



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

PŘEVODOVÁ ÚSTROJÍ V ELEKTRICKÝCH POHONECH VOZIDEL

GEAR TRAINS IN AUTOMOTIVE ELECTRIC DRIVES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Vlaha

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Neuman

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Ondřej Vlaha**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce: **Ing. Ondřej Neuman**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Převodová ústrojí v elektrických pohonech vozidel

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Elektrický pohon je známý mimo jiné svou vysokou účinností a častokrát velmi plochou křivkou točivého momentu již od minimálních otáček. I tento typ pohonu má svou charakteristiku účinnosti. Přímý pohon nebo jednostupňová převodovka nemusí být vždy dostačující pro řadu aplikací elektrických pohonů.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše v oblasti převodových ústrojí (jednostupňových i víceústupňových), které jsou spojeny s trakčními elektrickými pohony vozidel.

Vytvořit přehled parametrů a veličin, které mají vliv na účinnost a výkonové parametry synchronního elektromotoru s permanentními magnety.

Zhodnotit vlivy zmíněných převodových ústrojí na účinnost a výkonové parametry elektrického pohonu.

Sekundárním cílem je využít účinností mapu elektromotoru a ilustrovat vliv víceústupňové převodovky na jednoduchém zátěžném cyklu motoru. Může se jednat také o jednoduchý jízdní manévr, například akcelerace vozidla v přímém směru.

Seznam doporučené literatury:

LARMINIE, James a John LOWRY. Electric vehicle technology explained. 2nd ed. Chichester: John Wiley, c2012. ISBN 978-111-9942-733.

HAYES, John G. a Gordon A. GOODARZI. Electric powertrain: energy systems, power electronics and drives for hybrid, electric and fuel cell vehicles. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2018. ISBN 978-111-9063-643.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá výzkumem v oblasti použití převodových ústrojí v elektrických vozidlech. Mapuje rozdělení elektromobilů v závislosti na druhu jejich pohonu. Dále se zabývá rozdělením konstrukcí elektromotorů a analyzuje parametry, které mají vliv na účinnost pohonného traktu. Druhá část práce se věnuje tvorbě výpočetního modelu Tesly Model 3. Tento model byl vytvořen v programu Matlab Simulink a ilustruje se na něm ovlivnění účinnosti pohonného traktu použitím jednostupňové nebo dvoustupňové převodovky při různých jízdních cyklech.

KLÍČOVÁ SLOVA

elektromobil, převodovka, dvoustupňová převodovka, elektromotor, převodové ústrojí elektromobilu

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the research in field of gearbox applications in electric vehicles. It describes the classification of electric vehicles depending on the type of their powertrain. It also discusses the distribution of electric motor designs and analyses the parameters that affects the efficiency of the drive train. A numerical model of Tesla Model 3 was created in Matlab Simulink to illustrate the effect on powertrain efficiency when using single or dual speed transmission under different driving cycles.

KEYWORDS

Electric vehicle, transmission, dual speed transmission, electric motor, electric vehicle geartrains

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VLAHA, Ondřej. *Převodová ústrojí v elektrických pohonech vozidel*. Online, Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství, 2024. Vedoucí práce Ondřej Neuman. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/158041>.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 24. května 2024

.....

Ondřej Vlaha

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Ondřeji Neumanovi za věnovaný čas při konzultacích a cenné rady, které mi pomohly při tvorbě této práce. Samozřejmě bych chtěl také poděkovat mé rodině, která mě podporovala po celou dobu studia.

OBSAH

Úvod	10
1 HISTORIE	11
2 ELEKTROMOBILITA.....	12
2.1 Základní rozdělení	12
2.1.1 Bateriové elektrické vozy (BEV)	13
2.1.2 Plug in hybrid (PHEV)	13
2.1.3 Hybridní elektrické vozy (HEV)	13
2.1.4 Vodíkové elektromobily (FCEV)	13
2.1.5 Porovnání efektivity různých pohonů.....	14
2.2 Elektromotory	14
2.2.1 Stejnoseměrný motor.....	15
2.2.2 Asynchronní motor	15
2.2.3 Synchronní motory s permanentními magnety (pmsm)	16
2.2.4 Použití elektrických motorů.....	21
2.3 Výkonová elektronika.....	22
2.3.1 Komponenty výkonové elektroniky	23
2.3.2 Ovlivnění efektivity použitím výkonové elektroniky.....	24
2.4 Převodovky pro elektromobily	26
2.4.1 Jednostupňové převodovky	27
2.4.2 Vícestupňové převodovky	28
2.4.3 Cvt převodovky	30
3 SOFTWARE PRO TVORBU VÝPOČETNÍHO MODELU.....	32
3.1 Matlab R2023b	32
3.2 Matlab simulink.....	32
3.3 Simscape.....	32
4 JÍZDNÍ MODEL.....	34
4.1 Struktura modelu	34
4.2 Jízdní simulace	38
4.2.1 Simulace při plné akceleraci.....	38
4.2.2 Simulace při pozvolné akceleraci	40
4.2.3 Simulace pozvolné akcelerace do kopce	41
4.3 Porovnání naměřených hodnot	42
Závěr	43
Použité informační zdroje.....	44
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	48

ÚVOD

V důsledku tlaku společnosti a vládních nařízení na snížení oxidu uhličitého a dalších výfukových plynů vypouštěných osobními dopravními prostředky se začal automobilový průmysl zaměřovat na hledání ekologičtějších pohonů vozidel. Dalším impulzem je také závislost evropských zemí na dodavatelích ropy. Právě kvůli nulovým lokálním emisím a využívání obnovitelných zdrojů elektrické energie používané k jejich pohonu se automobilky uchýlily k vysokým investicím a výzkumu v oblasti elektrických vozidel.

Hlavním rozdílem elektromobilu je, že pro pohon používají elektromotor namísto spalovacího motoru a tím jsou schopny dosahovat nulových lokálních emisí. Ačkoliv má elektrický pohon obecně lepší účinnost než spalovací motor, i tento typ pohonu v některých provozních bodech nepracuje zcela efektivně. Například při pomalé jízdě a velké zátěži. Východiskem pro zlepšení účinnosti v těchto režimech by mohlo být použití vícestupňové převodovky. Hlavními výhodami použití elektrického pohonu jsou vysoká efektivita pohonného traktu, velké pásmo využitelných otáček a nízká hladina hluku v kabině vozidla. Účinnost elektrického hnacího ústrojí může být až 96 %, a je tedy skoro trojnásobná v porovnání s účinností spalovacích motorů. Elektromobilita má však i své nevýhody. Hlavními nevýhodami jsou nižší dojezd v kombinaci se zdoluhavým dobíjením, nebo použití velkých a těžkých akumulátorů, které zvyšují hmotnost celého vozidla.

Tato práce se zabývá rešerší a zhodnocením vlivů převodových ústrojí na účinnost pohonů elektrických vozidel. Dále se zabývá myšlenkou, že jednostupňová převodovka nemusí být vždy dostačující pro různé jízdní cykly a je tedy uvažováno její nahrazení vícestupňovou převodovkou.

Cílem této bakalářské práce je vytvořit výpočetní model pro akcelerační cyklus, který umožňuje simulovat různé jízdní stavy. Pomocí tohoto modelu by bylo možné pozorovat zlepšení účinnosti pohonného traktu, pokud dojde k nahrazení jednostupňové převodovky vícestupňovou. Zmíněná převodovka by měla přinést zlepšení účinnosti pohonného traktu hlavně v nižších otáčkách při velkém zatížení, jelikož v tomto režimu elektromotor nevyniká nejlepší účinností. Tento režim vzniká např. při plném požadavku na moment ve velmi nízkých otáčkách nebo při jízdě do prudkého kopce v nízké rychlosti.

1 HISTORIE

Historie elektromobility sahá až do první poloviny 19. století, kdy začaly vznikat první prototypy elektrických vozidel. Za člověka, který sestrojil první elektromobil se považuje Holanďan Sibrandus Stratingh a jeho asistent Christopher Becker. Vozidlo vzniklo v roce 1835 což je o více než 50 let dříve než první vozidlo se spalovacím motorem. Zdrojem energie pro tento elektromobil byly jednorázové baterie, které se nedaly znovu nabít a po použití se musely vyhodit. První elektromobil je zobrazen na Obr. 1. [1]



Obr. 1 První elektromobil [1]

Druhým významným milníkem ve vývoji elektromobilů byl rok 1884, ve kterém Thomas Parker zkonstruoval první sériově vyráběný elektromobil. Koncem 19. stol. a počátkem 20. stol. elektromobily zažívaly největší posun ve vývoji a těšily se velké oblibě ve společnosti. Elektromobily byly natolik oblíbené, že každé třetí prodané vozidlo v USA bylo poháněno elektrickou energií. Nevýhodou těchto vozů byl nízký dojezd pohybující se okolo 60 kilometrů a nízká provozní rychlost, která byla zhruba 30 km/h. Toto období však netrvalo dlouho a s příchodem sériově vyráběného spalovacího vozidla model T od Henryho Forda, ve kterém bylo startování motoru klikou nahrazeno elektrickým startérem, byly elektromobily postupně vytlačeny z trhu. [1][2]

Dalším okamžikem, kdy se mohly elektromobily vrátit na výsluní byla doba na konci 60. a začátku 70. let. V těchto letech byla v USA ropná krize a automobilky se snažily vyrábět maloobjemové motory a také se začaly znovu zajímat o elektromobily. Jedním z elektromobilů, který vznikl v době ropné krize byl CitiCar vyroben Floridskou společností Sebring Vanguard. Toto vozidlo disponovalo výkonem 3 kW, dosahovalo rychlosti 56 km/h a dokázalo na jedno nabití ujet až 60 km. S koncem ropné krize byl vývoj těchto vozidel zastaven a automobilky se vrátili k výrobě vozů se spalovacím motorem. [1]

Na další vývoj elektrických vozů si lidstvo muselo počkat až do počátků 21. stol. V této době se svět začal prosazovat o snížení emisí z provozu osobních automobilů. Mezi průkopníky ve vývoji se řadí Toyota se svým hybridním modelem Prius a mezi automobilky produkující čisté elektromobily patří Tesla. [2]

2 ELEKTROMOBILITA

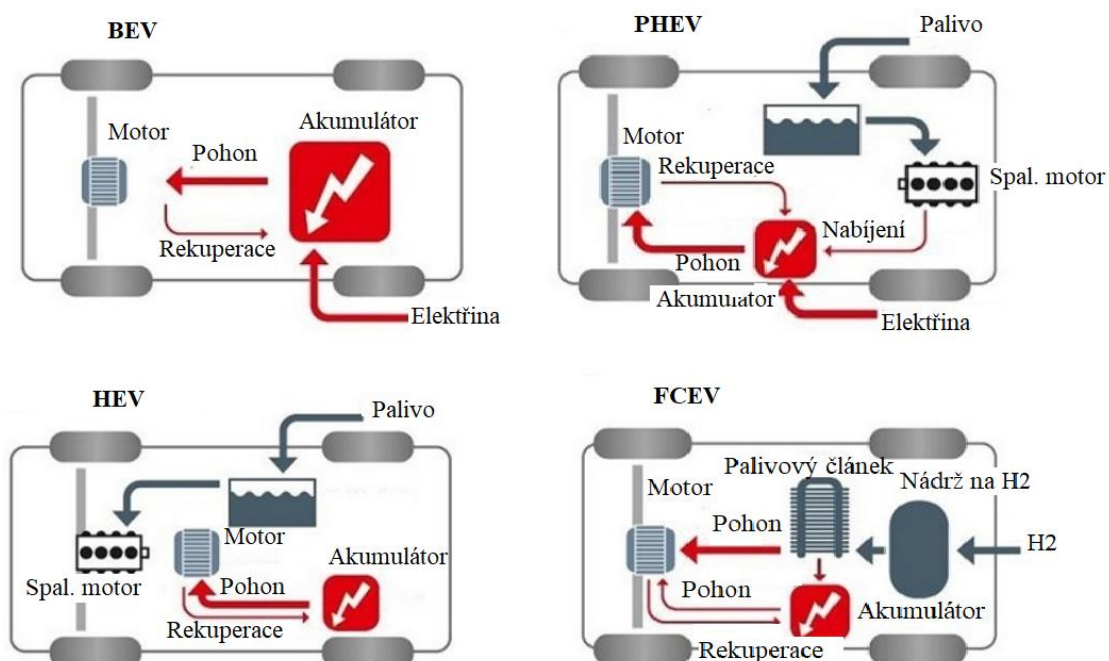
Elektromobily představují energeticky účinnější alternativu k doposud používaným vozidlům poháněným spalovacím motorem. Pro pohon využívají jeden nebo více elektromotorů. Ty se používají k přeměně elektrické energie uložené v bateriích na mechanickou energii, která zajišťuje pohyb vozidla. Velkou výhodou oproti spalovacím motorům může být možnost použití rekuperace pro zpomalení vozidla. Při zpomalování vozidla pomocí rekuperace se elektromotor používá jako generátor a tím nabíjí baterie. Dalšími výhodami elektromobilů jsou nižší náklady na provoz a na údržbu, tichá jízda nebo také nulové lokální emise. Nicméně se elektromobilita stále potýká s velkým problémem v podobě nedostatečné infrastruktury nabíjecích stanic a omezená dojezdová vzdálenost některých modelů elektromobilů. [3][4][5]

2.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ

Vozy, které pro svůj pohon používají elektrickou energii můžeme rozdělit do několika kategorií na základě konstrukce a zdroje energie použité pro jejich pohon. Architektura níže uvedených pohonů je popsána na Obr. 2. [3]

Elektromobily se řadí do 4 kategorií:

- Bateriový elektrický vůz (Battery electric vehicle – BEV)
- Plug-in hybrid (PHEV)
- Hybridní elektrický vůz (Hybrid electric vehicle – HEV)
- Elektrické vozidlo s palivovými články (Fuel cell vehicle – FCEV)



Obr. 2 Rozdělení elektromobilů [3]

2.1.1 BATERIOVÉ ELEKTRICKÉ VOZY (BEV)

Bateriové elektrické vozy, někdy označovány pouze zkratkou BEV, jsou plně elektrické a tím pádem nepoužívají pro pohon spalovací motor. Jsou poháněné jedním nebo více elektromotory a energii mají uschovanou v bateriích. Dříve se pro pohon používaly stejnosměrné motory, ale ty byly postupně vytlačeny motory střídavými. Baterie mají obvykle kapacitu 40-100 kWh, jsou nabíjeny ze sítě, případně rekuperací. V akumulátoru je uloženo stejnosměrné napětí. To se musí pomocí měniče přetransformovat na střídavé a poté se může použít pro napájení elektrického motoru. [3]

Vozidla spadající do kategorie BEV jsou např. Tesla model S, Škoda Enyaq, Volkswagen ID.3. [3]

2.1.2 PLUG IN HYBRID (PHEV)

Plug-in hybridní elektrické vozy kombinují pohon spalovacím motorem a elektromotorem, který může být na rozdíl od HEV nabíjen z externího zdroje, rekuperací, nebo i pomocí spalovacího motoru. Hlavní výhodou PHEV je schopnost ujet určitou vzdálenost čistě na elektrický pohon. Některé PHEV dokážou dojet až 100 km na čistě elektrický pohon. Kromě elektrického režimu mohou plug-in hybridní vozy fungovat také v hybridním režimu, ve kterém se automaticky kombinuje použití spalovacího motoru a elektromotoru tak, aby bylo dosaženo ideální účinnosti.[3]

Vozidla spadající do kategorie PHEV jsou např. Škoda Superb iV, Audi A3 E-Tron, BMW 330e. [3]

2.1.3 HYBRIDNÍ ELEKTRICKÉ VOZY (HEV)

Hybridní elektrické vozy, jinak nazývané paralelní hybridy používají pro pohon elektromotor i spalovací motor, které jsou zapojeny paralelně a mezi sebou propojené převodovkou. U tohoto typu hybridních vozů získává spalovací motor energii z paliva (benzinu nebo dieselu) a elektromotor je poháněn elektrickou energií z baterie. Akumulátor se na rozdíl od BEV nenabíjí ze sítě, ale je nabíjen pouze ze spalovacího motoru. Elektrický motor se nepoužívá k pohonu celého auta, ale využívá se pouze k výpomoci při větším zatížení spalovacího motoru, např. při akceleraci. [3]

Vozidla spadající do kategorie HEV jsou např. Toyota Prius nebo Honda Civic hybrid. [3]

2.1.4 VODÍKOVÉ ELEKTROMOBILY (FCEV)

Vodíkové elektromobily představují zcela odlišný způsob elektromobility, než známe z bateriových elektromobilů. Pro pohon využívají elektrické motory, které získávají energii z vodíku. Hlavním rysem vodíkových elektromobilů je použití palivového článku, který přemění kyslík a vodík na čistou energii bez tvorby emisí. Kombinují výhody elektromobilů s bateriemi s výhodami spalovacích motorů. Velkou výhodou oproti BEV je větší dojezd a rychlé tankování na vodíkových čerpacích stanicích.

Přestože vodíkové elektromobily nabízejí řadu výhod, stále čelí výzvám, které brání jejich masovému použití. Mezi ně patří například malá síť čerpacích vodíkových stanic, vysoká pořizovací cena nebo problémy spojené se skladováním stlačeného vodíku. [3][6]

Vozidla spadající do kategorie FCEV jsou např. Toyota Mirai nebo Hyundai Nexa. [3]

2.1.5 POROVNÁNÍ EFEKTIVITY RŮZNÝCH POHONŮ

Efektivita automobilů je klíčovým faktorem při posuzování jejich výkonu a environmentální udržitelnosti. Tab. 1 je zaměřena na porovnání účinnosti jednotlivých druhů pohonů dle účinnosti hnacího ústrojí a takzvané Well-To-Wheel účinnosti. Tato účinnost se označuje jako celková efektivita vozidla. Zaměřuje se na celý řetězec začínající získávání paliva, pokračující přes dodavatelský řetězec a pohonné ústrojí až na kola automobilu. [7]

Podle měření účinnosti z hlediska efektivity well-to-wheel nejlépe dopadly BEV a FCEV, a to s účinností dosahující 27 %. Za nimi následuje hybridní pohon s účinností 24 %. Nejhůře dopadlo benzinový spalovací motor, jehož účinnost byla pouhých 14 %. Všechna tato data jsou shrnuta v Tab. 1. [7]

Tab. 1 Porovnání efektivity [7]

Druh paliva	Účinnost hnacího ústrojí (%)	Účinnost well – to – wheel (%)
Benzinový spalovací motor	17	14
BEV	80	27
HEV	28	24
FCEV	45	27

2.2 ELEKTROMOTORY

Elektromotor je jedna z nejdůležitějších součástí v elektromobilu. Jedná se o točivý elektrický stroj, který se používá k přeměně elektrické energie uložené v bateriích na mechanickou energii. Může také pracovat jako generátor, tedy na opačném principu, kdy přeměňuje mechanickou energii na energii elektrickou a ukládá ji do baterií. Tento pracovní cyklus nazýváme generátorický režim. Většina elektromotorů fungují na principu vzájemného působení magnetického pole a elektrického proudu procházejícího cívkou, ze kterého získáme točivý moment přenášený na hnané zařízení. Magnetické pole je generované permanentními magnety, nebo elektromagnety, jejichž elektromagnetické pole je generováno elektrickým proudem. Mezi velkou výhodou oproti spalovacímu motoru lze zařadit např. schopnost dosažení maximálního točivého momentu již od nízkých otáček, nebo jednoduchou konstrukci. Elektromotory mají účinnostní charakteristiku velmi podobnou spalovacím motorům, ale mají větší rozsah použitelných otáček. Dle vykonávaného pohybu elektromotory dělíme na rotační a lineární, které se v elektromobilitě nepoužívají.

Rotační elektrické motory se vždy skládají z rotoru a statoru. Dělí se dle přiváděného proudu na stejnosměrné a střídavé. Střídavé můžeme dále rozdělit na synchronní a asynchronní. V elektromobilech se nejčastěji setkáváme se dvěma druhy elektromotorů. Jedná se o synchronní motor s permanentními magnety (PMSM) a asynchronní indukční motor.[8][9]

2.2.1 STEJNOSMĚRNÝ MOTOR

V dnešní době se již jedná o motor, který se v elektromobilech již nepoužívá. Dříve se v elektromobilech hojně využíval hlavně díky snadné regulaci. Stejnosměrné motory jsou v elektromobilitě postupně nahrazeny střídavými motory, které jsou efektivnější, konstrukčně jednodušší a mají lepší spolehlivost. Horší spolehlivost stejnosměrných motorů je způsobena použitím komutátoru. Další nevýhodou je dosahování nižších otáček oproti střídavým motorům také způsobené použitím komutátoru. Stejnosměrné motory byly využívány například v českém elektromobilu Škoda Eltra 151L.[10]

Jedná se o točivý stroj poháněný stejnosměrným proudem. Skládá se ze tří hlavních částí. Těmi jsou: rotor, stator a komutátor. Rotor je součástí motoru, která se otáčí důsledkem točivého momentu vytvářeného motorem. Je konstruován z vrstvených ocelových plechů, což pomáhá minimalizovat energetické ztráty vyvolané rotujícím magnetickým polem. V drážkách ocelových plechů je vinutí, které je připojené na komutátor. Stator je statická část motoru. Jsou v něm použity buď elektromagnety nebo permanentní magnety, které vytváří v motoru magnetické pole. Komutátor je zodpovědný za změnu polaritu každé půl otáčky. Díky komutátoru je motor schopný se otáčet jedním směrem. Je vyroben z měděných destiček připevněných na hřídel, se kterou se otáčejí. Motory se dále dělí na kartáčové a bezkartáčové. Motor funguje na principu indukce. Stejně póly se odpuzují a opačné póly se přitahují, čímž vznikne točivý moment.[11]

2.2.2 ASYNCHRONNÍ MOTOR

Asynchronní motor je napájen střídavým proudem. Energický tok mezi rotorem a statorem se přenáší pouze pomocí elektromagnetické indukce. Proto se někdy můžeme setkat s názvem indukční motor. V automobilovém průmyslu je využíván díky jednoduché a odolné konstrukci, nízké ceně a dobré spolehlivosti. Svůj název získal od způsobu funkce. Rychlost otáčení rotoru asynchronního motoru může být rozdílná od rychlosti otáčení magnetického pole. To znamená, že rychlost je asynchronní. Hlavní nevýhoda oproti synchronnímu motoru je tepelná ztráta na rotoru způsobená indukčním proudem. [12] [13]

Asynchronní motor se je složen z dvou hlavních součástí. Rotující součást se nazývá rotor a statická součást je nazývána stator. Mezi rotorem a statorem je malá vzduchová mezera, která společně s rotorem a statorem uzavírá magnetický tok v motoru. Rotor i stator je složen z nalisovaných jednostranně izolovaných plechů, ve kterých jsou drážky. V drážkách je uloženo vinutí stroje. Existují dva hlavní typy vinutí používaných v asynchronních motorech: jednofázové nebo třífázové. Nejčastěji se však používá třífázové vinutí. Rotory výkonnějších motorů jsou tvořeny neizolovanými mosaznými nebo měděnými vodiči, které jsou spojeny nakrátko zkratovacími kroužky. Tyto rotorové vinutí se nazývají klec. [12] [13]

Základním principem činnosti je vytváření pohybu prostřednictvím magnetického pole. Když se motor připojí ke zdroji střídavého napětí, elektrický proud procházející státorem začne vytvářet točivé magnetické pole. Točivý moment asynchronního motoru je přímo úměrný rozdílu otáček mezi rotorem a státorem, který nazýváme skluzové otáčky. Ty jsou nezbytné pro vytvoření indukovaného proudu v rotoru. Běžné skluzové otáčky asynchronního motoru se pohybují okolo 3 % až 8 % jeho jmenovitých otáček. [12] [13]

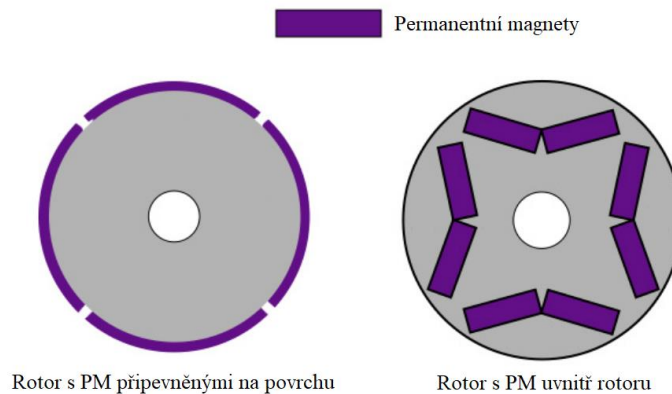
Na Obr. 3 se nachází asynchronní indukční motor s klecí. Zajímavostí je, že vinutí statoru je již složené z moderních plochých drátů ve tvaru sponky do vlasů.



Obr. 3 - Indukční motor [14]

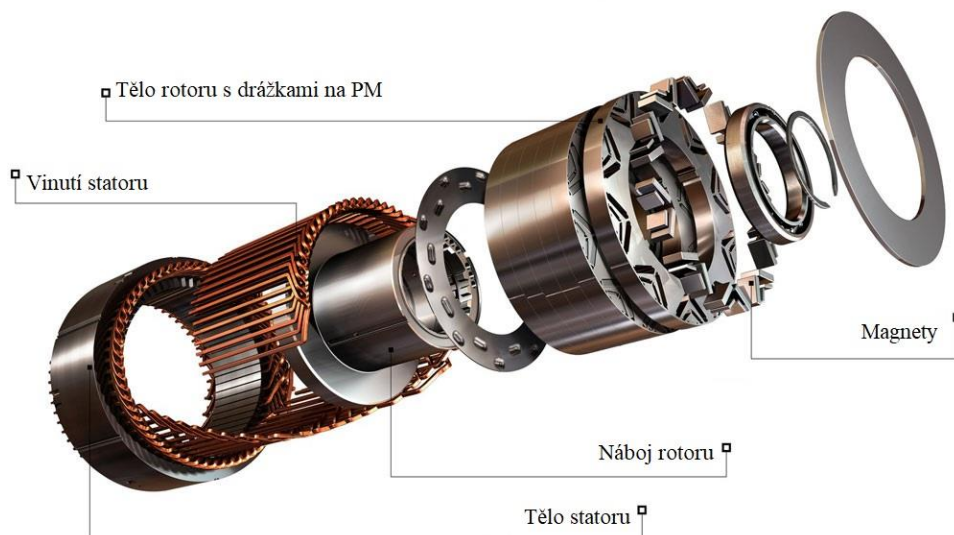
2.2.3 SYNCHRONNÍ MOTORY S PERMANENTNÍMI MAGNETY (PMSM)

V posledních letech se synchronní motory na principu permanentních magnetů staly velmi populárními a více než konkurenceschopné v porovnání s asynchronními motory. Stejně jako asynchronní motor se skládá z rotoru a statoru, na který je přiváděn střídavý proud. Využívá jednoho nebo více párů pólů permanentních magnetů uložených v rotoru k vytvoření magnetického pole. Jednou z výhod použití rotor s více páry magnetických pólů je, že motor pracuje na vyšší elektrické frekvenci pro danou mechanickou rychlost a díky tomu se dá zmenšit velikost a tím pádem i hmotnost motoru. Díky permanentním magnetům není potřeba přítomnost budícího proudu. Z konstrukčního hlediska se dají PMSM rozdělit na dva druhy. První typ má permanentní magnety připevněné na povrchu. Tyto motory se nejvíce využívají pro nízko rychlostní elektrická vozidla. Druhý způsob konstrukce má permanentní magnety uložené uvnitř rotoru. Motory s PM uloženými uvnitř rotoru jsou široce používány pro vysoko rychlostní automobilové pohony. Druhy konstrukce rotoru jsou vyobrazeny na Obr. 4.



Obr. 4 Konstrukce statorů [16]

Synchronní motor s permanentními magnety (IPM) uloženými v rotoru (viz. Obr. 5) je zařízení, které se ve velké míře využívá v automobilovém průmyslu. Točivý moment v IPM je generován dvěma mechanismy: 1) Vzájemným působením mezi tokem permanentních magnetů a dodávaným proudem, čímž vzniká magnetický moment, a 2) interakcí mezi dodávanými proudy a železným materiálem, čímž vzniká reluktanční moment. Stator IPM je napájen vyváženým třífázovým napětím a proudem, jehož výsledkem je rotující magnetické pole. Statorové tělo je poskládáno z plíšků vyrobených z feromagnetických materiálů. Třífázový střídavý motor má tři identická, ale oddělená vinutí, která jsou namotána v drážkách na statoru. Třífázové vinutí je vytvořené tak, že jsou jednotlivé fáze posunuty o 120° . [7][14]



Obr. 5 Synchronní motor s permanentními magnety [15]

Pro dosažení nejlepší teoretické účinnosti se využívá koncepce, ve které musí být synchronní motor s permanentními magnety vpředu i vzadu. Motor umístěný vzadu je výhodnější pro akceleraci, protože je při ní hmotnost vozidla přenášena dozadu, čímž se zvyšuje tlak na zadní pneumatiky a zvyšuje se tak jejich přilnavost. Na druhou stranu umístění motoru vpředu je výhodnější pro rekuperaci, jelikož se při zpomalování přesouvá hmotnost vozidla dopředu, což

více zatěžuje přední nápravu a dosahujeme efektivnější rekuperace. Tého koncepte využívá například automobilka Porsche u svého modelu Taycan nebo Jaguar u modelu I-Pace. Bohužel se jedná o nejdražší řešení a v praxi se u levnějších vozů využívá pouze jednoho elektromotoru nebo kombinace synchronního a levnějšího asynchronního motoru. I přes fakt, že se v tuto chvíli jedná o nejpoužívanější typ elektromotorů, má stále řadu nevýhod. Mezi hlavní nevýhodu patří vysoká cena oproti asynchronnímu motoru. Vysoká cena je způsobena hlavně použitím magnetů vyrobených z neodym-železo-borové slitiny. Tato slitina je používána hlavně pro svoji dobrou hustotu magnetického toku. [17]

2.2.3.1 VINUTÍ STATORU

V moderních elektromotorech byly smaltované válcové dráty nahrazeny plochými dráty ve tvaru sponky na vlasy. Tyto dráty jsou i v českých literaturách častěji označovány jejich anglickým názvem hairpins.

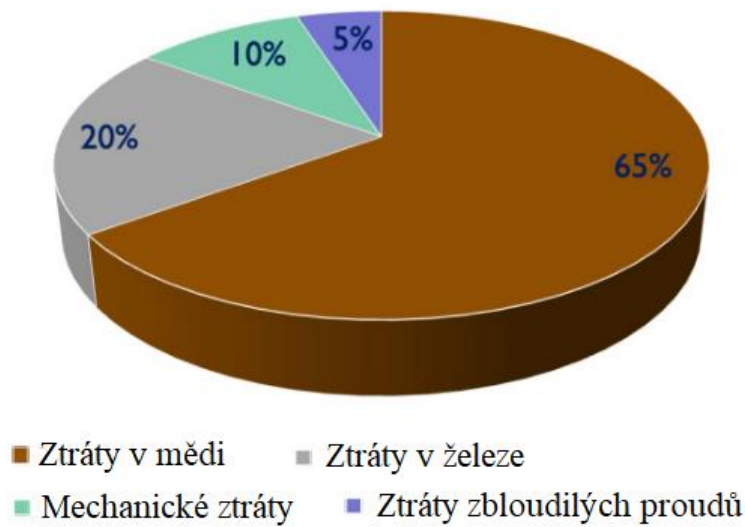
Oproti dříve používaným válcovým drátům dosahují hairpins větší měrný výkon, který je způsobený lepším vyplněním drážky. V porovnání s klasickými válcovými dráty dosahují ploché dráty o 20-30% lepší vyplnění drážky. Přesněji řečeno válcové dráty dosahují kolem 40% vyplnění drážky, zatímco ploché dráty mohou dosáhnout až 70 %. Porovnání vyplnění drážky a tvar plochých drátů je vidět na Obr. 6. Vyšší faktor vyplnění drážky znamená, že při zachování stejné velikosti motoru může dosahovat vyššího výkonu a točivého momentu, nebo naopak při zachování stejného výkonu a točivého momentu může mít motor menší velikost. Hairpins dosahují lepšího odvodu tepla z vinutí, kvůli těsnějšímu kontaktu plochých drátů oproti válcovým. Toto řešení dokáže snížit růst teploty ve vinutí až o 10 %. V důsledku zlepšení odvodu tepla motor dosáhne lepší efektivity a výkonu. [21]



Obr. 6 - Různá vinutí statoru [22]

2.2.3.2 ÚČINNOST PMSM

Vzhledem k mohutnému rozšiřování elektromobility a s tím i extrémnímu zvýšení potřebné elektrické energie k jejich provozu se začíná dbát na zvyšování účinnosti elektrických motorů a s tím spojenou úsporu elektrické energie, nebo naopak zvýšení výkonu motoru při zachování spotřeby elektřiny. Zjednodušeně se dá říct, že čím je motor větší, tím větší by měly být i ztráty. Obecně se ztráty v PMSM dají rozdělit na ztráty v mědi, v železe, mechanické ztráty a ztráty na zbloudilé magnetické energii. Na Obr. 7 je procentuální rozdělení ztrát působících na PMSM.



Obr. 7 Procentuální přehled ztrát elektromotoru [21]

Nižší efektivita ve vysokých otáčkách je způsobena zpětným elektromotorickým napětím (BEMF). Tento jev je způsoben faktem, že jak motor, tak i generátor pracují na stejném principu. Když je elektromotor roztočen, funguje zároveň jako motor i generátor. To znamená, že čím více proudu do motoru pošleme, tím rychleji se bude točit, ale tím vyšší napětí bude generovat v opačném směru. Kdybychom tedy chtěli vypočítat pracovní napětí, museli bychom od vstupního napětí odečíst napětí od BEMF. Například kdyby měl motor vstupní napětí 120 V a BEMF by generovalo 100 V, tak by pracovní napětí bylo pouze 20 V. [19]

Ztráty v mědi (Copper loss) jsou spojeny s odporovým ohřevem a jsou důsledkem průchodu elektrického proudu měděnými vodiči v motoru. Vzhledem k odporovému ohřevu musí být statoru zajištěno dostatečné chlazení, jelikož s rostoucí teplotou statoru roste i odpor a klesá účinnost. U moderních motorů jsou válcové smaltované dráty nahrazeny plochými dráty ve tvaru sponky na vlasy (tzv. hairpins) a ty také snižují tyto ztráty. Jak je vidět na Obr. 7 ztráty v mědi jsou nejvýznamnější a dosahují až 65 % veškerých ztrát v elektromotoru. [20]

Ztráty v mědi pro stator se dají vypočítat pomocí následujících vztahů: [24]

$$R = \frac{L}{\sigma \cdot S} \quad [\Omega] \quad (1)$$

kde	R	Odpor jedné fáze statoru
	L	Délka vodiče
	σ	Vodivost
	S	Průřez vodiče

Ze vztahu (1) se dá odvodit, že by se odpor dal snížit zkrácením vodiče, což není vhodné řešení. Dále by se odpor dal snížit použitím materiálu s vyšší vodivostí. Jednalo by se o supravodivé materiály, které však budou velmi drahé a pro toto řešení velmi neekonomické.

Z vypočteného odporu se dále vypočítají ztráty v mědi:

$$\Delta P_N = m \cdot R \cdot I^2 \quad [\text{W}] \quad (2)$$

kde	ΔP_N	Ztráty v mědi
	m	Počet fází statoru
	R	Odpor jedné fáze statoru
	I	Proud statorem

Ztráty na železe (Iron loss) se dají rozdělit na ztráty hysterezní, ztráty vířivých proudů a přídavné ztráty. Ztráty na železe se tedy dají vypočítat jako součet těchto tří ztrát a dosahují kolem 20 % celkových ztrát v elektromotoru. Tyto ztráty jsou udávány na hmotnost a závisí na frekvenci a maximální hustotě magnetického toku. To znamená, že čím rychleji se motor otáčí, tím vyšší jsou ztráty na železe. A čím menší je motor, tím méně místa zůstává pro magnetický tok a magnetický tok se stává vyšším. Ztráty v železe se převážně objevují na rotoru a statoru, ale ztráty z vířivých proudů se mohou vyskytovat i v permanentních magnetech. Ztráty v permanentních magnetech jsou sice malé, ale vzhledem ke špatné odolnosti magnetů proti teplotě mohou být kritické. [20]

Hysterezní ztráty vznikají v magnetickém materiálu, který je rozdělen na malé segmenty, které mají každý jinou magnetickou orientaci. Když dojde ke změně magnetické orientace těchto segmentů, vznikají hysterezní ztráty. Aby se těmto ztrátám zabránilo, používají se magneticky měkké materiály, jako jsou například železo-křemíkové plechy s malou křivkou hystereze. [20]

Vířivé proudy vznikají při změně magnetického toku ve statoru. Díky vířivým proudům ve statoru vznikají ztráty a zahřívají ho. Aby se těmto ztrátám zabránilo, je stator rozdělen pomocí tzv. lamelování, při kterém jsou plechy od sebe izolovány. Čím jsou tyto plechy užší, tím menší jsou ztráty vířivých proudů. [20]

Magnetické materiály se skládají ze segmentů, které jsou odděleny přepážkou. Změna v magnetickém poli může způsobit dislokaci těchto přepážek, a to vede k vzniku ztrát. Tyto ztráty se nazývají přídavné ztráty. [20]

Ztráty zbloudilých proudů se definují jako rozdíl vypočítaných ztrát a skutečných ztrát. Ztráty se dají těžce odhadnout, jelikož mohou vznikat z různých zdrojů. Těmi mohou být výrobní odchylky, nedokonalosti materiálů a tolerance návrhů. Tyto ztráty jsou v porovnání se ztrátami v železe nebo v mědi velmi malé. Běžně se pohybují okolo 1 %, ale také mohou dosáhnout až 5 %. [23]

Mechanické ztráty se na rozdíl od elektromagnetických ztrát, které se dají vypočítat podle materiálových vlastností, nedají tak snadno předpovědět, jelikož závisí na prostředí, ve kterém pracují. Mechanické ztráty se dělí na ztráty způsobené třením a ventilační ztráty. Tyto ztráty vznikají při rotaci motoru a jeho interakci s okolím. Velikost ztrát způsobených třením závisí na rychlosti rotace a vznikají například v ložiskách (kluzných nebo valivých) a jiných mechanických kontaktech. Aby byly třecí ztráty co nejnižší, musí být zvolena správná ložiska a být co nejlépe mazána. Ložiska se také nesmím přehřát, jinak mazivo začne ztrácet své mazací schopnosti a třecí ztráty se budou zvyšovat. Ventilační ztráty jsou způsobeny vzduchem proudícím mezi rotorem a státorem. Čím je rychlost zařízení větší, tím ztráty rostou a přispívají k nižší efektivitě stroje. Ztráty jsou funkcí otáček hřídele a vlastností plynu, jako je teplota, tlak, hustota, teplotní gradient na stěnách rotoru a statoru. [20] [24]

Ventilační ztráty se dají vypočítat pomocí následujícího vztahu: [24]

$$\Delta W = C_D \cdot \pi \cdot \rho \cdot \omega^3 \cdot r^4 \cdot \lambda \quad (3)$$

kde	ΔW	Ventilační ztráty
	C_D	Koeficient tření
	ρ	Hustota vzduchu
	ω	Úhlová rychlost
	r	Průměr rotoru
	λ	Délka rotoru

2.2.4 POUŽITÍ ELEKTRICKÝCH MOTORŮ

V níže uvedené Tab. 2 jsou přiřazeny elektromobily k elektromotorům, které používají pro svůj pohon. Nejzajímavější je např. Audi E-tron a E-tron GT, který každý používají pro pohon jiný elektromotor, nebo Škoda Enyaq která používá synchronní i asynchronní motor zároveň.

Použití asynchronního motoru vpředu a synchronního motoru vzadu u Škody Enyaq, nebo některé z výkonových variant Tesly model S je provedeno z důvodu zvýšení efektivity celého systému. Synchronní motor na zadní nápravě je využíván primárně pro pohon. Důvodem pro jeho použití je hlavně lepší efektivita oproti asynchronnímu a také se dá lépe řídit díky absenci skluzu. Asynchronní motor na přední nápravě je většinu času vypnutý a spíná pouze pokud vůz potřebuje vyšší výkon třeba pro akceleraci a pro vyšší výkon rekuperace, nebo je zapotřebí využít pohon všech kol. Hlavní výhodou použití asynchronního motoru oproti synchronnímu je nulová spotřeba, když je motor vypnutý. Další výhodou použití asynchronního motoru jako druhotný pohon je jeho pořizovací cena oproti motoru synchronnímu. [18]

Použití různých typů motorů zajišťujících pohon modelů Audi je způsobeno tím, že každý model je určený pro jinou cílovou skupinu. Modely Audi e-tron využívají asynchronní motor hlavně kvůli nižším nákladům na výrobu motoru a jednodušší konstrukci. Tyto výhody jsou však vykoupeny menší účinností a horší kontrolou motoru způsobenou skluzem asynchronního motoru. Synchronní motor s permanentními magnety byl v modelu Audi e-tron GT byl zvolen hlavně kvůli požadavku automobilky na výkon, jelikož se jedná o sportovní model. Tento motor v porovnání s asynchronním motorem dosahuje lepší účinnosti, většího rozsahu otáček, nižší hmotnosti a rozměru motoru. Na druhou stranu má tento motor vyšší pořizovací cenu způsobenou permanentními magnety vyrobenými z vzácných kovů a také má složitější konstrukci.

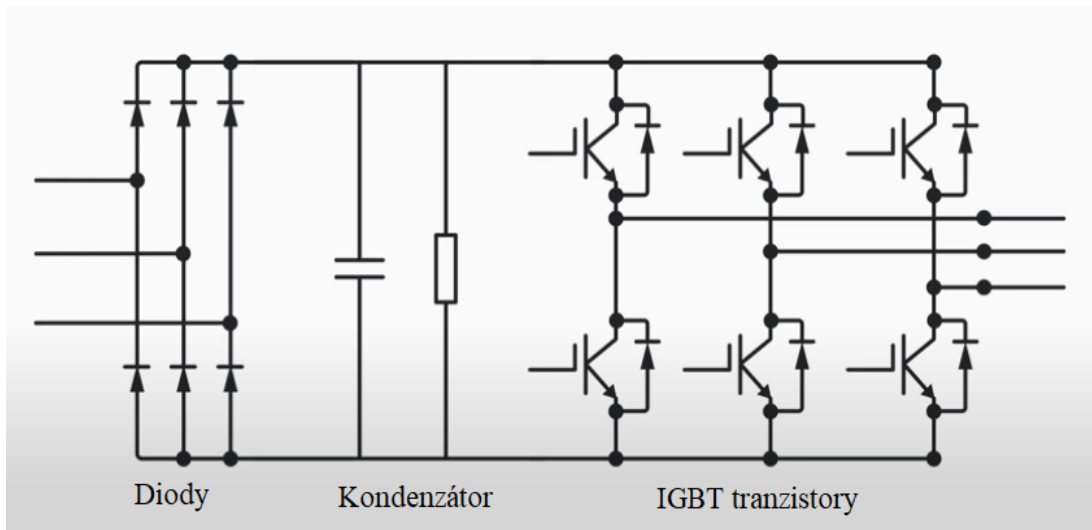
Tab. 2 Použití elektromotorů v elektromobilech [17]

<p>Synchronní s permanentním magnetem Modely koncernu Volkswagen na platformě MEB (zadní elektromotor), Audi e-tron GT, Ford Mustang Mach-e, Jaguar I-Pace, elektromobily koncernu Hyundai-Kia, Rimac C_Two, Porsche Taycan, Škoda Citigo^e iV, Škoda Octavia iV, Toyota RAV4 Plug-in Hybrid,</p>
<p>Asynchronní Audi e-tron, Mercedes-Benz EQC, Tesla Model S, Mercedes-Benz EQA, Renault Twizy</p>
<p>Asynchronní vpředu/synchronní vzadu Škoda Enyaq iV ve verzi s pohonem všech kol, Mercedes-Benz EQA 4MATIC, Tesla model S</p>
<p>Stejnoseměrný motor Nissan Leaf, BMW i3</p>

2.3 VÝKONOVÁ ELEKTRONIKA

Použití dílčích komponentů výkonové elektroniky v elektrických vozech má důležitou úlohu, jako je například tok energie mezi bateriemi a elektromotorem, převod stejnosměrného proudu na proud střídavý nebo regulace rychlosti a momentu elektromotoru. Jelikož se měnič stará o řízení elektromotoru, tak se správným řízením může zlepšit jeho efektivita. Měníče umožňují přeměnu elektrické energie pomocí periodického přepínání zdroje energie dovnitř a ven z elektrického obvodu. Polovodičové součástky používané ve výkonové elektronice jsou tranzistory, tyristory a diody. Současná výkonová elektronika však požadovala větší spektrum použitelných parametrů, a tak postupným vývojem vznikly nejčastěji používané bipolární tranzistor s izolovanou řídicí elektrodou (IGBT) a tyristor řízený integrovanou řídicí elektrodou (IGCT). Potřeba udržení spolehlivosti zařízení zvládat vysoký výkon při udržení vysoké spolehlivosti vedla k nahrazení tradiční křemíkové elektroniky novými materiály. Tyto nové materiály, mezi které patří nitrid galia nebo karbid křemíku poskytují vyšší dodávku energie, lepší spolehlivost a snížení velikosti a hmotnosti. Součástky musí být dostatečně chlazeny pro zachování spolehlivosti a účinnosti. [25]

Zapojení na Obr. 8 se skládá z diod, kondenzátorů a IGBT tranzistorů. Diody zajišťují přeměnu ze střídavého proudu na stejnosměrný a kondenzátor filtruje jejich signál. Diody a kondenzátor se v obvodu nacházejí pouze v případě, že je výkonová elektronika napájena AC proudem. V případě, že je pro napájení použit pouze DC proud z baterie, není ho nadále potřeba usměrňovat a diody s kondenzátorem nemusejí v obvodu být a poté bude obvod složen pouze z IGBT tranzistorů. Zmíněné IGBT tranzistory pracují jako přepínač, který v sobě nemá žádné pohyblivé části a je spínán elektricky. Pokud jsou zapnuté, může přes ně elektrina proudit. Pokud jsou vypnuté, proudění se zastaví. Mají schopnost je zapnout a vypnout několik tisíckrát za sekundu. Na Obr. 8 jsou IGBT tranzistory zapojené do dvou řad. Horní řada reprezentuje kladný proud a dolní řada záporný proud. Řízením rychlosti a sekvence přepínání IGBT můžeme ovládat frekvenci výstupního proudu. Zvyšujícími otáčkami motoru se zrychluje přepínání IGBT a tím dochází k jeho zahřívání. V důsledku špatného chlazení a zvýšení teploty může klesnout účinnost měniče. [26]



Obr. 8 - IGBT zapojení [26]

2.3.1 KOMPONENTY VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

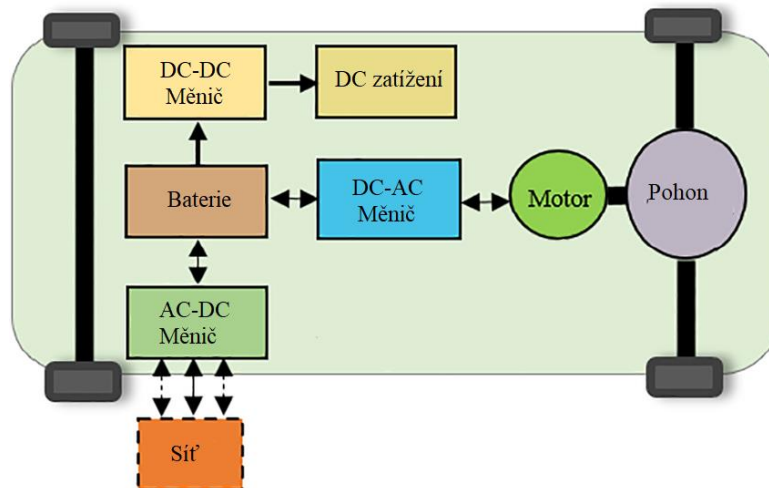
V elektromobilech jsou obvykle využívány tyto 3 druhy měničů

DC/DC měnič

AC/DC měnič – usměrňovač

DC/AC měnič – invertor

Všechny tyto druhy výkonové elektroniky a jejich zapojení ve vozidle jsou na Obr. 9.



Obr. 9 - Použití výkonové elektroniky ve vozidle [30]

DC/DC měnič hraje v řízení napájení elektrického vozidla klíčovou roli. Jeho hlavní funkce je převod stejnosměrného proudu z jedné úrovně na druhou, čímž zajistí stabilní a efektivní dodávku energie různým zařízením a systémům. V aplikacích, kde může napájecí napětí kolísat v důsledku postupného vybíjení baterie nebo změny zatěžení, udržují konstantní výstupní napájení. Důležitou výhodou DC/DC měniče je jejich vysoká účinnost při převodu energie. Pomocí spínacích technik dokáží minimalizovat ztráty spojené s odporovými prvky (transformátory, lineární regulátory), které generují teplo a tím ztrácejí energii. Toto vede k celkové lepší účinnosti baterie. [27]

AC/DC měnič je elektrické zařízení, které přeměňuje střídavý proud na stejnosměrný. Při použití v elektrickém vozidle hraje klíčovou roli při procesu nabíjení. Když vozidlo připojíme do nabíjecí stanice, tak je z ní odebírán střídavý proud, ale v akumulátoru je uložen proud stejnosměrný. Proto se využije AC/DC měnič, který AC proud přemění na DC proud a poté se může uložit do baterií. Účinnost a výkon měniče jsou klíčové, jelikož přímo ovlivňují rychlost nabíjení. Také se používá při rekuperaci, při té elektromotor produkuje střídavý proud a ten se musí přeměnit na stejnosměrný, aby se mohl uložit do baterií. [28]

DC/AC měnič přeměňuje vstupní stejnosměrné napětí uložené v bateriích na výstupní střídavé napětí pro pohon elektromotoru. V motoru poháněném střídavým proudem musí být každá fáze proudu ve správný okamžik změnit směr toku z kladného na záporný v závislosti na otáčení motorové hřídele a požadovaného točivého momentu. Čím větší má motor otáčky, tím častěji probíhá změna frekvence nebo směru toku. Tuto proměnlivou frekvenci změny směru proudu řídí trakční střídač. Jeho hlavní úlohou je zajištění správného proudu a směru toku v jakýkoliv okamžik, čehož je dosaženo neustálým monitorováním úhlu natočení hřídele a dopočítávání potřebného proudu pro získání požadovaného výkonu. Důležitost trakčního střídače spočívá v získání optimálního výkonu a efektivity v elektrických a hybridních vozidlech. [29]

2.3.2 OVLIVNĚNÍ EFEKTIVITY POUŽITÍM VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

Výkonová elektronika hraje klíčovou roli ve zlepšení efektivity elektrických vozidel. Řídí napětí a proud dodávaný do motoru, aby bylo dosaženo optimálních účinností při různých rychlostech a zatíženích. Dohlíží na teplotní řízení, které je nezbytné pro udržení efektivity a

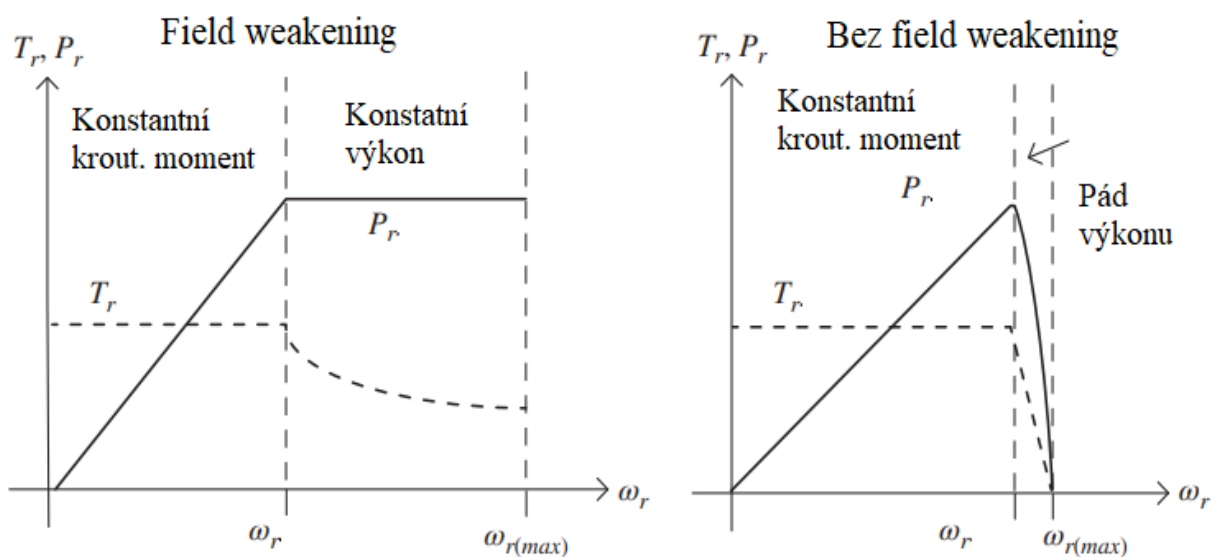
spolehlivosti systému. DC/AC invertor používaný pro trakční motory také nabízí pracovní režim zvaný odbuzování. Ale v české i zahraniční literatuře se spíše setkáváme s názvem field weakening. [7]

2.3.2.1 FIELD WEAKENING

Field weakening je technika ovládání motoru, která umožňuje produkovat širší rozsah použitelných otáček – konstantním točivým momentem při nižších otáčkách a téměř konstantním výkonem při vyšších otáčkách. Tato technika zvyšuje výkonové spektrum motoru a zároveň zlepšuje účinnost v pracovní oblasti motoru. [31]

Při otáčení motoru vzniká zpětná elektromotorická síla (BEMF). Maximální rychlost motoru je závislá na schopnosti vnesení proudu do vinutí statoru. S rostoucími otáčkami motoru roste i BEMF, které by eventuelně mohlo překročit napájecí napětí motoru. Pomocí odbuzování elektromagnetického pole se BEMF snižuje a tím umožňuje provozovat motor ve vyšších otáčkách. V důsledku odbuzování se otáčky motoru mohou až zdvojnásobit. [31]

Na Obr. 10 je vidět důležitost použití field weakening. Pole konstantního točivého momentu je sice stejně velké, ale poté dojde k pádu výkonu způsobeného BEMF.

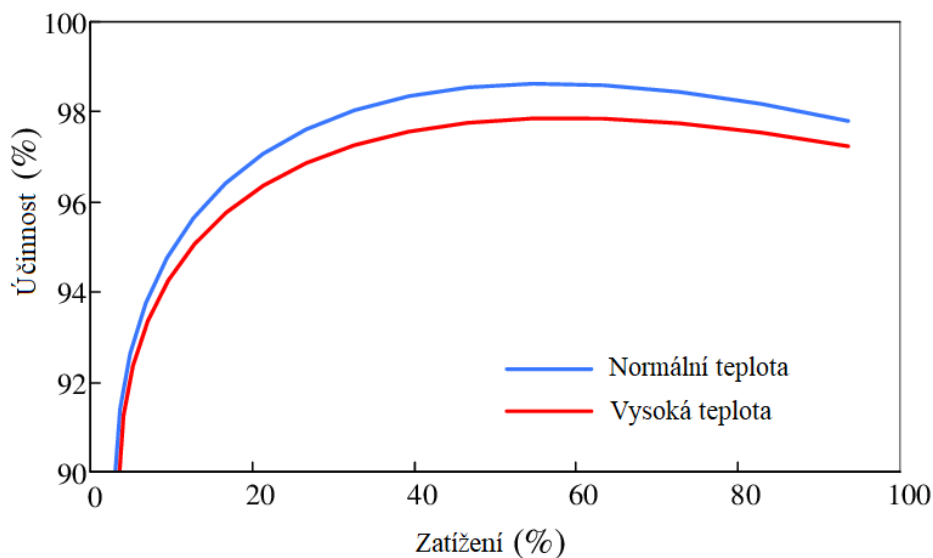


Obr. 10 - Field weakening [7]

2.3.2.2 ZTRÁTY IGBT TRANZISTORŮ

Ztráty v IGBT tranzistorech se dělí na spínací ztráty a vodivostní ztráty. Jak už bylo zmíněno v odstavci 222.3, IGBT tranzistory fungují jako spínač. Tím, že se tento přepínač dokáže několikrát za sekundu vypnout a zapnout, začnou v něm vznikat spínací ztráty. Ztráty při zapnutí vznikají při přechodu IGBT z vypnutého stavu do zapnutého stavu, a to především kvůli

energii potřebné k aktivaci zařízení. Naopak ztráty při vypínání vznikají při přechodu ze zapnutého stavu do stavu vypnutého a jsou způsobeny hlavně potřebnou energií pro zotavení diody, která je paralelně připojena k IGBT. K vodivostním ztrátám v IGBT dochází, když je zařízení v zapnutém stavu, a ty závisí především na úbytku napětí na zařízení a na proudu, který jím protéká. Oba tyto druhy ztrát jsou závislé na teplotě, a jejím růstem se hodnoty jejich ztrát zvyšují. Aby se spínací ztráty redukovaly, je klíčové zajistit měnič efektivní chlazení. Z Obr. 11 je zřetelné, že s rostoucí teplotou klesá účinnost IGBT tranzistorů. [7]



Obr. 11 - Závislost účinnosti IGBT na teplotě [44]

2.4 PŘEVODOVKY PRO ELEKTROMOBILY

Aby mohl spalovací motor pracovat v efektivním pásmu otáček, které má oproti elektromobilu omezený rozsah, musí být propojený s vícešupňovou převodovkou. Toto se však netýká elektrických motorů, které poskytují maximální točivý moment už od nulových otáček a jejich pásmo otáček je také vyšší. Ačkoliv je provozní rozsah elektromotoru velký, při určitých provozních režimech, jako je např. velký požadavek na točivý moment při nízkých otáčkách, elektromotory ztrácejí účinnost. Vzhledem k limitované kapacitě zásob elektrické energie na palubě elektrického vozidla je každé zvýšení efektivity i o jedno procento velmi důležité. Proto se automobilky začaly věnovat i vývoji vícešupňových převodovek, aby dosáhly lepší efektivity. Použití vícešupňové převodovky má také své nevýhody. Toto zařízení je těžší a konstrukčně složitější. Zároveň ani elektromobily nepotřebují převodovku pro zařazení zpátečky. V důsledku použití výkonové elektroniky, nemusí převodovka obsahovat převod pro zpětný chod a pouze se dojde k otočení směru otáčení motoru.

Převodovky se dělí na:

Jednostupňové převodovky

Vícešupňové převodovky

CVT převodovky

2.4.1 JEDNOSTUPŇOVÉ PŘEVODOVKY

Ve srovnání se spalovacími motory, které musí točivý moment vytvářet v průběhu času, elektromobily okamžitě produkují maximální množství točivého momentu v širokém rozsahu otáček. Elektromotor je schopen rozdělovat výkon přímo na kola, čímž odpadá potřeba vícerychlostních převodovek a doprovodného řazení. Proto většina výrobců elektrických vozidel používají jednostupňové převodovky. Tyto převodovky nejčastěji mívají převodový poměr kolem 7-10:1. Jedná se o převod do pomala. To v praxi znamená, že 7 otáček elektromotoru je rovno jedné otáčce kola. Hlavní výhodou použití jednostupňové převodovky je jednoduchost konstrukce, čímž se snižují náklady na údržbu vozidla. Další výhodou je nižší hluk způsobený třením a s tím i spojené třecí ztráty. Dále je jednostupňová převodovka lehčí a spolehlivější oproti vícešupňovým. [38]

Jednostupňové převodovky využívá například automobilka Tesla. Konkrétněji Tesla model 3 využívá jednostupňovou převodovku s převodovým poměrem 9:1, která je napevno spojena s motorem bez jakékoliv spojky. Díky jednostupňové převodovce sice dosáhne zjednodušení konstrukce oproti vícešupňovým, ale v dálničních rychlostech bude mít nižší výkon a horší efektivitu, na kterou se váže jak spotřeba, tak i dojezd vozidla. [18]

Dalším řešením je použití dvou motorů. Jeden motor uložený na zadní nápravě a druhý na přední. Každý motor je propojený s jednostupňovou převodovkou s různými převodovými poměry. Tento typ konstrukce používá automobilka Tesla u Modelu X. Ten má na přední nápravě elektromotor propojený s jednostupňovou převodovkou, která má převodový poměr 7.56:1. Elektromotor na zadní nápravě má převodový poměr 9.04:1. [33]

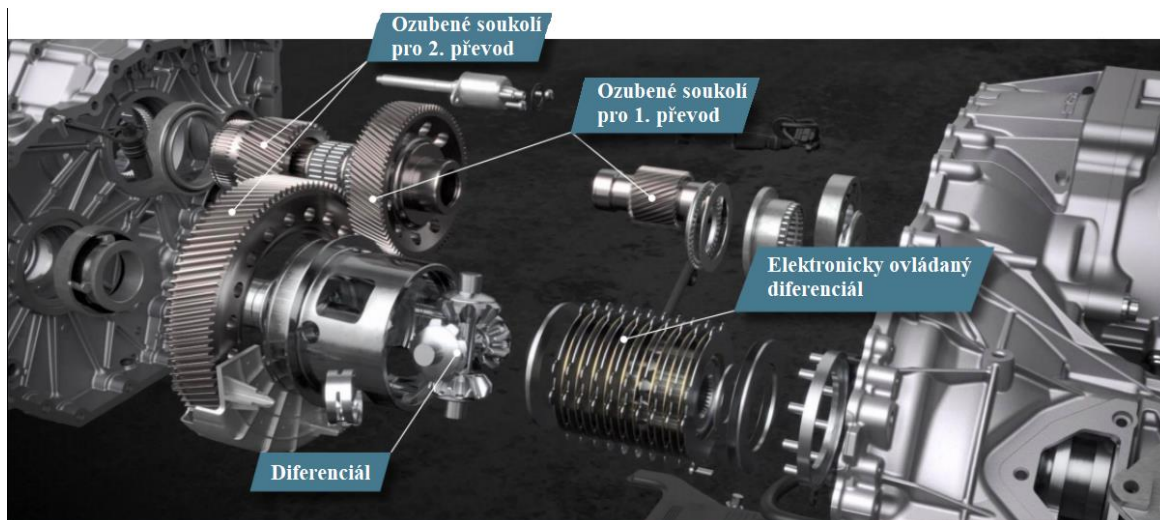
Na Obr. 12 je převodovka používaná v Tesla model X. Na vstupní rotorové hřídeli je nalisované ozubené kolo s 31 zuby, které pohání protiběžné ozubené kolo s 81 zuby. Tyto dvě ozubená kola (modře zvýrazněná na obr. 11) poskytují převodový poměr 2.6. Na stejné hřídeli se také nachází menší ozubené kolo s 24 zuby a pohání velké ozubené kolo s 83 zuby, které je napojené na diferenciál. Toto spojení poskytuje převodový poměr 3.44. Součinem těchto dvou převodových poměrů vznikne převodový poměr 9.04:1. [40]



Obr. 12 - převodovka Tesla model X [40]

2.4.2 VÍCESTUPŇOVÉ PŘEVODOVKY

Vícerychlostní převodovky, se zatím používají hlavně ve vysoce výkonových elektromobilech. Běžně se v převodovkách využívají dva nebo tři převodové stupně, které jsou používány pro zlepšení akcelerace vozidla v nižších otáčkách, zvýšení maximální rychlosti nebo zlepšení efektivity ve vysokých rychlostech. Obecně první převodový stupeň zlepšuje akceleraci a točivý moment, zatímco druhý převodový stupeň nabízí vyšší maximální rychlost a efektivitu. Na druhou stranu jejich velkou nevýhodou je zvýšení nákladů na výrobu a údržbu způsobené složitější konstrukcí oproti jednostupňovým převodovkám. Tato konstrukce může způsobit zvýšení hmotnosti vozidla a energetické ztráty při řazení převodových stupňů. Tyto uvedené nevýhody mohou vést ke snížení celkové účinnosti elektromobilu. Dvoustupňová převodovka z Porsche Taycan je na Obr. 13. [34]



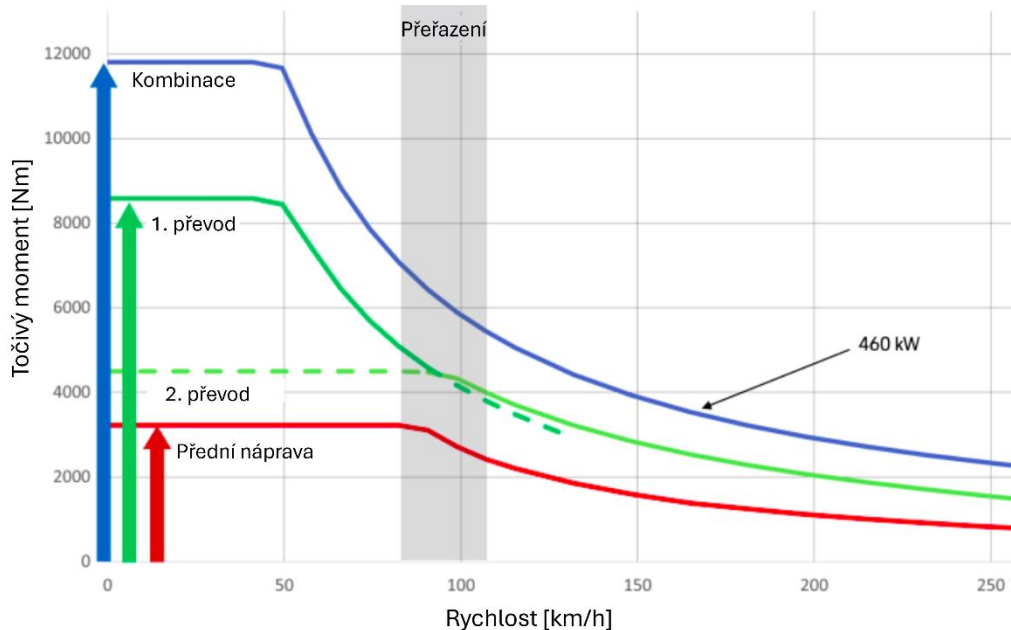
Obr. 13 - Převodovka Porsche Taycan [38]

V minulosti se o použití dvoustupňové převodovky již v roce 2008 pokusila automobilka Tesla s konceptem první generace modelu Roadster. Jednalo se o dvoustupňovou převodovku. První stupeň měl být zařazený do hranice 100 km/h a poté se přeřadilo druhý převodový stupeň, čímž bylo dosažení zrychlení z 0 na 100 km/h za necelé 4 sekundy. Bohužel se nakonec převodovka ukázala jako nespolehlivá a její životnost byla pouze pár tisíc mil. Proto se nakonec Tesla Roadster do sériové výroby dostala pouze s jednostupňovou převodovkou. [35]

V současné době se do použití vícestupňové převodovky pustila pouze automobilka Porsche se svým modelem Taycan a Audi s modelem e-tron GT, které vzhledem k vlastnění stejným koncernem sdílejí stejnou platformu. Zmíněný Porsche Taycan je poháněn dvěma elektromotory. Jeden elektromotor je uložený na přední nápravě s jednostupňovou převodovkou. Druhý elektromotor je uložen na zadní nápravě a je propojen s dvoustupňovou převodovkou, která používá dvě spojky, aby dokázaly zvládnout změnu převodového poměru. První rychlostní stupeň má převodový stupeň 15:1. To znamená, že 15 otáček na motoru představuje jednu otáčku na kole. Výsledkem tohoto velkého převodového stupně je velmi vysoký točivý moment na kole, což umožňuje výbornou akceleraci z místa. První rychlostní stupeň je využíván pouze při zvoleném jízdním režimu Sport nebo Sport plus a zůstává zařazený až do 50mph, což je zhruba 80 km/h. Druhý rychlostní stupeň má převodový poměr stejně jako jednostupňová převodovka na přední nápravě 8:1. Díky druhému převodovému stupni je vozidlo schopno dosáhnout vyšší efektivity při vysokých rychlostech a zároveň mít dostatečnou zásobu výkonu. Při použití jízdního režimu Range nebo Normal je upřednostňováno použití

druhého převodového stupně pro celý jízdní cyklus, aby bylo dosaženo co nejlepší efektivity a tím pádem i dojezdu. [36]

Na Obr. 14 je výkonnostní charakteristika elektromobilu Porsche Taycan, na které je vykreslených několik křivek. Zelené křivky znázorňují průběh točivého momentu při použití 1. a 2. rychlostního stupně. Modrá křivka znázorňuje kombinaci všech křivek. Z obrázku vychází, že použití dvoustupňové převodovky vede k vyššímu točivému momentu ve všech oblastech, a to jak v nízkých, tak i vysokých otáčkách.



Obr. 14 Otáčková charakteristika Porsche Taycan [38]

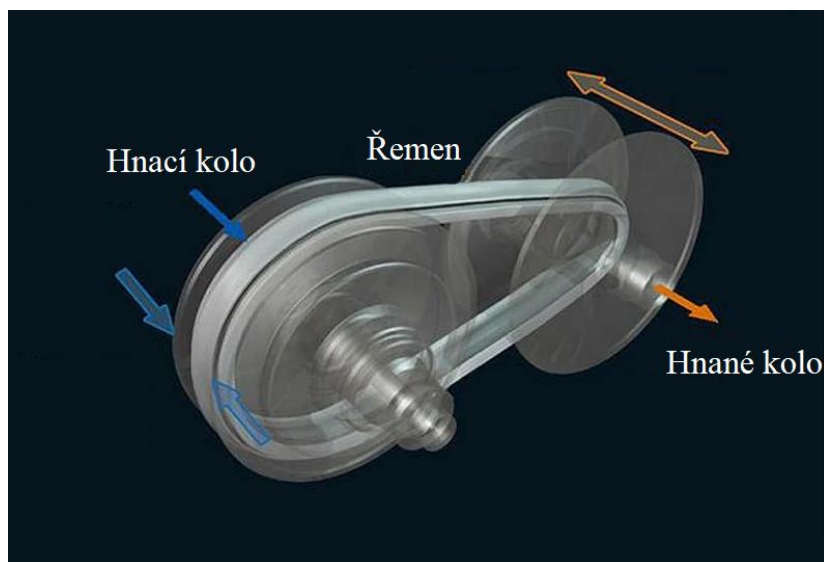
Na Obr. 14 přímo navazuje Tab. 3, která ukazuje rozdíly v akceleraci při zařazení pouze jednoho rychlostního stupně a použití obou převodových stupňů. Nejmenší rozdíl vycházel u akcelerace 0-100 km/h, u kterého byl rozdíl pouhých 0.3 sekundy což je hlavně způsobeno faktem, že toto zrychlení trvalo samo o sobě 2.9 sekundy. Zatímco u zrychlení 130–190 km/h byl rozdíl dokonce 1.4 sekundy. Použití převodovky se prokázalo i ve zlepšení dojezdu vozidla o 3 %, což vychází na zlepšení o 15 km.

Tab. 3 - Porovnání akcelerace Porsche Taycan [37]

	Jednostupňová převodovka	Dvoustupňová převodovka	Rozdíl
Převodový poměr, přední/zadní	8.5/8.5	8.5/15-8.5	-
Bod řazení	-	100 km/h	-
Max. rychlost	240 km/h	240 km/h	-
0-100 km/h	3.2 s	2.9	0.3 s
65-130 km/h	7.2 s	6.7	0.5 s
130-190 km/h	5.9 s	5.5	0.4 s
160-240 km/h	12.9 s	11.5	1.4 s
Dojezd	500 km/h	+3 %	15 km

2.4.3 CVT PŘEVODOVKY

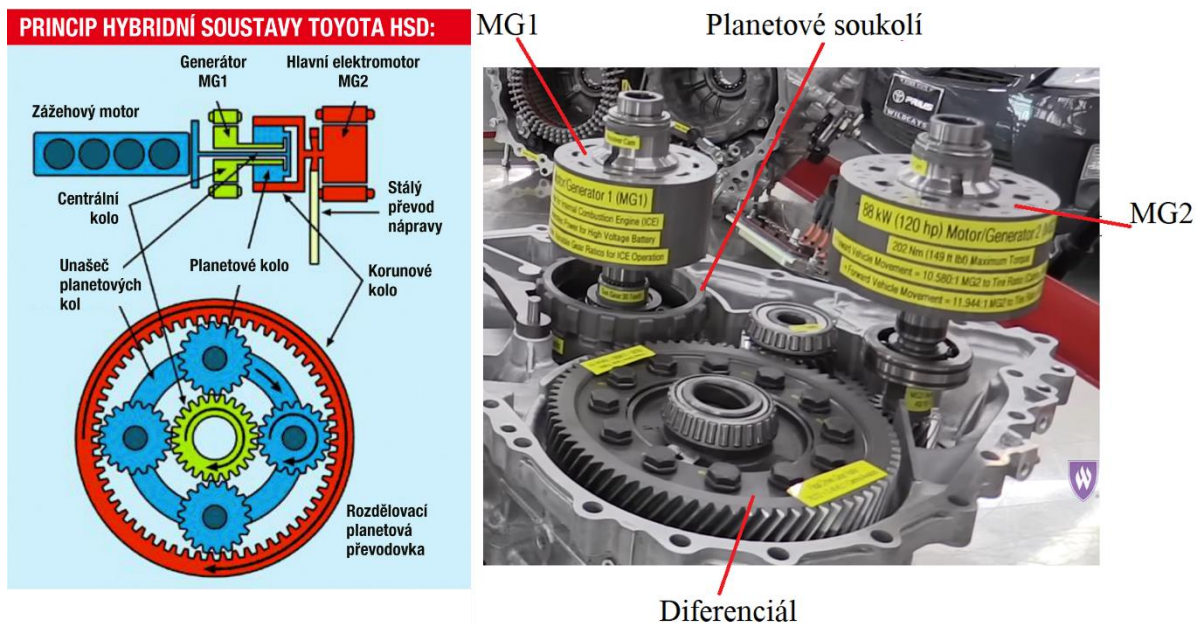
Plynulé bezstupňové převodovky (CVT) mají teoreticky nekonečný počet rychlostních stupňů. Použitím CVT převodovky je schopen vůz dosáhnout dobré efektivity v důsledku toho, že může motor pořád běžet v ideálních otáčkách. CVT převodovka funguje na úplně odlišném principu změny převodového poměru než nejčastěji používané vícešupňové převodovky využívané například ve vozidlech se spalovacím motorem. Je složena ze dvou kuželových kol spojených řemenem (Obr. 15). První kuželové kolo, známé též jako hnací kolo, je poháněno klikovou hřídelí motoru a je s druhým (hnaným) kuželovým kolem spojené řemenem. Točivý moment druhého kuželového kola je přenášen na diferenciál a z diferenciálu přes poloosy na kola vozidla. Změnou vzdálenosti mezi dvěma kužely hnaného kola se mění jeho pracovní průměr, a tím se mění převodový poměr výstupní hřídele. Aby zůstal řemen správně napnutý, musí se průměr hnacího kuželového kola také měnit. Díky plynulé změně převodu může motor běžet v otáčkách s nejvyšší účinností a mění se pouze převodový poměr. Jelikož u této převodovky nedochází k přímému přerazování, poskytuje převodovka hladkou jízdu a akceleraci v jakékoliv rychlosti. Vzhledem k tomu, že tyto převodovky špatně zvládají velký točivý moment, tak nejsou vhodné pro použití v elektrických vozidlech. [41]



Obr. 15 - CVT převodovka [43]

Automobilka Toyota vyvinula vlastní převodovku s plynule měnitelným převodem pojmenovanou e-CVT. Ta funguje na úplně odlišném principu než výše zmiňovaná CVT převodovka. Tato převodovka však nemůže být použita pro obyčejné spalovací vozy, protože potřebuje 2 zdroje rotačního pohybu. Předpokladem použití e-CVT převodovky je tedy podmínka, že má vůz spalovací motor i elektromotor poháněný trakční baterií a je schopen jet pouze na elektrickou energii. Pohon pouze na elektrickou energii je využit například při zpětném chodu. Vnitřní uspořádání zmiňované převodovky včetně schématu je na Obr. 16. Hlavní částí převodovky je planetové soukolí. Kromě spalovacího motoru jsou v pohonném traktu obsaženy i dva elektromotory, které jsou uloženy v převodové skříni. Jeden motor je nazvaný MG1 a druhý MG2. Zkratka MG znamená motor/generátor. K variabilnímu převodovému poměru nedochází jako u klasických CVT převodovek pomocí řemenem spojených kuželových kol, ale pomocí planetového soukolí spojeného s elektromotorem MG1. MG1 je v převodovém systému využíván hned k několika úkolům.

Prvním z nich je, že funguje jako startér. Druhá věc, za kterou stojí MG1 je jeho funkce jako generátor, kdy přeměňuje točivý moment tvořený spalovacím motorem a tím nabíjí trakční baterii využívanou k pohonu MG2. Nejdůležitější funkcí, kterou má MG1 v převodovém ústrojí je variabilní změna převodového poměru mezi klikovou hřídelí spalovacího motoru a protiběžného kola. Motor MG2 je pevně spojen přes ozubená kola s diferencíálem, a proto vždy, když se kola otáčejí, tak se točí i motor MG2. Spojení MG2 a diferenciálu je přes ozubené kolo s převodovým poměrem 11,9:1. Při akceleraci MG2 pracuje jako motor a při snižování rychlosti funguje jako generátor. Kola pohání buď samostatně, nebo v kombinaci se spalovacím motorem. [42]



Obr. 16 – e-CVT převodovka [42] [48]

3 SOFTWARE PRO TVORBU VÝPOČETNÍHO MODELU

V práci byl vytvořen výpočetní model elektrického vozidla, který je detailně popsán v kapitole 4. Pro tvorbu modelu elektrického vozidla byla použita nadstavba programu Matlab Simulink. Výstupní data byla nadále zpracována v programu MATLAB.

3.1 MATLAB R2023B

MATLAB je komplexní nástroj poskytující mnoho funkcí a možností pro inženýrské a vědecké výpočty. Nabízí výkonný programovací jazyk pro numerické výpočty a vývoj algoritmů. Jeho interaktivní prostředí je vybaveno grafickými nástroji, které umožňují zkoumání, návrh a řešení různých problémů. S tisíci vestavěnými funkcemi z oblastí matematiky, statistiky, optimalizace a manipulace s daty poskytuje široké spektrum možností pro specializované technické výpočty. [45]

Matematické modelování, simulace, analýzy a prezentace dat jsou další klíčové oblasti, ve kterých MATLAB exceluje. Jeho grafické funkce umožňují vizualizaci dat a tvorbu vlastních grafů, zatímco vývojové nástroje pomáhají zlepšovat kvalitu kódu a maximalizovat výpočetní výkon. S možností vytváření aplikací s grafickým uživatelským rozhraním je MATLAB flexibilním prostředkem pro tvorbu uživatelsky přívětivých programů. Díky funkci integrace algoritmů v jazyce MATLAB s externími aplikacemi a jazyky jako C, Python, Java, .NET a Microsoft Excel je možné propojit MATLAB s dalšími nástroji a využít jejich synergický potenciál. MATLAB podporuje také paralelní a distribuované výpočty, včetně GPU výpočtů a práce s rozsáhlými daty, což umožňuje efektivní zpracování i velkých datových souborů. [45]

3.2 MATLAB SIMULINK

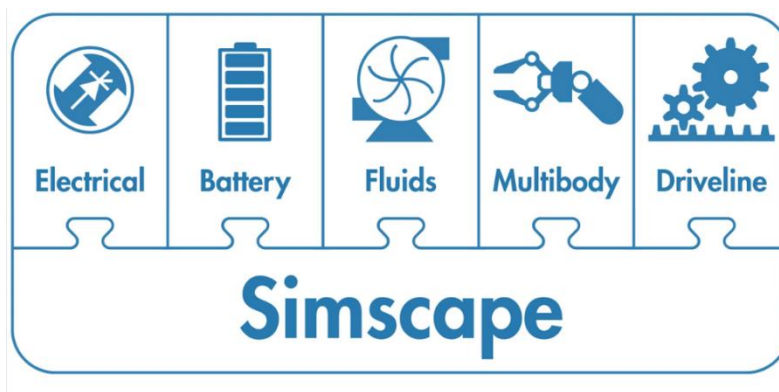
Simulink® je rozšíření MATLABu navržené pro modelování a simulaci dynamických systémů a vývoj algoritmů pomocí Model-Based Design. Umožňuje uživatelům rychle a snadno vytvářet simulační modely ve formě blokových schémat a nasazovat je na cílové platformy bez nutnosti ručního psaní kódu. Modely mohou být vytvořeny buď pomocí rovnic nebo sestavením bloků reprezentujících prvky reálných systémů. Kromě fyzikálních modelů je také možné modelovat algoritmy řídicích systémů včetně automatického ladění, systémy zpracování signálu, komunikace a zpracování obrazu. [46]

Dále se dá MATLAB SIMULINK rozšířit o další knihovny. V této práci byla využívána knihovna Simscape a její podknihovny.

3.3 SIMSCAPE

Simscape umožňuje rychle vytvářet modely fyzikálních systémů v prostředí Simulink. Pomocí tohoto nástroje se dají vytvářet modely fyzických komponent na základě fyzikálních spojení, které se přímo integrují s blokovými schématy a jinými modely, případně řízením. Lze modelovat systémy mechanické, elektrické, hydraulické, jejich tepelnou výměnu, systémové řízení, optimalizace atd. Přídavné produkty Simscape poskytují složitější komponenty a možnosti analýzy. [47]

Simscape pomáhá vyvíjet řídicí systémy a testovat výkonnost na úrovni systému. Vlastní modely komponent lze vytvářet pomocí jazyka Simscape založeného na základu MATLABu, který umožňuje tvorbu fyzikálních modelovacích komponent, domén a knihoven. Modely se dají parametrizovat pomocí proměnných a výrazů MATLAB a navrhovat řídicí systémy pro fyzikální systém v prostředí Simulink. Pro nasazení modelů do jiných simulačních prostředí, včetně systémů HIL (hardware-in-the-loop), podporuje Simscape generování C-kódu. Na Obr. 17 je logo Simscape a podknihovny tohoto programu. [47]



Obr. 17 Logo simscape [47]

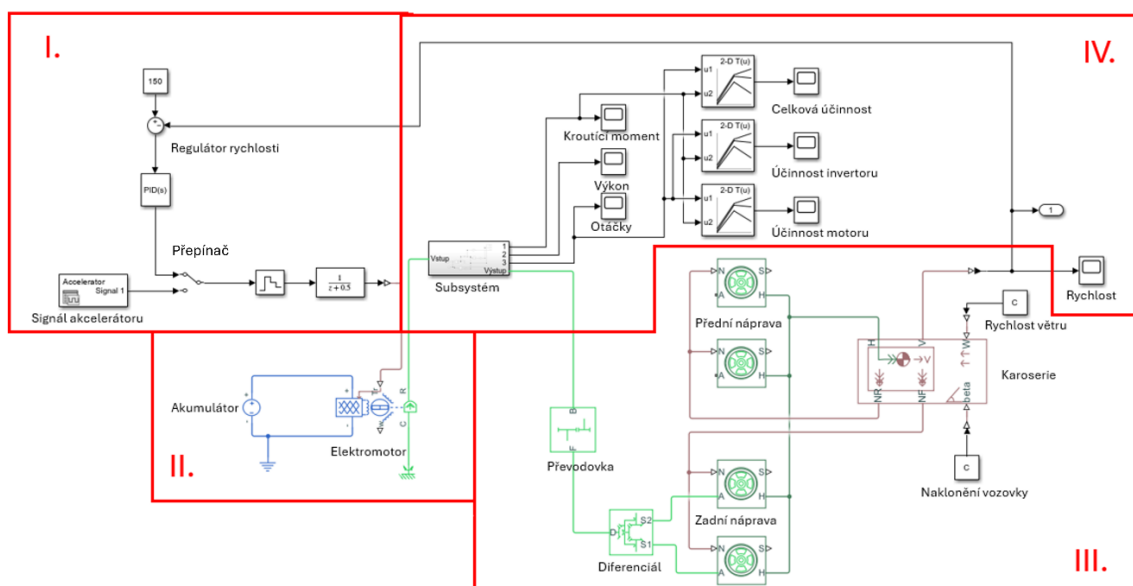
4 JÍZDNÍ MODEL

Cílem modelu bylo vytvoření simulace jízdního cyklu v programu MATLAB simulink. Model byl vytvořen základní knihovnou Simscape. Konkrétněji se jednalo o knihovny Simscape electrical a Simscape driveline. Celkem byly vytvořeny 2 modely. První model simuloval akceleraci elektrického vozidla s jednostupňovou převodovkou a druhý sice simuloval stejnou akceleraci, ale byla u něj použita dvoustupňová převodovka. Výsledky byly porovnány v účinnosti mapě elektrického hnacího ústrojí. Zjišťovalo se, zda má použití dvoustupňové převodovky smysl z hlediska zlepšení efektivity elektrického vozidla.

Model byl konstruován na základě elektromobilu Tesla Model 3, jelikož jsou k tomuto vozidlu dostupná potřebná data k vytvoření modelu. Akcelerační cyklus byl proveden zrychlením z 0 km/h na 150 km/h. Uvažována byla jízda po dokonale rovné asfaltovém povrchu a v druhém měření byl nastaven mírný kopec. Rychlost větru byla rovna 0 km/h.

4.1 STRUKTURA MODELU

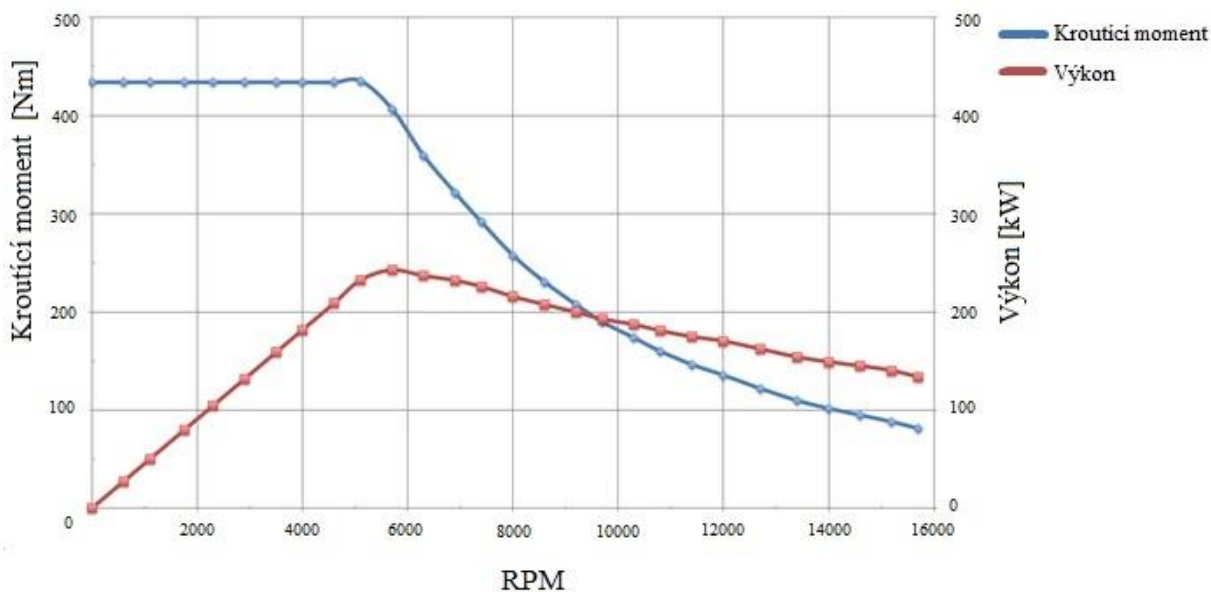
Akcelerační model se skládá ze čtyř hlavních částí a jednoho podsystému. Jedná se o řídicí elektroniku, pohonnou část, část nahrazující fyzický model vozidla. Čtvrtý úsek je určen k vykreslení grafů. Všechny tyto části jsou označeny na Obr. 18.



Obr. 18 - Simulink model

První část (I.) zajišťuje řízení pohonu vozidla. Řízení motoru je navrženo tak, že lze manuálním přepínačem volit mezi blokem, který nařídí motoru akcelarovat s požadavkem na maximální točivý moment a tím dosáhnout nejrychlejší možné akcelerace na maximální rychlosti. Při přepnutí spínače do druhé polohy se aktivuje PID regulátor, který pozvolně reguluje rychlost, dokud nedosáhne požadované rychlosti. Tyto bloky jsou dále zapojeny na vyhlazovače signálu, který zlepšuje plynulost dodávaného signálu do elektromotoru pro oba akcelerační cykly.

Druhá pohonná část (II.) je složena pouze ze dvou bloků. Prvním blokem je 350 voltový akumulátor, který zajišťuje přísun elektrické energie pro elektromotor. Druhý blok zastupuje synchronní elektromotor s permanentními magnety. Povel pro požadovaný výkon, který má elektromotor vyvinout přichází z řídicí části modelu (I.). Parametry pro něj, kterými jsou točivý moment v závislosti na otáčkách, jsou odečteny z otáčkové charakteristiky (Obr. 19) elektromobilu Tesla Model 3.



Obr. 19 – Otáčková charakteristika motoru Tesla model 3 [50]

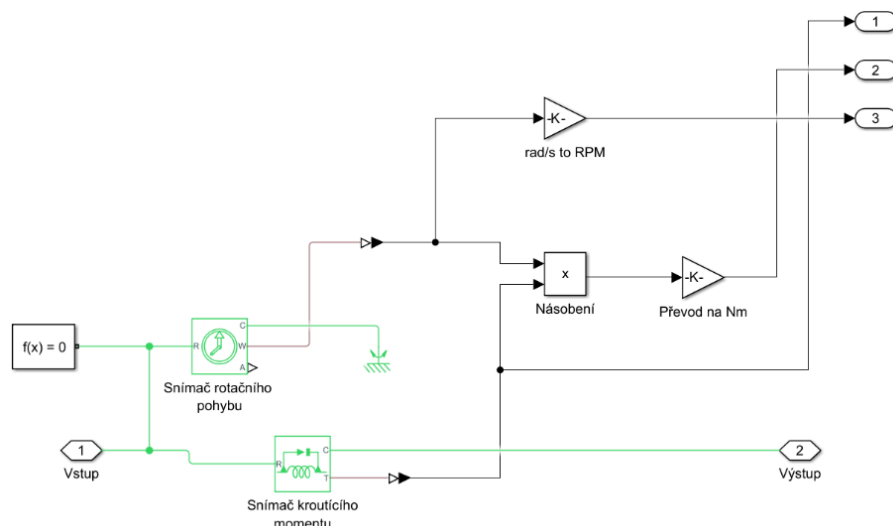
Třetí část (III.) fyzikálně popisuje vozidlo, pneumatiky, diferenciál a také převodovku pro změnu převodového poměru. K tomu využívá jednostupňovou nebo dvoustupňovou převodovku. První jmenovaná má převodový poměr do pomala, ten je roven 9:1. V případě modelu s vícestupňovou převodovkou byla použita převodovka s dvěma převodovými stupni. První převodový stupeň má převodový poměr 15:1 a druhý 8:1. Převodový poměr byl zvolen po vzoru elektromobilu Porsche Taycan, který společně s Audi E-tron GT jako jeden z mála elektromobilů používá dvoustupňovou automatickou převodovku. Z převodovky jde točivý moment do diferenciálu, který ho dále rozdělí na zadní poháněná kola. Poloměr valení kol je vypočítán pro kola o rozměru 235/45 r18, které jsem běžně používány už z výroby na Tesle Model 3. Také byl na kolech nastaven valivý odpor pro jízdu po asfaltové silnici. Poslední důležitý blok této části je karoserie. Zmíněný blok je velmi důležitý, jelikož zahrnuje fyzické rozměry a vlastnosti simulovaného vozidla. Mezi parametry, které tento blok zahrnuje patří: hmotnost vozidla, setrvačnost vozidla při zrychlení, podélné vzdálenosti těžiště vozidla od přední a od zadní nápravy, výška těžiště od země, čelní plocha vozidla a součinitel odporu vzduchu. Nezahrnuje však setrvačnost rotačních hmot, které nejsou známy. Na karoserii jsou ještě přivedeny dva další bloky. První blok udává rychlost větru působící na vozidlo a druhý úhel sklonu vozovky, po které vůz jede. Údaje zadávané do této části jsou zapsány v Tab. 4.

Tab. 4 - vstupní parametry modelu [49]

Parametr	Hodnota	Jednotky
Napětí baterie	350	V
Výkon	320	kW
Točivý moment	430	Nm
Převodový poměr jednostupňové převodovky	9:1	-
Převodový poměr dvoustupňové převodovky	15:1, 8:1	-
Poloměr valení kol	0,33	m
Koeficient valivého odporu kol	0,04	-
Rychlost větru	0	Km/h
Úhel sklonu vozovky	0	°
Hmotnost vozidla	1830	Kg
Vzdálenost těžiště vozidla od přední nápravy	1,430	m
Vzdálenost těžiště vozidla od zadní nápravy	1,440	m
Výška těžiště od země	0,445	m
Čelní plocha automobilu	2,23	m ²
Koeficient odporu vzduchu	0.22	-

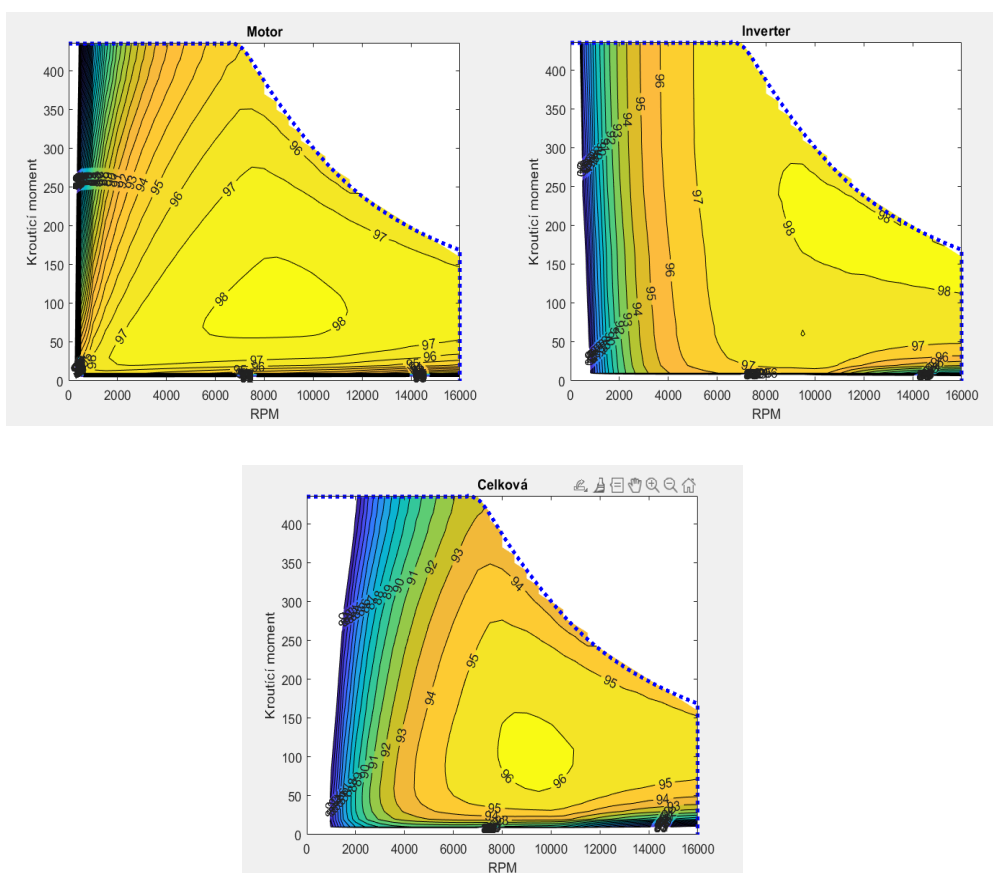
Čtvrtá část (IV.) se zabývá vykreslením výsledků do grafů pomocí bloků scope. První graf zobrazuje rychlost simulovaného vozidla v závislosti na čase a je získaný přímo z výstupu bloku karoserie. Grafy pro točivý moment, výkon a otáčky vycházejí z výstupů podsystému. Pro získání hodnot efektivity v požadovaných rychlostech byl připojen točivý moment a otáčky na blok účinnostní mapy. V tomto bloku je kromě dříve zmíněných parametrů také zadána matice max. točivého momentu, matice max. rychlosti a matice efektivity. Tyto matice byly získané z programu [51]. Výstupem z tohoto bloku je účinnost dle vstupních otáček a točivého momentu.

Podsystém, který spadá do čtvrté části (IV.) musel být u modelu použit, aby se udržela přehlednost modelu. Jeho funkcí je měření výstupních parametrů z bloku motoru a poté jejich výstup použít pro vykreslení grafů. Snímač měření točivého momentu se rozděluje na dva výstupy. První je pouze točivý moment a vede rovnou do výstupu z podsystému číslo 1. Druhý výstup se spojuje se snímačem rotačního pohybu. Snímač rotačního pohybu měří otáčky připojeného elektromotoru. Snímač má dva výstupy. Jeden výstup převede výsledné Rad/s na RPM a jde do výstupu číslo 3. Druhý výstup ze snímače rotačního pohybu se pomocí násobícího bloku vynásobí s výstupem snímače točivého momentu. Násobením otáček a točivého momentu získáme výsledný výkon vozidla a ten je napojen na výstup z podsystému číslo 2. Zapojení podsystému je znázorněno na Obr. 20.



Obr. 20 – Podsystem modelu

V Matlabu byly dále vykresleny 3 účinnostní mapy pro elektromobil Tesla model 3. Jedna mapa vykresluje účinnost elektromotoru, druhá účinnost invertoru a třetí mapa účinnost celého pohonného traktu. Mapa celkové účinnosti je získána vynásobením účinnosti elektromotoru a invertoru. Data pro vykreslení těchto map byly získány z [51]. Mapy jsou vykresleny na Obr. 21. Tyto účinnostní mapy budou nadále použity k zakreslení výstupních účinností modelu.



Obr. 21 - Účinnostní mapy

4.2 JÍZDNÍ SIMULACE

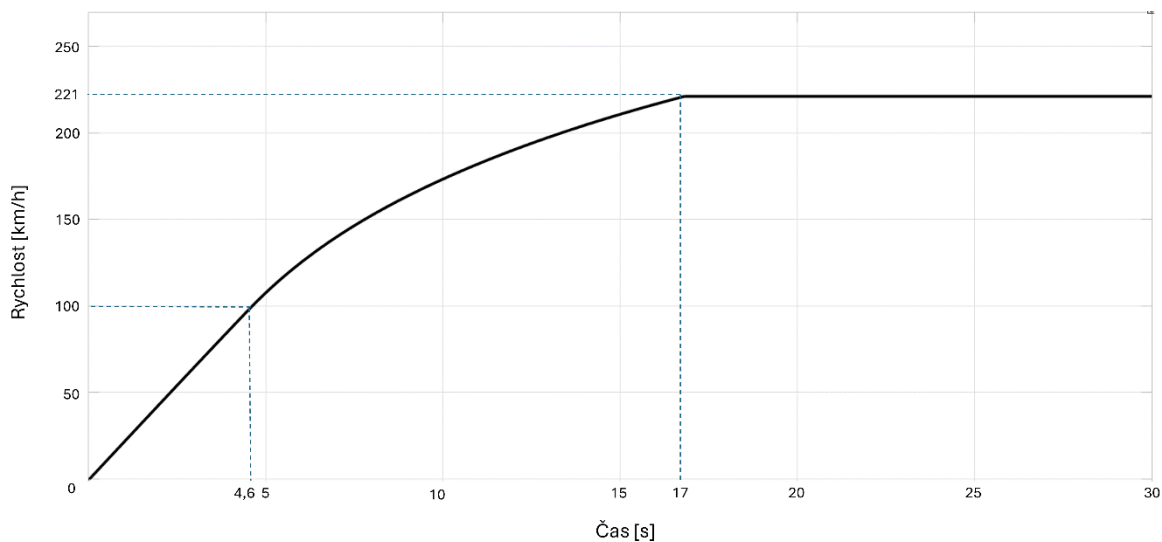
Použitý model je sestaven z bloků popsaných v kapitole 4.1 na Obr. 18. Jak už bylo zmíněno v dřívějších kapitolách, budou použity dva skoro totožné výpočetní modely. Jediné rozdíly mezi nimi jsou, že u prvního byla použita jednostupňová převodovka a u druhého dvoustupňová. Dvoustupňová převodovka byla nastavena tak, že po překonání hranice 100 km/h dojde automaticky k přerazení na 2. rychlostní stupeň. Celkově budou provedeny 3 měření pro každý model. Jedná se o měření účinnosti a akcelerace při plné akceleraci, měření účinnosti při pozvolné akceleraci a měření účinnosti při pozvolné akceleraci při jízdě do kopce.

4.2.1 SIMULACE PŘI PLNÉ AKCELERACI

Měření bylo provedeno pod plným zatížením elektromotoru, kdy signál akcelerátoru zajišťoval požadavek na plný výkon. Zjišťovala se akcelerace z 0-100 km/h a maximální rychlost. Poté byly v závislosti na otáčkách a točivém momentu odečteny celkové účinnosti ve vybraných rychlostech a zapsány do tabulky. Vozidlo jelo po rovné asfaltové silnici a rychlost větru se rovnala 0 km/h. Čas trvání simulace byl nastaven na 30 sekund, aby se do měření dokázala promítnout i maximální rychlost

Jednostupňová převodovka

Zrychlení z 0-100 km/h bylo u modelu s jednostupňovou převodovkou dosaženo za 4,6 sekundy. Maximální dosažená rychlost byla 221 km/h a výpočetní model ji dosáhl za 17 sekund. Časový průběh akcelerace je na Obr. 22.



Obr. 22 - Akcelerace modelu s jednostupňovou převodovkou

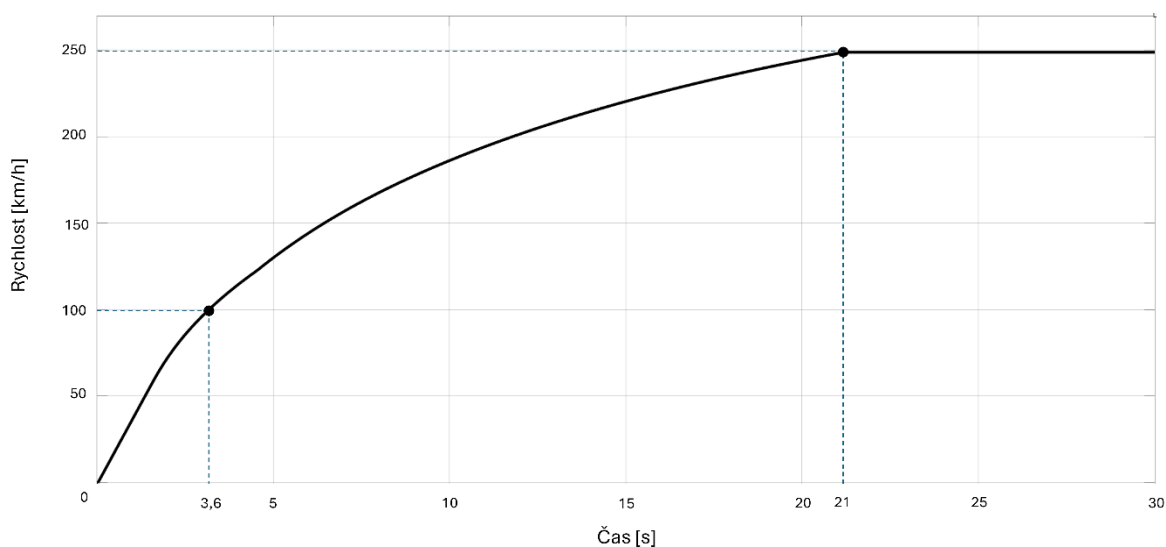
Naměřené hodnoty účinnosti při plném zatížení motoru u modelu s jednostupňovou převodovkou jsou uvedeny v Tab. 5.

Tab. 5 - Účinnost modelu s jednostupňovou převodovkou při plném zatížení

Rychlost vozidla	Účinnost
30 km/h	80,7 %
50 km/h	87,4 %
90 km/h	92,5 %
130 km/h	93,6 %

Dvoustupňová převodovka

Akcelerace z 0-100 km/h trvala u modelu s dvoustupňovou převodovkou 3,2 sekundy a maximální rychlost vozidla byla 249 km/h a její dosažení trvalo 21 sekund. Průběh akcelerace v závislosti na čase je na Obr. 23.



Obr. 23 - Akcelerace modelu s dvoustupňovou převodovkou

Naměřené hodnoty účinnosti při plném zatížení motoru u modelu s dvoustupňovou převodovkou jsou uvedeny v Tab. 6.

Tab. 6 - Účinnost modelu s dvoustupňovou převodovkou při plném zatížení

Rychlost vozidla	Účinnost
30 km/h	88,7 %
50 km/h	92 %
90 km/h	93,7 %
130 km/h	93,4 %

4.2.2 SIMULACE PŘI POZVOLNÉ AKCELERACI

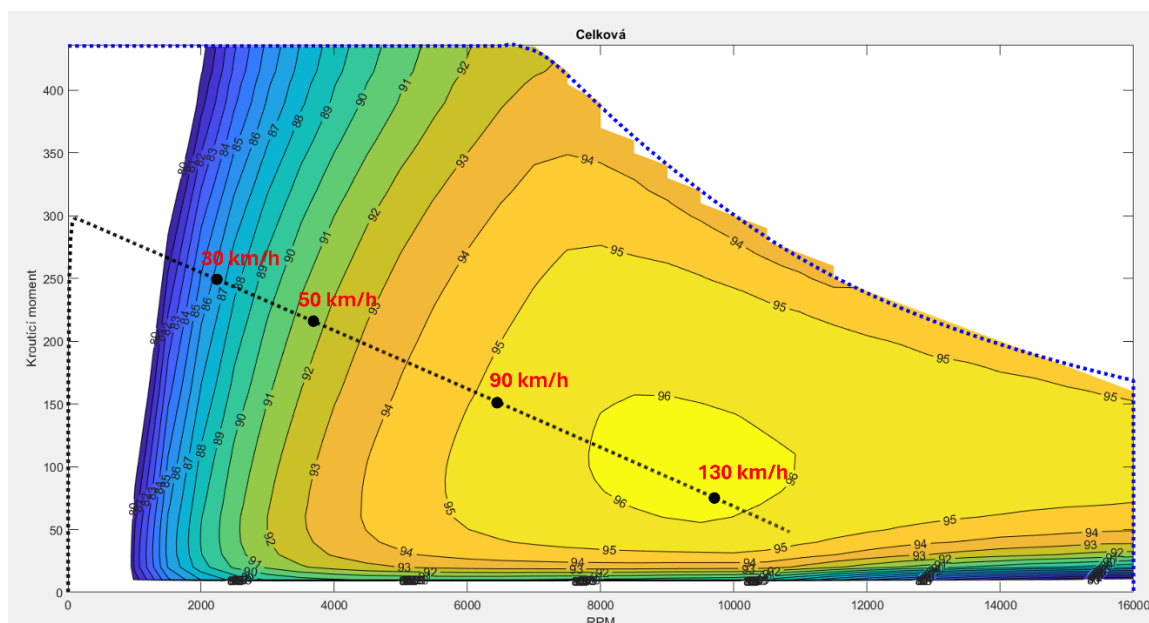
Druhé měření simulovalo pozvolný akcelerační cyklus, ve kterém byla regulovaná rychlost nastavena na 150 km/h. Pro pozvolnou akceleraci byl v modelu přepínačem nastavený na režim regulace rychlosti pomocí PID regulátoru. Z tohoto měření je vykreslen graf celkové účinnosti v závislosti na zatížení motoru. Tedy závislost otáček a točivého momentu. Dále byly účinnosti zakresleny do celkové účinnostní mapy pohonného traktu.

Jednostupňová převodovka

Naměřené hodnoty účinnosti pozvolného akceleračního cyklu s jednostupňovou převodovkou jsou uvedeny v Tab. 6 a zakresleny na Obr. 24.

Tab. 7 - Účinnosti modelu s jednostupňovou převodovkou

Rychlost vozidla	Účinnost
30 km/h	86 %
50 km/h	91,5 %
90 km/h	95,3 %
130 km/h	96,2 %



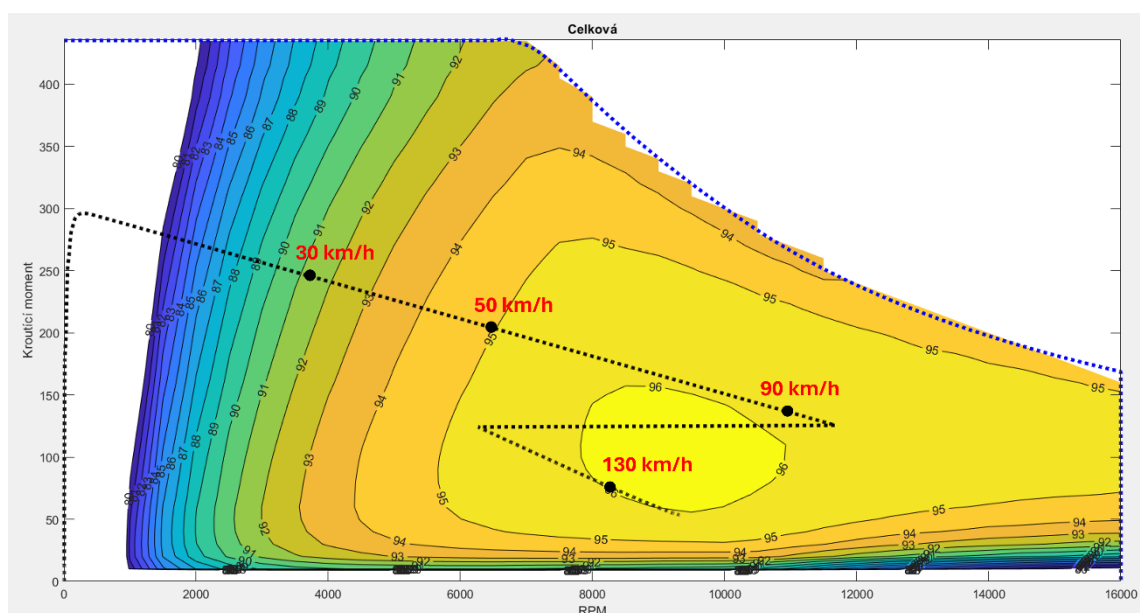
Obr. 24 - Účinnostní mapa při pozvolné akceleraci s jednostupňovou převodovkou

Dvoustupňová převodovka

Naměřené hodnoty účinnosti pozvolného akceleračního cyklu s dvoustupňovou převodovkou jsou uvedeny v Tab. 8 a zakresleny na Obr. 25.

Tab. 8 - Účinnosti modelu s dvoustupňovou převodovkou

Rychlost vozidla	Účinnost
30 km/h	91 %
50 km/h	94,6 %
90 km/h	95,9 %
130 km/h	96 %



Obr. 25 - Účinnostní mapa pozvolné akcelerace s dvoustupňovou převodovkou

4.2.3 SIMULACE POZVOLNÉ AKCELERACE DO KOPCE

Měření účinnosti pozvolné akcelerace při jízdě do kopce probíhalo pomocí PID regulátoru, ve kterém byla regulovaná rychlost nastavena na 150 km/h. Výpočetní model byl ještě doplněn o 10% stoupání. Tímto měřením má být zjištěno, zda dojde ke změně celkové účinnosti pohonného traktu, pokud vozidlo pojedje v nízké rychlosti pod vyšším zatížením.

Jednostupňová převodovka

Naměřené hodnoty účinnosti pozvolné akcelerace do kopce modelu s jednostupňovou převodovkou jsou uvedeny v Tab. 9.

Tab. 9 – Účinnost při pozvolné akceleraci do kopce s jednostupňovou převodovkou

Rychlost vozidla	Účinnost
30 km/h	85,6 %
50 km/h	91,4 %
90 km/h	95,2 %
130 km/h	96,2 %

Dvoustupňová převodovka

Naměřené hodnoty účinnosti při pozvolné akceleraci do kopce modelu s dvoustupňovou převodovkou jsou uvedeny v Tab. 10.

Tab. 10 - Účinnost při pozvolné akceleraci do kopce modelu s dvoustupňovou převodovkou

Rychlost vozidla	Účinnost
30 km/h	91 %
50 km/h	94,5 %
90 km/h	95,8 %
130 km/h	96 %

4.3 POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT

Použitím dvoustupňové převodovky dokázalo, díky vyššímu převodovému poměru na 1. rychlostním stupni, simulované vozidlo snížit čas akcelerace z 0-100 km/h o 1,4 sekundy. Maximální rychlost se zvýšila dokonce o 28 km/h. Rozdíl účinností při požadavku na plný výkon byl nejvýraznější v rychlosti 30 km/h, při které je rozdíl v účinnosti 8 %.

Při pozvolné akceleraci, kterou by elektromobil využíval pro většinu jízdních cyklů, byly změny v účinnosti nejvýraznější také v nízkých rychlostech. Při 30 km/h bylo zlepšení účinnosti rovno 5 % a při 50 km/h to byly 3 %. Při zprůměrování těchto účinností se dá jednoduše vypočítat zlepšení dojezdu při použití dvoustupňové převodovky v městských rychlostech. Při udávaném dojezdu Tesly model 3, který je 614 km [49], dojde ke zlepšení dojezdu o 30 km. V případě, že bychom počítali s celým spektrem rychlostí, tak se dojezd zvýší o 14 km.

Největší zlepšení účinnosti při pozvolné akceleraci do kopce bylo naměřeno také v nízké rychlosti a toto zlepšení bylo 5,4 % při 30 km/h a při 50 km/h bylo toto zlepšení 3,1 %. Ve vysoké rychlosti byly naměřené účinnosti skoro totožné.

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo provést rešerši v oblasti převodových ústrojí v pohonech elektrických vozů a poté zhodnotit jejich vliv na účinnost pohonného traktu elektromobilu. Na základě provedené rešerše zhodnotit vliv jedno a víceúrovňových převodovek na účinnost pohonného traktu. Ta je v odvětví elektromobility velice důležitá vzhledem k omezenému dojezdu elektromobilů v kombinaci s dlouhým časem stráveným nabíjením vozidla.

Z rešerše je patrné, že většina elektrických vozidel používá pouze jednostupňové převodovky s pevným převodem. Toto řešení bývá použito hlavně kvůli jednodušší konstrukci a nižším cenovým nákladům. Na druhou stranu u těchto vozidel dochází ke snížení účinnosti při velkém zatížení v nízkých otáčkách. Jedny z mála automobilek, které použily pro pohon svých vozidel dvoustupňovou převodovkou jsou Porsche Taycan a Audi e-tron GT. Tato převodovka je koncipována tak, že je v nízkých rychlostech použit první rychlostní stupeň s nízkým převodovým poměrem. V případě, že na vozidlo nejsou kladeny nároky na vysoké zatížení, je použit druhý rychlostní stupeň po celé spektrum rychlosti.

Na základě informací získaných o převodovém ústrojí zmiňovaného Porsche Taycan byla koncepce jeho převodovky implementována do výpočetního modelu elektromobilu Tesla Model 3. Tento vůz byl zvolen hlavně díky volně přístupným datům potřebných pro tvorbu modelu. Vytvořený výpočetní model byl použit pro měření celkové účinnosti pohonného ústrojí při různých jízdních režimech. Tato účinnost se skládala z účinnosti elektromotoru a výkonové elektroniky. Účinnost byla měřena na třech jízdních režimech: akcelerace s požadavkem na maximální moment, pozvolná akcelerace a pozvolná akcelerace do kopce.

Výpočetním modelem bylo zjištěno, že napříč všemi měřeními je největší přínos dvoustupňové převodovky znatelný v nízkých rychlostech. Dvoustupňová převodovka se pozitivně projevila na čase zrychlení, který byl při jejím použití nejnižší. Je nutné dodat, že v simulaci není zahrnutý čas přerazení, který by čas zrychlení negativně ovlivnil. Taktéž byla účinnost při plné akceleraci zlepšena o 8 %. Při pozvolné akceleraci bylo zlepšení účinnosti v nízké rychlosti 5 %. Kdyby vůz jezdil převážně v městských rychlostech, mohlo by dojít ke zlepšení dojezdu o 30 km. Měření pozvolné akcelerace do kopce však nepřineslo očekávané výsledky. Účinnosti napříč rychlostmi jsou si rovny, nebo se liší pouze o desetiny procent, při porovnání s pozvolnou akcelerací po rovné silnici. Tato podobnost může být způsobena dostatečným výkonem elektromotoru, který se při jízdě do kopce nedostal do oblasti točivého momentu, která by ovlivnila výslednou účinnost.

Dle dat získaných z výpočetního modelu má použití převodovky největší smysl u výkonného sportovního auta, kde vůz získá rychlejší akceleraci a také velké zlepšení účinnosti v nízkých rychlostech při plném zatížení. Druhým způsobem, při kterém by se daly využít výhody dvoustupňové převodovky je vůz, který velkou část jízdních cyklů tráví v městském provozu. Zde by se použití dvoustupňové převodovky mohlo projevit na zvýšení dojezdu v důsledku zvýšení účinnosti v malých rychlostech. Při použití víceúrovňové převodovky je nutné vždy zhodnotit, zda zvýšená konstrukční náročnost dostatečně vykompenzuje lepší dynamiku a delší dojezd při určitých provozních režimech.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Na cestě do historie elektromobility [online]. 2019 [cit. 2024-01-29]. Dostupné z: <https://elektrickevozy.cz/clanky/vedecke-okenko-na-ceste-do-historie-elektromobility-dil-1-aneb-jak-to-vsechno-zacalo>
- [2] History of electric cars [online]. 2014 [cit. 2024-01-29]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>
- [3] Types of Electric Cars and Working Principles [online]. b.r. [cit. 2024-01-30]. Dostupné z: <https://www.omazaki.co.id/en/types-of-electric-cars-and-working-principles/>
- [4] What you need to know about electromobility [online]. 2021 [cit. 2024-01-30]. Dostupné z: <https://www.infineon.com/cms/en/discoveries/electromobility/>
- [5] Volkswagen – rekuperace [online]. b.r. [cit. 2024-02-21]. Dostupné z: <https://www.volkswagen.cz/ev/vse-o-elektromobilite/rekuperace>
- [6] Elektromobily Toyota na vodíkové palivové články. Toyota.cz [online]. b.r. [cit. 2024-02-15]. Dostupné z: <https://www.toyota.cz/nova-auta/mirai/vodik>
- [7] HAYES, John G. a Gordon A. GOODARZI. Electric powertrain: energy systems, power electronics and drives for hybrid, electric and fuel cell vehicles. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2018. ISBN 978-1-119-06364-3.
- [8] Elektro, Jak se dělá elektromotor, 2021. Roč. 2021, č. 12. ISSN 1210-0889.
- [9] Akumulátory a pohonné systémy elektrických vozidel – EV (1. díl), 2021. Online. In: OEnergetice. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektromobilita/akumulatory-a-pohonne-systemy-elektrickyh-vozidel-ev-1-dil>. [cit. 2024-03-30].
- [10] Není motor jako motor, synchronní elektromotory úspěšně čelí svým původním slabinám. In: Technickytydenik [online]. 2021 [cit. 2024-03-04]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/poutaky/neni-motor-jako-motor-synchronni-elektromotory-uspesne-celi-svym-puvodnim-slabinam_53685.html
- [11] Stejnoseměrný motor – princip činnosti a použití. In: Botland blog [online]. 2023 [cit. 2024-03-04]. Dostupné z: <https://botland.cz/blog/stejnosemerny-motor-princip-cinnosti-a-pouziti/#Stejnosemerny-motor--jak-je-konstruovan>
- [12] Asynchronní motory, 2016. Online. In: Elektrické stroje a přístroje. Dostupné z: <https://projekty.osu.cz/irp2016/Asynchronni%20motory.pdf>. [cit. 2024-03-30].
- [13] Asynchronní stroje – konstrukce, princip funkce a řízení, 2017. Online. In: O energetice. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/asynchronni-stroje-konstrukce-princip-funkce-a-rizeni>. [cit. 2024-03-30].
- [14] Induction Motor Design Overview and detailed Function, b.r.. Online. In: Oswos. Dostupné z: <https://oswos.com/induction-motor/>. [cit. 2024-04-20].

- [15] Permanent magnet synchronous motor. In: About-Motors [online]. 2023 [cit. 2024-03-12]. Dostupné z: <https://about-motors.com/motorcontrol/pmsm/>
- [16] What is a Permanent Magnet Synchronous Motor? In: EverythingPE [online]. 2023 [cit. 2024-03-12]. Dostupné z: <https://www.everythingpe.com/community/what-is-a-permanent-magnet-synchronous-motor>
- [17] Elektromotor – synchronní vládne. In: Automobilrevue [online]. 2022 [cit. 2024-03-12]. Dostupné z: https://www.automobilrevue.cz/rubriky/presunuto-na-trucker-cz-truck-bus/predstavujeme/elektromotory-synchronni-vladne_48530.html
- [18] Check Out Tesla Model 3/Model Y's Modular Electric Drive Units, 2021. Online. InsideEVs. Dostupné z: <https://insideevs.com/news/518692/tesla-model-3y-drive-units/>. [cit. 2024-04-14].
- [19] How Do Electric Cars Produce Instant Maximum Torque? [@Engineering Explained], 2018. Online. 2018. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=VwFEyL_JJAQ&ab_channel=EngineeringExplained. [cit. 2024-03-26].
- [20] Losses in Electric Motors, b.r.. Online. Oswos.com. Dostupné z: <https://oswos.com/motor-losses/>. [cit. 2024-03-26].
- [21] Flat Wire Winding in EV Motor, 2023. Online. In: ZHANG, Emily. Quadrant. Dostupné z: <https://www.quadrant.us/blog/1751.html>. [cit. 2024-03-27].
- [22] WHAT IS A HAIRPIN MOTOR - BENEFITS & ASSEMBLY PROCESS, 2023. Online. LaserAX. Dostupné z: <https://www.laserax.com/blog/hairpin-motor>. [cit. 2024-04-22].
- [23] Stray Loss Analysis of AC Machines Using Time-Stepped Finite Elements, 2010. Disertační práce. Edmonton: University of Alberta.
- [24] HUYNH, Co, Liping ZHENG a Dipjyoti ACHARYA, 2008. Losses in High Speed Permanent Magnet Machines Used in Microturbine Applications [online]. 23. prosinec 2008. B.m.: ASME International. Dostupné z: doi:10.1115/1.2982151
- [25] Výkonová elektronika pro elektrická vozidla, b.r.. Online. In: Hexagon. Dostupné z: <https://hexagon.com/cs/resources/resource-library/electric-vehicle-power-electronics>. [cit. 2024-04-04].
- [26] Variable Frequency Drives Explained | VFD Basics - Part 2 [@RealParts], 2022. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=DXjXh0cF8Kc>. [cit. 2024-04-21].
- [27] Introduction to DC/DC Converters, b.r.. Online. In: Monolithicpower. Dostupné z: <https://www.monolithicpower.com/en/power-electronics/dc-dc-converters/introduction-to-dc-dc-converters>. [cit. 2024-04-04].
- [28] Journal of emerging technologies and innovative research, 2023. Roč. 2014, č. 10. ISSN 2349-5162.

- [29] What Is a Traction Inverter? Evolution of Traction Inverters, b.r.. Online. In: Exro.com. Dostupné z: <https://www.exro.com/industry-insights/what-is-a-traction-inverter>. [cit. 2024-04-07].
- [30] KUMAR, Siddhant, Adil USMAN a Bharat Singh RAJPUROHIT, 2021. Battery charging topology, infrastructure, and standards for electric vehicle applications: A comprehensive review [online]. 11. srpen 2021. B.m.: Institution of Engineering and Technology (IET). Dostupné z: doi:10.1049/esi2.12038
- [31] Field Weakening - What, How, and Why to do It, 2021. Online. In: Powertransmission. Dostupné z: <https://www.powertransmission.com/articles/1375-field-weakening-what-how-and-why-to-do-it>. [cit. 2024-04-08].
- [32] Field Weakening Support, 2019. Online. In: Hackaday. Dostupné z: <https://hackaday.io/project/164932-axiom-100kw-motor-controller/log/162931-field-weakening-support>. [cit. 2024-04-08].
- [33] Subsystems, b.r.. Online. In: Tesla. Dostupné z: https://www.tesla.com/ownersmanual/modelx/en_us/GUID-E414862C-CFA1-4A0B-9548-BE21C32CAA58.html. [cit. 2024-04-14].
- [34] JEONG, Wonhyeong, Jaeoh HAN, Taesu KIM, Jongseok LEE a Sehoon OH, 2023. Two-Speed Transmission Structure and Optimization Design for Electric Vehicles [online]. 22. prosinec 2023. B.m.: MDPI AG. Dostupné z: doi:10.3390/machines12010009
- [35] Breaking: Tesla has a solution for their transmission woes: get rid of it!, 2008. Online. Autoblog. Dostupné z: https://www.autoblog.com/2008/01/23/breaking-tesla-has-a-solution-for-their-transmission-woes-get/?guccounter=1&guce_referrer=aHR0cHM6Ly93d3cuZ29vZ2x1LmNvbS8&guce_referrer_sig=AQAAANR-pee9QfHArHgm9AA9EpefinuzHxsIMdzAgGEHsdXL2I9JmqTWkKHV_jtNzxFtqffO8g-rnYyD1PTQpq2sQzggvSz3VDub8ALcYIBF-qlDAP1EgbC1fqMj4OzMoNpHEg7sO57gJ8zhGw_NiF3LcXtYtNm_9-LTGqDEbyZzlSVn. [cit. 2024-04-12].
- [36] The powertrain, b.r.. Online. In: Porsche. Dostupné z: <https://media.porsche.com/mediakit/taycan/en/porsche-taycan/der-antrieb>. [cit. 2024-04-13].
- [37] Porsche Taycan 2-Speed Rear Transaxle: Performance Modeled, 2019. Online. In: InsideEVs. Dostupné z: <https://insideevs.com/news/343827/porsche-taycan-2-speed-rear-transaxle-performance-modeled/>. [cit. 2024-04-13].
- [38] An Extremely Detailed Look At The Porsche Taycan's Engineering Designed To Take On Tesla, 2022. Online. Jalopnik. Dostupné z: <https://jalopnik.com/an-extremely-detailed-look-at-the-porsche-taycans-engin-1837802533>. [cit. 2024-05-08].
- [39] DO ELECTRIC CARS HAVE TRANSMISSIONS, 2023. Online. In: Mazda USA. Dostupné z: <https://www.mazdausa.com/resource-center/do-electric-cars-have-transmissions>. [cit. 2024-04-14].

- [40] Does Tesla Have Transmission? No Standard Transmission, 2023. Online. In: Electricgear. Dostupné z: <https://electricgear.com/does-tesla-have-transmission/>. [cit. 2024-04-15].
- [41] Co je to bezestupňová převodovka (CVT) a jak funguje?, 2023. Online. In: Moto Focus. Dostupné z: <https://motofocus.cz/technika/79528,co-je-to-bezestupnova-prevodovka-cvt-a-jak-funguje-jaky-olej-pouzivat-pro-prevodovku-cvt>. [cit. 2024-04-15].
- [42] Understanding the Toyota RAV4 Hybrid [@WeberAuto], 2021. Online. 2021. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=O61WihMRdjM&ab_channel=WeberAuto. [cit. 2024-04-15].
- [43] What is CVT, b.r.. Online. In: Edmunds. Dostupné z: <https://www.edmunds.com/car-technology/cvt-enters-the-mainstream.html>. [cit. 2024-04-15].
- [44] WANG, T, Z CHEN, J Y XU, F Y WANG a H M LIU, 2017. Energy-saving management modelling and optimization for lead-acid battery formation process [online]. listopad 2017. B.m.: IOP Publishing. Dostupné z: doi:10.1088/1755-1315/93/1/012015
- [45] Matlab, b.r.. Online. Humsoft. Dostupné z: <https://www.humusoft.cz/matlab/details/>. [cit. 2024-04-22].
- [46] Mathwork, 1994. Online. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>. [cit. 2024-05-14].
- [47] Simscape, https://www.mathworks.com/?s_tid=gn_logo. Online. Mathworks. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/products/simscape.html>. [cit. 2024-04-24].
- [48] Toyota – lídr hybridní technologie, 2017. Online. Automobilrevue. Dostupné z: https://www.automobilrevue.cz/rubriky/testy/predstavujeme/toyota-lidr-hybridni-technologie_46087.html. [cit. 2024-05-08].
- [49] Model 3 – návod k obsluze, 2024. Online. Tesla. Dostupné z: https://www.tesla.com/ownersmanual/model3/cs_cz/. [cit. 2024-05-09].
- [50] How much horsepower does the new Tesla Roadster have?, 2021. Online. In: Quora. Dostupné z: <https://www.quora.com/The-new-Tesla-Roadster-7-400-lb-ft-has-about-7x-more-torque-than-the-P100D-960-lb-ft-Does-it-also-have-7x-more-horsepower-The-P100D-has-588-WHP-Does-that-mean-the-new-Roadster-has-over-4-000-WHP-Does-the-of-motors-change-the-scaling>. [cit. 2024-05-09].
- [51] Motor XP, b.r.. Online. Dostupné z: <https://motorxp.com/#motorrpm>. [cit. 2024-05-11].

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

AC		Alternating current
BEMF		Back electromotive force
BEV		Battery electric vehicle
C_D	[-]	Koeficient tření
CVT		Continuously Variable Transmission
DC		Direct current
FCEV		Fuel cell electric vehicle
HEV		Hybrid electric vehicle
I	[A]	Proud procházející státorem
IGBT		Insulated gate bipolar transistor
IGCT		Integrated gate-commutated thyristor
IPM		Interior permanent magnet
IPMSM		Interior permanent magnet synchronous machine
L	[m]	Délka vodiče
m	[-]	Počet fází statoru
PHEV		Plug-in hybrid electric vehicle
PM		Permanent magnet
PMSM		Permanent magnet synchronous machine
R	[Ω]	Odpor jedné fáze statoru
r	[m]	Průměr rotoru
RPM		Rotates per minute [min ⁻¹]
S	[m ²]	Průřez vodiče
SPM		Surface-mounted permanent magnet
SPMSM		Surface-mounted permanent magnet synchronous machine
ΔP_N	[W]	Ztráty v mědi
ΔW	[W]	Ventilační ztráty
λ	[m]	Délka rotoru
σ	[S]	Vodivost