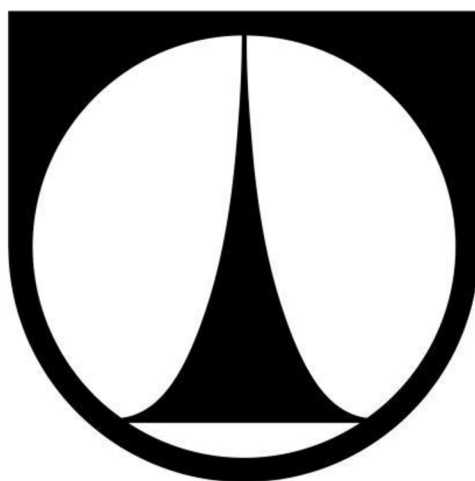


Technická univerzita v Liberci

Studijní program: B0715A270008 Strojírenství

Studijní obor: Strojírenství

Bakalářská práce



Vozidla s elektrickým hnacím ústrojím

Vypracoval: Gleb Sats

Vedoucí: Ing. Ph.D. Robert Voženílek

Počet stran: 55

Počet obrázků: 40

Akademický rok: 2020/2021

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá současnou koncepcí vozidel s elektrickým hnacím ústrojím. Práce obsahuje dvě hlavní části a to jsou teoretická a praktická. Teoretická část popisuje hlavní vlastnosti a konstrukci moderních elektrických vozidel. Tato část také popisuje rozvoj infrastruktury pro elektromobily. Pro praktickou část byl zvolen software a prostřednictvím tohoto softwaru byla vytvořena simulace modelu vozidla s elektrickým pohonem.

Klíčová slova: elektromobil, elektromotor, baterie, proud, napětí, kolo, rychlost, výkon.

Annotation

This bachelor's work focuses on the modern concept of electric vehicle powertrains. The work consists of two main parts: theoretical and practical. The theoretical part describes the main characteristics and design of modern electric vehicles. This section also describes the development of infrastructure for electric vehicles. For the practical part was selected software and with the help of this software was created a simulation model of an electric car.

Key words: electric car, electric motor, battery, current, voltage, wheel, velocity, power.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Vozidla s elektrickým hnacím ústrojím jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

V Liberci

Gleb Sats

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	5
Úvod	7
1. Současná koncepce vozidel s elektrickými pohony	8
1.1 Přehled elektrických vozidel	8
1.1.1 Protean Ford F-150	8
1.1.2 Tesla Model S P85D	9
1.1.3 Škoda CITIGOe iV	10
1.2 Struktura pohonu elektrického vozidla	11
1.2.1 Stejnoseměrné motory	12
1.2.2 Střídavé motory	13
1.2.3 Elektromotor v náboji kola	16
1.2.4 Řízení elektromotoru	17
1.2.5 Zdroj energie	18
2. Simulace	21
2.1 Matlab Simulink	21
2.2 Celkový model elektromobilu	22
2.3 Mechanická soustava modelu	23
2.3.1 Karosérie	24
2.3.2 Kolo	27
2.3.3 Převodovka	28
2.4 Elektrický pohon	31
2.4.1 Střídač	31
2.4.2 Elektromotor	33
2.5 Zdroj energie	37
2.6 Řídicí systém	41
2.7 Vstupní signály	43
2.7 Vizualizace charakteristik	46
Závěr	52
Seznam zdrojů	53
Seznam obrázků	54

Seznam symbolů a zkratek

AC	Střídavý proud	[–]
CG	Těžiště vozidla	[–]
DC/AC	Střídač	[–]
PMSM	Synchronní motor s permanentním magnetem	[–]
SOC	Stav nabití baterie	[–]
FOC	Vektorové řízení	[–]
ACIM	Indukční motor	[–]
g	Gravitační zrychlení	$[m \cdot s^{-2}]$
m	Hmotnost vozidla	$[kg]$
V_x	Rychlost vozidla	$[m \cdot s^{-1}]$
A	Čelní plocha vozidla	$[s^2]$
F_x	Podélná síla na kolo	$[N]$
F_z	Normálová síla na kolo	$[N]$
V_w	Rychlost větru	$[m \cdot s^{-1}]$
C_d	Součinitel aerodynamického odporu	[–]
F_d	Aerodynamická odporová síla	$[N]$
ρ	Hustota vzduchu	$[kg \cdot m^{-3}]$
Ω	Úhlová rychlost kola	$[rad \cdot s^{-1}]$
r	Poloměr kola	$[m]$
r_F	Poloměr hnaného ozubeného kola	$[m]$
r_B	Poloměr hnacího ozubeného kola	$[m]$
ω_F	Úhlová rychlost hnaného ozubeného kola	$[rad \cdot s^{-1}]$
ω_B	Úhlová rychlost hnacího ozubeného kola	$[rad \cdot s^{-1}]$
n_F	Počet zubů hnaného ozubeného kola	[–]
n_B	Počet zubů hnacího ozubeného kola	[–]
V_{sx}	Rychlost prokluzu kola	$[m \cdot s^{-1}]$
k	Skluz kola	[–]
ω	Úhlová rychlost	$[rad \cdot s^{-1}]$
τ_B	Vstupní točivý moment	$[N \cdot m]$
τ_F	Výstupní točivý moment	$[N \cdot m]$
τ_{loss}	Ztráta točivého momentu v důsledku tření	$[N \cdot m]$
τ_{Coul}	Coulombův moment	$[N \cdot m]$
T	Točivý moment	$[N \cdot m]$
η	Účinnost	[–]
v_a, v_b, v_c	Fázová napětí	$[V]$
v_d, v_q, v_0	Napětí nezávislá na úhlu rotoru	$[V]$
i_a, i_b, i_c	Elektrický proud	$[A]$
i_d, i_q, i_0	Proudy nezávislé na úhlu rotoru	$[A]$
R	Elektrický odpor	$[\Omega]$
L_i	Indukčnosti	$[H]$

$\psi_{am}, \psi_{bm}, \psi_{cm}$	Toky permanentních magnetů	[Wb]
ψ_a, ψ_b, ψ_c	Celkové toky statoru	[Wb]
V_0	Napětí nabité baterie	[V]
V_0	Napětí nabité baterie	[V]
$V_{T,i}$	Pokles napětí na rezistoru	[V]
λ_i	Multiplikátory	[-]
R_{RC}	RC odpory	[Ω]
C_{RC}	RC kapacity	[F]
ω_{ref}	Úhlová rychlost referenční	[rad.s ⁻¹]
T_{ref}	Točivý moment referenční	[N.m]
θ_r	Mechanický úhel rotoru	[rad]
θ_e	Elektrický úhel rotoru	[rad]
$d - q$	Osy svázané s rotorem	[-]
AH	Jmenovitá kapacita baterie	[Ah]
T	Teplota baterie	[K]
λ	Koeficient teplotní závislosti	[-]
M_{th}	Tepelná kapacita baterie	[J.kg ⁻¹]

Úvod

Doprava je jedním z významných zdrojů znečišťování ovzduší. Prostřednictvím tohoto zdroje se do ovzduší dostávají především oxidy dusíku (zejména oxid dusičitý), suspendované částice frakce PM10 a PM2,5 (prachové částice), oxid uhelnatý a uhlovodíky. Všechny výše uvedené znečišťující látky mají řadu negativních dopadů na lidské zdraví i vegetaci [1]. Suspendované částice se do ovzduší dostávají většinou prostřednictvím výfukových plynů z osobních i nákladních automobilů. Některé automobilky našly řešení ve výrobě elektrických vozidel, kterých počet každý rok na silnicích roste. Důvody, proč vozidla s elektrickými pohony dosud nebyla tak populární, jsou: cestovní vzdálenost, náklady na elektromobil, infrastruktura dobíjecích stanic.

V současné době je maximální cestovní vzdálenost 530 km (Tesla S), a průměrná 230 km. Kapacita baterie se postupně zvyšuje a brzy bude tato bariéra překonána.

Podle cen za rok 2018 elektromobily byly o 25–30% dražší než automobily se spalovacími motory, a to kvůli ceně akumulátorů. Srovnáme-li ceny baterií například od roku 2010, pak se pravděpodobně v letech 2023–2024 budou elektromobily rovnat jejich protějšku se spalovacím motorem.

Počet dobíjecích stanic po celém světě dosáhl hodnoty 5,2 milionů. Z těchto stanic je většina soukromá, veřejně přístupné dobíjecí stanice tvoří zhruba 15 % z celkového počtu. Ve srovnání s předchozím rokem došlo k jejich nárůstu o 44 %. V České republice v současné době je cca 450 nabíjecích stanic, ale v letech 2021 a 2022 tento počet vzroste o přibližně 540.

Podle těchto informací lze říci, že vývoj elektrických vozidel rychle postupuje.

1. Současná koncepce vozidel s elektrickými pohony

1.1 Přehled elektrických vozidel

Elektrická vozidla uvedená v přehledu mají různé typy pohonů. Liší se nejen vlastnostmi motorů, ale také jejich počtem a umístěním. Variant realizace pohonného ústrojí je hodně, většina z nich nepotřebuje mechanickou převodovku. Výhody pohonu bez použití mechanické převodovky jsou například: přímý přenos točivého momentu z elektromotoru na kolo bez ztráty mechanické energie nebo nízká celková hmotnost elektrického vozidla ve srovnání s elektrickým vozidlem s mechanickou převodovkou. Elektrická vozidla se také liší kapacitou baterie a výkonem motorů za účelem změny výkonu automobilu nebo jeho hospodárnosti.

1.1.1 Protean Ford F-150



Obr.1 Protean Ford F-150 [2]

SUV Protean Ford F-150 je vybaveno čtyřmi elektrickými motory v každém kole, z nichž každý má výkon 80 kW a točivý moment 800 - 1000 Nm. Hmotnost motorů a baterií, které váží asi 450 kilogramů, je menší než hmotnost standardního spalovacího motoru Ford F-150. Elektrické vozidlo je vybaveno lithium-iontovými bateriemi s kapacitou 40 kWh a poskytuje kilometrový výkon vozidla na jedno nabití až 100 km. Baterie se nabíjí do 6–8 hodin ze standardní zásuvky nebo za hodinu od třífázové vysoké napájecí zásuvky. Baterie jsou

upevněny na speciálních držácích pod karoserií přibližně uprostřed, pro optimální rozložení hmotnosti a pro lepší ovladatelnost vozidla. Zároveň bylo možné tímto způsobem ušetřit veškerý užitečný prostor, a to jak v kabině, tak v zadní části pickupu.

1.1.2 Tesla Model S P85D



Obr.2 Tesla Model S P85D [3]

Pod zkratkou P85D se ukrývá nejsilnější verze vozidla Tesla Model S. Písmeno P znamená Performance, číslovka představuje kapacitu akumulátorů v kilowatthodinách a D prozrazuje použití dvojice elektromotorů. Takto konfigurovaný vůz je vždycky čtyřkolkou, a protože jsou motory napojeny rovnou na kola (distribuci točivého momentu řídí elektronika), není zde žádná převodovka. Jednoduché řešení minimalizuje třecí ztráty, zajišťuje lineární a ničím nepřerušovaný průběh zrychlení a šetří spoustu prostoru. Elektromotory mají výkon 165 a 350 kW, a protože pracují zároveň, lze hodnoty jednoduše sečíst. Celkem 2,2 tuny vážící Tesla produkuje neuvěřitelných 515 kW (700 koní) a točivý moment 930 N.m dostupný od prvního milimetru pohybu automobilu. Proto P85D je srovnávána s nejznámějšími sportovními automobily. Tesla Model S P85D zrychlí z nuly na 100 km/h za 3,3 sekundy a dosáhne elektronicky omezené maximální rychlosti 250 km/h. V průměru by přitom neměla spotřebovat

více než 17,7 kWh na sto kilometrů jízdy a podle údajů automobilky na jedno nabití ujede až 480 kilometrů [4].

1.1.3 Škoda CITIGOe iV



Obr.3 ŠKODA CITIGOe iV [5]

Jedná se o první sériově vyráběný vůz značky ŠKODA s plně elektrickým pohonem. Vůz ŠKODA CITIGOe iV je vybaven elektromotorem s výkonem 61 kW a pohonem předních kol. Maximální točivý moment 212 Nm zajišťuje rychlé reakce vozu, které je důležité na městských křižovatkách a v hustém provozu. Zrychlení z 0 na 100 km/h dosáhne za 12,5 sekundy a maximální rychlost vozu je 130 km/h. Vůz je vybaven několika režimy, které ovlivňují dojezd vozu. Kromě běžného jízdního režimu může být šetřena energie v bateriích výběrem režimu ECO nebo ECO+, které snižují spotřebu a zvyšují dojezd (dosahují toho snížením výkonu motoru a omezením některých systémů, jako je klimatizace). Maximální vzdálenost, kterou s vozem můžete ujet, je tak cca 252 kilometrů. Převodovka je jednostupňová. Vůz je poháněn bateriemi, které mají kapacitu 36,8 kWh a jsou umístěny v podlaze vozu. Nabíjení může

probíhat buď na nabíjecích místech elektromobilů, nebo ze standardní domácí zásuvky s výkonem 2,3 kW. Doba nabíjení se liší podle zvoleného způsobu dobítí: z běžné domácí zásuvky dobijete vůz na 80 % za 12 hodin a 43 minut, z nabíjecí stanice WallBox 7,2 kW s odpovídajícím kabelem dobijete vůz jen za 4 hodiny a 12 minut. Oba tyto způsoby využívají střídavý proud AC, které se běžně využívá v domech a bytech. Třetím typem nabíječky je kombinovaný nabíjecí systém CCS se stejnosměrným proudem, který dobije vůz na 80 % za pouhou 1 hodinu. Spotřebu baterie snižuje systém rekuperace brzdové energie, kterým se při brzdění může znovu získávat energie a ukládat ji zpět do baterie vozu. Výhodou tohoto elektrovozu je relativně snadný servis a tichý chod motoru [6].

1.2 Struktura pohonu elektrického vozidla

Elektromobil je ve srovnání s automobily se spalovacími motory mnohem jednodušší a má minimální počet pohyblivých prvků. K nastartování elektromotoru tedy není nutný startér a převodovka má jednodušší konstrukci a má méně funkcí než u automobilu se spalovacím motorem. Důvod je obecně jednoduchý: elektromotor nabízí vysoký moment od okamžiku spuštění.

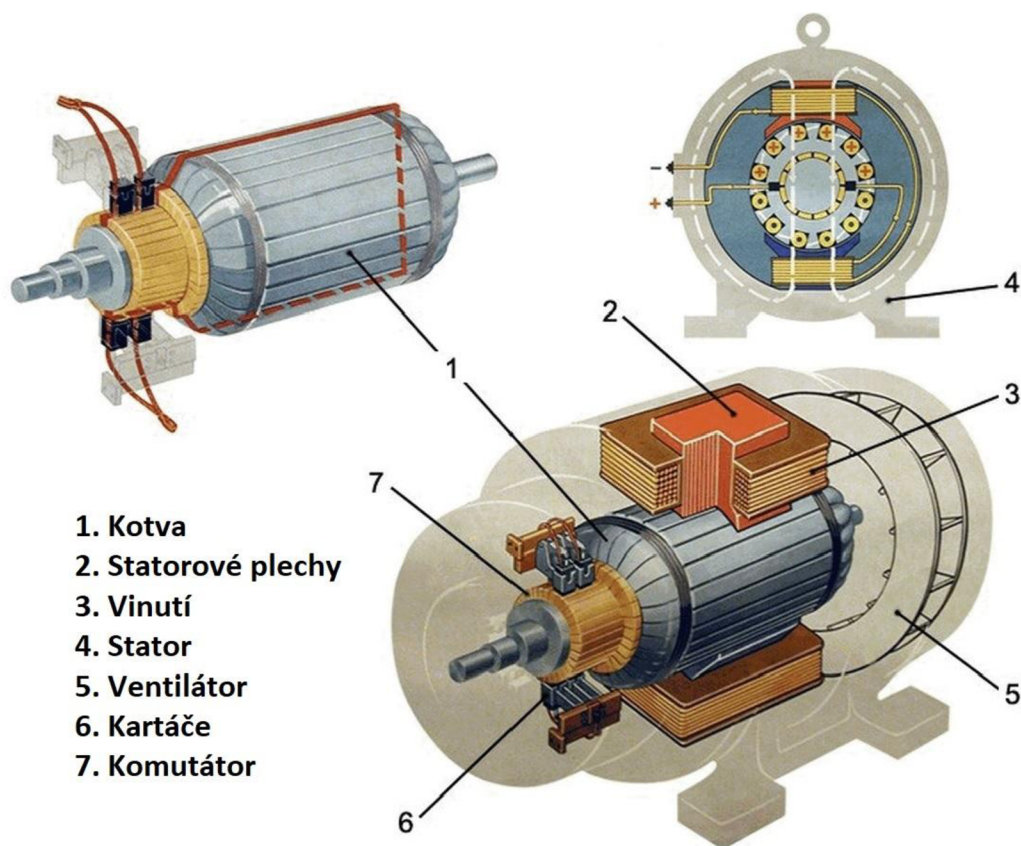
Systém elektrického pohonu vozidla zahrnuje:

- Elektronicky řízený elektrický motor / generátor
- Akumulátorová baterie s řídicí jednotkou pro regulaci baterie a nabíječku
- Invertor (počítač řízení elektrického pohonu)
- Převodovka včetně diferenciálu
- Brzdový systém

Elektromotor je mechanismus, který přeměňuje elektrickou energii na mechanickou energii, která pohání auto. Trakční motor může také působit jako generátor a přeměňovat energii již pohybujících se kol zpět na elektrickou energii. Elektromotor je založen na principu elektromagnetické indukce: do statoru je přiváděn elektrický proud, který prochází vinutími a vytváří rotující magnetické pole, které indukuje proud v tyčích rotoru a otáčí jej.

Existuje několik typů elektrických motorů: stejnosměrné, bezkartáčové a střídavé motory. Ve všech případech je jejich práce založena na fenoménu elektromagnetické indukce. Rozdíl spočívá v konstrukci těchto mechanismů a ve způsobu napájení pohonu.

1.2.1 Stejnospěrné motory



Obr. 4 Stejnospěrný motor [7]

Všechny stejnosměrné motory mají kotvu (rotující prvek) a induktor (stacionární část), které jsou odděleny vzdušným prostorem. Induktor se skládá z rámu, který je prvkem magnetického obvodu, a také z hlavního a pomocného pólu. Na nich jsou vinutí nezbytná k vytvoření magnetického pole zařízení. Induktor stejnosměrného motoru vytváří stacionární magnetické pole. Kotva se skládá z magnetického systému a kolektoru, kde je pomocí kartáčů generován elektrický proud.

Stejnospěrný motor má své nevýhody:

- Hluk při provozu
- Nutnost výměny dílů (třecí kartáče a komutátor)
- Rušení v důsledku jiskření kartáčů a spínání vinutí kotvy

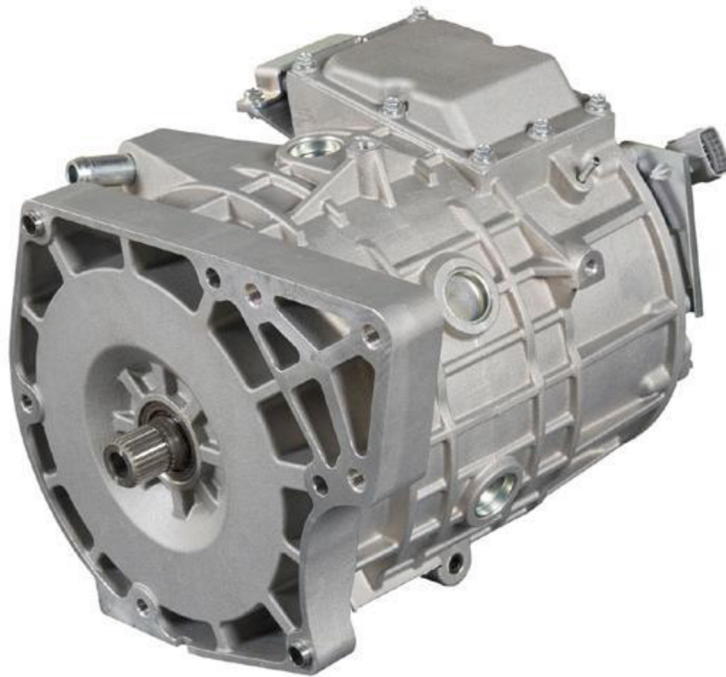
Stejnosemřný elektrický motor má vyšší účinnost a také má schopnost přesněji řídit rychlost, což se odráží v ceně takového zařízení.

Bezkartáčový stejnosměrný motor má vinutí na statoru a permanentní magnet na rotoru. Místo komutátoru se používá střídač, který zajišťuje napájení vinutí statoru pulsně modulovaným stejnosměrným proudem. Motor nemá žádné rotující elektrické součásti. Výhodou bezkartáčových motorů je, že nejsou téměř žádné opotřebitelné díly, výjimkou jsou ložiska, na kterých uloženy hřídel rotoru. Nevýhodou těchto motorů je cena, která je způsobena vysokými náklady na řídicí jednotky.

1.2.2 Střídavé motory

Elektrické motory tohoto typu mohou být napájeny jedno-, dvou- nebo třífázovým proudem. Třífázové jsou rozděleny na synchronní a asynchronní. Navenek jsou téměř identické, stator mají stejnou konstrukci a plní stejnou funkci - vytvářejí rotující magnetické pole. Rozdíl spočívá v činnosti rotorů. Nepochybnou výhodou střídavých motorů je rekuperace, tj. schopnost generovat energii při brzdění elektrického vozidla a ukládat ji do baterie. Střídavé motory zpravidla mají jednodušší konstrukce než stejnosměrné motory a také jsou lehčí a menší.

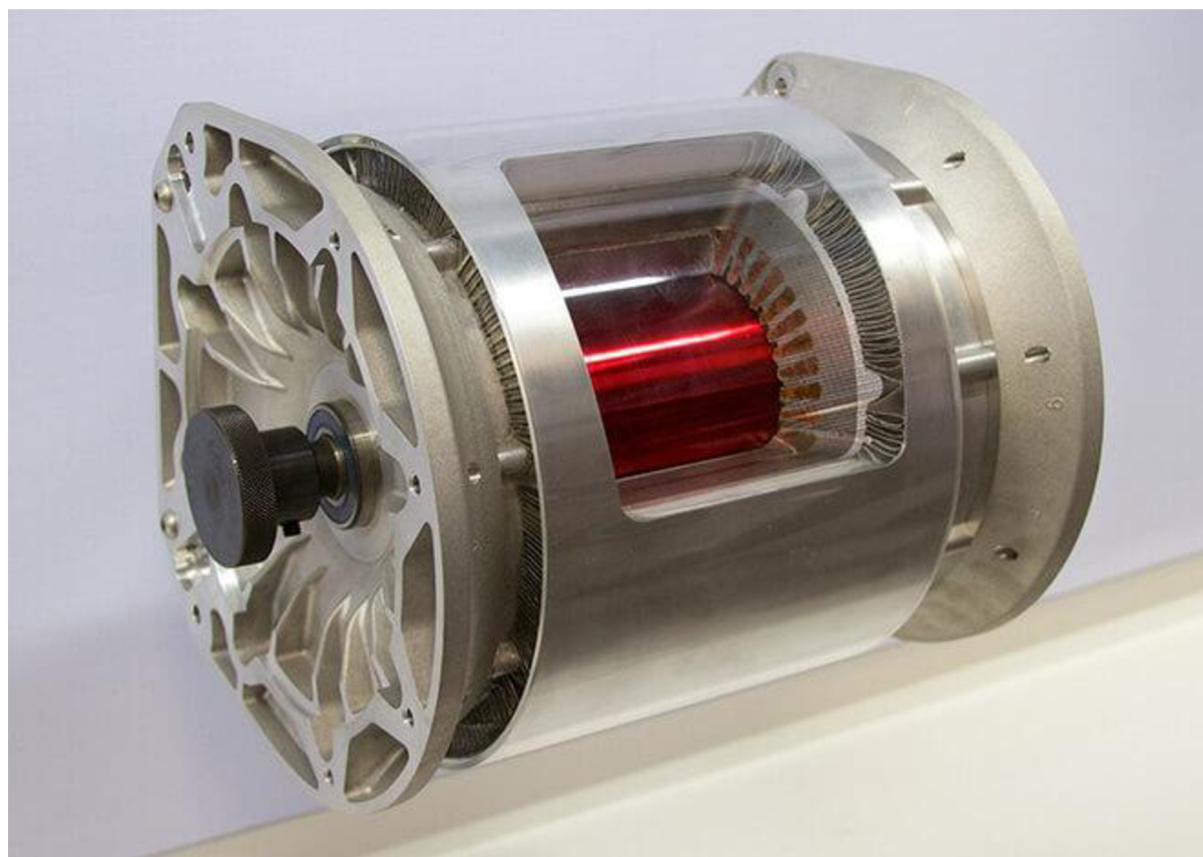
Synchronní elektromotory



Obr.5 Synchronní motor Mitsubishi i-MiEV [8]

V motorech tohoto typu se rotor a magnetické pole statoru pohybují stejnou rychlostí. Synchronní motory s kapacitou stovek kilowattů mají na rotoru další budící vinutí. U elektromotorů s nižším výkonem jsou póly tvořeny permanentními magnety. Taková zařízení se používají tam, kde je vyžadována konstantní rychlost, bez ohledu na zatížení. Motory tohoto typu mají vysokou účinnost ve srovnání s asynchronními motory stejného výkonu. Synchronní motory mají také některé nevýhody: obtížnost startu a docela složitá konstrukce, což zvyšuje náklady na jejich výrobu. Ale je několik způsobů řešení problému rozběhu tohoto typu motoru. Používá se k tomu pomocný motor (stejnoseměrný generátor nebo asynchronní motor) nebo asynchronní rozběh (umístění klece na rotoru jako u asynchronního motoru).

Asynchronní elektromotory



Obr.6 Asynchronní motor Tesla Model S [9]

Většina moderních elektrických vozidel používá asynchronní nebo indukční motor. Rotor je tvořen klecí z vodivých tyčí propojených vodičů. Stator, jako u synchronního motoru, je tvořen vinutím. U indukčního motoru rychlost otáčení magnetického pole neodpovídá rychlosti otáčení rotoru. Výhodou těchto zařízení je jejich udržovatelnost - lze snadno najít náhradní díly pro elektrická vozidla vybavená těmito motory. Mezi další výhody patří: jednoduchá konstrukce, nízké náklady, spolehlivost. Rychlost asynchronního motoru závisí na frekvenci střídavého proudu, to znamená, že změnou frekvence proudu můžete změnit rychlost otáčení hnacích kol, což usnadňuje ovládání rychlosti elektrického vozidla. Rychlost otáčení elektromotoru se může pohybovat od 0 do 18 000 1/min.

1.2.3 Elektromotor v náboji kola



Obr.7 Elektromotor v náboji kola [10]

- Vehicle Suspension - Náprava vozidla
- Wheel Bearing - Ložisko kola
- Coils & Power Electronics/Micro Inverters - Cívky a Výkonová elektronika
- Conventional Alloy Wheel - Slitinové disky

Vědci upravili sériový elektromobil Ford Focus EV odstraněním původního elektromotoru. Ten byl nahrazen čtyřmi elektromotory umístěnými do prostoru mezi brzdovým systémem a ráfek standardních kol.

Každý motor se skládá ze statické části s 20 cívkami a rotující části s 24 zuby. Je-li jedna z cívek pod napětím, přitahuje nejbližší zub rotoru. Postupnou aktivací jednotlivých cívek dochází k roztáčení rotoru a pohonu vozu. Pohyb je tedy uskutečněn za pomoci reluktanční síly, která snižuje magnetický odpor mezi cívkou a rotorem.

Reluktanční motory jsou dobře známy - především pro relativně vysoký výkon při nízké ceně. Největší výzvou pro vědce však bylo navrhnout motory tak, aby nemusely být individuálně přizpůsobeny žádnému instalačnímu prostoru.

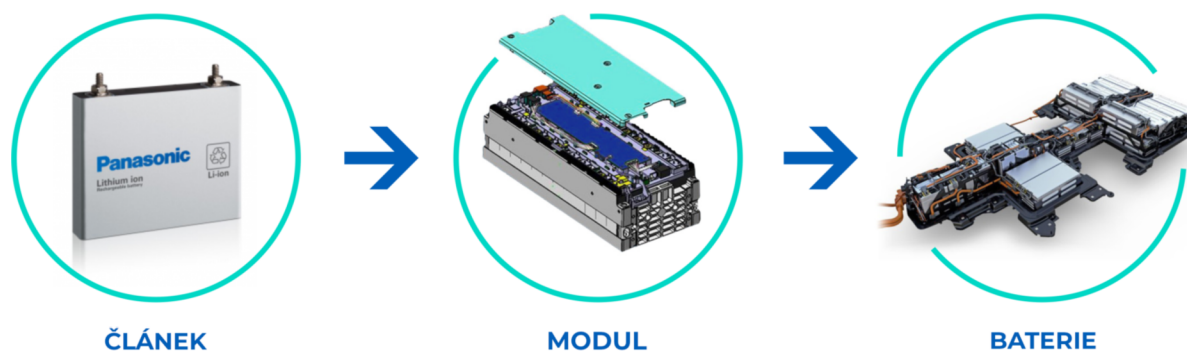
Jejich tvar je navržen tak, aby bylo možné je snadno integrovat do podběhů jakéhokoliv vozu. To vytváří předpoklad pro sériovou výrobu a použití v různých modelech vozidel.

Nyní nastává otázka, jakých jízdních výkonů dosahuje prototyp s motory v nábojích kol. Vůz zrychluje za 8 sekund na 100 km/h a dosahuje maximální rychlosti 160 km/h. Parametry odpovídají přibližně Nissan Leaf, výkon jednotlivých motorů v nábojích kol je o něco více než 25 kW. [11]

1.2.4 Řízení elektromotoru

Většina elektrických vozidel je poháněna třífázovým střídavým motorem, a pro napájení tohoto typu elektromotoru je vyžadované střídavé napětí. V elektromobilech se používá invertor (počítač řízení elektrického pohonu), který převádí stejnosměrné napětí akumulátoru na napětí potřebné k napájení elektromotoru. Toto elektronické zařízení určuje polohu rotoru vzhledem ke každému ze tří vinutí a v určitém okamžiku dodává napětí do vinutí s určitou polaritou, nezbytnou pro rotaci rotoru. Invertor má také další užitečné funkce nezbytné pro provoz elektrického pohonu a to jsou: rekuperační brzdění, změna smyslu otáčení, stabilizace vstupního napětí, ochrana proti přebití, ochrana proti úplnému vybití baterie, ochrana proti přehřátí. Mění taky charakter střídavého proudu, například frekvenci, a tím je zajištěna regulace otáček elektromotoru. Při použití čtyř motorů v nábojích kol invertor umožňuje rozdělení točivého momentu mezi motorovými koly při zatáčení analogicky s mechanickým diferenciálem.

1.2.5 Zdroj energie



Obr.8 Akumulátorová baterie [12]

Jako zdroj energie se využívá akumulátor, který je umístěn kompaktně v podvozku mezi nápravami. Na kapacitě akumulátoru závisí dojezdová vzdálenost elektrického vozidla. Baterie elektrického vozidla měří přibližně 200 x 150 x 15 cm a váží asi 540 kg. Baterie se skládá z řady modulů, z nichž každý se skládá z několika stovek a občas i tisíců kompaktních článků, které jsou spojené buď paralelně nebo sériově tak, aby bylo dosaženo potřebné napětí a proud. Využívají se několik typů článků a to jsou: válcové, pouzdrové a hranolové. V bateriích elektrických automobilů, které se skládají z velkého počtu článků, napětí dosahuje přibližně 250-300V. Tato hodnota je dostatečná pro motory s nízkým výkonem. Standardní lithiový článek má jmenovité napětí 4 V, takže můžeme dosáhnout 400V připojením 100 článků do série. Různí výrobci elektrických vozidel používají různé způsoby skládání baterií.

Tesla využívá válcové články, jejich hlavní výhodou je vospělost a vysoká optimalizace při výrobě. Jedná se také o nejlevnější variantu, která má zároveň nejvyšší účinnost. BMW a Volkswagen využívají hranolové články, které jsou skladnější, lépe se chladí a jejich výroba není nákladná, ale za to mají nízkou energetickou hustotu a problémy s počtem cyklů nabití a vybití. Nissan, Renault a Chevrolet používají pouzdrové baterie, které jsou nejflexibilnější co se týče návrhu jednotlivých modulů a kapacity, ale je potřeba pečlivě kontrolovat jak teplotu, tak tlak. [13]

Většina moderních elektromobilů používá lithium-iontové baterie. Výhody těchto zdrojů elektrické energie jsou:

- vysoká hustota akumulované energie
- vyšší napětí ve srovnání s jinými typy baterií
- malé samovybitení - až 6% měsíčně, až 20% ročně
- téměř bez paměťového efektu
- relativně dlouhá životnost - více než 1000 cyklů nebo 10 let

Nevýhodami jsou vysoká cena a malý teplotní rozsah, ve kterém fungují lithium-iontové baterie (od -20 do $+50$ °C). Při použití mimo tyto hodnoty se vlastnosti baterie zhoršují - za chladu se kapacita snižuje, za tepla baterie může být nestabilní. Vážným problémem lithium-iontových baterií je vysoká úroveň nebezpečí výbuchu, pokud je poškozena nebo ztratí těsnost.

Vnitřní odpor baterie udává maximální výkon, kterým lze baterii vybit nebo nabít, a ovlivňuje, jaké ztráty vzniknou uvnitř baterie. V baterii s vysokým vnitřním odporem bude docházet k velkým ztrátám při odběru proudu a bude se tedy více zahřívat. Z tohoto důvodu někdy výrobci využívají aktivní chlazení baterie. Ze zkušenosti, dojezd elektromobilu je jiný v zimním a letním období. Zimní dojezd je pochopitelně výrazně kratší. Méně znalí majitelé a řidiči nebo recenzenti tento rozdíl přisuzují výhradně spotřebě topení elektrických vozidel. Dojezd v chladnějším období ovlivní ale obzvláště teplota baterie, na které je vnitřní odpor závislý. S klesající teplotou zpomaluje většina chemických reakcí – v lidském těle stejně jako v autě. Výjimkou není ani ta, která probíhá uvnitř lithiových článků. Zvenku se tato vlastnost jeví jako zvýšení vnitřního odporu. A tady se vracíme k začátku tohoto odstavce: vysoký vnitřní odpor = vysoké ztráty uvnitř baterie. Proto někteří výrobci elektromobilů využívají aktivní ohřev baterie. Pokud není baterie aktivně klimatizována, dochází k dočasnému snížení výkonu, aby nedošlo k poškození baterie z důvodu překročení hraničních teplot. U klimatizovaných baterií je výkon stabilní. [14]

Hlavní nevýhodou elektrických vozidel je značná doba nabíjení baterií, obvykle nejméně 3 hodiny. Nicméně existuje možnost snížení doby nabíjení pomocí stejnosměrného proudu, a tento způsob nabíjení trvá přibližně 30 minut. Téměř každé moderní elektrické vozidlo lze nabít z běžné elektrické zásuvky. Přítomnost takové funkce vám umožní zůstat bez pohybu v oblastech, kde nejsou žádné speciální nabíjecí stanice. Nabíjení ze zásuvky v domácnosti má svá omezení. Napájecí napětí 230 V střídavého proudu. Konstrukce zásuvky a použité vodiče

omezují intenzitu proudu na 16 A. Plné nabití baterie elektrického vozidla Tesla Model S 75D bude trvat přibližně 21 hodin. Nejběžnější režim nabíjení používaný na parkovištích, čerpacích stanicích a dalších veřejných místech je vysoce výkonné nabíjení střídavým proudem. Tento typ nabíjení je možný díky speciální nabíjecí stanici, která je schopna dodávat střídavý proud s vysokým výkonem, který nelze v běžných podmínkách domácnosti dosáhnout. Tyto speciální nabíjecí stanice jsou schopné dodávat výstupní proud 7,2 až 43 kW v závislosti na zapojení (jednofázové nebo třífázové). Doba nabíjení baterie v tomto režimu je od půl hodiny do 4 hodin. Baterie jsou vždy nabíjeny přímo stejnosměrným proudem. Elektrické vozidlo má proto vlastní nabíječku, která převádí střídavý proud přicházející ze stanice na stejnosměrný a upravuje parametry nabíjení. Jak již bylo uvedeno, přítomnost takového zařízení pro jakékoliv elektrické vozidlo je povinná, jinak se v kritické situaci nebude moci dobít. Nabíjení můžete výrazně urychlit, pokud se na stanici připojíte přímo k baterii. S tímto přístupem již neexistují omezení velikosti a hmotnosti nabíječky, protože všechny její součásti jsou umístěny mimo karoserii elektrického vozidla. K bateriím lze dodávat pouze stejnosměrný proud. Provozní napětí akumulátoru v moderních elektrických vozidlech je obvykle 400 - 450 V. Proto bylo jako standard pro stejnosměrné nabíjení bráno napětí 500 V. Elektromobil můžete nabít takovým způsobem velmi rychle, přibližně za 30 minut, ale nabíjecích stanic tohoto typu je stále velmi málo. Jedním z důvodů je jejich stále vysoká cena. Jakýkoli typ rychlého nabíjení snižuje životnost baterie. Aby se snížil vliv tohoto faktoru, je u některých stanic ultrarychlé nabíjení omezeno na 80% kapacity baterie.

2. Simulace

2.1 Matlab Simulink

Pro vytvoření simulace vozidla s elektrickým pohonem byl zvolen software Matlab Simulink. Simulink je přílohou balíčku MATLAB. Při simulaci pomocí Simulinku je implementován princip vizuálního programování, podle kterého uživatel vytvoří na obrazovce model zařízení z knihovny bloků a provede výpočty. Na rozdíl od klasických metod modelování nemusí uživatel důkladně studovat programovací jazyk a numerické metody matematiky, ale spíše obecné znalosti vyžadované při práci na počítači a samozřejmě znalosti oblasti, ve které pracuje. Simulink je poměrně samostatný nástroj MATLAB a při práci s ním není potřeba znát samotný MATLAB ani jeho další aplikace. Na druhou stranu přístup k funkcím MATLABu a dalším nástrojům zůstává otevřený a lze je použít v Simulinku. V simulaci si uživatel může zvolit metodu řešení diferenciálních rovnic i metodu změny času modelu (s pevným nebo proměnným krokem). Během simulace je možné sledovat procesy probíhající v systému. K tomu se používají speciální pozorovací zařízení, která jsou součástí knihovny Simulink. Výsledky simulace mohou být prezentovány ve formě grafů nebo tabulek. Simulink má také tu výhodu, že umožňuje doplňovat knihovny bloků pomocí rutin napsaných v MATLABu, C ++, Fortran a Ada.

Pro modelování reálných systémů firma MathWorks vyvinula nadstavbový nástroj prostředí Simulink, který je založen na technice fyzikálního modelování. Hlavní vlastnost fyzikálního modelování je úplné oproštění se od popisu chování soustav prostřednictvím diferenciálních rovnic nebo přenosů. Simscape je tvořen knihovnamí prvků reálného světa z oblasti elektrotechniky, mechaniky, hydrauliky a knihovnou termomechanických jevů a fyzikálních signálů. Lze modelovat systémy jako elektromotory, můstkové usměrňovače, hydraulické pohony a chladicí systémy. Další produkty Simscape poskytují sofistikovanější komponenty a analytické nástroje. Komponenty Simscape představují fyzické prvky, jako jsou pumpy, motory a operační zesilovače. Čáry v modelu, které spojují tyto komponenty, odpovídají fyzickým spojením ve skutečném systému, který přenáší energii. Tento přístup umožňuje popsat spíše fyzickou strukturu systému než základní matematiku. Elektrické, mechanické, hydraulické a další fyzické připojení jsou v diagramu znázorněny čarami, jejichž barva označuje jejich fyzickou oblast, takže na první pohled je vidět, které systémy jsou v modelu a jak spolu souvisejí.

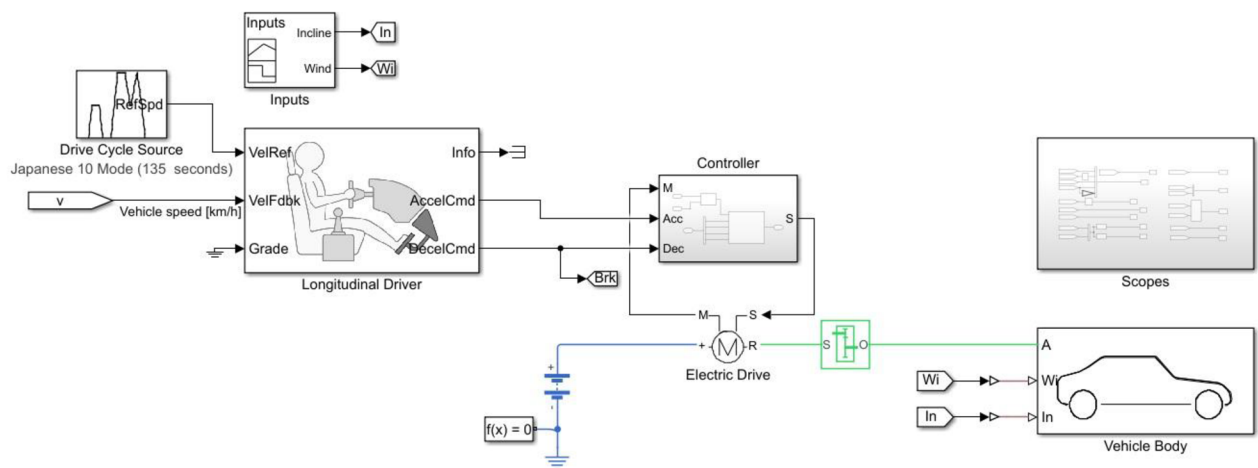
Simscape se skládá z šesti produktů, které pokrývají širokou škálu aplikací:

- Simscape
- Simscape Driveline
- Simscape Electrical
- Simscape Fluids
- Simscape Multibody
- Specialized Power Systems

SimDriveline je určen pro modelování mechaniky pohonných jednotek automobilů a strojů, Simscape Fluids pro simulaci hydraulických systémů, Simscape Electrical pro modelování elektrických obvodů a Multibody pro modelování a simulaci komplexních mechanických zařízení v prostorovém souřadnicovém systému (3D). Specialized Power Systems je samostatným, nezávislým na nástroji Simscape, modulem pro simulaci soustav v oboru výkonové elektroniky a energetiky.

2.2 Celkový model elektromobilu

Obrázky a informace byly vytvořeny a použity v rámci softwaru Matlab Simulink.



Obr.9 Celkový model elektromobilu

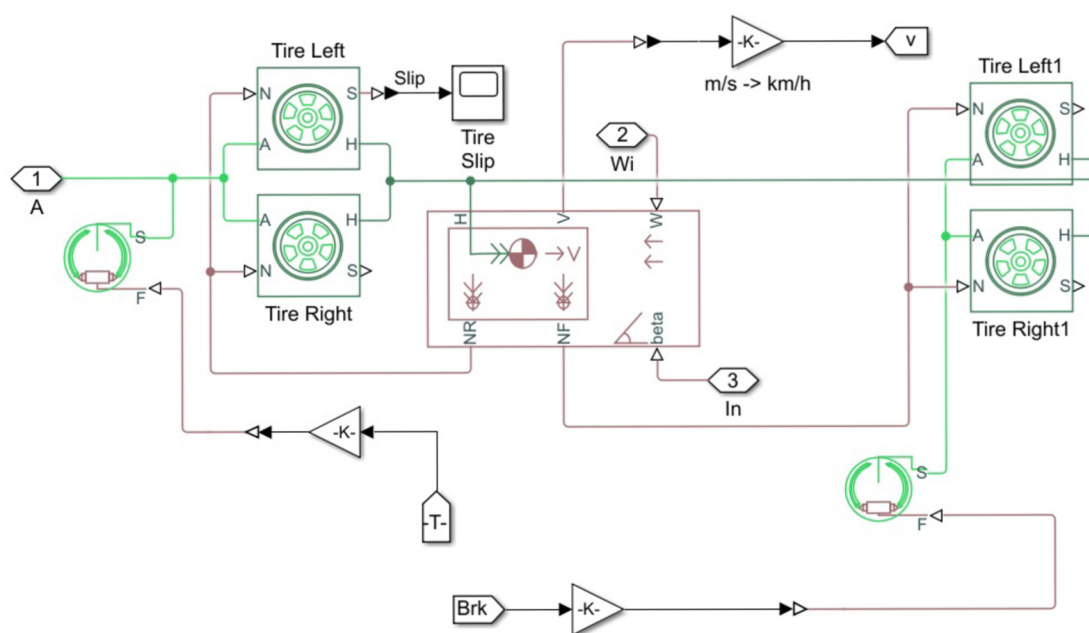
Model elektrického vozidla se musí skládat z:

- mechanické části
- elektrického pohonu
- zdroje energie
- řídicího systému
- vstupních signálů

To je základním systémem všech modelů elektromobilu, a každý z těchto subsystémů je modelován podle požadavků vývojáře.

Dále budou podrobněji popsány subsystémy a základní bloky, které jsem použil k modelování tohoto systému.

2.3 Mechanická soustava modelu



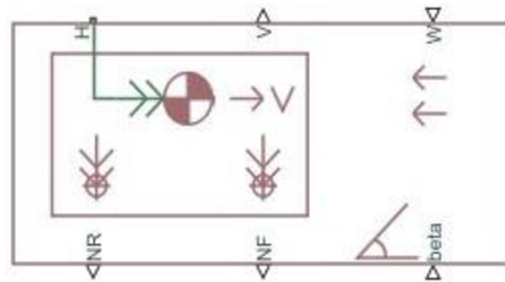
Obr.10 Mechanická soustava

Mechanická soustava modelu elektrického vozidla se skládá z bloků:

- Vehicle body (karoserie vozidla)
- Tire (kolo)
- Simple gear (jednoduchá převodovka)

Pro brzdění byly zvolené kotoučové brzdy. Všechny tyto bloky jsou vzájemně propojeny odpovídajícími porty.

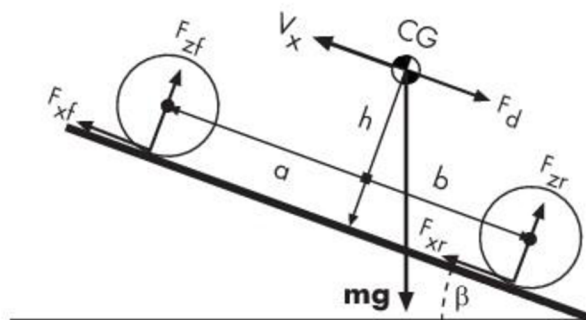
2.3.1 Karosérie



Obr.11 Blok Vehicle body

Blok *Vehicle body* představuje dvounápravovou karosérii vozidla v podélném pohybu. Vozidlo může mít na každé nápravě stejný nebo jiný počet kol. Kola vozidla se považují za shodné. Vozidlo má také těžiště (CG), které je v rovině jízdy nebo pod ní. Blok zohledňuje tělesnou hmotnost, aerodynamický odpor, sklon vozovky a rozložení hmotnosti mezi nápravy v důsledku zrychlení a profilu vozovky. Volitelně zahrnuje dynamiku výšky a odpružení. Vozidlo se nepohybuje svisle vzhledem k zemi.

Osy vozidla jsou rovnoběžné a tvoří rovinu. Podélný směr x leží v této rovině kolmo k nápravám. Pokud vozidlo jede ve svahu β , normálový směr z není rovnoběžný s gravitací, ale je vždy kolmý k podélné rovině nápravy.



Obr.12 Dynamika a pohyb vozidla

- g je gravitační zrychlení
- β je úhel sklonu
- m je hmotnost vozidla
- h je výška těžiště vozidla (CG) nad zemí
- a, b jsou vzdálenosti přední a zadní nápravy od normálového bodu projekce CG
- V_x je rychlost vozidla
- F_{xf}, F_{xr} jsou podélné síly na každé kolo v předních a zadních kontaktních bodech
- F_{zf}, F_{zr} jsou normálové síly zatížení na každé kolo

Pohyb vozidla je výsledkem účinku všech sil a momentů působících na něj. Podélné síly kol posouvají vozidlo dopředu nebo dozadu. Hmotnost vozidla působí prostřednictvím jeho těžiště (CG). V závislosti na úhlu sklonu hmotnost táhne automobil k zemi a táhne ho dozadu nebo dopředu.

$$mV_x' = F_x - F_d - mg \cdot \sin \beta \quad (1)$$

$$F_x = n (F_{xf} + F_{xr}) \quad (2)$$

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho A (V_x + V_w)^2 \cdot \text{sgn}(V_x + V_w) \quad (3)$$

- V_w je rychlost větru
- n je počet kol na každé nápravě
- A je čelní plocha vozidla
- C_d je součinitel aerodynamického odporu
- ρ je hustota vzduchu
- F_d je aerodynamická odporová síla

Nulové normálové zrychlení a točivý moment s nulovým stoupáním určují normálovou sílu na každé přední a zadní kolo.

$$F_{zf} = \frac{-h(F_d + mg \sin \beta + mV_x') + b \cdot mg \cos \beta}{n(a+b)} \quad (4)$$

$$F_{zr} = \frac{+h(F_d + mg \sin \beta + mV_x') + a \cdot mg \cos \beta}{n(a+b)} \quad (5)$$

$$F_{zf} + F_{zr} = mg \frac{\cos \beta}{n}$$

Rychlost stoupání, ke kterému dochází během zrychlování vozidla, závisí na třech složkách točivého momentu a setrvačnosti vozidla:

$$a = \frac{(f \cdot h) + (F_{zf} a) - (F_{zr} b)}{J} \quad (6)$$

Blok *Vehicle body* umožňuje modelovat pouze podélnou dynamiku, rovnoběžnou se zemí a orientovanou ve směru pohybu. Předpokládá se, že vozidlo je v horizontální a normální rovnováze. Rovnice tedy předpokládají, že kola nikdy neztratí kontakt s vozovkou. Toto omezení může vést k negativním normálovým silám.

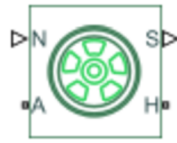
Tento blok má 6 portů, dva z nich jsou vstupní a čtyři výstupní:

- *W* - Vstup fyzického signálu pro rychlost větru
- *beta* - Vstup fyzického signálu pro úhel sklonu vozovky
- *V* - Výstup fyzického signálu pro podélnou rychlost vozidla
- *NF* - Výstup fyzického signálu pro normální sílu na přední nápravu. Síly kol jsou považovány za pozitivní, pokud působí dolů
- *NR* - Výstup fyzického signálu pro normální sílu na zadní nápravu
- *H* - tento port souvisí s horizontálním pohybem karoserie vozidla. Musí být připojen k odpovídajícím portům na všech kolech

Hlavní parametry, které lze pro tento blok nastavit:

- Hmotnost vozidla
- Počet kol na nápravu
- Vodorovná vzdálenost od těžiště k přední nápravě
- Vodorovná vzdálenost od těžiště k zadní nápravě
- Gravitační zrychlení
- Externě definovaná dodatečná hmotnost - možnost proměnné hmotnosti
- Varování před zápornou normální silou

2.3.2 Kolo



Obr.13 Blok Tire

Blok může modelovat dynamiku pneumatik za stálých nebo proměnlivých podmínek vozovky. Pro větší přesnost modelu pneumatiky je možnost specifikovat poddajnost pneumatiky, setrvačnost a valivý odpor. Tyto vlastnosti však zvyšují složitost modelu pneumatiky a mohou zpomalit simulaci.

Blok Tire modeluje pneumatiku jako tuhou kombinaci kola a pneumatiky, která je v kontaktu s vozovkou a může proklouznout. Když je na osu kola aplikován točivý moment, pneumatika tlačí na zem (příčemž je vystavena kontaktnímu tření) a přenáší výslednou reakci jako síla zpět na kolo. Tato akce tlačí kolo dopředu nebo dozadu.



Obr.14 Síly působící na kolo

- F_z je svislé zatížení pneumatiky
- F_x je podélná síla v místě dotyku
- V_x je podélná rychlost náboje kola
- Ω je úhlová rychlost kola
- r_w je poloměr kola

Rychlost prokluzu kola:

$$V_{sx} = r_w \Omega - V_x \quad (7)$$

Skluz kola:

$$k = \frac{V_{sx}}{|V_x|}, \text{ pro zablokované kolo } k = -1, \text{ pro dokonalou rotaci } k = 0 \quad (8)$$

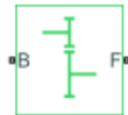
Tento blok má 4 porty:

- *N* - Port vstupu fyzického signálu spojený s normální silou působící na pneumatiku. Normální síla je kladná, pokud působí na pneumatiku směrem dolů a tlačí ji na vozovku
- *S* - Port výstupního fyzického signálu spojený s relativním prokluzem mezi pneumatikou a vozovkou
- *A* - Mechanický rotační port spojený s nápravou
- *H* - Mechanický translační port, který přenáší tah generovaný pneumatikou

Zakladní parametry:

- Jmenovité svislé zatížení
- Maximální podélná síla při jmenovitém zatížení
- Skluz při maximální síle při jmenovitém zatížení
- Poloměr otáčení

2.3.3 Převodovka



Obr.15 Blok Gear

Blok Simple Gear představuje převodovku, která omezuje připojené osy hnacího základního ozubeného kola B a hnaného ozubeného kola F, aby se otáčely s pevným převodovým poměrem, který je zadán. Je také možnost nastavit směr otáčení výstupního kola, buď se otáčí ve stejném nebo opačném směru jako vstupní kolo. Pokud se otáčejí ve stejném směru, úhlová

rychlost ω_F a úhlová rychlost ω_B mají stejné znaménko. Pokud se otáčejí v opačných směrech, ω_F a ω_B mají opačná znaménka.

Rovnice, podle které blok funguje:

$$r_F \omega_F = r_B \omega_B \quad (9)$$

- r_F je poloměr hnaného ozubeného kola
- ω_F je úhlová rychlost hnaného ozubeného kola
- r_B je poloměr hnacího ozubeného kola
- ω_B je úhlová rychlost hnacího ozubeného kola

Převodový poměr:

$$i_{FB} = \frac{r_F}{r_B} = \frac{n_F}{n_B} \quad (10)$$

- n_F je počet zubů hnaného ozubeného kola
- n_B je počet zubů hnacího ozubeného kola

Redukcí dvou stupňů volnosti na jeden nezávislý stupeň volnosti se získá rovnice přenosu točivého momentu:

$$i_{FB} \tau_B + \tau_F - \tau_{loss} = 0 \quad (11)$$

- τ_B je vstupní točivý moment
- τ_F je výstupní točivý moment
- τ_{loss} je ztráta točivého momentu v důsledku tření

pro ideální případ, $\tau_{loss} = 0$.

V neideálním převodu (B, F) se úhlová rychlost, poloměry převodů a počty zubů převodovky nezmění. Přenesený točivý moment a výkon se ale sníží o Coulombovo tření mezi povrchy zubů na převodech B a F, charakterizované účinností η . V případě konstantní účinnosti je η konstantní, nezávisle na přenášeném zatížení nebo výkonu.

V případě, když účinnost je závislá na zatížení nebo na výkonu:

$$\tau_{Coul} = i_{FB}\tau_{idle} + k\tau_F \quad (12)$$

- τ_{Coul} je Coulombův moment závislý na tření
- τ_{idle} je točivý moment působící na vstupní hřídel v režimu volnoběhu
- k je konstanta úměrnosti

Účinnost η souvisí s τ_{Coul} ve standardní předchozí verzi, ale stává se závislou na zatížení

$$\eta = \frac{\tau_F}{i_{FB}\tau_{idle} + (k+1)\tau_F} \quad (13)$$

Blok má porty:

- B - Rotační mechanický port spojený se vstupním hřídelem
- F - Rotační mechanický port spojený se výstupním hřídelem

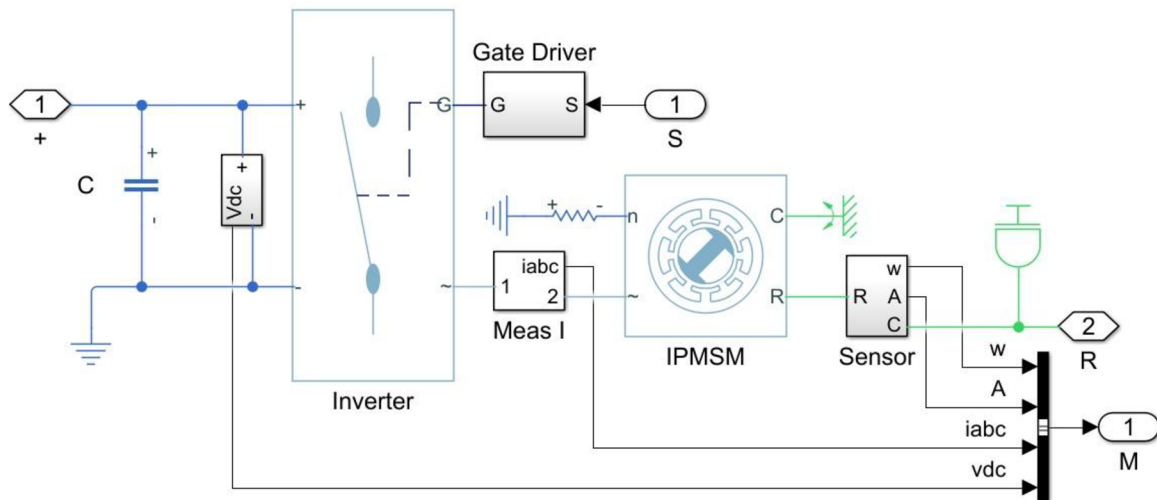
Při zapnutí volitelného tepelného portu H (Heat flow) je možnost modelovat účinky tepelného toku a teploty:

- Účinnost závislá na teplotě
- Účinnost závislá na teplotě a zátěži

Základní parametry pro nastavení:

- Převodový poměr (musí být kladný)
- Směr otáčení výstupního hřídele vzhledem ke vstupnímu
- Tepelná energie potřebná ke změně teploty
- Teplota na začátku simulace

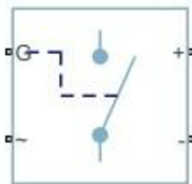
2.4 Elektrický pohon



Obr.16 Elektrický pohon

Pro elektrický pohon modelu byl zvolen synchronní motor s permanentním magnetem. Protože se jedná o střídavý motor, bylo nutné použít střídač (Inverter DC/AC). Pro zpětnou vazbu s řídicím systémem byly použity komponenty pro měření, a to jsou: voltmetr, ampérmetr, senzory pro měření rychlosti a úhlu zátěže rotoru.

2.4.1 Střídač



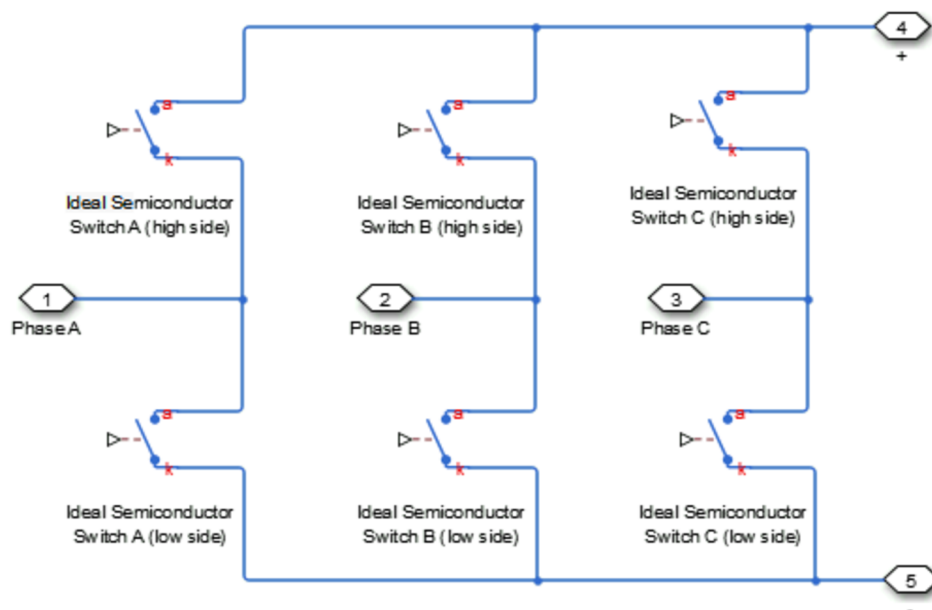
Obr.17 Blok Converter (Three-Phase)

Blok modeluje obousměrný AC/DC převodník, který spojuje třífázovou síť střídavého proudu se sítí stejnosměrného proudu. Brány šesti spínacích zařízení se ovládají prostřednictvím signálů z řídicí jednotky na port G.

Porty bloku:

- G - Vstupní signály
- \sim - Rozšiřitelný třífázový port
- $+$ - Kladný pól DC
- $-$ - Záporný pól DC

Obrázek ukazuje ekvivalentní obvod pro převodník s plně řízenými spínacími zařízeními:

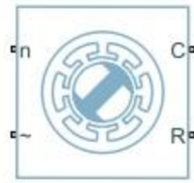


Obr.18 Obvod převodníku

Spínací zařízení, která lze zvolit:

- Gate Turn-Off Thyristor (Tyristor pro vypnutí brány)
- Ideal Semiconductor Switch (Ideální polovodičový spínač)
- IGBT (Bipolární tranzistor s izolovanou bránou)
- MOSFET (N - kanálový tranzistor)
- Thyristor (Tyristor)
- Averaged Switch (Přepínač)

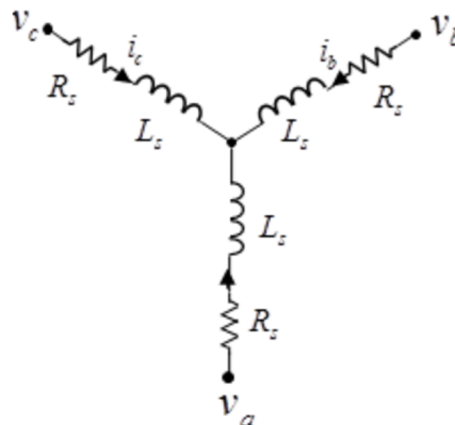
2.4.2 Elektromotor



Obr. 19 Blok PMSM

Blok PMSM modeluje třífázový synchronní motor s permanentním magnetem, zapojený do hvězdy.

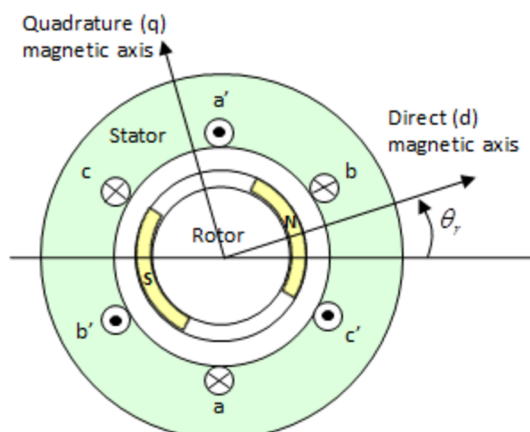
Obrázek ukazuje ekvivalentní elektrický obvod pro vinutí statoru:



Obr. 20 Elektrický obvod pro vinutí statoru

- v_a, v_b, v_c jsou jednotlivá fázová napětí na vinutí statoru
- i_a, i_b, i_c jsou proudy ve vinutí statoru
- R_s je ekvivalentní odpor každého vinutí statoru
- L_s je indukčnost každého vinutí statoru

Tento obrázek ukazuje konstrukci motoru s jedním pólovým párem na rotoru:



Obr.21 Konstrukce motoru

Permanentní magnety generují magnetické pole rotoru, které vytváří sinusoidální rychlost změny magnetického toku v závislosti na úhlu rotoru. Pro konvenci os na obrázku, a - fáze a toky permanentních magnetů jsou vyrovnány, když mechanický úhel rotoru θ_r je nulový. Mechanický úhel rotoru definován jako úhel mezi magnetickou osou fáze a a osou q rotoru.

Napětí na vinutí statoru jsou určeny:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d\psi_a}{dt} \\ \frac{d\psi_b}{dt} \\ \frac{d\psi_c}{dt} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Permanentní magnet a tři vinutí přispívají k celkovému toku spojujícímu každé vinutí.

Celkový tok je definován:

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_{am} \\ \psi_{bm} \\ \psi_{cm} \end{bmatrix} \quad (15)$$

- $\frac{d\psi_a}{dt}, \frac{d\psi_b}{dt}, \frac{d\psi_c}{dt}$ jsou rychlosti změny magnetického toku v každém vinutí statoru
- ψ_a, ψ_b, ψ_c jsou celkové toky spojující každé vinutí statoru
- $\psi_{am}, \psi_{bm}, \psi_{cm}$ jsou toky permanentních magnetů spojující vinutí statoru
- L_{aa}, L_{bb}, L_{cc} jsou vlastní indukčnosti statorových vinutí
- $L_{ab}, L_{ac}, L_{ba}, L_{bc}, L_{ca}, L_{cb}$ jsou vzájemné indukčnosti vinutí statoru

Indukčnosti ve vinutí statoru jsou závislé na elektrickém úhlu rotoru, definované:

$$\theta_e = N\theta_r + \text{rotor offset} \quad (16)$$

$$L_{aa} = L_s + L_m \cos(2\theta_e) \quad (17)$$

$$L_{bb} = L_s + L_m \cos(2(\theta_e - 2\pi/3)) \quad (18)$$

$$L_{cc} = L_s + L_m \cos(2(\theta_e + 2\pi/3)) \quad (19)$$

$$L_{ab} = L_{ba} = -M_s - L_m \cos(2(\theta_e + \pi/6)) \quad (20)$$

$$L_{bc} = L_{cb} = -M_s - L_m \cos(2(\theta_e + \pi/6 - 2\pi/3)) \quad (21)$$

$$L_{ca} = L_{ac} = -M_s - L_m \cos(2(\theta_e + \pi/6 + 2\pi/3)) \quad (22)$$

- θ_r je mechanický úhel rotoru
- θ_e je elektrický úhel rotoru
- *rotor offset* je 0, pokud elektrický úhel rotoru je definován vzhledem k ose d , nebo $-\pi/2$, pokud vzhledem k ose q
- L_m je flukтуаční indukčnost statoru
- M_s je průměrná vzájemná indukčnost mezi vinutími statoru
- N je počet pólpárů

Tok permanentního magnetu spojující vinutí a je maximální, když $\theta_e = 0$, a je nulová, když $\theta_e = 90^\circ$. Proto propojený tok motoru je definován:

$$\begin{bmatrix} \psi_{am} \\ \psi_{bm} \\ \psi_{cm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_m \cos \theta_e \\ \psi_m \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \\ \psi_m \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (23)$$

kde ψ_m je propojení toku permanentního magnetu.

Pomocí Parkovy transformace:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (25)$$

kde:

$$P = 2/3 \begin{bmatrix} \cos\theta_e & \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta_e & -\sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Aplikováním Parkovy transformace na první dvě elektrické rovnice vzniknou následující rovnice, které definují chování bloku:

$$v_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - N\omega i_q L_q \quad (27)$$

$$v_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} - N\omega(i_d L_d + \psi_m) \quad (28)$$

$$v_0 = R_s i_0 + L_0 \frac{di_0}{dt} \quad (29)$$

$$T = \frac{3}{2} N(i_q(i_d L_d + \psi_m) - i_d i_q L_q) \quad (30)$$

- v_d, v_q, v_0 jsou napětí vinutí statoru, která jsou nezávislá na úhlu rotoru
- i_d, i_q, i_0 jsou proudy vinutí statoru, která jsou nezávislé na úhlu rotoru
- ω je rychlost otáčení rotoru
- T je točivý moment rotoru
- $L_d = L_s + M_s + 3/2 L_m$ je indukčnost osy d statoru
- $L_q = L_s + M_s - 3/2 L_m$ je indukčnost osy q statoru
- $L_0 = L_s - 2M_s$ je indukčnost nulové sekvence statoru

Porty bloku:

- \sim - Třífázový port
- n - Neutrální port
- R - Mechanický rotační port spojený s rotorem motoru
- C - Mechanický rotační port spojený s pouzdrem motoru

Základní parametry bloku, které lze nastavit:

- Typ vinutí
- Počet pólpárů
- Parametrizace vazby toku permanentního magnetu
- Parametrizace statoru

2.5 Zdroj energie

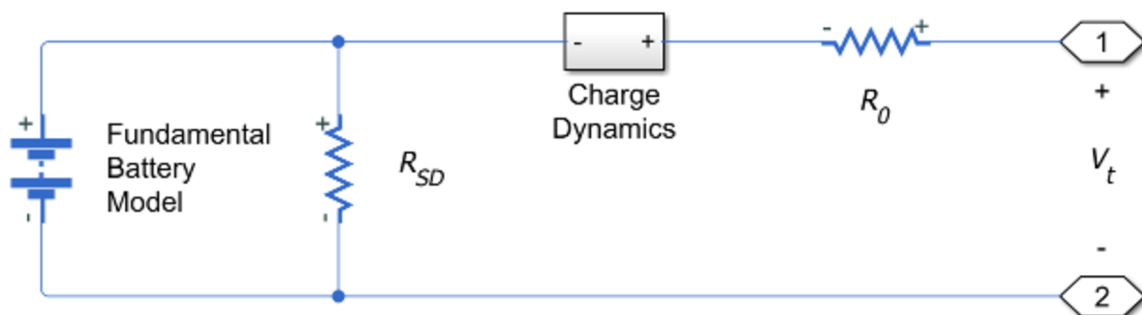


Obr.22 Blok Battery

Blok *Battery* představuje jednoduchý model baterie. Blok má čtyři varianty modelování

- **Bez nástrojů / Bez tepelného portu** - Základní model, neukazuje stav nabití a vybití baterie a zanedbává tepelné účinky. Tato varianta modelování je výchozí.
- **Bez nástrojů / S tepelným portem** - Model s otevřeným tepelným portem. Tento model neukazuje stav baterie.
- **S nástroji / Bez tepelného portu** - Model s otevřeným výstupním portem stavu baterie. Tento model zanedbává tepelné účinky.
- **S nástroji / S tepelným portem** - Model, který umožňuje ukazovat stav nabití a vybití baterie a uvažuje tepelné účinky.

Obvod baterie se skládá ze základního modelu baterie, odporu samovybíjení R_{sd} , modelu dynamiky nabíjení a sériového odporu R_0



Obr.23 Obvod baterie

Pokud jako parametr kapacity nabití baterie je zvolen *Nekonečný*, blok modeluje baterii jako sériový rezistor a zdroj konstantního napětí. Pokud parametr kapacity nabití baterie je *Omezený*, blok modeluje baterii jako sériový rezistor a zdroj napětí závislý na nabití.

V konečném případě je napětí funkcí nabíjení a má následující vztah:

$$V = V_0 \left(\frac{SOC}{1 - \beta(1 - SOC)} \right) \quad (31)$$

- SOC (state-of-charge) je poměr aktuálního nabití k jmenovité kapacitě baterie
- V_0 je napětí, když baterie je plně nabitá bez zátěže, jak je definováno v parametru *Jmenovité napětí*
- β je konstanta, která se vypočítá tak, že napětí baterie je V_1 , když je náboj AH_1

Rovnice definuje přibližný vztah mezi napětím a zbývajícím nábojem. To ukazuje rostoucí rychlost poklesu napětí při nízkých hodnotách nabití a zajišťuje, že napětí baterie se stane nulovým, když je úroveň nabití nulová.

U modelů baterií s omezenou kapacitou nabíjení je možnost modelování zhoršení výkonu baterie v závislosti na počtu cyklů vybití. Blok realizuje postupné snižování energie baterie škálováním konkrétních hodnot parametrů baterie, které se zadávají v parametrech, v závislosti na počtu dokončených cyklů vybíjení.

$$\lambda_{AH} = 1 - k_1 N^{0.5} \quad (32)$$

$$\lambda_{R0} = 1 + k_2 N^{0.5} \quad (33)$$

$$\lambda_{V1} = 1 - k_3 N \quad (34)$$

$$N = N_0 + \frac{1}{AH} \int_0^t \frac{i(t) \cdot H(i(t))}{\lambda_{AH}(t)} dt \quad (35)$$

- λ_{AH} je multiplikátor pro jmenovitou kapacitu baterie
- λ_{R0} je multiplikátor sériového odporu baterie
- λ_{V1} je multiplikátor napětí V_1
- N je počet dokončených vybíjecích cyklů
- N_0 je počet dokončených vybíjecích cyklů před začátkem simulace
- AH je jmenovitá kapacita baterie v ampérhodinách
- $i(t)$ je okamžitý výstupní proud baterie
- je funkce okamžitého výstupního proudu baterie. Tato funkce vrací 0, pokud je argument záporný, a 1, pokud je argument kladný

Blok vypočítá koeficienty k_1, k_2, k_3 nahrazením hodnot parametrů, které se zadávají v parametrech. Například výchozí sada parametrů bloku odpovídá následujícím hodnotám koeficientů:

- $k_1 = 1e - 2$
- $k_1 = 1e - 3$
- $k_1 = 1e - 3$

Rozšířené rovnice napětí, když je tepelný port:

$$V = V_{0T} \left(\frac{SOC}{1 - \beta_T(1 - SOC)} \right) \quad (36)$$

$$V_{0T} = V_0 (1 + \lambda_V(T - T_1)) \quad (37)$$

$$\beta_T = \beta (1 + \lambda_B(T - T_1)) \quad (38)$$

- T je teplota baterie
- T_1 je jmenovitá teplota
- λ_V je parametr teplotní závislosti koeficientu pro V_0
- λ_B je parametr koeficientu teplotní závislosti pro β

Vnitřní sériový odpor, odpor samovybíjení a jakýkoli dynamický odpor nabíjení jsou také funkcemi teploty:

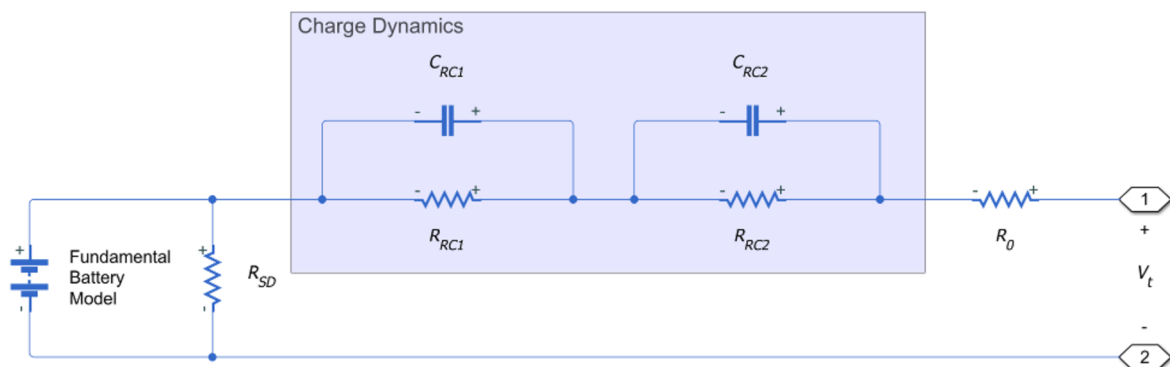
$$M_{th}T = \sum_i V_{T,i}^2 / R_{T,i} \quad (39)$$

- M_{th} je tepelná kapacita baterie
- i odpovídá i -tému ohmickému ztrátovému příspěvateli. V závislosti na konfiguraci:
 - Sériový odpor
 - Odporu samovybíjení
 - První segment dynamiky nabíjení
 - Druhý segment dynamiky nabíjení
 - Třetí segment dynamiky nabíjení
 - Čtvrtý segment dynamiky nabíjení
 - Pátý segment dynamiky nabíjení
- $V_{T,i}$ je pokles napětí na rezistoru i
- $R_{T,i}$ je odpor i

Dynamiku nabití baterie umožňuje modelovat parametr *Charge dynamics*:

- *No dynamics* - ekvivalentní obvod neobsahuje žádné paralelní RC sekce. Mezi svorkovým napětím a interním nabíjecím napětím baterie není zpoždění
- *One time – constant dynamics* - ekvivalentní obvod obsahuje jednu paralelní RC sekci
- *Two time – constant dynamics* - ekvivalentní obvod obsahuje dvě paralelní RC sekce
- *Three time – constant dynamics* - ekvivalentní obvod obsahuje tři paralelní RC sekce
- *Four time – constant dynamics* - ekvivalentní obvod obsahuje čtyři paralelní RC sekce
- *Five time – constant dynamics* - Ekvivalentní obvod obsahuje pět paralelních RC sekcí

Obrázek ukazuje ekvivalentní obvod pro blok se dvěma časovými konstanty:



Obr.24 Obvod pro dynamiku nabití baterie

- R_{RC1}, R_{RC2} jsou paralelní RC odpory
- C_{RC1}, C_{RC2} jsou paralelní RC kapacity

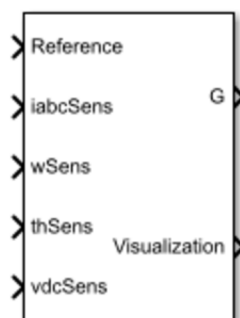
Porty bloku:

- q - Úroveň nabití baterie
- + - Kladný pól
- - - Záporný pól
- H - Tepelná kapacita baterie

Parametry bloku:

- Jmenovité napětí
- Vnitřní odpor
- Vnitřní odpor v průběhu nabíjení
- Vnitřní odpor v průběhu vybíjení
- Kapacita nabití baterie
- Maximální nabití baterie v ampérhodinách
- Napětí V_1 , když je náboj AH1
- Dynamika nabíjení
- Měření teploty
- Tepelná kapacita

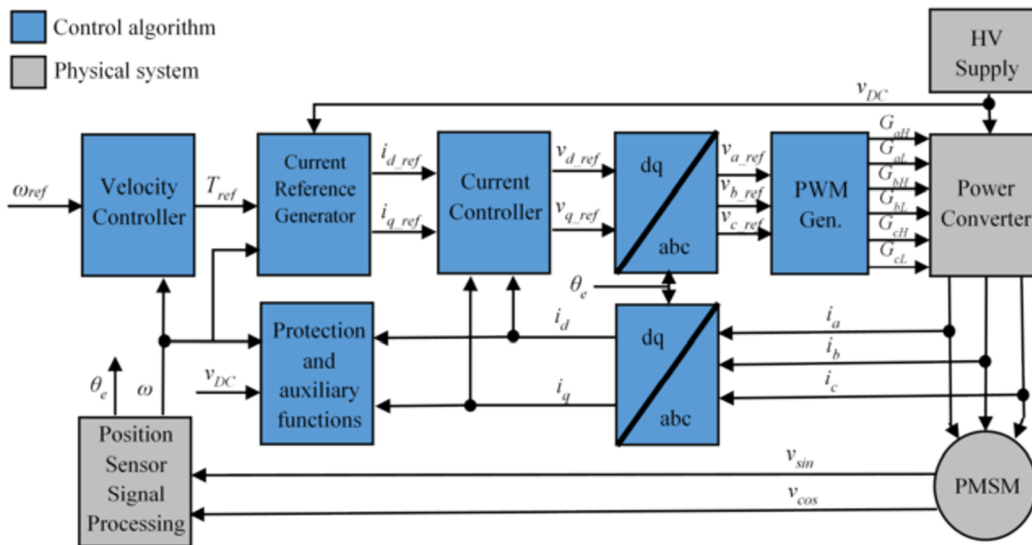
2.6 Řídicí systém



Obr.25 Blok PMSM Field-Oriented Control

Řídicí systém modelu elektromobilu je založen na bloku *PMSM Field-Oriented Control (FOC)*. FOC je také známá jako vektorové řízení, tato metoda je používána k řízení synchronního motoru s permanentními magnety (PMSM) a střídavých indukčních motorů (ACIM). FOC poskytuje dobrou schopnost ovládní v celém rozsahu točivého momentu a otáček. Implementace FOC vyžaduje převod statorových proudů ze stacionárního referenčního rámce na rámec toku rotoru (také známý jako referenční rámec $d - q$). Regulace otáček a regulace točivého momentu jsou nejčastěji používanými režimy řízení FOC. Režim řízení polohy je méně častý. Metoda FOC vyžaduje zpětnou vazbu proudů a polohy rotoru v reálném čase pomocí senzorů.

Tento obrázek ukazuje řídicí strukturu PMSM:



Obr. 26 Řídicí struktura PMSM

- ω je měřená úhlová rychlost
- ω_{ref} je referenční úhlová rychlosti
- T_{ref} je referenční elektromagnetický točivý moment
- i, v jsou statorové proudy a napětí (dolní indexy d a q představují osu d a osu q , dolní indexy a, b, c představují tři statorová vinutí)
- θ_e je elektrický úhel rotoru
- G jsou výstupní impulsy (dolní indexy H (High), L (Low))

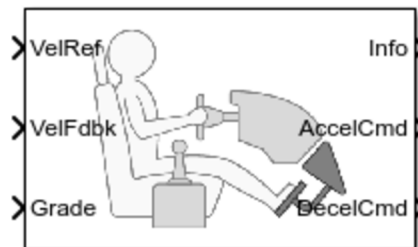
Porty bloku jsou:

- *Reference* - Vstupní signál (točivý moment v Nm nebo rychlosti v rad/s , v závislosti na zvoleném režimu řízení)
- *iabcSens* - Měřené fázové proudy
- *wSens* - Rychlost rotoru
- *thSens* - Úhel rotoru
- *vdcSens* - Napětí DC zdroje
- G - Výstupní impulsy do invertoru
- *Visualization* - Vizualizační signály

Základní parametry bloku:

- Typ vinutí motoru
- Režim ovládání
- Maximální výkon
- Maximální točivý moment
- Počet pólů
- Typ ovládání

2.7 Vstupní signály

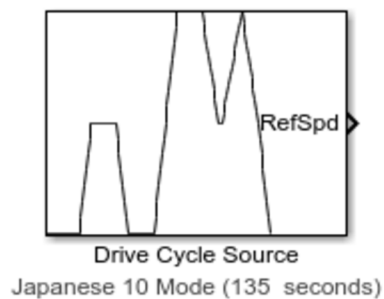


Obr.27 Blok Longitudinal Driver

Blok *Longitudinal Driver* implementuje ovladač podélného sledování rychlosti. Na základě referenčních a zpětnovazebních rychlostí blok generuje normalizované příkazy zrychlení a brzdění. Blok se používá k modelování dynamické odezvy řidiče nebo ke generování příkazů nezbytných ke sledování podélného jízdního cyklu. Blok představuje chování řidiče při řízení během manévrování po dráze a vyhýbání se překážkám a také bere v úvahu zpoždění řidiče vyplývající z percepčních a neuromuskulárních mechanismů. Je možnost nastavit výstupní signál do převodovky ale u elektrického vozidla to není nutné.

Porty bloku:

- *VelRef* - Referenční rychlost vozidla
- *VelFdbk* - Podélná rychlost vozidla
- *Grade* - Úhel sklonu silnice
- *Info*- Řídící signály
- *AccelCmd* - Příkaz zrychlení vozidla
- *DecelCmd* - Příkaz zpomalení vozidla



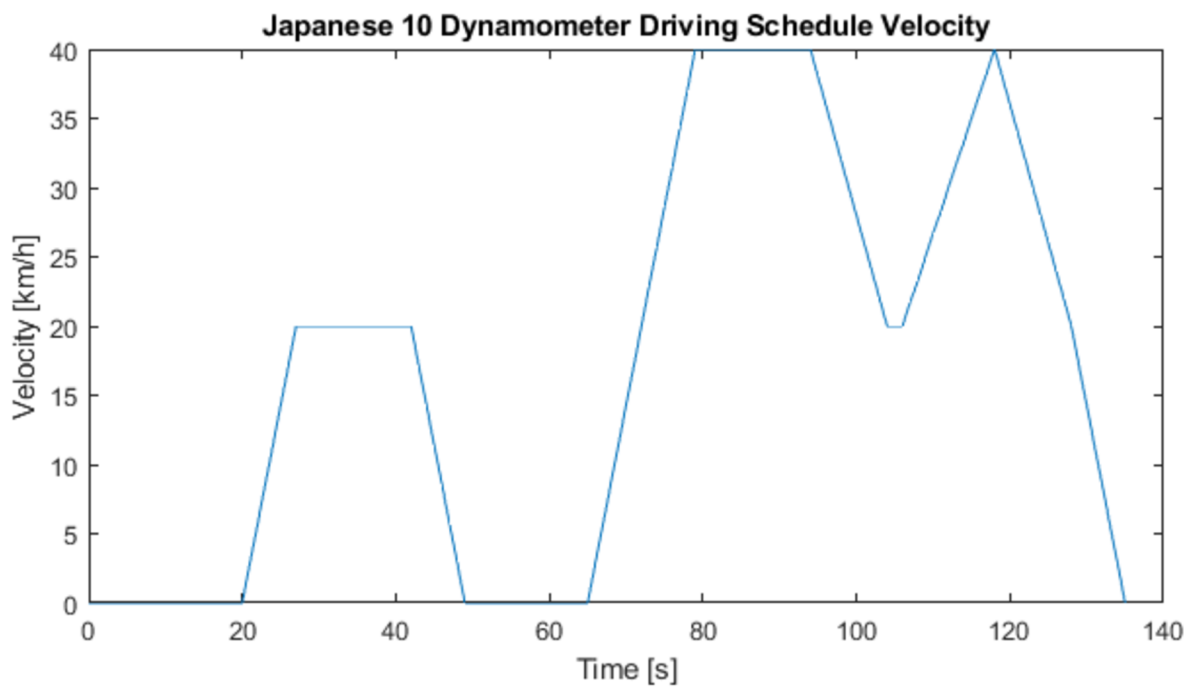
Obr.28 Blok Drive cycle source

Blok *Drive cycle source* generuje standardní nebo uživatelem zadaný podélný jízdní cyklus. Výstupem bloku je zadaná podélná rychlost vozidla, kterou lze použít k:

- Stanovení točivého momentu motoru a dalších parametrů požadovaných vozidlem k dosažení požadované rychlosti a zrychlení
- Sledování a optimalizování ovládání vozidla, výkonu systému a spolehlivosti systému během několika jízdních cyklů
- Identifikací poruch

Cyklus lze vybrat z velkého počtu standardních cyklů nebo vytvořit vlastní ve formátech .mat, .xls, .xlsx, .txt

Pro tuto simulaci byl zvolen cyklus ze stávajících: *Japanese 10 Mode (135 seconds)* s nejkratší dobou trvání.



Obr.29 Jízdní cyklus (závislost rychlosti na čase)

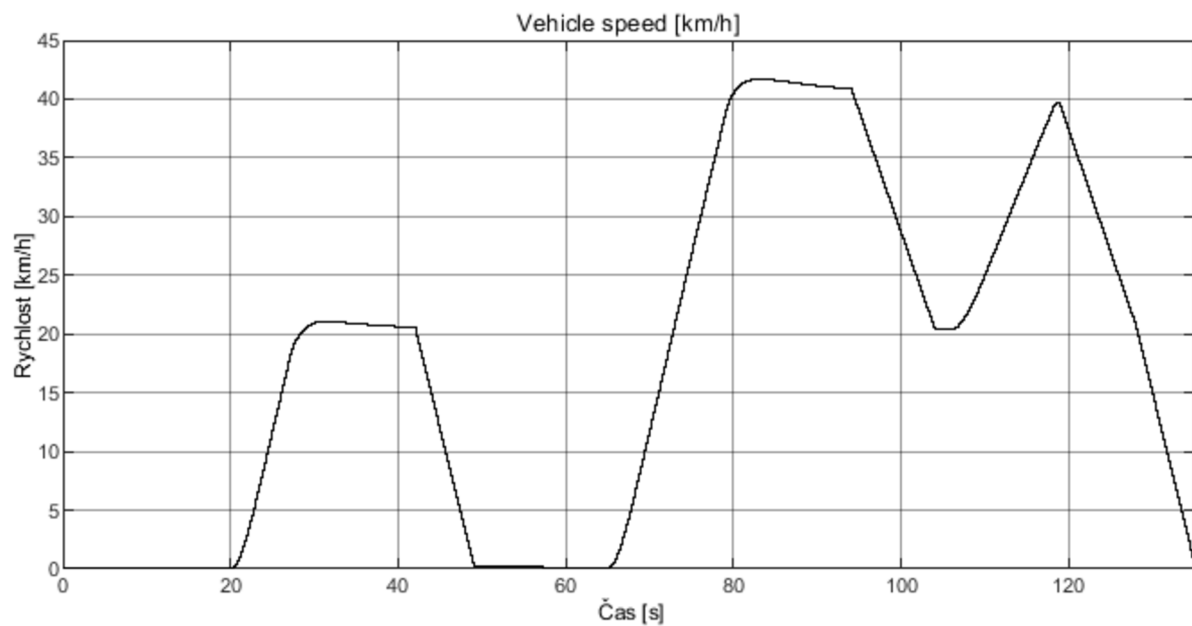
Pro vytvoření jakékoli dalších vstupních signálů, například průběh rychlosti větru a úhlu sklonu vozovky, byl použit blok *Signal Builder*

2.7 Vizualizace charakteristik

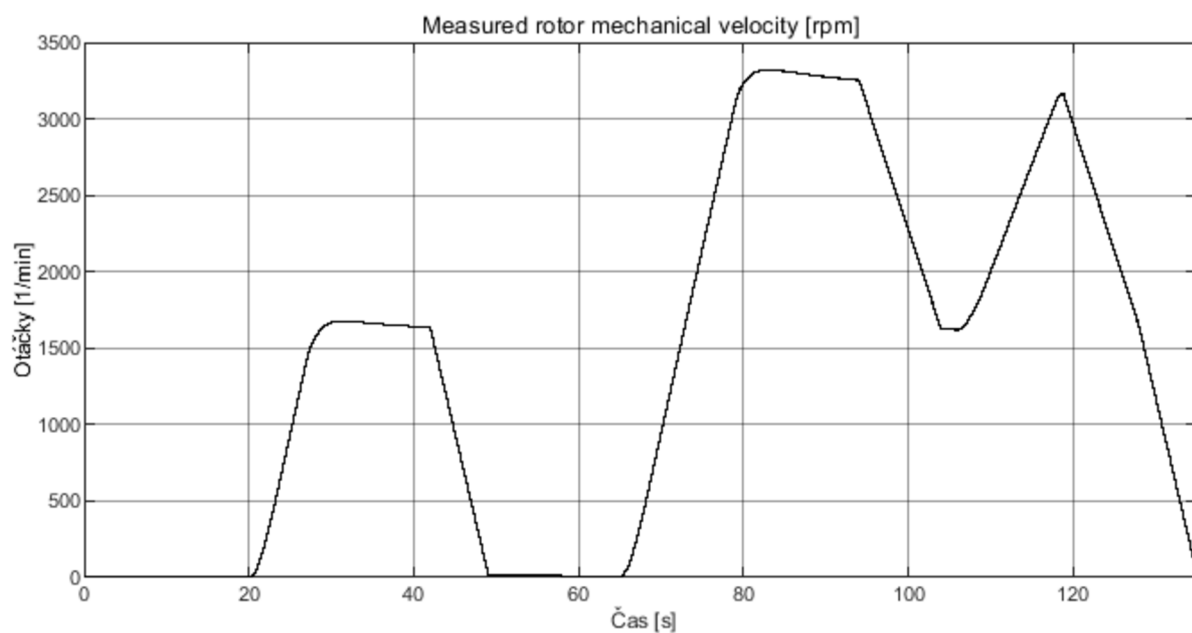
Během simulace lze pomocí bloků *Scope* sledovat různé charakteristiky ze všech senzorů a na základě těchto informací optimalizovat model.

Dále bude ukázka několika grafů této simulace:

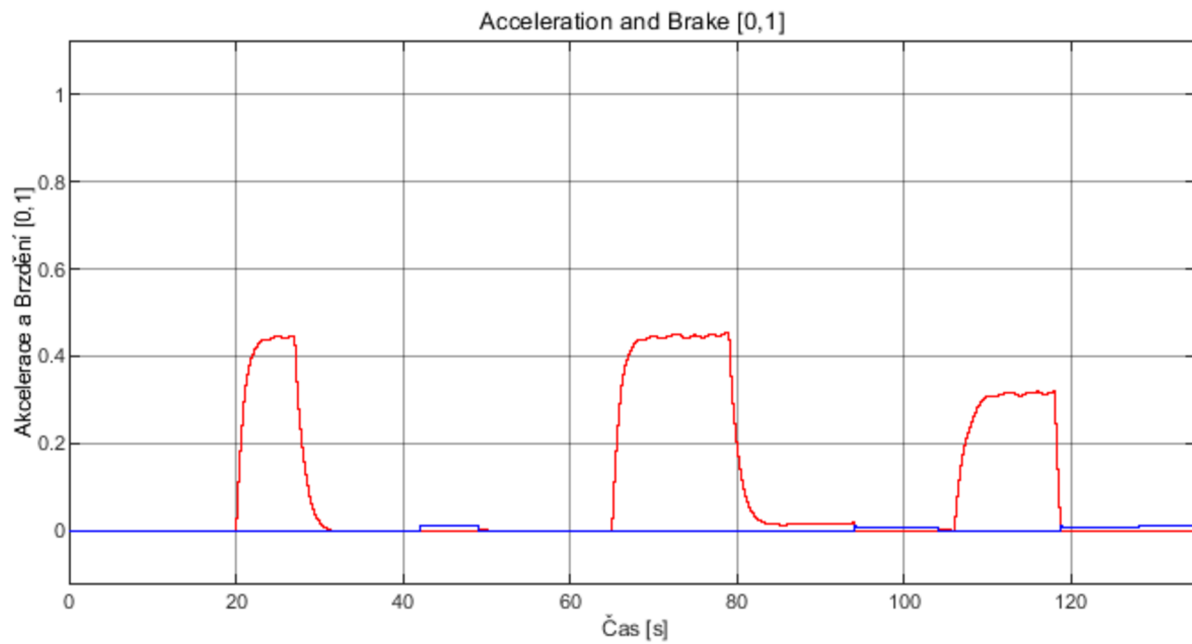
První stav modelu:



Obr.30 Graf průběhu rychlosti [km/h]



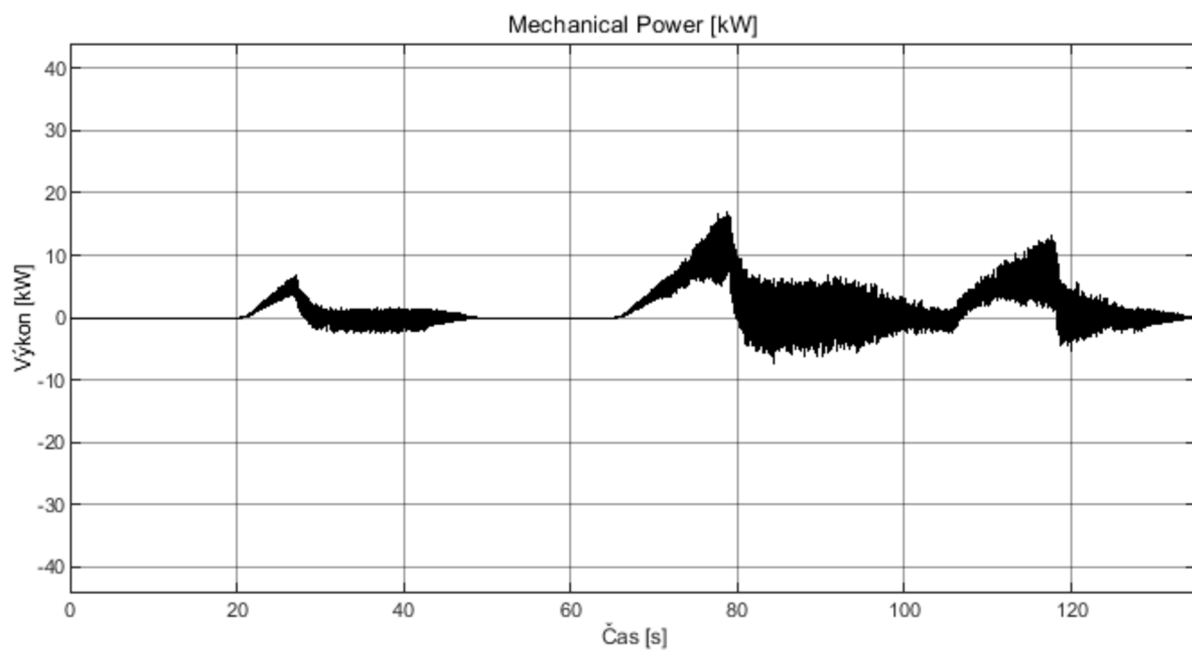
Obr.31 Graf otáček rotoru [1/min]



Obr.32 Graf zrychlení a brzdění [0,1]

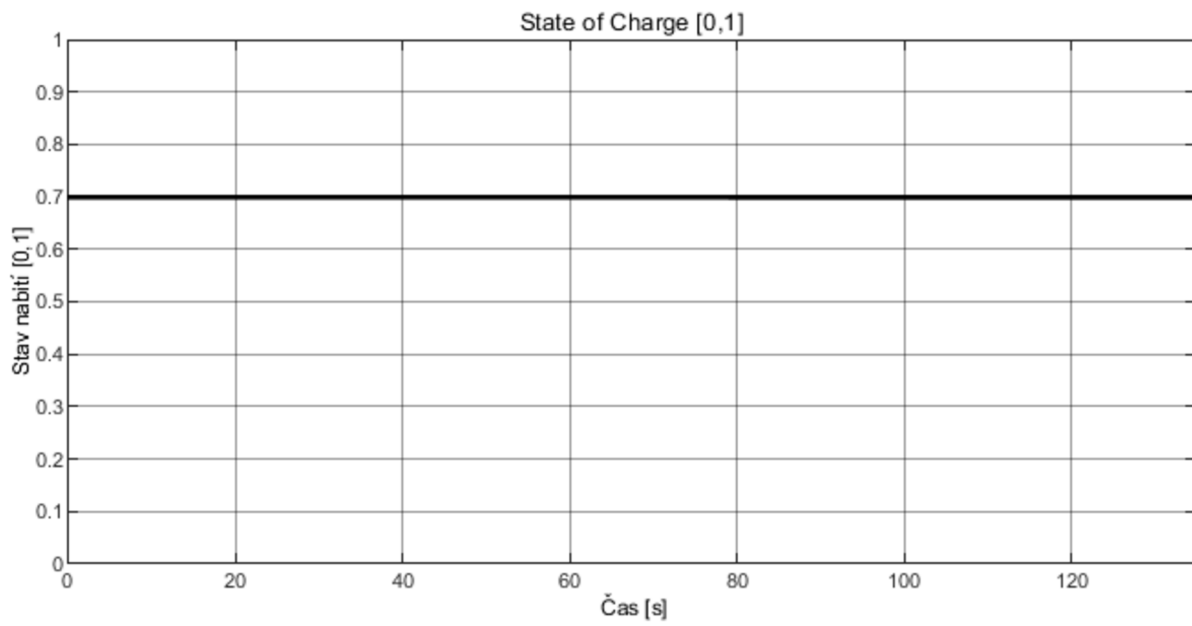
Červená křivka – akceleraace

Modrá křivka – brzdění



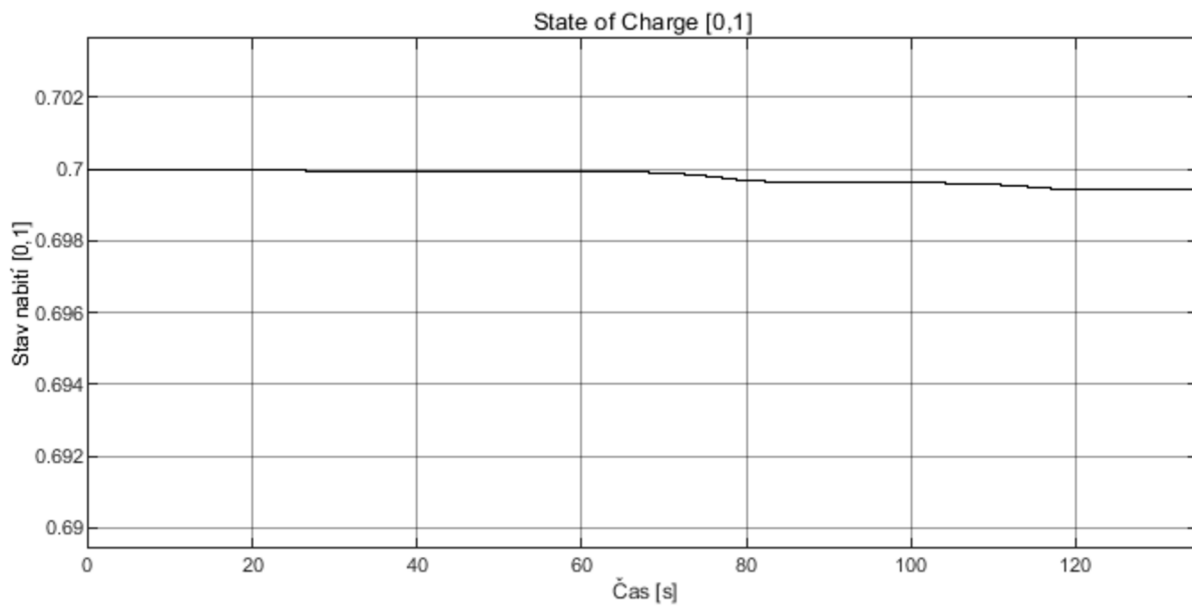
Obr.33 Graf výkonu během simulovaného testu [kW]

Graf stavu baterie s počátečním nabitím na 70%



Obr.34 Graf stavu baterie [0,1]

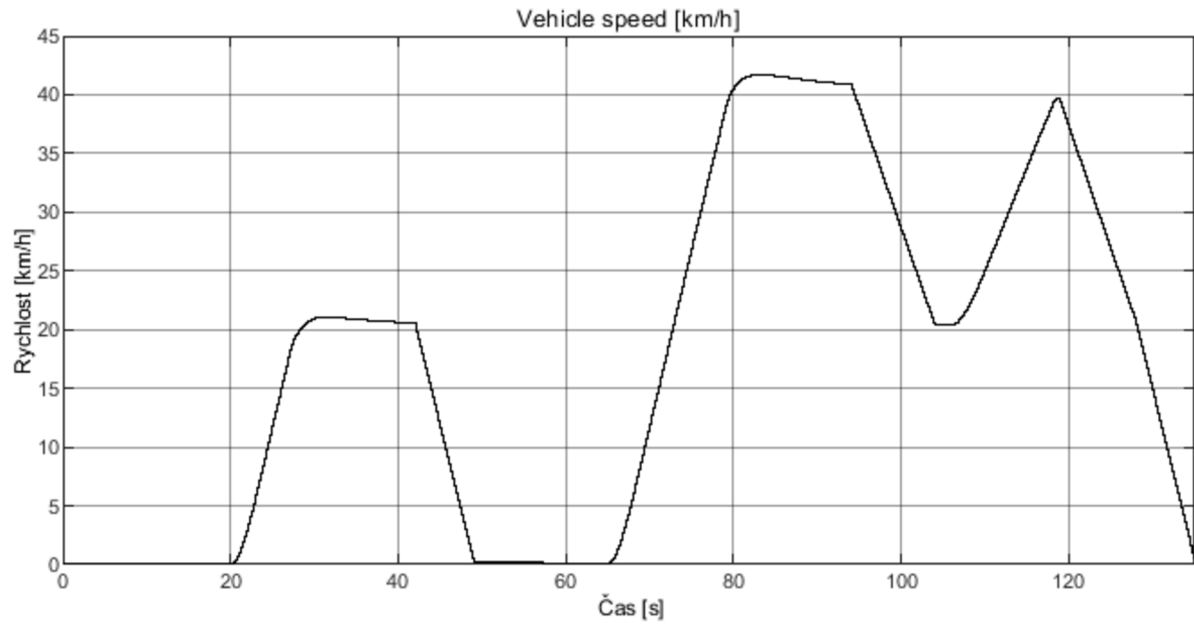
Graf stavu baterie s počátečním nabitím na 70% v přiblížení do rozsahu 1%



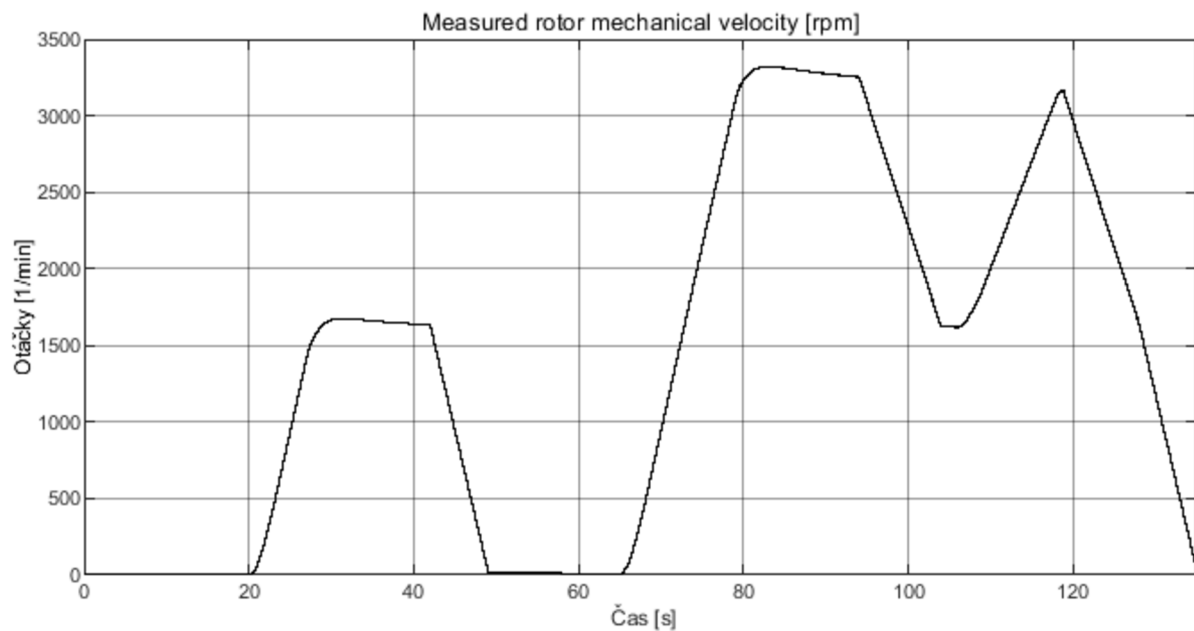
Obr.35 Graf stavu baterie v přiblížení [0,69 , 0,70]

Druhý stav modelu:

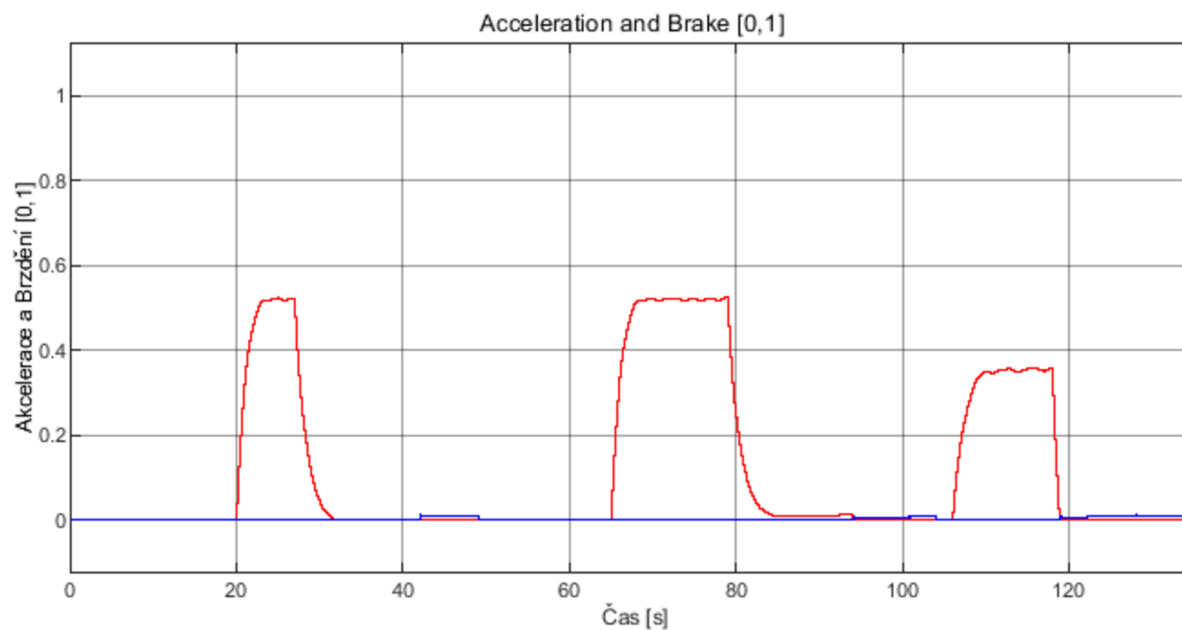
Pro druhý stav modelu byla zvýšena hmotnost vozidla o 20% a snížena kapacita baterie o 60%



Obr.36 Graf průběhu rychlosti druhý stav [km/h]



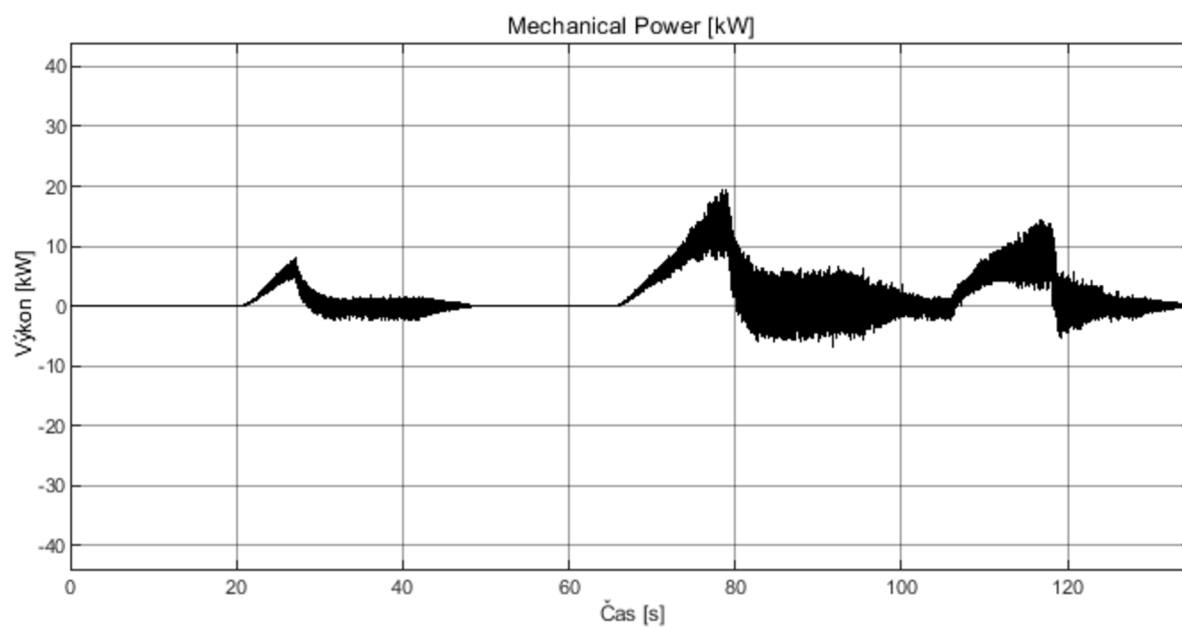
Obr.37 Graf otáček rotoru druhý stav [1/min]



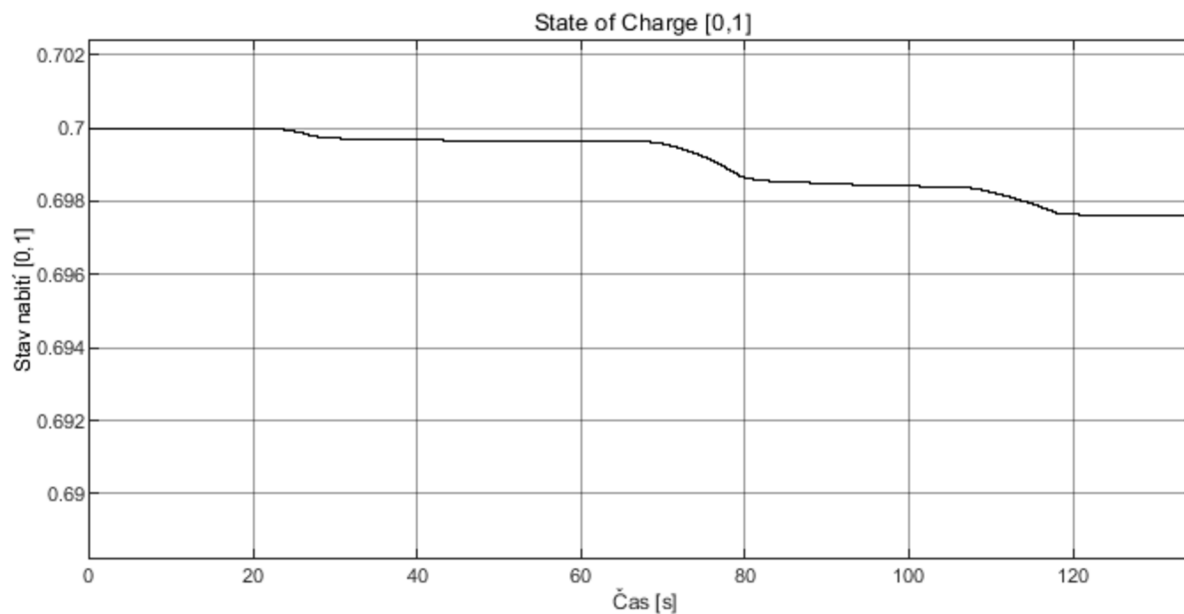
Obr.38 Graf zrychlení a brzdění druhý stav [0,1]

Červená křivka – akcelerace

Modrá křivka – brzdění



Obr.39 Graf výkonu během simulovaného testu druhý stav [kW]



Obr.40 Graf stavu baterie v přiblížení druhý stav [0,69 , 0,70]

Podle těchto grafů je vidět že ani hmotnost vozidla ani kapacita baterie nemají vliv na otáčky motoru, ale mají vliv na výkon motoru a na hodnoty přidání plynu a brzdění. Byl ukázkově simulován pouze krátký jízdní cyklus z důvodu nároků na výpočetní techniku, proto pokles stavu nabití baterie je malý, avšak simulace ukazuje na funkčnost tohoto parametru.

Závěr

Tato bakalářská práce popisuje vozidla s elektrickým pohonem. A skládá se ze dvou hlavních částí, a to jsou: teoretická a praktická.

První část této práce obsahuje informaci o součástech elektrického pohonu a o výhodách elektrických vozidel ve srovnání s automobily se spalovacími motory. Teoretická část ukazuje různé typy elektromotorů a jejich výhody a nevýhody. Podle toho je vidět proč výrobci elektrických vozidel používají nejčastěji synchronní a asynchronní střídavé motory. Motory tohoto typu mohou být poháněny jenom střídavým proudem a otáčky jsou regulovány frekvencí. Pro tyto účely existuje počítač, který se jmenuje invertor. V závěru teoretické části je popis baterie pro elektromobily, jejich konstrukce, závislost vlastností na počasí a problémy při dobíjení.

Druhá část popisuje software Matlab Simulink, který byl zvolen pro vytvoření simulačního modelu elektrického vozidla. Na začátku je ukázan celkový model elektromobilu a jeho subsystemy. Dále se práce věnuje základním blokům, které byly použity v tomto modelu. Popis každého z nich obsahuje informaci na jakých principech jsou založeny bloky a jsou ukázány některé vzorce podle kterých pracují. Také jsou ukázány způsoby propojení mezi bloky a parametry, které lze zadat pro simulaci.

Bylo rozhodnuto vytvořit dva stavy simulace, aby bylo vidět, že při změně některých vstupních parametrů se mění charakter simulace. Na konci této bakalářské práce jsou zobrazeny průběhy vybraných základních charakteristik pro první a druhý stav simulace.

Téma elektrických vozidel je velmi rozsahlé a vyvíjí se poměrně rychle. Během napsání této práce jsem se dozvěděl hodně o elektrických pohonech ale je to jen malá část tohoto zajímavého, a v současné době, důležitého tématu. Práce v softwaru Matlab Simulink byla velmi užitečnou. Je potřeba více času a zkušeností pro vytvoření složitějšího modelu, který bude mít více funkcí a dále se více přiblíží skutečnému elektromobilu.

Seznam zdrojů

- [1] Ministerstvo životního prostředí. [online]. [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: <https://www.mzp.cz/cz/doprava>
- [2] Protean Ford F-150. [online]. [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: <https://www.engadget.com/2011-04-21-protean-electric-in-wheel-motors-have-the-stuff-to-make-an-f-150.html>
- [3] Tesla Model S P85D. [online]. [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/tesla-model-s-p85d-tohle-je-budoucnost-87792>
- [4] Tesla Model S P85D. [online]. [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/tesla-model-s-p85d-tohle-je-budoucnost-87792>
- [5] ŠKODA CITIGOe iV. [online]. [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: <https://www.autoopat.cz/skoda/citigoe-iv/>
- [6] ŠKODA CITIGOe iV. [online]. [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: <https://www.autoopat.cz/skoda/citigoe-iv/>
- [7] Stejnosměrný motor. [online]. [cit. 2020-12-26]. Dostupné z: <https://www.asutpp.ru/elektrodvigatel-postoyannogo-toka.html>
- [8] Synchronní motor Mitsubishi i-MiEV. [online]. [cit. 2020-12-30]. Dostupné z: <https://hevcars.com.ua/reviews/dvigatel-elektromobilya/>
- [9] Asynchronní motor Tesla Model S. [online]. [cit. 2020-12-30]. Dostupné z: <https://hevcars.com.ua/reviews/dvigatel-elektromobilya/>
- [10] Elektromotor v náboji kola. [online]. [cit. 2021-01-10]. Dostupné z: <https://hevcars.com.ua/reviews/dvigatel-elektromobilya/>
- [11] Hybrid.cz. [online]. [cit. 2021-01-10]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/elektromotor-v-naboji-kola-uchyti-se-jako-flexibilni-levny-pohon-elektromobilu>
- [12] Elonx.cz. [online]. [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: <https://www.elonx.cz/zakladni-parametry-baterii-v-elektromobilech/>
- [13] Evexpert.cz. [online]. [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: <https://www.evexpert.cz/rady-a-tipy-zajimavosti-novinky-informace-evexpert/elektromobilita/elektromobily-a-jejich-baterie>
- [14] Devinn.cz. [online]. [cit. 2021-02-19]. Dostupné z: <https://www.devinn.cz/baterie-elektromobilu/>

Seznam obrázků

- Obr. 1 - Protean Ford F-150
- Obr. 2 - Tesla Model S P85D
- Obr. 3 - ŠKODA CITIGOe iV
- Obr. 4 - Stejnoseměrný motor
- Obr. 5 - Synchronní motor Mitsubishi i-MiEV
- Obr. 6 - Asynchronní motor Tesla Model S
- Obr. 7 - Elektromotor v náboji kola
- Obr. 8 - Akumulátorová baterie
- Obr. 9 - Celkový model elektromobilu
- Obr. 10 - Mechanická soustava
- Obr. 11 - Blok Vehicle body
- Obr. 12 - Dynamika a pohyb vozidla
- Obr. 13 - Blok Tire
- Obr. 14 - Síly působící na kolo
- Obr. 15 - Blok Gear
- Obr. 16 - Elektrický pohon
- Obr. 17 - Blok Converter (Three-Phase)
- Obr. 18 - Obvod převodníku
- Obr. 19 - Blok PMSM
- Obr. 20 - Elektrický obvod pro vinutí statoru
- Obr. 21 - Konstrukce motoru
- Obr. 22 - Blok Battery
- Obr. 23 - Obvod baterie
- Obr. 24 - Obvod pro dynamiku nabití baterie
- Obr. 25 - Blok PMSM Field-Oriented Control
- Obr. 26 - Řídící struktura PMSM
- Obr. 27 - Blok Longitudinal Driver
- Obr. 28 - Blok Drive cycle source
- Obr. 29 - Jízdní cyklus (zavislost rychlosti na čase)
- Obr. 30 - Graf průběhu rychlosti
- Obr. 31 - Graf otáček rotoru
- Obr. 32 - Graf zrychlení a brzdění

Obr. 33 - Graf výkonu během simulovaného testu

Obr. 34 - Graf stavu baterie

Obr. 35 - Graf stavu baterie v přiblížení

Obr. 36 - Graf průběhu rychlosti druhý stav

Obr. 37 - Graf otáček rotoru druhý stav

Obr. 38 - Graf zrychlení a brzdění druhý stav

Obr. 39 - Graf výkonu druhý stav

Obr. 40 - Graf stavu baterie v přiblížení druhý stav