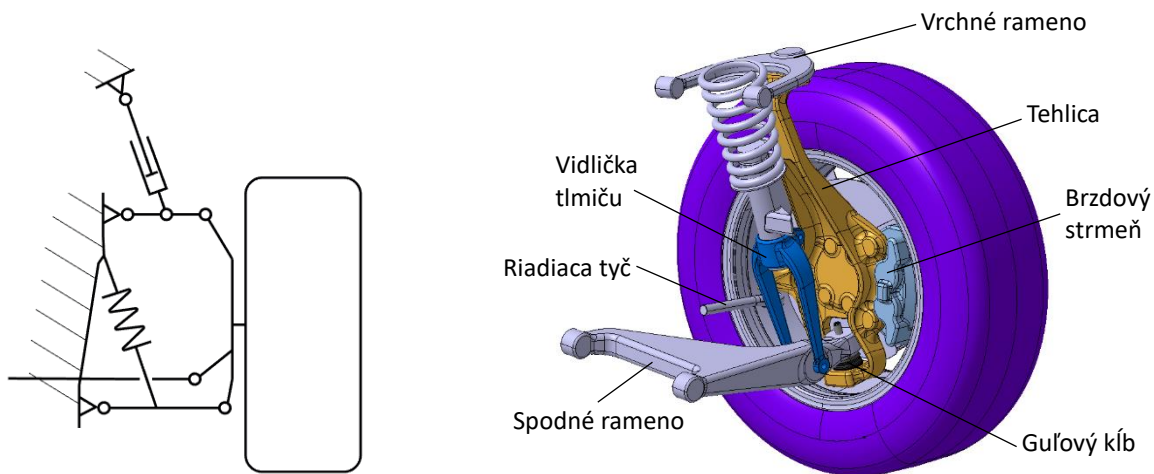




Pretože pri väčšine koncepčných návrhov došlo k posunutiu alebo zmene ložísiak v náboji kolesa, pri každom návrhu bol vykonaný kontrolný výpočet ložísiak. Keďže sa jedná o koncepty, kontrolné výpočty sú obmedzené len na zistenie statickej bezpečnosti pri namáhaní od zvislej sily pri brzdení vozidla u predných náprav a akcelerácie vozidla u zadných náprav. Zároveň sa pri výpočte berie do úvahy axiálna sila generovaná šikmým ozubením prevodovky. Spočítané ekvivalentné statické zaťaženie je následne porovnané so statickou únosnosťou ložiska.

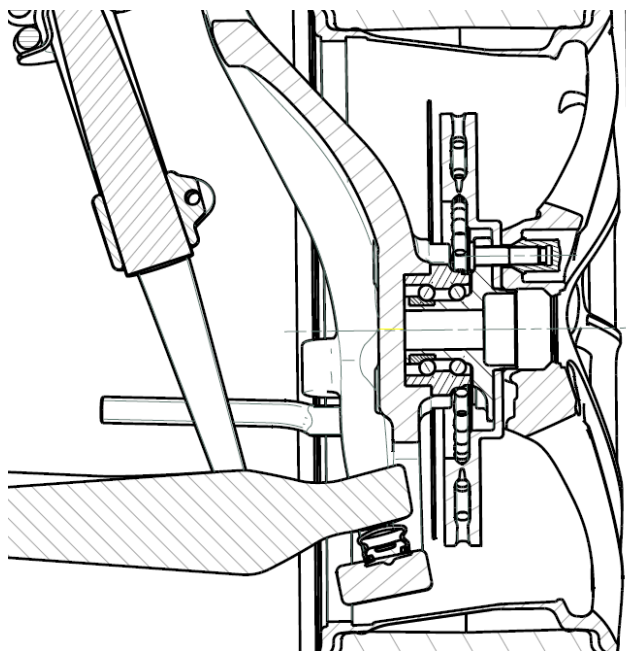
## 4.2 Predná lichobežníková náprava

V súčasnosti je to jeden z najpoužívanějších typov konštrukcií pre prednú nápravu u drahších a športovejšie ladených vozidiel, pretože eliminuje nedostatky ostatných typov náprav a umožňuje dosiahnutie vysokej výkonnosti pri minimálnej nutnosti kompromisov. Jej kinematickú schému a konkrétnu zadanú nápravu s popisom hlavných častí je možné vidieť na obr. 24. [26]



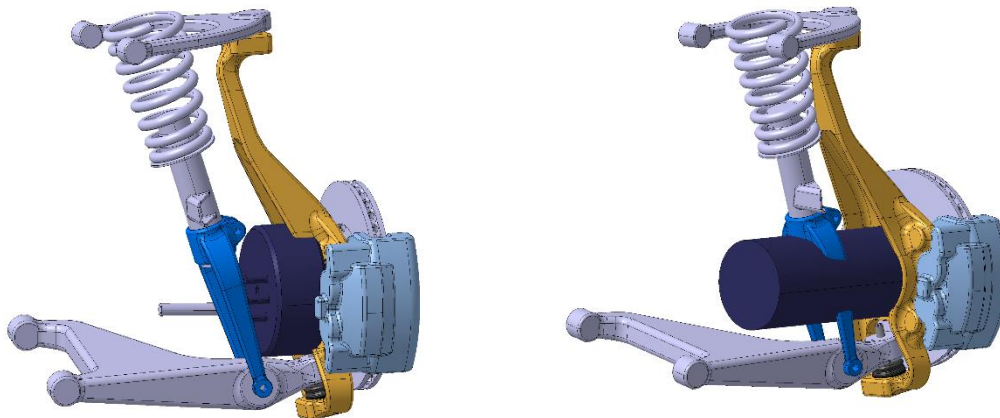
Obrázok 24 Kinematická schéma lichobežníkovej nápravy a konkrétna zadaná náprava s popísanými hlavnými časťami

Na nasledujúcom obrázku je zobrazený rez zostavy stredom kolesa. Do tohto typu konštrukcie bolo zo zadaných náprav najzložitejšie zakomponovať elektromotor, a to najmä kvôli odpruženiu, ktoré zasahuje do veľkej časti zástavbového priestoru medzi kolovou skupinou a karosériou.



Obrázok 25 Rez zadanou lichobežníkovou nápravou

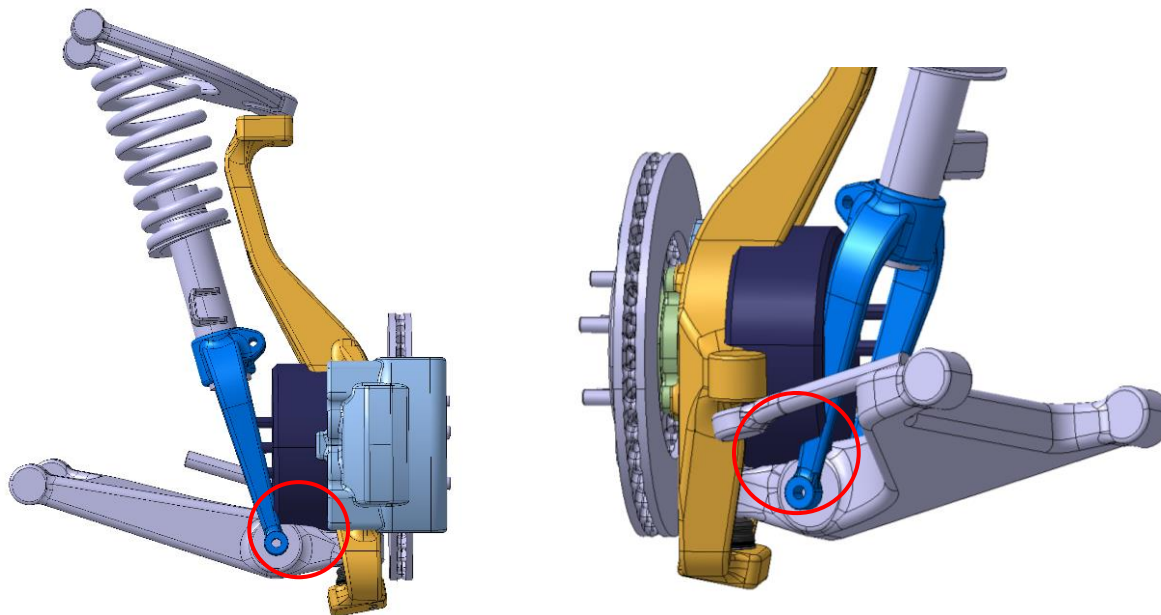
Do modelu nápravy boli spolu s odpovedajúcimi prevodovkami vložené oba typy vybraných elektromotorov – na obr. 26 jeden z „pancake“ motorov, v tomto prípade výkonovo a rozmerovo prostredný Emrax 208 a motor DT7. Ako už bolo spomenuté v úvode tejto kapitoly, požiadavkou je pripojiť elektromotor s prevodovkou k náprave s minimálnymi zmenami na jednotlivých dieloch nápravy. Oba motory boli preto pre prvotné zistenie zástavby napozicované za ložiskovú jednotku, do osy kolesa. Z uvedených obrázkov je zrejmé, že pre prípad lichobežníkovej nápravy je výhodnejšie použiť krátky motor s väčším priemerom. Hlavným dôvodom je kolízia motoru DT7 s vidličkou tlmiču, ktorú by v dôsledku natáčania kolesa nebolo možné odstrániť, a to ani prípadným vyosením motoru mimo os kolesa.



Obrázok 26 Elektromotory vsadené do lichobežníkovej nápravy – vľavo Emrax 208, vpravo DT7



Tento problém čiastočne nastáva i u druhého motoru, a to najmä v stave, kedy je koleso vo vypružení a so zatáčaním sa toto zhoršuje, kedy elektromotor zároveň kolидуje so spodným ramenom.



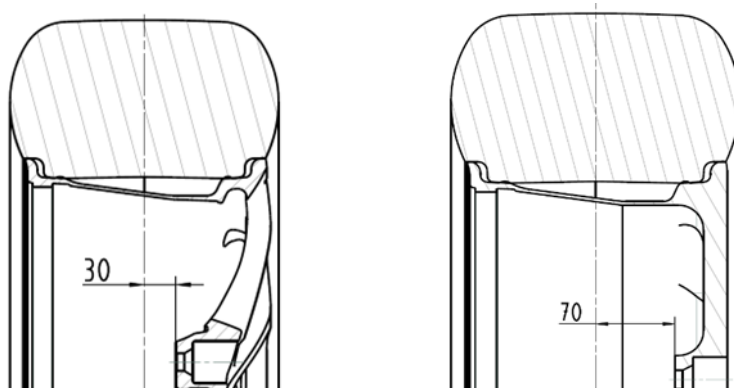
Obrázok 27 Elektromotor Emrax 208 vsadený do lichobežníkovej nápravy s vyznačenými kolíziami

Kolízie elektromotoru s vidličkou tlmiču a spodným ramenom je možné odstrániť, ak by sa motor posunul viac dovnútra kolesa. Ďalším problémom u tohto motoru avšak je, že zasahuje až k uchyteniu guľového kĺbu v spodnom ramene. Vyriešiť to môžeme vyosením elektromotoru nad os kolesa alebo použitím najmenšieho motoru Emrax 188. Týmto dvom možnostiam odpovedajú dva koncepty pre lichobežníkovú nápravu.



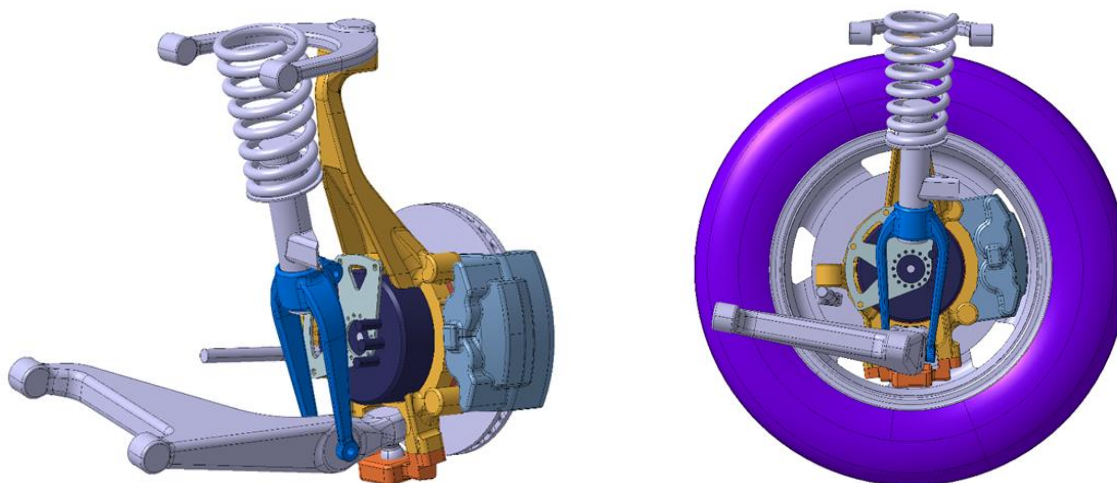
#### 4.2.1 Lichobežníková náprava – koncept č.1

V prvom koncepte sa použil elektromotor Emrax 188, ktorý bolo potrebné umiestniť čo najviac dovnútra kola. Pre dosiahnutie toho sa ako prvý upravil disk kola, u ktorého sa zmenil jeho zális z pôvodnej hodnoty ET30 na hodnotu ET70 (obr. 28).



Obrázok 28 Disk kola s pôvodnou a upravenou hodnotou zálisu

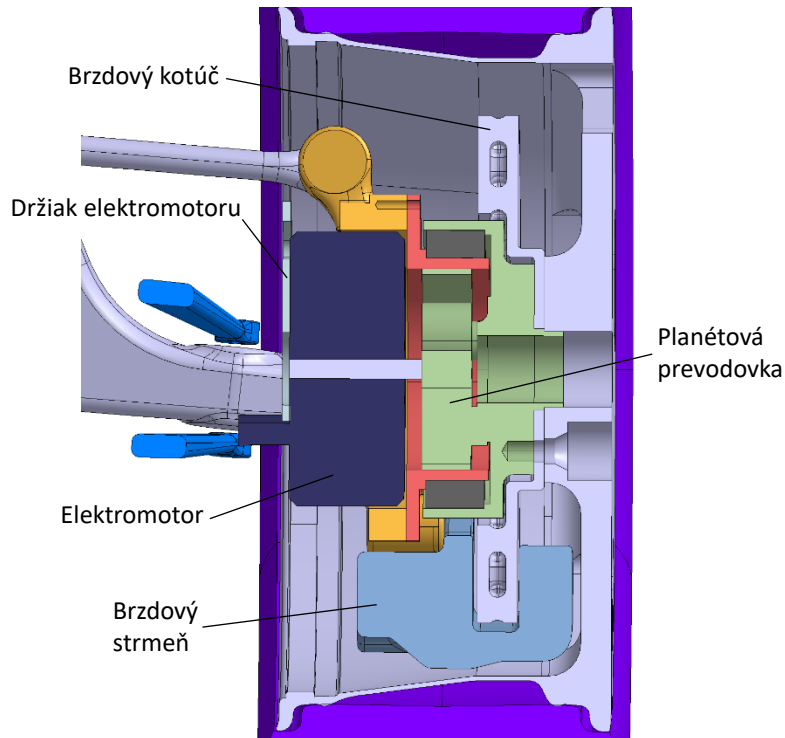
Touto zmenou sa však uvedené kolízie úplne neodstránili, a preto bolo potrebné zasunúť motor ešte viac do kola. Ložiskovú jednotku preto nebolo možné zachovať a muselo sa použiť dvojradové guľčkové ložisko s kosouhlým stykom s priemerom vnútorného krúžku väčším než je priemer koruny planétovej prevodovky, ako je to znázornené na obr. 30. Vnútny krúžok ložiska je nasadený na tehlicu, vonkajší krúžok je na strane unášaču planétovej prevodovky. Aby unášač nezasahoval do brzdového strmeňu bolo zároveň nutné prepočítať planétovú prevodovku, aby mala menší priemer. Napriek tomu sa musel brzdový kotúč zväčšiť a brzdový strmeň posunúť o 14,5mm bližšie k disku kola.



Obrázok 29 Lichobežníková náprava – koncept č.1 s elektromotorom Emrax 188



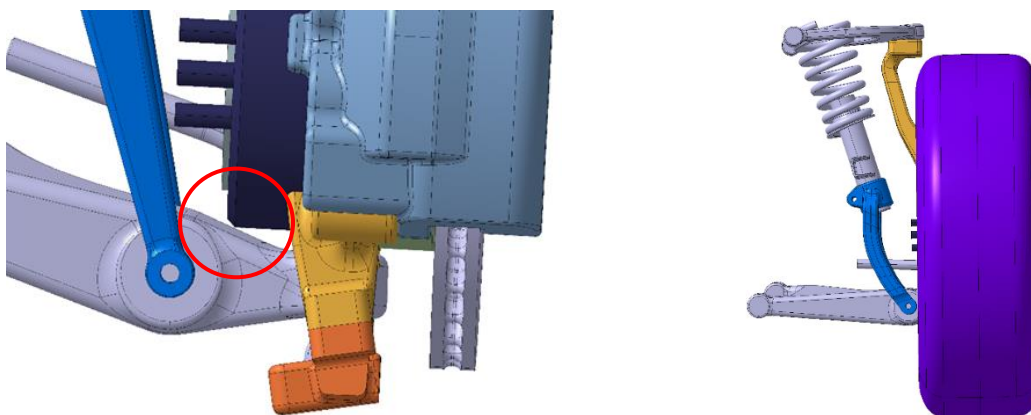
Aby bola kolová zostava zmontovateľná, časť tehlice, na ktorej je nasadený vnútorný krúžok ložiska (na obr. 30 je táto časť znázornená červene) je od tehlice oddelená a je k nej prišróbovaná. Stator elektromotoru je k tehlici uchytený pomocou držiaku na zadnej strane motoru.



Obrázok 30 Lichobežníková náprava – koncept č.1 s elektromotorom Emrax 188, rez stredom kola

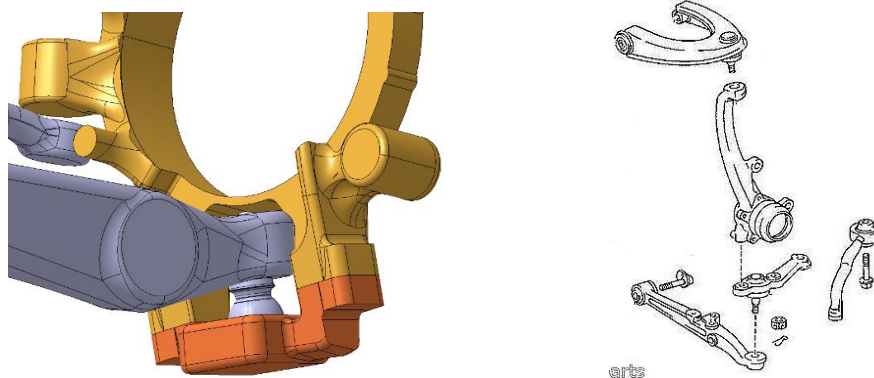
Po úprave kolovej skupiny sa už podarilo elektromotor posunúť dostatočne blízko k stredu kola a eliminovať tak väčšinu kolízií. Pri zadanom maximálnom vypružení a súčasnom maximálnom zatáčaní kola už motor nekoliduje s vidličkou tmiču, ale stále je pri určitom stave v dotyku so spodným ramenom. Toto by šlo odstrániť buď úpravou spodného ramena alebo posunutím úchytného bodu tmiču na spodnom ramene smerom k stredu auta, čo by ale znamenalo zmenu v prevodovom pomere medzi pohybom kola a pohybom odpruženia.

V prípade, ak by sme chceli zväčšiť maximálne natočenie kolies a využiť tak výhodu elektromotorov v koliesach, vďaka ktorým nie je natočenie kolies obmedzené maximálnym dovolených natočením homokinetického kĺbu, mohla by sa použiť ohnutá vidlička tmiču, ako je to vidieť na obr. 31.



Obrázok 31 vľavo – dotyk elektromotoru so spodným ramenom pri vyvesení kolesa a súčasnom zatáčaní, vpravo – pohľad na zostavu v základnej pozícii spredu

Ďalším problémom tohto riešenia je vzdialenosť motoru od guľového kĺbu v spodnom ramene. Napriek tomu, že sa použil veľkostne najmenší elektromotor, nie je medzi ním a spodným ramenom dostatok miesta pre uchytenie guľového kĺbu. Tehlica by tak musela byť v spodnej časti rozdelená a guľový kĺb by bol do tejto časti vsadený. Rovnako by to muselo byť riešené i na strane spodného ramena, ktoré by bolo delené podobne ako na obr. 32. Guľový kĺb by sa tak prišróboval na jednej strane k tehlici a na druhej strane k spodnému ramenu.



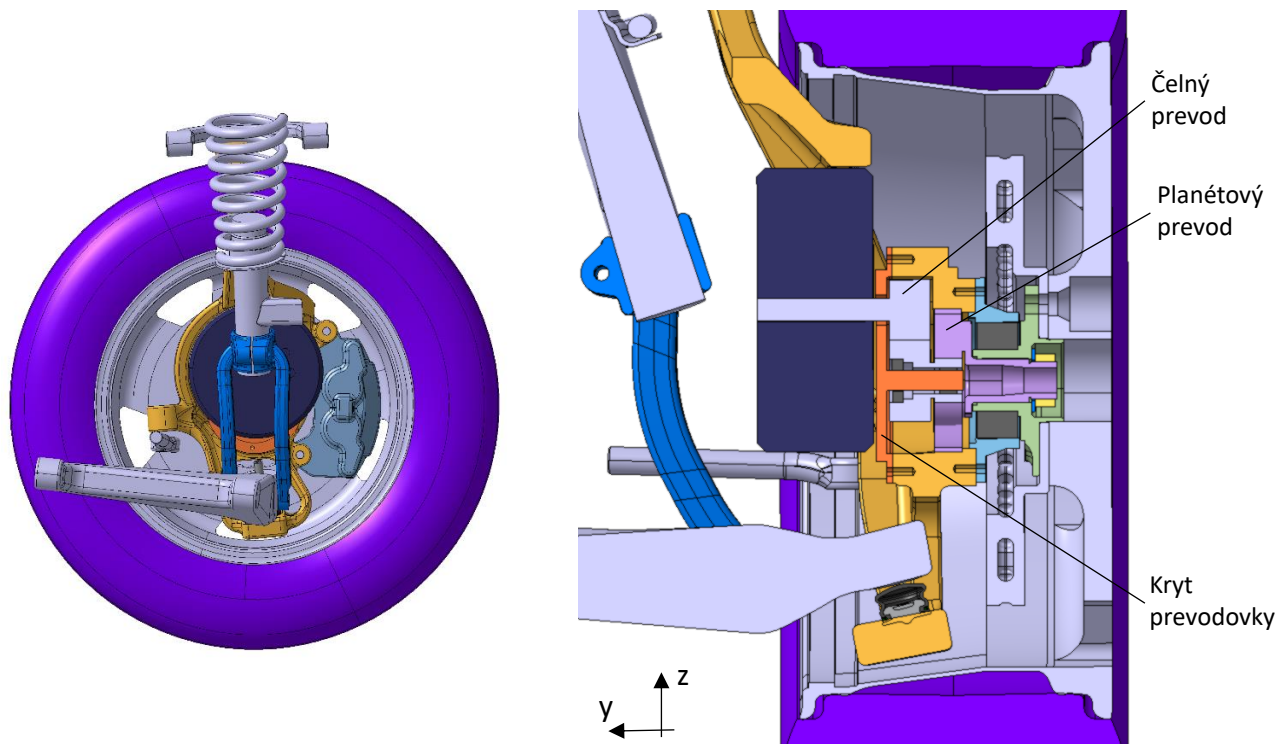
Obrázok 32 vľavo – detail rozdelenej tehlice, vpravo – ukážka deleného spodného ramena u vozu Lexus IS200 [25]

Problematickou časťou je taktiež mazanie prevodovky a jej zakrytie a utesnenie, aby nedochádzalo k prenikaniu nečistôt a úniku oleju. U elektromotoru typu „out-runner“ sa otáča jeho vonkajšia časť, a preto by musela byť prevodovka utesnená na výstupnej hriadeľi elektromotoru. Zo strany unášaču by sa v jeho stredovom otvore použila jednoduchá krytka. Vhodným riešením tohto problému, ale taktiež z pohľadu namáhania nie optimálneho uchytenia statoru pomocou držiaku, by mohlo byť použitie elektromotoru typu „in-runner“, ktorého plášť by mohol byť priamo súčasťou tehlice.



#### 4.2.2 Lichobežníková náprava – koncept č.2

U druhého konceptu tohto typu nápravy je oproti prvému konceptu elektromotor posunutý voči osi kola o 50mm v smere osi Z. Touto úpravou sa odstráni kolízia elektromotoru s uchytením guľového kĺbu v spodnom ramene a mohol sa tak použiť väčší motor Emrax 208. Rez zostavou je znázornený na obr. 33. Prevod momentu z výstupnej hriadele elektromotoru k náboju zabezpečuje prevodovka zložená z dvoch častí – z čelného prevodu, ktorý kompenzuje vyosenie motoru a z planétového prevodu. Celkový prevodový pomer prevodovky je daný súčinom jednotlivých prevodov a odpovedá hodnote z tab. 6. Prevodový pomer čelného prevodu je  $i_{CG}=1,35$  a prevod planétovej prevodovky  $i_{PG} = 4$ .



Obrázok 33 Lichobežníková náprava – koncept č.2 s elektromotorom Emrax 208

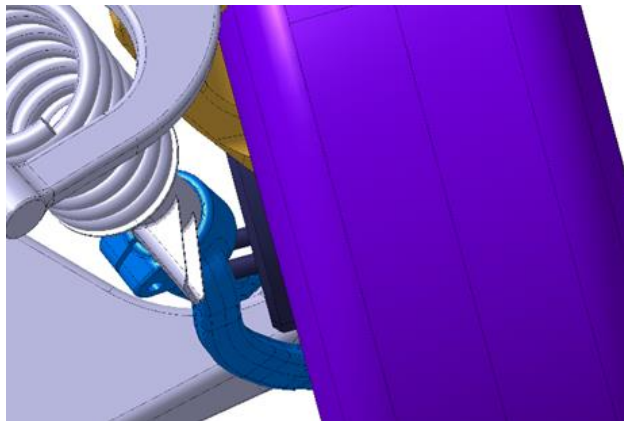
Z obrázkov je ďalej zrejmé, že bolo potrebné upraviť tehlicu tak, aby sa do nej mohla vložiť prevodovka. Výrobca ponúka pre rôzne typy zaťaženia rôzne kombinácie usporiadania a veľkosti ložisiek vo vnútri elektromotoru. Preto sa u pastorku čelného ozubenia predpokladá, že je podporený ložiskami elektromotoru. Hnané koleso čelného prevodu je spojené s planétou planétovej prevodovky. Reakcie od ozubenia zachytávajú guľčkové ložisko umiestnené v hnanom kolese čelného prevodu a ihlové ložisko, ktoré je umiestnené v planéte. Sily sa prenášajú cez



hriadeľ vsadenú do krytu prevodovky, ktorý je pripevnený k tehlici. Výstupným členom prevodovky je unášač, ktorý je napojený na vnútorný krúžok náboju. Hnací moment sa z unášaču prenáša na náboj pomocou drážkovania. U tohto riešenia by teda bolo možné použiť bežne dostupnú ložiskovú jednotku 3. generácie pre hnanú nápravu. Podľa upravenej tehlice tomu bolo potrebné prispôbiť i úchytné body brzdového strmeňa.

Problémovou časťou je uchytenie statoru elektromotoru, ktoré by bolo možné vyriešiť dvomi spôsobmi. Prvou alternatívou je, že stator by bol podobne ako v prvom koncepte uchytený zo strany tlmiču pomocou držiaku k tehlici. Druhou možnosťou je otočiť elektromotor a uchytiť stator k tehlici zo strany prevodovky. Nevýhodou tohto riešenia je, že napájacie káble a výstupy chladenia by boli otočené smerom ku kolesu a museli by sa vyviesť z kolesa von. Táto možnosť je závislá na konštrukčných možnostiach a obmedzeniach úpravy polohy napájania a chladenia elektromotoru, a preto by sa musela prediskutovať s výrobcom. Oba riešenia uchytenia statoru ale prinášajú ďalšie zväčšenie zástavbovej dĺžky celej kolovej zostavy a tým aj pravdepodobne kolíziu elektromotoru s vidličkou tlmiču. V tomto prípade sa môže taktiež použiť ohnutá vidlička, ktorou by sa prípadnej kolízii predišlo.

U tohto konceptu, v stave pri úplnom vyvesení kolesa a tomu odpovedajúcom maximálnom zatáčaní, sú od seba vidlička s elektromotorom vzdialené 5,8mm.



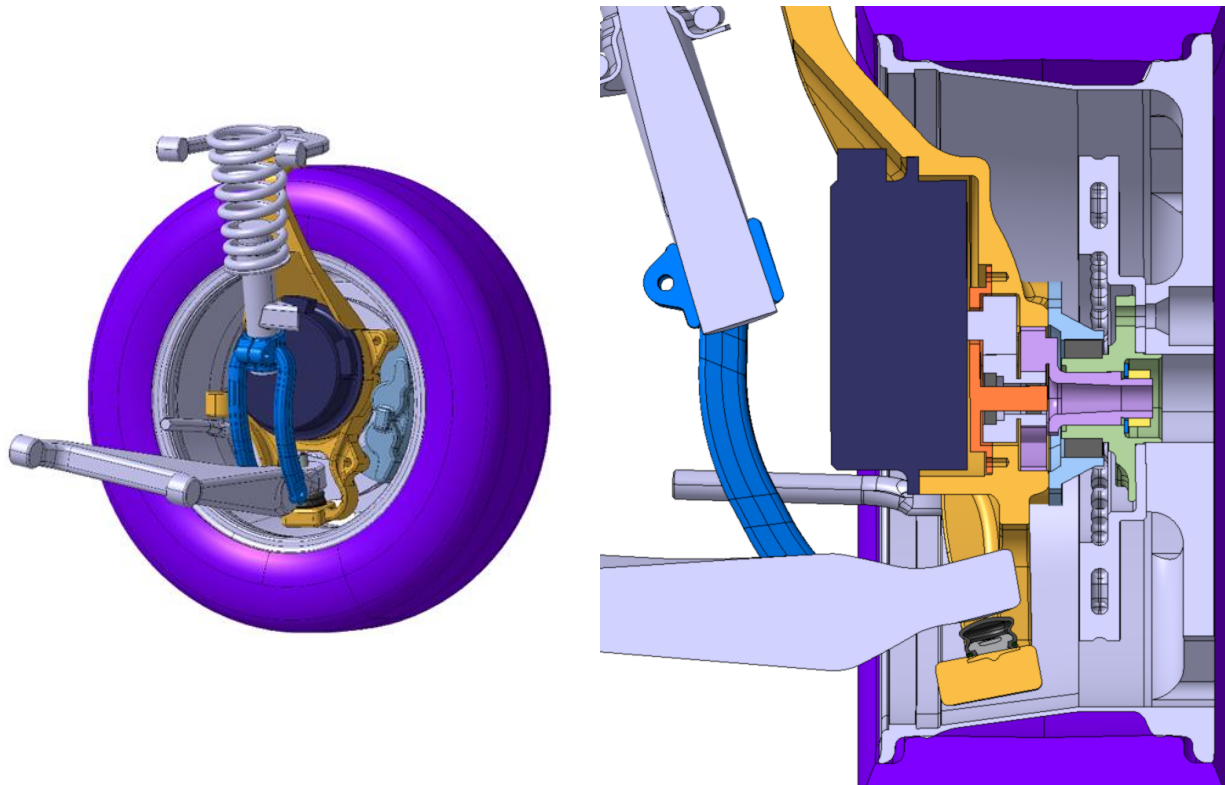
Obrázok 34 Vzdialenosť elektromotoru od vidličky tlmiču pri max. vyvesení kolesa a zatočení doprava

Problém s uchytením statoru by bolo jednoduché vyriešiť použitím elektromotoru typu „in-runner“. Na obr. 35 je znázornená zostava s motorom Nova 30. Celkový prevodový pomer prevodovky odpovedá prevodovému pomeru tohto motoru z tab. 6. Stator, ktorý je vonkajšou





časťou motoru, je uchytený priamo k tehlici. V tomto prípade by dokonca mohol byť plášť elektromotoru integrovaný v tehlici a v nej by mohlo byť priamo umiestnené vinutie statoru.



Obrázok 35 Lichobežníková náprava – koncept č.2 s elektromotorom Nova 30

### 4.2.3 Kontrola ložísk

Určenie zaťaženia:

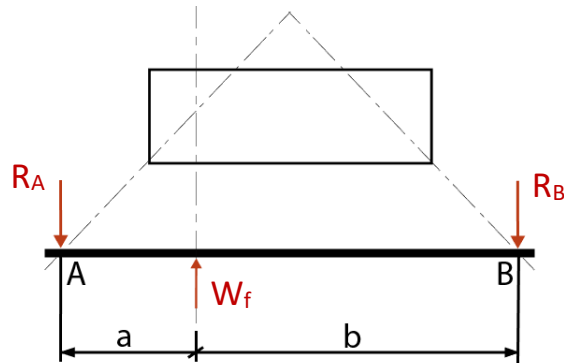
- Keďže sa jedná o prednú nápravu, uvažujeme brzdzenie vozidla s konštantným spomalením  $a = 1g$ , z čoho bolo pre ťažšie vozidlo SUV spočítané dynamické zaťaženie kolesa  $W_f$ .
- Ako ďalšie vo výpočte uvažujeme sily generované planétovou prevodovkou. Predpokladáme, že radiálna sila je nulová a tangenciálna zložka na výpočet ložísk nemá vplyv. Uvažovaná je preto len axiálna sila generovaná šikmým ozubením.

Parametre použitých ložísk sú uvedené v Prílohe 7.



#### 4.2.3.1 Lichobežníková náprava – koncept č.1

Pri návrhu bolo použité dvojradowé guľičkové ložisko s kosouhlým stykom NBA15219 od výrobcu NSK.



Obrázok 36 Lichobežníková náprava – koncept č.1, schéma pôsobiacich síl

Reakcie v podporách A a B získame z rovnovážnych rovníc:

$$R_A - W_f + R_B = 0 \quad (15)$$

$$M_A: R_B(a + b) - W_f \cdot a = 0 \quad (16)$$

Celkové radiálne zaťaženie ložiska je dané

$$F_r = R_A + R_B = 7292,4 \text{ N} \quad (17)$$

Axiálna sila od planétovej prevodovky  $F_a = 2091,5 \text{ N}$ .

Ekvivalentné statické zaťaženie ložiska:

$$P_0 = X_0 \cdot F_r + Y_0 \cdot F_a = 9216,6 \text{ N} \quad (18)$$

kde podľa [27]  $X_0 = 1$  a  $Y_0 = 0,92$ .

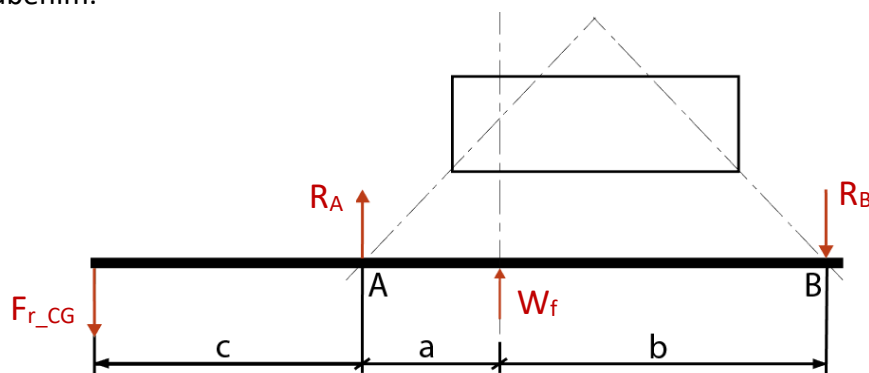
Statická bezpečnosť ložiska je potom

$$s_0 = \frac{C_{0r}}{P_0} = 5,6 \quad (19)$$



#### 4.2.3.2 Lichobežníková náprava – koncept č.2

U oboch riešení druhého konceptu je použité dvojrádové guľíkové ložisko s kosuhým stykom SKF 3209 A. Postup výpočtu je rovnaký ako pri prvom koncepte, ale v tomto prípade sú do zaťaženia uvažované aj sily od čelného prevodu – radiálna zložka a axiálna zložka generovaná šikmým ozubením.



Obrázok 37 Lichobežníková náprava – koncept č.2, schéma pôsobiacich síl

Tabuľka 10 Lichobežníková náprava – koncept č.2. Hodnoty statickej bezpečnosti ložísk

	Riešenie s elektromotorom Emrax	Riešenie s elektromotorom Nova
Axiálna sila od planét. prevodu $F_{a\_PG}$ [N]	1767,9	1725,5
Axiálna sila od čelného prevodu $F_{a\_CG}$ [N]	1725,5	1061,8
Radiálna sila od čelného prevodu $F_{r\_CG}$ [N]	2426,5	1493,2
Celkové radiálne zaťaženie $F_r$ [N]	4865,9	5799,2
Celkové axiálne zaťaženie $F_a$ [N]	42,4	663,7
Ekvivalentné statické zaťaženie $P_0^*$ [N]	4898,2	6303,7
Statická bezpečnosť $s_0$ [N]	<b>8,5</b>	<b>6,6</b>

\*Koefficienty  $X_0 = 1$  a  $Y_0 = 0,76$  pre výpočet ekvivalentného statického zaťaženia boli určené podľa [28]

#### 4.2.4 Záver k lichobežníkovej náprave

Pre oba koncepty lichobežníkovej nápravy vychádza najvýhodnejšie použiť elektromotor typu „in-runner“. Jeho vonkajšia časť môže byť priamo pripevnená k tehlici, čo je z pohľadu namáhania uchytenia motoru a celkovej zástavby zostavy výhodnejšie v porovnaní s „pancake“ motormi.



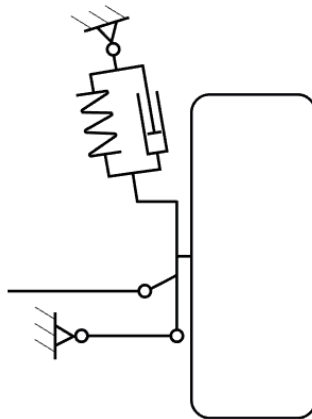
V prípade umiestnenia elektromotoru v osi kolesa nie je možné zachovať pôvodnú ložiskovú jednotku a musí sa upraviť celý koncept kolovej skupiny. Naopak posunutím elektromotoru mimo os kolesa je síce nutné zakomponovať zložitejšiu prevodovku, ale je možné použiť silnejší elektromotor a zároveň zachovať rozloženie kolovej skupiny s klasickou ložiskovou jednotkou.

U každého koncepčného návrhu bola vykonaná kontrola ložisiek s ohľadom na statickú bezpečnosť, ktorej hodnoty vyšli pre účel tejto práce uspokojivo.



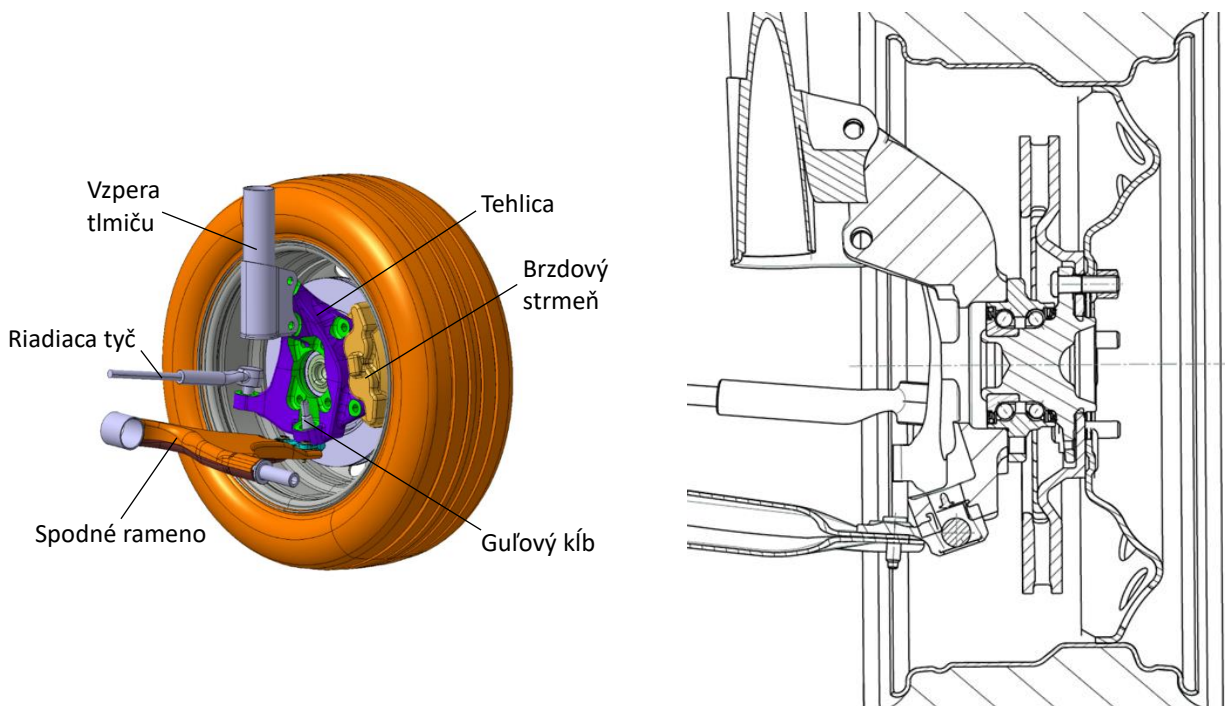
### 4.3 Predná náprava typu McPherson

Výhodou tejto konštrukcie je, že v porovnaní s lichobežníkovou nápravou je jednoduchšia a skladá sa z nižšieho počtu dielov – nemá vrchné rameno a tlmič je priamo uchytený k tehlici. Vďaka tomu je cenovo dostupnejšia a zároveň má menší zástavbový priestor, ktorý môže byť využitý pre priečnu zástavbu spaľovacieho motoru alebo pre predný kufor. Dôsledkom toho sú síce kompromisy z pohľadu funkčnosti oproti lichobežníkovej náprave, nad ktorými ale prevažujú jej uvedené výhody, a preto je to všeobecne najrozšírenejší typ prednej nápravy. [24]



Obrázok 38 Kinematická schéma nápravy typu McPherson

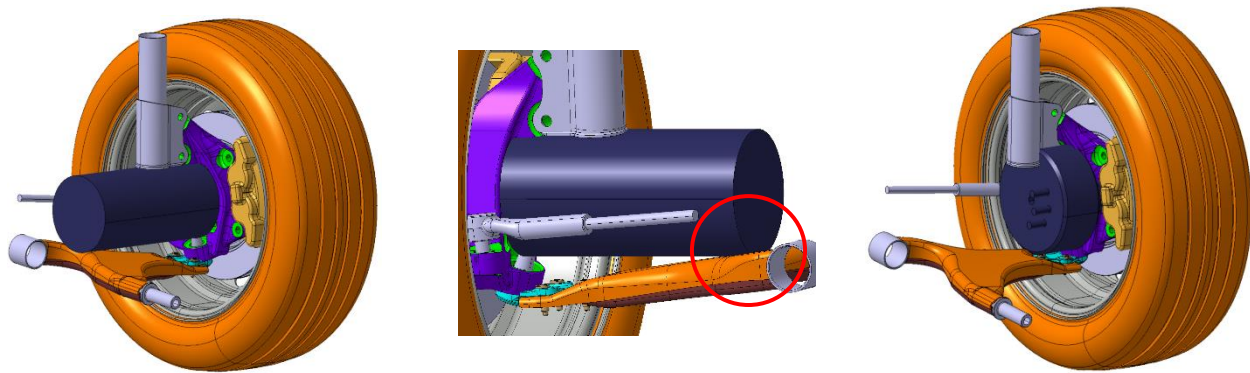
Na nasledujúcich obrázkoch je možné vidieť konkrétnu zadanú nápravu.



Obrázok 39 Zadaná náprava typu McPherson s popisom hlavných častí a rez stredom kola

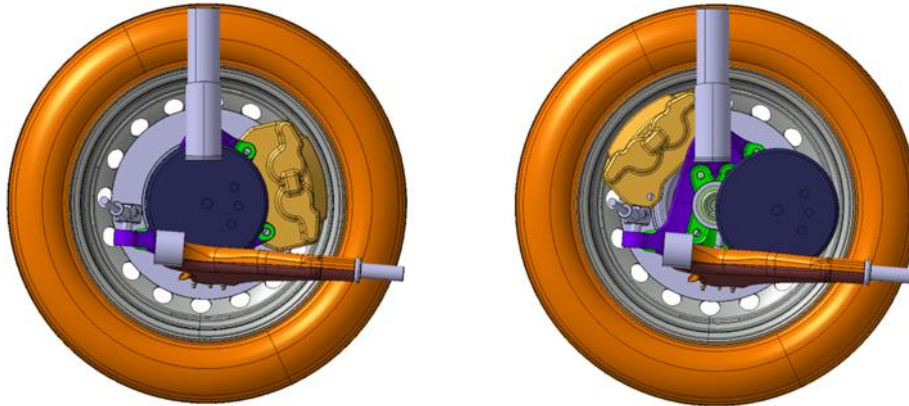


Podobne ako u prvej nápravy, aj tu boli na začiatku, pre zistenie možností zástavby, použité elektromotory Emrax 208 a DT7, ktoré boli s odpovedajúcimi prevodovkami napozicované do osy kolesa, priamo za náboj. Po vložení oboch typov motorov do tejto nápravy boli zrejmé dva možné koncepty.



Obrázok 40 Elektromotory vsadené do nápravy typu McPherson – vľavo DT7, vpravo Emrax 208. V strede vyznačená kolízia motoru DT7 so spodným ramenom

Kvôli pozícii tlmiču a jeho uchyteniu k tehlici, ale taktiež kvôli tomu, že motor v tejto pozícii zasahuje do úchytu guľového kĺbu v spodnom ramene, nie je možné zastavať ani jeden z motorov do osy kolesa. Síce by bolo možné posunúť motory až za tlmič (tzn. bližšie k stredu auta), ale následne by došlo ku kolíziám medzi motorom a spodným ramenom, ktorá je u motoru DT7 už tak zrejmá v základnej pozícii, v stave bez vypruženia alebo zatáčania kolesa. Zároveň by toto riešenie nebolo vhodné z pohľadu momentov zotrvačnosti elektromotorov, ktoré nie sú zanedbateľné a taktiež z pohľadu dostupného zástavbového priestoru - v popísanej pozícii by už elektromotor zasahoval do častí karosérie. U oboch konceptov sa preto motory posunuli mimo os kolesa tak, aby sa uvedeným kolíziám predišlo. Prevodovky použitých motorov preto bolo potrebné upraviť na dve časti – čelný prevod a planétový prevod, prípadne dvojstupňový čelný prevod. Aby sa čo najviac využil zástavbový priestor vo vnútri kolesa, použil sa rovnako ako u prvej nápravy disk s upraveným zálisom z pôvodnej hodnoty ET30 na hodnotu ET55. Posunutím brzdového strmeňu do voľného priestoru nad tyč riadenia bolo možné získať ešte väčší priestor pre zástavbu prevodoviek.

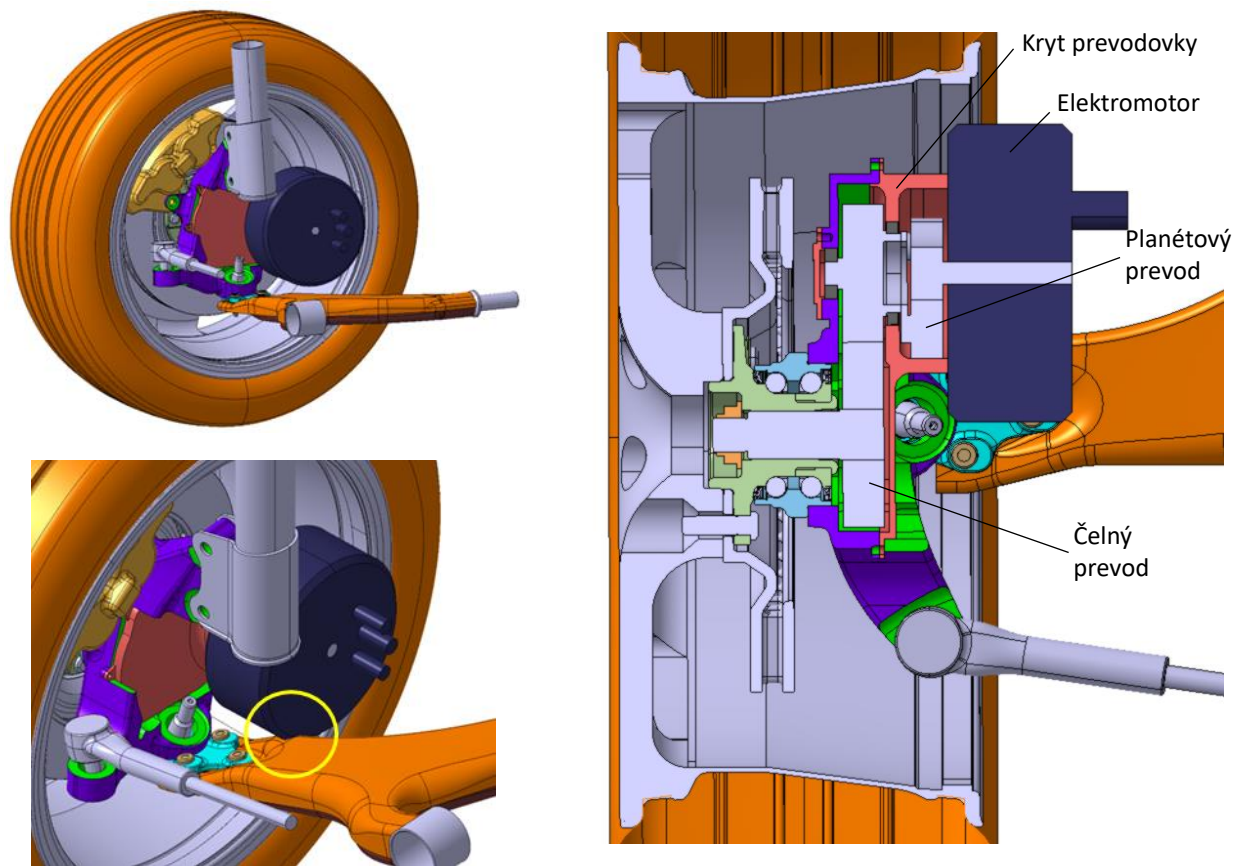


Obrázok 41 Brzdový strmeň v pôvodnej a posunutej pozícii

#### 4.3.1 Náprava typu McPherson – koncept č.1

U tohto koncepčného návrhu je použitý elektromotor typu „pancake“. Veľkosť motoru bola zvolená na základe zástavbového priestoru tvoreného tlmičom, guľovým kĺbom spodného ramena a vnútornou plochou disku kolesa. Zároveň bol tento priestor obmedzený obálkou pohybu spodného ramena, ktoré sa pri vyvesení kolesa približuje k elektromotoru. Tieto podmienky splnil len najmenší motor Emrax 188.

Na základe požadovanej osovej vzdialenosti sa upravila prevodovka na čelný prevod s prevodovým pomerom  $i_{CG} = 1,35$  a tomu sa prispôbil pomer planétového prevodu  $i_{PG} = 4,56$  tak, aby bol celkový prevodový pomer zachovaný. Pretože bolo nutné vyhnúť sa guľovému kĺbu v spodnom ramene, elektromotor poháňa planétový prevod, ktorý potom poháňa čelný prevod. Hnané koleso čelného prevodu je napojené na vnútorný krúžok konvenčnej ložiskovej jednotky 3. generácie pre hnanú nápravu. Tehlicu bolo potrebné prispôbiť tomu, aby sa do nej mohla vložiť prevodovka a aby ju bolo možné zakryť. K časti, ktorá je krytom prevodovky je zároveň pripojený stator motoru a jej súčasťou je i koruna planétovej prevodovky.



Obrázok 42 Náprava typu McPherson – koncept č.1 s elektromotorom Emrax 188

V súvislosti s uložením ozubených kolies čelného prevodu vzniká niekoľko problémov. Sily generované ozubením na strane hnacieho kolesa zachytávajú ložiská uložené v tehlici a v časti, ktorá je zároveň krytom prevodovky. To znamená, že by diely museli byť vyrobené dostatočne presne, aby bola zostava zmontovateľná a nedochádzalo by v dôsledku nepresností k nadmernému opotrebeniu ložisiek. Taktiež to prinieslo zväčšenie zástavbovej dĺžky zostavy a posunutie elektromotoru od stredu kolesa, čím pri plnom vyvesení kolesa dochádza ku kolízií motoru so spodným ramenom (obr. 42 vľavo dolu). Medzi motorom, tmičom a diskom kolesa je však stále dostatočná vzdialenosť a motor je možné posunúť tak, aby sa táto kolízia odstránila. Na strane hnaného kolesa sú sily od ozubenia prenášané do ložiskovej jednotky. Ak by to nestačilo, je možné podoprieť hnané koleso ďalším ložiskom na strane krytu prevodovky, resp. pre zachovanie čo najmenšieho počtu dielov nápravy by sa ložisková jednotka mohla rozdeliť a jedno ložisko by mohlo byť umiestnené za ozubeným kolesom, čo by taktiež pomohlo so zmenšením zástavbovej dĺžky zostavy.

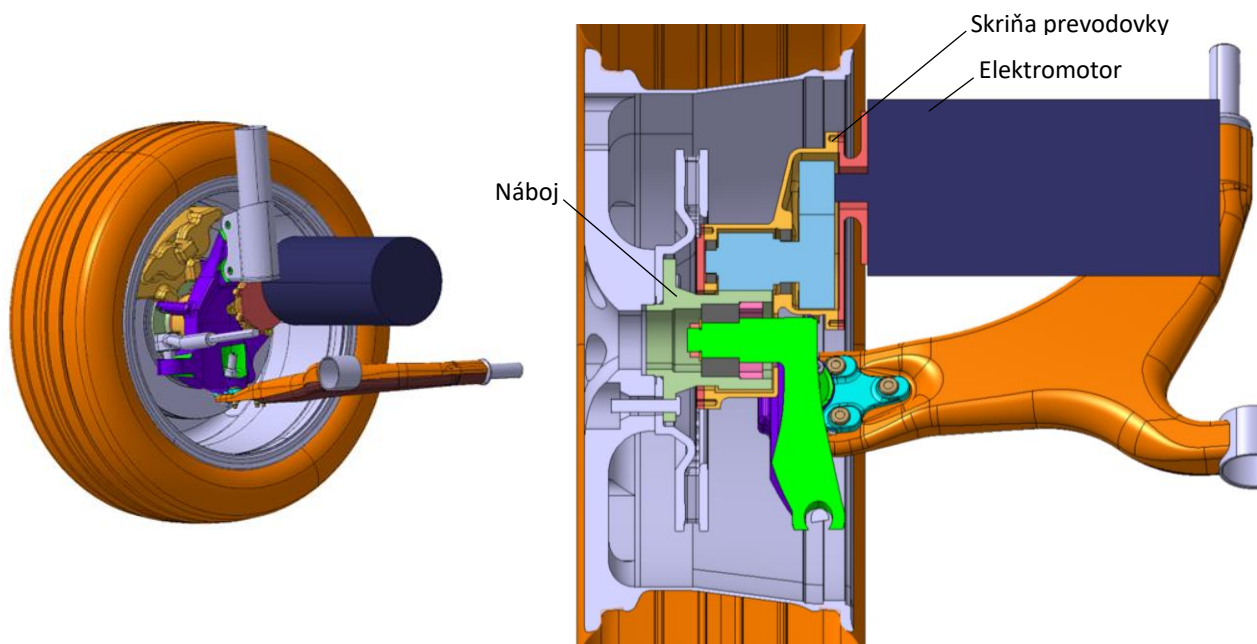




Ďalším problémom je uchytenie statoru elektromotoru ku krytu prevodovky, ktoré by muselo byť riešené vo vnútri krytu. Pri demontáži elektromotoru by sa tak musela rozobrať celá prevodovka. Vhodným riešením by bolo rovnako ako u koncepčných návrhov prvej nápravy použiť elektromotor typu „in-runner“.

#### 4.3.2 Náprava typu McPherson – koncept č.2

V druhom koncepte je do zadanej nápravy integrovaný elektromotor DT7. Aj v tomto prípade bola snaha posunúť motor čo najviac od osy kolesa, aby sa predišlo kolízií motoru so spodným ramenom. Zo zvolených elektromotorov má tento najnižší prevodový pomer, a preto tu bolo možné použiť namiesto prevodovky s planétovým a čelným prevodom jednoduchšiu dvojstupňovú čelnú prevodovku.



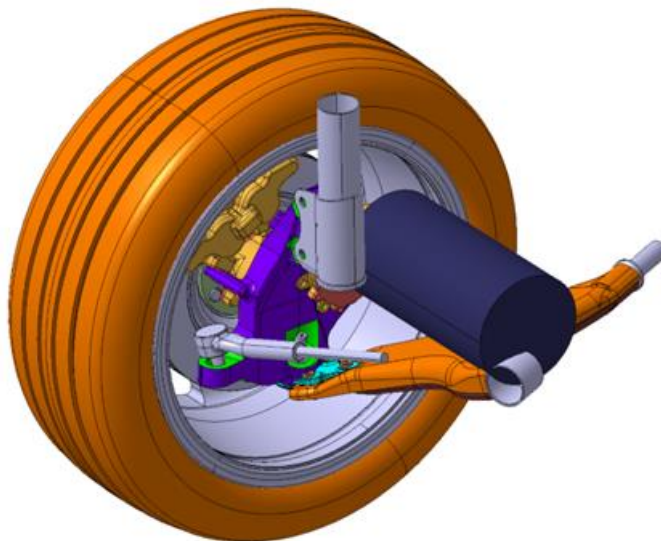
Obrázok 43 Náprava typu McPherson – koncept č.2 s elektromotorom DT7

Pôvodná ložisková jednotka sa odstránila a upravil sa celý koncept kolovej skupiny. Náboj v tomto prípade tvorí len jeden krúžok, ktorý má na vonkajšej ploche ozubenie a je výstupným členom prevodovky. Zaťaženie od pneumatiky prenášajú dve guľčkové ložiská s kosouhlým stykom usporiadané do „O“, ktoré sú vo vnútri náboju a ich vnútorné krúžky dosadajú na hriadeľ, ktorá je vsadená do tehlice.



V skriní prevodovky je pomocou ložisiek uložená stredová hriadeľ. U pastorku, ktorý je hnaný elektromotorom predpokladám s uložením v ložiskách elektromotoru, prípadne by bolo možné uložiť ho do ložisiek v prevodovej skriní. Skriňa je pomocou šróbov pripevnená k tehlici, ale aby sa zachovala jednoduchosť konštrukcie tejto nápravy, skriňa by mohla byť jedným kusom s tehlicou. Prevodovka je pred nečistotami chránená krytmi na strane vstupu a výstupu, kde na strane vstupu je k tomuto krytu pripojený elektromotor a na strane výstupu by medzi nábojom a skriňou, resp. krytom, malo byť dostatok miesta na utesnenie prevodovky. Na druhej strane medzi tehlicou a skriňou by táto časť mohla byť taktiež zakrytovaná.

Pri pohybe kola nastáva najkritickejší stav pri plnom vyvesení kola a súčasnom zatáčaní doprava. Kvôli dĺžkovým rozmerom elektromotoru dochádza ku kolízií s uchytením spodného ramena v karosérii a zatáčanie doprava je tak obmedzené približne na polovičné rozpätie v porovnaní s pôvodnou hodnotou. Elektromotor by tak musel byť asi o 40mm kratší, ale zníženie výkonu by sa mohlo kompenzovať zväčšením priemeru, keďže medzi elektromotorom a ostatnými časťami je dostatok voľného priestoru.



Obrázok 44 Náprava typu McPherson – koncept č.2, kolízia elektromotoru DT7 so spodným ramenom pri plnom vyvesení kola a súčasnom zatočení doprava

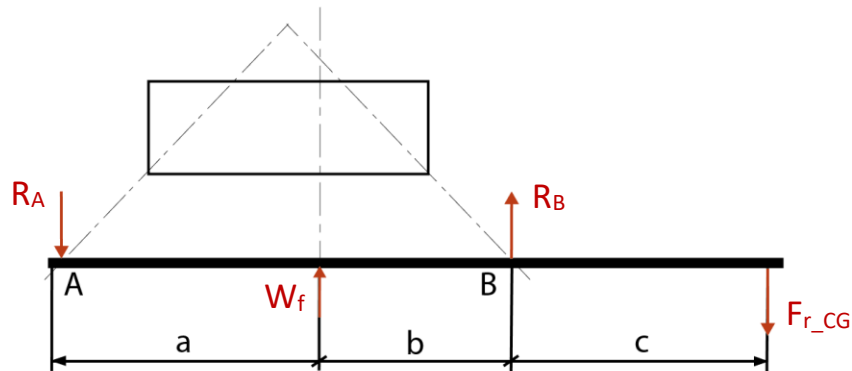


### 4.3.3 Kontrola ložísk

Kedže sa taktiež jedná o prednú nápravu, postup výpočtu je rovnaký ako u lichobežníkovej nápravy. Parametre použitých ložísk sú uvedené v Prílohe 7.

#### 4.3.3.1 Náprava typu McPherson – koncept č.1

Pôvodná ložisková jednotka sa u tohto návrhu zachovala, ale so zmenou zálisu disku sa posunula voči stredú pneumatiky.



Obrázok 45 Náprava typu McPherson – koncept č.1, schéma pôsobiacich síl

Z rovnovážnych rovníc dostaneme  $R_A = 6101,7 \text{ N}$  a  $R_B = 2907,2 \text{ N}$ ,

celková radiálna sila pôsobiaca na ložisko je daná

$$F_r = R_A - R_B = 3194,4 \text{ N} , \quad (20)$$

celková axiálna sila je daná

$$F_a = F_{a_{CG}} - F_{a_{PG}} = 1570,8 \text{ N} \quad (21)$$

Ekvivalentné statické zaťaženie ložiska:

$$P_0 = X_0 F_r + Y_0 F_a = 4231,2 \text{ N} , \quad (22)$$

kde podľa [28]  $X_0 = 1$  a  $Y_0 = 0,76$ .

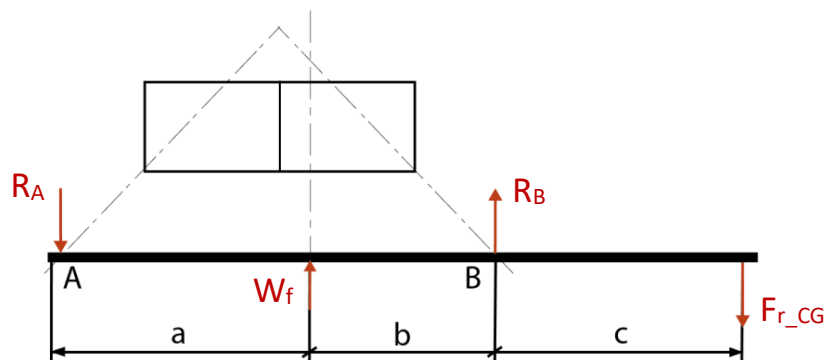
Statická bezpečnosť ložiska je potom

$$s_0 = \frac{C_{0r}}{P_0} = \mathbf{8,3} \quad (23)$$



#### 4.3.3.2 Náprava typu McPherson – koncept č.2

Ložiskovú jednotku nahradili dve jednoradové guľôčkové ložiská s kosouhlým stykom v usporiadaní do „O“ SKF 7206.



Obrázok 46 Náprava typu McPherson – koncept č.2, schéma pôsobiacich síl

Tabuľka 11 Náprava typu McPherson – koncept č.2. Výpočet statickej bezpečnosti ložísk

Axiálna sila od čelného prevodu $F_{a\_CG}$ [N]	2368,9
Radiálna sila od čelného prevodu $F_{r\_CG}$ [N]	4965,3
Celková radiálna sila $F_r$ [N]	2327,1
Ekvivalentné statické zaťaženie $P_0^*$ [N]	4127,5
Statická bezpečnosť $s_0$ [N]	<b>8,4</b>

\*Koefficienty pre výpočet  $P_0$ :  $X_0 = 1$  a  $Y_0 = 0,76$

#### 4.3.4 Záver k náprave typu McPherson

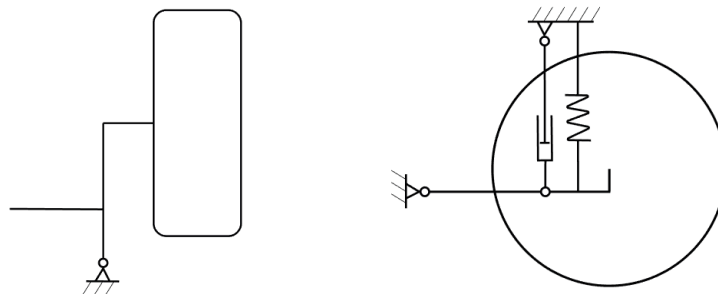
U prednej nápravy typu McPherson bolo u oboch spracovaných koncepčných návrhov potrebné elektromotory posunúť mimo os kola, a to v dôsledku malej vzdialenosti úchytných bodov tlmíču a guľového kĺbu spodného ramena od osy kola. Zástavbový priestor bol taktiež výrazne obmedzený obálkou pohybu spodného ramena. Toto je problémom u oboch konceptov, kde pri vyvesení kola elektromotor čiastočne zasahuje do spodného ramena, resp. do jeho uchytenia ku karosérii. V oboch prípadoch by mal byť tento problém riešiteľný bez nutnosti posunutia kinematických bodov nápravy.

Z kontrolných výpočtov ložísk vyšli hodnoty statickej bezpečnosti uspokojivo.



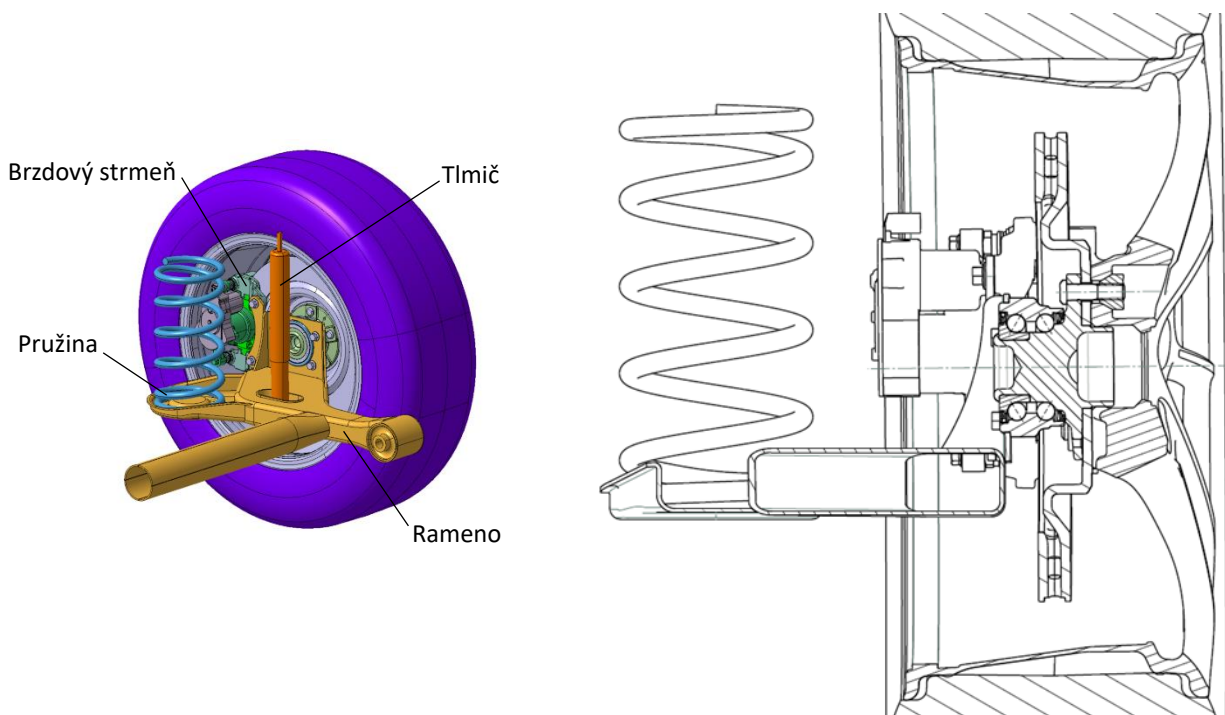
#### 4.4 Zadná náprava s vlečnými ramenami a torznou tyčou

Jednoduchá konštrukcia používaná u zadných náprav, a to vďaka kompaktnému dizajnu, ktorý umožňuje čo najväčšie využitie priestoru medzi kolesami. Je tvorená vlečným ramenom, ktoré je v jednom bode pripevnené ku karosérii a môže sa voči nej v tomto bode natáčať. Súčasťou ramena je torzná tyč, ktorá prepája obe kolesá a zabezpečuje rollovú tuhosť zadnej nápravy. Vďaka svojej jednoduchosti je táto konštrukcia výhodná z ekonomického hľadiska a využíva sa preto najmä u vozidiel nižších tried. [29]



Obrázok 47 Kinematická schéma nápravy s vlečnými ramenami a torznou tyčou, vľavo pohľad zhora, vpravo pohľad zo strany

Z obrázkov konkrétnej zadanej nápravy je vidieť, že bol pri jej návrhu kladený dôraz na to, aby boli tlmič s pružinou čo najbližšie ku kolesu a maximalizoval sa tak priestor pre pasažierov a batožinu.

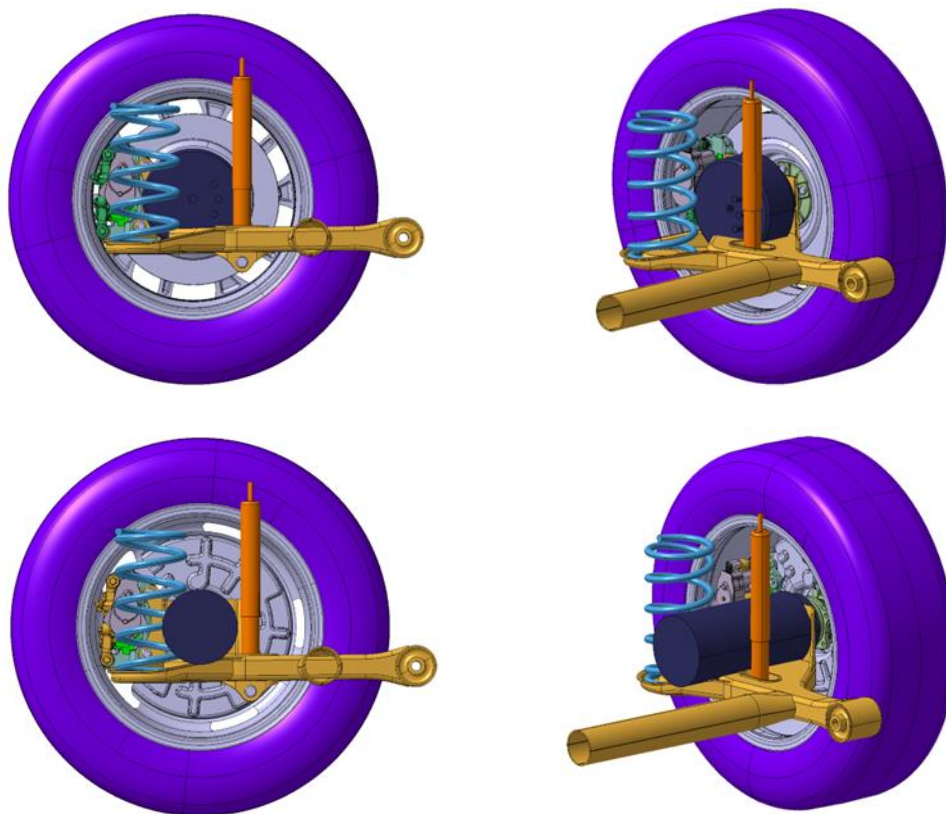


Obrázok 48 Náprava s vlečnými ramenami a torznou tyčou s popisom hlavných častí a rez stredom kolesa



Preto je pri integrácii elektromotorov do tejto nápravy snaha, aby motory zostali čo najviac skryté vo vnútri disku a ak to nie je možné, aby nepresahovali za tlmáč a pružinu a zároveň, aby nebolo potrebné prvky odpruženia posunúť. Keďže sa jedná o zadnú nápravu bez pomocného zatačania kolies, zakomponovať elektromotory by malo byť v tomto prípade jednoduchšie, než u prvých dvoch náprav.

Pre stanovenie koncepčných návrhov sa do zadanej nápravy vložili elektromotory Emrax 208 a DT7. Z obr. 49 je zrejmé, že zo skupiny „pancake“ motorov bolo potrebné vyriešiť kolíziu motoru s ramenom, kde sa ponúkali dve možnosti riešenia, a to buď posunutím elektromotoru nad rameno alebo úpravou samotného ramena. Ďalej si môžeme všimnúť, že ani rozmerovo stredný elektromotor nezasahoval do častí odpruženia, a preto bolo v tomto prípade možné integrovať silnejšie motory z tejto skupiny. U motoru DT7 bolo potrebné vyriešiť jeho dĺžkové rozmery, pretože zasahuje až za obálku pružiny, čo je nežiadúce. Zároveň má motor príliš veľký priemer na to, aby ho bolo možné napozicovať medzi pružinu a tlmáč, a preto bolo nevyhnutné tieto prvky posunúť.



Obrázok 49 Elektromotory vsadené do zadanej nápravy – hore motor Emrax 208, dole motor DT7



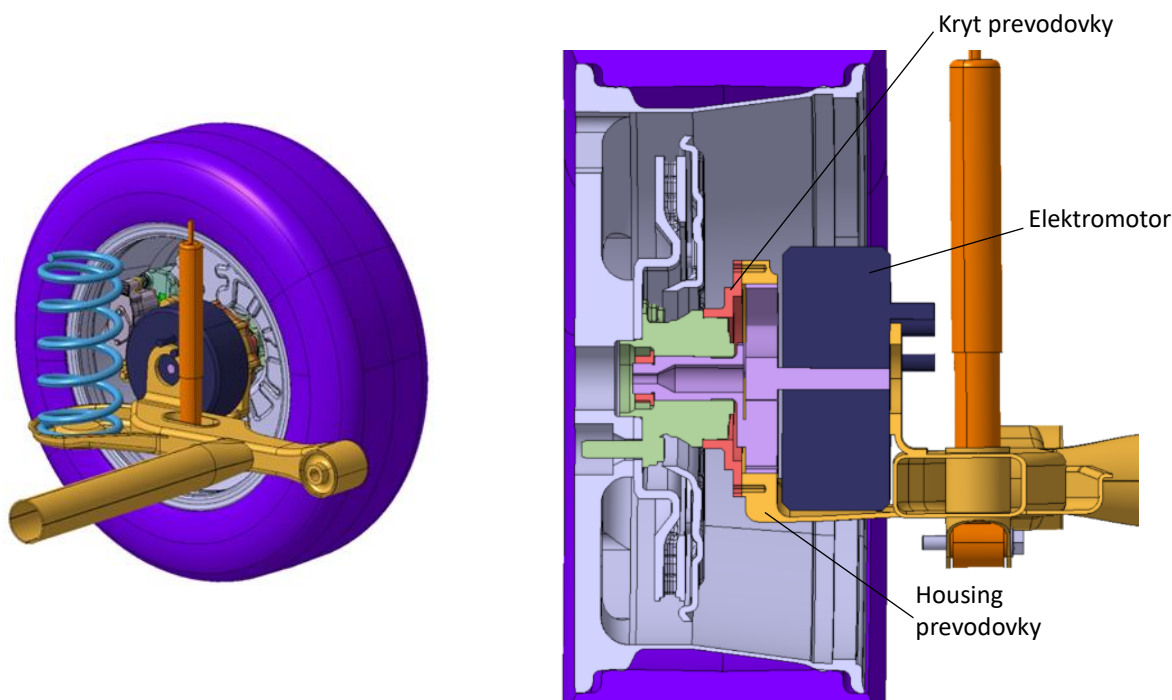
#### 4.4.1 Náprava s vlečnými ramenami a torznou tyčou – koncept č.1

Aj v tomto prípade sa u koncepčných návrhov použil disk kola so zväčšeným zálisom, ktorý bol upravený z pôvodnej hodnoty ET30 na ET70, čo u elektromotorov typu „pancake“ pomohlo zväčšiť zástavbový priestor pre motor a vyhnúť sa tak prvkom odpruženia. Vďaka tomu bolo možné zaintegrovvať najvýkonnejší motor, ktorým je Emrax 228.

Na začiatok však bola snaha zachovať jednoduchosť konštrukcie nápravy a pretože u motoru Emrax 228 dochádzalo pri umiestnení v osi kola ku kolízií medzi motorom a brzdovým strmeňom, a bolo by ho preto potrebné voči osi posunúť, čo by znamenalo zložitejšie riešenie prevodovky a zástavby celkovo, bol zvolený motor Emrax 208.

##### 4.4.1.1 Koncept č.1 s elektromotorom typu „out-runner“ v osi kola

V prvej verzii tohto konceptu je časť ramena, ku ktorej bola pôvodne pripojená ložisková jednotka skrátaná po zadnú časť elektromotoru. Zároveň je v tomto mieste k ramenu uchytený stator motoru. Unášač planétovej prevodovky aj v tomto prípade poháňa konvenčnú ložiskovú jednotku pre hnanú nápravu. Celá planétová prevodovka je vsadená do housingu, ktorý je súčasťou ramena a aby bolo možné zostavu rozobrať, je housing pripojený k náboju pomocou krytu prevodovky.



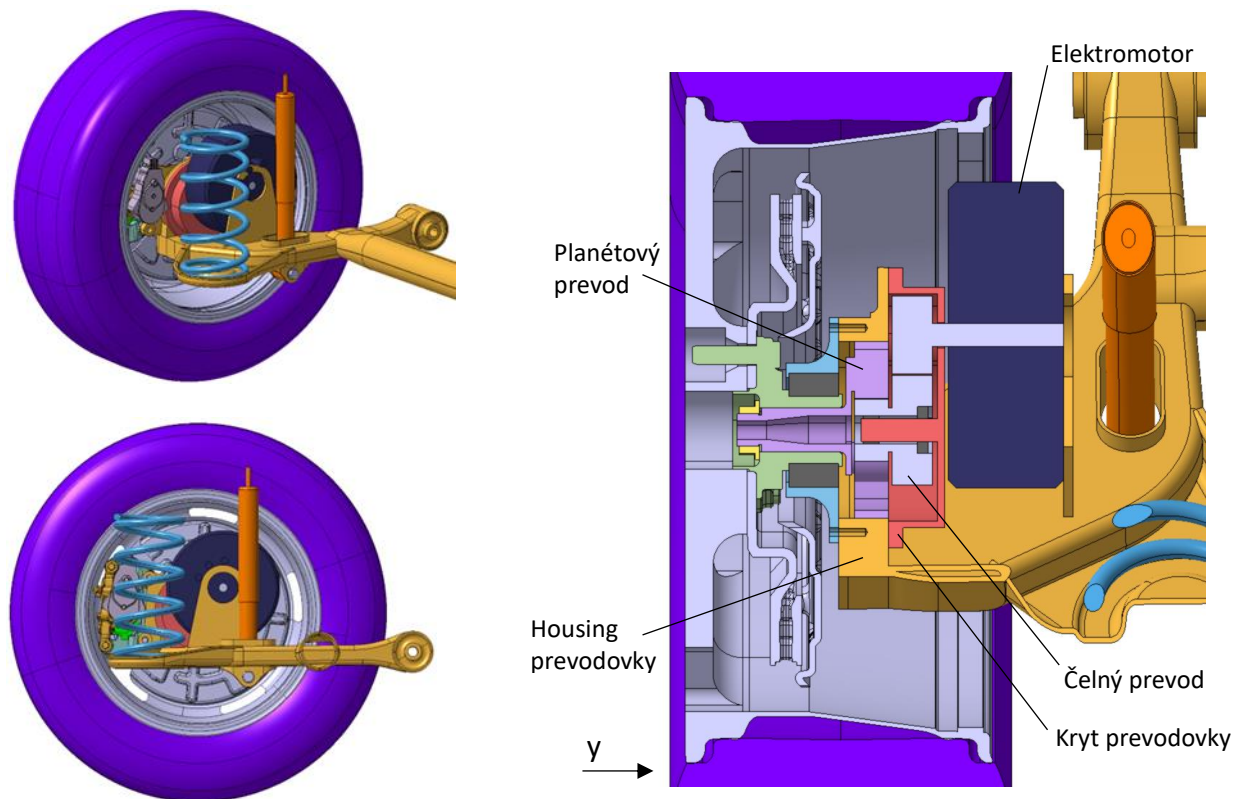
Obrázok 50 Náprava s vlečnými ramenami a torznou tyčou – koncept č.1 s elektromotorom Emrax 208



Kedže sa jedná o elektromotor typu „out-runner“, utesnenie prevodovky by muselo byť riešené na strane vstupnej hriadeli, kde by bol taktiež potrebný kryt, aby sa celý priestor uzavrel. Táto konštrukcia pravdepodobne nebude optimálna ani z pohľadu namáhania časti, ktorá prepája housing prevodovky s hlavnou časťou ramena. Preto sa v ďalšej verzii elektromotor, aj za cenu zložitosti sústavy, posunul nad rameno.

#### 4.4.1.2 Koncept č.1 s elektromotorom typu „out-runner“ mimo os kola

Pri posunutí motoru nad rameno je v disku kola dostatočný priestor pre zástavbu najvýkonnejšieho motoru Emrax 228, ktorý bol na základe toho použitý v ďalšej verzii konceptu č.1. Celkový prevodový pomer redukcie je rozdelený medzi čelný prevod a planétový prevod, ako je vidieť na obr. 51. Planétový prevod je podobne ako u predošlej verzie uložený v housingu, ktorý je spojený s ramenom a z jednej strany je k nemu pripojená ložisková jednotka a na druhej strane kryt čelného prevodu. Hnané koleso čelného prevodu, ktoré je jedným kusom spolu s planétou, je uložené v ložiskách na hriadeli, ktorá je vsadená do krytu prevodovky.



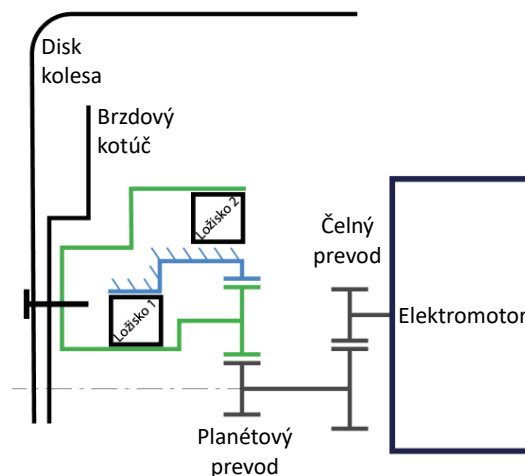
Obrázok 51 Náprava s vlečenými ramenami a torznou tyčou – koncept č.1 s elektromotorom Emrax 228





V dôsledku zapracovania zložitejšej prevodovky sa zväčšila zástavbová dĺžka celej zostavy a motor sa musel posunúť von z kola, čím následne vznikla kolízia s tlmičom, ktorý bolo potrebné posunúť v osi Y o 15mm. Problémom je taktiež montáž zostavy. Aby bolo možné rozobrať prevodovku a motor, vyžadovalo by to ešte zložitejšie riešenie konštrukcie.

Riešením dĺžkových rozmerov a s tým súvisiacej kolízie motoru s tlmičom by mohla byť zmena koncepcie kolovej skupiny. Namiesto ložiskovej jednotky by sa mohli použiť dve jednoradové guľičkové ložiská s kosuhlým stykom do „O“, z ktorých jedno by bolo väčšie než koruna planétovej prevodovky, ako je to zobrazené na nasledujúcej schéme.



Obrázok 52 Schéma úpravy konštrukcie pre zmenšenie zástavbovej dĺžky sústavy

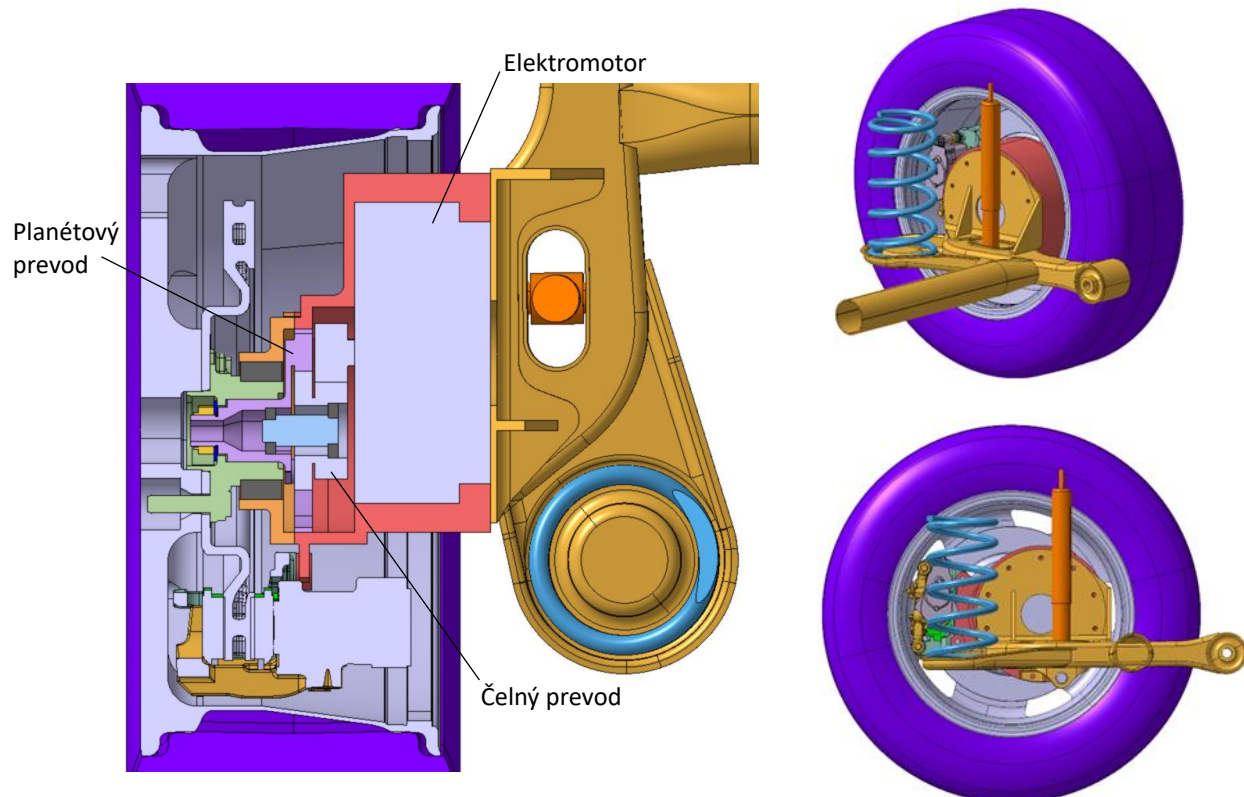
Najjednoduchším riešením dĺžkových rozmerov je samozrejme použitie menšieho motoru, ale horšiu servisovateľnosť tým pravdepodobne neodstránime. Tento problém by mohol vyriešiť elektromotor typu „in-runner“, v ktorého plášti by zároveň mohla byť uložená prevodovka.

#### 4.4.1.3 Koncept č.1 s elektromotorom typu „in-runner“

Do zadanej nápravy bol zakomponovaný väčší z dvojice zvolených „in-runner“ motorov Nova 50. Pre jednoduchosť konštrukcie bola snaha ponechať jeho umiestnenie v osi kola, avšak v tejto pozícii zasahoval do brzdového strmeňu. Elektromotor bolo preto potrebné posunúť voči osi kola. Podobne ako u predošlých konceptov, sa na základe požadovanej osovej vzdialenosti elektromotoru od osy kola upravil celkový prevodový pomer na čelný prevod a planétový prevod.



Konštrukcia je riešená podobne ako u predošlej verzie tohto konceptu s rozdielom, že motor je k ramenu uchytený pomocou jeho vonkajšej časti, v ktorej je zároveň uložená celá prevodovka. Zo strany náboju je k nej pripojený vonkajší krúžok ložiskovej jednotky, ktorý slúži aj ako kryt prevodovky. Unášač planétového prevodu už klasicky poháňa vnútorný krúžok ložiskovej jednotky, ktorej ložiská majú v porovnaní s bežnou jednotkou väčší priemer, aby bolo možné v hriadeli unášaču uložiť jedno z guľičkových ložísk zachytávajúcich sily od čelného prevodu. Pre zmenšenie zástavby by sa v tomto mieste mohlo prípadne použiť ihlové ložisko. Takto umiestnený elektromotor nezasahuje do prvkov odpruženia a nebolo ani potrebné meniť ich pozície.



Obrázok 53 Náprava s vlečenými ramenami a torznou tyčou – koncept č.1 s elektromotorom Nova 50

#### 4.4.2 Náprava s vlečenými ramenami a torznou tyčou – koncept č.2

U druhého konceptu je pre pohon použitý elektromotor DT7. Ako je zrejmé z obr. 54, sú dve možnosti integrácie tohto typu motoru – buď ho ponechať v osi kola a posunúť pružinu alebo posunúť motor mimo os, do miesta tlmiča a tlmič posunúť bližšie k pružine. Pri skúmaní oboch možností sa zistilo, že v druhom prípade by bolo nutné posunúť nielen tlmič, ale aj pružinu, aby medzi nimi nevznikla kolízia. Zároveň by sa v tomto prípade musela pre docielenie požadovanej

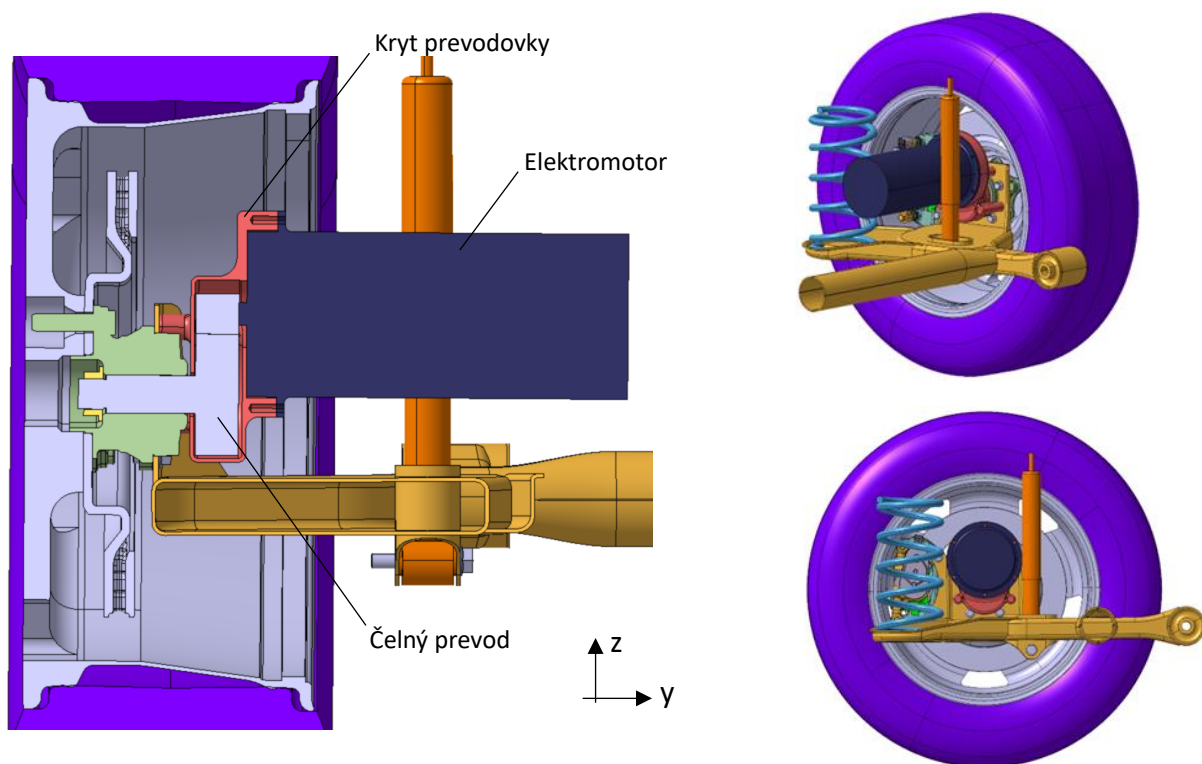


osovej vzdialenosti použiť zložitejšia dvojstupňová prevodovka. Na základe toho sa dospelo k rozhodnutiu vypracovať prvú možnosť s motorom v osi kola.



Obrázok 54 Náprava s vlečnými ramenami a torznou tyčou – koncept č.2, umiestnenie elektromotoru vľavo – v osi kola, vpravo – mimo os kola

Elektromotor avšak nebolo možné ponechať úplne v osi kola ani u prvej možnosti, pretože zasahoval do ramena, a preto ho bolo potrebné posunúť v smere osy Z. Vďaka tomu ale bolo možné použiť pre redukcii jednoduchší čelný prevod namiesto planétového prevodu. Kryt prevodovky je zároveň nosnou časťou elektromotoru a je pripojený k ramenu v mieste, kde je k



Obrázok 55 Náprava s vlečnými ramenami a torznou tyčou – koncept č.2 s elektromotorom DT7



nemu uchytená ložisková jednotka. Táto časť ramena bude pravdepodobne musieť byť výrazne tuhšia, aby zniesla sily od zotrvačných momentov motoru.

Toto riešenie je síce jednoduché a v porovnaní s ostatnými konceptami vyžaduje minimálne úpravy ostatných častí zostavy, problémom však je, že elektromotor svojou dĺžkou presahuje prvky odpruženia a pružinu bolo kvôli kolízií s motorom potrebné posunúť o 40mm. V ďalšom rozpracovaní konceptu by preto mohla byť konštrukcia podobná ako u konceptu č.2 nápravy typu McPherson. Ozubenie hnaného kolesa prevodovky by v tomto prípade mohlo byť súčasťou náboja, čím by sa výrazne skrátila zástavbová dĺžka.

#### 4.4.3 Kontrola ložisiek

Určenie zaťaženia:

- Keďže sa jedná o zadnú nápravu, uvažujeme dynamické zaťaženie kolesa pri akcelerácií vozidla s konštantným zrýchlením  $a = 1g$ , z čoho bolo pre ťažšie vozidlo SUV spočítané dynamické zaťaženie pre jedno koleso zadnej nápravy  $W_r$ .
- Podobne ako u predchádzajúcich kontrolných výpočtov ložisiek uvažujeme podľa typu použitého prevodu radiálne a axiálne sily generované čelným ozubením prevodovky a axiálne sily od planétového prevodu.

Postup výpočtu je rovnaký ako u predchádzajúcich typov náprav, preto sú v nasledujúcej tabuľke uvedené len výsledné hodnoty. Parametre použitých ložisiek sú uvedené v Prílohe 7.

Pozn. ku konceptu č.1: Pretože boli v oboch verziách konceptu č.1 s „out-runner“ elektromotormi zachované konvenčné ložiskové jednotky, kontrola ložisiek bola vykonaná len pre verziu s motorom Emrax 228, pretože u nej nastáva horší záťažový stav.



Tabuľka 12 Náprava s vlečnými ramenami a torznou tyčou. Výpočet statickej bezpečnosti ložísk

	Koncept č.1 - Emrax 228	Koncept č.1 - Nova 50	Koncept č.2 – DT7
Celková axiálna sila $F_a$ [N]	807,3	1096,9	4269,4
Celková radiálna sila $F_r$ [N]	4734,3	5347,8	3180,7
Ekvivalentné statické zaťaženie $P_0$ [N]	5347,8	6181,4	6425,4
Statická bezpečnosť $s_0$ [N]	<b>7,8</b>	<b>9,5</b>	<b>6,5</b>

#### 4.4.4 Záver k náprave s vlečnými ramenami a torznou tyčou

V prípade nápravy s vlečnými ramenami a torznou tyčou bolo zo všetkých zadaných typov náprav najjednoduchšie integrovať elektromotory, pretože sa jedná o zadnú nápravu a vďaka dostupnému zástavbovému priestoru sem bolo možné zastavať výkonnejšie elektromotory. V prvom koncepte bolo snahou do nápravy integrovať elektromotory typu „out-runner“, ale použitím motoru typu „in-runner“ sa podarilo doceliť kompaktnejšiu zostavu, bez nutnosti posunutia prvkov odpruženia. U druhého konceptu sa motor nepodarilo zastavať bez toho, aby to ovplyvnilo pozíciu prvkov odpruženia, napriek tomu je táto konštrukcia jednoduchá a vyžaduje minimálne úpravy ostatných častí zostavy.

K jednotlivým konceptom boli vykonané kontrolné výpočty ložísk, v ktorých hodnoty statickej bezpečnosti vyšli uspokojivo.



## Záver

Na základe zadania boli v úvode práce preskúmané existujúce riešenia pohonu osobných vozidiel pomocou elektromotorov umiestnených v kolesách. Výrobcovia automobilov zatiaľ zostávajú pri prechode na elektrickú pohonnú jednotku pri klasickej koncepcii s pohonným ústrojenstvom uloženým v odpružených hmotách a pohon pomocou „in-wheel“ motorov je tak zatiaľ používaný len u koncepčných vozidiel. Prínos tohto typu pohonu je zrejmý v mnohých ohľadoch, nielen čo sa týka dynamických vlastností vozidla a jeho stability, ale taktiež z pohľadu „packagingu“ vo vnútri auta. Najväčšia nevýhoda plynie z uloženia pohonu v neodpružených hmotách, čo má za následok zhoršenie dynamických vlastností vozu. Z uvedených testov ale vyplýva, že ak by sa so zvýšenými neodpruženými hmotami počítalo už pri návrhu odpruženia vozu, bolo by možné aj vďaka prínosu tohto pohonu v oblasti dynamiky v niektorých ohľadoch dokonca dynamické vlastnosti vozu zlepšiť.

Pre zistenie prínosu tohto pohonu v oblasti pozdĺžnej dynamiky konkrétnych zadaných vozidiel boli zostavené zjednodušené simulačné modely akcelerácie a brzdenia s využitím rekuperácie pohonu. Výsledky simulácií ukázali, že doplnkový pohon má u oboch typov zadaných vozidiel výrazný vplyv na zlepšenie pozdĺžnej dynamiky vozu a môžeme predpokladať, že za znížených adhézných podmienok bude tento účinok ešte väčší.

Cieľom tejto práce bolo zistiť možnosti integrácie elektromotorov do troch zadaných náprav. Na základe zadefinovaných okrajových podmienok sa zvolili elektromotory vhodné pre túto aplikáciu, ktoré sa následne zakomponovali do zadaných náprav. U prednej lichobežníkovej nápravy bol zástavbový priestor výrazne obmedzený polohou odpruženia, a preto do nej nebolo možné zakomponovať motor s malým priemerom a väčšou dĺžkou. Spracované teda boli dva koncepty s „pancake“ motormi. V prípade prednej nápravy typu McPherson už bolo možné integrovať oba typy motorov. Keďže sa v oboch prípadoch jedná o riadené nápravy, u niektorých koncepčných riešení dochádza v určitých polohách kolesa ku kolíziám elektromotoru s okolitými časťami. Toto by malo byť možné vyriešiť úpravou kolidujúcich dielov bez toho, aby sa musela meniť poloha kinematických bodov náprav. U zadnej nápravy s vlečenými ramenami a torznou tyčou bolo taktiež možné zakomponovať oba typy elektromotorov, a to rôznymi spôsobmi. Zo skupiny



„pancake“ motorov je najvhodnejším typom „in-runner“ motor. U motoru s malým priemerom a väčšou dĺžkou sa síce musela upraviť pozícia pružiny, ale vďaka tomu je zachovaná jednoduchosť konštrukcie. Z koncepčných riešení zástavby „pancake“ motorov je možné všeobecne pre všetky typy zadaných náprav poznamenať, že síce sa z pohľadu výkonovej hustoty zdajú byť najvhodnejšie motory typu „axial-flux“, z modelov plynie, že pre túto aplikáciu sú z pohľadu zástavby lepšie „in-runner“ motory.

To, aký z popísaných konceptov konštrukčných riešení je vhodný pre zadané typy vozidiel závisí na tom, akej triedy je dané vozidlo. Ak vozidlo patrí do nižšej cenovej kategórie, budeme sa snažiť zachovať jednoduchosť konštrukcie, aby sa náklady zvýšili čo najmenej. U vozidla typu sedan bude kvôli jeho nižšej hmotnosti preferované použiť ľahšie zo zvolených elektromotorov, aby sa minimalizoval vplyv zvýšených neodpružených hmot.

Pri pohľade na konštrukčné riešenia jednotlivých náprav je zrejmé, že sa jedná o zjednodušené modely zostáv určené pre zistenie zástavbových možností. To či bude možné niektoré z navrhovaných riešení zakomponovať do reálneho vozidla preto závisí na ich ďalšom rozpracovaní. Zvýšením neodpružených hmot sa menia dynamické vlastnosti sústavy, čo má za následok zmenu záťažových stavov jednotlivých dielov, ktoré bude potrebné podrobiť pevnostnej analýze a výpočtom životnosti. Ďalej bude potrebné vyriešiť napájanie elektromotoru a v prípade motorov chladených kvapalinou aj chladiaci okruh a celá pohonná jednotka sa musí zakomponovať do systému vozidla. Výsledky tejto práce by preto mohli byť prvým krokom k využitiu tohto nekonvenčného typu pohonného ústrojenstva.



## Prehľad použitej literatúry

- [1] LIN, Kelly. *Hyundai's First Dedicated EV Platform Is Designed for RWD, AWD and Has a Big Future*. Online. In: Motor Trend. © 2024. Dostupné z: <https://www.motortrend.com/news/hyundai-first-dedicated-ev-platform-rwd-awd-details/>. [cit. 2024-01-08].
- [2] BEJBLÍK, Ján. *Elektické pohony automobilu*. Bakalárska práca. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2017.
- [3] *Models*. Online. Tesla. © 2024. Dostupné z: <https://www.tesla.com/models>. [cit. 2024-01-08].
- [4] MIDDELKOOP, WILLEM L. *Around town in an electric car*. Online. In: WILLEM.com. © 2024. Dostupné z: <https://willem.com/blog/2018-11-16-around-town-in-an-electric-car/>. [cit. 2024-01-08].
- [5] STROHL, Daniel. *Ferdinand Porsche, Joseph Ledwinka, and the invention of the electric hub motor*. Online. In: Hemmings. © 2024. Dostupné z: <https://www.hemmings.com/stories/2014/02/12/ferdinand-porsche-joseph-ledwinka-and-the-invention-of-the-electric-hub-motor>. [cit. 2024-01-08].
- [6] *In-wheel-motor-technology*. Online. Elaphe. © 2023. Dostupné z: <https://in-wheel.com/en/technology/#in-wheel-motor-technology>. [cit. 2024-01-08].
- [7] *Elaphe and Lightyear develop the most efficient production powertrain in the world*. Online. In: Lightyear. © 2024. Dostupné z: <https://lightyear.one/articles/lightyear-and-elaphe-develop-the-most-efficient-production-powertrain-in-the-world>. [cit. 2024-01-08].
- [8] *Lightyear 0*. Online. In: Electric vehicle Database. © 2024. Dostupné z: <https://ev-database.org/car/1166/Lightyear-0>. [cit. 2024-01-08].
- [9] Pd18 4250 Datasheet. V1. 2021. Dostupné z: <https://www.proteanelectric.com/f/2022/03/Pd18-4250-Datasheet-v1.pdf>
- [10] BADAL, Jan. *Analysis of different powertrain configurations for a formula style electric race car*. Online, Master thesis. Lund: Lund University, 2019. Dostupné z: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/171833/master-thesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [cit. 2024-01-08].
- [11] *Legacy Safety*. Online. Subaru. © 2023. Dostupné z: [https://subaru-oman.com/legacy\\_safety.html](https://subaru-oman.com/legacy_safety.html). [cit. 2024-01-08].
- [12] ACHTENOVÁ, Gabriela. *Převodná ústrojí motorových vozidel*. V Praze: České vysoké učení technické, 2012. ISBN 978-80-01-05129-0.
- [13] ŚLASKI, Grzegorz; GUDRA, Adam; BOROWICZ, A. D. A. M. Analysis of the influence of additional unsprung mass of in-wheel motors on the comfort and safety of a passenger car. *Archiwum Motoryzacji*, 2014, 65.3: 51-64.





- [14] *Managing Unsprung Mass – Everything We’ve Ever Been Asked*. Online. In: Protean Electric. © 2024. Dostupné z: <https://www.proteanelectric.com/managing-unsprung-mass-everything-weve-ever-been-asked/>. [cit. 2024-01-08].
- [15] ANDERSON, Martyn a HARTY, Damian. *Unsprung Mass with In-Wheel Motors - Myths and Realities*. PDF. 2010. Dostupné z: <https://www.proteanelectric.com/f/2018/04/protean-Services3.pdf>
- [16] SEWARD, Derek. *Race Car Design*. Palgrave, 2014. ISBN 978-1-137-03014-6.
- [17] *Adheze pneumatik a její měření*. Bakalářská práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2013.
- [18] HINCAPIÉ, J. S. L.; SANDOVAL, Andresdavid Vargas; PARRA, J. Z. Axial Flux Electric Motor. *Military University of New Granada. Mechatronics Engineering*, 2012. Dostupné z: <https://www.emworks.com/ckfinder/userfiles/files/Axial%20Flux%20Motor.pdf>
- [19] *Nova 30 - Plettenberg*. Online. Plettenberg motors. © 2022. Dostupné z: <https://plettenbergmotors.com/product/nova-30-en/>. [cit. 2024-01-08].
- [20] *Nova 50 - Plettenberg*. Online. Plettenberg motors. © 2022. Dostupné z: <https://plettenbergmotors.com/product/nova-50-en/>. [cit. 2024-01-08].
- [21] *E-Motors*. Online. EMRAX. © 2020. Dostupné z: <https://emrax.com/e-motors/>. [cit. 2024-01-08].
- [22] Technical Data and Manual for EMRAX Motors / Generators. pdf. Version 5.1. 2018. Dostupné z: [https://emrax.com/wp-content/uploads/2017/10/user\\_manual\\_for\\_emrax\\_motors.pdf](https://emrax.com/wp-content/uploads/2017/10/user_manual_for_emrax_motors.pdf)
- [23] *DYNASYN DT, DP SERVO MOTORS*. pdf. v1. 2022. Dostupné z: [https://www.amk-motion.com/media/daten/downloads/produkte/Brosch%C3%BCren/DT\\_DP\\_Motoren\\_EN.pdf](https://www.amk-motion.com/media/daten/downloads/produkte/Brosch%C3%BCren/DT_DP_Motoren_EN.pdf)
- [24] GILLESPIE, Thomas D. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. SAE International, 1992. ISBN 978-1560911999.
- [25] *SuperPro - Rear Lower Control Arm - Inner Bush kit*. Online. In: Fensport. © 2024. Dostupné z: <https://www.fensport.co.uk/collections/lexus-is-200-gxe10-01-99-12-05/products/superpro-rear-arb-bush-kit-14mm-is200-rs200-is300-spf2817-14k>. [cit. 2024-01-08].
- [26] MILLIKEN, William F. a MILLINKEN, Douglas L. *Race Car Vehicle Dynamics*. United States of America: Society of Automotive Engineers, 1995. ISBN 1-56091-526-9.
- [27] *NSK: Rolling Bearings for Industrial Machinery*. Pdf. CAT. No. E1103. 2020. Dostupné z: <https://www.nsk.com/common/data/ctrGPdf/bearings/e1103b.pdf#page=207>
- [28] *SKF: Valivá ložiska*. Pdf. PUB BU/P1 17000. 2019. Dostupné z: [https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d1968096351e/pdf\\_preview\\_medium/0901d1968096351e\\_pdf\\_preview\\_medium.pdf](https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d1968096351e/pdf_preview_medium/0901d1968096351e_pdf_preview_medium.pdf)
- [29] *Rear Twist Beam*. Online. Altair HyperWorks. © 2023. Dostupné z: [https://help.altair.com/hwdesktop/hwx/topics/motionview/rear\\_twist\\_beam\\_r.htm](https://help.altair.com/hwdesktop/hwx/topics/motionview/rear_twist_beam_r.htm). [cit. 2024-01-08].



## Zoznam obrázkov

Obrázok 1 Umiestnenie doplnkového pohonu pre pohon RWD a FWD.....	10
Obrázok 2 Platforma elektromobilov Hyundai [1].....	12
Obrázok 3 Elektrická pohonná jednotka vozu Smart EQ [4].....	13
Obrázok 4 vľavo: Rozpad kolovej skupiny s využitím in-wheel motoru výrobcu Elaphe [6], vpravo: Vozidlo Lightyear 0 [8].....	15
Obrázok 5 Rozpad kolovej skupiny s využitím in-wheel motoru výrobcu Protean Electric [9].....	15
Obrázok 6 Ovplyvnenie stability vozidla využitím vektorovania momentu [10] [11].....	16
Obrázok 7 Zjednodušený model vozu pre hodnotenie vertikálnej dynamiky [13].....	18
Obrázok 8 Výsledky simulácie vertikálnej dynamiky pre referenčné vozidlo a vozidlo so zvýšenou neodpruženou hmotou o 22kg a odpruženou hmotou o 23kg [13].....	19
Obrázok 9 Závislosť zrýchlenia odpružených hmôt na frekvencii pre rôzne pomery odpruženej hmoty k neodpruženej [14].....	20
Obrázok 10 Výsledky subjektívneho hodnotenia [14].....	21
Obrázok 11 Zobrazenie pôsobiacich síl pri akcelerácii vozu.....	23
Obrázok 12 Usporiadanie statoru a rotoru u elektromotorov s axiálnym a radiálnym magnetickým tokom [18].....	25
Obrázok 13 Elektromotory Nova 30 vľavo a Nova 50 vpravo [19] [20].....	26
Obrázok 14 Celá výkonová rada elektromotorov Emrax [22].....	26
Obrázok 15 Možné kombinácie usporiadania ložísiel u elektromotorov Emrax [22].....	27
Obrázok 16 Elektromotor s malým priemerom a väčšou dĺžkou.....	27
Obrázok 17 Schéma planétového prevodu.....	29
Obrázok 18 Výkonové a momentové krivky elektromotoru Emrax 208.....	29
Obrázok 19 Simulačný model akcelerácie pre vozidlo s pohonom zadnej nápravy.....	32
Obrázok 20 Priebeh hnacej sily pri akcelerácii vozu.....	33
Obrázok 21 Simulačný model akcelerácie pre vozidlo s pohonom oboch náprav.....	34
Obrázok 22 Simulačný model brzdenia pre vozidlo s pohonom prednej nápravy.....	35
Obrázok 23 Simulačný model brzdenia pre vozidlo s pohonom oboch náprav.....	36
Obrázok 24 Kinematická schéma lichobežníkovej nápravy a konkrétna zadaná náprava s popísanými hlavnými časťami.....	41
Obrázok 25 Rez zadanou lichobežníkovou nápravou.....	42
Obrázok 26 Elektromotory vsadené do lichobežníkovej nápravy – vľavo Emrax 208, vpravo DT7.....	42
Obrázok 27 Elektromotor Emrax 208 vsadený do lichobežníkovej nápravy s vyznačenými kolíziami.....	43
Obrázok 28 Disk kola s pôvodnou a upravenou hodnotou zálisu.....	44
Obrázok 29 Lichobežníková náprava – koncept č.1 s elektromotorom Emrax 188.....	44
Obrázok 30 Lichobežníková náprava – koncept č.1 s elektromotorom Emrax 188, rez stredom kola.....	45



Obrázok 31 vľavo – dotyk elektromotoru so spodným ramenom pri vyvesení kola a súčasnom zatáčaní, vpravo – pohľad na zostavu v základnej pozícii spredu.....	46
Obrázok 32 vľavo – detail rozdelenej tehlice, vpravo – ukážka deleného spodného ramena u vozu Lexus IS200 [25].....	46
Obrázok 33 Lichobežníková náprava – koncept č.2 s elektromotorom Emrax 208.....	47
Obrázok 34 Vzdialenosť elektromotoru od vidličky tlmiču pri max. vyvesení kola a zatočení doprava.....	48
Obrázok 35 Lichobežníková náprava – koncept č.2 s elektromotorom Nova 30.....	49
Obrázok 36 Lichobežníková náprava – koncept č.1, schéma pôsobiacich síl.....	50
Obrázok 37 Lichobežníková náprava – koncept č.2, schéma pôsobiacich síl.....	51
Obrázok 38 Kinematická schéma nápravy typu McPherson.....	53
Obrázok 39 Zadaná náprava typu McPherson s popisom hlavných častí a rez stredom kola...	53
Obrázok 40 Elektromotory vsadené do nápravy typu McPherson – vľavo DT7, vpravo Emrax 208. V strede vyznačená kolízia motoru DT7 so spodným ramenom.....	54
Obrázok 41 Brzdový strmeň v pôvodnej a posunutej pozícii.....	55
Obrázok 42 Náprava typu McPherson – koncept č.1 s elektromotorom Emrax 188.....	56
Obrázok 43 Náprava typu McPherson – koncept č.2 s elektromotorom DT7.....	57
Obrázok 44 Náprava typu McPherson – koncept č.2, kolízia elektromotoru DT7 so spodným ramenom pri plnom vyvesení kola a súčasnom zatočení doprava.....	58
Obrázok 45 Náprava typu McPherson – koncept č.1, schéma pôsobiacich síl.....	59
Obrázok 46 Náprava typu McPherson – koncept č.2, schéma pôsobiacich síl.....	60
Obrázok 47 Kinematická schéma nápravy s vlečnými ramenami a torznou tyčou, vľavo pohľad zhora, vpravo pohľad zo strany.....	61
Obrázok 48 Náprava s vlečnými ramenami a torznou tyčou s popisom hlavných častí a rez stredom kola.....	61
Obrázok 49 Elektromotory vsadené do zadanej nápravy – hore motor Emrax 208, dole motor DT7.....	62
Obrázok 50 Náprava s vlečnými ramenami a torznou tyčou – koncept č.1 s elektromotorom Emrax 208.....	63
Obrázok 51 Náprava s vlečnými ramenami a torznou tyčou – koncept č.1 s elektromotorom Emrax 228.....	64
Obrázok 52 Schéma úpravy konštrukcie pre zmenšenie zástavbovej dĺžky sústavy.....	65
Obrázok 53 Náprava s vlečnými ramenami a torznou tyčou – koncept č.1 s elektromotorom Nova 50.....	66
Obrázok 54 Náprava s vlečnými ramenami a torznou tyčou – koncept č.2, umiestnenie elektromotoru vľavo – v osi kola, vpravo – mimo os kola.....	67
Obrázok 55 Náprava s vlečnými ramenami a torznou tyčou – koncept č.2 s elektromotorom DT7.....	67



## Zoznam tabuliek

Tabuľka 1 Typy pohonu u vybraných elektrických vozidiel .....	14
Tabuľka 2 Parametre zadaných vozidiel a pohonného ústrojenstva .....	22
Tabuľka 3 Prenositeľný moment na prednej náprave pre rôzne hodnoty súčiniteľu adhézie .....	24
Tabuľka 4 Parametre zvolených elektromotorov .....	28
Tabuľka 5 Hodnoty bezpečnosti pre ohyb v päte zubu a bezpečnosti v dotyku planétového prevodu pre motor Emrax 208 .....	30
Tabuľka 6 Parametre planétových prevodoviek.....	30
Tabuľka 7 Vstupné hodnoty pre simulačné modely .....	31
Tabuľka 8 Výsledné hodnoty simulácií akcelerácie .....	37
Tabuľka 9 Výsledné hodnoty simulácií brzdenia .....	38
Tabuľka 10 Lichobežníková náprava – koncept č.2. Hodnoty statickej bezpečnosti ložísiel .....	51
Tabuľka 11 Náprava typu McPherson – koncept č.2. Výpočet statickej bezpečnosti ložísiel.....	60
Tabuľka 12 Náprava s vlečenými ramenami a torznou tyčou. Výpočet statickej bezpečnosti ložísiel	69



## Prehľad použitých skratiek a symbolov

Označenie	Názov veličiny	
FWD	Vozidlo s pohonom prednej nápravy	
RWD	Vozidlo s pohonom zadnej nápravy	
AWD, 4WD	Vozidlo s pohonom oboch náprav	
2WD	Vozidlo s pohonom jednej nápravy	
EREV	Elektrické vozidlo s predĺženým dojazdom	
MPV	Viacúčelové vozidlo, minivan	
ET	Zális disku kolesa	
$F_y$	Priečna sila v kontaktnej ploche pneumatiky s vozovkou	[N]
$W_t$	Prenos hmotnosti	[N]
$F_h$	Hnacia sila na kolesách	[N]
$F_{f\_stat}$	Statické zaťaženie prednej nápravy	[N]
$F_{f\_dyn}$	Dynamické zaťaženie prednej nápravy	[N]
$F_{z\_dyn}$	Zvislé dynamické zaťaženie	[N]
$F_{r\_dyn}$	Dynamické zaťaženie zadnej nápravy	[N]
$h$	Výška ťažiska	[m]
$L$	Rázvor	[m]
$l_1$	Vzdialenosť ťažiska od prednej nápravy	[m]
$l_2$	Vzdialenosť ťažiska od zadnej nápravy	[m]
$M_f$	Maximálny prenositeľný moment na prednej náprave	[Nm]
$m$	Hmotnosť	[kg]
$r_{dyn}$	Dynamický polomer pneumatiky	[m]
$\mu$	Súčiniteľ adhézie	[-]
$n_k$	Otáčky kolesa	[ot.min <sup>-1</sup> ]
$M_{max}$	Maximálny moment elektromotoru	[Nm]
$n_{Mmax}$	Maximálne otáčky, pri ktorých elektromotor dosahuje maximálny moment	[ot.min <sup>-1</sup> ]
$K_A$	Súčiniteľ vonkajších dynamických síl	[-]



$C_x$	Súčiniteľ odporu vzduchu	[-]
$S_x$	Čelná plocha vozidla	[m <sup>2</sup> ]
$\rho$	Hustota	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$f$	Súčiniteľ valivého odporu	[-]
$F_F$	Hnacia sila na prednej náprave	[N]
$F_R, F_{xr}$	Hnacia sila na zadnej náprave	[N]
$R_a$	Odpor vzduchu	[N]
$R_v$	Valivý odpor	[N]
$F_{mf}$	Hnacia sila elektromotoru na predných kolesách	[N]
$F_{mr}$	Hnacia sila elektromotoru na zadných kolesách	[N]
$F_m$	Hnacia sila elektromotoru na kolesách	[N]
$F_x$	Hnacia sila	[N]
$v$	Rýchlosť	[m.s <sup>-1</sup> ]
$i_{CG}$	Prevodový pomer čelného prevodu	[-]
$i_{PG}$	Prevodový pomer planétového prevodu	[-]
$a$	Zrýchlenie	[m.s <sup>-2</sup> ]
$W_f$	Zvislé zaťaženie predného kolesa	[N]
$W_r$	Zvislé zaťaženie zadného kolesa	[N]
$R_A$	Reakcia v mieste A	[N]
$R_B$	Reakcia v mieste B	[N]
$F_{r\_CG}$	Radiálna zložka sily čelného prevodu	[N]
$F_{a\_CG}$	Axiálna zložka sily čelného prevodu	[N]
$F_{a\_PG}$	Axiálna zložka sily planétového prevodu	[N]
$F_a$	Celková axiálna sila	[N]
$F_r$	Celková radiálna sila	[N]
$P_0$	Ekvivalentné statické zaťaženie	[N]
$X_0$	Súčiniteľ radiálneho zaťaženia	[-]
$Y_0$	Súčiniteľ axiálneho zaťaženia	[-]
$C_{0r}, C_0$	Základná statická únosnosť ložiska	[kN]
$s_0$	Statická bezpečnosť ložiska	[-]



## Zoznam príloh

- Príloha č.1** Grafy závislosti efektívneho vertikálneho zrýchlenia na frekvencii pri prejazde rôznych typov nerovností vozovky s vyznačenými hranicami vplyvu na človeka
- Príloha č.2** Tabuľka hodnôt súčiniteľu adhézie pneumatiky na rôznych povrchoch, tabuľka hodnôt súčiniteľu vonkajších dynamických síl
- Príloha č.3** Výkresy a výkonové krivky elektromotorov Nova
- Príloha č.4** Katalógové listy elektromotorov Emrax
- Príloha č.5** Výkonové krivky elektromotoru DT7
- Príloha č.6** Výsledné grafy simulácií pozdĺžnej dynamiky
- Príloha č.7** Parametre použitých ložisiek