

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Dopravní a manipulační technika

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vozidla s nezávislým elektrickým pohonem všech kol

Autor: **Jiří Hosnedl**
Vedoucí práce: **Ing. Roman ČERMÁK, Ph.D.**

Akademický rok 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří HOSNEDL**

Osobní číslo: **S13B0156P**

Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Dopravní a manipulační technika**

Název tématu: **Vozidla s nezávislým elektrickým pohonem všech kol**

Zadávací katedra: **Katedra konstruování strojů**

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

Základní požadavky:

Proveďte rešerši v oblasti vozidel s nezávislým pohonem kol. Zpracujte tematiku z hledisek principů činnosti, srovnání jednotlivých koncepcí, vlastností, aplikací, atd. Zmapujte trendy v oboru a očekávaný budoucí vývoj. Uveďte teoretický základ potřebný k popisu dynamiky vozidla. Proveďte simulaci vozidla ve vybraném simulačním nástroji. V praktické části práce navrhnete ovládání jednotlivých pohonů kol pro experimentální vozidlo. Podle možností otestujte navrženou variantu simulačně nebo na reálném systému.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova bakalářské práce:

1. Rešerše v zadané oblasti, zmapování trendu a očekávaného vývoje
2. Teoretický popis a simulační model
3. Návrh ovládání pohonů a testování

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah kvalifikační práce: **30-40 stran A4**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

FIJALKOWSKI, B. T. *Automotive Mechatronics: Operational and Practical Issues.*
New York: Vol.II, Springer, 2011, ISBN 978-94-007-1182-2

RILEY, R. Q. *Alternative Cars in the 21st Century A New Personal Transportation Paradigm.* USA: 2nd ed., SAE, Warrendale, 2003, ISBN 0-7680-0874-3

Podkladový materiál, výkresy, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Roman Čermák, Ph.D.**

Katedra konstruování strojů

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Pavel Florian**

Katedra konstruování strojů

Datum zadání bakalářské práce: **19. září 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2017**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Václava Lašová, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 19. září 2016

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

| | | | |
|----------------------|--|-------------------|--------------------------------|
| AUTOR | Příjmení Hosnedl | Jméno Jiří | |
| STUDIJNÍ OBOR | „Dopravní a manipulační technika“ | | |
| VEDOUcí PRÁCE | Příjmení (včetně titulů) Ing. Čermák, Ph.D. | Jméno Roman | |
| PRACOVISŤE | ZČU - FST - KKS | | |
| DRUH PRÁCE | DIPLOMOVÁ | BAKALÁŘSKÁ | Nehodící se škrtněte |
| NÁZEV PRÁCE | Vozidla s nezávislým elektrickým pohonem všech kol | | |

| | | | | | |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|
| FAKULTA | strojní | KATEDRA | KKS | ROK ODEVZD. | 2017 |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

| | | | | | |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|---|
| CELKEM | 64 | TEXTOVÁ ČÁST | 62 | GRAFICKÁ ČÁST | 2 |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|---|

| | |
|---|--|
| <p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p> | <p>Bakalářská práce se blíže zaměřuje na vozidla s nezávislým elektrickým pohonem. Teoretická část si klade za cíl zmapovat současný a budoucí vývoj. V praktické části je popisován simulační model. Dále je popisováno ovládání a testování na reálném modelu.</p> |
| <p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p> | <p style="text-align: center;">Nezávislý pohon všech kol, elektrický pohon, hybridní pohon, elektronický diferenciál, Adams</p> |

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

| | | | | |
|--------------------------|--|-----------------|----------------------------|--|
| AUTHOR | Surname Hosnedl | Name Jiří | | |
| FIELD OF STUDY | “Transport and handling machinery“ | | | |
| SUPERVISOR | Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Čermák, Ph.D. | Name Roman | | |
| INSTITUTION | ZČU - FST - KKS | | | |
| TYPE OF WORK | DIPLOMA | BACHELOR | Delete when not applicable | |
| TITLE OF THE WORK | Vehicles with independent electric drive on several wheels | | | |

| | | | | | |
|----------------|------------------------|-------------------|----------------|---------------------|------|
| FACULTY | Mechanical Engineering | DEPARTMENT | Machine Design | SUBMITTED IN | 2017 |
|----------------|------------------------|-------------------|----------------|---------------------|------|

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

| | | | | | |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|---|
| TOTALLY | 64 | TEXT PART | 62 | GRAPHICAL PART | 2 |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|---|

| | |
|---|---|
| BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS | The bachelor thesis is focuses on vecicles with independent electric drive. The theoretical part aims to map current and future developments. The simulation model is described in the practical part. Next is control and testing on the real model described. |
| KEY WORDS | Independent drive all wheel, electric drive, hybrid drive, electronic differential, Adams |

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval Ing. Romanu Čermákovi, Ph.D. za projevenou ochotu a poskytnutí cenných rad.

Obsah

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Úvod..... | 1 |
| 2 | Historie..... | 2 |
| 2.1 | Úvod do stručné historie..... | 2 |
| 2.2 | Smysl diferenciálu | 3 |
| 2.3 | Pohon konvenčních diferenciálů | 3 |
| 2.4 | Mechanické diferenciály..... | 4 |
| 2.4.1 | Svorný diferenciál | 4 |
| 2.4.2 | Kuželový diferenciál | 4 |
| 2.4.3 | Uzávěrka kuželového diferenciálu..... | 5 |
| 2.4.4 | Čelní diferenciál | 6 |
| 2.4.5 | Samosvorný diferenciál Torsen..... | 7 |
| 2.4.6 | Spojka Haldex | 7 |
| 3 | Elektronické diferenciály | 9 |
| 3.1 | Současný trend ve vývoji vozidel..... | 10 |
| 3.1.1 | Úvod do problematiky..... | 10 |
| 3.2 | Elektromobil BMW i3 | 11 |
| 3.3 | Liebherr | 12 |
| 3.4 | Mitsubishi S-AWC | 13 |
| 3.5 | Audi ESC..... | 14 |
| 4 | Kinematický a dynamický rozbor..... | 16 |
| 4.1 | Teoretický pohled | 16 |
| 4.2 | Úvod do praktického pohledu..... | 19 |
| 4.2.1 | Nedotáčivost..... | 20 |
| 4.2.2 | Přetáčivost | 20 |
| 4.2.3 | Ideální průjezd..... | 21 |
| 4.3 | Praktický pohled | 21 |
| 4.3.1 | Kammova kružnice přilnavosti | 22 |
| 5 | Simulace..... | 23 |
| 5.1 | Simulace kuželového diferenciálu v Adams View | 23 |
| 5.2 | Adams Car | 24 |
| 5.3 | Šablona a subsystém Powertrain | 26 |
| 5.4 | Model vozidla s nezávislým elektrickým pohonem dvou kol | 27 |
| 5.5 | Definice simulační úlohy a prezentace výsledků | 27 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5.5.1 | ISO lane change | 28 |
| 5.5.2 | Simulace s využitím modelu SmartDriver | 29 |
| 5.5.3 | Výsledky provedených simulací | 29 |
| 6 | Demonstrátor..... | 30 |
| 6.1 | Návrh projektu..... | 30 |
| 6.2 | Použité komponenty | 32 |
| 6.2.1 | Mega2560..... | 32 |
| 6.2.2 | Motor shield DK electronic..... | 33 |
| 6.2.3 | Screw shield | 33 |
| 6.2.4 | Stejnoseměrný elektromotor | 33 |
| 6.2.5 | Lineární potenciometr | 34 |
| 6.2.6 | Hodinový displej TM1637 | 34 |
| 6.2.7 | Snímač otáček | 35 |
| 6.3 | Testování demonstrátoru | 35 |
| 6.3.1 | Finální testování levotočivé zatáčky | 36 |
| 7 | Závěr | 38 |
| 8 | Použitá literatura a zdroje | 39 |

Přehled obrázků

| | |
|--|----|
| Obrázek 1 Mechanismus kompasu [2.1.1] | 2 |
| Obrázek 2 Spyker 4WD [2.1.2] | 2 |
| Obrázek 3 Železniční dvojkolí [2.1.3] | 3 |
| Obrázek 4 Vozidlo s více nápravami [2.3.1] | 3 |
| Obrázek 5 Svorný diferenciál | 4 |
| Obrázek 6 Mercedes Benz W25 [2.4.1] | 4 |
| Obrázek 7 Kuželový diferenciál [2.4.2] | 5 |
| Obrázek 8 Schéma kuželového diferenciálu | 5 |
| Obrázek 9 Uzávěrka kuželového diferenciálu [2.4.3] | 6 |
| Obrázek 10 Čelní diferenciál [2.4.4] | 6 |
| Obrázek 11 Samosvorný diferenciál Torsen [2.4.5] | 7 |
| Obrázek 12 Spojka Haldex [2.4.6] | 8 |
| Obrázek 13 Uspořádání systému 4WS [3.0.1] | 9 |
| Obrázek 14 Zastoupení evropského trhu [3.1.1] | 10 |
| Obrázek 15 BMW i3 [3.2.1] | 11 |
| Obrázek 16 Vnitřní uspořádání vozu BMW i3 [3.2.2] | 11 |
| Obrázek 17 Liebherr T282B [3.3.1] | 12 |
| Obrázek 18 Uspořádání technologie S-AWC [3.4.1] | 13 |
| Obrázek 19 Systém Audi ESC [3.5.1] | 14 |
| Obrázek 20 Ackermannova podmínka řízení [4.1.1] | 16 |
| Obrázek 21 Kinematické schéma | 17 |
| Obrázek 22 Zobrazení reálných situací [4.2.1] | 19 |
| Obrázek 23 Nedotáčivost [4.2.2] | 20 |
| Obrázek 24 Přetáčivost [4.2.3] | 20 |
| Obrázek 25 Směrové úhly | 21 |
| Obrázek 26 Závislost adheze na skluzu [4.3.1] | 21 |
| Obrázek 27 Kammova kružnice | 22 |
| Obrázek 28 Vizualizace výsledků simulace diferenciálu | 23 |
| Obrázek 29 Ukázka tvorby sestavy ze subsystémů šablon | 24 |
| Obrázek 30 Sestavení dílčích subsystémů | 25 |
| Obrázek 31 Vygenerované vozidlo | 25 |
| Obrázek 32 Konvenční uspořádání šablony Powertrain [5.3.1] | 26 |
| Obrázek 33 Blokové schéma šablony Powetrain pro nezávislý elektrický pohon | 27 |

| | |
|--|----|
| Obrázek 34 Nahrazení subsystému spalovacího motoru elektromotorem | 27 |
| Obrázek 35 Definice testovací trati manévru ISO lane change [5.5.1] | 28 |
| Obrázek 36 Vizualizace výsledků simulace pro ISO lane change | 28 |
| Obrázek 37 Vizualizace výsledků simulace s využitím modulu SmartDriver | 29 |
| Obrázek 38 Navržený virtuální model | 30 |
| Obrázek 39 Technologické schéma projektu | 31 |
| Obrázek 40 Mega 2560 [6.2.1] | 32 |
| Obrázek 41 Motor shield [6.2.2] | 33 |
| Obrázek 42 Screw shield [6.2.3] | 33 |
| Obrázek 43 Stejnoseměrné elektromotory [6.2.4] | 34 |
| Obrázek 44 Lineární potenciometr [6.2.5] | 34 |
| Obrázek 45 Hodinový displej [6.2.6] | 34 |
| Obrázek 46 Snímač otáček [6.2.7] | 35 |
| Obrázek 47 N-coder | 35 |
| Obrázek 48 Reálně postavený demonstrátor | 35 |
| Obrázek 49 Vizualizace levotočivé zatáčky | 36 |
| Obrázek 50 Softwarový výstup Serial Monitoru | 36 |

Přehled tabulek

| | |
|---|----|
| Tabulka 1 Parametry základní desky Mega2560 [32] | 32 |
| Tabulka 2 Parametry stejnosměrných elektromotorů [35] | 34 |
| Tabulka 3 Výstupní informace otáček | 37 |

Přehled příloh

Příloha č. 1: Zdrojový kód demonstrátoru

Příloha č. 2: Elektrické schéma demonstrátoru

1 Úvod

V současné době jsou nuceni automobiloví konstruktéři odolávat stále většímu množství požadavků, kterým je nutné se při vývoji podřídit. Jedná se zejména o stále se zpřísnující emisní a bezpečnostní normy. Zavedené emisní normy EURO přímo limitují výskyt některých výfukových plynů. Nejnovější norma EURO VI se pozorněji zaměřuje na nedávno vyrobené vozy. Pozadu však nezůstávají ani bezpečnostní systémy, kterým je potřeba věnovat značnou pozornost. S tímto souborem požadavků logicky narůstá i počet nově vzniklých problémů, které je potřeba vyřešit. U konvenčních vozidel je v dnešní době poměrně obtížné vyhovět všem zmíněným požadavkům. Zde se tedy otevírá zcela nový prostor pro vývoj nových pohonných technologií, které budou šetrnější k životnímu prostředí.

Do popředí se začala dostávat tzv. elektromobilita, která postupně vytlačuje běžné spalovací motory. Do této oblasti patří i hybridní vozidla, využívající více než jeden pohon, z nichž je alespoň jeden elektrický. Mezi hlavní důvody konstrukce elektrických vozidel patří nižší provozní náklady a snížená ekologická zátěž.

Cílem této práce je zmapovat minulý, současný a očekávaný vývoj v oblasti mechanismů pro rozdělování výkonu na jednotlivá poháněná kola vozidel, a popsat kinematický a dynamický vliv, který je zvláště důležitý při jejich konstrukci.

Dále se práce zabývá simulací vozidel s důrazem na nezávislý elektrický pohon. Simulace jsou prováděny v prostředí ADAMS/View a ADAMS/Car. V další části práce je věnována pozornost fyzickému demonstrátoru jako modelu reálného systému. Zmíněný demonstrátor je naprogramován a zkonstruován jako výuková pomůcka pro vizualizaci elektrického pohonu všech kol.

2 Historie

2.1 Úvod do stručné historie

Nejnovější archeologické poznatky naznačují, že první mechanismus diferenciálu se používal ve starověku, konkrétněji v antickém Řecku. Antikythera mechanismus nesloužil jako převodové ústrojí u pohonu vozidel, jak se používá dnes. Jeho využití spočívalo v určování úhlu mezi rovinou ekliptiky. Tato rovina se s časem příliš nemění a používá se tedy pro definování ekliptikálních souřadnic. Pomocí výše zmíněných souřadnic se v astronomii určovala poloha nebeského tělesa, jehož dráhy leží blízko ekliptiky. [6]

Počátkem druhého století našeho letopočtu byl v Číně zkonstruován dvoukolový vůz, který byl využíván jako kompas. Jednalo se o typ nemagnetického mechanizovaného kompasu. Tento vůz se mohl natočit zcela libovolným směrem, ale figurka na obrázku 1 ukazovala vždy na jih. Historicky tak šlo o první jednoznačně doložený vynález, kdy bylo využito ozubených kol, které rozdělávaly otáčky na jednotlivá kola. Mechanismus se skládal z několika převodů. Tato ozubená kola byla z hlediska starověké technologie lehce vyrobitelná. [7]



Obrázek 1 Mechanismus kompasu [2.1.1]

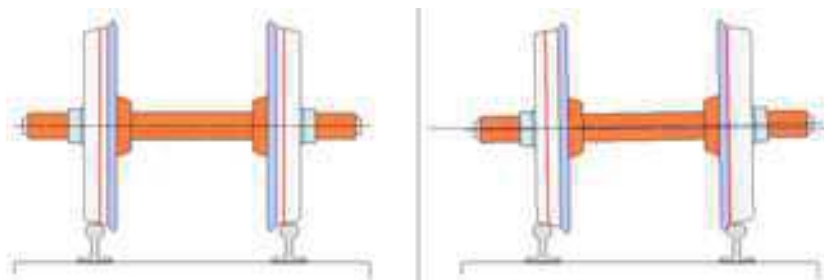
Začátkem osmnáctého století byl vynalezen systém řízení čtyř kol. Jeho vynálezcem byl Rudolf Ackermann, který jako první položil základ pro geometrické uspořádání řízení kol. Tohoto objevu následně využívali konstruktéři z celého světa. [8]

V roce 1902 bylo v nizozemské firmě Spyker poprvé sestrojeno vozidlo Spyker 4WD s pohonem všech čtyř kol. Jako první svého druhu používalo šestiválcový motor. Pohon všech kol zajišťoval ústřední diferenciál. I přes nesporné úspěchy se ale nikdy nedostal do sériové výroby. [9]



Obrázek 2 Spyker 4WD [2.1.2]

Zhruba do roku 1883 se pevně věřilo, že u železničního vozidla, které pojíždí obloukem, doléhají okolky obou vodících dvojkolí na vnější stranu kolejnice. Tato chybná představa byla



Obrázek 3 Železniční dvojkolí [2.1.3]

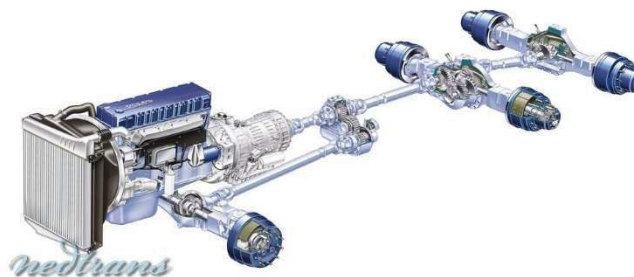
posléze vyvrácena. Železniční kola jsou na nápravě nalisována a tvoří železniční dvojkolí. Obě kola mají tedy stejné obvodové rychlosti. Při průjezdu obloukem je ovšem potřeba zajistit rozdílné otáčky. Řešením tohoto problému je kuželový tvar železničního kola. Vlivem odstředivého zrychlení se dvojkolí posune směrem k vnější kolejnici. V důsledku toho se vnitřní kolo odvaluje na menším průměru než kolo vnější, čímž jsou zajištěny rozdílné obvodové rychlosti. Na obrázku 3 je zobrazena přímá jízda a jízda obloukem. [10]

2.2 Smysl diferenciálu

Hlavní význam konstrukce diferenciálu vychází z jízdy zatáčkou. Z pohledu zatáčky projíždí vnější kolo delší dráhu než kolo vnitřní. Rozdíl dráhy levého a pravého kola bude tím větší, čím bude větší rozchod kol. Vnitřní kolo má vzhledem k projížděné dráze větší počet otáček a negativním důsledkem je dřenění pneumatiky po vozovce a brzdění kola. Vnější kolo má naopak méně otáček, než potřebuje, a pneumatika se rovněž smýká o vozovku. Hnací kola se opotřebovávají a vozidlo vybočuje na vnější stranu zatáčky. Na základě této skutečnosti se vozidla osazují diferenciálem. Tímto krokem se zvětšuje ovladatelnost a přilnavost pneumatik k vozovce a tím pádem klesá opotřebení pneumatik.

2.3 Pohon konvenčních diferenciálů

Pohyb se přenáší od motoru přes spojku do převodovky, zpravidla pak z Kardanovy hřídele na diferenciál, který rozděljuje kroutící moment na hnané poloosy. Vozidla s více nápravami mají obvykle na každé nápravě ještě tzv. mezinápravový diferenciál. Tento druh



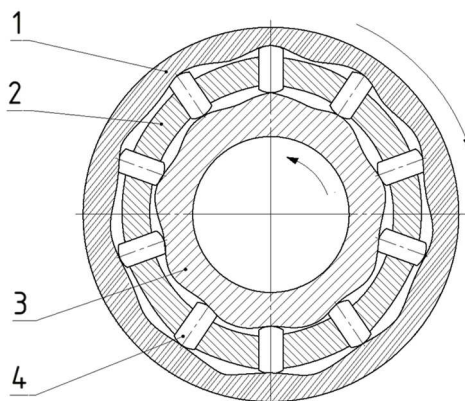
Obrázek 4 Vozidlo s více nápravami [2.3.1]

diferenciálu rozděljuje moment mezi kola dané nápravy. Na obrázku 4 je využito právě těchto mezinápravových diferenciálů. [3]

2.4 Mechanické diferenciály

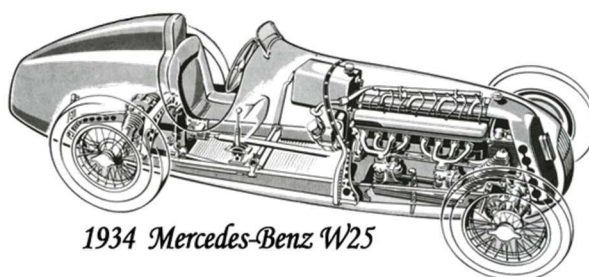
2.4.1 Svorný diferenciál

Historickou zajímavostí byl svorný diferenciál, který byl zkonstruovaný ve třicátých letech 20.století zejména pro potřebu závodních vozů. Skládá se z vnější vačky (1), kolíkového unášeče (2), vnitřní vačky (jádra) (3) a kolíků (4).



Obrázek 5 Svorný diferenciál

Vysoké tření způsobovalo zhoršenou účinnost mechanismu. Tato adheze vyvolává při protáčení jednoho kola velký rozdíl momentu, přenášeného na samotná kola. Diferenciál funguje až se zmenšujícím se poloměrem zatáčky, do té doby se chová jako pevná osa. Hlavním požadavkem při konstrukci bylo zajistit dostatečnou ovladatelnost při současné úspoře hmotnosti. Svorný diferenciál měl proti dnešním provedením asi poloviční účinnost (40-45%). V jednom z prvních vozů značky Mercedes byl použit tento diferenciál. Jednalo se o Mercedes-Benz W25, který vážil 750 kg a byl osazen tří a půl litrovým motorem. U této formule tedy jasně převažovala trakční síla nad adhezními možnostmi. [2]



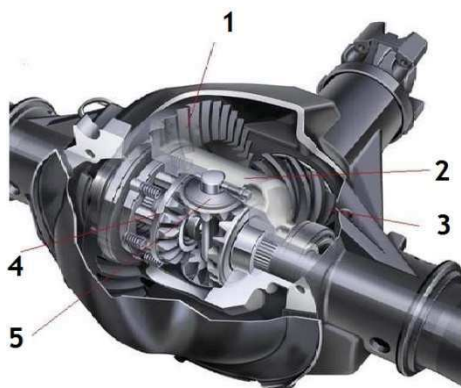
1934 Mercedes-Benz W25

Obrázek 6 Mercedes Benz W25 [2.4.1]

2.4.2 Kuželový diferenciál

Vozidla s kuželovým diferenciálem mají talířové kolo (1) spojeno s klecí (2), která je volně uložena ve skříni rozvodovky. S klecí je dále spojen čep satelitů (5), na kterém jsou volně uloženy satelity. Tyto satelity jsou v záběru s planetovými koly (4). Pohon se přenáší od rozvodovky přes pastorek (3) na talířové kolo (1), a dále pak z talířového kola na klec pevně spojenou s čepem satelitů. Satelity jsou volně uloženy na čepu, takže hnací kola (6) jsou poháněna prostřednictvím satelitů. Součet otáček planetových kol je roven dvojnásobnému

počtu otáček čepu satelitů. Velikost přenášeného momentu udává kolo, které má horší přilnavost vzhledem k vozovce.

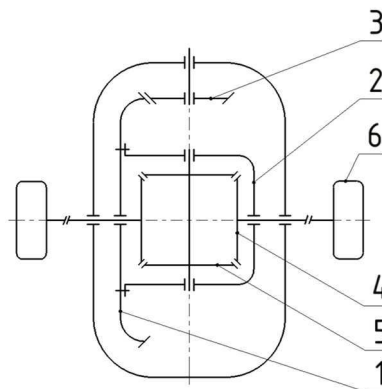


Obrázek 7 Kuželový diferenciál [2.4.2]

Při dokonalé přímé jízdě je odpor kol proti otáčení u obou kol stejný, tento odpor vzniká mezi pneumatikou a vozovkou. Satelity se v té chvíli nepohybují a tvoří jen pomyslnou zubovou spojku mezi planetovými koly. Kroutící moment je rozdělen rovným dílem.

V zatáčce má vnější kolo tendenci zvýšit své otáčky, takže klade otáčení menší odpor než kolo vnitřní. Na satelity pak působí rozdílné síly, které je roztáčí ve směru menšího odporu.

Výhodou tohoto provedení je relativně jednoduchá konstrukce a dobrá mechanická účinnost, která je podstatně větší než u svorného diferenciálu. V dnešní době jsou tyto diferenciály konstruované jako samočinné. V případě potřeby se uzávěrka diferenciálu sama uvede do činnosti a zabrání tak prokluzování hnacích kol.

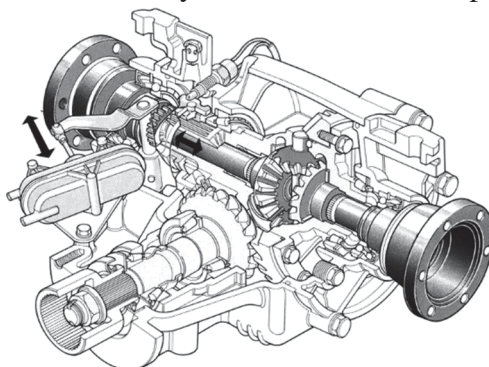


Obrázek 8 Schéma kuželového diferenciálu

2.4.3 Uzávěrka kuželového diferenciálu

Slabou stránkou diferenciálu je stav při rozjíždění, kdy jedno z kol stojí na pevné půdě, tj. má dobrou adhezi, a naopak druhé kolo vykazuje nízkou adhezi. Kolo, které má lepší adhezi zůstane stát i s planetovým kolem. V této chvíli není tedy přenesen žádný moment. Po planetovém kole se začnou odvalovat satelity a zároveň předávají pohyb druhému planetovému kolu, které se otáčí s hřídelem kola. Vozidlo zůstane stát a kolo na kluzké půdě se začne zahrabávat. Výše uvedený problém řeší tzv. uzávěrka diferenciálu, která v podstatě vyřadí

diferenciál z činnosti, a tak se obě hnací kola otáčejí stejnými otáčkami. V této chvíli se chovají jako pevná osa. U starších konstrukcí býval závěr konstruován jako spojka, která spojila hřídele obou kol nebo častěji spojila jen jedno planetové kolo s klecí diferenciálu. Na obrázku 9 je vidět spojení levé poloosy s klecí diferenciálu. Klasické konstrukce bývají v podobě zubové spojky nebo přesuvné objímky. Ovládání může být mechanické, elektropneumatické nebo samočinné.



Obrázek 9 Uzávěrka kuželového diferenciálu [2.4.3]

Mechanické ovládání se dnes využívá prakticky jen u dvoukolových vozidel, které jsou spojeny osou. Při dlouhodobém ponechání zařazené uzávěrky hrozí při projíždění zatáčky smyk. Dalším výrazným nedostatkem je nadměrné opotřebení pneumatik.

Pro potřeby terénních vozidel byl vyvinut částečně svorný diferenciál. U této koncepce je také závěr, který se spíná automaticky, ale jen pro malé rychlosti. Při běžných adhezních podmínkách diferenciál pracuje standardně. V okamžiku, kdy se jedno z kol začne otáčet podstatně rychleji než kolo druhé, se otevře odstředivé závaží. V důsledku odstředivých sil, které plynou z vysoké obvodové rychlosti, se závaží zachytí západkou. Výsledek je blokování kola s nižší adhezí.

2.4.4 Čelní diferenciál

Funkce čelního diferenciálu je prakticky obdobná kuželovému. Hlavním rozdílem od kuželového diferenciálu, který má kuželové ozubení, je použití čelních soukolí. Místo jednoho kuželového satelitu je využito dvojice satelitů čelních. Tento druh diferenciálu má dva páry satelitů. Uzávěrka diferenciálu je řešena podobně jako u kuželového. [3]

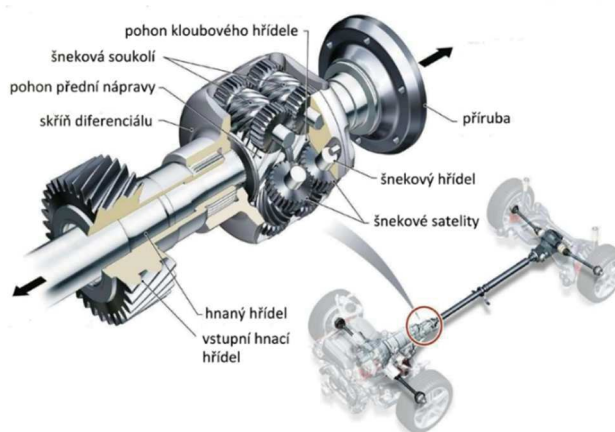


Obrázek 10 Čelní diferenciál [2.4.4]

2.4.5 Samosvorný diferenciál Torsen

Zásadním důvodem pro konstrukci samosvorných diferenciálů, byl fakt, že uzávěrka diferenciálu nedovoluje rozdílné otáčky kol. Její použití je mimo měkký povrch a malé rychlosti krajně nevhodné. V okamžiku, kdy je uzávěrka aktivní, je velice obtížné s vozidlem zatočit. Pro eliminování těchto problémů se vyvinuly samosvorné diferenciály, které zamezují protáčení jednotlivých kol vůči sobě.

Tyto druhy diferenciálů rozdělují hnací moment v závislosti na okamžité adhezi. Mezinápravový diferenciál Torsen převádí točivý moment ze šneku na šnekové kolo. V tomto uspořádání plní dva šneky roli planetových kol. Satelity jsou spojeny šnekovými satelity, tj.



Obrázek 11 Samosvorný diferenciál Torsen [2.4.5]

ozubenými koly s přímými zuby. Díky svornému účinku se zvětšuje moment na kole s lepší adhezí. Tohoto jevu se dosahuje třením ve šnekovém převodu. Jakožto mezinápravový diferenciál rozděluje moment mezi přední a zadní nápravu, kde je ještě využito mezinápravových diferenciálů. Je tedy hojně využíván v automobilech s pohonem všech kol. [11]

2.4.6 Spojka Haldex

Dalším konstrukčním řešením mezinápravového diferenciálu je Haldex spojka. Tato koncepce bývá označována za most mezi klasickými mechanickými a elektronickými diferenciály. Spojka je osazena těsně před zadním diferenciálem. Podobně jako u systému Torsen se spojka využívá u pohonu všech kol a rozděluje hnací moment mezi přední a zadní nápravu. Důležitým prvkem je elektronicky řízená spojka. Řídící jednotka přímo reguluje výkon mezi přední a zadní nápravu. Elektronika této spojky pracuje s informacemi o aktuálním stavu otáček, točivého momentu a rychlosti kol. Za běžných podmínek převádí většinu točivého momentu na přední nápravu. Při prokluzu se spojka vlivem tlaku oleje, který je dodáván čerpadlem, pomalu uzavře a dokáže přenést prakticky všechnu sílu od motoru na zadní nápravu. Spouštěčem této akce je rozdíl otáček předních kol, lišících se o určitou hodnotu. Každá vývojová generace této spojky vyhodnocuje data rozdílným způsobem. Čím je větší rozdíl otáček, tím více vzrůstá tlak, který vytvářejí dvě axiální pístová čerpadla. Celý systém je pak řízen regulačními ventily, které jsou ovládány přímo z řídicí jednotky.

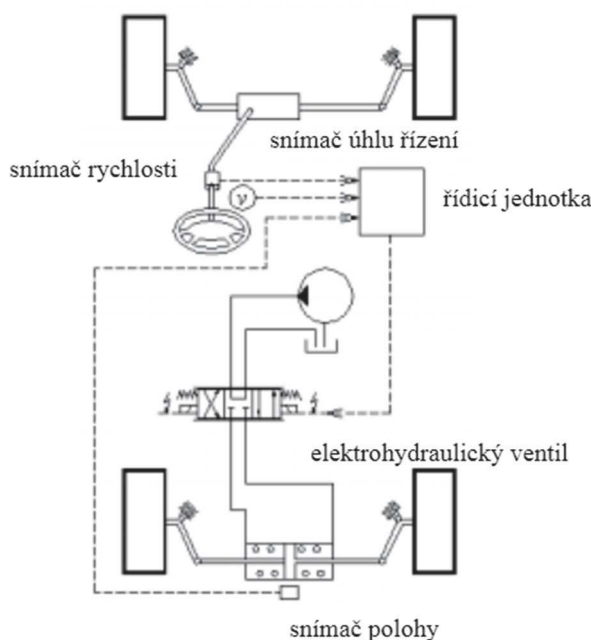
V porovnání s čistě mechanickým diferenciálem Torsen, využívá tato spojka převážně elektronický systém, který lépe rozkládá moment mezi nápravami. Naproti tomu systém Torsen se pyšní stálým pohonem všech kol. [12,13,14]



Obrázek 12 Spojka Haldex [2.4.6]

3 Elektronické diferenciály

Vzhledem k požadavkům současné doby, kdy je zákazníky kladena řada požadavků se vyvíjejí aktivní diferenciály. Aktivním řízením se sleduje především stabilita jízdy. Základním zařízením je řídicí jednotka, která signály zabezpečuje požadovaný chod. Systém dat, které zpracovává, pracuje ve většině případů s těmito informacemi: otáčky kol, stáčení vozu, zrychlení, natočení volantu a poloha plynového pedálu. Díky těmto informacím umožňuje předpovídat chování vozu v následujícím okamžiku a jednat tak s jistým předstihem, na rozdíl od jiných systémů, které reagují na situaci již vzniklou. Elektronický diferenciál upravuje otáčky hnaných kol podle úhlu zatočení říditelné nápravy. Z tohoto úhlu se zpravidla vyhodnocuje poloměr zatáčení a dochází k upravení rychlosti kol tak, aby na všechna kola byly dodávány točivé momenty, které potřebují. Tyto systémy vyžadují další řadič, který provádí stejný úkol jako mechanický diferenciál. Cílem těchto kroků je upravení rychlosti hnacích kol. Systém je znám pod zkratkou MMS (Multi Machine System) - systém vozidla s více samostatně řízenými motory. Nespornou výhodou je nižší hmotnost oproti mechanickému diferenciálu. V této koncepci může odpadat spojka, v některých případech i převodovka a celá část mechanické rozvodovky. Další výhodou je nezávislé rozdělení otáček mezi jednotlivá hnací kola.



Obrázek 13 Uspořádání systému 4WS [3.0.1]

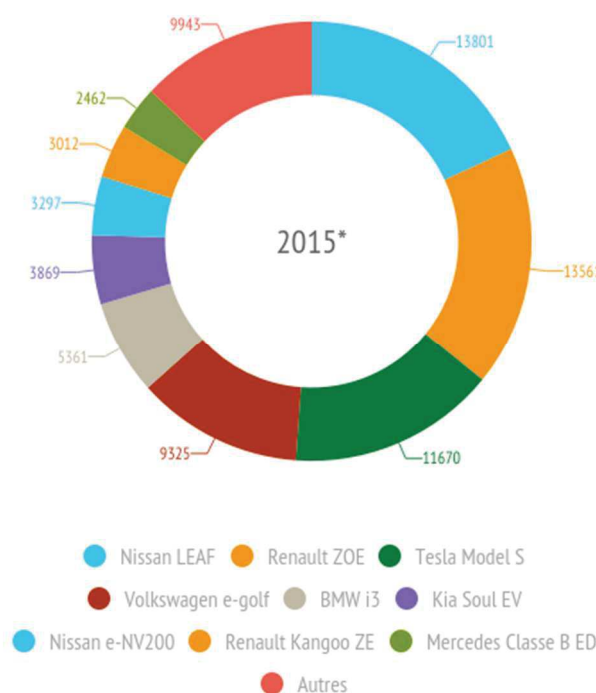
Na obrázku 13 je zobrazena funkce systému 4WS (Four Wheel Steering) – systém řízení čtyř kol. Toto konstrukční řešení umožňuje natáčení zadních kol dle vstupních snímaných parametrů. Na základě těchto informací systém vyhodnotí výstupní veličinu, která ovládá silový člen, který je řízen pomocí hydraulického ventilu, který řídí obvod s hydromotorem. V konečné fázi hydromotor upravuje natočení zadních kol. [1,2,15]

3.1 Současný trend ve vývoji vozidel

3.1.1 Úvod do problematiky

Soudobý trend si klade za cíl dosáhnout větší dopravní bezpečnosti, nižší spotřeby a také nižších emisí. Cest, kterými lze docílit tyto nové požadavky, je nespočet. Například u čistě benzínových motorů se snižuje zdvihový objem, nižší výkon se poté snaží dodat prostřednictvím turbodmychadla. Značná část výrobců se také snaží o odlehčení konstrukce, kde je velká poptávka po nových materiálech. Nedílnou součástí dnešních vozidel se pomalu, ale jistě stávají indikátory řazení, které se snaží ještě více s počítačovou přesností optimalizovat spotřebu paliva. Softwarové systémy zabezpečují zpětnou vazbu mezi uživatelem a vozidlem. Tyto systémy monitorují komplexní styl jízdy, který podle celé řady aspektů vyhodnotí. Výsledkem toho jsou cenné rady a tipy pro řidiče, jak co nejlépe optimalizovat svou jízdu.

Další možnou cestou jsou hybridní vozidla a elektromobily. U hybridů se ve většině případů jedná o kombinaci klasického spalovacího motoru s podpůrným elektromotorem. Tato vozidla jsou většinou dobíjena přímo z elektrické zásuvky (plug-in-hybrid). Většina světových výrobců ale spíše investuje do vývoje elektromobilů, které se těší stále větší popularitě. Velká část v městech žijících zákazníků požaduje například automatickou převodovku a menší



Obrázek 14 Zastoupení evropského trhu [3.1.1]

provozní náklady vozu. Tyto potřeby jsou uspokojeny právě konstrukcí elektromobilu. Do budoucna se tak plánuje přechod na čistě elektrický pohon. V současnosti se na trhu objevují elektromobily, které mají reálný dojezd okolo 100-200 km. Tato vozidla jsou čím dál více využívána ve velkých městech. Jistou výhodou je záběr elektromotoru při nejnižších otáčkách, kde lze využít plný výkon motoru. K největším problémům dnešní koncepce patří limitované dynamické vlastnosti a velké množství času, které je potřebné pro nabití. Další otázkou je pak

samotná životnost baterie. S problémem nabíjení souvisí i poměrně malá městská infrastruktura dobíjecích stanic. Nejdůležitějším aspektem je ovšem cena, která se všeobecně pohybuje mnohem výše, než je tomu u vozidel s konvenčním pohonem. Na obrázku 14 je znázorněno celkové zastoupení evropského trhu podle prodaných vozidel. Z obrázku je patrné, že za rok 2015 se celkově prodalo okolo sedmdesáti tisíc těchto elektromobilů. [1,16,18]

3.2 Elektromobil BMW i3

BMW i3 je elektromobil, který dobyl český trh v oblasti elektromobilů a hybridních vozidel. Ve světovém měřítku se prodej pohybuje mezi prvními pěti nejprodávanějšími elektromobily na světě za rok 2015. I přesto se doba nabití baterie stále ještě pohybuje okolo desíti hodin.



Obrázek 15 BMW i3 [3.2.1]

Tento čtyřmístný vůz vyhovuje nejprísnějším ekologickým požadavkům. V tomto případě se také kladl vysoký požadavek na zmenšení hmotnosti. Hlavním důvodem je menší zátěž elektromotoru, a tím větší úspora baterie. Lithium-iontový akumulátor váží 230 kg a hmotnost celého vozu je stlačena pod 1200 kg. Na obrázku 16 je vidět zajímavé uspořádání akumulátorů. Netradičním řešením bylo použití termoplastu na vnější díly karoserie. Interiér je



Obrázek 16 Vnitřní uspořádání vozu BMW i3 [3.2.2]

tvořený celou řadou vymožeností v podobě širokouhlého monitoru a vestavěné navigace. Pohon obstarává centrální synchronní elektromotor, který je umístěn v zadní části vozu. Celkový výkon činí 150 kW s točivým momentem 250 Nm. Tento kroutící moment je prakticky dostupný už od nejnižších otáček. Tato skutečnost je hlavním důvodem, proč je toto vozidlo hojně využíváno právě na městských komunikacích. Pro tyto účely byla vyvinuta jednostupňová převodovka. V ekonomickém režimu automobilka garantuje dojezd až 200 km.

Relativní náklady na 1 km jízdy jsou výrazně nižší, než je tomu u klasických spalovacích motorů. Přes všechny zmíněné silné stránky je tento vůz ekonomicky dostupný jen malé části populace. [17]

3.3 Liebherr

Liebherr německá firma, která již představila celou řadu vozidel s nezávislým pohonem kol. Byla založena v roce 1949 a v současné době se řadí mezi světové špičky v oblasti jeřábů a stavebních strojů. Firma vyrábí ve 25 továrnách v různých částech světa na čtyřech kontinentech. První sériově vyráběný vůz byl mobilní věžový otočný jeřáb. Hlavními odběrateli této techniky jsou především firmy, které se zabývají těžbou uhlí.



Obrázek 17 Liebherr T282B [3.3.1]

Nadnárodní společnost Liebherr přišla v roce 2004 na trh s obrovským nákladním vozidlem Mining truck T282 B. Do roku 2013 byl považován za jediné vozidlo s užitečným zatížením až 360 tun. Před konstruktéry stál nelehký úkol, potřebovali co možná nejvíce uspořit hmotnost při zachování požadovaného výkonu. Dalším požadavkem bylo maximalizovat produktivitu a minimalizovat spotřebu paliva. Výsledkem těchto požadavků je kombinace diesellového motoru s efektivním elektronickým pohonným systémem Litronic Plus AC. Tato spolupráce bývá označována jako hybridní pohon. Prvotním zdrojem energie je spalovací diesellový motor, který je na společné hřídeli s elektrickým generátorem. Přeměnou mechanické energie motoru na elektrickou energii generátoru se vyrábí střídavý proud pro pohon elektromotorů. Pohon zadních kol tedy zajišťuje elektronický diferenciál. Elektrický pohonný systém je tedy složen ze dvou nezávislých elektromotorů. Každý motor rozděljuje nezávisle otáčky na své hnací kolo. Oba elektromotory koriguje řídicí jednotka. Při projíždění zatáčky pohonný systém automaticky upraví točivý moment na zadní kola. Výsledkem je přizpůsobení rychlosti v zatáčce, čímž se zvyšuje přilnavost a klesá opotřebení pneumatik. Největší konstrukční rychlost je 64 km/h a celkový výkon činí neuvěřitelných 2700 kW. Pohotovostní hmotnost vozidla je 237 t, ale dokáže pracovat až s trojnásobkem své hmotnosti. Průměrná spotřeba se pohybuje okolo 170 l/h. Každý rok se jich prodá desítky kusů, jedná se tedy o malosériovou výrobu.

Vhodnou regulací zmíněného hybridního pohonu lze velice dobře optimalizovat výkon tohoto nákladního vozidla. Tato sestavená konstrukce dosahuje velkého záběrového momentu, který je potřeba hlavně při rozběhu. K jistým záporům patří vyšší cena, která se odráží ve složitosti použité technologie a všeobecné náročnosti konstrukce. [19,20]

3.4 Mitsubishi S-AWC

Japonští vývojáři přišli s tímto zajímavým pohonem všech čtyř kol. Technologie se vyvíjí od roku 2007. Systém S-AWC (Super All Wheel Control) je tvořen aktivním předním diferenciálem a elektronicky řízenými spojkami. Aktivní systém vyhodnocuje výstupní data v řádech milisekund. Vstupními daty pro systém jsou: rychlost, zrychlení a úhel natočení předních kol. Výstupy elektricky řízených spojek jsou spojeny s hnací poloosou a mezi vstupy a diferenciálem jsou vloženy převody. Je-li například potřeba urychlit pravé kolo, začne se spínat řízená spojka a pravá poloosa je urychlována. Zároveň se o stejnou hodnotu zpomaluje protilehlá poloosa. Celý systém se skládá ze čtyř dílčích synchronizovaných podsystémů ACD



Obrázek 18 Uspořádání technologie S-AWC [3.4.1]

(Active Center Differential), AYC (Active Yaw Control), ASC (Active Stability Control) a ABS (Antiblock Brake System). Podsystém ACD používá elektronicky řízenou lamelovou spojku a rozděluje točivý moment proudící na přední a zadní nápravu tak, aby byla zajištěna co nejlepší trakce a ovladatelnost. Výchozí konfigurace rozděluje stejným dílem moment mezi přední a zadní nápravu. AYC má za úkol přesně vyhodnotit dynamiku vozidla v reálném čase a na základě těchto informací rozdělit moment mezi zadními koly. Bezpečnost je pod dohledem systému ASC, který zlepšuje trakci při zrychlení tak, že brání prokluzování kol na kluzkém povrchu. ABS je bezpečnostní systém, který brání zablokování kol a následnému smyku.

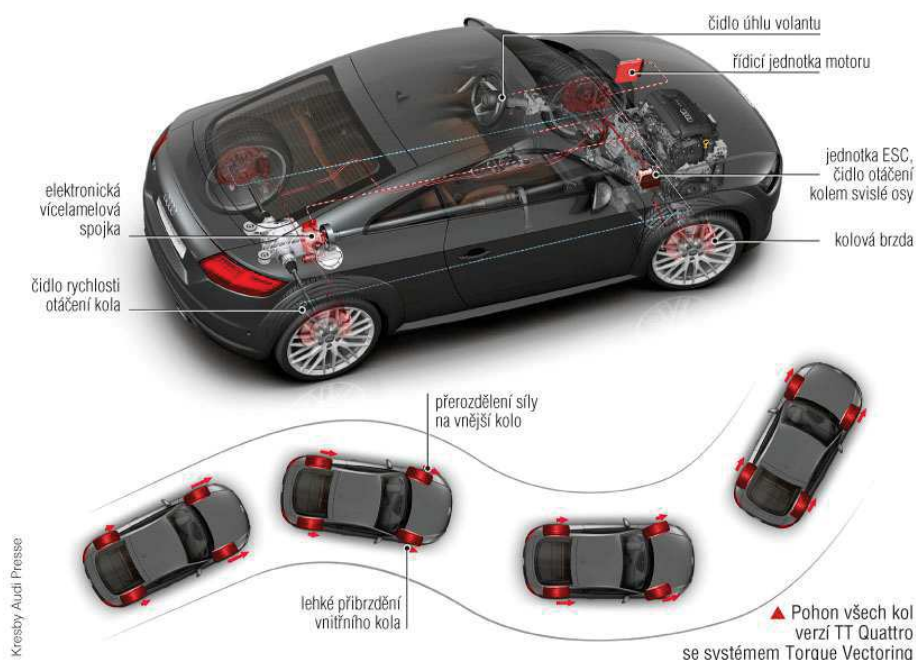
Uživatel si může sám z pohodlí vozu zvolit optimální konfiguraci svého vozu podle stavu vozovky jedním ze čtyř režimů. Cílem je rozložení kroutícího momentu mezi jednotlivé nápravy, a tím získání optimálního výkonu.

- ECO - Ekonomický mód
- NORMAL - Pro požití za běžných podmínek
- SNOW - Zimní režim za různých podmínek
- LOCK - Režim na kluzké vozovce

Jestliže byl zaznamenán prokluz některého z kol, kdy dochází ke ztrátě adheze a systém reaguje přes řídicí jednotku změnou těchto poměrů. Největší přerozdělení kroutícího momentu je 50:50 mezi přední a zadní nápravou. [21,22]

3.5 Audi ESC

Se svou technologií nezůstává pozadu ani automobilka Audi. Stabilizační program ESC (Electronic stability control) je v jistém slova smyslu nadstavbou systému ESP (Electronic Stability Programme). Jedná se o technologii, která v zásadě zlepšuje stabilitu vozu. ESC je vybaven elektronickým diferencialem s omezeným prokluzem. Systém tvoří hydraulický agregát fungující pomocí série senzorů, které monitorují ztrátu kontroly nad vozidlem. V kritické situaci systém nařizuje sešlápnout brzdový pedál příslušného kola. Elektronický stabilizační systém bez vlivu řidiče uvolní tlak v brzdovém kotouči kola, které ztrácí přilnavost. Systém obvykle dokáže rozpoznat ztrátu nad kontrolou řízení, ještě před jejím vznikem. Brzdnými zásahy vytváří opačný otáčivý moment. Tento moment působí opačným směrem proti vzniklému smyku a snaží se o stabilizaci vozu. Systém ESC je přímo závislý na adhezi



Obrázek 19 Systém Audi ESC [3.5.1]

mezi silnicí a pneumatikou automobilu, proto se chová zcela rozdílně v případě starších ojetých pneumatik. Tato technologie se aktivuje především v situacích, kdy řidič přecení své jízdní schopnosti. Rychle jedoucí vozidlo hůře reaguje na prudké pohyby volantu, a tím ztrácí stabilitu. V tomto momentu se vozidlo dostává do smyku, a právě v tomto okamžiku se otevírá prostor pro stabilizační program. Tento systém v zásadě vyhodnocuje dvě důležité otázky: kam vozidlo směřuje a jakým směrem se reálně pohybuje. Odpovědi na tyto otázky zodpovídá série snímačů.

- Snímač otáček všech kol
- Snímač podélného a příčného zrychlení
- Snímač rychlosti
- Snímač tlaku brzdové kapaliny
- Snímač polohy plynového pedálu
- Snímač natočení volantu

První tři snímače dávají odpověď na první otázku. Zbývající část snímačů zodpovídá druhou otázku, kam se vozidlo skutečně pohybuje. Na základě těchto informací může řídicí jednotka porovnávat odchylky od skutečné a plánované dráhy. Pokud se tato data výrazně liší, vyhodnotí situaci jako kritickou a zasáhne.

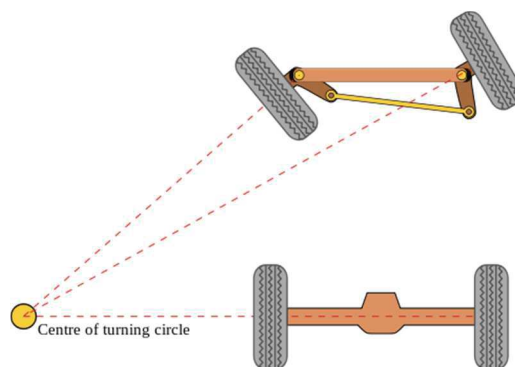
Dle nařízení evropského parlamentu musí být všechny nové automobily vybaveny systémem ESC počínaje rokem 2014. Pro tento systém používají světoví výrobci celou řadu obchodních názvů.

Nevýhodou této technologie je opotřebení brzdového modulu v důsledku blokovacího systému. Elektronická uzávěrka přibrzdí při zatáčení vnitřní kolo permanentně. Záleží na stavu vozovky a zvoleném stylu jízdy, ale obecně je spojena s vyšším opotřebením brzdových kotoučů a destiček. [23,24,28]

4 Kinematický a dynamický rozbor

4.1 Teoretický pohled

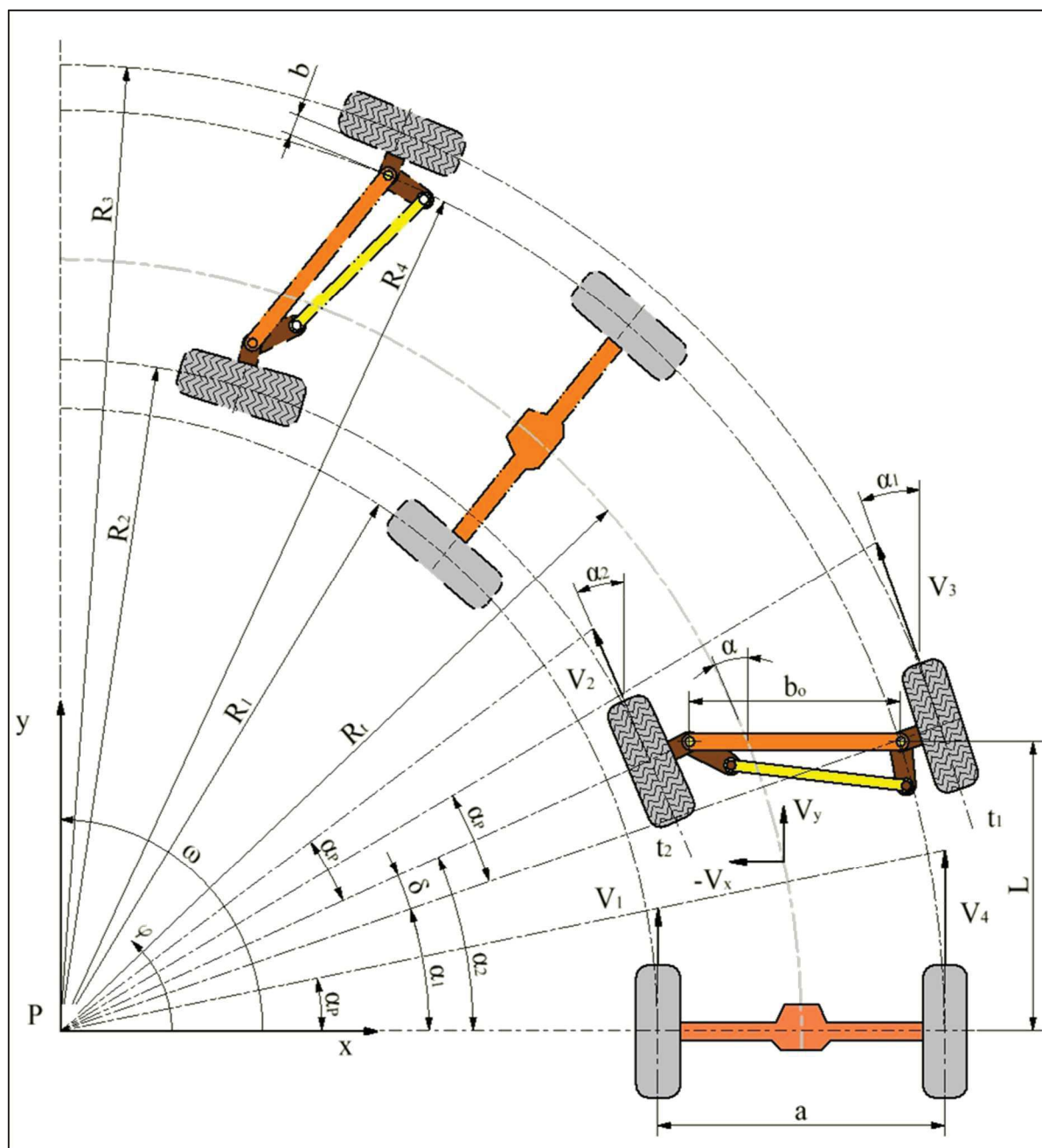
Mechanismus hnacích a hnaných kol musí splňovat určité geometrické závislosti tak, aby byla zajištěna dobrá trakce. Vnější a vnitřní kola opisují různé poloměry. V důsledku této skutečnosti musí být zajištěny rozdílné otáčky. Aby nevznikalo nežádoucí smýkání po vozovce, měl by tedy podvozek splňovat tzv. Ackermannovu podmínku. Tato podmínka formuluje, že pól pohybu P leží na spojnici zadní nápravy a spolu s osami předních kol se protíná v jednom



Obrázek 20 Ackermannova podmínka řízení [4.1.1]

bodě. Pól je dále středem teoretického poloměru zatáčení, z něhož jsou rychlosti všech kol viděny pod stejným zorným úhlem α_p . Vnitřní a vnější kola musí být tedy tečnami poloměrů, které opisují. Z toho plyne, že obě přední kola musí mít jiný úhel natočení. Rozdíly v úhlech natočení definuje tzv. diferenční úhel rejdů δ , který říká, o kolik je natočeno vnitřní kolo vůči vnějšímu. Má velký vliv na jízdní vlastnosti a opotřebení pneumatik. Tuto geometrickou závislost je poměrně obtížné splnit u vozidel, které mají více než jednu nápravu.

Pro požadované závislosti vycházíme z Ackermannovy kinematické podmínky řízení. Uvažované vozidlo se nachází ve dvou polohách. První z nich zobrazuje vozidlo v počátečním stavu, kdy vozidlo právě začíná zatáčet. Koncová poloha je obecná poloha levotočivého zatáčení. V této podkapitole je uvažováno pouze s účinky kinematiky. Pro vyjádření této podmínky definujeme rozvor nápravy, rozchod kol, teoretický poloměr zatáčení, úhel natočení vnějšího kola a úhel natočení vnitřního kola. Z obrázku 21 je patrné, že řídicí páky spolu se spojovací tyčí mají tvar lichoběžníku. Tato geometrická podmínka platí pouze pro malé rychlosti a ideálně tuhá kola. Je zde předpoklad konstantních sil a v dotykové plošce dochází pouze k odvalování, nikoliv ke tření. Následně uvedené formule jsou odvozeny z obrázku 21. [25,26]



Obrázek 21 Kinematické schéma

Výpočet geometrické závislosti mezi úhly natočení předních kol:

$$\cotg \alpha_1 - \cotg \alpha_2 = \frac{b_0}{L} \quad (1)$$

kde: α_1 je úhel natočení vnějšího kola $[\circ]$
 α_2 je úhel natočení vnitřního kola $[\circ]$
 b_0 je rozchod přední nápravy [m]
 L je rozvor vozidla [m]

Výpočet rychlosti vozidla ve směru x:

$$v_x = \frac{dx}{dt} = -\frac{d(R_t \cdot \cos \varphi)}{dt} = R_t \cdot \sin \varphi \cdot \frac{d\varphi}{dt} \quad (2)$$

kde: v_x je rychlost vozidla ve směru x [m/s]
 t je čas [s]
 R_t je teoretický poloměr zatačení [m]
 φ je pomocný úhel při vyjadřování [°]

Výpočet rychlosti vozidla ve směru y:

$$v_y = \frac{dy}{dt} = \frac{d(R_t \cdot \sin \varphi)}{dt} = R_t \cdot \cos \varphi \cdot \frac{d\varphi}{dt} \quad (3)$$

kde: v_y je rychlost vozidla ve směru y [m/s]

Výpočet celkové rychlosti vozidla:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{R_t^2 \omega^2 (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi)} = R_t \cdot \omega \quad (4)$$

kde: ω je úhlová rychlost [1/s]

Výpočet rychlosti kola s indexem 1:

$$v_1 = \omega \cdot \left(R_t - \frac{a}{2}\right) = \pi \cdot D \cdot n_1 \quad (5)$$

kde: v_1 je rychlost kola 1 [m/s]
 a je rozchod vozidla [m]
 π je Ludolfovo číslo [-]
 D je průměr kola [m]
 n_1 jsou otáčky kola 1 [1/s]

Výpočet rychlosti kola s indexem 2:

$$v_2 = \omega \cdot R_2 = \omega \cdot \frac{L - (b \cdot \sin \alpha_2)}{\sin \alpha_2} = \pi \cdot D \cdot n_2 \quad (6)$$

kde: v_2 je rychlost kola 2 [m/s]
 R_2 je vzdálenost od středu ke kolu 2 [m]
 b je rozteč rejdového čepu k ose kola [m]
 n_2 jsou otáčky kola 2 [1/s]

Výpočet rychlosti kola s indexem 3:

$$v_3 = \omega \cdot R_3 = \omega \cdot \frac{L + (b \cdot \sin \alpha_1)}{\sin \alpha_1} = \pi \cdot D \cdot n_3 \quad (7)$$

kde: v_3 je rychlost kola 3 [m/s]
 R_3 je vzdálenost od středu ke kolu 3 [m]
 n_3 jsou otáčky kola 3 [1/s]

Výpočet rychlosti kola s indexem 4:

$$v_4 = \omega \cdot \left(R_t + \frac{a}{2} \right) = \pi \cdot D \cdot n_4 \quad (8)$$

kde: v_4 je rychlost kola 4 [m/s]
 R_4 je vzdálenost od středu ke kolu 4 [m]
 n_4 jsou otáčky kola 4 [1/s]

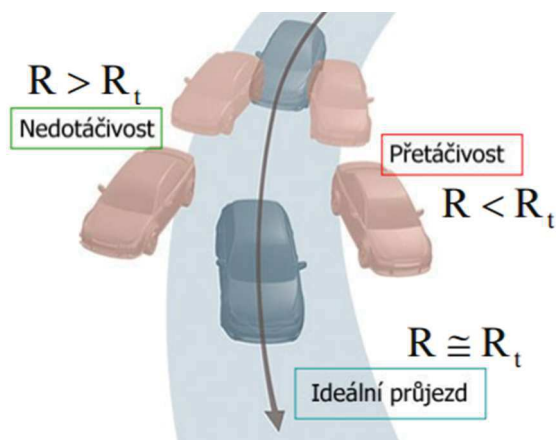
Výpočet teoretického poloměru:

$$R_t = L \cdot \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (9)$$

kde: α je teoretický úhel zatáčení [°]

4.2 Úvod do praktického pohledu

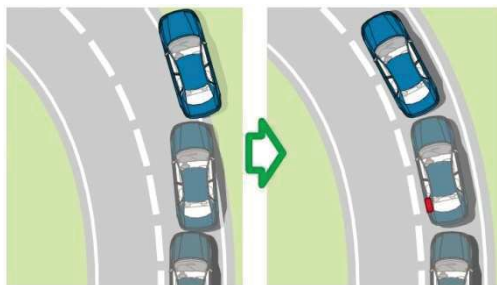
Vezmeme-li v úvahu účinky dynamiky, pak vznikají na všech kolech směrové odchylky, které vyvolává odstředivá síla a důsledky neideálně tuhých kol. Současná vozidla tedy nepoužívají doslovně Ackermannovu podmínku, hlavně proto, že ignoruje tyto dynamické účinky. Vlivem směrových úhlů se rozlišuje teoretický poloměr zatáčení R_t a skutečný poloměr zatáčení R . Teoretický poloměr vychází z Ackermannovy podmínky a je rozdílný od skutečného, který je bohatší o dynamiku. V zásadě rozlišujeme tři stavy, které mohou v praxi nastat.



Obrázek 22 Zobrazení reálných situací [4.2.1]

4.2.1 Nedotáčivost

Nedotáčivost $R > R_t$ je spojena se smykem přední nápravy a projevuje se neochotou vozidla zatočit. V dnešní době tyto problémy řeší důmyslné systémy jako je například ESP. V závislosti na situaci sníží systém ESP točivý moment motoru. Následně cílenými brzdnými zásahy na jednom nebo více kolech vytvoří opačný otáčivý moment než ten, který dostal vozidlo do smyku. Při smyku dojde nejdříve ke snížení výkonu motoru a poté systém přibrzdí

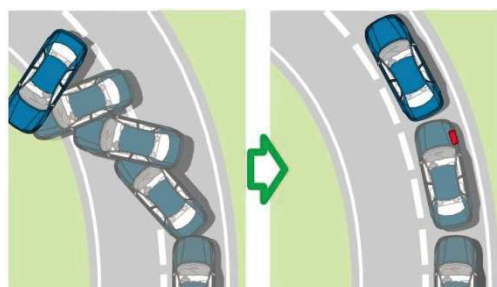


Obrázek 23 Nedotáčivost [4.2.2]

zadní vnitřní kolo z pohledu zatáčky. Starší ESP systémy používaly pro stabilizační zásah jednoho zadního vnitřních kola. Současné systémy využívají obě vnitřní kola. Nedotáčivost je stavem mírně žádoucím.

4.2.2 Přetáčivost

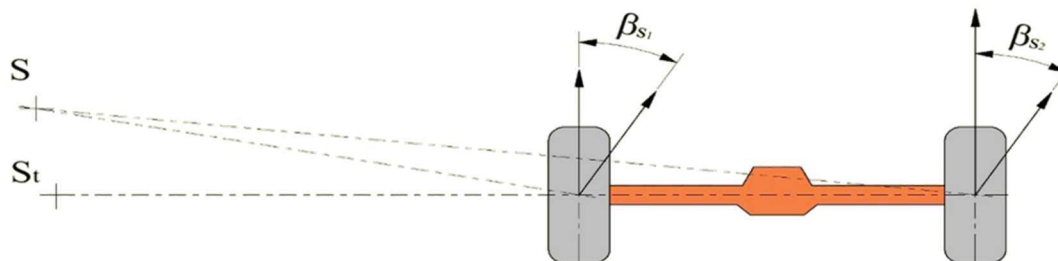
Přetáčivost vzniká smykem zadní nápravy. Tento stav bývá zpravidla hůře zvládnutelným nežli nedotáčivost. Problém řeší systém ESP, který přibrzdí kolo na vnější straně zatáčky. Jestliže ani tento krok nepostačuje, nařídí jednotka přidání plynu. Zmíněná situace nastává velice zřídka.



Obrázek 24 Přetáčivost [4.2.3]

4.2.3 Ideální průjezd

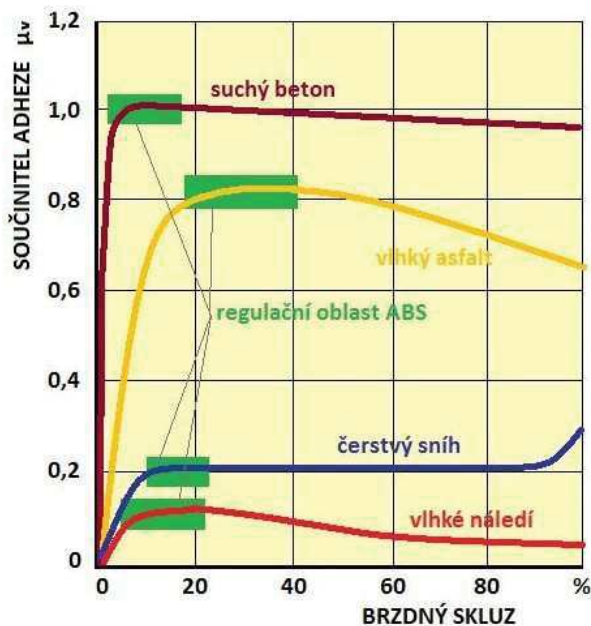
Stav, kdy $R = R_t$ je teoreticky ideálním stavem, avšak v praxi nenastává. Vždy je rozdíl mezi teoretickým středem S_t a skutečným středem S . Tento stav je naznačen na obrázku 25.



Obrázek 25 Směrové úhly

4.3 Praktický pohled

V reálném prostředí uvažujeme průnik kola s vozovkou jako plochu, nikoliv jako přímku či bod. Při větších rychlostech se v jistém okamžiku adhezní poměr dostane na hodnotu, kdy dochází k prokluzu. Tato maximální hodnota se nazývá koeficient adheze. Při odvalování kol po vozovce dochází k pružné deformaci pneumatiky a k rozdílům mezi skutečnými a geometrickými závislostmi. Rozdíl mezi těmito skutečnostmi se nazývá úhel skluzu β , jedná



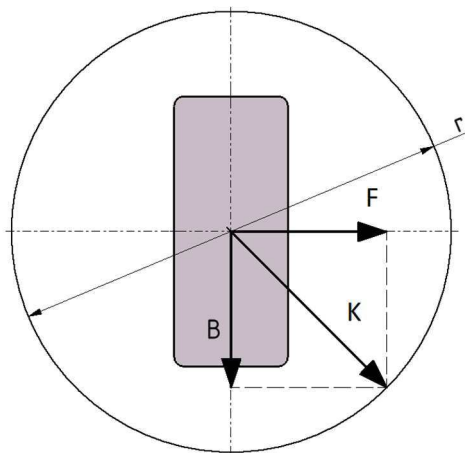
Obrázek 26 Závislost adheze na skluzu [4.3.1]

se o úhel mezi vektorem teoretické rychlosti a vektorem skutečné rychlosti. Výsledkem této skutečnosti je rozdílný střed zatáčení, a tím i opisovaný poloměr. Skluz vzniká při pouhém odvalování, nejvíce však při brzdění nebo zrychlování a je přímo úměrný součiniteli adheze μ . Adhezní součinitel je poměr mezi tečnými a normálovými složkami sil. Jde o bezrozměrný koeficient, který se udává jako poměrné číslo. Výše tohoto součinitele závisí především na jakosti a stavu povrchu vozovky a stavu pneumatik. Dále pak na rychlosti jízdy a v neposlední

řadě na velikosti skluzu. Skluz lze vysvětlit jako pomalejší otáčení kola, než by odpovídalo teoretické rychlosti obvodu kola při dané rychlosti vozidla. Nejvyšší součinitel adheze se dosahuje při optimálním skluzu. Po jeho překročení roste až na hodnotu odpovídající 100 % skluzu. V tomto případě se kolo nedotáčí a v krajním případě může dojít až ke smyku. Míra opotřebení pneumatik je v přímém spojení se skluzem. V reálném prostředí proto musíme uvažovat se součinitelem adheze. Limit bezpečného skluzu se pohybuje okolo 30-35 %. Z uvedeného obrázku 26 je patrný funkční rozsah systému ABS. Tento systém se v podstatě snaží o setrvání vozidla v oblasti stabilního skluzu.

4.3.1 Kammova kružnice přilnavosti

Prakticky se tak všechny síly přenášejí prostřednictvím pneumatik. Základní podmínkou, jak zde již bylo zmíněno, je přilnavost čili adheze. Adhezní podmínky lze jednoduše znázornit pomocí tzv. Kammovy adhezní (třecí) kružnice. Tato kružnice udává síly mezi vozovkou a pneumatikou. U kružnice rozlišujeme dvě praktické situace. První z nich je stabilní oblast skluzu, kdy vozidlo má dobré adhezní podmínky. Opakem přechází situace je nestabilní skluz. Kružnice se využívá ke znázornění okamžitých adhezních vlastností. Její průměr je přímo úměrný přilnavosti pneumatiky k vozovce. Platí, že čím je lepší adheze, tím je větší průměr kružnice r . Aby nedocházelo ke ztrátě adheze mezi pneumatikou a vozovkou, nesmí výslednice sil překročit poloměr třecí kružnice. V reálném prostředí mají pneumatiky větší přilnavost v podélném směru, takže skutečný tvar Kammovy kružnice připomíná elipsu. Pokud je brzdná síla B rovna maximální přenesené síle K , pak musí být podle obrázku 27 boční síla F rovna nule. V tomto případě má kolo nulové boční vedení. Následně dochází k zablokování kola a pneumatika se dostává do smyku. [27,28,29,30]



Obrázek 27 Kammova kružnice

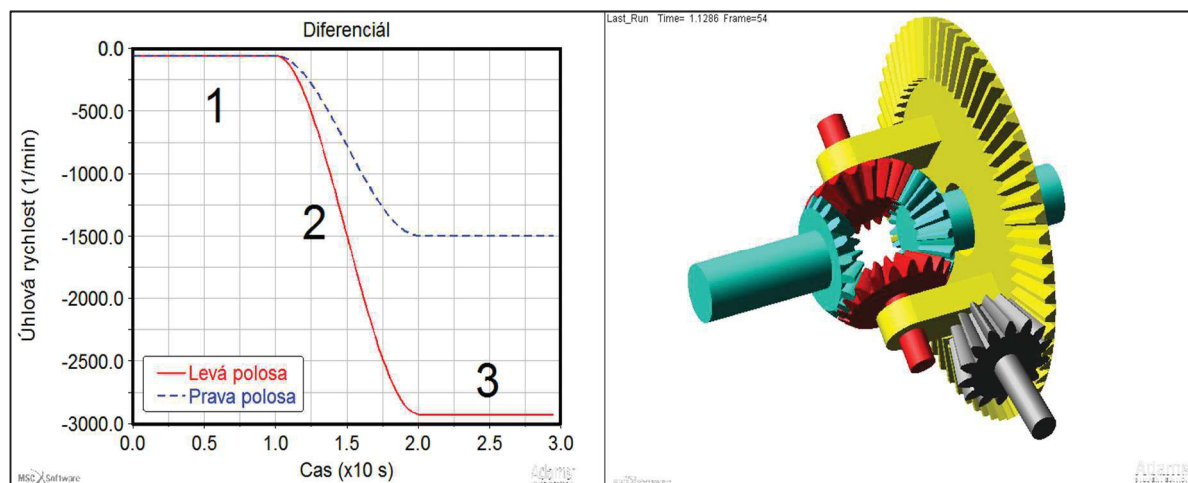
5 Simulace

5.1 Simulace kuželového diferenciálu v Adams View

Funkce kuželového diferenciálu byla simulována v softwaru Adams View. Prvním krokem bylo vytvoření simulačního modelu dle návodu (převzato s [31]).

Na obrázku 28 jsou vidět obě poloosy modrou barvou, které jsou v této simulaci přerušeny. Červeně jsou poté znázorněny satelity, které jsou upevněny v rámu žlutého talířového kola. Šedou barvou je naznačen pastorek, který přivádí výkon od motoru.

Na obrázku jsou znázorněny jednotlivé fáze. V první fázi se vozidlo pohybuje ideálně konstantní přímou jízdou, kde mají obě kola stejné úhlové rychlosti. V časovém rozmezí 10-20 s (druhá fáze) je vidět změna úhlových rychlostí. Vozidlo právě vykonává pravotočivou zatáčku. Tento fakt je dán rozdílnými úhlovými rychlostmi jednotlivých poloos. Ve třetí fázi se stále ještě vykonává pravotočivý manévr, ale úhlové rychlosti jsou již ustáleny. Kola tedy mají konstantní otáčky. Pro názornost je zvolen velký otáčkový rozdíl mezi poloosami, jehož bylo docíleno volbou velkého rozchodu.

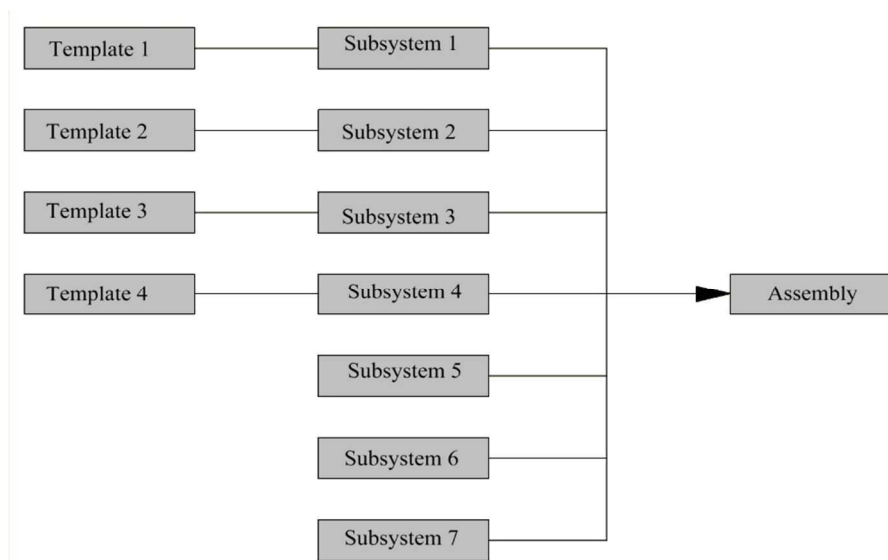


Obrázek 28 Vizualizace výsledků simulace diferenciálu

5.2 Adams Car

Adams Car je součástí simulačních programů od firmy MSC Software. Jedná se o specializované prostředí, které se zaměřuje na dopravní prostředky. Tohoto vývojového prostředí využívá celá řada světových automobilek. Zmíněný software umožňuje vytváření prototypů vozidel. Adams Car zlepšuje efektivitu a snižuje náklady tím, že umožní ověření návrhu na systémové úrovni. Analyzovat změny ve virtuálním návrhu lze mnohem rychleji a s podstatně nižšími náklady než testování fyzických prototypů. Spolu s rozsáhlými možnostmi analýzy je optimalizován pro řešení konkrétních problémů s využitím vysoce výkonných výpočetních prostředí. Podstata funkce je založena na tzv. šablonách (template based). Cílem tohoto přístupu je umožnit konstruktérům rychlé sestavení vozidla bez toho, aby se museli důkladněji zabývat dílčími subsystémy. Další možnou cestou je vytváření vlastních šablon, které definují zcela jiné vlastnosti. Topologickou část lze rozdělit do několika bodů:

- Template (šablona) – je v zásadě parametrický model, který definuje souhrn určitých vlastností.
- Subsystem (subsystém) – se používá pro modifikování parametrických dat a k vytvoření vlastní konfigurace. Subsystémy jsou zpravidla generovány ze šablon.
- Assembly (sestava) – je souhrn několika subsystémů, které dále ještě obsahují dílčí šablony.
- Full-Vehicle-Assembly (kompletní sestava vozidla) – je kolekce subsystémů popisujících celé vozidlo.
- Connector (konektor) – prvek šablony sloužící k definici propojení jednotlivých submodelů do sestavy.

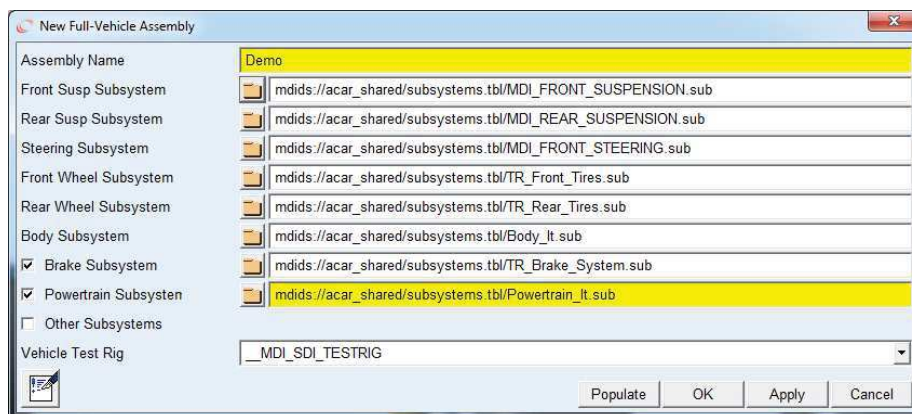


Obrázek 29 Ukázka tvorby sestavy ze subsystémů šablon

Podstata klíčové funkce je založena na tom, že definice jednotlivých subsystémů je uložena v šabloně, která obsahuje bližší informace o geometrii těles a vazbách mezi nimi. V přednastaveném subsystému jsou tato data nativně nastavena. Z určité série šablon jsou následně generovány subsystémy, které tvoří sestavu viz obrázek 29. Software poté

automaticky vygeneruje matematický popis systému na základě formalismů implementovaných v systému.

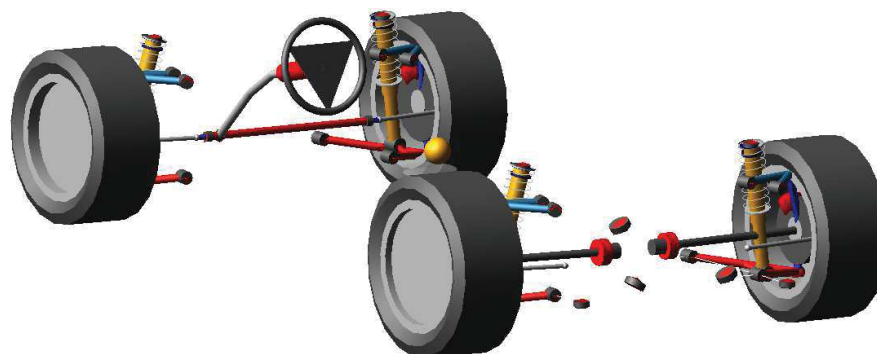
Vytvoření modulu kompletního vozidla pak probíhá výběrem vhodné šablony, nebo častěji zvolením již definovaného subsystému z databáze. Následující obrázek 30 naznačuje generování vozidla na základě dílčích subsystémů. Většina zde uvedených subsystémů je nezbytná pro generování vozu. Každé vozidlo tedy musí obsahovat určitý počet subsystémů, které ho definují. Ostatní subsystémy jsou pouze jakousi nadstavbou, kterou lze definovat



Obrázek 30 Sestavení dílčích subsystémů

například různé bezpečnostní systémy. Jak již bylo řečeno, každá sestava obsahuje nezbytný počet subsystémů, které jednoznačně definují vlastnosti vozidla. Jednotlivé subsystému jsou základem pro charakteristiku vozidla.

Na základě těchto vstupních informací software automaticky generuje vozidlo, které má charakteristické unikátní vlastnosti. V podstatě jsou zde šifrovány komplexní informace o vozidle včetně geometrických závislostí.



Obrázek 31 Vygenerované vozidlo

Kromě definování modelu vozidla jsou zde ještě další nástroje, které usnadňují definici simulační úlohy a následné zpracování výsledků. Tyto nástroje prakticky umožňují zaměřením se na určité konkrétní vlastnosti vozidla, které mají být monitorovány. Definováním simulace se sledují vlastnosti takto vytvořené konstrukce. Pomocí těchto nástrojů lze tedy odhalit přednosti i nedostatky navržené koncepce. Výsledkem těchto simulací bývají závislosti

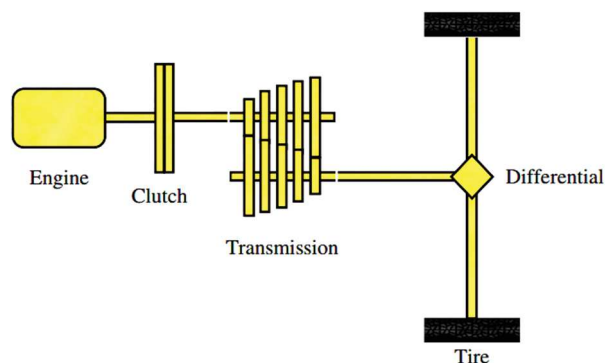
jednotlivých veličin nebo pevnostní analýzy. Výstupní informace lze porovnávat s různými konstrukčními řešeními a optimalizovat tak samotnou konstrukci.

Mezi tyto nástroje se řadí:

- Předdefinované manévry (např. zrychlování, brzdění v zatáčce, ISO lane change, apod.)
- Event Builder – nástroj pro definici vlastních manévrů
- Road Builder – nástroj pro definici vozovky (povrch, nerovnosti apod.)
- Path Optimizer – nástroj pro generování optimální cesty
- Smart Driver – nástroj simulující ideálního řidiče

5.3 Šablona a subsystém Powertrain

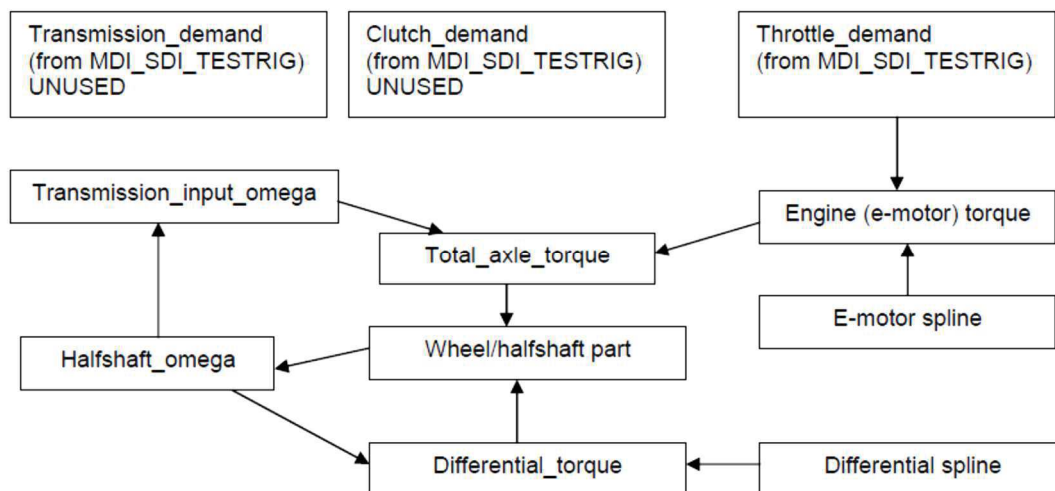
V konvenčním vozidle obsahuje tento subsystém, respektive šablona, definici spalovacího motoru, spojky, převodovky a diferenciálu. Tuto konvenční šablonu zobrazuje obrázek 32. Jsou zde uchovány komplexní informace od vzniku hnací síly až po přenos pohybu na kola. Tento systém disponuje informacemi o jednotlivých převodových stupních či prokluzu spojky apod. V průběhu simulace dochází například ke změně rychlosti nebo směru jízdy. Systém tedy mimo jiné poskytuje dokonalé informace o tom, kdy se má zařadit vyšší, popřípadě nižší převodový stupeň atd.



Obrázek 32 Konvenční uspořádání šablony Powertrain [5.3.1]

Na rozdíl od jiných šablon (např. Suspension nebo Steering) neobsahuje tato šablona příliš velké množství geometrických entit, ale zahrnuje především definici funkce pohonu pomocí diferenciálních a algebraických rovnic. Dále je v ní kodována například charakteristika motoru (závislost otáček a kroutícího momentu).

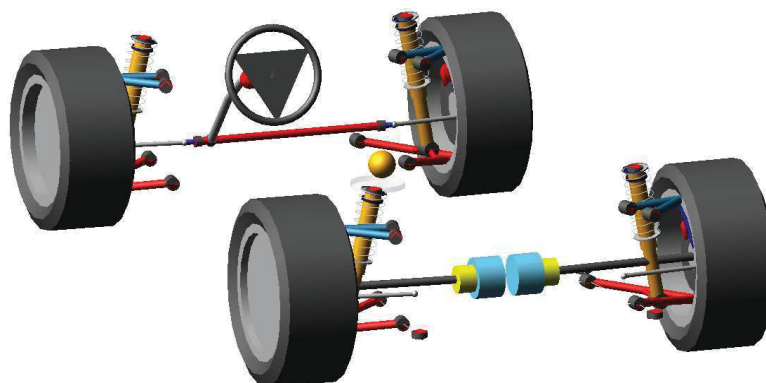
Pro definování nezávislého elektrického pohonu dvou kol je potřeba předdefinovat šablonu Powertrain. Na níže uvedeném obrázku je blokové schéma takovéto koncepce. Tato požadovaná šablona je zjednodušená, a neobsahuje tedy žádné informace ohledně převodovky a diferenciálu. V souvislosti s tím odpadá i vstup řazení (Transmission demand) a vypínání spojky (Clutch demand). Unikátností této koncepce je začlenění dvou nezávislých elektromotorů, z nichž každý pohání jednu z poloos. Parametry motorů jsou popsány pomocí charakteristiky uložené v externím souboru vlastností. Blokové schéma této šablony (převzato z [5]) je uvedeno na obrázku 33.



Obrázek 33 Blokové schéma šablony Powetrain pro nezávislý elektrický pohon

5.4 Model vozidla s nezávislým elektrickým pohonem dvou kol

Pro generování modelu vozidla byla využita předdefinovaná sestava vozidla MDI_Demo_Vehicle_It.asy. Namísto předdefinovaného subsystému Powertrain, popisujícího pohon se spalovacím motorem, byla využita šablona dual_motor.tpl (převzato z [5]). Hlavním rozdílem oproti konvenčnímu uspořádání s jedním centrálním spalovacím motorem je použití dvou elektromotorů. Tyto elektromotory jsou na obrázku 34 naznačené modrou barvou.



Obrázek 34 Nahrazení subsystému spalovacího motoru elektromotorem

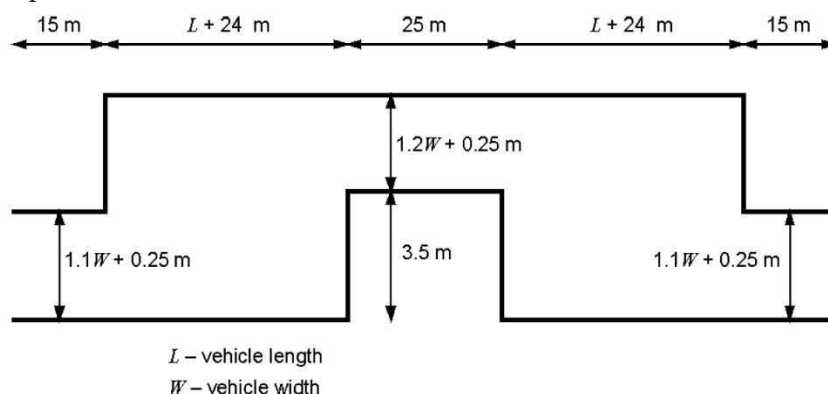
5.5 Definice simulační úlohy a prezentace výsledků

Model vozidla, který využívá šablonu dual_motor.tpl byl otestován na příkladu vyhýbacího manévru (ISO lane change) a na definované dráze s použitím modulu Smart Driver. Bližší popis dílčích parametrů a několik ukázkových výstupů ze simulace je uvedeno v následujících odstavcích.

5.5.1 ISO lane change

Vyhýbací manévr neboli tzv. losí test spočívá ve změně jízdního pruhu. V okamžiku změny se po projetí určité vzdálenosti vozidlo snaží dostat zpět. Cílem tohoto úkonu je monitorování reakce vozidla. V této konkrétní úloze byl kladen velký důraz na mapování úhlu klopení karosérie.

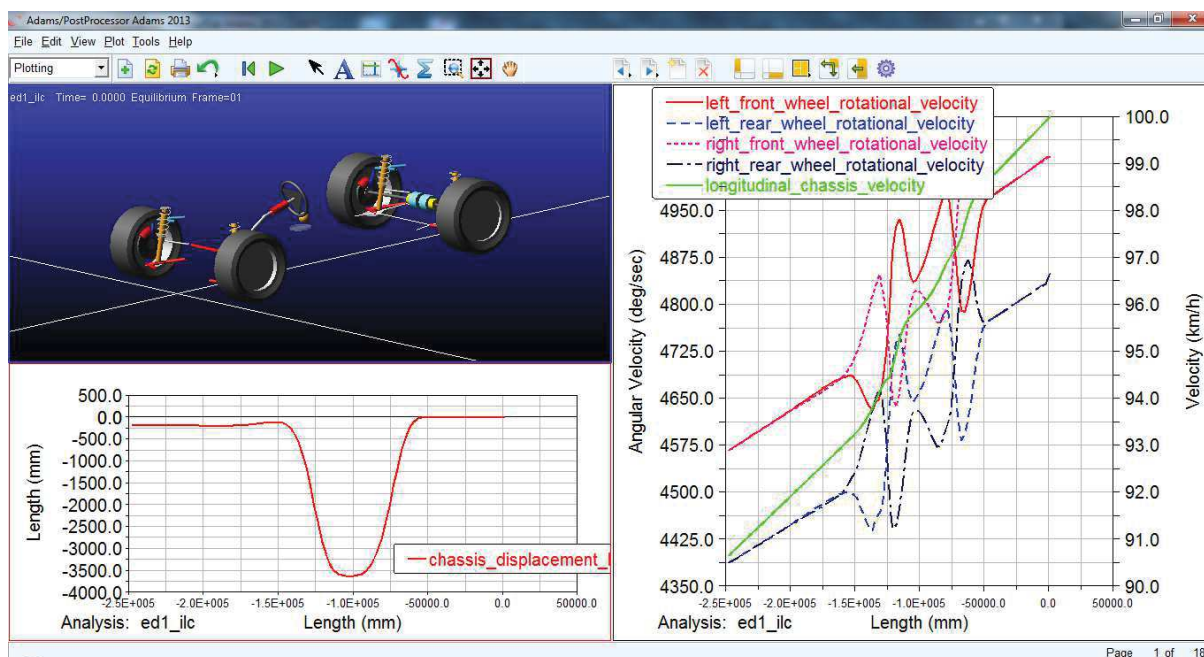
Definice dráhy je uvedena na obrázku 35. Dráha se skládá ze tří přímých úseků definované délky, které jsou přesazeny ve dvou jízdních pruzích. Vozidlo projíždí tuto definovanou dráhu jistou rychlostí a musí dráhu projet bez porušení limitní geometrie vymezené šířkou pruhu.



NATO (AVTP 03-160) Lane Change Test Course

Obrázek 35 Definice testovací trati manévru ISO lane change [5.5.1]

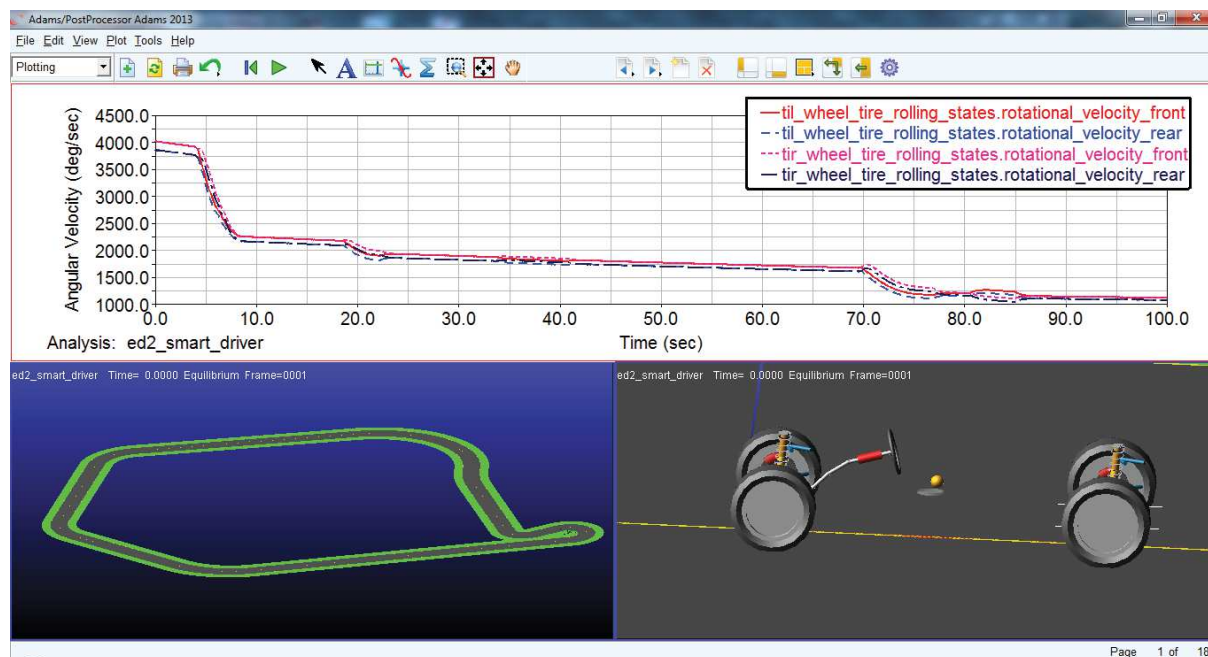
Obrázek 36 zobrazuje vizualizaci průjezdu dráhou se zobrazením grafů rychlosti otáčení jednotlivých kol a polohy těžiště vozidla v rovině XY.



Obrázek 36 Vizualizace výsledků simulace pro ISO lane change

5.5.2 Simulace s využitím modelu SmartDriver

Pro tuto simulační úlohu byl použit předdefinovaný model tratě track.tpl – viz obrázek 37. V tomto případě je dráha rozdělena do několika přímých úseků a několika zatáček s různými poloměry křivosti. Tato simulace byla provedena pouze pro vozidlo s nezávislým elektrickým pohonem zadních kol. Nastavení tohoto modulu bylo ponecháno na defaultních parametrech. Výsledky simulace jsou zobrazeny na obrázku 37. Z grafu je patrná závislost úhlové rychlosti jednotlivých kol na čase.



Obrázek 37 Vizualizace výsledků simulace s využitím modulu SmartDriver

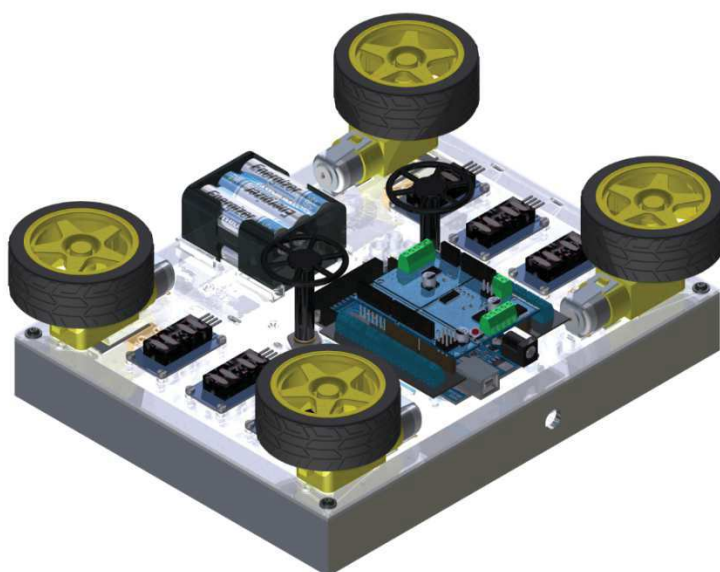
5.5.3 Výsledky provedených simulací

Z obrázků 36 a 37 je patrná rozdílná úhlová rychlost při průjezdu zatáčkou. Naproti tomu při dopředné jízdě tyto křivky rychlostí vnějších a vnitřních kol splývají. Rozchod uvažovaného vozidla je 1,5 m. Tato skutečnost přímo ovlivňuje odsazení jednotlivých křivek. Jinými slovy u vozidla s podstatně větším rozchodem bude z pohledu zatáčky mnohem větší rozdíl mezi vnějšími a vnitřními koly.

6 Demonstrátor

6.1 Návrh projektu

Základ tohoto demonstrátoru vychází z Ackermannovy podmínky řízení, není zde tedy uvažováno s účinky dynamiky. Předpokladem je skutečnost, že kola nejsou vystavena žádné adhezi. Demonstrátor vykresluje ideální situaci, kdy nenastává prokluz. Každé kolo je roztáčeno nezávisle od svého elektromotoru. Stejnoseměrné elektromotory ovládá řídicí jednotka, která je naprogramována tak, aby upravovala jednotlivé rychlosti. Vstupními veličinami jsou rychlost vozidla a úhel natočení volantu. Tyto informace se dále zpracovávají v řídicí jednotce, kterou zde simuluje základní deska Arduino mega2560. Finálním výstupem jsou tedy otáčky dílčích elektromotorů, které jsou posléze snímány.

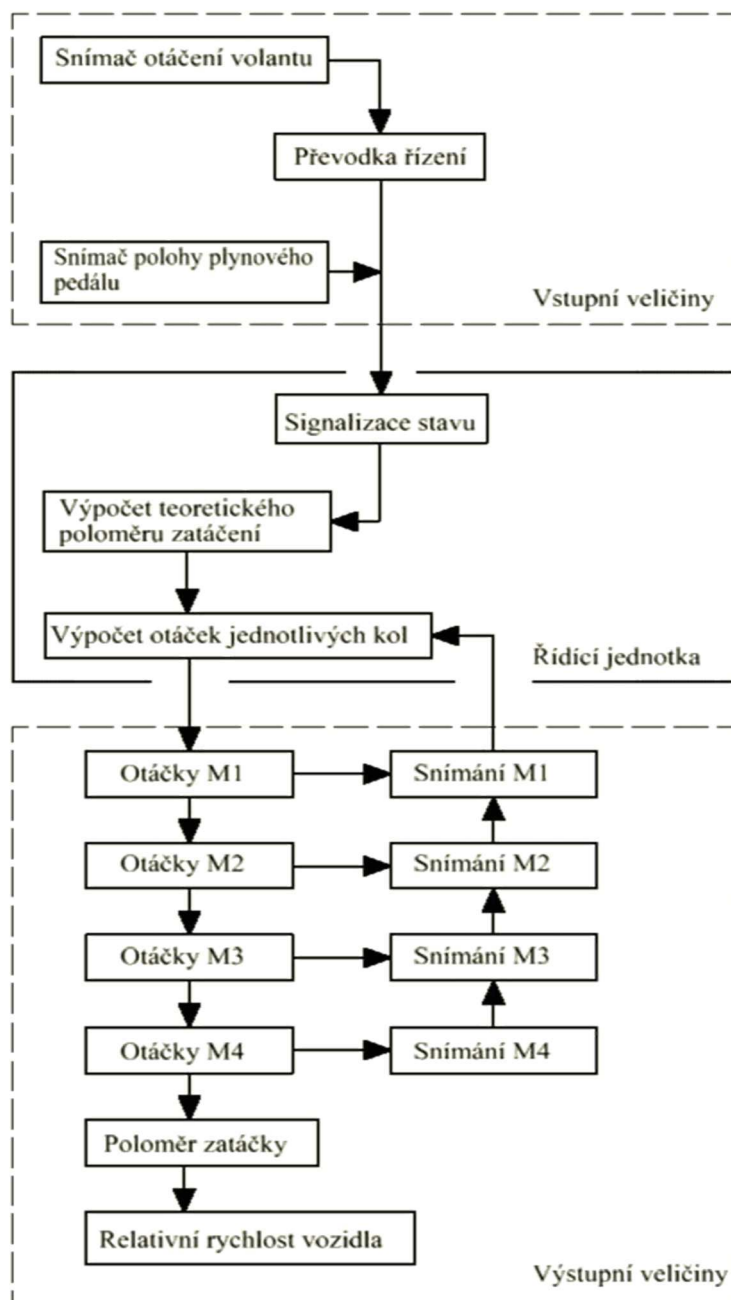


Obrázek 38 Navržený virtuální model

Při samotném návrhu bylo zohledněno mnoho ovlivňujících faktorů. Hlavním požadavkem při navrhování byla simulace nezávislého pohonu všech kol. Dalším kritériem bylo zajistit změnu vstupních parametrů nezávisle na čase. Požadavkem bylo tedy zajistit správné otáčky jednotlivých kol v závislosti na vstupních informacích. Na obrázku 38 je virtuální model samotného návrhu bez připojovacích kabelů.

Technologické schéma celého projektu tvoří algoritmus dílčích operací. Toto schéma přesně odráží jednotlivé kroky, které jsou chronologicky řazeny za sebou. Z obrázku 39 je zřejmé, že program tvoří vstupy dat, která se vyhodnocují v řídicí jednotce. Tato data jsou snímána z ovládacích prvků. Do programu tedy vstupuje snímač polohy volantu, který zajišťuje potenciometr. Tato hodnota není ovšem reálný úhel, o který by se měla natočit kola. Tento úhel je dále podroben převodu, který zajišťuje převodka řízení. Z pohledu softwarové technologie je to jen násobení či dělení hodnoty určitou přednastavenou konstantou. Paralelně s tím se také snímá poloha „plynového pedálu“, která dává informaci o rychlosti vozidla. Informaci rovněž obstarává další potenciometr. Obě tyto vstupní hodnoty procházejí signalizací stavu. Proces signalizace vyhodnocuje určitý stav, který vlivem vstupních veličin nastal. Signalizace dává

v konečném stádiu informaci o tom, v jaké situaci se vozidlo nachází. Teoreticky pak mohou nastat tři situace: přímá jízda, levotočivá zatáčka a pravotočivá zatáčka. Všechna tyto data vstupují do výpočtu teoretického poloměru zatáčení a výpočtu otáček jednotlivých kol. Výpočty výstupních veličin generuje řídicí jednotka s přímou závislostí se vstupními daty. Tento cyklus se provádí v krátkém časovém úseku, aby byla zajištěna co možná nejkratší odezva. Mezi zobrazované výstupní veličiny patří otáčky na elektromotorech, dále teoretický poloměr zatáčení a relativní rychlost vozidla. Zpětnou vazbu tvoří optické snímače.




Obrázek 39 Technologické schéma projektu

6.2 Použité komponenty

6.2.1 Mega2560

Jako základní neboli mateřská deska byla zvolena Mega2560. Důvodem volby byl především velký počet výstupních pinů. Další nezanedbatelnou podmínkou je komunikace s USB portem. Nutno zde podotknout, že deska je srdcem celého projektu. Tato komponenta pracuje v doporučeném rozsahu napětí 7-12 V. Maximem je 20 V, které deska ještě krátkodobě snáší. Při dlouhodobém působení této maximální hodnoty hrozí poškození desky vlivem přehřátí regulátoru napětí. Technické specifikace jsou uvedeny v tabulce 1. [32]

| Motherboard Mega2560 | | |
|--|------|------------|
|  | | |
| Obrázek 40 Mega 2560 [6.2.1] | | |
| Mikrořadič | [-] | ATmega2560 |
| Provozní napětí | [V] | 5 |
| Doporučené vstupní napětí | [V] | 7-12 |
| Vstupní limitní napětí | [V] | 20 |
| Počet analogových pinů | [-] | 16 |
| Počet digitálních pinů | [-] | 54 |
| Střídavý proud na jeden pin | [mA] | 20 |
| Flash paměť | [kB] | 256 |
| Délka | [mm] | 101.52 |
| Šířka | [mm] | 53.3 |
| Hmotnost | [g] | 37 |

Tabulka 1 Parametry základní desky Mega2560 [32]

6.2.2 Motor shield DK electronic

Pomocí této komponenty lze ovládat čtveřici stejnosměrných motorů v obou směrech. Další možností je ovládání servo motorů a krokových motorů. Motor shield může být napájen přímo ze základní desky, nebo je zde možnost externího napájení. Vzhledem k náročným požadavkům motorů se častěji používá externího napájení. Rozsah vstupního napětí se pohybuje od 4,5 V do 25 V. Nadstavba je osazena tepelnou pojistkou, která chrání řídicí obvody před přehřátím. [33]



Obrázek 41 Motor shield [6.2.2]

6.2.3 Screw shield

Tato součást je další nadstavbou základní desky. Hlavním úkolem je vyvedení pinů na šroubovací svorkovnice. Tyto svorkovnice jsou zobrazeny na obrázku 42. [34]



Obrázek 42 Screw shield [6.2.3]

6.2.4 Stejnosměrný elektromotor

Tento druh motorů má zpravidla pouze dva vodiče. Připojením těchto vodičů k baterii lze přímo roztočit motor konstantními otáčkami. Regulace se provádí změnou budícího napětí na rotoru. Velkou výhodou stejnosměrného motoru je téměř lineární závislost otáček na vstupním napětí. Z toho plyne, že okamžitá rychlost motoru je přímo závislá na budícím napětí. Základní parametry použitých motorů jsou uvedené v tabulce 2. [35]

| | | | | |
|----------|---------|----------|-----|-----|
| Napájení | [V] | 3 | 5 | 6 |
| Proud | [mA] | 100 | 100 | 120 |
| Otáčky | [1/min] | 100 | 190 | 240 |
| Hmotnost | [g] | 50 | | |
| Rozměry | [mm] | 70*22*18 | | |
| Hluk | [dB] | <65 | | |



Tabulka 2 Parametry stejnosměrných elektromotorů [35]

Obrázek 43 Stejnosměrné elektromotory [6.2.4]

6.2.5 Lineární potenciometr

Potenciometr je obecně znám jako elektrotechnická součástka, která se používá pro regulaci především ve zvukové technice. Hlavní část tvoří odporová dráha, po níž pojíždí jezdec. V našem případě se jedná o otočný potenciometr, neboť zmiňovaný jezdec je na otáčivé ose. Odporová dráha má dále lineární přírůstek odporu v celé své šíři, proto zde mluvíme o tzv. lineárních potenciometrech. Mezi nejpodstatnější vlastnosti patří maximální pracovní úhel a hodnota odporu. [36]



Obrázek 44 Lineární potenciometr [6.2.5]

6.2.6 Hodinový displej TM1637

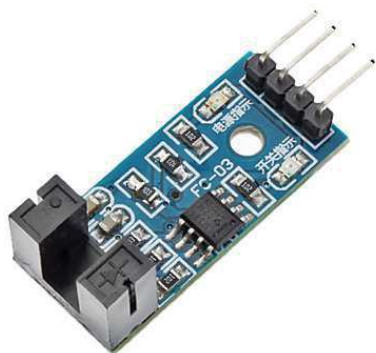
Jedná se o univerzální hodinový displej, který může zobrazovat číselnou i textovou informaci, která je ovšem omezena svou velikostí. Skládá se ze čtyř sedmi-segmentových displejů. Každý dílčí segment je zvlášť spojen s obvodem. Tím lze zapínat nebo vypínat jednotlivé segmenty pro zobrazení krátkých znaků. K nevýhodám patří nemožnost zobrazení desetinné čárky. [37]



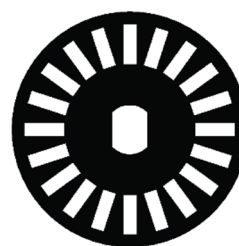
Obrázek 45 Hodinový displej [6.2.6]

6.2.7 Snímač otáček

Jak je patrné již z názvu, tento díl měří otáčky elektromotoru. Princip je na bázi optického senzoru, který pracuje s diodou a fototranzistorem. Dioda zajišťuje osvětlení a fototranzistor pouze snímá přítomnost tohoto jevu. Výsledný signál je tedy pouze binární 1 a 0. Při výpočtu se obvykle měří počet vzniklých signálů 1, což je počet případů, kdy se vysílaný signál dostane do koncové polohy. Pro toto měření je zde zapotřebí ještě tzv. n-coderu. V našem případě tuto pozici zastává kruhový disk – viz obrázek 47, který má po obvodu n drážek. Při následné rotaci motoru se tento disk otáčí na společné hřídeli s elektromotorem viz obrázek 46. [38]



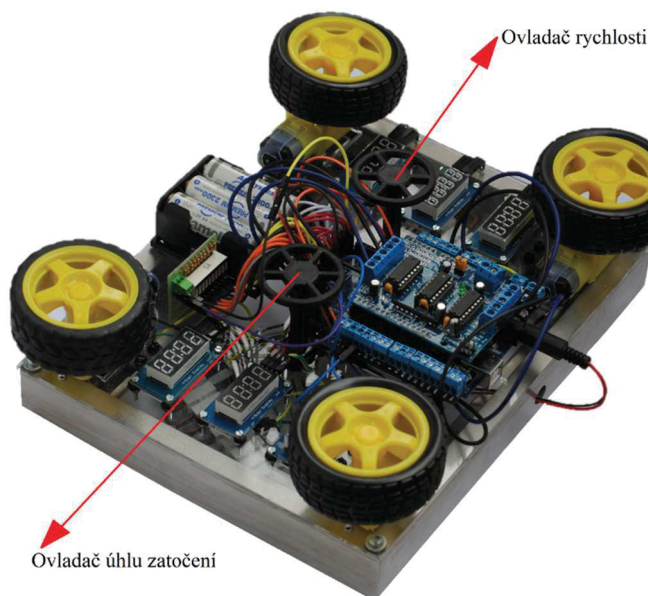
Obrázek 46 Snímač otáček [6.2.7]



Obrázek 47 N-coder

6.3 Testování demonstrátoru

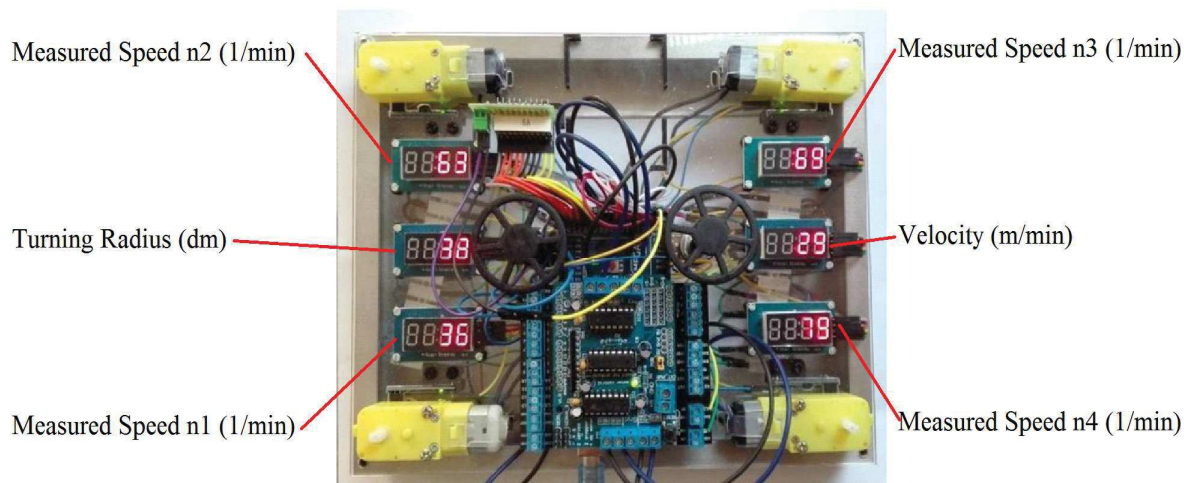
V následující části je prováděno testování řídicí jednotky s nadstavbami, shieldy, senzory, ovládacími prvky a ostatním příslušenstvím. Výsledný demonstrátor je zobrazen na obrázku 48. Na tomto reálném modelu byl vyzkoušen algoritmus jednotlivých funkcí popsaných na obrázku 39. Zdrojový kód je přiložen v příloze 1.



Obrázek 48 Reálně postavený demonstrátor

6.3.1 Finální testování levotočivé zatačky

Použité formule jsou odvozeny ze vzorců kapitoly 4, pouze je pro jednodušší výpočet zanedbána konstanta b . Jak již bylo řečeno, vstupními parametry je rychlost (Velocity) a úhel natočení (OutputAngle). Z těchto dat je vyhodnocen teoretický poloměr zatačení (Turning Radius) a výsledné teoretické otáčky jednotlivých kol (Speed ni). Dále jsou otáčky snímány prostřednictvím snímačů a tvoří zpětnou vazbu o aktuálním stavu (Measured Speed ni). Měřené



Obrázek 49 Vizualizace levotočivé zatačky

otáčky jsou vyobrazeny na hodinových displejích na obrázku 49.

Softwarovým výstupem jsou data uvedená na obrázku 50. Uvedené informace platí pro zmíněnou situaci levotočivého manévru.

```

Left Cornering OutputAngle[°]= 33
Turning Radius[m] = 3.85
Velocity[m/min] = 29
Speed n1 [1/min] = 28.17
Speed n2 [1/min] = 41.13
Speed n3 [1/min] = 70.80
Speed n4 [1/min] = 64.14
Measured Speed n1 [1/min] = 36
Measured Speed n2 [1/min] = 63
Measured Speed n3 [1/min] = 69
Measured Speed n4 [1/min] = 79

```

Obrázek 50 Softwarový výstup Serial Monitoru

Teoretické rychlosti (Speed ni) vycházejí z výpočtů a jsou přesnými informacemi o počtu otáček jednotlivých kol. Měřené informace (Measured Speed ni) jsou výstupními informacemi o aktuální změřené rychlosti motorů. Získaná data jsou uvedena v tabulce 3. Rozdíl mezi vypočítanými a změřenými daty je dán volbou parametrů použitého příslušenství. Cestou, jak tato měřená data přiblížit k teoretickým hodnotám, je použití P případně PI regulátorů. Taková regulace by zajišťovala shodu vypočítaných a naměřených hodnot. Řešení zmíněného regulačního problému je nad rámec této práce.

| | Speed [1/min] | Measured Speed [1/min] | Difference [1/min] |
|----|---------------|---------------------------|--------------------|
| n1 | 28.17 | 36 | 7.83 |
| n2 | 41.13 | 63 | 21.87 |
| n3 | 70.80 | 69 | 1.8 |
| n4 | 64.14 | 79 | 14.86 |

Tabulka 3 Výstupní informace otáček

7 Závěr

V první, rešeršní části bakalářské práce byl popsán historický vývoj diferenciálů až po současný trend v oblasti vozidel s nezávislým elektrickým pohonem. Byly uvedeny hlavní funkce jednotlivých koncepcí a zmíněny jejich přednosti a nedostatky. Další kapitola obsahuje dynamický a kinematický rozbor, který byl potřebný zejména ve druhé, praktické části bakalářské práce, jejíž náplní bylo vytvoření demonstrátoru.

V praktické části byl vytvořen simulační model kuželového diferenciálu v softwaru ADAMS/View. Další krok byl návrh vozidla s nezávislým elektrickým pohonem zadních kol v softwaru ADAMS/Car, který byl následně podroben několika testům. Prvním ISO lane change testem bylo hodnoceno chování vozu, které náhle mění jízdní pruh. Dalším simulovaným manévrem byla jízda po okruhu s využitím modulu pro řízení SmartDriver.

V další části byl navržen a zrealizován demonstrátor, který simuluje vozidlo s nezávislým elektrickým pohonem. Zdrojový kód celého projektu byl zpracován v programu Arduino jazykem C++. Dále bylo vytvořeno elektrické schéma kompletního uspořádání.

Cíle bakalářské práce byly splněny.

Z důvodu limitního rozsahu bakalářské práce a omezené dostupnosti některých součástí se otevírá prostor pro navazující práce, které by se mohly zabývat následujícími tématy:

- Vyřešení problému regulace otáček – vypočítaných a naměřených dat.
- Aplikace algoritmu na elektrické vozidlo s říditelnou nápravou. V tomto případě by bylo ještě nezbytné zajistit dálkové ovládání mezi vozidlem a uživatelem.
- Rozšíření vypracovaného algoritmu, např.: doprogramování opačného směru jízdy.
- Vytvoření simulační šablony, která by definovala pohon všech kol.

8 Použitá literatura a zdroje

- [1] RILEY, R. *Alternative cars in the 21th century*. Warrendale, PA: SAE, 2004. ISBN 978-0-7680-0874-6.
- [2] PAUER, V. *Vývoj konstrukce závodních vozů*. Praha: Grada Publishing, 2011. ISBN 987-80-247-3015-8.
- [3] FRONK, J. *Automobil a motocykl v obrazech*. Praha: Naše vojsko, 1962.
- [4] RENÉ CEDRYCH, M. *Automobily Škoda Felicia*. Praha: Grada Publishing, 1998. ISBN 80-7169-718-4.
- [5] FLORIAN P., AL HAWARRNEH Y., ČERMÁK R. *Modeling and simulation of an independent alectric powertrain in ADAMS/CAR*, CADAM2015, 15.-19.9.2015, Tučepi, Croatia, pp. 27-30
- [6] Antikythera mechanism In: *en.wikipedia* [online]. [cit. 2017-02-01]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Antikythera_mechanism
- [7] The Chinese South-Pointing Chariot. In: *Lhup* [online]. [cit. 2017-03-10]. Dostupné z: <http://www.lhup.edu/~dsimanek/make-chinese/southpointingcarriage.htm>
- [8] Differential. In: *en.wikipedia* [online]. [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Differential_\(mechanical_device\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Differential_(mechanical_device))
- [9] 4WD. In: *autolexikon* [online]. [cit. 2016-09-10]. Dostupné z: <http://www.autolexikon.net/cs/articles/4wd-four-wheel-drive/>
- [10] Průjezd obloukem. In: *cs.wikipedia* [online]. [cit. 2016-10-11]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Pr%C5%AFjezd_obloukem
- [11] Diferencial torsen. In: *autorubik* [online]. [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://www.autorubik.sk/clanky/diferencial>
- [12] Diferenciály. In: *clanky.katalog-automobilu* [online]. [cit. 2016-10-09]. Dostupné z: <http://clanky.katalog-automobilu.cz/46-diferencialy-jake-jsou-a-jak-pracuji/>
- [13] Haldex spojka. In: *auto.idnes* [online]. [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: http://auto.idnes.cz/jak-funguje-haldex-pohon-vsech-kol-drs-/automoto.aspx?c=A120510_012556_automoto_vok
- [14] Haldex. In: *audiklub* [online]. [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <https://audiklub.cz/techwiki/haldex>
- [15] 4WS – řízení zadních kol. In: *docplayer* [online]. [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/332867-4ws-rizeni-zadnich-kol.html>
- [16] Trendy ve výrobě automobilů. In: *konstrukter* [online]. [cit. 2016-10-10]. Dostupné z: <http://www.konstrukter.cz/2015/02/05/trendy-ve-vyrobe-automobilu/>

- [17] BMW i3 – Elektrická revoluce. In: *auto* [online]. [cit. 2016-09-9]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/test-bmw-i3-elektricka-revoluce-79318>
- [18] Prodeje elektromobilů. In: *oenergetice* [online]. [cit. 2016-11-12]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/cista-mobilita/prodeje-elektromobilu-v-evrope-mezirocne-vzrostly-o-49/>
- [19] Liebherr T282B. In: *en.wikipedia* [online]. [cit. 2016-11-12]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Liebherr_T_282B
- [20] Mining Truck T282B. In: *en.wikipedia* [online]. [cit. 2016-08-12]. Dostupné z: <http://www.webcitation.org/5ntmWJZg8?url=http://www.liebherr.com/catXmedia/me/Documents/238b7bd9-20df-4296-9e8f-b825d3668e02.pdf>
- [21] Mitsubishi S-AWC. In: *en.wikipedia* [online]. [cit. 2016-08-10]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Mitsubishi_S-AWC
- [22] S-AWC. In: *Mitsubishi-motors* [online]. [cit. 2016-07-07]. Dostupné z: <http://www.mitsubishi-motors.com/en/innovation/technology/library/s-awc.html>
- [23] Electronic stability control. In: *en.wikipedia* [online]. [cit. 2016-06-02]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_stability_control
- [24] ESC. In: *howsafeisyourcar* [online]. [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://www.howsafeisyourcar.com.au/Electronic-Stability-Control/>
- [25] Ackermannova podmínka. In: *autolexikon* [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://www.autolexikon.net/cs/articles/ackermannova-podminka/>
- [26] Ackermann steering geometry. In: *en.wikipedia* [online]. [cit. 2016-04-09]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Ackermann_steering_geometry
- [27] Směrové řízení vozidla. In: *cahp* [online]. [cit. 2016-03-10]. Dostupné z: <http://www.cahp.cz/wp-content/2013/03/02-Systemy-smeroveho-rizeni.pdf>
- [28] ESP. In: *autolexikon* [online]. [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://www.autolexikon.net/cs/articles/esp-electronic-stability-programme/>
- [29] Kammova kružnice přilnavosti. In: *autolexikon* [online]. [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://www.autolexikon.net/cs/articles/kammova-kruznice-prilnavosti/>
- [30] Skluz a jeho důsledky. In: *upce* [online]. [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://library.upce.cz/Sources/CL117.pdf>
- [31] MSC ADAMS Open Differential. In: *youtube* [online]. [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: <http://net-auto.cz/moodle/mod/resource/view.php?id=117>
- [32] Arduino Mega2560. In: *arduino* [online]. [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/main/arduinoBoardMega2560>

[33] Arduino Motor Shield. In: *arduino* [online]. [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoMotorShieldR3>

[34] Screw Shield. In: *seeedstudio* [online]. [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <https://www.seeedstudio.com/Screw-Shield-p-1238.html>

[35] Arduino kolo s převodovaným motorem. In: *arduino-shop* [online]. [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <https://arduino-shop.cz/arduino/972-arduino-kolo-s-prevodovanim-motrem-1424115262.html>

[36] Potenciometr. In: *cs.wikipedia* [online]. [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Potenciometr>

[37] TM1637. In: *playground.arduino* [online]. [cit. 2017-02-01]. Dostupné z: <https://playground.arduino.cc/Main/TM1637>

[38] Motor speed sensor. In: *electroschematics* [online]. [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <http://www.electroschematics.com/12275/motor-speed-sensor-module-circuit/>

Obrázky:

[2.1.1] [cit. 2017-04-12] <http://www.lhup.edu/~dsimanek/make-chinese/southpointingcarriage.htm>

[2.1.2] [cit. 2017-02-20] <http://www.grandprixhistory.org/spyker.htm>

[2.1.3] [cit. 2017-01-22] http://www.cs.wikipedia.org/wiki/File:Axle_Train_in_Radius.png

[2.3.1] [cit. 2017-05-15] <http://modelforum.cz/viewtopic.php?f=5&t=7815&start=30>

[2.4.1] [cit. 2017-03-02] <http://www.velocetoday.com/chinese-grand-prix-2012/>

[2.4.2] [cit. 2016-09-11] <http://www.autorubik.sk/clanky/diferencial>

[2.4.3] [cit. 2016-10-12] <http://www.diopan.cz/citroenbx/diferencial.htm>

[2.4.4] [cit. 2016-11-05] <http://cs.aston-martin-club.com/clanek/samosvorne-diferencialy-304>

[2.4.5] [cit. 2016-11-01] <http://autotrip.cz/srovnani-quattro-vs-xdrive-kdo-je-vitez/>

[2.4.6] [cit. 2016-12-05] http://marceljanco.sk/co-je-to-haldex-ako-funguje-poruchy-servis_auto/

[3.0.1] [cit. 2016-12-15] <http://docplayer.cz/332867-4ws-rizeni-zadnich-kol.html>

[3.1.1] [cit. 2016-12-11] <http://oenergetice.cz/cista-mobilita/prodeje-elektromobilu-v-evrope-mezirocne-vzrostly-o-49/>

[3.2.1] [cit. 2017-01-20] <http://www.autoblog.com/bmw/i3/>

- [3.2.2] [cit. 2017-02-21] <http://www.hybrid.cz/bmw-i3-ma-nove-33kwh-baterii-dojezd-200-km>
- [3.3.1] [cit. 2017-02-01] https://www.carsbase.com/photo/Liebher_T_282_B_model_55.html
- [3.4.1] [cit. 2017-04-11] <http://blog.pgd.pl/mitsubishi-s-awc-w-czym-tkwi-sekret-lancera-evo/>
- [3.5.1] [cit. 2017-04-12] http://www.automobilrevue.cz/automobily/predstavujeme/audi-tt-2015-do-tretice_43922.html
- [4.1.1] [cit. 2017-05-02] https://en.wikipedia.org/wiki/Ackermann_steering_geometry
- [4.2.1] [cit. 2017-05-11] <http://www.cahp.cz/wp-content/2013/03/02-Systemy-smeroveho-rizeni.pdf>
- [4.2.2] [cit. 2017-04-11] <http://www.autolexicon.net/cs/articles/esp-electronic-stability-programme/>
- [4.2.3] [cit. 2017-03-11] <http://www.autolexicon.net/cs/articles/esp-electronic-stability-programme/>
- [4.3.1] [cit. 2017-04-11] <http://net-auto.cz/moodle/mod/resource/view.php?id=117>
- [5.3.1] [cit. 2017-01-15] <http://www.amet.it/autoconva2c-web-seminar-automatically-and-quickly-translates-adamscar-vehicle-model/>
- [5.5.1] [cit. 2017-02-11] http://www.geocities.ws/edelboux/pneus_ISO_lane.html
- [6.2.1] [cit. 2017-04-09] <https://www.arduino.cc/en/main/arduinoBoardMega2560>
- [6.2.2] [cit. 2017-04-04] <http://navody.arduino-shop.cz/navody-k-produktum/motor-shield-1293d.html>
- [6.2.3] [cit. 2017-05-06] <https://www.epictinker.com/Screw-Shield-2-p/acc08101p.htm>
- [6.2.4] [cit. 2017-04-09] <http://robotstore.cz/obchod/arduino/dc-motor-prevodovka-kolo-s-pneumatikou-arduino-robot/>
- [6.2.5] [cit. 2017-05-10] <http://www.pentaservis.cz/clanky-potenciometr.html>
- [6.2.6] [cit. 2017-05-11] <https://potentiallabs.com/cart/buy-tm1637-online%20-india-hyderabad>
- [6.2.7] [cit. 2017-01-15] http://www.hwpro.cz/oc/index.php?route=product&product_id=482

PŘÍLOHA č. 1

Zdrojový kód demonstrátoru

```
#include <AFMotor.h> //Ovladani motor shieldu (knihovna)
#include <TM1637Display.h> //Ovladani displeju (knihovna)
#include <SoftwareSerial.h> //Defalutni knihovna jazyku

AF_DCMotor motor1(1, MOTOR12_1KHZ); //Definovani motoru M1
AF_DCMotor motor2(2, MOTOR12_1KHZ); //Definovani motoru M2
AF_DCMotor motor3(3, MOTOR34_1KHZ); //Definovani motoru M3
AF_DCMotor motor4(4, MOTOR34_1KHZ); //Definovani motoru M4

#define CLK 53
#define DIO 52

#define CLK1 51
#define DIO1 50

#define CLK2 49
#define DIO2 48

#define CLK3 45
#define DIO3 44

#define CLK4 43
#define DIO4 42

#define CLK5 41
#define DIO5 40 //Definovani pinu pro displeje

TM1637Display dis(CLK, DIO);
TM1637Display dis1(CLK1, DIO1);
TM1637Display dis2(CLK2, DIO2);
TM1637Display dis3(CLK3, DIO3);
TM1637Display dis4(CLK4, DIO4);
TM1637Display dis5(CLK5, DIO5); //Definovani CLK/DIO pinu pro displeje

byte mypins[10] = {22,23,24,25,26,27,28,29,30,31}; //Definovani LED diod

int encoder_pin_M1 = 2;
int encoder_pin_M2 = 3;
int encoder_pin_M3 = 18;
int encoder_pin_M4 = 19; //Definovani pinu pro N-codery

unsigned int rpm_M1;
unsigned int rpm_M2;
unsigned int rpm_M3;
unsigned int rpm_M4;
volatile byte pulses_M1;
volatile byte pulses_M2;
volatile byte pulses_M3;
volatile byte pulses_M4;
unsigned long timeold_M1;
unsigned long timeold_M2;
unsigned long timeold_M3;
unsigned long timeold_M4;
unsigned int pulsesperturn = 20;

int ByteReceived;
byte pot_velocity = A8; //Definovani analogoveho pinu pro potenciometr
```

```
byte pot = A9; //Definovani analogoveho pinu pro druhý potenciometr
int SteeringAngle = 0, velocityS = 0;
int v = 0;
int SAngle = 0;
int k_angle=4;
int k_v=100;
int i;
double R, n1, n2, n3, n4;
double D = 0.2;
double alfaS, alfaSGear;
const float a = 3, L = 2.5; //Nadefinovani konstant a promenych

const uint8_t HELLO[] = {
  SEG_F | SEG_E | SEG_G | SEG_B | SEG_C,
  SEG_A | SEG_F | SEG_E | SEG_D | SEG_G,
  SEG_F | SEG_E | SEG_B | SEG_C,
  SEG_E | SEG_D | SEG_C | SEG_B | SEG_A | SEG_F //Definovani defalutnich
segmentu pro displeje
};

void counter_M1()
{
  pulses_M1++;
}
void counter_M2()
{
  pulses_M2++;
}
void counter_M3()
{
  pulses_M3++;
}
void counter_M4()
{
  pulses_M4++; //Procedury na pocitani pulzu
}

void setup() //Nativni nastaveni programu
{
  dis.setBrightness(15);
  dis.setSegments(HELLO);

  dis1.setBrightness(15);
  dis1.setSegments(HELLO);

  dis2.setBrightness(15);
  dis2.setSegments(HELLO);

  dis3.setBrightness(15);
  dis3.setSegments(HELLO);

  dis4.setBrightness(15);
  dis4.setSegments(HELLO);

  dis5.setBrightness(15);
  dis5.setSegments(HELLO); //Nastaveni pocatecni informace na displejich
```



```
pinMode(mypins[i], OUTPUT); //Definování výstupu definovaných pinů

pinMode(encoder_pin_M1, INPUT);
pinMode(encoder_pin_M2, INPUT);
pinMode(encoder_pin_M3, INPUT);
pinMode(encoder_pin_M4, INPUT); //Definování vstupu pro snímače
attachInterrupt(0, counter_M1, FALLING);
attachInterrupt(1, counter_M2, FALLING);
attachInterrupt(5, counter_M3, FALLING);
attachInterrupt(4, counter_M4, FALLING); //Funkce změni binární hodnoty
snimace
pulses_M1 = 0;
pulses_M2 = 0;
pulses_M3 = 0;
pulses_M4 = 0;
rpm_M1 = 0;
rpm_M2 = 0;
rpm_M3 = 0;
rpm_M4 = 0;
timeold_M1 = 0;
timeold_M2 = 0;
timeold_M3 = 0;
timeold_M4 = 0; //Anulování počátečních hodnot
Serial.begin(9600); //Zvolení datového pásma pro Serial Monitor
delay(1500); //Prodleva programu
}

void loop() //Nekonečná smyčka
{

velocityS = analogRead(pot_velocity);
v = map(velocityS, 0, 1023, 1, 30); //Změna rozsahu potenciometru

SteeringAngle = analogRead(pot);
SAngle = map(SteeringAngle, 0, 1023, 135, -135); //Změna rozsahu
potenciometru
{
if (millis() - timeold_M1 >= 1000)
{
detachInterrupt(0);
rpm_M1 = (60 * 1000 / pulsesperturn) / (millis() - timeold_M1) * pulses_M1;
//Výpočet snímaných otacek
timeold_M1 = millis();
pulses_M1 = 0;
attachInterrupt(0, counter_M1, FALLING);
}
if (millis() - timeold_M2 >= 1000)
{
detachInterrupt(1);
rpm_M2 = (60 * 1000 / pulsesperturn) / (millis() - timeold_M2) * pulses_M2;
timeold_M2 = millis();
pulses_M2 = 0;
attachInterrupt(1, counter_M2, FALLING);
}
if (millis() - timeold_M3 >= 1000)
{
detachInterrupt(5);
```

```
rpm_M3 = (60 * 1000 / pulsesperturn ) / (millis() - timeold_M3) * pulses_M3;
timeold_M3 = millis();
pulses_M3 = 0;
attachInterrupt(5, counter_M3, FALLING);
}
if (millis() - timeold_M4 >= 1000)
{
detachInterrupt(4);
rpm_M4 = (60 * 1000 / pulsesperturn ) / (millis() - timeold_M4) * pulses_M4;
timeold_M4 = millis();
pulses_M4 = 0;
attachInterrupt(4, counter_M4, FALLING);
}
}
{
if((SAngle<=20)&&(SAngle>=-20)) //Funkce pro primou jizdu
{
n1=n2=n3=n4=((k_v)+(v/(PI*D))); //Vypocet otacek

motor1.setSpeed(n1);
motor1.run(FORWARD);
motor2.setSpeed(n2);
motor2.run(FORWARD);
motor3.setSpeed(n3);
motor3.run(FORWARD);
motor4.setSpeed(n4);
motor4.run(FORWARD); //Roztaceni motoru

dis.showNumberDec(rpm_M4, false);
dis1.showNumberDec(0, false);
dis2.showNumberDec(rpm_M3, false);
dis3.showNumberDec(rpm_M1, false);
dis4.showNumberDec(v, false);
dis5.showNumberDec((rpm_M2), false); //Vypis dipleju
}
for (int i=4 ; i<6; ++i) Signalizace LED diod
{
if (i > 0)
digitalWrite(mypins[i-1], LOW);
digitalWrite(mypins[i], HIGH);
delay(300);
}
digitalWrite(mypins[4], LOW);
digitalWrite(mypins[5], LOW);
}
Serial.print("\t Straight OutputAngle[°] = " ); //Vypis hodnot do SM
Serial.println((SAngle/k_angle));
Serial.print("\t \t Turning Radius[m] = " );
Serial.println("?");
Serial.print("\t \t Velocity[m/min] = " );
Serial.println(v);
Serial.print("\t \t Speed n1 [1/min] = " );
Serial.println(n1);
Serial.print("\t \t Speed n2 [1/min] = " );
Serial.println(n2);
Serial.print("\t \t Speed n3 [1/min] = " );
Serial.println(n3);
```

```

Serial.print("\t \t Speed n4 [1/min] = " );
Serial.println(n4);
Serial.print("\t \t Measured Speed n1 [1/min] = " );
Serial.println( (rpm_M4), DEC);
Serial.print("\t \t Measured Speed n2 [1/min] = " );
Serial.println( (rpm_M3), DEC);
Serial.print("\t \t Measured Speed n3 [1/min] = " );
Serial.println( (rpm_M1), DEC);
Serial.print("\t \t Measured Speed n4 [1/min] = " );
Serial.println( (rpm_M2), DEC);
delay(1500);
}

if (SAngle<-20) //Funkce pro pravotocivou zatačku
{
alfaSGear = (-1)*(SAngle/k_angle)*(PI/180);
R = L*((cos(alfaSGear)/sin((alfaSGear)))));
n4=((k_v)+(((v/R)*(R-(a/2)))/(PI*D)));
n2=((k_v)+(((v/R))*sqrt((L*L)+(((R+(a/2))*(R+(a/2)))))))/(PI*D);
n1=((k_v)+(((v/R)*(R+(a/2)))/(PI*D)));
n3=((k_v)+(((v/R))*sqrt((L*L)+(((R-(a/2))*(R-(a/2)))))))/(PI*D);

motor1.setSpeed(n4);
motor1.run(FORWARD);
motor2.setSpeed(n1);
motor2.run(FORWARD);
motor3.setSpeed(n3);
motor3.run(FORWARD);
motor4.setSpeed(n2);
motor4.run(FORWARD);

dis.showNumberDec(rpm_M4, false);
dis1.showNumberDec((R*10), false);
dis2.showNumberDec(rpm_M3, false);
dis3.showNumberDec(rpm_M1, false);
dis4.showNumberDec(v, false);
dis5.showNumberDec(rpm_M2, false);
{
for (int i=6 ; i<10; ++i)
{
if (i > 0)
digitalWrite(mypins[i-1], LOW);
digitalWrite(mypins[i], HIGH);
delay(300);
}
digitalWrite(mypins[9], LOW);
}

Serial.print("\t Right Cornering OutputAngle[°] = " );
Serial.println((SAngle/k_angle));
Serial.print("\t \t Turning Radius[m] = " );
Serial.println(R);
Serial.print("\t \t Velocity[m/min] = " );
Serial.println(v);
Serial.print("\t \t Speed n1 [1/min] = " );
Serial.println(n1);
Serial.print("\t \t Speed n2 [1/min] = " );

```

```

Serial.println(n2);
Serial.print("\t\t Speed n3 [1/min] = " );
Serial.println(n3);
Serial.print("\t\t Speed n4 [1/min] = " );
Serial.println(n4);
Serial.print("\t\t Measured Speed n1 [1/min] = " );
Serial.println((rpm_M4),DEC);
Serial.print("\t\t Measured Speed n2 [1/min] = " );
Serial.println((rpm_M3),DEC);
Serial.print("\t\t Measured Speed n3 [1/min] = " );
Serial.println((rpm_M1),DEC);
Serial.print("\t\t Measured Speed n4 [1/min] = " );
Serial.println((rpm_M2),DEC);
delay(1500);

}
if (SAngle>20) //Funkce pro levotocivou zatačku
{
alfaSGear =(SAngle/k_angle)*(PI/180);
R = L*((cos(alfaSGear)/(sin((alfaSGear)))));
n1=((k_v)+(((v/R)*(R-(a/2)))/(PI*D)));
n3=((k_v)+(((v/R))*sqrt((L*L)+(((R+(a/2))*((R+(a/2)))))))/(PI*D));
n4=((k_v)+(((v/R)*(R+(a/2)))/(PI*D)));
n2=((k_v)+(((v/R))*sqrt((L*L)+(((R-(a/2))*((R-(a/2)))))))/(PI*D));

motor1.setSpeed(n4);
motor1.run(FORWARD);
motor2.setSpeed(n1);
motor2.run(FORWARD);
motor3.setSpeed((n3));
motor3.run(FORWARD);
motor4.setSpeed((n2));
motor4.run(FORWARD);

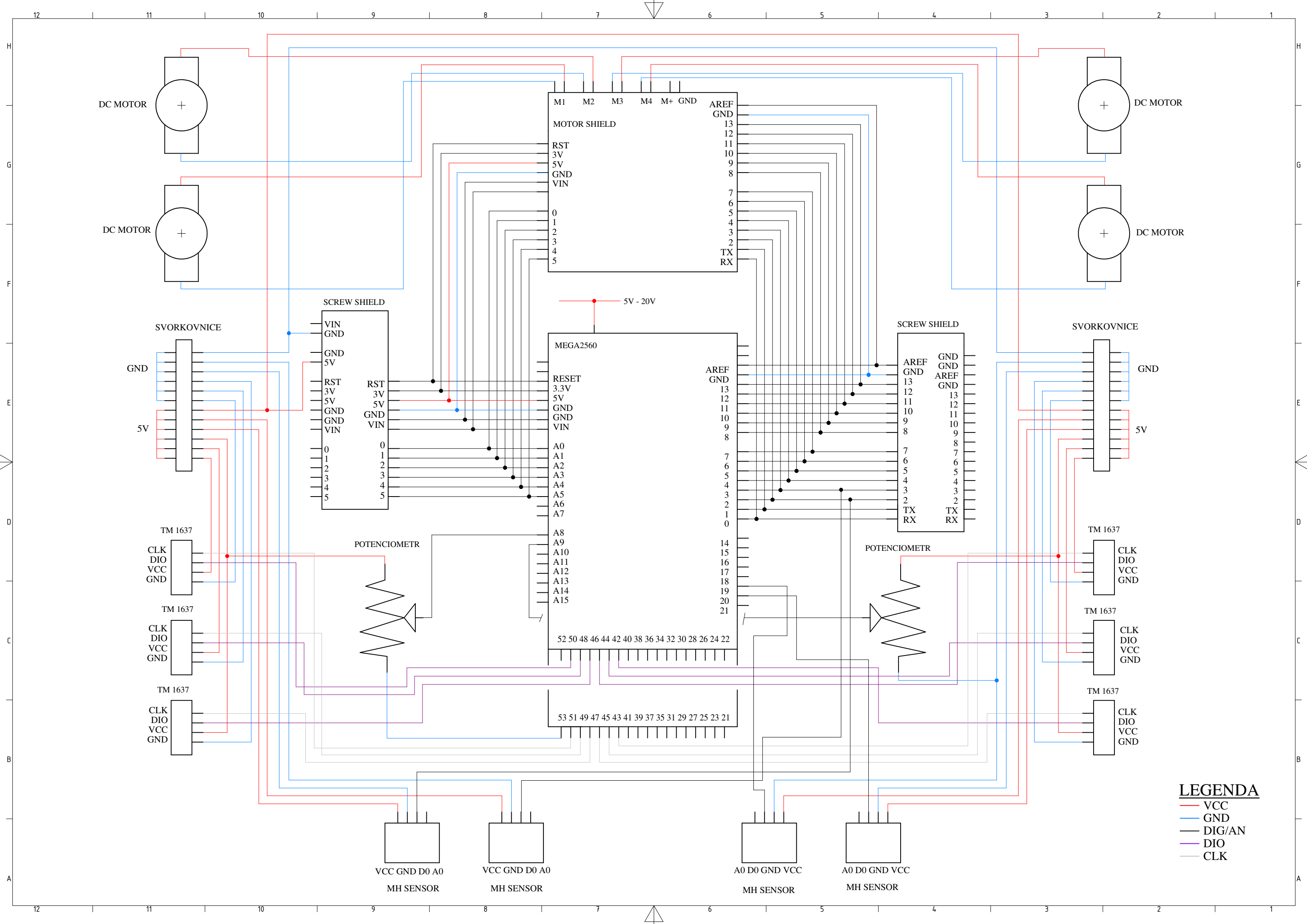
dis.showNumberDec(rpm_M4, false);
dis1.showNumberDec((R*10), false);
dis2.showNumberDec(rpm_M3, false);
dis3.showNumberDec(rpm_M1, false);
dis4.showNumberDec(v, false);
dis5.showNumberDec(rpm_M2, false);
{
for (int i=0; i<4; ++i)
{
if (i > 0)
digitalWrite(mypins[i-1], LOW);
digitalWrite(mypins[i], HIGH);
delay(300);
}
digitalWrite(mypins[3], LOW);
}
Serial.print("\t Left Cornering OutputAngle[°]= " );
Serial.println((SAngle/k_angle));
Serial.print("\t\t Turning Radius[m] = " );
Serial.println(R);
Serial.print("\t\t Velocity[m/min] = " );
Serial.println(v);
Serial.print("\t\t Speed n1 [1/min] = " );

```

```
Serial.println(n1);
Serial.print("\t \t Speed n2 [1/min] = " );
Serial.println(n2);
Serial.print("\t \t Speed n3 [1/min] = " );
Serial.println(n3);
Serial.print("\t \t Speed n4 [1/min] = " );
Serial.println((n4));
Serial.print("\t \t Measured Speed n1 [1/min] = " );
Serial.println((rpm_M4),DEC);
Serial.print("\t \t Measured Speed n2 [1/min] = " );
Serial.println((rpm_M3),DEC);
Serial.print("\t \t Measured Speed n3 [1/min] = " );
Serial.println((rpm_M1),DEC);
Serial.print("\t \t Measured Speed n4 [1/min] = " );
Serial.println((rpm_M2),DEC);
delay(1500);
}
}
}
```

PŘÍLOHA č. 2

Elektrické schéma demonstrátoru



- LEGENDA**
- VCC
 - GND
 - DIG/AN
 - DIO
 - CLK