



Účinnost hnacího ústrojí elektrických vozidel

Disertační práce

Studijní program:

P2302 Stroje a zařízení

Studijní obor:

Konstrukce strojů a zařízení

Autor práce:

Ing. Josef Břoušek

Školitel práce:

prof. Dr. Ing. Pavel Němeček
Katedra vozidel a motorů



Prohlášení

Prohlašuji, že svou disertační práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé disertační práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má disertační práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

15. prosince 2021

Ing. Josef Břoušek

Účinnost hnacího ústrojí elektrických vozidel

Abstrakt

Disertační práce se zabývá problematikou účinnosti hnacího ústrojí elektrických vozidel. Současný vývoj a výzkum hnacích ústrojí elektrických vozidel je soustředěn na dosažení velmi vysoké účinnosti hnacího ústrojí. Disertační práce přináší do této problematiky nástroje pro detailní vyhodnocování účinnosti elektrických hnacích ústrojí a jeho součástí. Práce je zaměřena na vyhodnocování účinnosti elektromotoru pomocí matematického modelu a experimentálního měření, měření účinnosti převodovky elektrického vozidla a vyhodnocování celkové účinnosti hnacího ústrojí pomocí simulačního modelu vozidla a experimentálního měření. Součástí práce jsou detailní výsledky z provedených simulací a měření účinnosti elektrického hnacího ústrojí.

Klíčová slova: elektrické vozidlo, účinnost, hnací ústrojí, elektromotor, pmsm, elektromobil, model účinnosti, měření účinnosti

Powertrain efficiency of electric vehicles

Abstract

The dissertation deals with the powertrain efficiency of electric vehicles. The current research and development of electric vehicle powertrains is focused on achieving very high powertrain efficiency. This dissertation introduces tools for detailed evaluation of the electric powertrains efficiency and its components. The thesis focuses on evaluating the efficiency of the electric motor using a mathematical model and experimental measurements, measuring the efficiency of the electric vehicle transmission, and evaluating the overall powertrain efficiency using a vehicle simulation model and experimental measurements. The work includes detailed results from the simulations and measurements of the electric powertrain efficiency.

Keywords: electric vehicle, efficiency, powertrain, electric motor, pmsm, electric vehicle, efficiency model, efficiency measurement

Poděkování

Rád bych poděkoval mému školiteli prof. Dr. Ing. Pavlu Němečkovi za odborné vedení při řešení mé disertační práce a během celého mého doktorského studia. Doc. Ing. Pavlu Rydlovi, Ph.D. děkuji za cenné připomínky a odborné konzultace k tématu mé disertační práce. Vedoucímu katedry vozidel a motorů Ing. Robertu Voženílkovi, Ph.D. děkuji za poskytnuté zázemí katedry vozidel a motorů a laboratoře pohonných jednotek s náležitě profesionálním vybavením. Všem nejbližším spolupracovníkům děkuji za přátelské vztahy a za výpomoc při realizaci experimentálních měření v laboratoři pohonných jednotek.

Obsah

Seznam zkratek a symbolů	7
1 Úvod	10
2 Přehled o současném stavu problematiky	12
2.1 Komentovaná rešerše k tématu disertační práce	12
2.2 Uspořádání hnacích ústrojí vozidel s elektrickým pohonem	14
2.3 Trakční elektromotory vhodné pro hnací ústrojí vozidel	16
2.4 Matematické modely PMSM	21
2.5 Shrnutí současného stavu problematiky	34
3 Cíle disertační práce	36
4 Matematický model PMSM s výpočtem účinnosti	39
4.1 Matematický model PMSM při uvažování vlivu Jouleových ztrát a ztrát v železe	39
4.2 Stanovení parametrů pro model trakčního motoru Zero Motorcycles ZF 75-7	42
4.2.1 Stanovení ekvivalentního odporu pro modelování ztrát v železe	42
4.2.2 Měření odporu statorového vinutí	43
4.2.3 Měření napěťové konstanty a určení spřaženého magnetického toky permanentních magnetů	43
4.2.4 Měření indukčnosti vinutí	44
4.2.5 Shrnutí parametrů trakčního motoru Zero Motorcycles ZF 75-7	46
4.3 Výsledky účinnosti modelu motoru Zero Motorcycles ZF 75-7	47
5 Experimentální měření účinnosti trakčního PMSM	49
5.1 Metodika měření účinnosti PMSM	49
5.2 Výsledky měření účinnosti PMSM	52
5.3 Porovnání výsledků měření účinnosti PMSM s matematickým modelem	55
6 Dílčí shrnutí první části disertační práce	57
7 Simulační model vozidla s elektrickým hnacím ústrojím	58
7.1 Popis simulačního modelu vozidla s elektrickým hnacím ústrojím . . .	58
7.2 Simulace vozidla s elektrickým hnacím ústrojím	61

7.3	Výsledky účinnosti hnacího ústrojí vozidla s elektrickým hnacím ústrojím ze simulačního modelu	63
8	Experimentální hnací ústrojí elektrického vozidla	66
9	Měření účinnosti převodovky elektrického vozidla	67
9.1	Výsledky měření účinnosti převodovky	69
10	Experimentální měření účinnosti hnacího ústrojí elektrického vozidla	73
10.1	Metodika měření účinnosti hnacího ústrojí elektrických vozidel	73
10.2	Měření mapy účinnosti hnacího ústrojí	77
10.3	Vstupní data pro měření účinnosti hnacího ústrojí na jízdách cyklech	80
10.4	Měření účinnosti na jízděm cyklu NEDC se sníženou maximální rychlostí vozidla na 100 km/h	80
10.5	Měření účinnosti na jízděm cyklu WLTC class 2	83
10.6	Porovnání výsledků měření účinnosti hnacího ústrojí s výsledky účinnosti ze simulačního modelu	85
11	Dílčí shrnutí druhé části disertační práce	89
12	Shrnutí metodiky vyhodnocování účinnosti hnacího ústrojí elektrických vozidel	90
13	Výsledky disertační práce	92
14	Zhodnocení výsledků disertační práce	93
14.1	Zhodnocení výsledků pro vědní obor	93
14.2	Zhodnocení výsledků pro praxi	94
15	Doporučení na pokračování práce v daném tématu a oboru	95
16	Závěr	97
	Seznam použité literatury	100
	Seznam publikací autora souvisejících s řešenou problematikou	104
	Seznam ostatních publikací autora	106
	Seznam funkčních vzorků autora	107
	Seznam užitých vzorů a patentů autora	107

Seznam zkratek a symbolů

CNG	Compressed natural gas, stlačený zemní plyn
CTA	Constant Torque Angle
GPS	Globální polohový systém
IM	Asynchronní motor
LPG	Liquefied petroleum gas, zkapalněný ropný plyn
M	Točivý moment
MTPA	Maximal Torque Per Amper, metoda maximálního momentu na jednotku proudu
NEDC	New European Driving Cycle, nový evropský jízdní cyklus
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor, synchronní motor s permanentními magnety
SRM	Reluktanční motor
TUL	Technická univerzita v Liberci
WLTC	Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycles, celosvětový harmonizovaný zkušební cyklus pro lehká vozidla
WLTP	Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure, celosvětově harmonizované zkušební postupy pro lehká vozidla
α	Úhel podélného sklonu vozovky
ΔP_m	Mechanické ztráty
ΔP_{Cu}	Ztráty v mědi (ve vinutí)
ΔP_{Fe}	Ztráty v železe
ΔP_{mech}	Mechanické ztráty
η	Účinnost motoru
η_p	Účinnost převodovky celková
η_C	Účinnost měniče
η_D	Účinnost elektrického pohonu
η_{hu}	Účinnost hnacího ústrojí bez měniče
η_{huC}	Účinnost měniče
η_{huCel}	Účinnost hnacího ústrojí celková (včetně měniče)
η_{PMSM}	Účinnost motoru
i_{0d}	Budící proud v ose d
i_{0q}	Budící proud v ose q
L_d	Indukčnost v ose d
L_q	Indukčnost v ose q
ω	Úhlová frekvence, úhlová rychlost elektrická
ω_{p1}	Vstupní úhlová rychlost převodovky

ω_{p2}	Výstupní úhlová rychlost převodovky
Φ	Magnetický tok
Φ_B	Magnetický tok vyvolaný magnety
ψ_d	Magnetický tok v ose d
ψ_q	Magnetický tok v ose q
a_V	Zrychlení vozidla
B_m	Velikost plochy hysterezní smyčky pole
D_1	Vnitřní průměr statoru
D_e	Vnější průměr motoru
F_B	Brzdná síla
F_T	Trakční síla generovaná od jednotlivých pneumatik
F_V	Odpor vzduchu
F_Z	Tažná zátěž
g	Gravitační zrychlení
I_1	Prostorový vektor statorového proudu
I_d	Tokotvorná složka proudu
i_d	Složka proudu ve směru osy d
I_q	Momentotvorná složka proudu
i_q	Složka proudu ve směru osy q
I_S	Proud statorovým vinutím motoru
I_{Smax}	Maximální proud statorovým vinutím motoru
K_c	Materiálová konstanta - ztráty vířivými proudy
K_e	Materiálová konstanta - ztráty dodatečné
k_e	Napěťová konstanta motoru
K_h	Materiálová konstanta - hysterezní ztráty
L	Celková délka statoru
L_d	Indukčnost statorového vinutí ve směru osy d
L_q	Indukčnost statorového vinutí ve směru osy q
M_{p1}	Vstupní točivý moment převodovky
M_{p2}	Výstupní točivý moment převodovky
P_δ	Výkon ve vzduchové mezeře
P_{p1}	Příkon na vstupu převodovky
P_{p2}	Výkon na výstupu převodovky
P_1	Činný příkon motoru
P_2	Užitečný výkon na hřídeli motoru
P_C	Výkon měniče
P_d	Dodatečné ztráty

P_{DC}	Příkon elektrického pohonu
P_{hu1}	Příkon hnacího ústrojí
P_{huC}	Výkon měniče
P_{huM}	Mechanický výkon na výstupu hnacího ústrojí
P_{mech}	Mechanický výkon
P_{PMSM}	Mechanický výkon na hřídeli elektromotoru
R_i	Ekvivalentní odpor ztrát v železe
R_s	Ztráty v mědi pomocí odporu
U_d	Průmět fázoru statorového napětí do osy d
U_q	Průmět fázoru statorového napětí do osy q
v	Obvodová rychlost rotoru
v_V	Rychlost vozidla
x_V	Pozice vozidla

1 Úvod

V odborné literatuře bylo již zdokumentováno (např. v [36] a v řadě dalších), že lidstvo svými aktivitami spalováním fosilních paliv negativně ovlivňuje zvyšující koncentraci CO_2 a dalších skleníkových plynů v atmosféře. Tato zjištění přináší všeobecné obavy o zvyšování průměrné teploty na Zemi mimo přirozenou variabilitu teplotních změn na Zemi již během následujícího století. Přičemž CO_2 má největší nárůst koncentrace ze všech skleníkových plynů, a proto je to také plyn, kterým lidstvo svým působením na zemi zřejmě nejvíce ovlivňuje klimatické změny a je to tedy oblast, kterou by se lidstvo mělo zřejmě blíže zabývat [36]. Především tyto popsání trendy zvyšování emisí CO_2 v atmosféře jsou důvodem k probíhajícímu celosvětovému zpřísnování regulovaných limitů na emise a spotřebu paliva vozidel. Vzhledem k neustálému zpřísnování regulovaných limitů na emise a spotřebu paliva vozidel je v posledních letech pozornost výrobců vozidel, vlád a zákazníků směřovaná na vozidla s alternativními hnacími ústrojími jako jsou především vozidla s elektrickým, hybridním a vodíkovým hnacím ústrojím. Výzkum a vývoj je zaměřován na nové koncepty pohonů, systémy umožňující větší dostupnost známých technologií z hlediska finanční dostupnosti a na spolehlivost těchto pohonů [2]. Hlavními tématy v případě elektrických vozidel je oblast témat okolo prodloužení dojezdu vozidla na jedno nabití baterie, dosažení vyššího výkonu a vyšší účinnosti hnacího ústrojí [28].

Současná společnost je tedy na počátku tzv. zásadní transformace současné mobility na mobilitu udržitelnou, jejíž cílem je výrazné snížení emisí a dosažení co nejvyšší udržitelnosti a tedy i snížení závislosti dopravy na fosilních palivech v součinnosti s úsilím o nulové znečištění [14]. Na trhu se objevují jedny z prvních sériově vyráběných elektrických vozidel, které jsou již produkovány ve velkých množstvích, s ambicemi nabízet dostatečnou užitnou hodnotu pro koncové uživatele. Současně adopce elektrických vozidel koncovými uživateli oproti vozidlům se spalovacími motory podle současných odhadů nepostupuje příliš rychle. Před vývojem a výzkumem v oblasti elektrických vozidel tedy stojí stále velmi obtížný úkol, tedy dosažení takových parametrů těchto vozidel, které by uspokojily koncové uživatele v oblasti dostatečných výkonových parametrů, ale především také aby dosáhly dostatečné účinnosti hnacího ústrojí, které se u uživatelů projeví skutečností, že vozidla bude možné provozovat s nižší energetickou spotřebou. Zvýšením dosahované účinnosti elektrického hnacího ústrojí v reálném provozu vozidla lze dosáhnout vyššího dojezdu vozidla na jedno nabití baterie, nebo případně tato skutečnost umožňuje snížení požadavku na velikost kapacity baterie ve vozidle, čímž lze dosáhnout například snížení hmotnosti vozidla a také i snížení finanční náročnosti na pořízení takového

vozidla.

Zvýšení dosahované účinnosti elektrických hnacích ústrojí ve vozidlech může být tedy poměrně výrazným nástrojem, který by mohl společnosti pomoci při přechodu na udržitelnou mobilitu a mohl by tak snížit potřebnou dobu pro dosažení uhlíkové neutrality v sektoru silniční dopravy. Tato skutečnost je současně i hlavním motivem mé disertační práce, kterou zaměřuji na experimentální a simulační vyhodnocování vlastností hnacího ústrojí elektrických vozidel se zaměřením na problematiku účinnosti hnacího ústrojí a jeho součástí.

2 Přehled o současném stavu problematiky

Cílem této kapitoly je popsat současný stav problematiky hnacích ústrojí elektrických vozidel na základě posouzení výsledků získaných z provedené rešerše na toto téma a na základě analýzy používaných hnacích ústrojí v konvenčně vyráběných elektrických vozidlech.

2.1 Komentovaná rešerše k tématu disertační práce

Na začátku řešení své disertační práce jsem prohledal dostupné informační zdroje se zaměřením na problematiku hnacích ústrojí elektrických vozidel. Na základě těchto získaných a posouzených informací jsem následně vypracoval tuto kapitolu o současném stavu problematiky. Informace jsem vyhledával pomocí postupné volby vhodných klíčových slov a dále pomocí nalezené sítě citovaných článků na dané téma s postupným zaměřením na účinnost hnacího ústrojí elektrických vozidel.

Výzvy ve výzkumu a vývoji elektrických vozidel

I přesto, že již některé komerční elektrické vozy jsou již dostupné na trhu vozidel, stále je v tomto tématu mnoho výzev a možností ve vývoji a v přechodu na elektrická vozidla oproti vozidlům se spalovacím motorem. Autor [3] ve své publikaci uvádí, že elektrická vozidla mají potenciál poskytnout nulové emise během provozu na pozemních komunikacích a velmi nízké celkové emise, pokud se do celkového výpočtu zahrne i výroba elektrické energie. Současně konstatují, že stále mezi hlavní výzvy ve vývoji těchto vozidel patří omezený dojezd vozidla na jedno nabití (při porovnání s vozidlem se spalovacím motorem), vysoká počáteční cena vozidla a nedostatek dobíjecí infrastruktury.

Autoři článku [6] na základě provedeného průzkumu zmiňují skutečnost, že výrobci vozidel jsou velmi konzervativní v implementaci nových technologií. Většina elektrických vozidel dostupných na trhu využívá v hnacím ústrojí jeden asynchronní nebo synchronní motor s permanentními magnety s tradičním uspořádáním v kombinaci s jednostupňovou převodovkou s mechanickým diferenciálem. Celkový návrh elektrických vozidel následuje dva rozdílné směry. Jedním směrem je návrh vozidel pro dojíždění na krátké vzdálenosti, kdy jsou použity menší baterie s menší hmotností, s menším dojezdem na jedno nabití a maximální rychlost je omezena pro městskou dopravu. Druhým směrem jsou naopak vozidla s delším dojezdem na jedno nabití, který je dosahován bateriemi s vysokou kapacitou. Článek ukazuje, že porov-

nání mezi různými elektrickými motory použitými v hnacích ústrojích elektrických vozidel je obtížná a komplexní záležitost, kterou komplikuje velké množství parametrů motorů a nedostatek doporučené nebo standardizované metodiky měření. Autoři navrhuji pro efektivní porovnávání a vyhodnocování hnacích ústrojí elektrických vozidel experimentální testování ústrojí na standardizovaném jízdním cyklu nebo jinou standardizovanou metodu měření účinnosti. Takovou metodu nebo metodiku jejich článek již ale nenavrhuje ani nepopisuje.

Vyhodnocování účinnosti hnacích ústrojí elektrických vozidel

V rámci vyhodnocování účinnosti hnacího ústrojí elektrických vozidel je v době začátku řešení mé disertační práce možné nalézt v literatuře práce, které se soustředí na vyhodnocování účinnosti pomocí simulací a experimentálních měření. Problematiku vyhodnocování účinnosti hnacích ústrojí elektrických vozidel blíže popisují vybrané publikace v této kapitole.

Autoři článku [11] uvádějí skutečnost, že jedním z nejdůležitějších výzkumných témat v oblasti uspořádání hnacích ústrojí elektrických a hybridních vozidel je analýza účinnosti hnacího ústrojí a jeho jednotlivých součástí. Článek se pomocí simulace a experimentu věnuje porovnávání dvou různých topologií zapojení měniče se zaměřením na analýzu účinnosti. Ve svém experimentu použili testovací stanoviště s dynamometrem řízeným pomocí řídicího systému, ke kterému byl napřímo připojen měřený PMSM. Pro měření potřebných veličin autoři použili dva výkonové analyzátoři. Výsledky autoři prezentují ve formě map účinností pro měniče, motor a pro celý pohon, na základě kterých vyhodnocují přínosy jednotlivých topologií zapojení měniče. Autoři uvádějí, že na základě jejich rešerše je v dostupné literatuře nedostatek výzkumu detailního analyzování účinnosti různých hnacích ústrojí.

Další autoři se ve svém článku [8] věnovali účinnosti hnacího ústrojí komerčního elektrického vozidla Tazzari Zero. Svou pozornost soustředili na vývoj modelu pro odhad účinnosti hnacího ústrojí elektrického vozidla bez nutnosti znalosti potřebných parametrů vozidla s využitím měření na vozidle. V rámci svého vývoje prezentovali měření účinnosti hnacího ústrojí ve formě mapy účinnosti z měření během reálné testovací jízdy vozidla. Autoři ve vozidle měřili blíže nespécifikovaným způsobem elektrický proud a napětí baterie. Pomocí GPS měřili stoupání a rychlost vozidla. Měřená data ukládali každou 0,5 s. Experimentální jízdy vozidla byly provedeny v městské oblasti i na širokém rozsahu rychlosti vozidla a provozního zatížení. Trakční síla vozidla byla určena v post-procesu v závislosti na dostupných parametrech vozidla a provozních podmínkách. Účinnost hnacího ústrojí byla následně stanovena pro všechny potřebné body rychlosti vozidla a trakční síly, které byly zapotřebí k sestavení mapy účinnosti hnacího ústrojí. V závěru článku autoři uvedli porovnání výsledků spotřeby energie z baterie mezi výsledky z modelu v softwaru MATLAB Simulink a z experimentálního měření během jízdy vozidla s rozdílem 4,7 %, který autoři považovali za přijatelný vzhledem k použitým přesnostem senzorů a použitým předpokladům při tvorbě modelu. Pro budoucí práce autoři zmiňují využití této metody s větším počtem provozních bodů, které by tak pokryly širší oblast na mapě účinnosti.

Autoři článku [35] publikovali výsledky experimentální analýzy účinnosti a dojezdu elektrického vozidla se zaměřením na vyhodnocování optimální volby velikosti převodového poměru převodovky. Autoři uvádí, že vzhledem k variabilitě okolních podmínek při provozu vozidla, je měření spotřeby energie elektrických vozidel komplexní a poměrně složitá záležitost. Proto jsou pro experimentální testování vozidel na jízdních cyklech standardně využívány válcové zkušebny, na kterých je možné pro elektrická vozidla provádět analýzy dojezdu a spotřeby energie. Autoři provedli jízdní testy s vozidlem Ford Focus EV ve válcové zkušebně. Pro sběr potřebných dat autoři využili jednotku pro sběr dat od National Instruments v kombinaci s vlastním řešením postaveném na aplikaci vytvořené v LabVIEW. Potřebné měřené veličiny na baterii vozidla měřili pomocí měřicí jednotky energie TBS Electronics BV. Toto řešení umožnilo stanovit potřebnou spotřebu energie. Na základě provedených měření na jízdním cyklu NEDC následně porovnávali rozdíly ve spotřebě energie a dojezdu pro různé varianty převodovky.

V rámci homologačního procesu se pro vozidla s elektrickým hnacím ústrojím provádí standardizované měření spotřeby elektrické energie a elektrického akčního dosahu. Tento postup je stanoven nařízením evropské komise 2017/1151 [12] a vychází z procedury WLTP. Na začátku zkoušky je baterie vozidla plně nabita. Vozidlo je podrobena jízdě na jízdním cyklu WLTC (vývoj tohoto jízdního cyklu byl blíže popsán v článku [31]) a ihned po testu je vozidlo připojeno k dobíjecí stanici, u které je dobíjecí kabel vybaven měřením celkového množství elektrického proudu. Výsledná hodnota spotřeby elektrické energie v jednotkách Wh/km je získána vydělením celkového množství elektrického proudu pomocí dosažené ujeté vzdálenosti vozidla. [16]

2.2 Uspořádání hnacích ústrojí vozidel s elektrickým pohonem

Tato kapitola vychází z informací o uspořádání hnacích ústrojí vozidel s elektrickým pohonem uvedených v publikaci [37]. Vlastnosti elektromotorů, kterými se liší elektromotory od spalovacích motorů, umožňují vyvíjet lehké, kompaktní a vysoce účinné hnací ústrojí vozidel. Těmito důležitými vlastnostmi jsou především: produkce vysokého točivého momentu při nízkých otáčkách motoru, široké otáčkové spektrum a možnost úplného zastavení otáček a tím tedy i eliminace potřeby volno běhu při zastavení vozidla.

Volba uspořádání hnacího ústrojí vyžaduje zvažování především těchto požadavků: pohon kol jedné nápravy - pohon předních kol, zadních kol nebo pohon všech čtyřech kol; počet elektromotorů ve vozidle a počet rychlostních stupňů převodovky. Na základě kombinací těchto požadavků je možné vytvořit následující tři základní typy uspořádání hnacího ústrojí elektrických vozidel, které umožňují vytváření dalších variant těchto uspořádání. Volba počtu elektromotorů hnacího ústrojí i použití převodovky s větším počtem rychlostních stupňů mají podle prostudovaných prací potenciál dosažení zvýšení účinnosti hnacího ústrojí.

A. Konvenční typ hnací ústrojí elektrických vozidel

Nejvyužívanějším hnací ústrojí v současných elektrických vozidel je uspořádání s jedním elektromotorem a jednou mechanickou hřídelovou převodovkou s jedním rychlostním stupněm a s mechanickým diferenciálem. Vzhledem ke skutečnosti hojného využití v současnosti bude toto uspořádání hnacího ústrojí v dále v této práci označované jako konvenční hnací ústrojí elektrických vozidel. Toto uspořádání vychází z typického uspořádání hnacího ústrojí vozidel se spalovacím motorem, které je běžně složeno ze spalovacího motoru - spojky - převodovky s mechanickým diferenciálem - příčnými hnacími hřídeli připojenými ke hnaným kolům vozidla. V elektrickém vozidle je spalovací motor nahrazen elektromotorem a převodovka má obvykle pouze jeden redukční rychlostní stupeň a mechanický diferenciál. Jednodušší varianta tohoto uspořádání je čisté nahrazení spalovacího motoru elektromotorem a využití původní vícerychlostní převodovky. Toto řešení dnes již ale v sériové výrobě elektrických vozidel není využíváno a objevuje se již pouze v některých přestavbách užitkových vozidel nebo v experimentálních vozidlech.

B. Hnací ústrojí elektrických vozidel se dvěma elektromotory

Možnost použít v hnacím ústrojí více motorů než pouze jeden jako v případě většiny vozidel se spalovacím motorem přináší do elektrických vozidel mnoho dalších variant uspořádání hnacích ústrojí. Již při použití dvou elektromotorů je možné vytvořit několik různých uspořádání.

Pro uspořádání hnacího ústrojí s pohonem kol jedné nápravy je první variantou použití hřídelové převodovky s jedním rychlostním stupněm, která má dva vstupy pro dva elektromotory na vstupním hřídeli. Tato varianta pak může být použita buď s mechanickým diferenciálem pro distribuci točivého momentu mezi dvě hnaná kola nebo bez mechanického diferenciálu, kdy je distribuce točivého momentu na dvě hnaná kola řízena elektronickým řídicím systémem pohonu. Ve variantě bez mechanického diferenciálu slouží každý ze dvou elektromotorů k pohonu jednoho hnaného kola vozidla.

Další možností je využití dvou elektromotorů pro pohon kol jedné hnané nápravy ve variantě, kdy není použita ani jedna hřídelová převodovka a každý elektromotor je k hnanému kolu připojen buď přímo příčným hnacím hřídelem nebo s využitím planetové převodovky. V obou těchto uvedených případech jsou elektromotory pevně uloženy k rámu nebo karoserii vozidla.

Speciální aplikací dvou elektromotorů je potom použití dvou tzv. kolových elektromotorů, které jsou umístěny přímo v hnaném kole a slouží zároveň jako ložisko kola. Podle typu použitého elektromotoru tato hnací ústrojí buď obsahují planetové převodovky nebo jsou zcela bez mechanických převodů. V tomto případě hnacího ústrojí jsou často tyto elektromotory uloženy ve vozidle pružně na nápravovém odpružení vozidla.

Variantou se dvěma elektromotory jsou tvořeny také uspořádání hnací ústrojí s pohonem kol dvou náprav, kdy jeden elektromotor slouží pro pohon kol přední nápravy a druhý elektromotor je použit pro pohon kol zadní nápravy vozidla.

V těchto uspořádáních jsou často využívány hřídelové převodovky s mechanickým diferenciálem a jedním rychlostním stupněm.

C. Hnací ústrojí elektrických vozidel s více než dvěma elektromotory

Počet elektromotorů v hnacím ústrojí vozidla teoreticky není omezen a jsou vyvíjena i hnací ústrojí s více než dvěma elektromotory. Vznikají tak kombinace variant uspořádání hnacích ústrojí uvedených v předchozí části této kapitoly. Jedná se většinou o použití uspořádání pro pohon kol dvou náprav.

Tři elektromotory mohou tvořit uspořádání, ve kterém jsou dva motory použity pro pohon kol jedné nápravy a třetí motor pohání kola druhé nápravy, přičemž motory obou náprav jsou většinou použity s redukčními převodovkami s mechanickými diferenciály.

Poslední možná uspořádání hnacího ústrojí jsou tvořena čtyřmi elektromotory, přičemž každý motor slouží k pohonu jednoho kola. Varianty tohoto uspořádání se pak liší podobně jako je uvedeno v předchozí části této kapitoly u hnacího ústrojí se dvěma elektromotory. Hnací ústrojí mohou nebo nemusejí využívat převodovky bez mechanických diferenciálů a elektromotory jsou opět buď pevně uloženy v rámu nebo karoserii vozidla nebo jsou umístěny přímo v kolech vozidla.

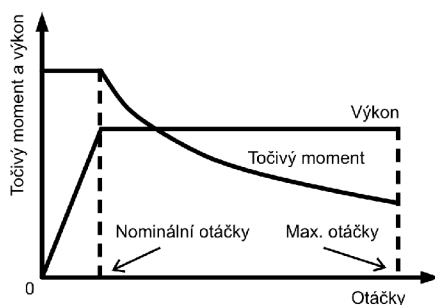
2.3 Trakční elektromotory vhodné pro hnací ústrojí vozidel

Texty této kapitoly vycházejí z informací uvedených v publikacích [37], [38], [4] a [6]. Vlastnosti hnacích ústrojí s elektrickými motory se oproti hnacím ústrojím s konvenčními spalovacími motory liší především dostupností vysokého točivého momentu v nízkých otáčkách, širokým spektrem otáčkových variant a nepotřebností volnoběhu motoru při zastavení vozidla. Potenciál vlastností elektromotorů umožňuje vyvinout nové hnací ústrojí, které budou lehčí, kompaktnější a budou dosahovat velmi vysoké účinnosti.

Požadavky na hnací ústrojí vozidla obecně vycházejí z požadovaných provozních požadavků a schopností jednotlivých typů vozidel. Obecně se schopnosti vozidel určují podle dosažované akcelerace, která je vyhodnocována na základě času potřebného k dosažení určité rychlosti z rychlosti nulové nebo z určité nenulové nízké rychlosti. Další schopnost je určována požadavkem na stoupání vozidla, které je definováno maximálním stoupáním vozovky, které je vozidlo schopné při určité rychlosti překonávat. Do základních požadavků patří také dosažovaná maximální rychlost vozidla. Společně s těmito schopnostmi, které je možné vyjádřit číselně, je důležité, aby pohon vozidla umožňoval jízdu konstantní rychlostí.

Z předchozích požadavků na pohon vozidla vychází požadovaná momentová charakteristika hnacího ústrojí vozidla s elektrickým motorem znázorněná na obrázku 2.1. Z požadované charakteristiky je patrné, že se od elektromotoru požaduje dosa-

žení vysokého točivého momentu v nízkých otáčkách pro akceleraci vozidla při rozjezdu a dosažení vysokého výkonu pro jízdu ve vyšších rychlostech. Zároveň oblast otáček pod konstantním výkonem je požadována co nejširší. Oproti tomu požadavky na elektromotory využívané v průmyslových aplikacích často požadují široký rozsah konstantního točivého momentu z nulových otáček motoru. Poměr rozsahu konstantního točivého momentu a rozsahu konstantního výkonu motoru záleží primárně na typu elektromotoru a na strategii jeho řízení.



Obrázek 2.1: Požadovaná momentová charakteristika trakčního elektromotoru

Z předchozích popsaných informací můžeme vyčíst, že volba typu elektromotoru pro pohon vozidla je velmi důležitým krokem, který zásadně ovlivňuje dosahované vlastnosti vozidla. V literatuře [10] a [39] se uvádí, že automobilový průmysl stále hledá ten nejvhodnější elektromotor pro hnací ústrojí vozidel.

Základními požadavky na elektromotor pro hnací ústrojí vozidla jsou podle zdrojů [37] a [34] následující:

1. Vysoký okamžitý výkon a vysoká hustota výkonu
2. Vysoký točivý moment při nízkých otáčkách pro rozjezdy a stoupání, současně vysoký výkon ve vysokých otáčkách pro jízdu ve vyšších rychlostech
3. Velmi široký rozsah otáček s konstantním výkonem
4. Rychlá momentová odezva
5. Vysoká účinnost v širokém spektru otáček s konstantním točivým momentem a konstantním výkonem
6. Vysoká účinnost pro rekuperační brzdění
7. Malá velikost, nízká hmotnost a nízký moment setrvačnosti
8. Vysoká životnost a robustnost pro různé provozní podmínky vozidel
9. Cenová dostupnost
10. Spolehlivost (vysoká odolnost proti poruchám)

V předchozí části této kapitoly byly popsány požadavky na hnací ústrojí vozidel s elektrickým motorem. V současnosti se pro účely hnacích ústrojí vozidel uvažují následující typy trakčních elektromotorů [34], [38]: synchronní motor s buzením permanentními magnety (PMSM), asynchronní motor (IM) a reluktanční motor (SRM). V minulosti byly do hnacích ústrojí elektrických vozidel také aplikovány stejnosměrné motory, nicméně vzhledem k nárůstu požadavků na dosažení vysoké účinnosti, vysoké hustoty výkonu a bezúdržbovému provozu, jsou již tyto motory pro elektrická vozidla považovány jako nevhodné [4].

Asynchronní motory

Asynchronní motory jsou v hnacích ústrojích elektrických vozidel používány pro jejich následující vlastnosti: jednoduchá struktura, spolehlivost, robustnost, malá potřeba údržby, nízká cena a schopnost provozu v nepříznivém prostředí. Mezi nevýhody asynchronních motorů patří nižší dosahovaná účinnost oproti PMSM způsobená vyššími energetickými ztrátami. Nedostatky jsou často řešeny použitím duálních měničů za účelem rozšíření oblasti konstantního výkonu a energetické ztráty jsou snižovány konstrukčními návrhy motorů. [38]

Synchronní motory s permanentními magnety

Synchronní motory s permanentními magnety dosahují oproti asynchronním motorům často vyšší hodnoty hustoty výkonu a účinnosti. Tyto motory mají kratší oblast konstantního výkonu. Tuto skutečnost lze ale ovlivnit použitím vhodného řízení motoru. Použité permanentní magnety v těchto motorech umožňují motoru dosahovat vysokého točivého momentu. Na druhou stranu motoru přinášejí nevýhody v podobě vyšších mechanických sil a zvýšení cen. [38]

Reluktanční motory

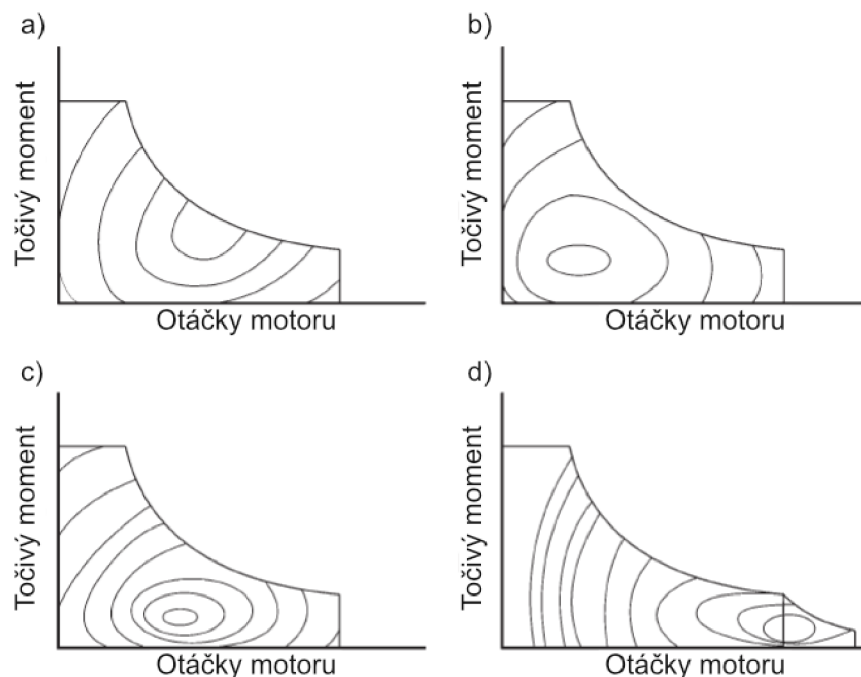
Mezi hlavní výhody reluktančních motorů pro použití v elektrických vozidlech patří: jednodušší řízení, široká oblast konstantního výkonu ve vyšších otáčkách, spolehlivost, robustnost a nižší cena. Dosahovaná účinnost může být srovnatelná s asynchronními motory a oproti PMSM u reluktančních motorů odpadá nutnost použití permanentních magnetů. Díky těmto výhodám lze tyto motory považovat za vhodné motory pro elektrická vozidla. Mezi nevýhody těchto motorů naopak patří akustický hluk, vibrace a nerovnoměrnost dostupného točivého momentu. Tyto vlastnosti je nutné při návrhu a konstrukci motoru pro aplikaci v elektrických vozidlech náročně řešit. [38]

Podle prostudovaných publikací, může být použití synchronních reluktančních motorů v hnacích ústrojích elektrických vozidel velmi perspektivní. Výrobci těchto elektromotorů neustále zvyšují jejich dosahovanou účinnost a současně dochází ke snižování ceny motorů, odpadá nutnost chlazení rotoru a nedochází k odmagnetování magnetů vlivem překročení kritické hodnoty teploty motoru. Další perspektivní

inovací je vývoj v oblasti synchronních reluktančních motorů s podpůrnými magnety.

Účinnost elektromotorů

Účinnost elektromotorů je udávána hodnotou účinnosti v určitém bodu v závislosti na otáčkách motoru a aktuálním točivém momentu motoru [6]. Pro grafické znázornění účinnosti elektromotorů jsou využívány tzv. mapy účinnosti. Dosahované mapy účinnosti jednotlivých typů motorů jsou různé. Odlišují se na základě fyzikálních vlastností jednotlivých typů motorů a jejich konstrukčního řešení. Mapy účinností jednotlivých typů elektromotorů jsou zobrazeny na obr. 2.2. Pokud bychom porovnávali různé typy elektromotorů, které by měly stejnou hodnotu špičkové účinnosti, obecně PMSM dosahují vyšší účinnosti v oblastech vyšších točivých momentů při konstantních otáčkách motoru. Struktura oblastí účinnosti IM je podobná PMSM, nicméně IM dosahují obecně menší plochu oblasti nejvyšší účinnosti. SRM mají oblast nejvyšší účinnosti posunutou do oblastí vyšších otáček motoru, ale účinnost rapidně klesá v oblastech nízkých otáček motoru.



Obrázek 2.2: Mapy účinností pro elektromotory typu a) PMSM s povrchovými permanentními magnety; b) PMSM s vnořenými permanentními magnety; c) asynchronní motor; d) reluktanční motor [6]

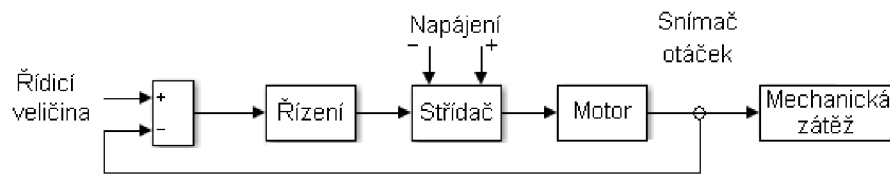
Na obrázku 2.2 je možné pozorovat rozdílnou distribuci jednotlivých hladin účinností. Z obou map PMSM, uvedených na obrázku 2.2 a) a b), je oproti ostatním typům motorů patrné, že tyto motory mohou dosahovat větší oblasti s maximální a vysokou účinností. Tato skutečnost je vítaným benefitem v současnosti hojně používaném konvenčním uspořádání hnacího ústrojí elektrických vozidel s převodovkou

s jedním rychlostním stupněm. Přičemž konstrukčními parametry těchto motorů je možné ovlivňovat polohu oblasti s maximální účinností. Mapa účinnosti asynchronních motorů na obrázku 2.2 c) ukazuje poměrně úzkou oblast maximální a vysoké účinnosti, která bývá situována do oblasti nižších točivých momentů. Mapa účinnosti reluktančních motorů, na obrázku 2.2 d), zobrazuje specifickou distribuci vysoké účinnosti do oblasti vysokých otáček a nízkých točivých momentů, kterou jsou tyto motory schopné dosahovat.

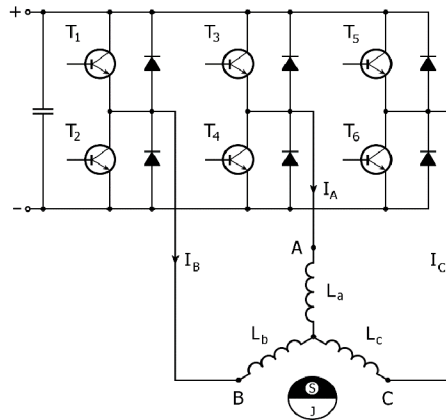
2.4 Matematické modely PMSM

Pro analýzy vlastností elektrických motorů lze vhodně využít adekvátních matematických modelů motorů. Poznatky ze simulací s využitím matematických modelů významně podporují další vývoj a výzkum v oblasti trakčních elektromotorů pro elektrická vozidla. Tato kapitola je proto zaměřena na současný stav matematického modelování PMSM, metod řízení pohonů s PMSM a matematického modelování účinnosti PMSM. Poznatky a informace v této kapitole vycházejí ze studia následujících zdrojů [30], [23], [17], [20], [25], [41].

Matematický model řízení motoru se skládá z části řízení, střídače, motoru a mechanické zátěže. Blokové zapojení řízení PMSM je zobrazeno na obrázku 2.3. Elektrické zapojení střídače je na obrázku 2.4.



Obrázek 2.3: Blokové zapojení řízení PMSM [30]



Obrázek 2.4: Elektrické zapojení střídače [30]

Model motoru je dále možné sestavit z napěťových rovnic na základě náhradního zapojení PMSM zobrazeného na obrázku 2.5.

Napěťové rovnice ve složkovém tvaru v souřadnicích rotujících rychlostí ω jsou pak následující:

$$U_d = R_1 I_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega \Psi_q = R_1 I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega L_q I_q \quad (2.1)$$

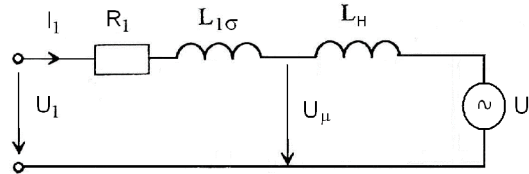
$$U_q = R_1 I_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega \Psi_d = R_1 I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + \omega (L_d I_d + \Phi_B) \quad (2.2)$$

$$\Psi_d = L_d I_d + \Phi_B \quad (2.3)$$

$$\Psi_q = L_q I_q \quad (2.4)$$

$$\Phi_B = \text{konst.} \quad (2.5)$$

kde ω je elektrická úhlová rychlost rotoru a rovněž souřadného systému, L_d a L_q jsou indukčnosti statorového vinutí v podélné a příčné ose a Φ_B je magnetický tok vyvolaný magnety.

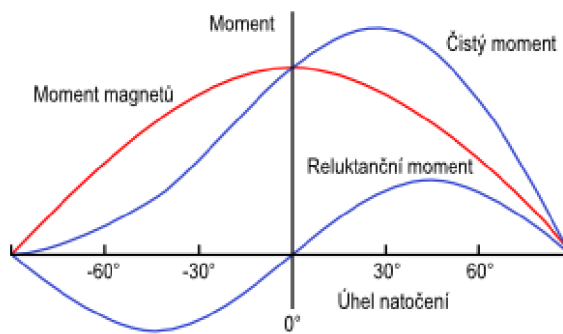


Obrázek 2.5: Náhradní zapojení PMSM [30]

Točivý moment motoru je potom vypočítáván z analyticky odvozeného následujícího vztahu:

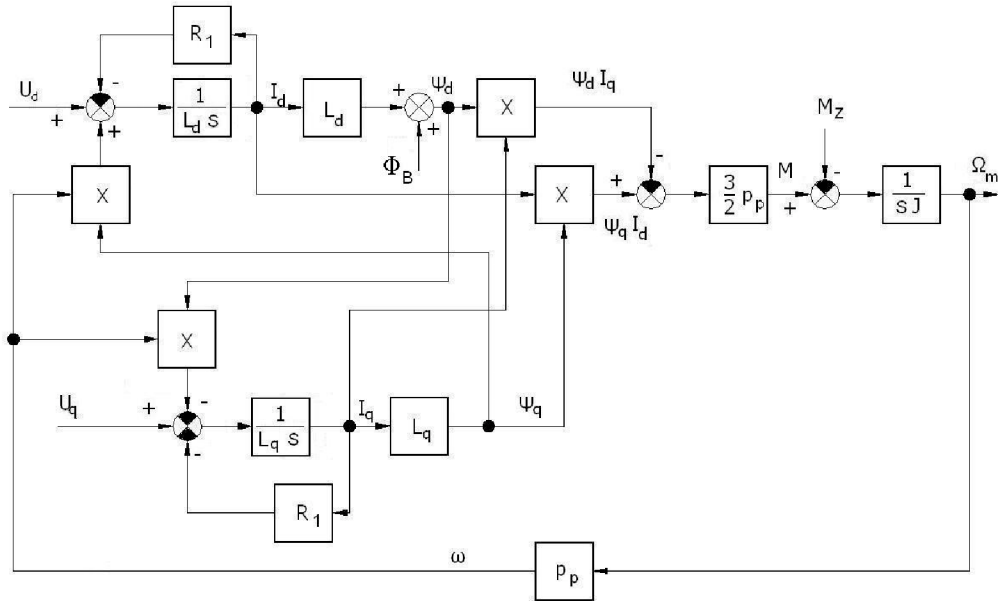
$$M = \frac{3}{2} p_p \text{Im}[\overline{\Psi}_1^* \overline{I}_1] = \frac{3}{2} p_p (\Psi_q I_d - \Psi_d I_q) = \frac{3}{2} p_p [\Phi_B I_q + (L_d - L_q) I_d I_q] \quad (2.6)$$

První součin v hranaté závorce představuje hlavní složku momentu. Druhý výraz je označován jako reluktanční moment a vyskytuje se pouze tehdy, má-li stroj vyniklé póly na rotoru ($L_d \neq L_q$). Závislost momentu na úhlu natočení rotoru je uvedena na obrázku 2.6.



Obrázek 2.6: Závislost točivého momentu na úhlu natočení [23]

Na základě předchozích rovnic (2.1) – (2.6) je dále sestaven model PMSM (obrázek 2.7), který na základě složek vstupních napětí U_d a U_q vypočítává moment motoru.



Obrázek 2.7: Blokové schéma modelu PMSM [30]

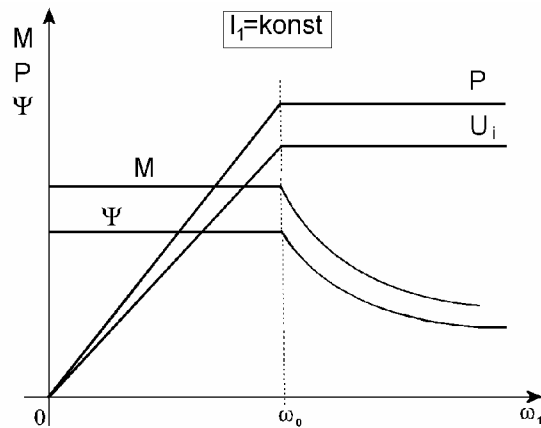
Metody řízení pohonu s PMSM

Dosažení vysoké účinnosti elektrického pohonu, a tedy i maximalizace úspory energie, vyžaduje použití pokročilých řídicích algoritmů. V současnosti je jedním z nejpokročilejších způsobů řízení vektorové, kdy se na základě vektorů napětí ve statoru a proudu v rotoru v každém okamžiku vypočítává optimální napájení motoru. Vektorové řízení je však nutné doplnit adekvátní strategií řízení, která odpovídá charakteristice zátěže a požadované dynamice. [30], [27]

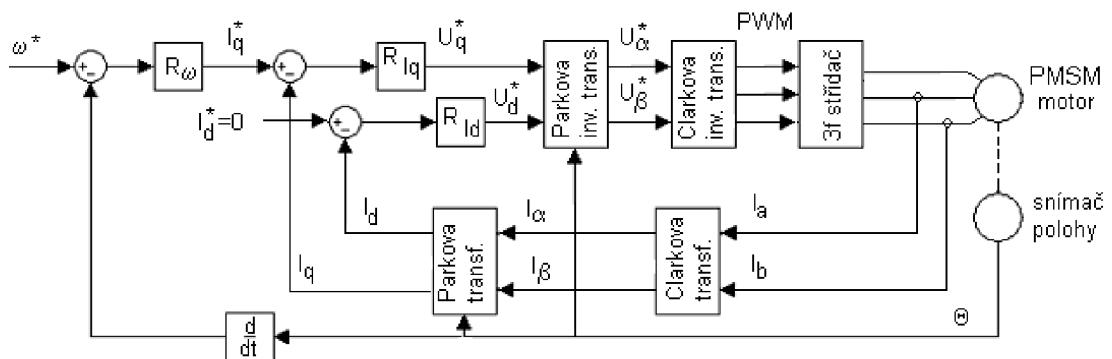
Klasické vektorové řízení

Klasické vektorové řízení umožňuje dosáhnout vysoké dynamiky a přesnosti regulace pohonu s asynchronním i synchronním motorem. Umožňuje provoz v optimálních podmínkách v ustáleném stavu i během přechodových dějů. Vektorové řízení spočívá v odděleném řízení spráženého magnetického toku motoru a jeho momentu. Magnetický tok a vnitřní elektromagnetický moment jsou základní regulované veličiny v elektrických strojích.

Na obrázku 2.8 jsou uvedeny dva základní pracovní režimy synchronního stroje. Oblast pod jmenovitou rychlostí otáčení ($\omega < \omega_0$) je oblast konstantního momentu. Oblast nad jmenovitou rychlostí ($\omega > \omega_0$) je oblast konstantního výkonu. V této oblasti dochází k odbuzování střídavého stroje a moment motoru klesá. Blokové zapojení vektorového řízení je uvedeno na obrázku 2.9.



Obrázek 2.8: Pracovní režimy střídavých strojů (ideální stav) [30]

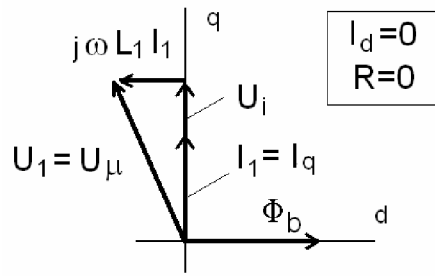


Obrázek 2.9: Blokové zapojení klasického vektorového řízení PMSM [30]

Řízení na maximální moment

Při tomto řízení je udržován fázový posuv mezi proudem ve statoru a rotoru na hodnotě 90° . Tato metoda je někdy označována jako CTA (constant torque angle). Regulátor I_q je tvořen otáčkovou smyčkou s regulátorem otáček. Žádaná hodnota otáček je srovnávána se skutečnou hodnotou získanou jako derivace okamžité hodnoty úhlu natočení. Výstupem tohoto regulátoru je požadovaná hodnotu momentotvorné složky statorového proudu I_q . Cílem regulátoru proudu I_q je zajistit, aby složka statorového proudu I_d byla nulová. V tomto případě je prostorový fázor statorového proudu kolmý k budícímu magnetickému toku a stroj pracuje s maximálním točivým momentem. Příslušný fázorový diagram je uveden na obrázku 2.10.

Metoda je určena pro řízení v oblasti pod jmenovitou rychlostí a algoritmus řízení zajišťuje kolmost fázorů I_1 a Φ_b (viz obrázek 2.10). Jedná se o řízení na maximální točivý moment při konstantní velikosti budícího toku. V tomto případě regulátor složky I_d musí zajistit, aby složka statorového proudu byla $I_d = 0$. Momentotvorná složka fázoru statorového proudu I_q potom určuje, v tomto případě společně s příslušným fázorem magnetického toku Φ_b , elektromagnetický moment stroje podle



Obrázek 2.10: Fázorový diagram řízení PMSM na maximální točivý moment [30]

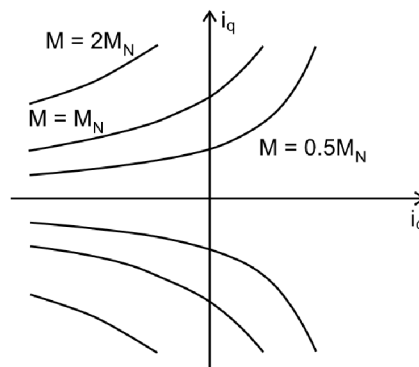
následující rovnice (2.7).

$$M = \frac{3}{2}p_p(\Psi_q I_d - \Psi_d I_q) = \frac{3}{2}p_p[\Phi_B + (L_d - L_q)I_d]I_q = \frac{3}{2}\Phi_B I_q \quad (2.7)$$

Momentové vektorové řízení

Momentové vektorové řízení umožňuje řídit pohon na konstantní točivý moment pomocí vhodného nastavení proudů I_d a I_q . Křivky konstantního momentu jsou uvedeny na obrázku 2.11.

$$M = \frac{3}{2}p_p[\Psi_M + (L_d - L_q)I_d]I_q \quad (2.8)$$



Obrázek 2.11: Trajektorie konstantního točivého momentu [17]

Řízení MTPA

Řízení pomocí metody MTPA (maximal torque per ampere) umožňuje řídit motor s maximálním točivým momentem dosažitelným pomocí daného proudu I_S . V tomto případě je nutné zajistit vhodné nastavení proudů i_d a i_q . Rovnici trajektorie tohoto řízení je možné vypočítat pomocí definiční rovnice pro točivý moment. Odvození rovnic pro výpočet proudů i_d a i_q v režimu MTPA je následující:

$$M_e = \frac{3p}{4}[\Psi_M I_{qm} + (L_d - L_q)I_{dm}I_{qm}] \quad (2.9)$$

$$M_e = \frac{3p}{2}[\Psi_M \sqrt{I_M^2 - I_d^2} + \frac{3p}{2}(L_d - L_q)I_d \sqrt{I_M^2 - I_d^2}] \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial M_e}{\partial I_d} = \frac{3p - I_d \Psi_M + (L_d - L_q)I_d \sqrt{I_M^2 - I_d^2}}{2 \sqrt{I_M^2 - I_d^2}} = 0 \quad (2.11)$$

Pomocí $\frac{\partial M_e}{\partial I_d} = 0$ vypočítáme rovnici trajektorie MTPA. Trajektorie řízení MTPA je hyperbola v rovině d-q (viz obrázek 2.12).

$$(i_d - i_q)^2 + \Psi_M i_d - (L_d - L_q)i_q^2 \quad (2.12)$$

$$i_d = \frac{\Psi_M - \sqrt{\Psi_M^2 + 8(L_q - L_d)^2 i_q^2}}{4(L_d - L_q)} \quad (2.13)$$

$$i_d = \frac{\Psi_M}{2(L_q - L_d)} - \sqrt{\frac{\Psi_M^2}{4(L_q - L_d)^2} + i_q^2} \quad (2.14)$$

nebo

$$i_d = \frac{\Psi_M}{4(L_q - L_d)} - \sqrt{\frac{\Psi_M^2}{16(L_q - L_d)^2} + \frac{I_M}{2}} \quad (2.15)$$

$$i_q = \sqrt{i_S^2 - i_d^2} \quad (2.16)$$

Maximální rychlost v režimu MTPA je dosažena v bodu A. Určena je maximálním proudem I_{Smax} a maximální hodnotou napětí U_{Smax} .

Otáčky pohonu jsou v tomto režimu následující

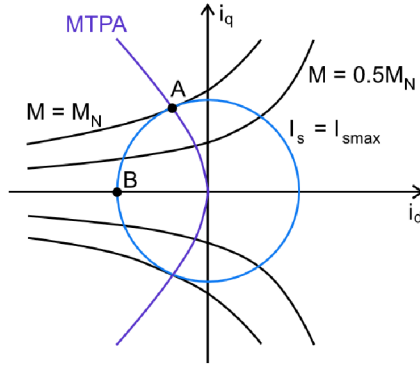
$$\omega = \frac{U_S}{\Psi_S} = \frac{U_S}{\sqrt{(L_d i_d + \Psi_M)^2 + (L_q i_q)^2}} \quad (2.17)$$

Maximální otáčky (v bodu A na obrázku 2.12) jsou následující

$$\omega_M = \frac{U_{Smax}}{\sqrt{(L_d i_{dm} + \Psi_M)^2 + (L_q i_{qm})^2}} \quad (2.18)$$

Tato rychlost je nejvyšší rychlost motoru dosažitelná výše zmíněnou metodou MTPA. Jedná se o jmenovité otáčky motoru. Další zvýšení rychlosti je možné dosáhnout pomocí odbuzování s metodou FW (field weakening mode), která je popsána v další kapitole. V tomto režimu již ale dojde k poklesu točivého momentu na hřídeli motoru.

Mezi výhody metody řízení MTPA lze považovat možnost dosažení zvýšení účinnosti elektrického pohonu. Při použití metody MTPA může motor dodat stejný točivý moment a otáčky při menším statorovém proudu. Tato skutečnost může přinést širší využití této metody v řízení elektrických pohonů ve vozidlech.



Obrázek 2.12: Trajektorie metody řízení MTPA [20]

Řízení v režimu odbuzování FW (field weakening)

V oblasti nad jmenovitou rychlostí je nutné provést odbuzení motoru. To je provedeno nastavením složky proudu I_d do záporných hodnot tak, aby velikost satorového napětí byla stále v říditelné oblasti výstupního napětí střídače. Fázor indukovaného protinapětí U_p můžeme vypočítat pomocí

$$U_p = j\omega(L_d I_d + jL_q I_q) + j\omega\Phi_B \quad (2.19)$$

Absolutní hodnota tohoto napětí nesmí překročit určitou maximální hodnotu U_{pmax} s ohledem na maximální přípustný proud měniče, respektive motoru. V oblasti odbuzení je nutné omezovat také složku I_q podle následujícího vztahu

$$I_{qmax} = \pm\sqrt{I_{max}^2 - I_d^2} \quad (2.20)$$

V bodu B na obrázku 2.12 je v režimu FW dosaženo maximální možné rychlosti. Jedná se o kritické otáčky. Rychlost pohonu v bodu B je

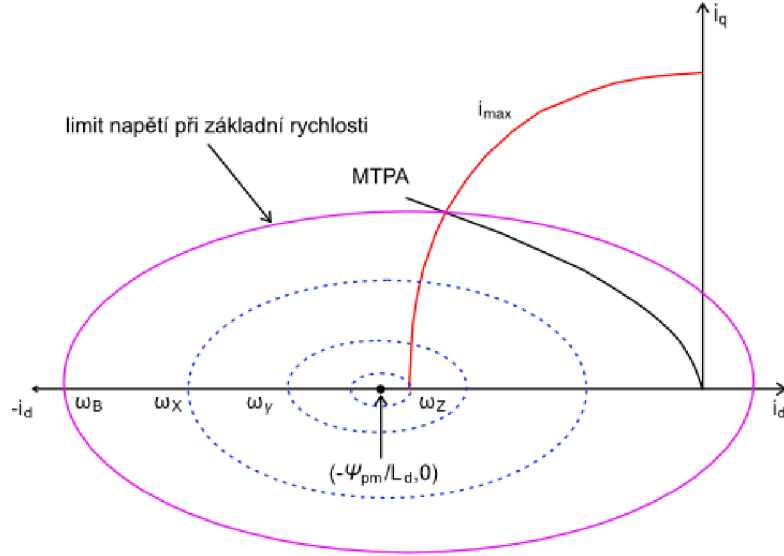
$$\omega_B = \frac{V_{max}}{\sqrt{(L_d I_{dc} + \Psi_M)^2 + (L_q I_{qc})^2}} \quad (2.21)$$

Pro kompenzaci té části indukovaného napětí motoru, která převyšuje maximální výstupní napětí střídače pro dané vstupní stejnosměrné napětí střídače a pro dané otáčky platí, že přírůstek indukovaného napětí, který je po přechodu do režimu se zeslabeným magnetickým tokem potřeba eliminovat složkou i_d je dán vztahem

$$\Delta U_i = L_d \dot{i}_d \omega = k_\Phi F_f (\omega - \omega_{pr}) \quad (2.22)$$

V tomto vztahu je L_d indukčnost statoru, ω je mechanická úhlová rychlost, k_Φ je konstanta motoru určující závislost mezi indukovaným napětím, magnetickým tokem rotoru a otáčkami a ω_{pr} je úhlová rychlost, při které nastává přechod do režimu se zeslabeným tokem při daném vstupním napětí střídače ve stavu naprázdno.

Dále můžeme odvodit trajektorii konstantního napětí (viz obrázek 2.13). Jedná se o geometrické místo maximálního napětí pro konkrétní hodnotu rychlosti. Tato



Obrázek 2.13: Trajektorie konstantního napětí [25]

trajektorie určuje hodnotu otáček pro konkrétní hodnotu napětí. Odvození trajektorie konstantního napětí (podle rovnice elipsy) je následující

$$\left(\frac{V_S}{\omega_S}\right)^2 = (\Psi_M + L_d i_d)^2 + (L_q I_q)^2 \quad (2.23)$$

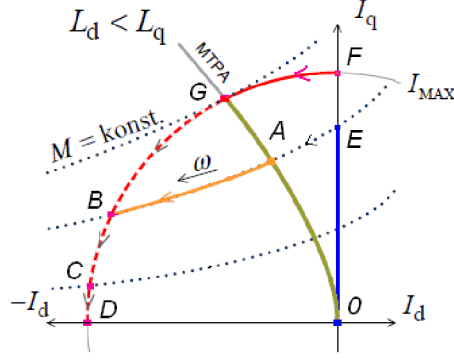
kde bod se souřadnicemi $\left(-\frac{\Psi_M}{L_d}, 0\right)$ na obrázku 2.13 je střed a osy jsou $\frac{V_S}{\omega L_d}$ a $\frac{V_S}{\omega L_q}$.

Magnetický tok motoru je definován pomocí

$$\Psi_S = \sqrt{(\Phi_M + L_d i_d)^2 + (L_q i_q)^2} = \frac{V_S}{\omega_e} \quad (2.24)$$

Na obrázku 2.14 jsou potom uvedeny následující trajektorie řízení PMSM:

- Trajektorie 0F znázorňuje řízení na maximální moment ($i_d = 0$ řízení)
- Trajektorie 0FD znázorňuje metodu řízení v režimu odbuzování
- Trajektorie 0EB znázorňuje metodu řízení na konstantní moment
- Trajektorie 0AB znázorňuje metodu řízení na konstantní moment pomocí MTPA
- Trajektorie 0G znázorňuje metodu řízení na maximální moment pomocí MTPA



Obrázek 2.14: Trajektorie jednotlivých metod řízení MTPA a FW pro $\Psi_M/L_d > I_{max}$ [25]

Odvození proudu i_d v režimu FW je následující:

V regionu FW platí

$$\frac{U_m}{\omega_e} = \sqrt{(L_d i_d + \Psi_M)^2 + (L_q i_q)^2} \quad (2.25)$$

Z podmínky $i_m = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}$ určíme i_q a dosadíme do rovnice (2.24)

$$(L_d^2 - L_q^2)i_d^2 + 2\Psi_M L_d i_d + \Psi_M^2 + L_q^2 i_m^2 - \frac{V_m^2}{\omega_e^2} = 0 \quad (2.26)$$

Rovnice má dva kořeny

$$i_{d1} = \frac{\Psi_M L_d - \sqrt{(\Psi_M L_d)^2 - (L_d^2 - L_q^2)(\Psi_M^2 + L_q^2 i_m^2) - \frac{V_m^2}{\omega_e^2}}}{L_q^2 - L_d^2} < 0 \quad (2.27)$$

$$i_{d2} = \frac{\Psi_M L_d + \sqrt{(\Psi_M L_d)^2 - (L_d^2 - L_q^2)(\Psi_M^2 + L_q^2 i_m^2) - \frac{V_m^2}{\omega_e^2}}}{L_q^2 - L_d^2} > 0 \quad (2.28)$$

Aby docházelo k odbuzení, platí pouze kořen i_{d1} .

Pro režim FW a podmínku $\frac{\Psi_M}{L_d} > I_{max}$ jsou maximální otáčky určeny těmito hodnotami proudů i_d a i_q :

$$i_d = -I_{max} \quad \text{a} \quad i_q = 0$$

Tyto hodnoty potom dosadíme do rovnice (2.27).

$$\omega_{max} = \frac{\frac{V_{max}}{L_d}}{\frac{\Psi_M}{L_d} - I_{max}} \quad (2.29)$$

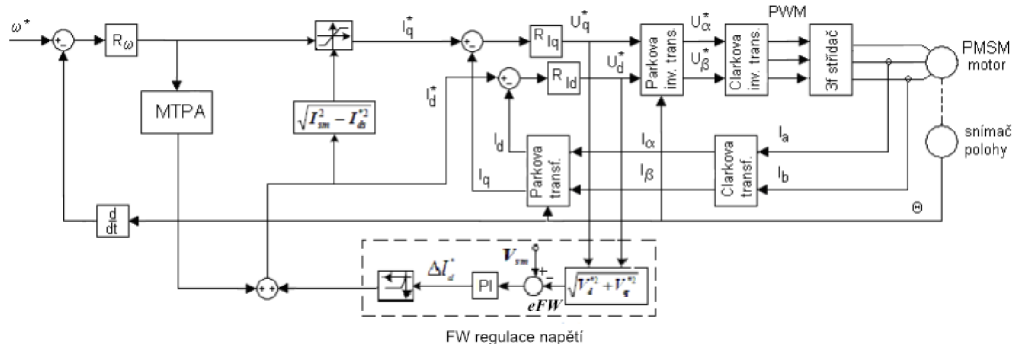
Maximální rychlost pohonu je dosažena v bodu D (viz obrázek 2.14).

Blokové zapojení vektorového řízení doplněného režimem odbuzení

Základní řídicí struktura zabezpečující korektní chování pohonu při stavu odbuzování je zobrazena na obrázku 2.15. Během odbuzování je generována záporná hodnota proudu i_d . Tím dochází ke generování magnetického pole statorovým vinutím proti magnetickému poli generovanému rotorovými magnety. Tento provozní stav může působit destruktivně na permanentní magnety a tím snižovat životnost motoru. Proto je při návrhu řídicích struktur pro odbuzování zapotřebí limitovat odbuzovací proud i_d a definovat hodnotu i_{dFWmin} , která nesmí být za provozu pohonu překročena.

Regulační odchylka e_{FW} nabývá kladné nebo záporné hodnoty. Kladná hodnota indikuje stav, kdy generované napětí nedosahuje napěťového limitu měniče (jedná se o běžný provozní stav pohonu). V tomto případě odbuzování není potřebné. Pokud by byla regulační odchylka kladná (regulátor by generoval kladný výstup $i_{dset} > 0$), došlo by k přibuzování motoru. Takový stav není žádaný pro algoritmus odbuzování a výstup regulátoru je limitován na hodnotu $i_{dset} = 0$. Kladná hodnota i_{dset} potom není generována.

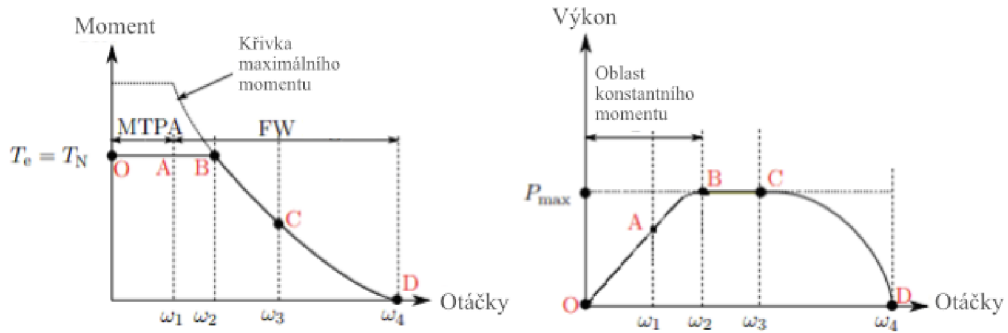
Záporná hodnota i_{dset} značí stav pohonu, kdy generované napětí vektorovým řízením požaduje hodnotu větší, než můžeme dosáhnout (tedy větší než U_{lim}). V tomto případě je nutné snížit hodnotu indukovaného napětí pomocí algoritmu odbuzování. Základní blokové zapojení pohonu, který pracuje v režimu FW je uveden na obrázku 2.15. Jedná se o vektorové řízení, které je v tomto případě doplněno režimem odbuzování a metodou MTPA.



Obrázek 2.15: Základní zapojení řízení v režimu odbuzování [30]

Trakční charakteristika motoru vzhledem k použité trajektorii řízení

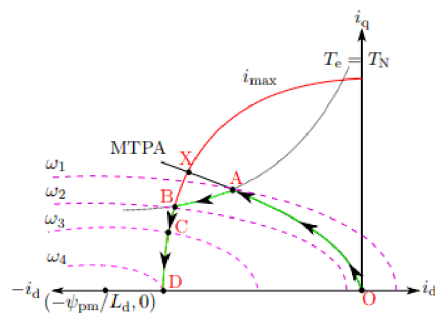
Základní trakční charakteristika trakčních motorů pro vozidla s elektrickým pohonem je uvedena na obrázku 2.16. Charakteristika I, na obrázku 2.16 označena jako „Křivka maximálního momentu“, je vhodná pro nízké otáčky pohonu (řízení s maximálním točivým momentem). V tomto režimu má pohon vysoký točivý moment. Nevýhodou je skutečnost, že při zkolabování střídače se může objevit zvýšené napětí na svorkách střídače. Tato skutečnost vyžaduje velké napěťové předdimenzování střídače.



Obrázek 2.16: Průběh točivého momentu a výkonu v závislosti na rychlosti vozidla pro $\frac{\Phi}{L_d} > I_{max}$ [25]

Pro pohony pracující v širokém rozsahu otáček je vhodnější charakteristika II, která je na obrázku 2.16 označena body O-A-B-C-D. Tato charakteristika se vyznačuje širším pásmem dostupného konstantního točivého momentu a využívá ji většina trakčních měničů ve vozidlech s elektrickým pohonem, kde je často pojmenovávána jako momentové řízení.

Poznamenejme, že trakční charakteristiky úzce souvisí s použitou trajektorií řízení. Trajektorie jednotlivých metod řízení je na obrázku 2.17. Jednotlivé body trajektorie řízení na obrázku 2.17 odpovídají bodům na průběhu točivého momentu a výkonu na obrázku 2.16.

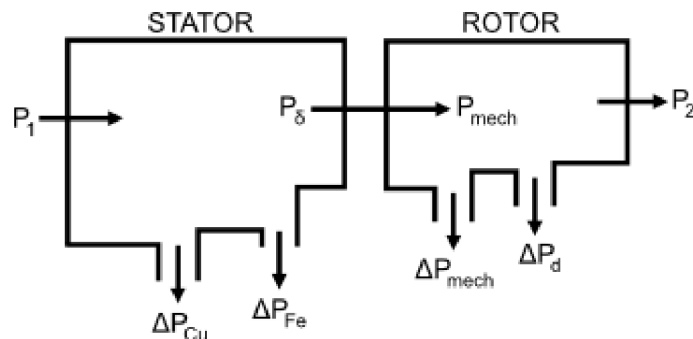


Obrázek 2.17: Trajektorie jednotlivých metod řízení pro $\frac{\Phi}{L_d} > I_{max}$ [25]

Matematické modelování účinnosti PMSM

Získání podrobných dat na základě modelování a simulování vlastností elektrických motorů lze rozdělit na dva fundamentální přístupy. Prvním přístupem je výpočet s využitím metody konečných prvků pomocí specializovaných softwarů jako je například software Ansys [7]. Při takovém přístupu je nutné pro výpočty použít poměrně detailní geometrické a materiálové parametry modelovaného motoru. Takové parametry většinou nejsou standardně od výrobců elektrických motorů dostupné, a proto je často jedinou možností jejich získání demontáž a často i destrukce motoru, aby bylo možné detailně analyzovat geometrii motoru. Druhým přístupem jsou výpočty s využitím matematických modelů, které vycházejí z matematicko-fyzikálního popisu vlastností elektrických motorů. V tomto přístupu je možné dosažení relevantních výsledků účinnosti i pro motory, u kterých nejsou detailní geometrické a materiálové parametry dostupné. Potřebné parametry pro tyto přístupy je možné často získat dostupným experimentálním měřením bez nutnosti destrukce motoru. Vzhledem k této skutečnosti jsem se v této práci dále blíže soustředil na tento druhý přístup, který více vyhovoval dostupnému vybavení.

Průchod výkonu PMSM je znázorněn na obrázku 2.18. Symbol P_1 má význam činného příkonu motoru. P_δ značí výkon ve vzduchové mezeře - výkon přenesený ze statoru do rotoru. P_{mech} je mechanický výkon rotoru. P_2 má význam užitečného výkonu na hřídeli motoru. Další symboly mají význam jednotlivých složek ztrát motoru: ΔP_{Cu} ztráty v mědi (ve vinutí), ΔP_{Fe} ztráty v železe, ΔP_{mech} mechanické ztráty, P_d dodatečné ztráty. Bližší popis jednotlivých ztrát je proveden na základě článků [26] a [15].



Obrázek 2.18: Tok výkonu PMSM [22]

Ztráty v mědi

Jedná se o Jouleovy ztráty, které jsou proměnlivé v závislosti na zatížení motoru. Tyto ztráty jsou vyvolány proudem protékajícím statorovým vinutím. Jsou úměrné součinu kvadrátu proudu a odporu statorového vinutí.

Ztráty v železe

Jako ztráty v železe jsou označovány ztráty způsobené vnějším střídavým magnetickým polem působícím na magneticky vodivý materiál. Ztráty v železe bývají nejčastěji vyjádřeny výrazem vycházejícím ze Steinmetzova vztahu

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_h + \Delta P_d = K_h f B_m^2 + K_c f^2 B_m^2 + K_e f^{1,5} B_m^{1,5} \quad (2.30)$$

Kde K_h , K_c a K_e jsou materiálové konstanty. Výraz je tvořen třemi členy představujícími hysterezní ztráty, ztráty vířivými proudy a ztráty dodatečné.

Hysterezní ztráty jsou důsledkem natáčení magnetických dipólů vlivem vnějšího pole, při kterém dochází k disipaci energie a ke zvýšení teploty. Značný vliv na ztráty má rychlost magnetování. Z tohoto důvodu jsou hysterezní ztráty úměrné frekvenci působícího pole f a velikosti plochy hysterezní smyčky pole B_m . Omezení hysterezních ztrát je možné docílit použitím magneticky měkkých materiálů.

Ztráty vířivými proudy jsou způsobené indukovaným napětím vyvolávajícím průchod proudu v materiálu. Tyto ztráty jsou úměrné druhé mocnině frekvence vnějšího pole f a magnetické indukce. Pro snížení těchto ztrát bývají magnetické obvody motorů složeny z tenkých plechů, jež bývají legovány pro zvýšení elektrického odporu.

Dodatečné ztráty bývají způsobovány rozptylovými toky prostorových, harmonických pulzací magnetického toku nebo nerovnoměrnostmi ve vzduchové mezeře motoru. Vznikají u strojů s drážkovaným magnetickým obvodem. Důvodem je pulzace magnetické indukce ve vzduchové mezeře a rotorových zubech. Jsou to tedy ztráty od vyšších harmonických složek napětí nebo proudu, které zvětšují ztráty ve vinutích a také v některých částech magnetického obvodu. Jsou závislé na velikosti harmonických složek. Při harmonických průbězích vstupních veličin se tento druh ztrát neobjevuje. Výpočet se provádí podle empirického vztahu:

$$P_d = 0,005P_2 \quad (2.31)$$

Mechanické ztráty

Ztráty mechanické ΔP_m vznikají v důsledku rotačního pohybu rotoru uvnitř statoru. Exaktní výpočet je značně komplikovaný. V literatuře se uvádí celá řada empirických vztahů [33]. Tyto ztráty se skládají ze ztrát třením a z ventilačních ztrát. Lze je přibližně určit ze vztahu, který je použitelný pro synchronní motory s vyniklými póly

$$\Delta P_m = 8p \left(\frac{n}{100} \right)^3 (10D_e)^3 \sqrt{L} \quad (2.32)$$

kde L je celková délka statoru, n je otáčivá rychlost a D_e je vnější průměr motoru.

Pro synchronní motory s hladkým rotorem je možné použít následující empirický vztah

$$\Delta P_m = v^{2,5} D_1 \sqrt{L} \quad (2.33)$$

kde v je obvodová rychlost rotoru, D_1 je vnitřní průměr statoru a L je celková délka statoru.

2.5 Shrnutí současného stavu problematiky

Výrobci automobilů ve většině případů pro pohon elektrických vozidel používají jeden elektromotor spojený s jednostupňovou převodovkou s mechanickým diferenciálem, např. Nissan Leaf, VW e-Golf, Chevrolet Bolt EV, Renault Zoe. Autoři [5] k tomuto konvenčnímu hnacímu ústrojí elektrických vozidel dodávají, že je používáno především z důvodu snížení výrobních nákladů na výrobu elektrických vozidel a s cílem dosažení nízké hmotnosti hnacího ústrojí. Toto řešení podle autorů omezuje elektrická vozidla v dosahování lepších výkonnostních parametrů. V jejich článku je zmíněno, že použití pouze jednoho rychlostního stupně vede k volbě nutného kompromisu mezi požadavkem na dosahovanou maximální stoupavost vozidla a maximální rychlost vozidla. Některé vozy již využívají pokročilejších pohonů s více elektromotory – jeden pro pohon přední nápravy a druhý pro pohon zadní nápravy, např. Tesla Model S P100D a Audi e-tron. Přehled používaných elektrických motorů v některých elektrických vozidlech na základě dostupných informací v roce 2019 je uveden v tabulce 2.1.

Autoři mnoha prací se zabývají analýzami, vyšetřováním a porovnáváním různých druhů hnacích ústrojí elektrických vozidel s cílem nalézt řešení s vysokým nebo vyšším potenciálním přínosem ve zvýšení účinnosti hnacího ústrojí. Zvýšení účinnosti elektrického vozidla na sebe váže především dosažení vyšší efektivity provozu, která se v praxi při provozu vozidla projeví především vyšším dosažitelným dojezdem vozidla na jedno nabití. Některé práce, např. [5], [18], [21], se zabývají hnacím ústrojím s vícestupňovými převodovkami s různým uspořádáním a technickým řešením. Některé práce, např. [24], [32], [19], se zabývají hnacím ústrojím s více elektromotory. Další práce se soustředí na vývoj samotných vysoce účinných elektromotorů s efektivním řízením. Tato řešení jsou často rozdílná od konvenčního hnacího ústrojí elektrických vozidel s jedním elektromotorem a jednostupňovou převodovkou s mechanickým diferenciálem. Většina těchto prací své výsledky podkládá daty v podobě map účinností elektromotorů, jejichž zdrojem jsou často pouze výsledky ze simulací.

V oblasti vyhodnocování účinnosti hnacího ústrojí elektrických vozidel lze na základě provedené rešerše shrnout, že efektivita hnacího ústrojí elektrických vozidel je v současné době posuzována různými způsoby. Nejrozšířenější metoda je pomocí stanovení spotřeby elektrické energie a maximálního dosažitelného dojezdu na jedno nabití na standardizovaných jízdních cyklech. Tato metoda je využívána výrobci automobilů při homologaci jejich vozidel a výsledky měření jsou následně uváděny v technických parametrech vozidel. Výsledky této metody poskytují užitečné parametry především pro koncového uživatele vozidel. Dalším způsobem vyhodnocování účinnosti hnacího ústrojí elektrických vozidel je přímé měření účinnosti hnacího ústrojí a jeho součástí. Metody zaměřené na tento způsob vyhodnocování mohou poskytnout detailnější výsledky o schopnostech hnacího ústrojí a jeho součástí v přeměňování elektrické energie na potřebnou mechanickou energii na hnacích

Výrobce	Modelový rok	Počet EM	Typ EM	Výkon [kW]	T. moment [Nm]	Dojezd [km]	Kapacita baterie [kWh]
BMW i3	2019	1	PMSM	125	250	240	38
Ford Electric	2018	1	PMSM	107	249	185	33,5
Hyundai Kona	2018	1	PMSM	100	395	250	39,2
Hyundai Kona	2018	1	PMSM	150	395	400	64
Chevrolet Bolt	2019	1	PMSM	150	360	380	60
Kia E-Niro	2019	1	PMSM	150	395	375	64
Nissan Leaf	2019	1	PMSM	160	340	350	60
Renault Zoe	2019	1	PMSM	80	220	260	41
VW E-Golf	2017	1	PMSM	100	290	190	32
Audi e-tron	2019	2	IM	264	560	330	95
Jaguar I-Pace	2019	2	PMSM	294	696	380	84
Mercedes-Benz EQC	2020	2	IM	300	765	335	80
NIO ES6	2019	2	PMSM /IM	164 /240	305	420	70
Tesla Model S	2018	2	IM	568	931	555	100
Tesla Model 3	2018	2	IM	258	527	475	74
Faraday Future FF91	-	3	PMSM	783	1800	608	130
Tesla Roadster	2020	3	IM	1000	10000	970	200

Tabulka 2.1: Přehled počtu EM používaných pro pohon EV [13]

kolech vozidla. Tyto výsledky jsou potom v oboru elektrických hnacích ústrojích velmi žádané, protože mohou mít potenciál blíže specifikovat oblasti, na které je třeba se zaměřovat v dalším výzkumu a vývoji elektrických vozidel.

3 Cíle disertační práce

Jak jsem již zmínil v úvodu této práce, svou disertační práci zaměřuji na experimentální a simulační ověřování vlastností hnacího ústrojí elektrických vozidel. V kapitole 2 jsem zároveň popsal aktuálnost tohoto tématu. Dalšími důvody pro tuto volbu vycházejí z mého předchozího studia na Technické univerzitě v Liberci, kde jsem měl možnost spolupracovat na vývoji částí experimentálního elektrického vozidla. Další inspirací bylo téma mé diplomové práce, které bylo zaměřeno na konstrukci experimentální jednostupňové převodovky pro hnací ústrojí elektrického vozidla. Téma jsem následně začal studovat v odborné literatuře, ve které se sice začínají objevovat články s podobným zaměřením, nicméně většina jich vychází především z matematických výpočtů a simulací pohonů. Detailních výsledků z experimentálního ověřování hnacího ústrojí elektrických vozidel je v době začátku mého studia doktorského studijního programu dostupných poměrně malé množství.

Na základě prostudovaných odborných publikací mohu konstatovat, že v literatuře se neudávají ucelené informace o sofistikovaných přístupech k získávání dat o účinnosti hnacího ústrojí elektrických vozidel. Především v publikacích, které se zaměřují na analýzu benefitů pokročilých hnacích ústrojí s víceúrovňovými převodkami nebo s více elektromotory, je zmiňován nedostatek literatury, která by se zaměřovala na experimentální ověřování účinnosti elektrických vozidel. Na základě prostudovaných publikací blíže popsaných v kapitole 2 o současném stavu problematiky mohu doplnit, že i když v době začátku řešení mé disertační práce k tématu publikace již vznikají, pouze velmi málo z nich uvádí kompletní výsledky dosažené účinnosti analyzovaného hnacího ústrojí na celém jízdním cyklu. Většina publikací je také založena pouze na matematickém modelování hnacího ústrojí bez validace výsledků pomocí experimentů a často nejsou uváděny kompletní vstupní parametry použitých elektromotorů s patřičnými zdroji. V rámci své disertační práce proto plánuji využít dostupného softwarového a experimentálního zázemí na katedře vozidel a motorů TUL pro vytvoření nástrojů, které přinesou významný posun poznání v oblasti vyhodnocování účinnosti hnacího ústrojí elektrických vozidel.

Hlavním cílem mé disertační práce je vytvoření metodiky vyhodnocování účinnosti hnacího ústrojí elektrických vozidel pomocí simulačního modelu vozidla a experimentálního měření účinnosti hnacího ústrojí elektrického vozidla ve zkušebně powertrain v laboratoři pohonných jednotek TUL. Ve zkušebně powertrain je možné experimentálně analyzovat hnací ústrojí vozidla bez nutnosti jeho instalace ve vozidle a zároveň je možné získat výsledky pro kompletní hnací ústrojí. Pokročilé metody analýzy účinnosti hnacího ústrojí mají potenciál přispět k dosažení zvýšení účinnosti ústrojí, přičemž tato skutečnost může mít pozitivní vliv na dosažení vyšší-

ho dojezdu vozidel na jedno nabití a snížení nároku na potřebnou kapacitu baterií. Disertační práce současně přinese ucelený soubor odborných informací o účinnosti hnacího ústrojí elektrických vozidel, které budou podloženy výsledky z matematických modelů, simulací a provedených experimentů. Pro naplnění uvedeného hlavního cíle práce jsem si stanovil následující dílčí cíle disertační práce:

- Dílčím cílem práce je vytvoření matematického modelu elektromotoru, který bude poskytovat výsledky ve formě map účinností.
- Dílčím cílem práce je provedení experimentálního měření účinnosti elektromotoru pro validaci matematického modelu elektromotoru.
- Dílčím cílem práce je vytvoření simulačního modelu vozidla s elektrickým hnacím ústrojím.
- Dílčím cílem práce je návrh a sestavení experimentálního hnacího ústrojí elektrického vozidla.
- Dílčím cílem práce je provedení experimentálního měření účinnosti hnacího ústrojí elektrického vozidla ve zkušebně powertrain v laboratoři pohonných jednotek TUL.
- Dílčím cílem práce je zpracování porovnání experimentálního měření účinnosti hnacího ústrojí elektrického vozidla s výsledky simulačního modelu vozidla s elektrickým hnacím ústrojím.

Matematický model elektromotoru

Tímto dílčím cílem plánuji dosažení matematického modelu elektromotoru, který umožní rychlé získání dat pro sestavení mapy účinnosti. Tento model bude možné využít pro získání vstupních dat účinnosti elektromotoru pro simulační model vozidla s elektrickým hnacím ústrojím.

Experimentální měření účinnosti elektromotoru

V rámci tohoto dílčího cíle provedu experimentální měření účinnosti elektromotoru na dostupném zařízení v laboratoři pohonných jednotek. Výsledky tohoto měření využiji pro validaci matematického modelu elektromotoru.

Simulační model vozidla s elektrickým hnacím ústrojím

Dílčím cílem této práce je sestavení vhodného simulačního modelu vozidla s elektrickým hnacím ústrojím. Model v práci následně využiji pro získání výsledků o účinnosti hnacího ústrojí na standardizovaných jízdních cyklech.

Experimentální hnací ústrojí elektrického vozidla

Dílčím cílem této práce je vytvoření experimentálního hnacího ústrojí elektrického vozidla. Toto hnací ústrojí využiji pro experimentální měření účinnosti hnacího ústrojí elektrického vozidla ve zkušebně powertrain v laboratoři pohonných jednotek TUL.

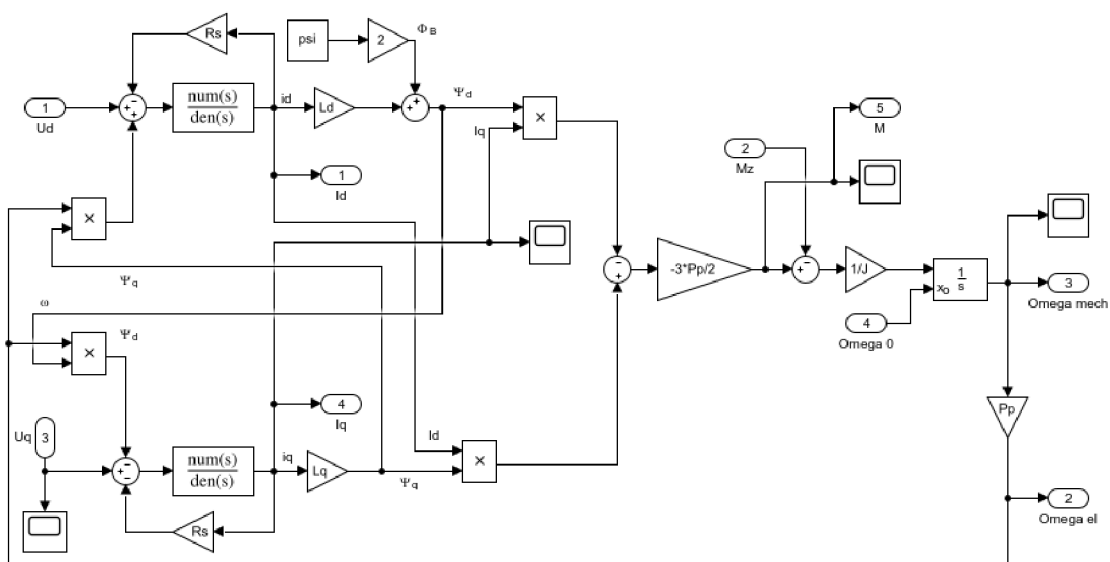
Experimentální měření účinnosti hnacího ústrojí elektrického vozidla

Dílčím cílem této práce je provedení experimentálního měření účinnosti hnacího ústrojí elektrického vozidla na standardizovaných jízdních cyklech ve zkušebně powertrain v laboratoři pohonných jednotek TUL. Vzhledem k vybavenosti této laboratoře a dostupného experimentálního know-how na katedře vozidel a motorů má tento experiment vysoký potenciál přinést žádaná data o účinnosti hnacího ústrojí elektrických vozidel, která budou sloužit jako excelentní podklad pro vytvoření metodiky vyhodnocování účinnosti hnacího ústrojí elektrických vozidel. Výsledky experimentu zároveň poslouží pro validaci simulačního modelu vozidla s elektrickým hnacím ústrojím.

4 Matematický model PMSM s výpočtem účinnosti

Na základě studia matematicko-fyzikálního modelování elektromotorů popsaného v kapitole 2.4 o matematických modelech PMSM jsem vytvořil následující model PMSM s vektorovým řízením v softwaru MATLAB Simulink. Zdrojem pro tvorbu modelu byly modely popsané ve skriptech [30].

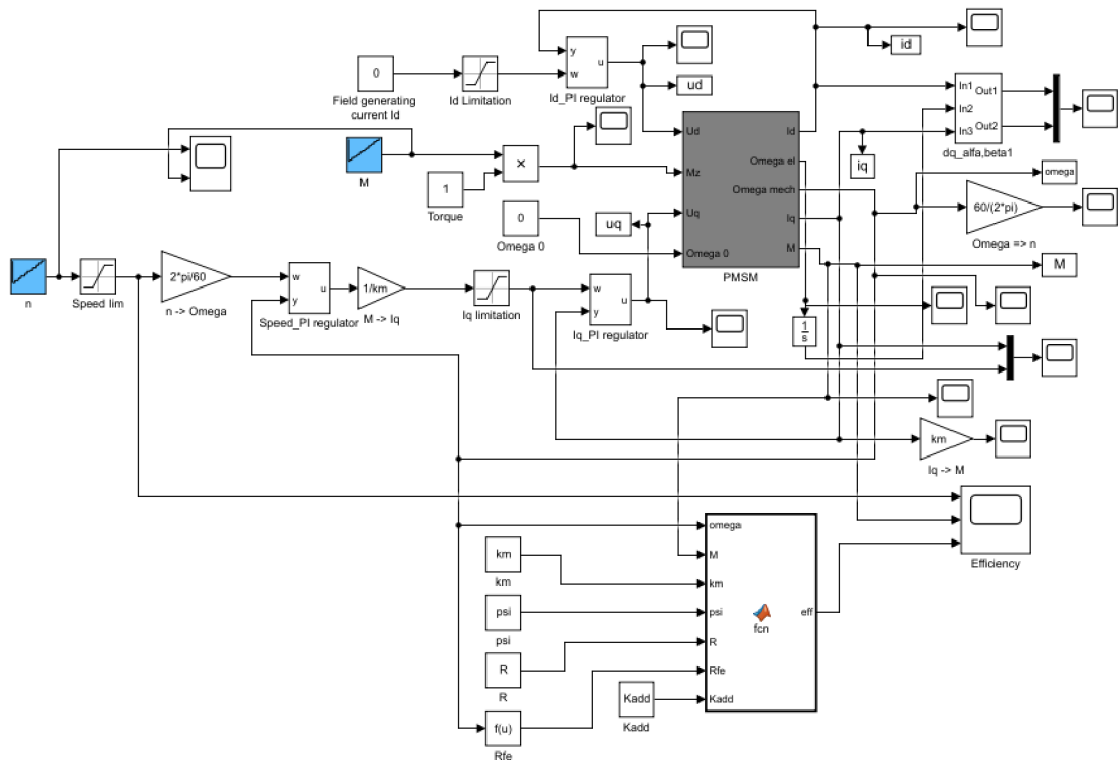
Pro řízení motoru jsem využil vektorové řízení motoru, které pracuje se zpětnou vazbou proudů a transformuje napětí mezi rotujícími a stojícími souřadnicemi pomocí Parkovy a Clarkovy transformace.



Obrázek 4.1: Blokové schéma modelu PMSM v softwaru MATLAB Simulink

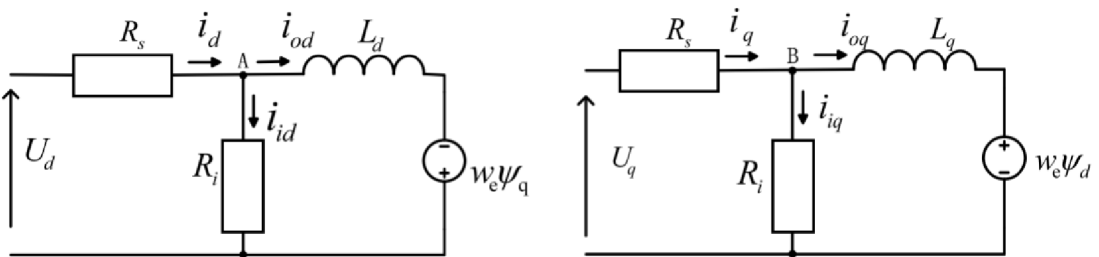
4.1 Matematický model PMSM při uvažování vlivu Jouleových ztrát a ztrát v železe

Pro implementaci výpočtu účinnosti PMSM při uvažování Jouleových ztrát (ztrát v mědi) a ztrát v železe do matematického modelu jsem aplikoval přístup popsaný v článku [40]. V tomto přístupu jsou ztráty v železe modelovány pomocí ekvivalentního odporu R_i a ztráty v mědi pomocí odporu R_s . Pro odvození modelu byl uvažován



Obrázek 4.2: Blokové schéma dynamického chování PMSM s výpočtem účinnosti

model PMSM v ustáleném stavu. Modelování ztrát železa je důležité v případě, kdy je synchronní motor provozován při vysokých rychlostech nebo v režimu nízkého magnetického toku. Poznamenejme, že hodnota R_i je závislá na změně frekvence, proudu (zátěže) a napětí.



Obrázek 4.3: Náhradní zapojení PMSM v souřadnicích d-q při uvažování ztrát v železe a mědi [40]

Popis veličin na náhradním zapojení PMSM na obrázku 4.3: ψ_d magnetický tok v ose d, ψ_q magnetický tok v ose q, L_d indukčnost v ose d, L_q indukčnost v ose q, i_{0d} budící proud v ose d, i_{0q} budící proud v ose q.

Základní rovnice pro výpočet proudů v motoru

$$i_d = i_{0d} + i_{id} \quad (4.1)$$

$$i_q = i_{0q} + i_{iq} \quad (4.2)$$

Z náhradního zapojení uvedeného na obrázku 4.3 je možné odvodit následující dvě rovnice

$$-\omega L_q i_{0q} - R_i i_{id} = 0 \quad (4.3)$$

$$\omega (L_d i_{0d} + \Psi_m) - R_i i_{iq} = 0 \quad (4.4)$$

Z výše uvedených rovnic jsou určeny ztrátové proudy i_{id} a i_{iq}

$$i_{id} = \frac{-\omega L_q i_{0q}}{R_i} \quad (4.5)$$

$$i_{iq} = \frac{\omega (L_d i_{0d} + \Psi_m)}{R_i} \quad (4.6)$$

Výsledné ztráty v železe jsou potom následující

$$P_{Fe} = 1,5 R_i (i_{id}^2 + i_{iq}^2) = 1,5 \omega^2 \left[\frac{(L_q i_{0q})^2}{R_i} + \frac{(L_d i_{0d} + \Psi_m)^2}{R_i} \right] \quad (4.7)$$

A výsledné ztráty v mědi následující

$$P_{Cu} = 1,5 R_s (i_d^2 + i_q^2) = 1,5 R_s \left[\left(i_{0d} - \frac{\omega L_q i_{0q}}{R_i} \right)^2 + \left(i_{0q} + \frac{\omega (L_d i_{0d} + \Psi_m)}{R_i} \right)^2 \right] \quad (4.8)$$

Dodatečné ztráty můžeme přibližně určit pomocí následující rovnice

$$P_d = 0,005 M \omega \quad (4.9)$$

Celkové ztráty jsou potom rovny součtu tří dílčích složek ztrát

$$P_Z = P_{Fe} + P_{Cu} + P_d \quad (4.10)$$

Příkon motoru je určován podle vztahu

$$P_1 = M \omega P_Z \quad (4.11)$$

Výstupní mechanický výkon

$$P_2 = M_H \omega \quad (4.12)$$

Výsledná účinnost motoru je potom

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (4.13)$$

Na základě výše uvedených závislostí jsem pro výpočet účinnosti PMSM v modelu použil následující vztah, ve kterém je použitý ekvivalentní odpor $R_i = f(\omega)$

$$\eta = \frac{M\omega}{M\omega + R_s \left(\frac{M}{k_m}\right)^2 + \frac{(\omega\Phi)^2}{R_i} + 0.005M\omega} \quad (4.14)$$

4.2 Stanovení parametrů pro model trakčního motoru Zero Motorcycles ZF 75-7

Vytvořený matematický model PMSM s výpočtem účinnosti jsem při řešení disertační práce využil pro získání dat účinnosti použitého trakčního motoru Zero Motorcycles ZF 75-7, který byl dostupný na katedře vozidel a motorů TUL. Pro efektivní využití modelu bylo zapotřebí stanovit potřebné parametry motoru. Pro stanovení následujících parametrů bylo zapotřebí provést experimentální měření: ekvivalentní odpor pro modelování ztrát v železe, odpor statorového vinutí, napěťová konstanta, sprážený magnetický tok permanentních magnetů a indukčnost vinutí. Dílčí popis provedených měření a stanovení parametrů je uveden v následujících podkapitolách 4.2.1 - 4.2.4. Zbývající potřebné parametry byly určeny bez experimentálních měření. Jejich hodnoty a určení je popsáno v podkapitole 4.2.5.

4.2.1 Stanovení ekvivalentního odporu pro modelování ztrát v železe

Stanovení ekvivalentního odporu R_i je možné provést výpočtem na základě konstrukčních parametrů motoru a tzv. měrných ztrát, které udávají měrné ztráty v 1 kg plechů v závislosti na indukci a frekvenci. Tyto parametry je ale nutné získat od výrobce plechů nebo od výrobce motoru. Výpočet lze pak provést například podle vztahů uvedených v [34]. Tyto potřebné parametry nebyly pro využitý motor Zero Motorcycles ZF 75-7 v době zpracování disertační práce dostupné, a proto jsem ekvivalentní odpor určil R_i na základě informací a parametrů obdobných motorů. Určené hodnoty ekvivalentního odporu R_i jsou uvedeny v tabulce 4.1.

ω [rad/s]	100	200	300	400
R_i [Ω]	0,7	1,45	2,1	2,8

Tabulka 4.1: Určené hodnoty ekvivalentního odporu R_i motoru Zero Motorcycles ZF 75-7 v závislosti na úhlové rychlosti motoru

Závislost ekvivalentního odporu R_i na úhlové rychlosti motoru na základě hodnot uvedených v tabulce 4.1 jsem určil pomocí aproximace z hodnot následovně:

$$R_i = 0,007\omega + 0,025 \quad (4.15)$$

4.2.2 Měření odporu statorového vinutí

Hodnotu odporu statorového vinutí R_s jsem stanovil pomocí popsané metody měřením v disertační práci [9]. Při tomto měření se využívá princip měření úbytku napětí na koncích vinutí, které je protékáno elektrickým proudem, jehož hodnota je měřena. Tuto metodu jsem použil pro měření úbytku napětí na svorkách modelovaného trakčního motoru s využitím připojeného zdroje stejnosměrného napětí.

č. měř.	$\Delta u[mV]$	$i[A]$	$R[\Omega]$	$R_s[\Omega]$
1	7,5	1,24	0,00605	0,00302
2	10,1	1,68	0,00601	0,00301
3	12,8	2,11	0,00607	0,00303
4	16,4	2,72	0,00603	0,00301
5	17,9	2,99	0,00599	0,00299
6	20,2	3,34	0,00605	0,00302
7	22,8	3,75	0,00608	0,00304
8	24,8	4,11	0,00603	0,00302
9	28,1	4,65	0,00604	0,00302
10	32,9	5,4	0,00609	0,00305

Tabulka 4.2: Hodnoty z měření odporu statorového vinutí R_s

Z hodnot R_s opakovaných měření jsem následně podle vztahu 4.16 vypočítal průměrnou hodnotu odporu statorového vinutí.

$$\bar{R}_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i \quad (4.16)$$

Výsledná hodnota činného odporu jedné fáze vinutí vyšla $R_s = 0,00302 \Omega$.

4.2.3 Měření napěťové konstanty a určení spřaženého magnetického toku permanentních magnetů

Hodnotu napěťové konstanty k_e a hodnotu spřaženého magnetického toku permanentních magnetů Φ_B jsem stanovil pomocí popsané metody měřením v disertační práci [9]. Určení hodnot je při této metodě provedeno pomocí měření indukovaného elektrického napětí na svorkách odpojeného synchronního motoru při nuceném otáčení hřídele rotoru známou rychlostí. Tento experiment jsem provedl na stanovišti pro protáčení spalovacích motorů, blíže popsané v kapitole 5.1, které umožňuje připojení elektromotoru k dynamometru, pomocí kterého byl elektromotor protáčen na požadovanou rychlost pro účely tohoto měření. Indukované elektrické napětí bylo měřeno na dvou fázích elektromotoru pomocí digitálních multimetrů. Výsledné hodnoty z měření jsou uvedeny v tabulce 4.3.

č. měř.	$n[ot.min^{-1}]$	$U_i[V]$
1	500	7,52
2	600	9,02
3	700	10,54
4	800	12,05
5	900	13,54
6	1000	15,06

Tabulka 4.3: Hodnoty z měření napěťové konstanty k_e

Výslednou hodnotu napěťové konstanty jsem určil metodou lineární regrese na základě rovnice regresní přímky (4.17).

$$U_i = \overline{k_e} \cdot n \quad (4.17)$$

Pro nejlepší odhad směrnice z naměřených hodnot jsem použil vztah:

$$k_e = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \cdot U_i}{\sum_{i=1}^N n_i^2} \quad (4.18)$$

Výsledná hodnota napěťové konstanty elektromotoru vyšla $k_e = 15,05 V/1000 ot.min^{-1}$.

Naměřené hodnoty indukovaného napětí při známé rychlosti jsem zároveň využil pro určení spřaženého magnetického toku permanentních magnetů Φ_B podle vztahu:

$$U_i = \Phi_B \cdot \omega_m \quad (4.19)$$

Výsledná hodnota spřaženého magnetického toku permanentních magnetů vyšla $\Phi_B = 0,14 Wb$.

4.2.4 Měření indukčnosti vinutí

Hodnoty indukčnosti vinutí L_d a L_q jsem stanovil pomocí popsané metody měřením v disertační práci [9]. Při této metodě se pro potřebné natočení rotoru do elektrické polohy $v = \pi/2$ využívá buzení stejnosměrným napětím společně s vhodným zapojením fází. Při vlastním měření je pak rotor motoru v této poloze zablokován, vinutí je napájeno pomocí autotransformátoru napájeného ze síťového napětí a měří se velikost napětí a proudu. Hodnoty z měření indukčností jsou uvedeny v tabulkách 4.4 a 4.4.

Hodnoty indukčnosti vinutí L_d a L_q jsem určil pomocí následujících vzorců s využitím již stanoveného odporu statorového vinutí R_s a známé hodnoty síťové frekvence 50 Hz

$$L_d = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{|u_{ab}|^2}{|i_a|^2} - \left(\frac{3}{2}R_s\right)^2} \quad (4.20)$$

$$L_q = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{|u_{bc}|^2}{|i_b|^2} - (2R_s)^2} \quad (4.21)$$

č. měř.	$U_{ab}[V]$	$I_a[A]$	$L_d[H]$
1	0,74	10,55	0,00014853
2	0,67	9,52	0,00014903
3	0,52	7,41	0,00014860
4	0,46	6,48	0,00015033
5	0,38	5,42	0,00014847
6	0,31	4,38	0,00014988
7	0,22	3,14	0,00014837
8	0,18	2,48	0,00015372
9	0,14	2,07	0,00014320
10	0,09	1,33	0,00014327

Tabulka 4.4: Hodnoty z měření indukčnosti vinutí L_d

č. měř.	$U_{ab}[V]$	$I_a[A]$	$L_q[H]$
1	0,10	1,31	0,00012111
2	0,16	2,12	0,00011973
3	0,21	2,76	0,00012071
4	0,29	3,82	0,00012044
5	0,34	4,34	0,00012431
6	0,42	5,57	0,00011962
7	0,55	7,24	0,00012052
8	0,61	8,11	0,00011932
9	0,67	8,85	0,00012010
10	0,77	10,14	0,00012047

Tabulka 4.5: Hodnoty z měření indukčnosti vinutí L_q

Výsledné hodnoty indukčnosti vinutí z naměřených hodnot jsem určil pomocí aritmetických průměrů s výsledky $L_d = 0,00014834 H$ a $L_q = 0,00012063 H$.

4.2.5 Shrnutí parametrů trakčního motoru Zero Motorcycles ZF 75-7

Parametry pro matematický model v softwaru MATLAB Simulink se do softwaru načítají z externího souboru (m-file), ve kterém jsou všechny potřebné parametry zapsány. Popis jednotlivých hodnot parametrů pro motor Zero Motorcycles ZF 75-7 je proveden v následujícím náhledu souboru. Za symbolem „%“ je uveden popis.

```
% Data_dg_model_ucinnost_Zero_75-7.m
```

```
n_limit = 7000 % Limitní hodnota požadovaných otáček elektromotoru;  
Určena podle hodnoty od výrobce elektromotoru;
```

```
I_limit = 300 % Limitní hodnota proudu;  
Určena podle max. hodnoty použitého měniče;
```

```
Ld = 0.00014834 % Indukčnost statorového vinutí ve směru osy d;  
Určena popsáním měřením;
```

```
Lq = 0.00012063 % Indukčnost statorového vinutí ve směru osy q;  
Určena popsáním měřením;
```

```
Rs = 0.003 % Činný odpor statorového vinutí jedné fáze elektromotoru;  
Určen popsáním měřením;
```

```
ke = 15.05 % Napěťová konstanta elektromotoru; Určena popsáním měřením;
```

```
km = 0.22 % Momentová konstanta elektromotoru;  
Určena na základě katalogového údaje obdobného elektromotoru  
a následně ověřena měřením na dynamometru;
```

```
psi = 0.15 % Magnetický tok permanentních magnetů; Určen popsáním měřením;
```

```
Pp = 5 % Počet pólpárů elektromotoru; Určen na základě katalogového údaje;
```

```
J=0.05 % Moment setrvačnosti rotoru elektromotoru.  
Určen na základě katalogového údaje obdobných elektromotorů;
```

```
Ki = 10 % Proporcionální složka proudového regulátoru;  
Určena postupnou změnou hodnoty pro optimální regulaci elektromotoru.
```

```
Ti = 0.002 % Časová konstanta proudového regulátoru;  
Určena postupnou změnou hodnoty pro optimální regulaci elektromotoru.
```

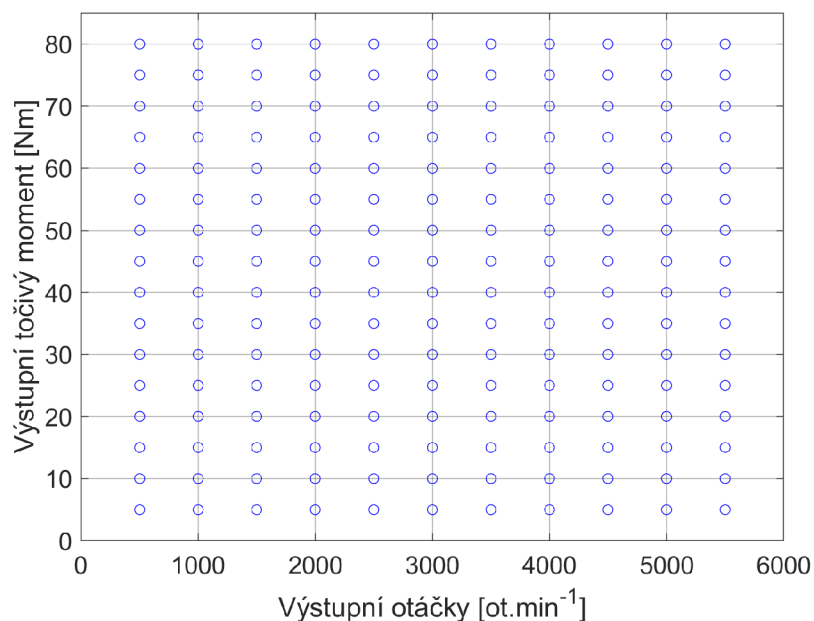
```
Ks = 400 % Proporcionální složka otáčkového regulátoru;  
Určena postupnou změnou hodnoty pro optimální regulaci elektromotoru.
```

$T_s = 0.4$ % Časová konstanta otáčkového regulátoru;
Určena postupnou změnou hodnoty pro optimální regulaci elektromotoru.

$K_{add}=0.01$ % Konstanta dodatečných ztrát;
Určena volbou z doporučeného rozsahu podle literatury 0.005 - 0.05;

4.3 Výsledky účinnosti modelu motoru Zero Motorcycles ZF 75-7

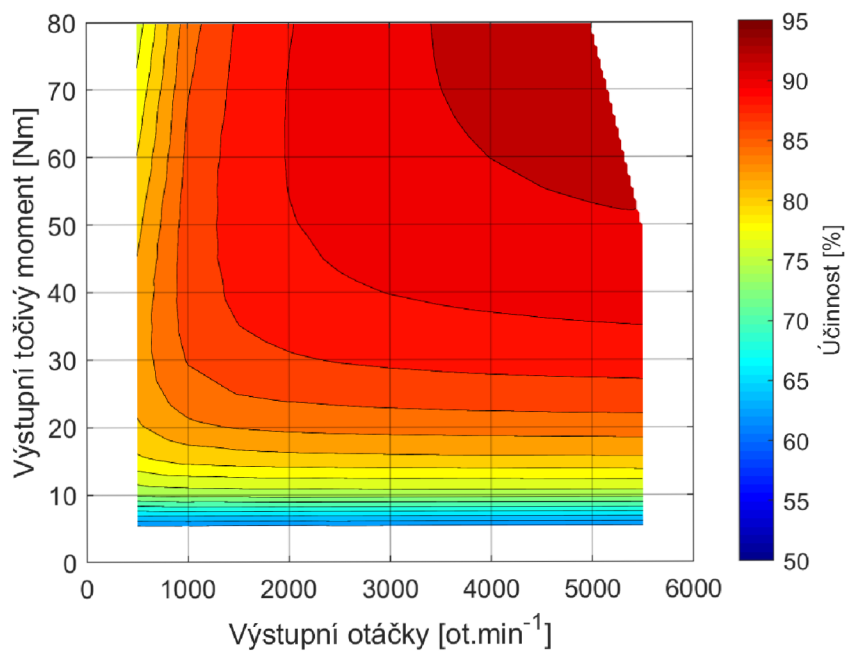
Vytvořený matematický model v prostředí softwaru MATLAB Simulink umožňuje provést simulaci provozu elektromotoru v požadované sekvenci výstupních otáček a výstupního točivého momentu, které jsou zapotřebí pro pokrytí mapované oblasti účinnosti elektromotoru. Požadovaná mapovaná oblast výstupních otáček a výstupního točivého momentu elektromotoru Zero Motorcycles ZF 75-7 je znázorněna formou bodů v podobě modrých kružnic na obrázku 4.4.



Obrázek 4.4: Mapovaná oblast výstupních otáček a výstupního točivého momentu elektromotoru

Před zahájení vlastní práce s modelem je zapotřebí do prostředí MATLAB načíst soubor s parametry motoru, který jsem blíže popsal v kapitole 4.2.5. Následně se zadá požadovaná délka simulace, požadované hodnoty pro sekvence výstupních otáček a výstupního točivého momentu a časový interval pro opakování sekvence točivého momentu. Po dokončení simulace v prostředí Simulinku se v prostředí vlastního MATLABu spustí nejdříve soubor Postprocess.m, který spustí výpočet aritmetic-

kých průměrů ze všech uložených hodnot otáček, točivého momentu a účinnosti. Průměry vypočítá pro potřebné body pro mapování účinnosti elektromotoru. Vlastní generování mapy účinnosti je pak provedeno spuštěním souboru Generate-map.m. Na obrázku 4.5 je zobrazena výsledná mapa účinnosti z matematického modelu pro modelovaný elektromotor Zero Motorcycles ZF 75-7.



Obrázek 4.5: Mapa účinnosti z matematického modelu elektromotoru Zero Motorcycles ZF 75-7

5 Experimentální měření účinnosti trakčního PMSM

Pro účel experimentálního měření účinnosti trakčního motoru Zero Motorcycles ZF 75-7 jsem použil dostupné zařízení původně navržené pro měření pasivních odporů spalovacích motorů protáčením elektrickým motorem v laboratoři pohonných jednotek katedry vozidel a motorů. Na zařízení byly provedeny patřičné mechanické, elektronické a softwarové úpravy pro potřeby měření účinnosti elektrického motoru.

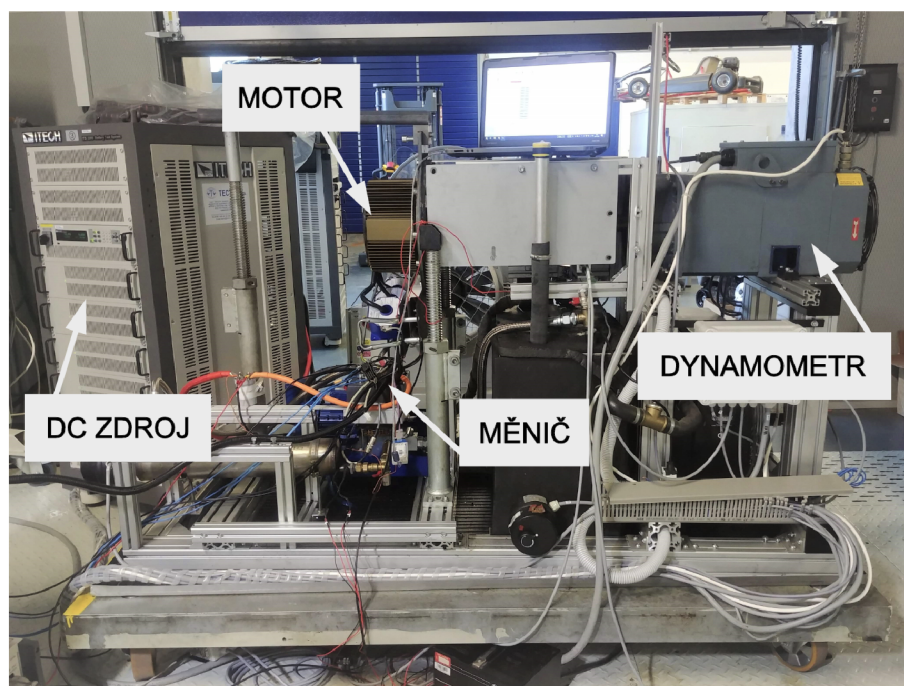
Mechanicky bylo zařízení vybaveno držákem pro upevnění elektromotoru do požadované polohy, axiální vzpěrou držáku a pro spojení měřeného elektromotoru s dynamometrem robustní hřídelí se dvěma spojkami Mayr, které byly dodány přímo pro potřeby tohoto zařízení. V řídicím systému stanoviště byl upraven regulátor dynamometru tak, aby bylo dosaženo hladšího chodu při provozu soustavy dynamometru a měřeného elektromotoru.

5.1 Metodika měření účinnosti PMSM

Stanoviště je vybaveno elektrickým asynchronním třífázovým motorem SIEI MA 133 K-G2, který je využíván jako dynamometr. Jeho parametry jsou následující: nominální výkon 28 kW, nominální točivý moment 94 Nm, max. otáčky 7000 rpm, hmotnost 132 kg. Pro účely měření točivého momentu je na stanovišti instalován snímač točivého momentu HBM T40B. Jedná se o vysoce robustní a přesný snímač točivého momentu, který v kombinaci s integrovaným magnetickým systémem snímání otáček umožňuje měření okamžitého výkonu na hřídeli měřeného motoru. Snímač umožňuje měřit nominální točivý moment do 200 Nm s maximem otáček až 20 000 rpm. Stanoviště je obsluhováno pomocí vlastního řídicího systému, který je vytvořen z komponent společnosti B&R Industrial Automation GmbH. Experimentální stanoviště je zobrazeno na obrázku 5.1.

Předmětem mého experimentu měření účinnosti elektrického pohonu byla sestava pohonu složená z elektromotoru Zero Motorcycles ZF 75-7 a měniče Sevcon Gen 4 110 V / 300 A. Elektromotor Zero Motorcycles ZF 75-7 je vzduchem chlazený synchronní motor s permanentními magnety s následujícími parametry: špičkový točivý moment 144 Nm, trvalý točivý moment 45 Nm, špičkový výkon 50 kW, trvalý výkon 17 kW, max. otáčky 6000 $ot.min^{-1}$, hmotnost 17 kg. Tyto parametry motor dosahuje v případě použití výkonnějšího měniče, který nebyl během experimentu k dispozici. Pro účely experimentu jsem použil třífázový měnič Sevcon Gen

4 poskytující maximální fázový proud 350 A.

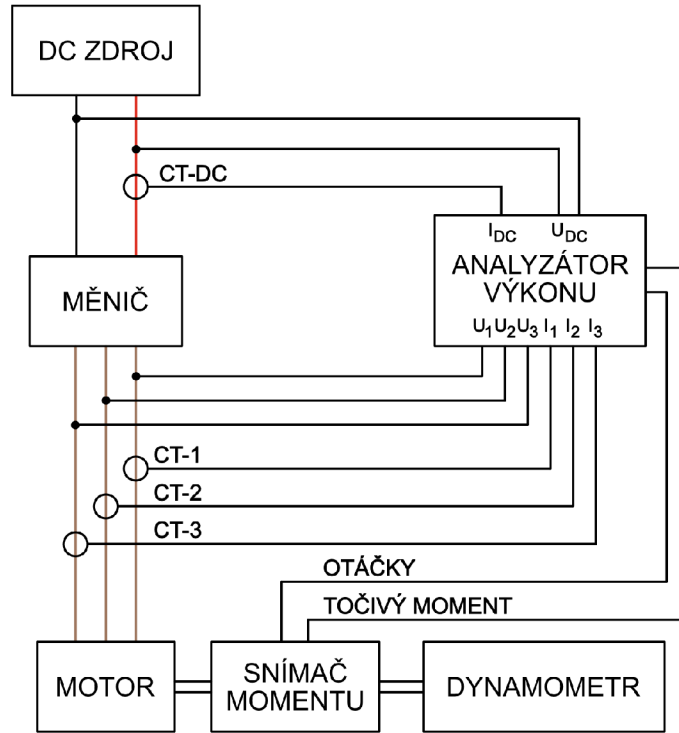


Obrázek 5.1: Experimentální stanoviště pro měření účinnosti elektromotoru

Pro napájení pohonu jsem použil DC zdroj ITECH IT6000C. Jedná se o obousměrný programovatelný zdroj stejnosměrného proudu, který kombinuje dvě zařízení v jednom – zdroj napájení a elektronickou zátěž s rekuperací energie do sítě v potřebných hodnotách napětí a elektrického proudu pro provoz elektrického pohonu. Svým chováním nahrazuje připojení pohonu k baterii, lze jej také nazývat „bateriovým emulátorem“. Emulátor je schopen dodat napětí o hodnotě 0 – 800 V a proud o maximální hodnotě 300 A. Emulátor současně během provozu poskytuje údaje o aktuálních hodnotách proudu a napětí. Jednotlivé bateriové emulátory lze paralelizovat pro zvýšení maximálního dodávaného proudu.

Cílem experimentu bylo získání dat pro sestavení mapy účinnosti elektromotoru. Měřený elektromotor byl na stanovišti mechanicky spojen přes hřídelovou spojku s jednou částí snímače točivého momentu. Druhá část snímače momentu byla mechanicky spojena s dynamometrem. Tím byla zajištěna možnost zatěžovat měřený elektromotor potřebným momentem. Schéma experimentu je zobrazeno na obrázku 5.2. Použitý snímač točivého momentu poskytoval data o aktuálních otáčkách a aktuálním momentu motoru. Při měření byl dynamometr provozován v otáčkovém režimu, otáčky pohonu byly tedy nastavovány na řídicím systému dynamometru. Měřený elektromotor byl provozován v momentovém režimu, točivý moment byl volen pomocí ovladače měniče. DC zdroj byl nastaven tak, aby poskytoval hodnotu napětí 100 V a max. hodnotu proudu ± 300 A.

Pro účely měření a zpracování elektrických i mechanických veličin jsem využil na pracovišti dostupný velmi přesný analyzátor výkonu Yokogawa WT5000. Analyzátor umožňuje zpracování dat všech měřených veličin v reálném čase na jedné časové



Obrázek 5.2: Schéma experimentu měření účinnosti elektromotoru

ose. Pro měření hodnot proudů a napětí je osazen čtyřmi přesnými měřicími kartami umožňujícími připojení externího senzoru proudu. Jak je zobrazeno na schématu experimentu na obrázku 5.2, do analyzátoru byla zavedena měřená data mechanických veličin otáček a točivého momentu ze snímače točivého momentu. Do analyzátoru byly dále zavedeny elektrické veličiny mezi DC zdrojem a měničem a také elektrické veličiny pro všechny tři fáze mezi měničem a motorem. Pro měření proudu byly použity čtyři snímače LEM IT 700-S Ultrastab na schématu experimentu na obrázku 5.2 je zobrazena jejich poloha označením $CT - DC$ a $CT - 1$, $CT - 2$ a $CT - 3$. LEM IT 700-S umožňuje měřit proud o maximální hodnotě ± 700 A. Napětí U_{DC} , U_1 , U_2 a U_3 bylo měřeno přímo měřicími kartami výkonového analyzátoru.

Použité zapojení všech snímačů a analyzátoru výkonu umožnilo během experimentu sledovat příkon celého elektrického pohonu P_{DC} mezi DC zdrojem a měničem, výkon měniče P_C mezi měničem a motorem a zároveň i mechanický výkon na hřídeli měřeného elektromotoru P_{PMSM} . Analyzátor následně podle vzorců 5.1 – 5.3 v reálném čase vypočítával účinnost měniče η_C , účinnost motoru η_{PMSM} a účinnost celého pohonu η_D .

$$\eta_C = \frac{P_C}{P_{DC}} \quad (5.1)$$

$$\eta_{PMSM} = \frac{P_{PMSM}}{P_C} \quad (5.2)$$

$$\eta_D = \frac{P_{PMSM}}{P_{DC}} \quad (5.3)$$

Vlastní měření jsem provedl v rozsahu otáček 500 ot.min^{-1} až 5500 ot.min^{-1} s krokem 500 ot.min^{-1} a v rozsahu vstupního proudu do měniče v rozsahu 5 A až 300 A s krokem 5 A. Každý bod měření byl se záznamem všech dat na analyzátoru po dobu 5 s se záznamem 20 vzorků za sekundu. Pro získání výsledných hodnot pro každý měřený bod jsem pro všechna potřebná data následně v softwaru MATLAB spočítal aritmetický průměr z naměřených hodnot.

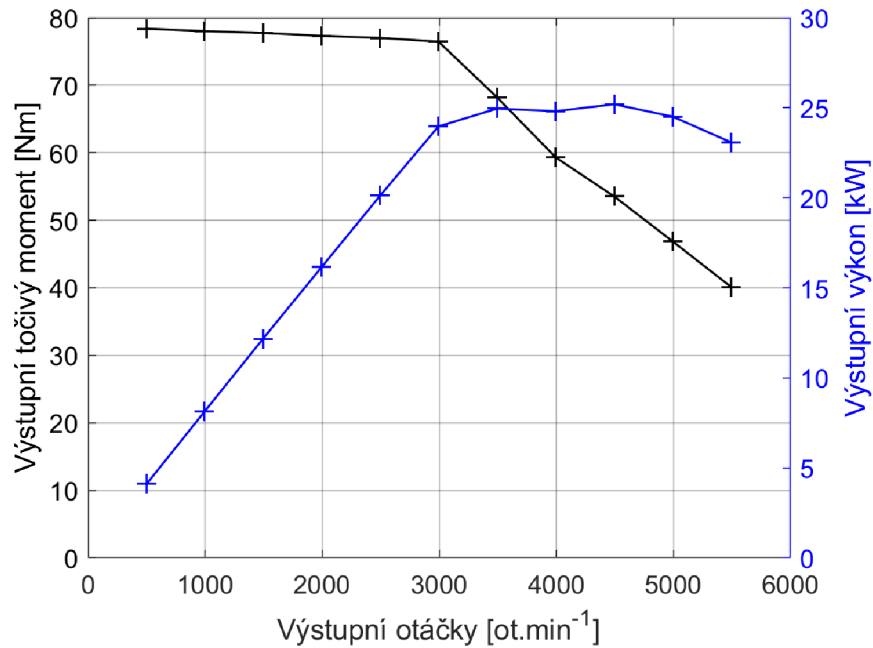
Pro účely zajištění dostatečného chlazení pohonu jsem během měření použil externí ventilátor z válcové zkušebny. Teplotní regulace v měniči byla během experimentu nastavena proti překročení kritické hodnoty teploty permanentních magnetů v motoru. Při překročení nastavené teploty měnič sníží fázový proud motoru podle nastavené křivky. Všechny měřené body byly měřeny vždy před dosažením této kritické teploty motoru.

5.2 Výsledky měření účinnosti PMSM

Výsledky jsou uvedeny pro použitou konfiguraci pohonu s motorem Zero Motorcycles ZF 75-7 a měničem Sevcon Gen 4 110 V / 300 A. Maximální výkonové parametry pohonu byly tedy shora omezeny především maximálním dostupným fázovým proudem měniče na 350 A. Při vyšších otáčkách musel být následně omezen fázový proud měniče, protože se zvyšujícími otáčkami rostl i potřebný DC proud do měniče, který byl omezený DC zdrojem na max. hodnotu proudu 300 A. Zpracování dat do podoby momentové charakteristiky a map účinností jsem provedl v softwaru MATLAB.

Průběh točivého momentu byl naměřen v rozsahu 500 ot.min^{-1} až 3000 ot.min^{-1} v rozmezí hodnot 76,46 Nm až 78,37 Nm. Hodnota 78,37 Nm tak byla naměřeným maximem točivého momentu motoru. Při vyšších otáčkách motoru začal poskytovaný točivý moment postupně klesat a to na hodnotu 59,31 Nm při 4000 ot.min^{-1} až k hodnotě 40,10 Nm při max. měřených otáčkách 5500 ot.min^{-1} . Průběh výkonu motoru začal na hodnotě 4,14 kW při 500 ot.min^{-1} a stabilně rostl až na hodnotu 23,97 kW při 3000 ot.min^{-1} . Maximální naměřený výkon motoru byl 25,20 kW při 4500 ot.min^{-1} . Průběh naměřeného točivého momentu a výkonu motoru je zobrazen na obrázku 5.3.

Výsledná mapa účinnosti pro celý elektrický pohon složený z motoru Zero Motorcycles ZF 75-7 a měniče Sevcon Gen 4 110 V / 300 A je zobrazena na obrázku 5.4. Pohon vykázal při měření účinnost větší než 85 % v oblasti definované přibližným rozsahem otáček 2500 ot.min^{-1} až 5500 ot.min^{-1} a přibližným rozsahem točivého momentu 28 Nm až 76 Nm. Dosažené maximum účinnosti bylo 88,9 % v bodu 4000 ot.min^{-1} a 59,3 Nm. Nejnižší hodnoty účinnosti byly naměřeny v okrajové oblasti v dolní části mapy v oblasti definované přibližným rozsahem otáček 1000 ot.min^{-1} až 4500 ot.min^{-1} a přibližným rozsahem točivého momentu 3,9 Nm až 7 Nm, ve kterém se hodnoty účinnosti pohybovaly v intervalu 51,2 % až 66,3 %. Nad touto oblastí se již hodnoty účinnosti poměrně rychle dostávaly nad 70 %. Dosažená

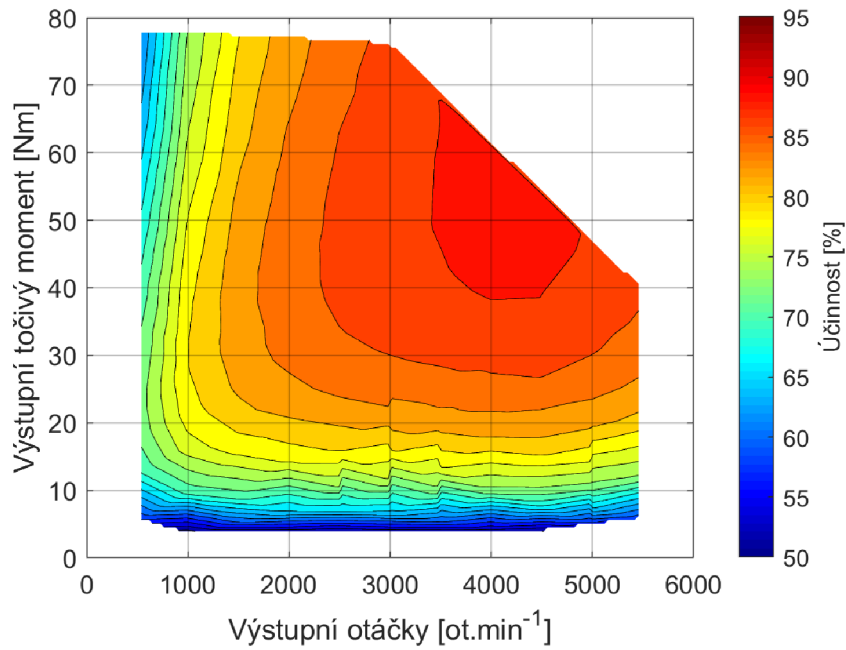


Obrázek 5.3: Momentová charakteristika měřeného elektrického pohonu s motorem Zero Motorcycles ZF 75-7 a měničem Sevcon Gen 4

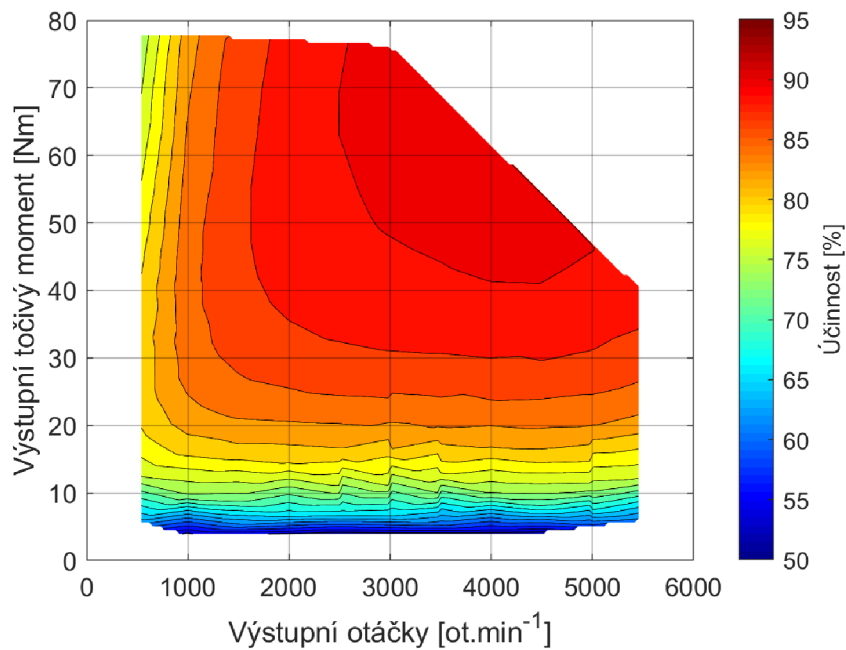
účinnost v oblasti v rozsahu nízkých otáček $500\ ot.min^{-1}$ až $1000\ ot.min^{-1}$ a celém rozsahu točivého momentu $5\ Nm$ až $78,37\ Nm$ byla v rozmezí hodnot $51,2\ \%$ až $79,9\ \%$.

Výsledná mapa samostatné účinnosti pro motor Zero Motorcycles ZF 75-7 řízeným měničem Sevcon Gen 4 $110\ V / 300\ A$ bez započítání účinnosti měniče, je zobrazena na obrázku 5.5. Motor vykázal při měření účinnost větší než $85\ \%$ v široké oblasti definované přibližným rozsahem otáček $1100\ ot.min^{-1}$ až $5500\ ot.min^{-1}$ a přibližným rozsahem točivého momentu $24,2\ Nm$ až $77,8\ Nm$. Pásmo účinnosti větší než $90\ \%$ bylo naměřeno v přibližném rozsahu otáček $2800\ ot.min^{-1}$ až $4700\ ot.min^{-1}$ a točivého momentu $50,1\ Nm$ až $76,2\ Nm$. Dosažené maximum účinnosti bylo $91,2\ \%$ v bodu $4000\ ot.min^{-1}$ a $59,3\ Nm$. Nejnižší hodnoty účinnosti byly naměřeny v okrajové oblasti v dolní části mapy v oblasti definované přibližným rozsahem otáček $900\ ot.min^{-1}$ až $4500\ ot.min^{-1}$ a přibližným rozsahem točivého momentu $3,9\ Nm$ až $7\ Nm$, ve které se hodnoty účinnosti pohybovaly v intervalu $52,7\ \%$ až $68,1\ \%$. Nad touto oblastí se již hodnoty účinnosti poměrně rychle dostávaly nad $70\ \%$. Dosažená účinnost v oblasti v rozsahu nízkých otáček $500\ ot.min^{-1}$ až $1000\ ot.min^{-1}$ a celém rozsahu točivého momentu $5\ Nm$ až $78,37\ Nm$ byla v rozmezí hodnot $53,9\ \%$ až $86,6\ \%$.

Výsledná mapa samostatné účinnosti pro měnič Sevcon Gen 4 $110\ V / 300\ A$, který řídil během experimentu motor Zero Motorcycles ZF 75-7 je zobrazena na obrázku 5.6. Měnič vykázal při měření účinnost větší než $90\ \%$ v téměř celém provedeném rozsahu měření účinnosti otáček a točivého momentu. Menší účinnosti bylo dosaženo v oblasti nízkých otáček motoru přibližně $500\ ot.min^{-1}$ až $1100\ ot.min^{-1}$



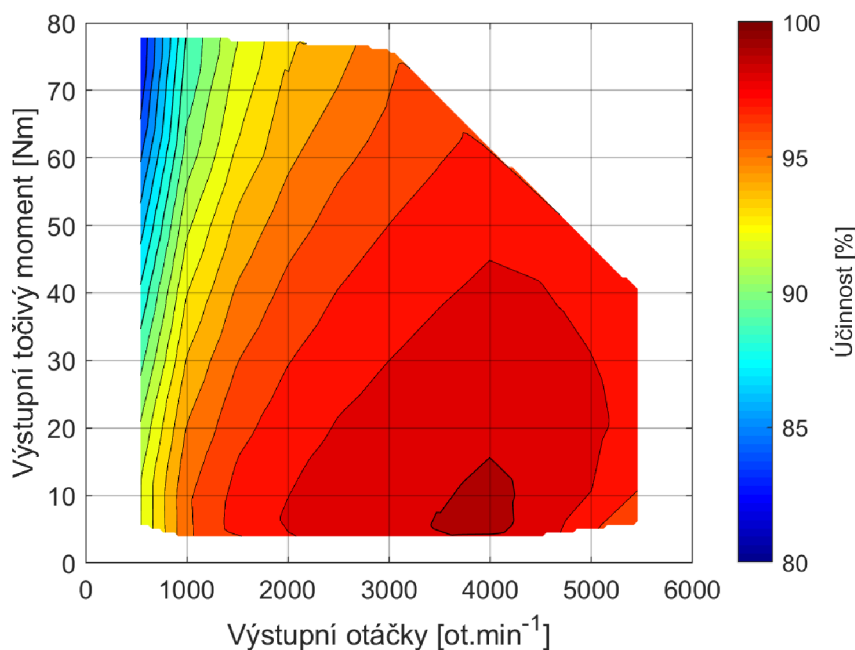
Obrázek 5.4: Mapa účinnosti měřeného elektrického pohonu s motorem Zero Motorcycles ZF 75-7 a měničem Sevcon Gen 4



Obrázek 5.5: Mapa účinnosti měřeného elektrického motoru Zero Motorcycles ZF 75-7

a točivého momentu přibližně 29,3 Nm až 78,37 Nm. Výrazně nižší účinnost měnič podle měření vykazoval v oblasti vyšších točivých momentů, přibližně více než 58,6

Nm až 78,37 Nm, a nízkých otáček 500 $ot.min^{-1}$ až 850 $ot.min^{-1}$. V této oblasti bylo dosaženo i naměřené minimum účinnosti měniče 82,6 % při 500 $ot.min^{-1}$ a 78,37 $ot.min^{-1}$.



Obrázek 5.6: Mapa účinnosti měřeného měniče Sevcon Gen 4

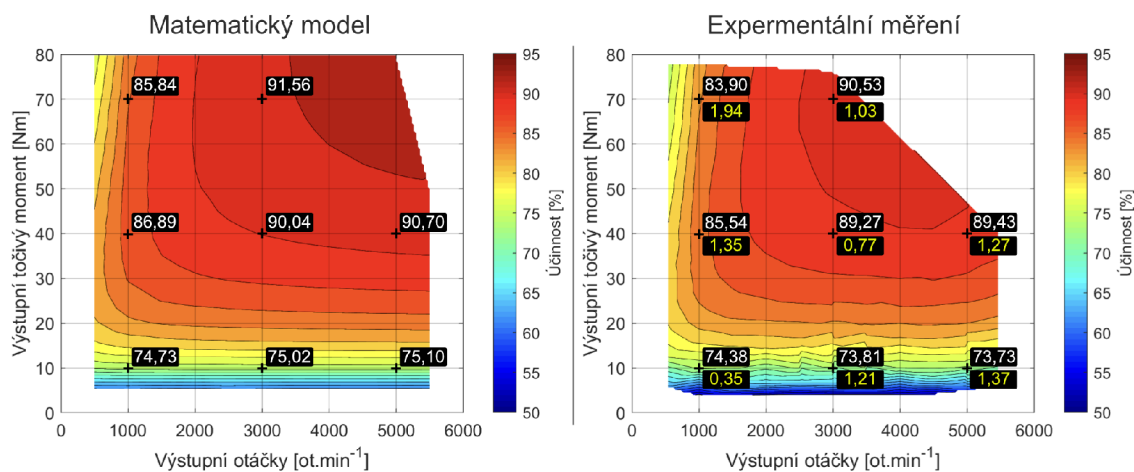
5.3 Porovnání výsledků měření účinnosti PMSM s matematickým modelem

Na obrázku 5.7 jsou zobrazeny obě výsledné mapy účinnosti pro účely porovnání výsledků účinnosti se zvýrazněnými hodnotami účinnosti v určitých provozních bodech elektrického motoru. Výsledné hodnoty účinnosti jsou na obou mapách ve srovnatelných rozsazích hodnot. Distribuce hodnot účinnosti má na obou mapách při porovnání hraničních křivek účinnosti velmi podobný charakter.

Viditelným rozdílem při porovnání mapy účinnosti z experimentálního měření s mapou účinnosti z matematického modelu je oblast v horní části mapy v rozsahu točivého momentu přibližně 78 Nm až 80 Nm na celém rozsahu otáček, ve které v mapě z modelu jsou spočítány výsledky, kdežto na mapě z měření již výsledky účinnosti nejsou dostupné, protože měřený elektrický pohon v použité konfiguraci při měření dosáhl svého maxima točivého momentu. Podobně je tomu tak i v oblasti mapy za hranicí výstupních otáček motoru 3000 $ot.min^{-1}$ a rozsahu točivého momentu přibližně 40 Nm až 80 Nm, ve které jsou opět výsledky účinnosti v mapě z modelu uvedeny pro větší provozní oblast. Důvodem popsané odlišnosti výsledků z experimentálního měření a výsledků z matematického modelu je skutečnost,

že do matematického modelu nejsou implementována všechna omezení, která byla dosažena na měřeném elektrickém pohonu.

Pro bližší porovnání hodnot z obou výsledných map účinností jsem vybral osm provozních bodů s přibližnou distribucí v rámci celé provozní oblasti použitého elektrického motoru. Jednotlivé hodnoty pro vybrané body jsou uvedeny v obrázku 5.7. Ve vybraných provozních bodech dosahují výsledné hodnoty účinnosti z matematického modelu vždy větší hodnoty v rozsahu rozdílu 0,35 % až 1,94 %. Jednotlivé hodnoty rozdílu jsou v obrázku 5.7 u každého vybraného provozního bodu uvedeny žlutou barvou textu. Největšího uvedeného rozdílu 1,94 % je dosaženo v provozním bodu 1000 $ot.min^{-1}$ výstupních otáček a 70 Nm výstupního točivého momentu. Naopak nejmenšího rozdílu 0,35 % je dosaženo v provozním bodu 1000 $ot.min^{-1}$ výstupních otáček a 10 Nm výstupního točivého momentu. Hodnoty rozdílů výsledných hodnot účinnosti ve vybraných provozních bodech nevykazují určitou závislost například s rostoucími výstupními otáčkami motoru nebo s růstem výstupního točivého momentu.



Obrázek 5.7: Porovnání výsledků účinnosti matematického modelu a experimentálního měření

6 Dílčí shrnutí první části disertační práce

V úvodní části své disertační práce jsem zpracoval přehled současného stavu problematiky na jehož základě jsem si stanovil cíle disertační práce se zaměřením na metodiku vyhodnocování účinnosti hnacího ústrojí elektrických vozidel. Následně jsem sestavil matematický model nejpoužívanějšího typu elektromotoru PMSM v současně vyráběných elektrických vozidlech, který poskytuje výsledky ve formě mapy účinnosti. Při sestavování modelu PMSM jsem dále provedl stanovení potřebných parametrů pomocí měření. Tímto krokem jsem naplnil dílčí cíl vytvoření matematického modelu elektromotoru.

V další části této práce jsem provedl experimentální měření účinnosti trakčního PMSM. Pro toto měření jsem využil dostupné zařízení a vybavení na Technické univerzitě v Liberci, které bylo původně využíváno k jiným účelům. Výsledky tohoto měření byly tři separátní mapy účinnosti - pro elektrický pohon skládající se z elektromotoru a měniče, samotného elektromotoru a samotného měniče. Výsledky měření jsem porovnal s výsledky z matematického modelu motoru a na základě tohoto porovnání výsledných map účinností si dovoluji konstatovat, že zvolený typ matematického modelu s dostatečnou přesností modeluje výpočet účinnosti trakčního PMSM a zároveň respektuje obecnou snahu o použití dostatečně jednoduchého matematického modelu, který poskytuje výsledky s dostatečnou přesností. Touto částí jsem tedy naplnil dílčí cíl provedení experimentálního měření účinnosti elektromotoru. Získané mapy účinnosti jsem v další části disertační práce využil v simulačním modelu vozidla s elektrickým hnacím ústrojím.

Vytvořený matematický model, popsaná metodika měření účinnosti elektromotoru na využitém dostupném zařízení a uvedené výsledky účinnosti zároveň poskytují vhodné základy pro další výzkum a vývoj v oblasti trakčních elektrických pohonů a jejich řízení na katedře vozidel a motorů a na dalších pracovištích Technické univerzity v Liberci.

7 Simulační model vozidla s elektrickým hnacím ústrojím

Tuto část disertační práce věnuji popisu vytvořeného simulačního modelu vozidla s elektrickým hnacím ústrojím. Mým cílem bylo sestavení simulačního modelu vozidla s elektrickým hnacím ústrojím, který bude vhodný pro vyhodnocování účinnosti hnacího ústrojí na standardizovaných jízdních cyklech. Na základě prostudování softwaru Ricardo IGNITE, který byl dostupný na katedře vozidel a motorů, jsem se rozhodl naplnit tento cíl mé disertační práce právě v tomto softwaru.

Následující popis softwaru Ricardo IGNITE a jeho částí v této kapitole vychází z informací uvedených v [29]. Ricardo IGNITE je software, který slouží pro modelování a simulaci kompletního vozidla. Jeho předností je možnost poměrně rychlého analyzování různých komponent vozidla a jejich vzájemných interakcí. Software využívá bohatě vybavené knihovny bloků komponent, ze kterých je možné modely vytvářet. U každého bloku lze pak definovat potřebné parametry komponenty. Po sestavení výpočtového modelu lze v prostředí softwaru spustit simulaci a po provedené simulaci lze využít implementovaný nástroj RPOST pro post-processing a analýzy výsledků. Kromě modelování systémů s hnacím ústrojím vozidel lze v IGNITE modelovat také elektrické, řídicí a tepelné systémy.

7.1 Popis simulačního modelu vozidla s elektrickým hnacím ústrojím

V prostředí softwaru Ricardo IGNITE jsem na základě detailního studia softwaru vytvořil simulační model vozidla s elektrickým hnacím ústrojím, který umožňuje vyhodnocování účinnosti hnacího ústrojí na standardizovaných i vlastních jízdních cyklech. Simulace je v modelu provedena na základě výpočtů hnací síly vozidla z jízdních odporových sil působících na vozidlo. Konkrétně model zohledňuje následující jízdní odpory: odpor valení, odpor vzduchu, odpor setrvačnosti a odpor stoupání. Model je vytvořený pro konvenční hnací ústrojí elektrických vozidel blíže popsané v kapitole 2.2. Jedná se tedy o ústrojí s jedním elektromotorem a mechanickou hřídelovou převodovkou s jedním rychlostním stupněm a s mechanickým diferenciálem.

Model vozidla počítá translační pohyb (pozici, rychlost a akceleraci) a normálové zatížení na každé nápravě. Trakční síla na pneumatikách pohání vozidlo, zatímco jízdní odpory působí na vozidlo proti směru jízdy. Model zohledňuje také stoupání a distribuci zatížení mezi nápravy.

Podélná akcelerace vozidla je počítána na základě následujících rovnic:

$$\Sigma F_H = F_{TA} + F_{TB} + F_{TC} + F_{TD} - F_V - F_Z - Mgsin(\alpha) - F_B \quad (7.1)$$

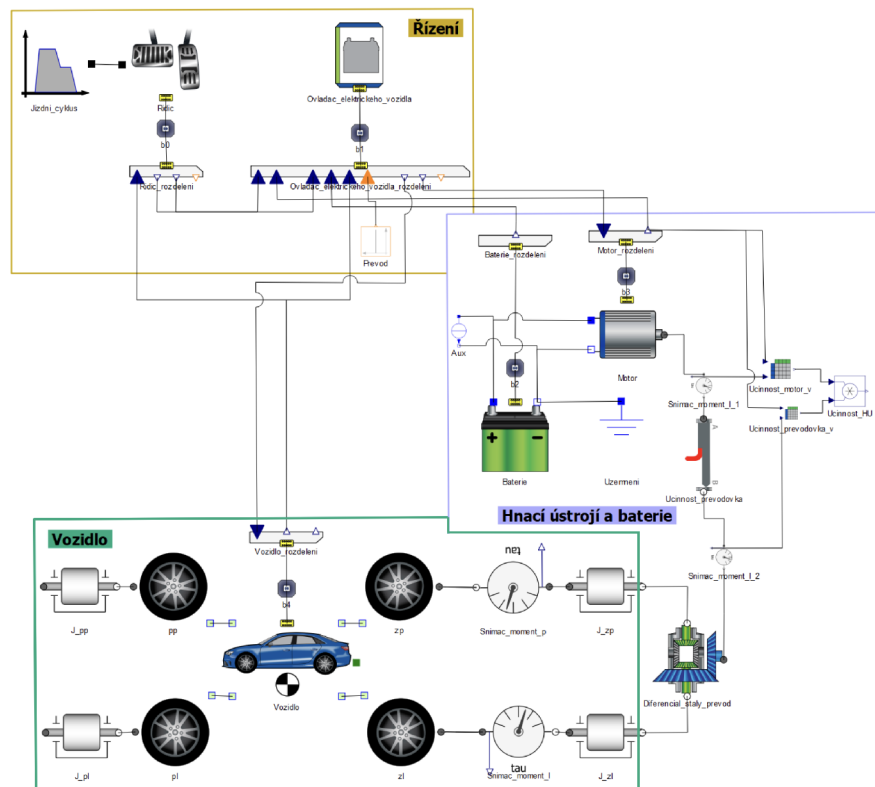
$$a_V = \Sigma F_H / M \quad (7.2)$$

$$dv_V / dt = a_V \quad (7.3)$$

$$dx_V / dt = v_V \quad (7.4)$$

kde F_{TA} , F_{TB} , F_{TC} a F_{TD} jsou trakční síly generované od levých a pravých pneumatik na přední a zadní nápravě; F_V je odpor vzduchu; F_Z je tažná zátěž; F_B brzdná síla; M hmotnost vozidla; g gravitační zrychlení; a_V zrychlení vozidla; v_V rychlost vozidla; x_V pozice vozidla a α je úhel podélného sklonu vozovky.

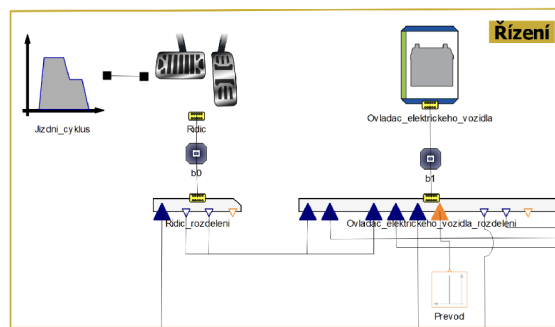
Model je rozdělen do tří sekcí podle vlastností jednotlivých bloků v určité sekci. Konkrétně se jedná o sekce řízení, vozidlo, hnací ústrojí a baterie. Náhled celého modelu vozidla je zobrazen na obrázku 7.1. Po vybrání jednotlivého bloku je možné v prostředí softwaru zadávat a upravovat související parametry.



Obrázek 7.1: Simulační model vozidla s elektrickým hnacím ústrojím v Ricardo Ignite

Sekce řízení, zobrazena na obrázku 7.2, se skládá z hlavních bloků: jízdní cyklus, řidič a ovladač elektrického vozidla. Blok jízdní cyklus definuje jízdní cyklus, kterému

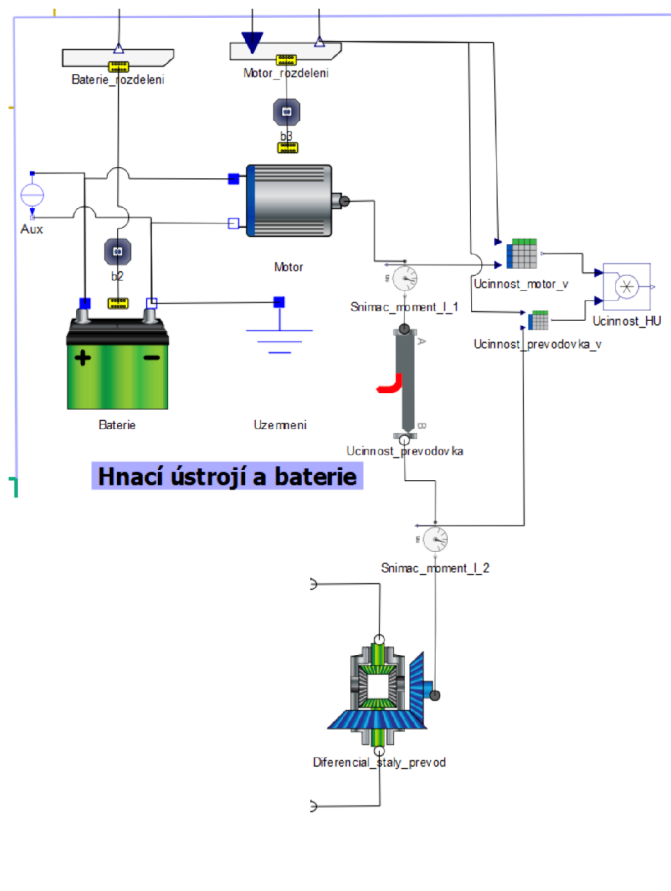
bude simulované vozidlo podrobena. Je možné vybírat z předdefinovaných jízdních cyklů nebo vkládat vlastní jízdní cykly jako hodnoty rychlosti vozidla v závislosti na čase. Blok řidiče řídí signály akcelerace a brzdění vozidla s cílem dosažení požadované rychlosti vozidla podle zvoleného jízdního cyklu. Blok dále umožňuje definovat specifické parametry akcelerace a brzdění vozidla. Blok ovladač elektrického vozidla ovládá elektrický motor a brzdy v závislosti na signálech řidiče. Vedlejšími bloky v této sekci jsou bloky rozdělení pro bloky řidiče a ovladač elektrického vozidla, které slouží pro rozdělení jednotlivých signálů do ostatních bloků modelu. Blok převod slouží pouze pro vyplnění požadavku zpětné vazby zařazené rychlosti pro ovladač vozidla.



Obrázek 7.2: Detail simulačního modelu - Řízení

Sekce hnací ústrojí a baterie, zobrazena na obrázku 7.3, je tvořena hlavními bloky: baterie, motor, účinnost převodovka a diferenciál stálý převod. Blok baterie reprezentuje zdroj elektrické energie, u kterého je možné nastavit základní elektrické parametry jako maximální kapacitu baterie, stav nabití, nominální napětí baterie a v případě potřeby také další parametry pro teplotní modelování baterie. Blok motoru je kombinovaný blok motoru a generátoru s vestavěným měničem a v modelu provádí konverzi mezi elektrickou a mechanickou energií za účelem pohonu vozidla. V bloku se zadává charakteristika točivého momentu v závislosti na otáčkách motoru, maximální hodnota proudu motoru a účinnost motoru, kterou je možné definovat pomocí mapy účinnosti nebo konstantní hodnotou. Blok účinnost převodovka do modelu zavádí mechanickou účinnost převodovky, kterou je možné definovat taktéž pomocí mapy účinnosti nebo konstantní hodnotou. Blok diferenciál stálý převod reprezentuje zjednodušený model ideálního stálého převodu s definicí velikosti převodového poměru. Za účelem výpočtu celkové účinnosti hnacího ústrojí na základě zadaných účinností převodovky a motoru jsou v této sekci použity bloky snímačů točivých momentů, účinnost motoru-v, účinnost převodovky-v a účinnost HU. Dílčí účinnosti převodovky a motoru jsou proto nutné zadat přímo do bloků motor a účinnost převodovka a současně stejným způsobem do bloku účinnost motor-v a účinnost převodovka-v. Vytvořený model tedy počítá s dvěma hlavními dílčími složkami účinnosti hnacího ústrojí - s účinností elektromotoru včetně měniče a s účinností převodovky. Považují zapotřebí zde poznamenat, že další součástí hnacího ústrojí, která může ovlivňovat celkovou účinnost hnacího ústrojí jsou klouby hnacích hřídelů. Podle dříve publikovaných výsledků z experimentů lze účinnost

těchto kloubů předpokládat v rozmezí hodnot 97 % až téměř 100 % v závislosti na typu kloubu [1]. Vedlejšími bloky v této sekci jsou opět bloky rozdělení baterie a motoru, které slouží k propojení signálů s dalšími bloky.

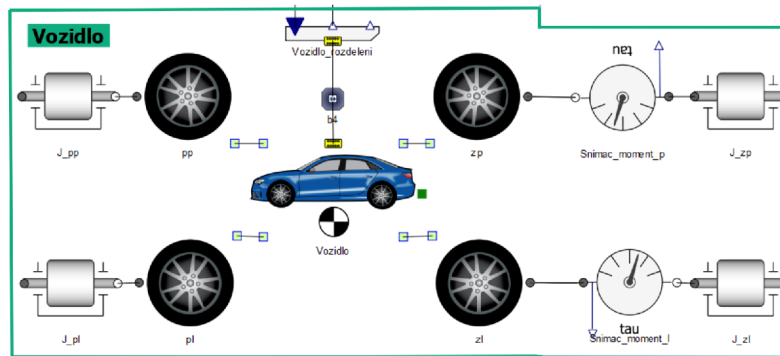


Obrázek 7.3: Detail simulačního modelu - Hnací ústrojí a baterie

Sekce vozidlo, zobrazena na obrázku 7.4, je tvořena bloky, které do modelu zavádějí parametry vozidla, kol a pneumatik. Blok vozidlo definuje počet náprav vozidla a je schopen zohledňovat zatížení náprav vzhledem k akceleraci, brzdění a sklonu vozovky. Do tohoto bloku se zadává především hmotnost vozidla, čelní plocha vozidla, koeficient odporu vzduchu a hustota vzduchu. Bloky kol s pneumatikami pp, pl, zp a zl reprezentují zjednodušené modely pneumatik s valivým odporem s nulovou hmotností a nulovým prokluzem. V bloku je zapotřebí definovat poloměr pneumatiky a součinitel odporu valení. Bloky J-pp, J-pl, J-zp a J-zl do modelu zavádí momenty setrvačnosti jednotlivých kol. Snímače momentů jsou v této sekci použity pro vyhodnocování točivého momentu na hnacích kolech vozidla.

7.2 Simulace vozidla s elektrickým hnacím ústrojím

Vytvořený simulační model vozidla s elektrickým hnacím ústrojím v softwaru Ricardo IGNITE jsem využil pro vyhodnocování účinnosti hnacího ústrojí zvoleného



Obrázek 7.4: Detail simulačního modelu - Vozidlo

vozidla na standardizovaných jízdách cyklech s uvažovaným elektrickým hnacím ústrojím skládajícím se z elektromotoru Zero Motorcycles ZF 75-7 s měničem Sevcon Gen 4 110 V / 300 A a z jednostupňové redukční převodovky s mechanickým diferenciálem s převodovým poměrem 5,857.

Pro provedení simulace bylo zapotřebí zvolit potřebné parametry vozidla. Pro přiblížení reálným parametrům vozidla jsem při volbě parametrů vycházel z dostupných parametrů vozidla Volkswagen e-Golf, nicméně vzhledem k dostupným datům o průběhu točivého momentu a účinnosti zvoleného elektromotoru z předchozích částí disertační práce jsem použité parametry vozidla volil v rámci dosahovaných parametrů motoru tak, aby vozidlo se zvolenými parametry bylo schopné absolvovat vybrané jízdny cykly NEDC se sníženou maximální rychlostí vozidla na 100 km/h a WLTC Class 2. Zvolené parametry vozidla jsou uvedeny v tabulce 7.1.

Hmotnost vozidla	[kg]	1100
Čelní plocha vozidla	[m ²]	1,8
Poloměr pneumatiky	[m]	0,31595
Součinitel odporu vzduchu	[–]	0,25
Součinitel odporu valení	[–]	0,015
Moment setrvačnosti kola	[kg.m ²]	2
Nominální napětí baterie	[V]	110
Kapacita baterie	[Ah]	89,5
Stav nabití baterie	[%]	100
Převodový poměr převodovky	[–]	5,8571

Tabulka 7.1: Parametry zvoleného vozidla pro simulaci

Momentovou charakteristiku elektromotoru jsem do modelu zadal podle naměřené charakteristiky uvedené na obrázku 5.3 v kapitole 5.2. Mapu účinnosti motoru včetně měniče uvedenou na obrázku 5.4 ve stejné kapitole jsem v modelu použil taktéž z provedeného předchozího experimentálního měření. Data o účinnosti převodovky jsem do modelu zavedl podle naměřené mapy účinnosti převodovky uvedené na obrázku 9.6 v kapitole 9.1.

Se zvoleným vozidlem jsem provedl simulace pro dva již zmíněné standardizované jízdní cykly - NEDC se sníženou maximální rychlostí vozidla na 100 km/h a WLTC Class 2. NEDC cyklus jsem vybral pro jeho průběh s delšími konstantními rychlostmi vozidla a na druhou stranu cyklus WLTC Class 2 jsem vybral pro jeho dynamičtější průběh rychlosti vozidla. Simulace jsem v softwaru Ricardo IGNITE provedl s časovým krokem 0,1 s.

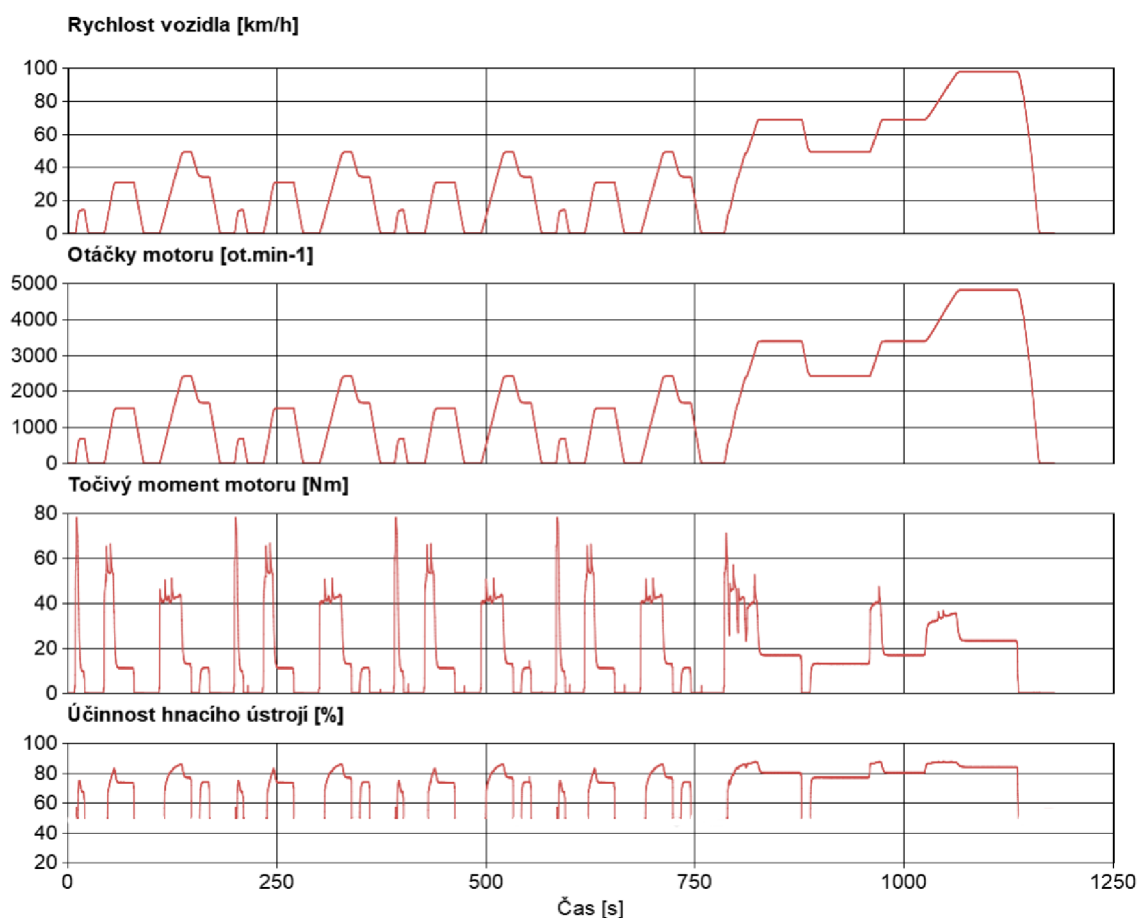
7.3 Výsledky účinnosti hnacího ústrojí vozidla s elektrickým hnacím ústrojím ze simulačního modelu

Vytvořený simulační model umožňuje po dokončení simulace zobrazení výsledků v integrovaném post-processing nástroji RPOST. Toto řešení vede ke zvýšení efektivitu práce se simulačním modelem, protože výsledky není zapotřebí exportovat a následně analyzovat v externích softwarech. Samotný export výsledků do univerzálních formátů je ale také možný. K vytvořenému simulačnímu modelu jsem v nástroji RPOST vytvořil prostředí, které umožňuje zobrazení a vyhodnocování účinnosti hnacího ústrojí ihned po dokončení vlastní simulace.

Vytvořené prostředí zobrazuje z provedené simulace konkrétní výsledky rychlosti vozidla, otáček motoru, točivého momentu motoru a účinnosti hnacího ústrojí. V nástroji RPOST je pak v případě potřeby dále možné zobrazit a vyhodnocovat další výsledky parametrů a veličin konkrétních bloků modelu. Například díky integrovaným snímačům točivého momentu na hnacích kolech vozidla je možné zobrazit a exportovat výsledky, které je možné dále využít pro experimenty ve zkušebně hnacího ústrojí powertrain v laboratoři pohonných jednotek TUL. Toto využití modelu detailněji popisují v kapitole 10.3.

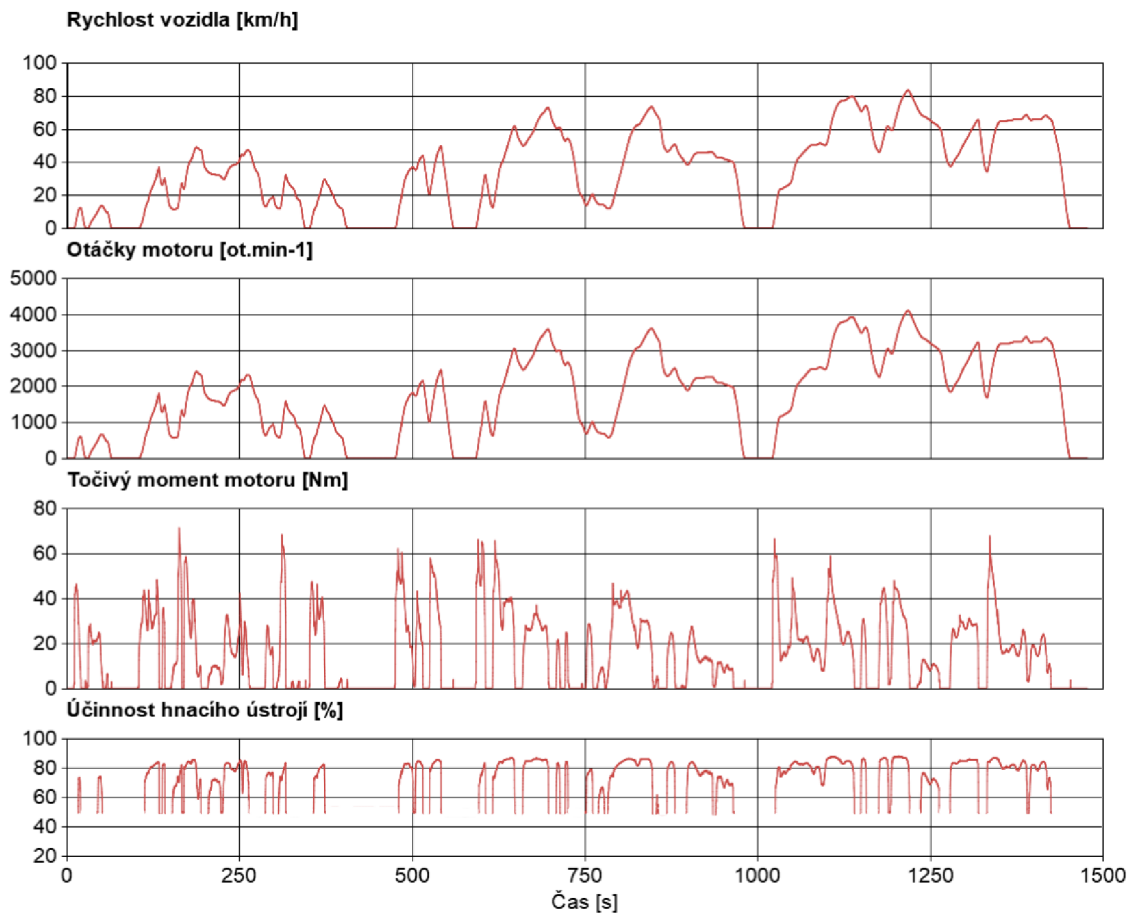
Výsledky ze simulace pro jízdní cyklus NEDC se sníženou maximální rychlostí vozidla na 100 km/h jsou zobrazeny na obrázku 7.5. V rámci tohoto jízdního cyklu motor dosáhl maximálních otáček 4820 ot.min^{-1} . Během rozjezdů z nulové rychlosti motor dosahoval krátce maximálního točivého momentu 78,4 Nm. V částech s konstantní nižší rychlostí vozidla byl dosahovaný točivý moment motoru kolem hodnoty 11 Nm v poslední fázi konstantní rychlosti vozidla 100 km/h byl točivý moment motoru 23,5 Nm. Detailní průběh účinnosti hnacího ústrojí je na obrázku 7.5 zobrazen jako čtvrtý graf. Hodnoty účinnosti jsou díky průběhu jízdního cyklu NEDC poměrně dobře čitelné. Hnací ústrojí dosahovalo účinnosti ve fázích s nižšími rychlostmi vozidla do 40 km/h hodnot v rozmezí 67 % až 73 %, krátkodobě potom až 83 %. S rostoucí rychlostí vozidla a tedy i otáček a točivého momentu motoru potom účinnost dosahovala vyšších hodnot, přičemž v závěrečné fázi cyklu s rychlostmi nad 60 km/h byly hodnoty účinnosti 80 % až 84 %. Nejvyšší hodnoty účinnosti 86 % až

87 % bylo dosahováno při závěrečném zrychlování na rychlost vozidla 100 km/h.



Obrázek 7.5: Výsledky simulace na jízdním cyklu NEDC se sníženou max. rychlostí vozidla na 100 km/h

Výsledky ze simulace pro jízdní cyklus WLTC Class 2 jsou zobrazeny na obrázku 7.6. Druhý zvolený cyklus reprezentuje dynamičtější jízdu vozidla oproti předchozímu cyklu NEDC. Cyklus se skládá ze tří částí - části s nízkou, střední a vysokou rychlostí v rámci cyklu. Motor se během cyklu pohyboval spíše v nižších otáčkách v přibližné rozsahu 1000 ot.min^{-1} až 4000 ot.min^{-1} . Průběh točivého momentu byl oproti jízdě NEDC více dynamický s méně částmi s konstantním průběhem točivého momentu. Dosahovaná účinnost části cyklu s nízkou rychlostí byla v rozmezí 72 % až 85 %. V částech se střední a vysokou rychlostí byla dosahovaná účinnost častěji vyšší než 80 % s nejvyššími hodnotami kolem 87 %.



Obrázek 7.6: Výsledky simulace na jízdním cyklu WLTC Class 2

8 Experimentální hnací ústrojí elektrického vozidla

Pro účely experimentálního výzkumu hnacích ústrojí elektrických vozidel je zapotřebí disponovat vhodným elektrickým hnacím ústrojím, které je složeno ze součástí, které takové experimentální využití umožňují. Pro splnění dílčího cíle mé disertační práce provedení experimentálního měření účinnosti hnacího ústrojí elektrického vozidla na standardizovaných jízdních cyklech ve zkušebně powertrain v laboratoři pohonných jednotek TUL jsem navrhl a vytvořil následující elektrické hnací ústrojí.

Jako nosný prvek hnacího ústrojí jsem použil experimentální převodovku pro elektrická vozidla, jejíž konstrukci jsem se věnoval ve své diplomové práci. Jedná se o jednostupňovou redukční převodovku s mechanickým diferenciálem s převodovým poměrem 5,857. Vnitřní komponenty převodovky pocházejí z převodovky Škoda Auto MQ 200 02T. Skříň převodovky je vyrobena třískovým obráběním z hliníkové slitiny a je uzpůsobena pro potřeby experimentálního ověřování elektrických pohonů. Konstrukce převodovky umožňuje připojení až dvou elektrických motorů na vstupní hřídel a příruby na výstupu převodovky umožňují použití příčných hnacích hřídelů Škoda Auto. Převodovka je navržena na maximální vstupní točivý moment 200 Nm a maximální vstupní otáčky $7000 \text{ ot. min}^{-1}$.

Jako elektromotor jsem použil dostupný trakční motor Zero Motorcycles ZF 75-7 v kombinaci s měničem Sevcon Gen 4 110 V / 300 A. Bližší parametry tohoto motoru jsou uvedeny v kapitole 5.1. Motor jsem k převodovce připojil pomocí upravené příruby převodovky a hřídele motoru a převodovky jsem spojil pomocí přírubové spojky. Navržené hnací ústrojí je zobrazeno na obrázku 8.1. Hnací ústrojí jsem použil následně při experimentálním měření účinnosti hnacího ústrojí, které popisují v kapitole 10.

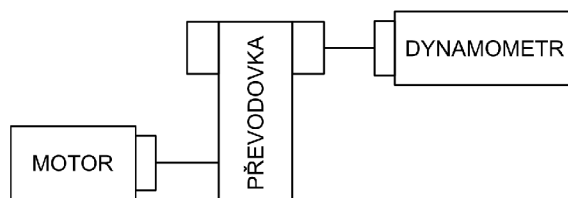


Obrázek 8.1: Navržené hnací ústrojí elektrického vozidla

9 Měření účinnosti převodovky elektrického vozidla

Hnací ústrojí elektrických vozidel je obvykle tvořeno elektromotorem, převodkovou s mechanickým diferenciálem a hnacími hřídeli. V kapitole 5 jsem popsal provedení experimentálního měření samostatné účinnosti elektromotoru a měniče. V této kapitole se věnuji experimentálnímu vyhodnocování samostatné účinnosti převodovky.

Předmětem měření účinnosti převodovky elektrického vozidla byla převodovka, kterou jsem blíže popsal v kapitole 8. Pro měření účinnosti samostatné převodovky jsem využil speciální režim zkušebny powertrain v laboratoři pohonných jednotek TUL pro měření samostatných převodovek, který byl pro účely mé disertační práce ve zkušebně zprovozněn. Kompletní zkušebna je detailně popsána v kapitole 10.1. Ve zmíněném režimu pro experimentální měření převodovek je ve zkušebně možné použít dva protilehlé dynamometry, kdy jeden z nich je použit jako motor a druhý jako dynamometr. Tímto způsobem je možné samostatnou převodovku podrobit požadovanému zatížení při požadovaných otáčkách. Schéma uspořádání experimentu měření účinnosti převodovky je na obrázku 9.1



Obrázek 9.1: Schéma uspořádání experimentu měření účinnosti převodovky

Vzhledem k možnosti připojení pouze jednoho výstupu převodovky k dynamometru jsem provedl uzavření mechanického diferenciálu v převodovce nahrazením satelitů diferenciálu speciálním elementem, čímž došlo k propojení výstupních hřídelů převodovky. Uzamčení diferenciálu je zobrazeno na obrázku 9.2.

Převodovku jsem umístil mezi dva protilehlé dynamometry na experimentální rám z hliníkových profilů. Umístění převodovky během experimentu je zobrazeno na obrázku 9.3. Vstupní hřídel převodovky jsem připojil k dynamometru, který byl provozován v režimu motoru. Výstupní hřídel převodovky jsem připojil k protilehlému dynamometru. Pro vyhodnocování účinnosti jsem měřil a zaznamenával hodnoty otáček a točivých momentů na vstupu a výstupu převodovky, přičemž řídicím systémem zkušebny jsem měl možnost nastavovat požadované hodnoty vstupních otáček a výstupního točivého momentu. Použité dynamometry jsou pro měření hodnot to-



Obrázek 9.2: Uzavření mechanického diferenciálu převodovky

čivého momentu a otáček vybaveny robustními a přesnými snímači HBM T40B s třídou přesnosti podle HBM $\pm 0,05$ z maximálního rozsahu měřeného momentu. Pro tento případ dosahují snímače přesnosti $\pm 1,5$ Nm. Během experimentu jsem pro kontrolní měření teploty oleje v převodovce použil snímač OMEGA Engineering TJC200-CAIN-M025U-150, který jsem umístil na vnitřní spodní části skříně převodovky skrz výpustný šroub na skříně převodovky.



Obrázek 9.3: Umístění převodovky ve zkušebně powertrain

Požadované hodnoty otáček a točivých momentů pro výpočet účinnosti převodovky jsem provedl v téměř maximálním možném rozsahu otáček dynamometrů v rozsahu 500 až 2500 ot.min^{-1} s krokem 500 ot.min^{-1} . Rozsah vstupního točivého momentu při měření byl 20 až 85,4 Nm s krokem 20 Nm. Přičemž bych zde rád poznamenal, že plánováno bylo provedení měření až do maximálního vstupního točivého momentu na jedné straně převodovky o hodnotě 100 Nm, ale řídicí systém zkušebny v čase měření nedovoloval překročení hodnoty točivého momentu 500 Nm na výstupu převodovky. Proto jsem provedl měření do hodnoty 85,4 Nm na vstupu převodovky, která odpovídá hodnotě 500 Nm na výstupu převodovky. Jednotlivé hodnoty otáček a točivých momentů bodů měření jsou uvedeny v tabulce 9.1.

Hodnoty v každém bodu měření byly zaznamenávány po dobu 30 s s frekvencí

Požadované hodnoty		Dopočítané
Vstupní otáčky	Výstupní t. moment	Vstupní t. moment
$[ot.min^{-1}]$	$[Nm]$	$[Nm]$
500	117,1	20,0
1000	234,3	40,0
1500	351,4	60,0
2000	468,6	80,0
2500	500	85,4

Tabulka 9.1: Hodnoty měření

záznamu 100 Hz. Zaznamenávány byly konkrétně hodnoty vstupních otáček převodovky pro určení vstupní úhlové rychlosti ω_{p1} , vstupního točivého momentu M_{p1} , výstupních otáček pro určení výstupní úhlové rychlosti ω_{p2} , výstupního točivého momentu M_{p2} a teplota oleje. Ze zaznamenaných hodnot jsem následně v softwaru MATLAB vypočítal aritmetické průměry všech hodnot pro každý bod měření. Ze získaných hodnot jsem dopočítal příkon na vstupu převodovky P_{p1} a výkon na výstupu převodovky P_{p2} a následně jsem vypočítal hodnoty celkové účinnosti převodovky η_p podle vztahu 9.1.

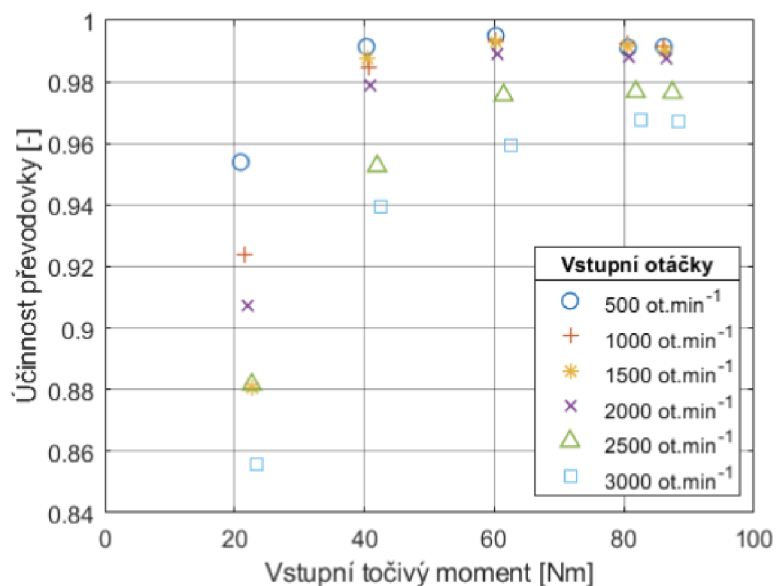
$$\eta_p = \frac{P_{p2}}{P_{p1}} = \frac{\omega_{p2} M_{p2}}{\omega_{p1} M_{p1}} \quad (9.1)$$

Měření účinnosti převodovky jsem provedl pro dvě rozdílné množství náplně oleje. Optimální množství oleje bylo během návrhu této převodovky stanoveno na základě 3D CAD modelu tak, aby bylo zajištěno dostatečné mazání všech soukolí. Prováděný experiment měření účinnosti převodovky jsem při této příležitosti využil pro ověření vlivu množství náplně oleje v převodovce na její dosaženou účinnost. První experimentální měření jsem provedl s náplní 500 g oleje, při kterém hladina oleje dosahovala spodní části kola rozvodovky. Při druhém měření jsem použil náplň 820 g oleje. V tomto případě hladina oleje dosáhla na spodní část ozubeného kola na vstupní hřídeli. Olej jsem použil Mogul Syntrans 75W-90 se specifikací API GL-4+ pro obě měření.

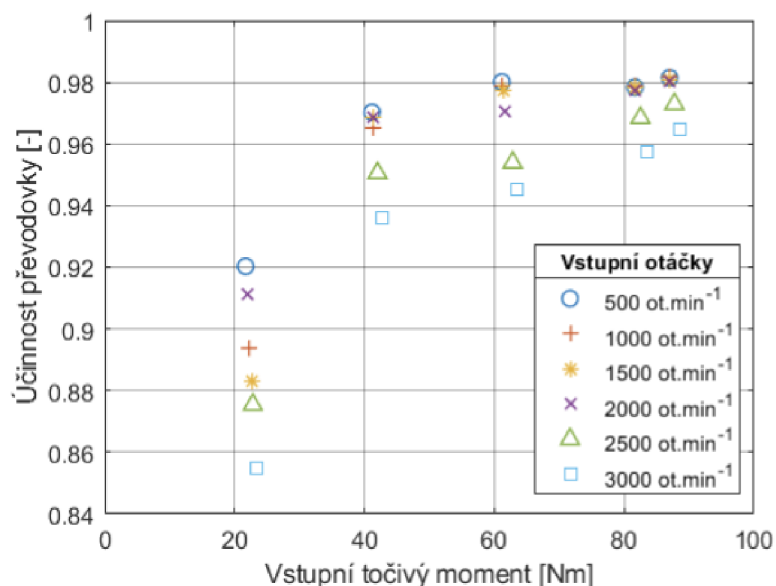
9.1 Výsledky měření účinnosti převodovky

Výsledné hodnoty účinnosti převodovky jsou zobrazeny na obrázcích 9.4 a 9.5. Jednotlivé symboly odpovídají rozdílným hodnotám vstupních otáček převodovky. Pro každý bod otáček je zobrazena hodnota účinnosti blízká hodnotě vstupního točivého momentu 20 Nm, 40 Nm, 60 Nm, 80 Nm a 85,4 Nm.

Ze získaných výsledných hodnot účinnosti jsem pomocí softwaru MATLAB vytvořil mapy účinnosti převodovky pro obě měření s rozdílným množstvím oleje. Mapy účinnosti jsou zobrazeny na obrázcích 9.6 a 9.7.



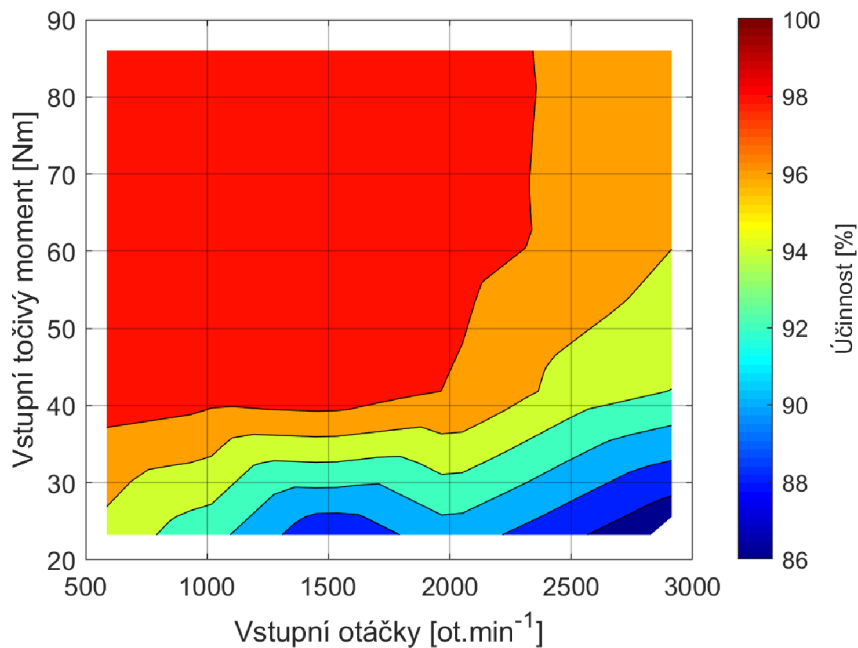
Obrázek 9.4: Výsledná účinnost převodovky s náplní 500 g oleje



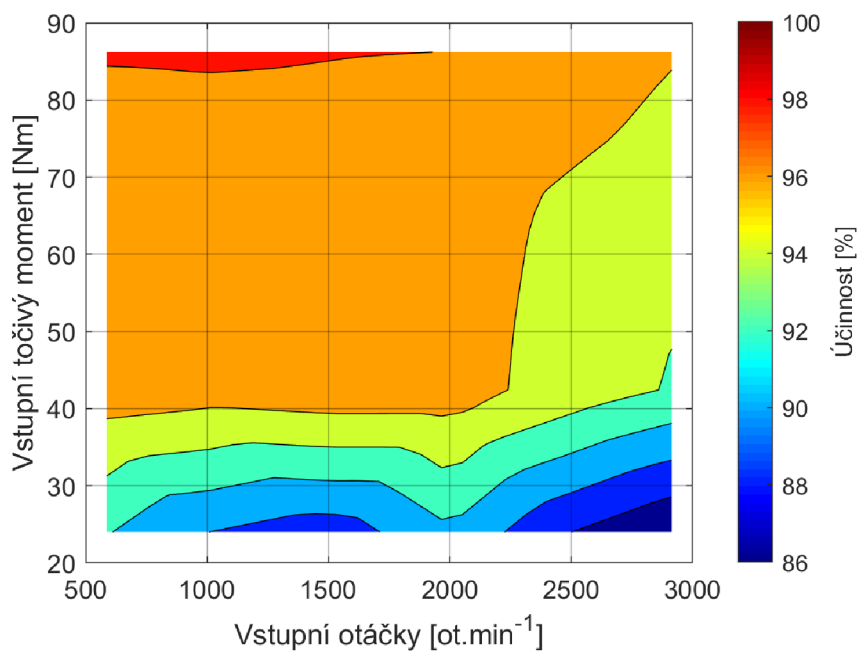
Obrázek 9.5: Výsledná účinnost převodovky s náplní 820 g oleje

Hodnoty teploty oleje ve vnitřní spodní části skříně převodovky byly během měření s náplní oleje 500 g v rozmezí 38,1 až 51,2 °C s průměrnou hodnotou 44,0 °C. S náplní 820 g oleje byly hodnoty teploty v rozmezí 40,3 až 51,2 °C s průměrnou hodnotou 44,5 °C.

Hodnoty účinnosti převodovky s 500 g náplní oleje dosáhly v bodech 500 *ot.min⁻¹*, 1000 *ot.min⁻¹* a 1500 *ot.min⁻¹* vstupních otáček a v oblastech vstupního točivého momentu 40 Nm, 60 Nm, 80 Nm a 85 Nm účinnost vyšší než 99 %. Na druhé straně v oblasti 500 až 3000 *ot.min⁻¹* vstupních otáček a nízkého vstupního



Obrázek 9.6: Mapa účinnosti převodovky s náplní 500 g oleje



Obrázek 9.7: Mapa účinnosti převodovky s náplní 820 g oleje

zatížení okolo 20 Nm byly naměřeny podstatně nižší hodnoty účinnosti - v rozsahu 85,6 až 95,4 %.

Na výsledcích je možné pozorovat skutečnost, že výsledné hodnoty účinnosti s náplní 820 g oleje jsou v každém bodu měření nižší než hodnoty s náplní 500 g

oleje. Výsledné hodnoty účinnosti při porovnání ukazují, že množství olejové náplně v měřené převodovce má poměrně výrazný vliv na její celkovou účinnost. V průměru byly hodnoty účinnosti s náplní 820 g o 1,2 % nižší než s náplní 500 g. Maximální rozdíl byl naměřen 3,4 % v bodu 500 ot.min^{-1} vstupních otáček a 21 Nm vstupního točivého momentu.

Experiment měření účinnosti převodovky elektrického vozidla poskytl detailní data o účinnosti experimentální převodovky. Domnívám se, že výsledné hodnoty účinnosti převodovky ukazují optimální kvalitu návrhu a výroby experimentální převodovky. Zároveň mohou poukazovat na to, že složka účinnosti převodovky může být podstatnou složkou účinnosti hnacího ústrojí elektrických vozidel. Především v oblastech nižších zatížení může poměrně výrazně ovlivňovat výslednou účinnost hnacího ústrojí. Tyto oblasti jsou také často oblasti, ve kterých jsou převodovky elektrických vozidel provozovány při některých standardizovaných jízdních cyklech. Proto se domnívám, že výzkum a vývoj v oblasti specializovaných převodovek pro elektrická vozidla je tématem, kterému je zapotřebí neustále věnovat pozornost.

Získané výsledky z experimentu ve specifických bodech vstupních otáček a vstupního točivého momentu mohou být dále využity v detailních simulacích a výpočtech účinnosti hnacích ústrojí elektrických vozidel a dalším výzkumu a vývoji těchto hnacích ústrojí. V dalších experimentálních měření by bylo vhodné provedení měření ve zbytku vstupních rozsahů otáček 3000 ot.min^{-1} až 7000 ot.min^{-1} a točivého momentu 100 Nm až 200 Nm. Další oblastí výzkumu by mohlo být také detailní měření účinnosti převodovky v oblastech nižšího vstupního točivého momentu než 40 Nm. Na základě těchto výsledků by bylo možné vytvoření detailnějších map účinností převodovky v oblasti s nižší dosahovanou účinností.

10 Experimentální měření účinnosti hnacího ústrojí elektrického vozidla

V předcházejících částech této disertační práce jsem se zaměřoval na vyhodnocování účinnosti dílčích prvků hnacího ústrojí elektrického vozidla - účinnost elektromotoru s měničem jsem popsal v kapitole 5 a kapitolu 9 jsem věnoval experimentálnímu měření účinnosti samostatné převodovky. V této části disertační práce jsem se věnoval měření celkové účinnosti hnacího ústrojí elektrického vozidla. Poznatky získané z použitých metod měření účinnosti samostatného elektromotoru na zkušebním zařízení s dynamometrem a s využitím výkonového analyzátoru společně s poznatky z měření účinnosti samostatné převodovky ve zkušebně powertrain jsem využil pro vytvoření následující metodiky vyhodnocování účinnosti hnacího ústrojí elektrických vozidel pomocí experimentálního měření ve zkušebně powertrain.

10.1 Metodika měření účinnosti hnacího ústrojí elektrických vozidel

Zkušebna powertrain se nachází v laboratoři pohonných jednotek TUL. Jedná se o zkušebnu, která je zaměřena na experimentální ověřování vlastností kompletního hnacího ústrojí vozidel. Zkušebna je zobrazena na obrázku 10.1.



Obrázek 10.1: Celkový pohled na zkušebnu powertrain

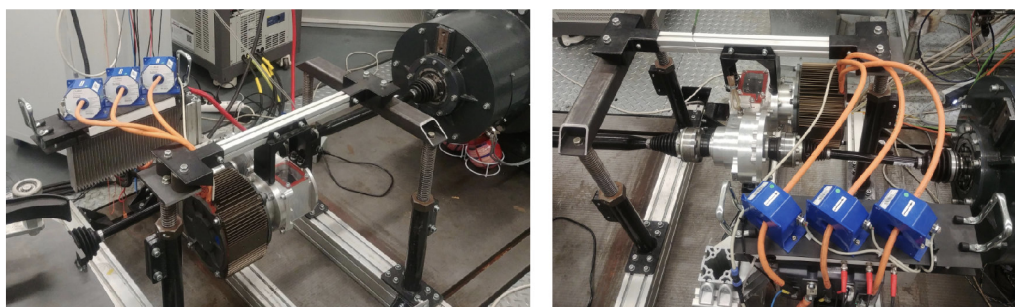
Zkušebna je vybavena čtyřmi asynchronními dynamometry. Jeden pár dynamometrů je tvořen dynamometry Siemens 136 ADG 288WP s následujícími parametry každého dynamometru 136 kw / 500 $ot.min^{-1}$ / 2598 Nm a s maximálními otáčkami 3000 $ot.min^{-1}$. Druhý pár dynamometrů tvoří dva menší dynamometry Siemens 111

ADG 286WP s parametry každého dynamometru 111 kW / 500 $ot.min^{-1}$ / 2120 Nm a s maximálními otáčkami 3000 $ot.min^{-1}$. Toto řešení umožňuje provádět experimentální ověřování hnacích ústrojí, která mají hnanou jednu nápravu nebo dvě nápravy. Ve zkušebně lze dále využít řídicího robota pro obsluhu řazení manuálních vícestupňových převodovek. Zkušebna je dále vybavena vlastním řídicím systémem, vzduchotechnikou a odtahem výfukových plynů. Jako palivo je možné využít přívodu benzínu, nafty, LPG nebo CNG a nyní je možné využít i zdroj elektrické energie pro experimenty s elektrickými hnacími ústrojími. Zkušebna je běžně využívána pro experimentální ověřování vlastností hnacích ústrojí a jejich součástí se spalovacími motory a pro dlouhodobé zkoušky převodovek.

Do doby řešení mé disertační práce byla zkušebna využívána výhradně pro hnací ústrojí se spalovacím motorem. Pro účely provozu elektrického hnacího ústrojí a řešení mé disertační práce bylo zapotřebí do zkušebny implementovat zdroj elektrické energie a nové regulační režimy elektrických pohonů do řídicího systému zkušebny. Obě implementace byly pro účely mé disertační práce a dalšího výzkumu elektrických hnacích ústrojí na katedře vozidel a motorů provedeny.

Předmětným hnacím ústrojím experimentu bylo experimentální hnací ústrojí, které jsem rámci této práce vytvořil a blíže popsal v kapitole 8. Jednalo se tedy o hnací ústrojí složené z trakčního elektromotoru Zero Motorcycles ZF 75-7 v kombinaci s měničem Sevcon Gen 4 110 V / 300 A a experimentální jednostupňové redukční převodovky s mechanickým diferenciálem. Pro napájení hnacího ústrojí jsem použil DC zdroj ITECH IT6000C. Tento zdroj jsem blíže popsal v kapitole 5.1.

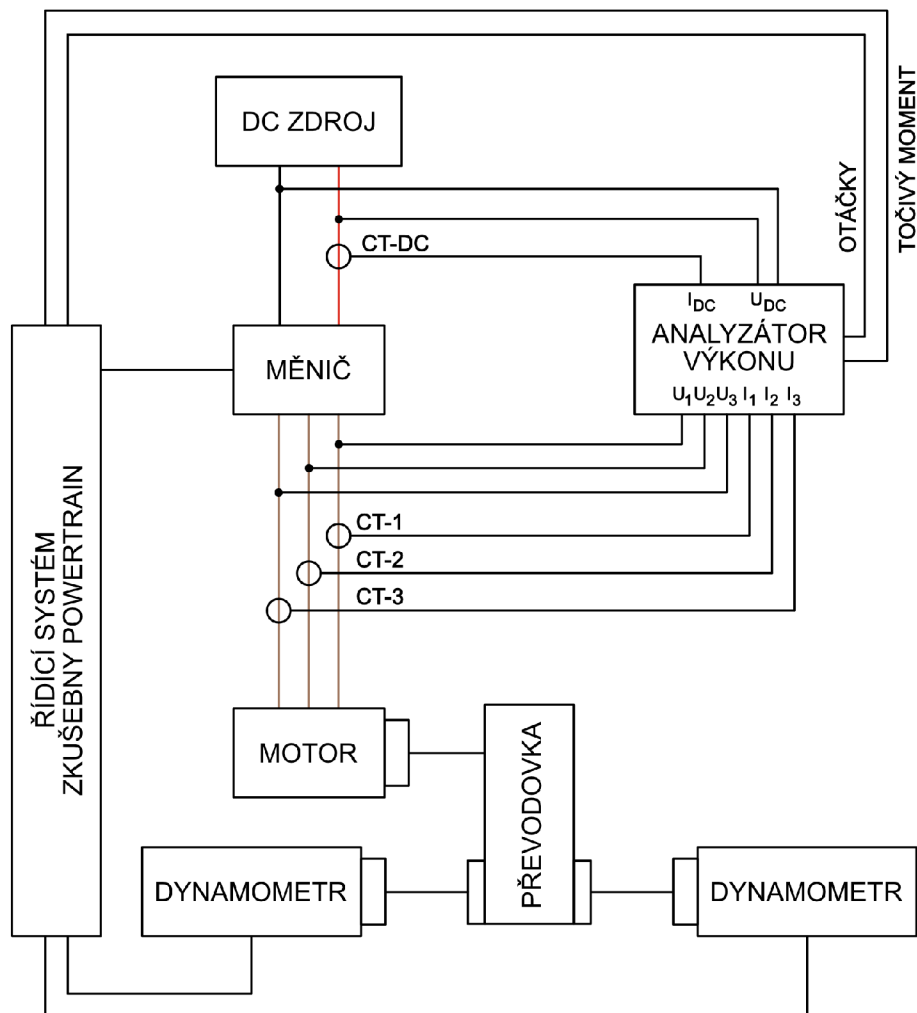
Cílem experimentů byla realizace vytvořené metodiky vyhodnocování účinnosti hnacího ústrojí elektrických vozidel pomocí experimentálního měření účinnosti hnacího ústrojí ve zkušebně powertrain v laboratoři pohonných jednotek TUL. Experimenty tak byly soustředěny na získání dat o účinnosti elektrického hnacího ústrojí v možném rozsahu měření výstupních otáček a točivých momentů pro sestavení mapy účinnosti hnacího ústrojí a na měření účinnosti hnacího ústrojí na standardizovaných jízdách cyklech.



Obrázek 10.2: Uložení hnacího ústrojí ve zkušebně powertrain

Hnací ústrojí jsem ve zkušebně umístil pomocí experimentálního rámu složeného ze systému hliníkových profilů v kombinaci s ocelovými profily a stavitelnými nohama zkušebny mezi dva dynamometry Siemens 111 ADG 286WP. Spojení obou výstupů převodovky bylo zajištěno příčnými hnacími hřídeli Škoda Auto. Měnič byl umístěn

v blízkosti elektromotoru na chladiči z hliníkové slitiny pro zajištění dostatečného chlazení. Napájení hnacího ústrojí zajišťoval již zmíněný DC zdroj ITECH IT6000C nastaven na hodnotu napětí 100 V a max. hodnotu proudu ± 300 A. Uložení hnacího ústrojí ve zkušebně je zobrazeno na obrázku 10.2.



Obrázek 10.3: Schéma experimentu měření účinnosti hnacího ústrojí

Za účelem získání výsledných dat účinnosti hnacího ústrojí jsem využil velmi přesný analyzátor výkonu Yokogawa WT5000, který jsem do experimentálního měření ve zkušebně powertrain zavedl podobně, jako jsem tento analyzátor využil při měření účinnosti samostatného elektromotoru blíže popsaneho v kapitole 5.1. V odkazované kapitole jsem již uvedl také podrobnější popis tohoto analyzátoru. V případě měření účinnosti hnacího ústrojí byl analyzátor do zkušebny zapojen podle schématu experimentu, který je uveden na obrázku 10.3. Do analyzátoru byla zavedena měřená data mechanických veličin otáček a točivých momentů, která byla analyzátoru poskytována řídicím systémem zkušebny powertrain. Vlastní měření otáček a točivých momentů bylo prováděno robustními a přesnými snímači točivého momentu HBM T40B, kterými jsou ve zkušebně dynamometry vybaveny. Jedná se

o snímače se schopností měření maximálního měřeného točivého momentu 3 kNm a s třídou přesnosti podle HBM $\pm 0,05$ maximálního rozsahu měřeného momentu. Pro tento případ dosahují snímače přesnosti $\pm 1,5$ Nm. Do analyzátoru byly dále zavedeny elektrické veličiny mezi DC zdrojem a měničem a také elektrické veličiny pro všechny tři fáze mezi měničem a motorem. Pro měření proudu byly použity čtyři snímače LEM IT 700-S Ultrastab. Tři snímače proudu modré barvy jsou zobrazeny na obrázku 10.2 vpravo. Hodnoty napětí byly měřeny přímo měřícími kartami výkonového analyzátoru. Měření proudu a napětí je blíže popsáno v kapitole 5.1 o měření účinnosti samostatného elektromotoru, v případě měření hnacího ústrojí bylo využito stejných zařízení a jejich obdobného zapojení. Záznam všech sledovaných veličin byl při všech měřeních proveden analyzátozem na USB flash disk s frekvencí záznamu 10 Hz.

Uspořádání experimentu umožnilo vyhodnocování příkonu do elektrického hnacího ústrojí P_{hu1} mezi DC zdrojem a měničem, výkon měniče P_{huC} mezi měničem a motorem a zároveň i mechanický výkon na výstupních hřídelích hnacího ústrojí P_{huM} . Analyzátor následně podle vzorců 10.1 – 10.3 v reálném čase vypočítával účinnost měniče η_{huC} , účinnost samostatného hnacího ústrojí bez měniče η_{hu} a účinnost hnacího ústrojí s měničem η_{huCel} .

$$\eta_{huC} = \frac{P_{huC}}{P_{hu1}} \quad (10.1)$$

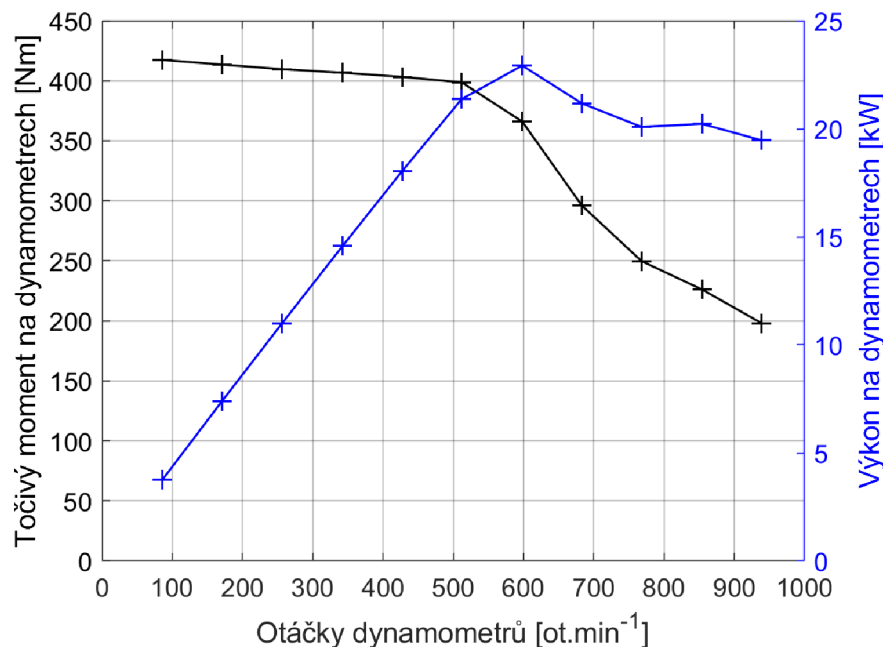
$$\eta_{hu} = \frac{P_{huM}}{P_{huC}} \quad (10.2)$$

$$\eta_{huCel} = \frac{P_{huM}}{P_{hu1}} \quad (10.3)$$

10.2 Měření mapy účinnosti hnacího ústrojí

První experimentální měření ve zkušebně powertrain jsem zaměřil na měření mapy účinnosti hnacího ústrojí. Uspořádání experimentu ve zkušebně jsem provedl podle metodiky popsané v předchozí kapitole 10.1. Ovládání zkušebny společně s řízením elektromotoru jsem prováděl přes řídicí systém zkušebny powertrain. Konkrétně jsem přes řídicí systém nastavoval otáčky dynamometrů, které odpovídaly připojeným hnacím hřídelům. Jedno se tedy o otáčky na výstupu převodovky. Zátěžný točivý moment hnacího ústrojí jsem nastavoval taktéž pomocí řídicího systému zkušebny v rozsahu 0 až 100 %. Rozsah odpovídal potenciálnímu stlačení pedálu plynu a tímto signálem řídicí systém zkušebny ovládal měnič elektromotoru. Je zapotřebí zde poznamenat, že měnič byl při experimentech s hnacím ústrojím nakonfigurován mírně odlišným způsobem než při měření samostatného motoru v kapitole 5. Konfigurace měniče musela zaručovat, aby ve všech provozních režimech nedocházelo k překročení odebíraného proudu o hodnotě 300 A z DC zdroje.

V prvním kroku jsem provedl měření momentové charakteristiky hnacího ústrojí. Výsledky měření jsou zobrazeny na obrázku 10.4. Hnací ústrojí dosáhlo maximální točivý moment na dynamometrech 417,4 Nm při otáčkách dynamometrů $85,9 \text{ ot.min}^{-1}$, přičemž točivý moment nad hodnotou 400 Nm hnací ústrojí udrželo do 496 ot.min^{-1} . Ve vyšších otáčkách točivý moment následně již klesal. Hodnota při nejvyšších měřených otáčkách dynamometrů 940 ot.min^{-1} byla dosažena 197,9 Nm. Maximální naměřený výkon 22,9 kW hnací ústrojí dosáhlo při otáčkách 600 ot.min^{-1} .

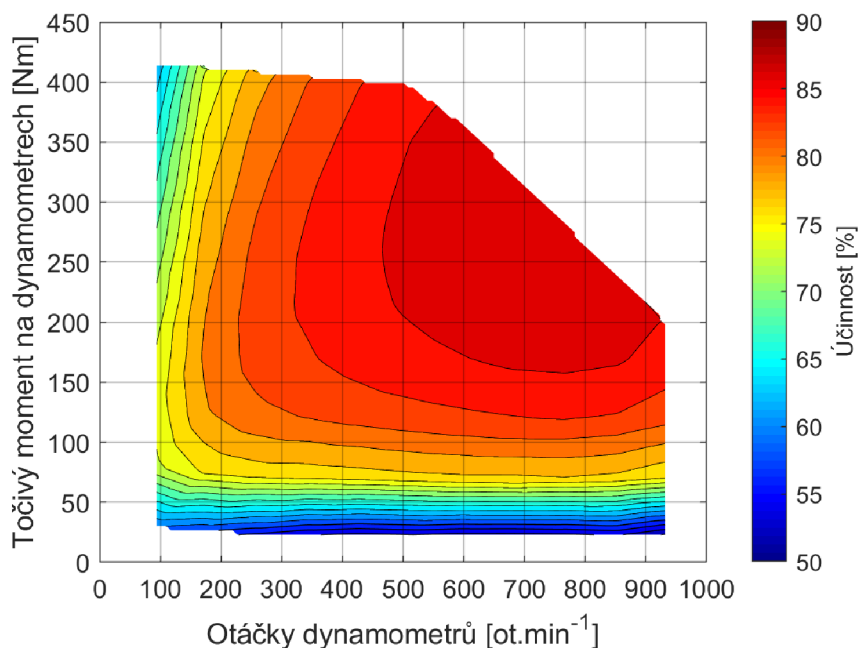


Obrázek 10.4: Momentová charakteristika hnacího ústrojí

V druhém kroku jsem provedl měření dat účinnosti pro sestavení tří map účin-

ností. Díky použitému schématu experimentu jsem mohl zaznamenávat celkovou účinnost hnacího ústrojí (tedy pro sestavu měnič - motor - převodovka), účinnost hnacího ústrojí bez měniče (sestavu motor - převodovka) a samostatnou účinnost měniče.

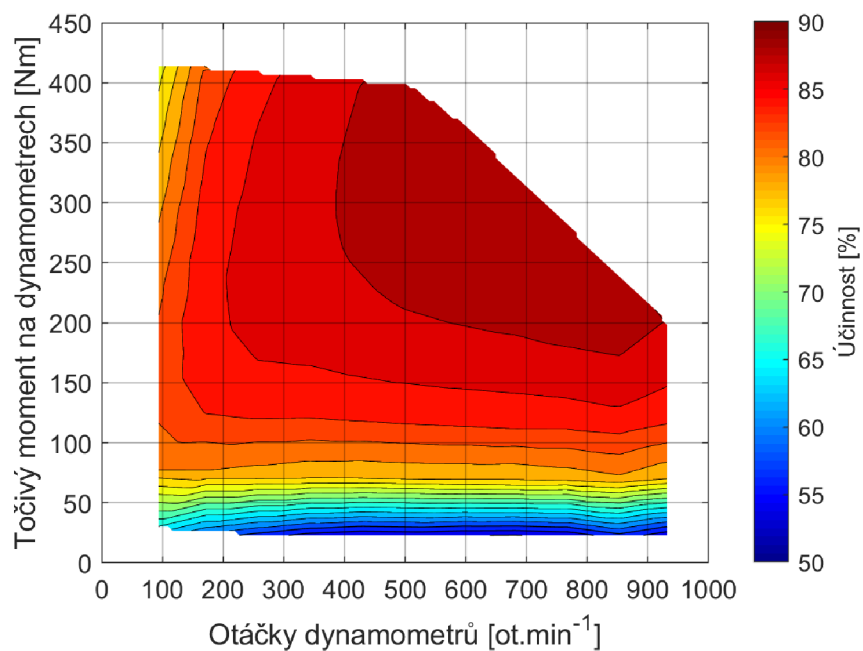
Vlastní měření jsem provedl v rozsahu otáček dynamometrů, které odpovídaly otáčkám motoru v rozsahu 500 ot.min^{-1} až 5500 ot.min^{-1} s krokem 500 ot.min^{-1} , a v zatížení pomocí stlačení pedálu plynu v rozsahu 0 až 100 % s krokem 10 %. Každý bod měření byl se záznamem všech dat na analyzátoru po dobu 5 s se záznamem 10 vzorků za sekundu. Pro získání výsledných hodnot pro každý měřený bod jsem pro všechna potřebná data následně v softwaru MATLAB spočítal aritmetický průměr z naměřených hodnot. Pro účely zajištění dostatečného chlazení pohonu jsem během měření použil externí ventilátor z válcové zkušebny. Teplotní regulace v měniči byla během experimentu nastavena proti překročení kritické hodnoty teploty permanentních magnetů v motoru. Při překročení nastavené teploty měnič snižuje fázový proud motoru podle nastavené křivky. Všechny měřené body byly měřeny vždy před dosažením této kritické teploty motoru.



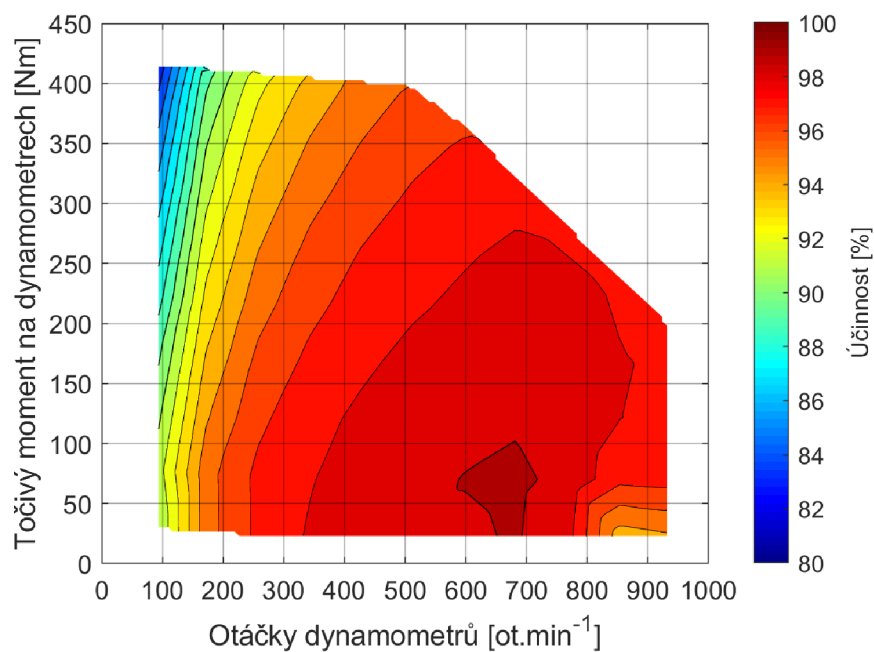
Obrázek 10.5: Mapa celkové účinnosti hnacího ústrojí (měnič-elektromotor-převodovka)

Výsledná mapa celkové účinnosti hnacího ústrojí je zobrazena na obrázku 10.5. Hnací ústrojí dosáhlo maximální účinnosti vyšší než 85 % v přibližné oblasti rozsahu otáček dynamometrů 460 ot.min^{-1} až 920 ot.min^{-1} a točivého momentu na dynamometrech v rozsahu 160 Nm až 370 Nm. Charakter mapy účinnosti hnacího ústrojí pak odpovídá charakteru mapy účinnosti z měření samostatného elektrického pohonu v kapitole 5. Dosahované hodnoty celkové účinnosti hnacího ústrojí jsou pak nižší než z měření samostatného pohonu. Podobným způsobem vyšla mapa účinnosti

hnacího ústrojí bez měniče zobrazena na obrázku 10.6. Mapa účinnosti měniče, zobrazena na obrázku 10.7 vyšla velmi podobně jako mapa účinnosti měniče při měření samostatného elektrického pohonu v kapitole 5.



Obrázek 10.6: Mapa účinnosti hnacího ústrojí bez měniče (motor-převodovka)



Obrázek 10.7: Mapa účinnosti měniče Sevcon Gen 4

10.3 Vstupní data pro měření účinnosti hnacího ústrojí na jízdních cyklech

Pro realizaci experimentů na standardizovaných jízdních cyklech ve zkušebně powertrain v laboratoři pohonných jednotek je zapotřebí do řídicího systému zkušebny zadat jako vstupní data především průběhy otáček hnacích kol a průběhy točivých momentů na hnacích kolech s frekvencí těchto dat 100 Hz. Řídicí systém zkušebny je potom schopen provést jízdní zkoušku s instalovaným hnacím ústrojím podle zadaných průběhů otáček a točivých momentů. Za účelem získání relevantních vstupních dat pro experimentální měření účinnosti hnacího ústrojí ve zkušebně powertrain jsem využil vytvořený simulační model v softwaru Ricardo IGNITE, který jsem detailně popsal v kapitole 7.

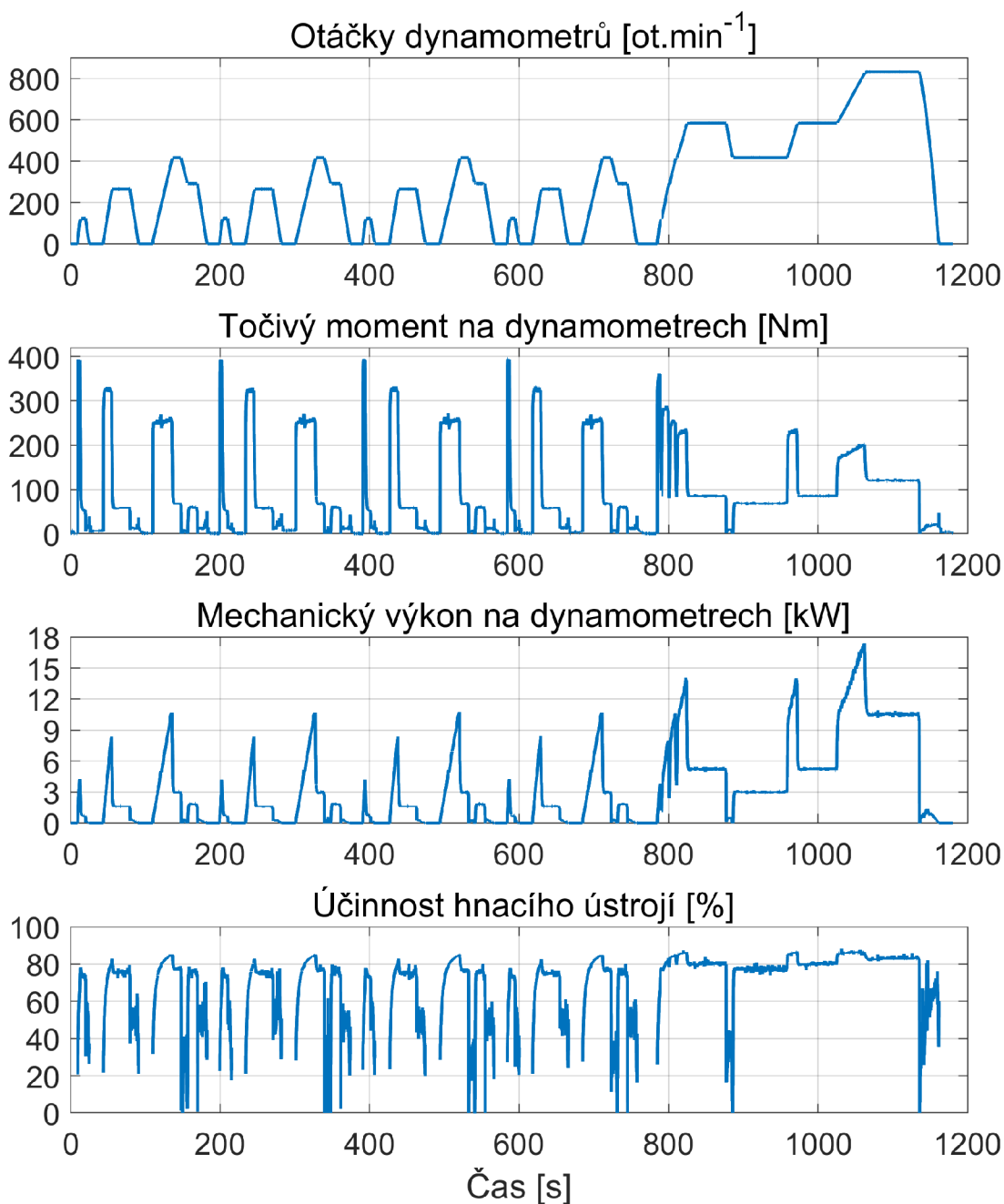
V simulačním modelu jsem použil stejné parametry vozidla jako v případě realizovaných a popsaných simulací v kapitole 7.2. Konkrétně tedy parametry pro zvolené vozidlo podle tabulky 7.1. Provedl jsem pak dvě simulace na jízdním cyklu NEDC se sníženou maximální rychlostí vozidla 100 km/h a na cyklu WLTC Class 2 s časovým krokem 0,01 s. Následně jsem v integrovaném post-processing nástroji RPOST exportoval potřebná data s průběhy otáček hnacích kol a točivých momentů na hnacích kolech. Získaná data jsem následně vložil jako vstupní data do řídicího systému zkušebny powertrain.

10.4 Měření účinnosti na jízdním cyklu NEDC se sníženou maximální rychlostí vozidla na 100 km/h

Při realizaci měření účinnosti elektrického hnacího ústrojí na standardizovaných jízdních cyklech ve zkušebně powertrain jsem postupoval podle vytvořené metodiky měření popsané v kapitole 10.1 se stejnou konfigurací hnacího ústrojí. Experimentální měření jsem provedl podle uvedeného schématu experimentu na obrázku 10.3. Je zde zapotřebí poznamenat, že elektrický pohon vzhledem k zaměření práce na účinnost hnacího ústrojí při měřeních neprováděl rekuperaci energie.

Oproti měření mapy účinnosti hnacího ústrojí popsaného v kapitole 10.2 jsem při realizovaných měření na jízdních cyklech využil režimu automatické zkoušky zkušebny powertrain. V tomto režimu jsou otáčky dynamometrů a točivý moment motoru řízeny plně řídicím systémem zkušebny podle zadaných vstupní dat otáček dynamometrů a podle zadaných točivých momentů na dynamometrech. Otáčky dynamometrů a točivé momenty na dynamometrech musí tedy odpovídat otáčkám a točivým momentům na kolech vozidla. Při experimentálních měření na jízdních cyklech jsem jako vstupní data použil data získaná z vytvořeného simulačního modelu v softwaru Ricardo IGNITE. Popis tvorby vstupních dat jsem popsal v předchozí kapitole 10.3 a detailní popis simulačního modelu jsem uvedl v kapitole 7.

Záznam všech měřených veličin jsem opět provedl na analyzátoru výkonu Yokogawa WT5000 na USB flash disk s frekvencí záznamu 10 Hz. Zaznamenaná data jsem následně analyzoval a zpracoval do podoby grafů v softwaru MATLAB.

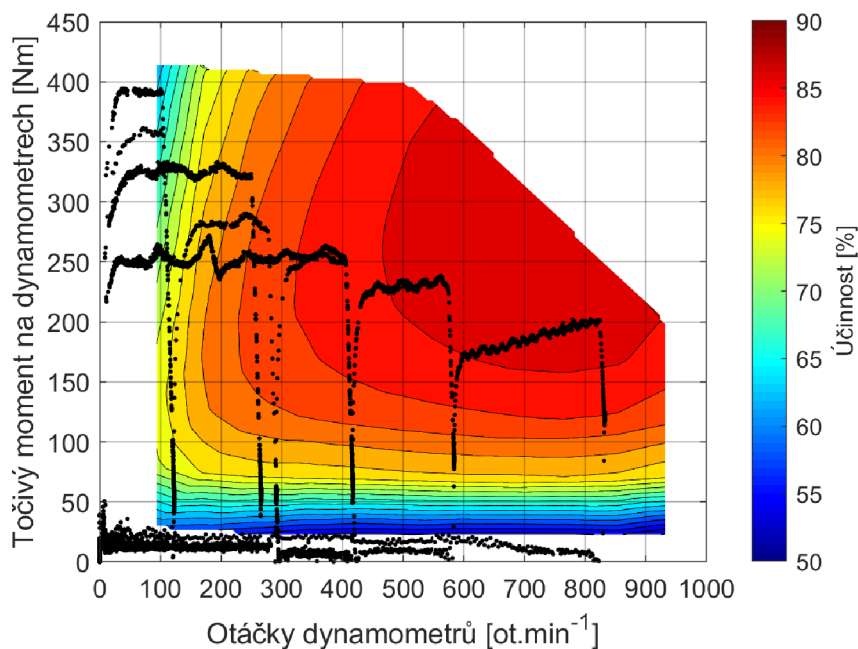


Obrázek 10.8: Výsledky měření účinnosti hnacího ústrojí na jízdním cyklu NEDC se sníženou maximální rychlostí vozidla na 100 km/h

Detailní výsledky z měření na jízdním cyklu jsou zobrazeny na obrázku 10.8. Konkrétně se jedná o zobrazení otáček dynamometrů, které odpovídají rychlosti vozidla, součet točivých momentů ze dvou dynamometrů, dosažený mechanický výkon na dynamometrech a celková účinnost hnacího ústrojí pro sestavu měnič - elektromotor - převodovka. Díky poměrně stabilním průběhům otáček dynamometrů a točivého momentu na dynamometrech jsou i výsledky měření účinnosti hnacího ústrojí

poměrně stabilní a považují je za vypovídající. Za méně vypovídající lze považovat výsledky v některých oblastech při akceleracích z nulové rychlosti a při brzdění, kdy dochází k velmi rychlým a výrazným změnám otáček a točivých momentů. V těchto oblastech může být dosahovaná účinnost hnacího ústrojí poměrně méně čitelná.

Zobrazení průběhu účinnosti hnacího ústrojí na jízdním cyklu v závislosti na čase nám poskytuje přímá data o účinnosti hnacího ústrojí. Průběh poskytuje pohled na účinnost na celém jízdním cyklu a umožňuje identifikaci oblastí vhodných pro optimalizaci hnacího ústrojí s cílem dosažení vyšší účinnosti hnacího ústrojí. Z průběhu účinnosti na obrázku 10.8 lze například identifikovat, že v oblastech nižších rychlostí s otáčkami kol pod 400 ot.min^{-1} se účinnost hnacího ústrojí pohybuje velmi často až kolem hodnoty 70 %. Až při vyšších hodnotách otáček kol v závěrečné fázi cyklu se hodnoty účinnosti pohybují nad hodnotou 80 % častěji. Zároveň ze změřené konkrétní mapy účinnosti hnacího ústrojí uvedené na obrázku 10.2 již víme, že hnací ústrojí je schopné dosahovat poměrně široké oblasti účinnosti s hodnotami vyššími než 85 %. V tomto případě se tedy nabízí například možnost analýzy optimalizace pomocí adekvátní změny převodového poměru převodovky, která by mohla vést k posunu jízdních bodů v mapě účinnosti do oblastí s vyšší účinností. Pro takovou optimalizační analýzu může být v prvotní fázi stanovení optimální hodnoty převodového poměru vytvořený simulační model popsany v kapitole 7. Mezi další cesty optimalizace dosahované účinnosti hnacího ústrojí by mohly dále být například optimalizační konstrukční změny motoru, aplikace pokročilých metod řízení pohonu nebo použití uspořádání hnacího ústrojí, které by zvolenému vozidlu umožnilo dosažení vyšší účinnosti na jízdním cyklu.



Obrázek 10.9: Body provozu hnacího ústrojí při jízdním cyklu NEDC se sníženou maximální rychlostí vozidla na 100 km/h v celkové mapě účinnosti hnacího ústrojí

Dalším vhodným zobrazením výsledků z měření účinnosti hnacího ústrojí v rámci možností použitého hnacího ústrojí pro hlubší analýzy výsledných dat může být zobrazení jednotlivých bodů provozu otáček a točivých momentů z průběhu cyklu, ve kterých se hnací ústrojí při cyklu nachází, do odpovídající mapy účinnosti hnacího ústrojí. Takové zobrazení bodů je provedeno na obrázku 10.9, ve kterém jsou do naměřené mapy účinnosti hnacího ústrojí, blíže popsané v kapitole 10.2, zaneseny body podle otáček dynamometrů a točivého momentu na dynamometrech, ve kterých se hnací ústrojí při průjezdu jízdního cyklu nacházelo.

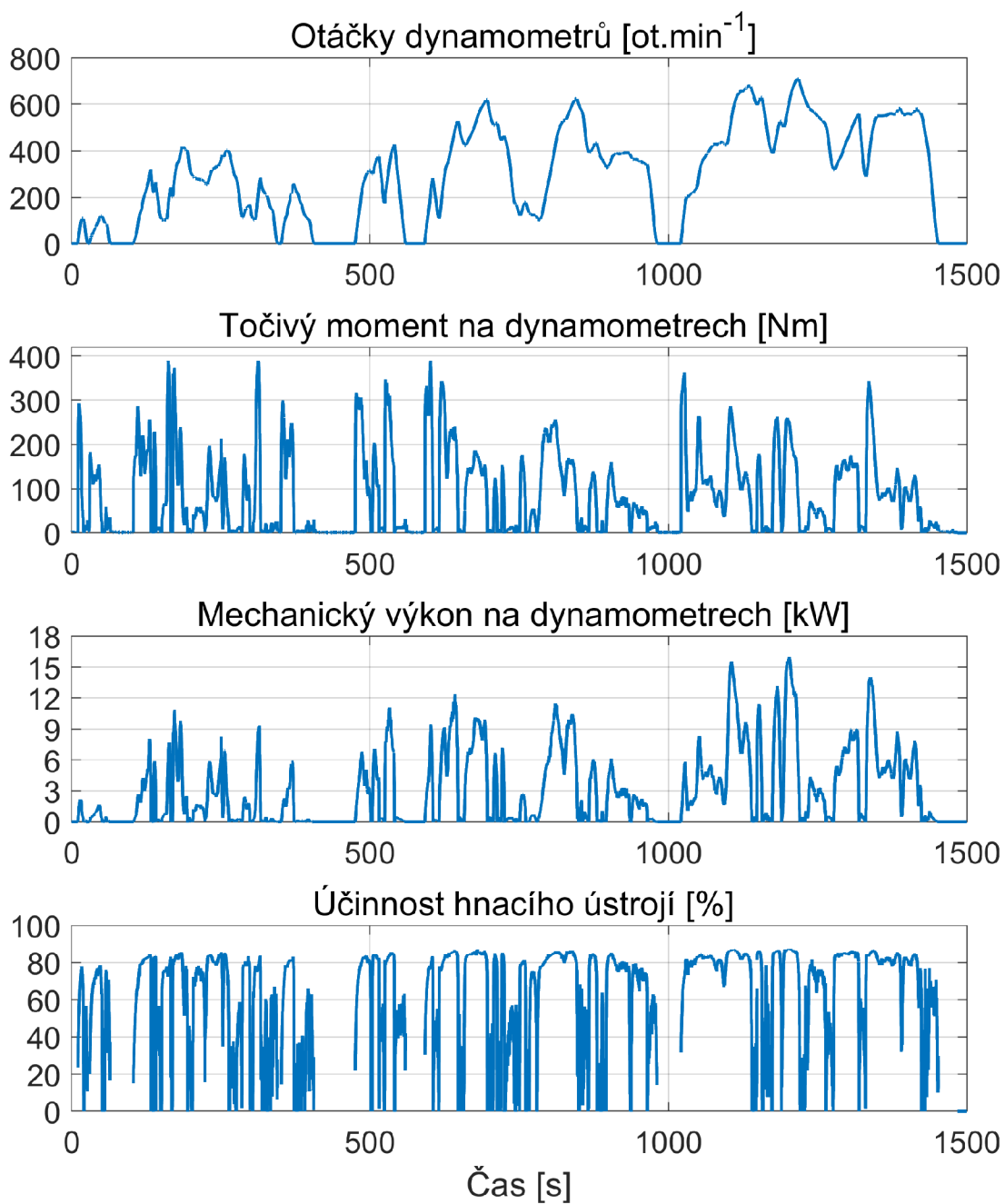
Použité zobrazení bodů provozu v průběhu cyklu umožňuje bližší analýzu dosažované účinnosti během jízdního cyklu. Z výsledků na obrázku 10.9 lze usuzovat, že pro optimalizaci dosažované účinnosti hnacího ústrojí s cílem zvýšení dosažené účinnosti je nezanedbatelnou oblastí oblast nízkých otáček, i v hodnotách pod 100 ot.min^{-1} , a středních až vyšších hodnotách točivého momentu na kolech, konkrétně oblast 210 Nm až 400 Nm. V této oblasti se nachází nezanedbatelné množství bodů jízdy a zároveň je z mapy účinnosti patrné, že v této oblasti hnací ústrojí dosahuje v rámci svých možností nižších hodnot účinnosti. Výrazné množství bodů provozu lze nalézt v oblasti nízkého točivého momentu pod hodnotou 40 Nm v téměř celém rozsahu provozních otáček, ve které jsou hodnoty účinnosti velmi nízké. Specificky s vyšším počtem v oblasti otáček pod 200 ot.min^{-1} . Zde je na místě poznamenat, že všechny tyto body nelze zcela považovat za provozní body hnacího ústrojí, protože mezi těmito body jsou obsaženy i vody, kdy hnací ústrojí v rámci cyklu již zpomalovalo a řídicí systém udržoval hnací ústrojí v provozu nízkého zatížení. Pro bližší analýzu těchto bodů by bylo adekvátní postupné zobrazení pouze bodů provozu jednotlivých částí jízdního cyklu.

10.5 Měření účinnosti na jízdním cyklu WLTC class 2

Obdobným způsobem jako při předchozím měření na jízdním cyklu pomocí režimu automatické zkoušky ve zkušebně powertrain jsem realizoval i následující měření účinnosti elektrického hnacího ústrojí na jízdním cyklu WLTC class 2. Vstupní data ve formě otáček dynamometrů a točivých momentů na dynamometrech jsem opět získal pomocí vytvořeného simulačního modelu v softwaru Ricardo IGNITE.

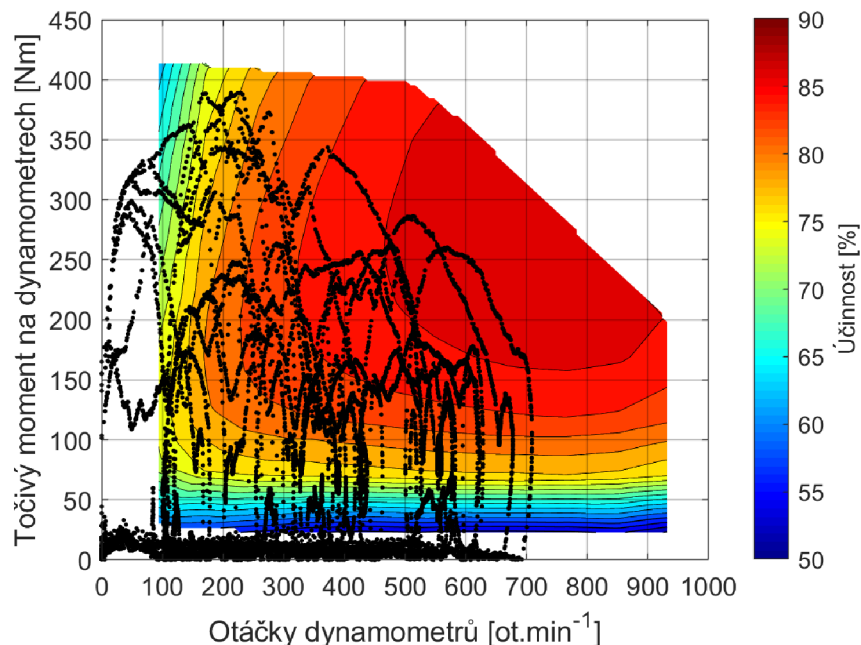
Výsledky z měření na jízdním cyklu jsou zobrazeny na obrázku 10.10. I přes dynamičtější charakter cyklu WLTC Class 2 oproti cyklu NEDC považuji průběhy otáček dynamometrů a točivého momentu na dynamometrech za stále poměrně stabilní a vypovídající. Hnací ústrojí se během tohoto cyklu častěji pohybovalo v hodnotách účinnosti nad 80 %. Vzhledem k potřebě vyšších točivých momentů při středních a vyšších otáčkách bylo častěji dosažováno účinnosti až 86 %.

I pro tento cyklus jsem provedl zobrazení bodů provozu hnacího ústrojí do celkové mapy účinnosti hnacího ústrojí, zobrazeno na obrázku 10.11. Dynamický charakter taktéž ovlivnil zobrazení těchto bodů. Body jsou méně uspořádané v jednotlivých oblastech mapy. I zde je patrné, že by pohon mohl dosáhnout na vyšší hodnoty účinnosti, pokud by došlo k celkovému posunu provozní oblasti během cyklu směrem doprava, resp. mapy účinnosti směrem doleva. Současně i v tomto případě je



Obrázek 10.10: Výsledky měření účinnosti na jízdním cyklu WLTC class 2

problematická oblast zobrazení bodů přibližně pod hodnotou 40 Nm, kterou jsem blíže popsal v závěru předchozí kapitoly 10.4.



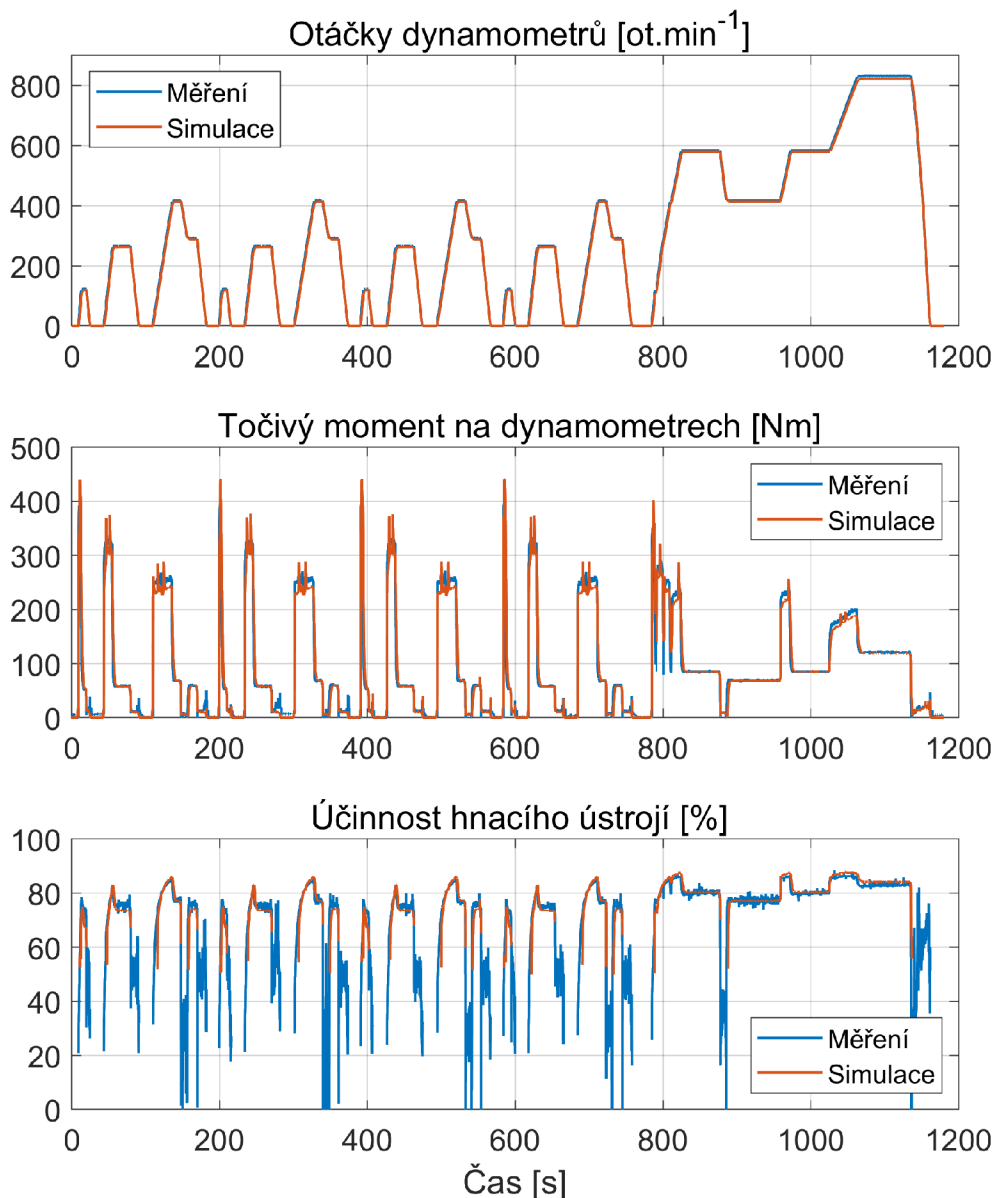
Obrázek 10.11: Body provozu hnacího ústrojí při jízděmém cyklu WLTC Class 2 v celkové mapě účinnosti hnacího ústrojí

10.6 Porovnání výsledků měření účinnosti hnacího ústrojí s výsledky účinnosti ze simulačního modelu

Získané výsledky z měření účinnosti hnacího ústrojí na obou jízděmém cyklech uvedených v kapitolách 10.4 a 10.5 jsem porovnal s výsledky účinnosti z vytvořeného simulačního modelu vozidla s elektrickým hnacím ústrojím, který jsem blíže popsal v kapitole 7.

Simulační model vypočítával celkovou účinnost hnacího ústrojí během jízděmém cyklu na základě zadaných dílčí účinnosti sestavy pohonu motoru s měničem a na základě zadané dílčí účinnosti převodovky. Dílčí účinnost sestavy pohonu motoru s měničem byla použita z experimentálního měření účinnosti samostatného pohonu popsaného v kapitole 5. Dílčí účinnost převodovky byla použita z experimentálního měření účinnosti převodovky popsaného v kapitole 9. Při měření účinnosti hnacího ústrojí na jízděmém cyklu byla naopak již měřena okamžitá účinnost celého hnacího ústrojí. Ze simulačního modelu pocházela zároveň vstupní data průběhů otáček hnacích kol a točivých momentů na hnacích kolech vozidla. Tvorba vstupních dat je popsána v kapitole 10.3.

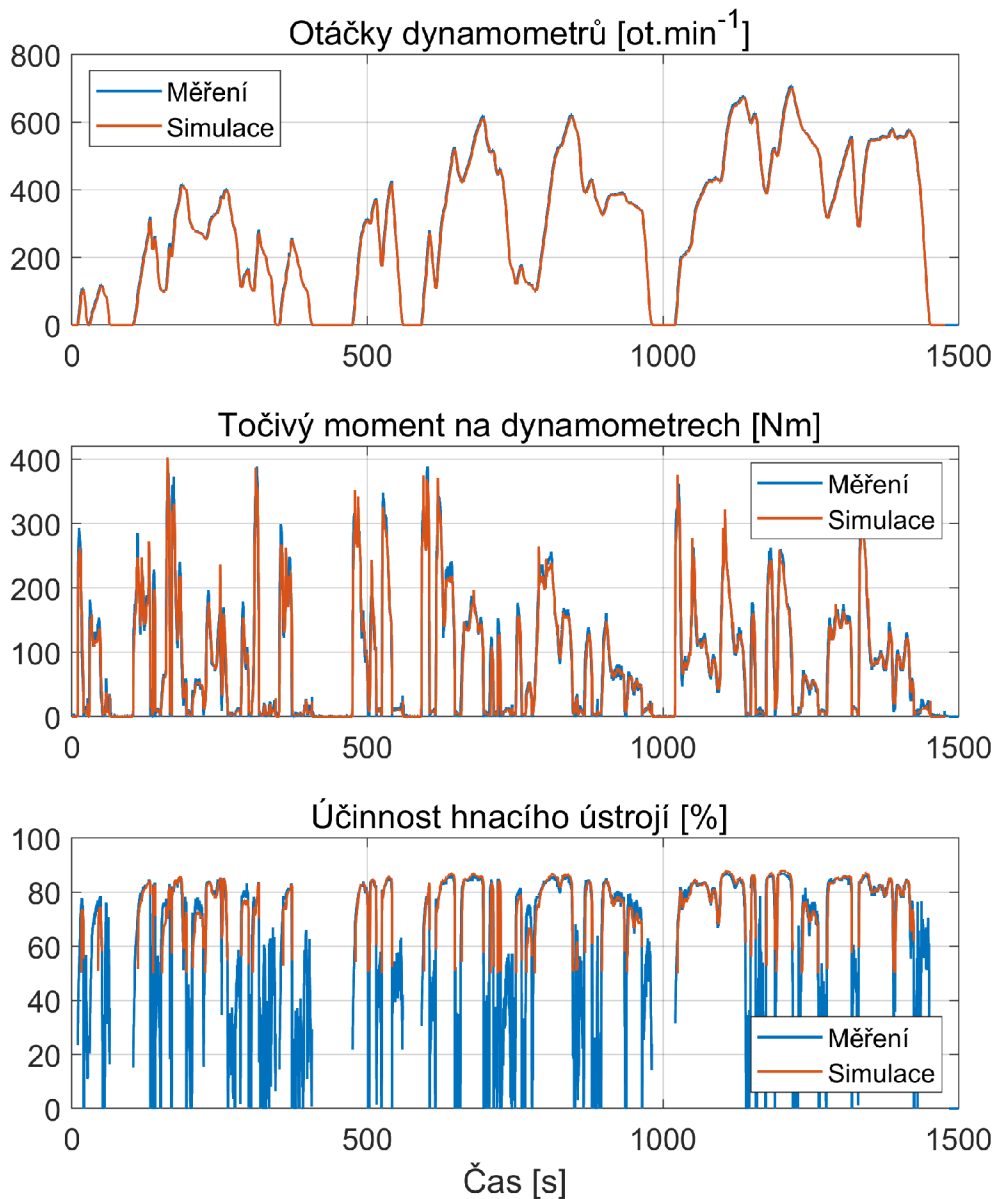
Porovnání výsledků měření účinnosti hnacího ústrojí s výsledky účinnosti ze simulačního modelu na jízděmém cyklu NEDC se sníženou maximální rychlostí vozidla na 100 km/h je zobrazeno na obrázku 10.12. Z celkového pohledu na porovnání průběhu otáček dynamometrů, resp. kol vozidla, je patrné, že hnací ústrojí při experi-



Obrázek 10.12: Porovnání výsledků měření účinnosti hnacího ústrojí s výsledky účinnosti ze simulačního modelu na jízdním cyklu NEDC se sníženou maximální rychlostí vozidla na 100 km/h

mentu kopírovalo otáčkami kol otáčky kol ze simulace. Rozdíly otáček v ustálených i přechodových režimech byly v řádu nízkých jednotek $ot.min^{-1}$. Taktéž průběhy točivého momentu lze hodnotit poměrně shodně. Časový charakter průběhu momentu z měření a simulace byl při experimentu dodržen. Hodnoty točivého momentu při měření v oblastech akcelerace vozidla dosahovaly potřeby mírně vyšších hodnot v rozdílu do 20 Nm. Ve výsledcích ze simulace docházelo k vyšším amplitudám točivého momentu při přechodových režimech. V oblastech konstantních rychlostí se dosažené točivé momenty z měření s momenty ze simulace téměř shodovaly s rozdílem do nízkých jednotek Nm. Průběh točivého momentu ze simulace byl v porovnání

s průběhem z měření hladší, přičemž u měření při konstantních rychlostech docházelo k oscilování hodnoty točivého momentu v intervalu zhruba do 6 Nm.



Obrázek 10.13: Porovnání výsledků měření účinnosti hnacího ústrojí s výsledky účinnosti ze simulačního modelu na jízdním cyklu WLTC class 2

K poměrně velmi přesnému kopírování výsledků z měření s výsledky ze simulace došlo i v případě samotných výsledků účinnosti hnacího ústrojí. Výsledky ze simulace jsou taktéž oproti výsledkům z měření hladší. Hodnoty dosažené účinnosti byly poměrně shodné v oblastech s konstantní rychlostí vozidla i v přechodových režimech při akceleraci vozidla. V oblastech s konstantní rychlostí byly uvažované střední hodnoty účinnosti z měření s účinností ze simulace rozdílné často do 2 %. Nejvyšší dosažené rozdíly v ustálených režimech byly do 5 %, výrazně ale převažují

rozdíly do 2 %. Ve výsledcích z měření jsou výraznější kmitavé hodnoty účinnosti při zpomalování a brzdění do nulové rychlosti.

Porovnání výsledků měření účinnosti hnacího ústrojí s výsledky účinnosti ze simulačního modelu na jízdním cyklu WLTC class 2 je zobrazeno na obrázku 10.13. I při tomto cyklu s vyšší dynamikou byl při experimentu dodržen průběh otáček kol. Časový průběh točivého momentu byl při experimentu téměř dodržen. Střední hodnoty točivého momentu z měření byly při poklesech točivého momentu velmi podobné hodnotám ze simulace. Amplitudy točivého momentu při měření dosahovaly častěji vyšších hodnot než amplitudy ze simulace.

Hodnoty účinnosti při měření při celkovém pohledu poměrně přesně kopírovaly výsledky ze simulace jako v případě předchozího jízdního cyklu s maximálními rozdíly do 5 % v oblastech amplitud a s rozdíly do 2 % v oblastech mimo přechodových režimů.

11 Dílčí shrnutí druhé části disertační práce

Ve druhé části své disertační práce, za jejíž začátek považuji kapitolu 6, jsem vytvořil simulační model vozidla s elektrickým hnacím ústrojím v softwaru Ricardo IGNITE. Simulační model poskytuje výsledky účinnosti hnacího ústrojí vozidla na jízdných cyklech. Současně lze model využít pro získávání vstupních dat pro experimentální měření elektrických hnacích ústrojí ve zkušebně powertrain v laboratoři pohonných jednotek TUL. Tímto krokem jsem naplnil dílčí cíl vytvoření simulačního modelu vozidla s elektrickým hnacím ústrojím.

Následně jsem splnil cíl návrhu a sestavení experimentálního hnacího ústrojí elektrického vozidla. Vytvořené hnací ústrojí lze využít pro další experimentální výzkum hnacích ústrojí elektrických vozidel a konkrétně jsem jej využil v dalším kroku řešení své práce při experimentálním měření účinnosti hnacího ústrojí elektrického vozidla ve zkušebně powertrain v laboratoři pohonných jednotek TUL. Při těchto experimentech jsem pro vytvořené hnací ústrojí naměřil momentovou charakteristiku, celkovou mapu účinnosti hnacího ústrojí, samostatnou mapu účinnosti hnacího ústrojí bez měniče a samostatnou mapu účinnosti pro měnič. Dále jsem provedl měření účinnosti hnacího ústrojí na jízdním cyklu NEDC se sníženou maximální rychlostí vozidla na 100 km/h a na cyklu WLTC Class 2. Těmito experimenty společně s provedením porovnání experimentálního měření s výsledky ze simulačního modelu jsem splnil poslední dva dílčí cíle, konkrétně provedení experimentálního měření účinnosti hnacího ústrojí elektrického vozidla ve zkušebně powertrain v laboratoři pohonných jednotek TUL a zpracování porovnání experimentálního měření účinnosti hnacího ústrojí elektrického vozidla s výsledky simulačního modelu vozidla s elektrickým hnacím ústrojím.

12 Shrnutí metodiky vyhodnocování účinnosti hnacího ústrojí elektrických vozidel

Hlavním cílem mé disertační práce bylo vytvoření metodiky vyhodnocování účinnosti hnacího ústrojí elektrických vozidel pomocí dvou přístupů, které v této kapitole shrnuji. Prvním přístupem je využití simulačního modelu vozidla, druhým přístupem je realizace experimentálního měření účinnosti ve zkušebně powertrain v laboratoři pohonných jednotek TUL. V obou přístupech se jedná o přístupy vyhodnocování účinnosti hnacího ústrojí na standardizovaných jízdnicích cyklech.

Vyhodnocování účinnosti hnacího ústrojí se simulačním modelem vozidla umožňuje získávání relativně rychlých výsledků bez potřeby realizace experimentů s kompletním hnacím ústrojím. Ovšem i v případě tohoto přístupu je zapotřebí použití adekvátních hodnot účinnosti hlavních dílčích složek účinnosti elektrického hnacího ústrojí. Konkrétně se jedná o data účinnosti elektrického pohonu a převodovky. Účinnost elektrického pohonu je pak často složena z účinností elektromotoru a měniče. Získání těchto hlavních dílčích účinností je v určitých případech poměrně složité. Ideálním případem je získání těchto účinností ve formě map účinností již od výrobce nebo dodavatele součástí. Ve velkém množství případů ale výrobci a dodavatelé tyto údaje neposkytují v dostatečném rozsahu, který by umožňoval efektivní vyhodnocování účinnosti výsledného hnacího ústrojí. Ve své disertační práci jsem se proto věnoval vytvoření přístupů, které získání těchto dílčích účinností umožňují.

V kapitole 4 jsem popsal vytvořený matematický model PMSM, který umožňuje získat mapu účinnosti tohoto typu motoru i bez experimentálního měření účinnosti motoru. Je zapotřebí poznamenat, že i při tomto přístupu je zapotřebí disponovat určitými parametry modelovaného motoru. V kapitole 5 jsem se věnoval měření účinnosti elektromotoru na dostupném zařízení v laboratoři pohonných jednotek TUL. Oba popsané přístupy vykazaly velmi podobné výsledky v podobě map účinností, které je možné následně v simulačním modelu vozidla použít. Účinnost převodovky je pak druhou významnou složkou účinnosti elektrického hnacího ústrojí. Některé výzkumné práce se zaměřením na účinnost elektrických hnacích ústrojí pracují s konstantní hodnotou této účinnosti. Ve své práci jsem provedl a popsal detailnější měření účinnosti převodovky v kapitole 9. Získaná data o účinnosti převodovky z tohoto měření je taktéž možné následně použít v simulačním modelu vozidla. Popsané nástroje je tedy možné využít pro získání potřebných dílčích účinností hnacího ústrojí.

Druhý přístup vyhodnocování účinnosti hnacího ústrojí experimentálním měřením účinnosti ve zkušebně powertrain v laboratoři pohonných jednotek TUL jsem

popsal v kapitole 10. Pro tento přístup je zapotřebí mít k dispozici již kompletní hnací ústrojí. Benefitem zkušebny powertrain je v tomto přístupu skutečnost, že hnací ústrojí pro měření účinnosti není zapotřebí zastavovat do vozidla. Pro měření na jízdnicích cyklech je nutné do řídicího systému zkušebny zadání požadovaných průběhů otáček kol a točivých momentů na kolech. Efektivní získání těchto vstupních dat poskytuje vytvořený simulační model vozidla, kdy v tomto případě není zapotřebí v modelu zadávat kompletní mapy účinnosti elektrického pohonu a převodovky. Přístup měření celého hnacího ústrojí tedy nevyžaduje bližší znalosti o dílčích účinnostech jeho částí a je možné takto poměrně za krátký čas získávat okamžité hodnoty účinnosti na jízdnicím cyklu reálného hnacího ústrojí. Výsledky obou přístupů jsem detailně porovnal v kapitole 10.6. Porovnání na jízdnicím cyklu NEDC se sníženou maximální rychlostí vozidla na 100 km/h, který reprezentoval cyklus s konstantními úseky rychlosti vozidla, a na cyklu WLTC class 2 s dynamickým průběhem rychlosti vozidla vykázalo poměrně velmi přesnou shodu výsledků.

Domnívám se, že oba přístupy mohou mít přínosné uplatnění v různých oblastech a odvětvích výzkumu a vývoje elektrických hnacích ústrojí vozidel. Vyhodnocování účinnosti hnacího ústrojí se simulačním modelem vozidla může být využito v oblastech výzkumu a vývoje částí hnacího ústrojí, které se soustředí na dosažení vysoké účinnosti motorů, měničů, převodovek a řízení pohonů pro vozidla s elektrickým pohonem. Bez potřeby tvorby kompletního hnacího ústrojí je simulační model schopen poskytovat efektivním způsobem průběh účinnosti hnacího ústrojí na jízdnicích cyklech. Benefitem tedy může být na místech, kde je zapotřebí vyhodnocovat vliv navrhovaných řešení, která cílí na zvýšení dosahované účinnosti hnacího ústrojí. V tomto případě je model schopen pro navrhovaná řešení poskytovat porovnání dosahované účinnosti hnacího ústrojí na kompletním jízdnicím cyklu.

Oproti tomu vyhodnocování účinnosti hnacího ústrojí experimentálním měření účinnosti kompletního hnacího ústrojí ve zkušebně powertrain v laboratoři pohonných jednotek TUL má potenciál pro výzkum a vývoj elektrických hnacích ústrojí ve fázích, kdy je již dostupné kompletní hnací ústrojí. Měřením účinnosti je možné ověřovat předpoklady dosahované účinnosti hnacího ústrojí z vývojových fází návrhů. Další prostor využití může být v oblastech vývoje hnacích ústrojí, která jsou již navržena a je zapotřebí provedení hodnocení nově implementovaných řešení, která by mohla mít potenciál přinést zlepšení dosahované účinnosti hnacího ústrojí. Benefitem je zároveň již uvedená skutečnost, že hnací ústrojí není zapotřebí při tomto měření instalovat do vozidla a i přesto je možné získat výsledky dosahované účinnosti na kompletních jízdnicích cyklech. Tato skutečnost tedy výrazně snižuje časovou a finanční náročnost například oproti metodám měření ve válcových zkušebnách.

13 Výsledky disertační práce

Hlavním výsledkem disertační práce je navržená metodika vyhodnocování účinnosti hnacího ústrojí elektrických vozidel pomocí simulačního modelu vozidla a experimentálního měření účinnosti hnacího ústrojí elektrického vozidla ve zkušebně powertrain v laboratoři pohonných jednotek TUL. V rámci návrhu a řešení metodiky vznikly další dílčí výsledky, které jsou navrženy a vytvořeny jako podpůrné nástroje pro vyhodnocování účinnosti hnacích ústrojí elektrických vozidel a jejich součástí:

- Dílčím výsledkem je vytvořený matematický model PMSM s vektorovým řízením v softwaru MATLAB Simulink, který poskytuje výsledky o účinnosti elektromotoru ve formě mapy účinnosti.
- Dílčím výsledkem je vytvořená metodika měření účinnosti elektromotoru na stanovišti s elektrickým dynamometrem, které je dostupné v laboratoři pohonných jednotek TUL.
- Dílčím výsledkem je vytvořený simulační model vozidla s elektrickým hnacím ústrojím v softwaru Ricardo IGNITE, který poskytuje výsledky o účinnosti hnacího ústrojí elektrického vozidla na jízdách cyklech.
- Dílčím výsledkem je vytvořené experimentální hnací ústrojí elektrického vozidla, které posloužilo jako hnací ústrojí při realizovaném experimentálním měření.
- Dílčím výsledkem je metodika měření účinnosti hnacího ústrojí elektrických vozidel ve zkušebně powertrain v laboratoři pohonných jednotek TUL.
- Za samostatné výsledky považují také všechny uvedené výsledky ve formě map účinností a grafů o účinnosti hnacího ústrojí elektrického vozidla a jeho součástí z matematického modelu, simulačního modelu a z realizovaných experimentálních měření.

14 Zhodnocení výsledků disertační práce

14.1 Zhodnocení výsledků pro vědní obor

Disertační práce přináší ucelený přehled a nové nástroje pro vyhodnocování účinnosti hnacích ústrojí elektrických vozidel. Dosažené a uvedené detailní výsledky ve formě map účinností a grafů o účinnosti hnacího ústrojí elektrického vozidla a jeho součástí z matematického modelu, simulačního modelu a z realizovaných experimentálních měření, podle mého názoru, rozšiřují teoretické souvislosti a poznatky v oblasti výzkumu a vývoje efektivních elektrických hnacích ústrojí vozidel a přináší do odborné literatury jejich zpracování v rámci jedné práce.

Vytvořený matematický model PMSM je schopen poměrně rychle poskytovat výsledné mapy účinnosti tohoto v současnosti nejpoužívanějšího typu elektromotoru v hnacích ústrojí vozidel. Tyto výsledky jsou, podle mého názoru, velmi cenné ve fázích návrhů nových elektrických hnacích ústrojí, které se soustředí na dosažení vysoké účinnosti ústrojí. Velký význam těchto výsledků spatřuji také ve využití v odborných pracích a následných publikacích, které se soustředí právě na dosažení vysokých účinností hnacích ústrojí a pro provádění návrhů, analýz a optimalizací potřebují adekvátní data o dosahované účinnosti těchto elektromotorů.

Vytvořená metodika měření a výsledky z měření účinnosti elektromotoru na stanovišti s elektrickým dynamometrem, které je dostupné v laboratoři pohonných jednotek TUL, mají podobný význam jako výsledky z vytvořeného matematického modelu PMSM popsaného v předchozím odstavci. Experimentální měření v této formě má navíc potenciál využití při validaci vytvářených modelů elektromotorů, při implementaci pokročilých metod řízení elektromotorů a dalších výzkumných činnostech.

Simulační model vozidla s elektrickým hnacím ústrojím přináší široké možnosti využití v oblastech dalšího výzkumu a vývoje efektivních elektrických hnacích ústrojí vozidel. Jeho hlavním benefitem je rychlé poskytování výsledné účinnosti hnacího ústrojí na standardizovaných jízdních cyklech. Vhodná může být tedy jeho aplikace především ve fázích vývoje, kdy je zapotřebí vyhodnocovat vliv určitých specifických změn nebo implementací nových přístupů v hnacím ústrojí, které mají za cíl určité zlepšení dosahované účinnosti. Pomocí nasazení simulačního modelu je potom snadné vyhodnocovat přínosy, vlivy a trendy těchto změn a inovací na účinnosti hnacího ústrojí na jízdním cyklu. Simulační model lze využít dále také pro získání vstupních dat pro experimentální měření účinnosti hnacího ústrojí ve zkušebně powertrain v laboratoři pohonných jednotek TUL.

Navržené a vytvořené experimentální hnací ústrojí elektrického vozidla posloužilo k provedení experimentálních měření účinnosti hnacího ústrojí ve zkušebně powertrain v laboratoři pohonných jednotek. Jeho další přínosy spatřuji především pro katedru vozidel a motorů, které přináší široké možnosti v rámci dalšího výzkumu a vývoje elektrických hnacích ústrojí v oblastech dílčích součástí hnacího ústrojí a pokročilých metod řízení. Vhodné může být také jeho nasazení v rámci výuky na katedře.

Vytvořená metodika měření účinnosti hnacího ústrojí elektrických vozidel ve zkušebně powertrain v laboratoři pohonných jednotek TUL přináší možnosti vyhodnocování účinnosti na kompletním reálném hnacím ústrojím bez nutnosti instalace hnacího ústrojí do vozidla. Měření má potenciál pro široké spektrum výzkumu a vývoje efektivních hnacích ústrojí a jejich součástí. Přínosem je možnost vyhodnocování vlivu určitých vývojových změn nebo implementací nových přístupů v hnacím ústrojí. Oproti vyhodnocování pomocí simulačního modelu tento přístup umožňuje vyhodnocování na reálném hnacím ústrojí, případně umožňuje také validaci simulačních modelů a jejich zpřesnění. Na základě prostudované odborné literatury k této problematice se současně domnívám, že především výsledky průběhu účinnosti na standardizovaných jízdnicích cyklech a případně i mapy účinnosti pro kompletní elektrické hnací ústrojí z reálného měření přináší do odborné literatury nové a unikátní podklady pro rozšíření obecného poznání této problematiky. Na těchto základech je možné vyhodnocovat a určovat oblasti, které má význam v rámci zvyšování účinnosti elektrických hnacích ústrojí optimalizovat a následně vyhodnocovat skutečný dopad implementovaných optimalizací.

Dosažené výsledky mají současně také přínos pro katedru vozidel a motorů, která vytvořené modely, metodiky a experimentální hnací ústrojí může využít v rámci dalšího vývoje a výzkumu elektrických hnacích ústrojí. Výsledky mohou být taktéž na katedře užitečné pro studijní program automobilového inženýrství, kterému mohou rozšířit oblasti výuky elektromobility. Výsledky současně fakultě strojní TUL rozšiřují možnosti soustředění výzkumu a vývoje v oblasti nové mobility.

14.2 Zhodnocení výsledků pro praxi

Domnívám se, že dosažené výsledky ve formě uceleného přehledu a nových nástrojů pro vyhodnocování účinnosti hnacích ústrojí elektrických vozidel mají potenciální význam pro praxi v oblasti přechodu společnosti na trvale udržitelnou mobilitu. Vytvořené nástroje mohou být využity ve výzkumu a vývoji takových hnacích ústrojí, která společnosti mohou přinést výrazný posun v dosahovaných možnostech hnacích ústrojí, která jsou nyní nazývána jako budoucí nebo alternativní hnací ústrojí. Posun obecného porozumění dosahované účinnosti hnacích ústrojí elektrických vozidel tak může být výraznou pomocí v této oblasti.

15 Doporučení na pokračování práce v daném tématu a oboru

Domnívám se, že dosažené výsledky mé disertační práce vytvářejí prostor pro pokračování ve výzkumu a vývoji elektrických hnacích ústrojí soustředěném na dosažený velmi vysoké účinnosti ústrojí. Konkrétně lze z mého pohledu v rámci jednotlivých výsledků doporučit následující témata a zaměření:

Matematický model PMSM s výpočtem účinnosti

- Vyhodnocování vlivu konstrukčních optimalizačních úprav motoru, které mají vliv na určité parametry motoru s cílem vyhodnocování vlivu úprav na dosahovanou účinnosti motoru.
- Implementace pokročilých metod řízení, například uvedených v kapitole 2.4, s cílem vyhodnocování jejich vlivu na dosahovanou účinnosti motoru.
- Tvorba matematických modelů pro další typy motorů na podobném základu s cílem detailního porovnání jejich dosahované účinnosti.

Metodika měření účinnosti elektromotoru na stanovišti s elektrickým dynamometrem

- Provedení měření pro další typy elektromotorů s cílem detailního porovnání jejich dosahované účinnosti.
- Provedení měření účinnosti na elektromotoru Zero Motorcycles ZF 75-7 s takovým měničem, který by poskytl motoru dostatečný proud až do hodnoty 600 A s cílem naměření mapy účinnosti v celém provozním rozsahu točivého momentu tohoto motoru.

Simulační model vozidla s elektrickým hnacím ústrojím

Simulační model vozidla s elektrickým hnacím ústrojím přináší poměrně široký prostor pro rozšíření do takových podob, ve kterých by umožňoval vyhodnocovat přínosy účinnosti hnacího ústrojí pro následující potenciální přístupy, které mohou přinést zvýšení dosahované účinnosti:

- Provedení optimalizace převodového poměru převodovky s cílem vyhodnocování vlivu na dosahovanou účinnosti hnacího ústrojí. Použitý software Ricardo IGNITE má implementovaný optimalizační nástroj HEEDS, který by bylo možné k takové práci využít.
- Implementace víceúrovňové převodovky a vyhodnocování dosahované účinnosti hnacího ústrojí.
- Úpravy simulačního modelu do podoby modelů s uspořádáním hnacích ústrojí s více elektromotory a vyhodnocování dosahované účinnosti hnacího ústrojí.
- Využití modelu pro porovnání dosahované účinnosti hnacího ústrojí na jízdních cyklech pro různé typy elektromotorů.

Experimentální hnací ústrojí elektrického vozidla

- Analyzování vlastností elektrických hnacích ústrojí se dvěma elektromotory, které použítá experimentální převodovka díky své konstrukci umožňuje.
- Vyhodnocování vlivu dosahované účinnosti hnacího ústrojí při měření ve zkušebně powertrain v laboratoři pohonných jednotek TUL při úpravách převodového poměru převodovky.

Metodika měření účinnosti hnacího ústrojí elektrických vozidel

Vytvořená metodika může být přínosně využita při vyhodnocování vlivu a přínosů implementací různých řešení, která by mohla přinést zvýšení dosahované účinnosti hnacího ústrojí. Mohou to být například řešení v podobě:

- Využití víceúrovňových převodovek v elektrických hnacích ústrojí
- Optimalizací převodového poměru převodovek v elektrických hnacích ústrojí
- Využití uspořádání hnacích ústrojí s více elektromotory
- Využití typů elektromotorů s vysokou dosahovanou účinností na širokém spektru provozních otáček a točivých momentů
- Využití vysokootáčkových trakčních elektromotorů
- Využití hnacích ústrojí s konstrukčně optimalizovanými elektromotory
- Využití elektrických hnacích ústrojí s pokročilými metodami řízení elektrických pohonů

16 Závěr

Na současném trhu vozidel se objevují jedny z prvních sériově vyráběných elektrických vozidel. Podle mého názoru lze v současnosti jejich fázi výzkumu a vývoje stále ještě považovat za počátek. Až v posledních letech jsou do výzkumu a vývoje elektrických vozidel soustředěny velké finanční a časové investice. Má disertační práce přináší do problematiky hnacích ústrojí elektrických vozidel nové nástroje a poznatky pro vyhodnocování účinnosti hnacích ústrojí pomocí experimentálních měření a simulací. Dosahovaná účinnost hnacího ústrojí v reálném provozu vozidla ovlivňuje dojezd vozidla na jedno nabití baterie, náročnost na velikost kapacity baterie a na dosahované výkonnostní parametry vozidla.

Na základě provedené práce mohu konstatovat, že vyhodnocování účinnosti hnacího ústrojí elektrických vozidel na standardizovaných jízdních cyklech lze provést pomocí vytvořeného simulačního modelu vozidla nebo pomocí experimentálního měření hnacího ústrojí ve zkušební powertrain v laboratoři pohonných jednotek TUL nebo případně na obdobném zařízení na jiném místě. Pro provedení vyhodnocování pomocí simulace je zapotřebí získání adekvátních dat o dosahované účinnosti jednotlivých součástí hnacího ústrojí, které mají významný vliv na celkovou dosahovanou účinnost. V případě uspořádání hnacího ústrojí s jedním elektromotorem a převodovkou s jedním rychlostním stupněm s mechanickým diferenciálem se jedná především o hodnoty účinnosti elektromotoru a převodovky. Pro stanovení účinnosti elektromotoru lze použít v práci popsané dva přístupy - přístup s využitím matematického modelu motoru a nebo přístup pomocí experimentálního měření účinnosti motoru. Pro předmětnou konfiguraci elektrického pohonu složeného z elektromotoru Zero Motorcycles ZF 75-7 a z měniče Sevcon Gen 4 110 V / 300 A lze uvést, že bylo dosaženo velmi podobných výsledků pomocí obou přístupů. Za zmínku stojí uvedení skutečnosti, že výsledky se v porovnávaných provozních bodech motoru lišily do hodnoty rozdílu 2 %. Domnívám se, že lze tedy částečně shrnout, že oba přístupy přináší velmi podobné výsledky. Považuji za vhodné zde poznamenat, že v ideálním případě lze doporučit provedení obou přístupů včetně porovnání výsledků, aby bylo dosaženo adekvátní verifikace konkrétního matematického modelu. Pro přiblížení stanovení účinnosti převodovky elektrického vozidla bylo v práci provedeno experimentální měření, které poskytuje hodnoty účinnosti jednostupňové převodovky s mechanickým diferenciálem v závislosti na vstupních otáčkách a vstupním točivém momentu. Tato data o účinnosti převodovky lze v simulačním přístupu taktéž využít.

Druhou možností vyhodnocování účinnosti elektrického hnacího ústrojí na jízdních cyklech je provedení experimentálního měření. Oproti vyhodnocování pomocí

simulace není zapotřebí získávání samostatných dat o účinnosti jednotlivých součástí hnacího ústrojí, která mohou být náročná na potřebný čas a zázemí, a je možné provádět vyhodnocování například na již dostupném reálném hnacím ústrojí. Z provedeného porovnání výsledků z obou metod vyhodnocování účinnosti hnacího ústrojí lze uvést, že bylo dosaženo velmi podobných průběhů výsledků účinnosti na jízdnicích cyklech, kdy rozdíl hodnot účinností z obou metod se často pohyboval do hodnoty rozdílu 2 % v oblastech mimo přechodové režimy a do rozdílu 5 % v oblastech přechodových režimů. I v tomto případě je tedy podle mého názoru možné shrnout, že obě metody přináší velmi podobné výsledky.

Z vlastní zkušenosti z realizovaných měření účinnosti elektrického hnacího ve zkušebně powertrain v laboratoři pohonných jednotek bych rád uvedl, že popsané měření pomocí vytvořené metodiky může být velmi užitečným nástrojem například při optimalizaci konfigurace měniče motoru a v jiných podobných situacích, kdy je po každé provedené změně na reálném hnacím ústrojí možné ihned analyzovat trendy vlivu na dosahovanou účinnost kompletního ústrojí.

Pro vytvořené experimentální hnací ústrojí, které se skládá z trakčního elektromotoru Zero Motorcycles ZF 75-7 v kombinaci s měničem Sevcon Gen 4 110 V / 300 A a experimentální jednostupňové redukční převodovky s mechanickým diferenciálem lze na základě provedeného vyhodnocování účinnosti hnacího ústrojí konstatovat, že ústrojí je schopné dosahovat na jízdnicím cyklu NEDC se sníženou maximální rychlostí vozidla na 100 km/h a na cyklu WLTC class 2 celkové účinnosti ústrojí kolem hodnoty 70 % při nižších rychlostech vozidla a hodnot nad 80 % častěji při rychlostech vyšších. Současně provedené zobrazení bodů provozu hnacího ústrojí naznačuje, že se hnací ústrojí v rámci uvedených jízdnicích cyklů poměrně často pohybuje v oblastech se střední až nízkou účinností.

Získané výsledky o dosahovaných hodnotách účinností předmětného experimentálního hnacího ústrojí s elektrickým motorem s konvenčním uspořádáním hnacího ústrojí lze podle mého názoru taktéž interpretovat tak, že hodnoty celkové účinnosti ústrojí, které sice využívá elektromotor, který je schopen dosahovat účinnosti blížící se hodnotám 90 %, se pak mohou v rámci standardizovaných jízdnicích cyklů NEDC se sníženou maximální rychlostí vozidla na 100 km/h a WLTC class 2 pohybovat majoritně na hodnotách v přibližném rozmezí hodnot 70 % až 80 %. Tuto skutečnost pak dále interpretuji tak, že současná hnací ústrojí elektrických vozidel se současnými komponenty hnacích ústrojí mají stále poměrně vysoký potenciál dosahovat podstatně vyšší účinnosti hnacího ústrojí v rámci standardizovaných jízdnicích cyklů. Z provedeného vyhodnocení současného stavu poznání bych zde jmenoval konkrétní cesty, které mají podle publikovaných skutečností potenciál přinést zvýšení účinnosti hnacího ústrojí, například: využití víceústupňových převodovek, optimalizace převodového poměru převodovky, využití uspořádání hnacích ústrojí s více elektromotory, využití typů elektromotorů s vyšší dosahovanou účinností na širokém spektru provozních otáček a točivých momentů, konstrukční optimalizace elektrických pohonů s cílem zvýšení dosahované účinnosti a využití pokročilých metod řízení elektrických pohonů.

Na základě provedených experimentů, práce s vytvořenými metodikami měření a na základě práce s vytvořeným matematickým modelem a vytvořeným simulačním

modelem se domnívám, že právě tyto nástroje a přístupy mohou při implementaci výše zmíněných cest, které představují potenciál pro zvýšení účinnosti elektrických hnacích ústrojí, najít široké uplatnění při vyhodnocování vlivů a přínosů těchto inovací na dosahovanou účinnost a mohou tak pozitivně přispět k v úvodu zmiňované transformaci na udržitelnou mobilitu.

Seznam použité literatury

- [1] Biermann, J. W.: Measurement system for CV joint efficiency. *SAE Technical Papers*, ročník 108, 1999: s. 1724--1730, ISSN 26883627, doi:10.4271/1999-01-0936.
- [2] Chan, C. C.: The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE*, ročník 95, č. 4, 2007: s. 704--718, ISSN 00189219, doi:10.1109/JPROC.2007.892489.
- [3] Chau, K.: Research on electric vehicles : Challenges, opportunities and emerging technologies. *Research on electric vehicles*, ročník 1, č. 1, 2012: s. 13--24, ISSN 2186-4942, doi:10.11425/sst.1.13.
- [4] Chau, K. T.: *Electric Vehicle Machines and Drives*. 2015, ISBN 9781118752524, doi:10.1002/9781118752555.
- [5] De Pinto, S.; Camocardi, P.; Sorniotti, A.; aj.: A four-wheel-drive fully electric vehicle layout with two-speed transmissions. In *2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2014*, Coimbra, Portugal: IEEE, 2014, ISBN 9781479967834, doi:10.1109/VPPC.2014.7006997.
- [6] De Santiago, J.; Bernhoff, H.; Ekergård, B.; aj.: Electrical motor drivelines in commercial all-electric vehicles: A review. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, ročník 61, č. 2, 2012: s. 475--484, ISSN 00189545, doi:10.1109/TVT.2011.2177873.
- [7] Delafosse, V.: Efficiency Maps for Electric Motors Made Easy. 2018. [cit. 2019-08-15].
Dostupné z: <https://www.ansys.com/blog/efficiency-maps-for-electric-motors-made-easy>
- [8] Dépature, C.; Lhomme, W.; Bouscayrol, A.; aj.: Efficiency map of the traction system of an electric vehicle from an on-road test drive. *2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2014*, 2014, doi:10.1109/VPPC.2014.7007056.
- [9] Diblík, M.: *Elektrické pohony pro dynamicky náročné aplikace 2006*. Disertační práce, Technická univerzita v Liberci, 2006.

- [10] Emadi, A.: *Handbook of automotive power electronics and motor drives*. CRC Press, 2005, ISBN 9780824723613, 736 s.
- [11] Estima, J. O.; Marques Cardoso, A. J.: Efficiency analysis of drive train topologies applied to electric/hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, ročník 61, č. 3, 2012: s. 1021--1031, ISSN 00189545, doi: 10.1109/TVT.2012.2186993.
- [12] European Commission: NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2017/1151. 2017.
- [13] EV Database: Compare electric vehicles - EV Database. [cit. 2019-07-08]. Dostupné z: <https://ev-database.org/>
- [14] Evropská komise: Strategie pro udržitelnou a inteligentní mobilitu – nasměrování evropské dopravy do budoucnosti. Technická zpráva, 2020. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX{%}3A52020DC0789>
- [15] Fiorillo, F.; Novikov, A.: An Improved Approach to Power Losses in Magnetic Laminations under Nonsinusoidal Induction Waveform. *IEEE Transactions on Magnetics*, ročník 26, č. 5, 1990: s. 2904--2910, ISSN 19410069, doi:10.1109/20.104905.
- [16] German Association of the Automotive Industry (VDA): Global WLTP roll-out for more realistic results in fuel consumption: Questions and answers regarding the new international test procedure. Technická zpráva, 2017. Dostupné z: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC107662/kjna28724enn.pdf>
- [17] Hoang, K. D.; Wang, J.; Cyriacks, M.; aj.: Feed-forward torque control of interior permanent magnet brushless AC drive for traction applications. *Proceedings of the 2013 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2013*, 2013: s. 152--159, doi:10.1109/IEMDC.2013.6556247.
- [18] Holdstock, T.; Sorniotti, A.; Everitt, M.; aj.: Energy consumption analysis of a novel four-speed dual motor drivetrain for electric vehicles. In *2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2012*, Seoul, South Korea: IEEE, 2012, ISBN 9781467309530, doi:10.1109/VPPC.2012.6422721.
- [19] Hu, M.; Zeng, J.; Xu, S.; aj.: Efficiency Study of a Dual-Motor Coupling EV Powertrain. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, ročník 64, č. 6, 2015: s. 2252 – 2260, ISSN 00189545, doi:10.1109/TVT.2014.2347349.
- [20] Huang, S.; Chen, Z.; Huang, K.; aj.: Maximum torque per ampere and flux-weakening control for PMSM based on curve fitting. *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2010*, ročník 4, č. 3, 2010: s. 3--7, doi: 10.1109/VPPC.2010.5729024.

- [21] Laitinen, H.; Lajunen, A.; Tammi, K.: Improving Electric Vehicle Energy Efficiency with Two-Speed Gearbox. In *2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, IEEE, dec 2017, ISBN 978-1-5386-1317-7, s. 1--5, doi: 10.1109/VPPC.2017.8330889.
Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8330889/>
- [22] Lu, D.; Ouyang, M.: Torque-based optimal acceleration control for electric vehicle. *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, ročník 27, č. 2, 2014: s. 319--330, ISSN 10009345, doi:10.3901/CJME.2014.02.319.
- [23] Murray, A.: Design platforms enable variable-speed motor control in energy-efficient appliances. 2007.
Dostupné z: <https://www.edn.com/design-platforms-enable-variable-speed-motor-control-in-energy-efficient-appliances/>
- [24] Mutoh, N.; Miyamoto, Y.; Horigome, T.; aj.: Driving characteristics of an electric vehicle system with independently driven front and rear wheels. In *IECON'03. 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Roanoke, VA, USA: IEEE, 2003, s. 931--938, doi:10.1109/IECON.2003.1280108.
- [25] Muiyang, L.: Flux-Weakening Control for Permanent-Magnet Synchronous Motors Based on Z-Source Inverters. , č. December, 2009: str. 111.
Dostupné z: <http://epublications.marquette.edu/theses{ }open/284>
- [26] Popescu, M.; Dorrell, D. G.; Ionel, D. M.: A study of the engineering calculations for iron losses in 3-phase AC motor models. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 2007: s. 169--174, doi:10.1109/IECON.2007.4460039.
- [27] Qinghua, L.: Analysis, Design and Control of Permanent Magnet Synchronous Motors for Wide-Speed Operation. *Journal of Chemical Information and Modeling*, ročník 53, č. 9, 2013: s. 1689--1699, ISSN 1098-6596, arXiv:1011.1669v3.
- [28] Rajashekar, K.: Present status and future trends in electric vehicle propulsion technologies. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, ročník 1, č. 1, 2013: s. 3--10, ISSN 21686785, doi:10.1109/JESTPE.2013.2259614.
- [29] Ricardo Software: IGNITE User Manual. 2018.
- [30] Rydlo, P.: *Řízení elektrických střídavých pohonů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, ISBN 9788073722234, 126 s.
- [31] Tutuianu, M.; Bonnel, P.; Ciuffo, B.; aj.: Development of the World-wide harmonized Light duty Test Cycle (WLTC) and a possible pathway for its introduction in the European legislation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, ročník 40, 2015: s. 61--75, ISSN 13619209, doi: 10.1016/j.trd.2015.07.011.
Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2015.07.011>

- [32] Urbina Coronado, P. D.; Ahuett-Garza, H.: Control Strategy for Power Distribution in Dual Motor Propulsion System for Electric Vehicles. *Mathematical Problems in Engineering*, ročník 2015, č. November, 2015, ISSN 15635147, doi: 10.1155/2015/814307.
- [33] Veg, L.: Měření mechanických ztrát asynchronního stroje a porovnání s empirickým výpočtem. In *Elektrotechnika a informatika: XVIII. ročník konference doktorských prací*, Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017, s. 100--104. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/handle/11025/26461>
- [34] Vorel, P.: Výkonové elektromechanické systémy v silničních vozidlech. 2005.
- [35] Wager, G.; McHenry, M. P.; Whale, J.; aj.: Testing energy efficiency and driving range of electric vehicles in relation to gear selection. *Renewable Energy*, ročník 62, č. 2014, 2014: s. 303--312, ISSN 09601481, doi:10.1016/j.renene.2013.07.029. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2013.07.029>
- [36] Wuebbles, D. J.; Jain, A. K.: Concerns about climate change and the role of fossil fuel use. *Fuel Processing Technology*, ročník 71, č. 1-3, 2001: s. 99--119, ISSN 03783820, doi:10.1016/S0378-3820(01)00139-4.
- [37] Xue, X. D.; Cheng, K. W. E.; Cheung, N. C.: Selection of electric motor drives for electric vehicles. In *Power Engineering Conference, 2008. AUPEC '08. Australasian Universities*, 2008, ISBN VO -, s. 1--6, doi:<http://ieeexplore.ieee.org/document/4813037/>.
- [38] Yildirim, M.; Polat, M.; Kurum, H.: A survey on comparison of electric motor types and drives used for electric vehicles. *16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, PEMC 2014*, 2014: s. 218--223, ISSN 1525-4135, doi:10.1109/EPEPEMC.2014.6980715.
- [39] Zeraoulia, M.; Benbouzid, M. E. H.; Diallo, D.: Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, ročník 55, č. 6, nov 2006: s. 1756--1764, ISSN 0018-9545, doi:10.1109/TVT.2006.878719. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4012550/>
- [40] Zhao, L.; Zhou, X.; Gao, D.: The Efficiency Optimization of Permanent Magnet Synchronous Machine DTC for Electric Vehicles Applications Based on Loss Model. *Proceedings of the 2015 International Power, Electronics and Materials Engineering Conference*, ročník 17, č. Ipemec, 2015: s. 70--75, doi: 10.2991/ipemec-15.2015.14.
- [41] Zhou, K.; Ai, M.; Sun, D.; aj.: Field weakening operation control strategies of PMSM based on feedback linearization. *Energies*, ročník 12, č. 23, 2019, ISSN 19961073, doi:10.3390/en12234526.

Seznam publikací autora souvisejících s řešenou problematikou

1. Břoušek, J., Krčmář, L., Rydlo, P. Efficiency Measuring of Electric Drive with Traction Synchronous Motor with Permanent Magnets, 2021 IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics, ECMSM 2021, Liberec, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., ISBN: 978-1-5386-1757-1, p. 1-5, 5 pages, 2021
2. Břoušek, J., Petr, T., Ježek, J., Voženílek, R. Transmission Design for an Autonomous Modular Platform, 7th International Conference INTEGRITY-RELIABILITY-FAILURE In Automotive, Locomotive, Aerospace, Civil Engineering and Biomechanics, Portugal, INEGI-Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial, ISBN: 978-989-54756-1-2, p. 465-468, 4 pages, 2020
3. Břoušek, J., Petr, T. Simulation study of dual motor drive system efficiency, 45. mezinárodní vědecká konference kateder dopravních, manipulačních, stavebních a zemědělských strojů, Plzeň, Západočeská univerzita v Plzni, ISBN: 978-80-261-0884-9, p. 8-16, 212 pages, 2019
4. Břoušek, J., Zvolský, T. Experimental study of electric vehicle gearbox efficiency, MATEC Web of Conferences, EDP Sciences, p. 1-5, 5 pages, ISSN: 2261236X, 2018
5. Břoušek, J., Voženílek, R. Gearbox design for a dual motor drive system, 7th International Conference on Mechanics and Materials in Design, Porto, Portugal, INEGI/FEUP, ISBN: 978-989-98832-6-0, p. 803-808, 6 pages, 2017
6. Bukvic, M., Břoušek, J., Jandura, P. Experimental Electric Vehicle eŠus Gen2, MECCA, Prague, Czech Technical University in Prague, 1, p. 7-12, 6 pages, ISSN: 1214-0821, n. 2, 2016
7. Voženílek, R., Zvolský, T., Bukvic, M., Břoušek, J. Zkušebna Powertrain, 42. Medzinárodná vedecká konferencia kateder dopravných, manipulačných, stavebných a poľnohospodárskych strojov, Bratislava, Vydavateľstvo STU v Bratislave, ISBN: 978-80-227-4584-0, p. 13-18, 6 pages, 2016
8. Voženílek, R., Zvolský, T., Bukvic, M., Břoušek, J. Powertrain, XLVI. International Scientific Conference of the Czech and Slovak Universities and

Institutions Dealing with Research of Internal Combustion Engines, Bratislava, Faculty of Mechanical Engineering, Slovak University of Technology in Bratislava, 1, ISBN: 978-80-227-4424-9, p. 159-164, 6 pages, 2015

9. Jandura, P., Břoušek, J., Bukvic, M. The Concept of a Highly Efficient Powertrain for an Electric Vehicle with Respect to Vehicle Driving Dynamics, 2015 International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE), Tatranská Lomnica, Faculty of Electrical Engineering of the Technical University of Košice, 1, ISBN: 978-146737376-0, p. 422-429, 8 pages, 2015

Seznam ostatních publikací autora

1. Beran, L., Vojíř, M., Myslivec, T., Petr, T., Břoušek, J., Diblík, M., Keller, P., Kajzr, D., Voženílek, R. A New Way to Design Software for Industrial Automation - 3d Printer Cement Mixtures, MM SCIENCE JOURNAL, Prague, MM SCIENCE, 1, p. 4223-4229, 7 pages, ISSN: 1803-1269, 2021
2. Břoušek, J., Ježek, J., Petr, T., Voženílek, R., Němeček, P., Krčmář, L. Concept of Autonomous Electric Modular Platform for Transport of Freight and Equipment, Proceedings of the 1st International Conference on Automotive Industry 2020, Mladá Boleslav, ŠKODA AUTO University, ISBN: 978-80-7654-016-3, p. 62-69, 8 pages, ISSN: 1803-5248, 2020
3. Břoušek, J., Brabec, P., Ježek, J., Petr, T. Design and Optimization of the Steering Knuckle for an Utility Vehicle, 7th International Conference INTEGRITY-RELIABILITY-FAILURE In Automotive, Locomotive, Aerospace, Civil Engineering and Biomechanics, Portugal, INEGI-Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial, ISBN: 978-989-54756-1-2, p. 105-110, 6 pages, 2020
4. Krčmář, L., Petr, T., Břoušek, J. Design of Rear Wheel Steering System of an Experimental Electric Vehicle, International Conference on Electrical Drives and Power Electronics, IEEE, 1, ISBN: 978-1-72810-389-1, p. 207-210, 4 pages, ISSN: 13393944, 2019
5. Voženílek, R., Beroun, S., Břoušek, J. Design of a tribometer for piston rings, Mechanisms and Machine Science; XII. International Conference on the Theory of Machines and Mechanisms, Liberec, Springer International Publishing, ISBN: 978-331944086-6, p. 309-314, 6 pages, ISSN: 22110984, 2017
6. Voženílek, R., Beroun, S., Břoušek, J., Seidel, F. The possibility of identifying the benefits of coating piston rings, Proceedings of the 7th International Conference on Mechanics and Materials in Design (M2D2017), Porto, Portugal, INEGI/FEUP, ISBN: 978-989-98832-7-7, p. 707-708, 2 pages, 2017
7. Brabec, P., Voženílek, R., Břoušek, J. Simulation of vehicle dynamic behaviour for charging powertrain, XLVII. International Scientific Conference of the Czech and Slovak University Departments and Institutions Dealing with the

Research of Internal Combustion Engines, Brno, Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Automotive Engineering, ISBN: 978-80-214-5379-1, p. 31-38, 8 pages, 2016

8. Břoušek, J. Simulace brzdění osobního automobilu při průjezdu zatáčkou. In: 41. mezinárodní konference kateder dopravních, manipulačních, stavebních a zemědělských strojů. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015, s. 90-95. ISBN 978-80-7494-196-2.

Seznam funkčních vzorků autora

1. Ježek, J., Voženílek, R., Kolomazník, M., Břoušek, J., Petr, T. Jednostupňová převodovka pro autonomní vozidlo, 1, 2020
2. Beran, L., Diblík, M., Myslivec, T., Vojíř, M., Kajzr, D., Břoušek, J., Petr, T., Voženílek, R. Řídicí systém pro testbed DY-A-NA určený pro tisk cementových směsí, 1, 2020
3. Břoušek, J., Petr, T., Voženílek, R., Beran, L., Diblík, M., Myslivec, T., Vojíř, M., Kajzr, D. Testbed DY-A-NA určený pro tisk cementových směsí, 1, 2020
4. Voženílek, R., Beroun, S., Břoušek, J. Zkušební a měřicí zařízení pro měření třecích ztrát - TH01021093-2015V002, 2015

Seznam patentů autora

1. Beran L., Záda, V., Petr, T., Břoušek, J. Vyvažovací systém robotického ramene manipulátoru, 2020. PV2018-681. Uděleno 30.04.2020. Zapsáno 10.06.2020.