

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Optimalizovaný návrh trakčního pohonu elektrického
silničního vozidla**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Michal MOŠNA
Osobní číslo:	E17N0082P
Studijní program:	N2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor:	Dopravní elektroinženýrství a autoelektronika
Téma práce:	Optimalizovaný návrh trakčního pohonu elektrického silničního vozidla
Zadávací katedra:	Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Zásady pro vypracování

V průběhu tvorby diplomové práce by student měl postupovat v následujících etapách:

1. Zvolit typ a vhodné trakční charakteristiky silničního vozidla.
2. Definovat komponenty trakčního pohonu vozidla – trakční baterii, trakční střídač, trakční motor a převodku, ochranné a spínací prvky.
3. Navrhnout trakční střídač pro jedno konkrétní zvolené řešení, navrhnout algoritmus řízení pohonu a nabíječe baterie pro zvolené řešení.
4. Sestavit simulační model kompletního trakčního pohonu.
5. Simulační ověření navržených modelů.

Shrnout závěry, posoudit navržené řešení, příp. navrhnout vylepšení.

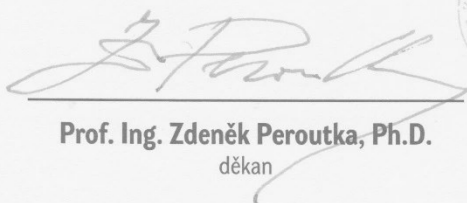
Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

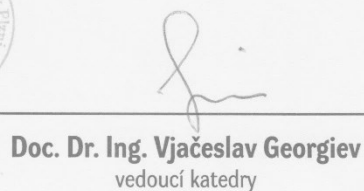
VONDRÁŠEK, F.: Výkonová elektronika – svazek III. Skripta ZČU, 2003.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Michalík, Ph.D.**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 4. října 2019

Dodatek k zadání Diplomové práce Fakulty elektrotechnické v akademickém roce 2019/2020

V návaznosti na mimořádné opatření Ministerstva zdravotnictví České republiky vydané v souvislosti s onemocněním COVID-19, týkajícího se mimo jiné zákazu osobní přítomnosti studentů v prostorách vysoké školy, která zahrnuje veškerou výuku (prováděnou např. formou přednášek, seminářů nebo konzultací), tak konání zkoušek pro studenty bakalářského a navazujícího magisterského studia, vedoucí Diplomové práce, především s ohledem na nutnost využití infrastruktury FEL při vypracování kvalifikační práce v období mimořádného opatření a v plné míře s přihlédnutím k realizovatelnosti práce po dobu trvání mimořádného opatření, upravuje body zadání práce takto:

3. Navrhnout trakční střídač pro jedno konkrétní zvolené řešení, navrhnout algoritmus řízení pohonu a nabíječe baterie pro zvolené řešení.

na

Navrhnout topologii trakčního střídače pro jedno konkrétní zvolené řešení, navrhnout algoritmus řízení pohonu.

V Plzni dne 22. 5. 2020

Beru na vědomí a souhlasím.

V Plzni dne 22. 5. 2020



Vedoucí práce: Ing. Jan Michalík, Ph.D.



Student: Bc. Michal Mošna, E17N0082P



prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.

děkan Fakulty elektrotechnické
Západočeské univerzity v Plzni

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá návrhem trakčního pohonu elektromobilu. V první teoretické části je probráno základní rozdělení elektrických silničních vozidel. Následuje informace ohledně nabíjecích procesů CHAdeMO. V další části jsou podrobeny popisu trakčního pohonu čtyři sériově vyráběné BEV vozidla. Další kapitoly popisují trakční charakteristiku a její omezení a topologie trakčních střídačů využívaných v dnešních vozidlech. V druhé, praktické, části je již řešen konkrétní simulační trakční pohon a s tím související problematika, tedy pohybové rovnice vozidla, zatěžovací odpory během jízdy a vektorové řízení pohonu s PMSM. Jsou popsány vztahy vedoucí k výsledkům simulace jízdy vozidla na konkrétních tratích. S tím souvisí i vyhodnocení spotřeby elektromobilu na těchto tratích a jejich porovnání. Součástí práce je i hrubý návrh trakční baterie, včetně její hmotnosti a rozměrů. Ve třetí kapitole jsou zobrazeny výsledky simulace a porovnání při změně vstupních hodnot. Závěr práce obsahuje hodnocení zpracované simulace a nastiňuje, jakým směrem by se práce mohla dále rozvíjet.

Klíčová slova

Elektromobil, BEV, trakční pohon, trakční baterie, trakční střídač, PMSM, vektorové řízení, CHAdeMo, trakční charakteristika, Parkova transformace, Clarkova transformace, pohybové rovnice, jízdní odpory, traťové odpory, simulace pohonu PMSM.

Abstract

The presented diploma thesis deals with the design of an electric vehicle traction drive. The first theoretical part discusses the basic division of electric road vehicles. This part is followed by information about CHAdeMO charging processes. In the next part, four series-produced BEV vehicles are described on the traction drive. The next chapters describe the traction characteristics and its limitations and the topology of the traction inverters used in today's vehicles. In the second, practical part, a specific traction drive and related issues are solved, ie vehicle equations of motion, load resistances while driving and the most comprehensive chapter - vector drive control with PMSM, where the relationships leading to the results of vehicle simulation on specific lines are described. Related to this is the evaluation of electric car consumption on these lines and their comparison. Part of the work is also a rough design of the traction battery, including its weight and dimensions. The third chapter displays the results of the simulation and comparison when changing the input values. The conclusion of the work contains an evaluation of the simulation and outlines in which direction the work could be further developed.

Key words

Electric vehicle, BEV, traction drive, traction battery, traction inverter, PMSM, vector control, CHAdeMO, traction characteristic, Park transformation, Clark transformation, equations of motion, driving resistances, road resistances, simulation of PMSM drive

Prohlášení

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

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 18.6.2020

Bc. Michal Mošna

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval externímu vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Cejnarovi, Ph.D. z firmy Eaton elektrotechnika s.r.o. za profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce a dále vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Michalíkovi, Ph.D. za cenné rady při tvorbě a zpracování této práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	11
MOTIVACE	12
1 SILNIČNÍ ELEKTRICKÁ VOZIDLA A JEJICH HLAVNÍ KOMPONENTY	13
1.1 ROZDĚLENÍ SILNIČNÍCH VOZIDEL EV (BEV, HEV, MILDHEV) DO 3.5 T	13
1.2 NABÍJECÍ STANDARDY CHADEMO	14
1.3 ANALÝZA SOUČASNÝCH ŘEŠENÍ VOZIDEL BEV	15
1.3.1 <i>Tesla Model S</i>	15
1.3.2 <i>BMW i3</i>	19
1.3.3 <i>Nissan Leaf</i>	22
1.3.4 <i>Volkswagen e-Golf</i>	25
1.3.5 <i>Porovnání BEV vozidel</i>	27
1.4 TRAKČNÍ CHARAKTERISTIKA ELEKTRICKÉHO VOZIDLA	27
1.5 TRAKČNÍ STRÍDAČ	28
1.6 PŘEVODOVKA.....	30
1.7 OCHRANNÉ PRVKY	30
2 SIMULAČNÍ MODEL	32
2.1 POHYBOVÉ ROVNICE	32
2.2 JÍZDNÍ A TRÁŤOVÉ ODPORY	33
2.3 NÁVRH TRAKČNÍ BATERIE	34
2.4 CLARKOVA TRANSFORMACE	36
2.5 PARKOVA TRANSFORMACE.....	36
2.6 OBVOD TRAKČNÍ BATERIE	37
2.7 ŘÍZENÍ STRÍDAČE.....	38
2.8 MATEMATICKÝ MODEL PMSM	39
2.9 VÝPOČET MOMENTU PMSM A TAŽNÉ SÍLY	39
2.10 OMEZENÍ ADHEZÍ	40
2.11 VEKTOROVÉ ŘÍZENÍ POHONU S PMSM.....	41
2.11.1 <i>Zadání vstupních proudů systému (d, q)</i>	42
2.12 VÝPOČET POŽADOVANÝCH SLOŽEK NAPĚTÍ V SOUŘADNÉM SYSTÉMU (D, Q).....	43
3 VÝSLEDKY SIMULACÍ	44
3.1 ODEZVA SYSTÉMU NA SKOKOVOU ZMĚNU RYCHLOSTI.....	44
3.2 ROZJEZD VOZIDLA Z 0 NA 100 KM/H.....	45
3.3 SPOTŘEBA PŘI KONSTANTNÍ RYCHLOSTI.....	47
3.4 SIMULACE JÍZDY PO UVAŽOVANÉ TRATI.....	47
4 ZÁVĚR	51
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	53
PŘÍLOHA 1	59
PŘÍLOHA 2	60

Seznam symbolů a zkratk

a	zrychlení [m/s ²]
a, b, c	třífázový souřadný systém
d, q	rotující souřadný systém (d, q)
C	kapacita kondenzátoru [F]
F	síla [N]
F_a	akcelerační síla [N]
F_o	síla od jízdních odporů [N]
F_s	síla od traťových odporů [N]
F_t	tažná síla [N]
F_{t-max}	maximální tažná síla [N]
g	gravitační zrychlení [m/s ²]
i_c	proud kondenzátoru [A]
i_{cc}	součet složek proudů tekoucí skrz hodní větve střídače [A]
i_{bat}	proud baterie [A]
i_{sa}	proud třífázového souřadného systému fáze A [A]
i_{sb}	proud třífázového souřadného systému fáze B [A]
i_{sc}	proud třífázového souřadného systému fáze C [A]
i_{sd}, i_{sd}^*	proud složky d souřadného systému (d, q) – skutečný, požadovaný [A]
i_{sq}, i_{sq}^*	proud složky q souřadného systému (d, q) – skutečný, požadovaný [A]
i_{sd-sat}	saturovaný proud složky d souřadného systému (d, q) [A]
i_{sq-sat}	saturovaný proud složky q souřadného systému (d, q) [A]
i_{sx}	proud složky x stacionárního souřadného systému statoru [A]
i_{sy}	proud složky y stacionárního souřadného systému statoru [A]
L_{bat}	indukčnost baterie [H]
L_d	indukčnost složky d v systému (d, q) [H]
L_q	indukčnost složky q v systému (d, q) [H]
m	hmotnost [kg]
M_{mech}	mechanický moment na hřídeli [Nm]
M_{PMSM}	moment synchronního stroje s permanentními magnety [Nm]
NN.....	nízké napětí
p_0	polynom jízdního odporu [‰]

pp	počet pólpárů [-]
P_{bat}	výkon baterie [W]
P_{ps}	příkon pomocné spotřeby [W]
PFC.....	power factor corrector
PMSM.....	synchronní motor s permanentními magnety
R_{bat}	odpor baterie [Ω]
r_k	poloměr kola [m]
R_s	odpor statoru [Ω]
s, s_0	rychlost, počáteční podmínka rychlosti v čase 0 [m/s]
$s^{\circ}/_{\circ}$	sklon trati [% \circ]
u_c	napětí na kondenzátoru [V]
u_{sd}, u_{sd}^*	napětí složky d v systému (d, q) – skutečné, požadované [V]
u_{sq}, u_{sq}^*	napětí složky q v systému (d, q) – skutečné, požadované [V]
u_{bat}	napětí na baterii [V]
v, v_0	rychlost, počáteční podmínka rychlosti v čase 0 [m/s]
x, y.....	stacionární souřadný systém statoru
μ	koeficient adheze [-] nebo [% \circ]
ε_v	odchylka rychlosti [-]
Φ_{PM}	magnetický tok permanentní magnetů [Wb]
η_{prev}	účinnost převodového ústrojí [-]
ω	elektrická úhlová rychlost [1/s]
ω_m	úhlová rychlost motoru [1/s]
ϑ	úhel natočení souřadného systému (d, q) vůči (x, y) [-]
ϑ_{RH}	součinitel rotačních hmot [-]

Úvod

Práce je rozdělena do čtyř hlavních kapitol.

První kapitola je teoretická. Popisuje vybranou problematiku silničních trakčních vozidel a vysvětluje možná řešení těchto problémů. První podkapitola obecně zmiňuje rozdělení elektrických silničních vozidel od těch méně elektrifikovaných MildHEV až po ty nejvíce závislé na elektrické energii – BEV, kterými se tato práce zabývá. V další podkapitole práce popisuje základní přehled nabíjecích procesů dle standardu CHAdeMO, kdy čtenáři dává informace o možnostech dobíjení elektrovozidel. V nejobsáhlejší části první kapitoly je popsán přehled řešení trakčních pohonů čtyř často kupovaných elektromobilů – Tesly Model S, BMW i3, Nissanu Leaf a VW e-Golf. Tato část je značně limitována informacemi, které se na veřejnosti objevují vzhledem k okolnostem, že elektromobilita je stále ještě poměrně nový obor a výrobci se snaží držet svoje know-how před konkurencí. V závěru této podkapitoly se nachází přehledné srovnání těchto vozidel. Další částí první kapitoly je rozbor trakční charakteristiky vozidla, kdy je obecně znázorněno, v jaké části a čím je nebo může být charakteristika omezená. V poslední části této kapitoly jsou popsány nejčastěji dnes používané topologie střídačů u silničních vozidel i s jejich popisem funkcí, požadavky a výhodami.

Druhá část se již zabývá praktickým řešením této problematiky. V úvodu je vybrána Mazda 6 jako vozidlo, které proběhne procesem elektrifikace, a pro které se uvažují hodnoty v simulaci. První podkapitola popisuje pohybové rovnice vedoucí od tažné síly vozidla přes zrychlení, rychlost až k ujeté dráze. Další část popisuje zatěžovací síly, které při jízdě ovlivňují tažnou sílu vozidla – jízdní, vztahující se ke konkrétnímu vozidlu, a traťové, kde je dominantní složkou sklonový profil trati, který v případě klesání má stejný směr jako tažná síla. V další podkapitole je popsána systematika návrhu trakční baterie z článků 18650, včetně jejího chlazení a konstrukčně znázorněna možná varianta řešení modulů. Další části popisují vektorové řízení, transformace mezi jednotlivými souřadnými systémy – Parkovu a Clarkovu. Je zde uvažována a znázorněna reálná trakční baterie se svými ztráty, které snižují účinnost celého systému.

Ve třetí části práce je poté schéma trakčního pohonu aplikováno na reálnou trať s reálným rychlostním profilem a je sledována spotřeba vozidla na této uvažované trati při změně vstupních veličin jako je hmotnost či převodový poměr.

V závěrečné kapitole probíhá shrnutí poznatků ze získaných výsledků. Práce navrhuje možné zlepšení nedostatků zhotovené simulace. Poslední část obsahuje zamyšlení nad

dalším doplněním simulace jednotlivých částí trakčního pohonu. To platí i o popisu trati, kdy lze přidat dále například i odpory z průjezdu obloukem aj.

Motivace

Tato práce vznikla jako diplomová práce na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity. Jejím hlavním cílem je zelektrifikovat silniční vozidlo a přinést tak principiální postup simulačního návrhu jeho pohonu i s řízením pomocí softwaru Matlab/Simulink. Výstupem tohoto programu by měl být pohyb vozidla na základě skutečné tratě, který by měl odpovídat reálným předpokladům dnešních elektromobilů, jak po mechanické, tak elektrické stránce.

1 Silniční elektrická vozidla a jejich hlavní komponenty

1.1 Rozdělení silničních vozidel EV (BEV, HEV, MildHEV) do 3.5 t

Elektrická silniční vozidla se z hlediska pohonu dělí na několik typů. Pro přehlednost bych rád uvedl základní zkratky objevující se v této problematice.

Samotná zkratka EV znamená z anglického „electric vehicle“ takové vozidlo, které ke svému pohonu využívá elektrickou energii. Z této zkratky plynou další typy vozidel, které k pohybu využívají buď samostatně elektromobil nebo kombinaci elektromotoru a zároveň motoru na jiný druh paliva. Takovým použitím je možné zlepšit účinnost, tedy i spotřebu a provozovat vozidlo za daných podmínek levněji.

Zkratka BEV znamenající „battery electric vehicle“ značí vozidlo, které je poháněno elektromobilem a energii uschovává v bateriových člancích. Narozdíl od následujících typů EV vozidel nemá ve výbavě jiný motor než právě ten elektrický. Baterie se dobíjí z externích (pro DC systémy) nebo interních (pro AC systémy) nabíječů dělicích se podle rychlosti dobíjení (nabíjecí standardy elektromobilů jsou popsány v další části této práce). Bližším podrobnostem o vozidlech BEV se zabývá tato práce.

HEV označuje „hybrid electric vehicle“, což jsou hybridní vozidla kombinující spalovací motor s elektromotorem. Standardně je elektromotor používán pro rozjezd a nižší rychlosti a spalovací motor je využit ve vyšších rychlostech. Je tomu tak z toho důvodu, že elektromotor dokáže již při nízkých otáčkách dodávat vysoký akcelerační moment oproti spalovacímu motoru, tedy i tažnou sílu. Baterie má u HEV vozidel oproti BEV mnohem nižší kapacitu, takže dokáže poskytovat energii pouze pro kratší vzdálenosti. Dobíjení baterie probíhá také během brzdění, tedy při reverzním módu, jako je u EV zvykem.

Vylepšenou verzí HEV jsou vozidla PHEV, tedy „plug-in hybrid electric vehicle“, které jsou typově obdobné jako HEV, avšak existuje možnost navíc externího nabíjení baterie, která má oproti HEV vyšší kapacitu a je umožněn delší dojezd čistě na elektrický pohon.

Posledním typem, kterým zde zmíním, je tzv. „MildHEV“ nebo „MHEV“. Tato verze pohonu kombinuje spalovací motor a elektromotor, který pracuje například v okamžicích, kdy jede vozidlo stálou rychlostí zadání jízdy nebo brzdy nebo při dobrždění – stejně jako HEV, kdy taktéž dobíjí svou baterii rekuperací. Touto technologií by měla být vybavena většina automobilů v blízké budoucnosti. [1], [2]

1.2 Nabíjecí standardy CHAdeMO

CHAdeMO je obchodní název pro rychlé nabíjení BEV do 62.5 kW při 500 V a 125 A stejnosměrného proudu prostřednictvím speciálního konektoru. Vylepšená verze CHAdeMO 2.0 umožňuje dobíjení až 400 kW při 1000 V a stejnosměrných 400 A. Zkratka pochází z „charge de move“ nebo charge for moving“. V roce se CHAdeMo stalo celosvětovým standardem pro dobíjení elektromobilů. [3], [4]

Většina elektromobilů má pro nabíjení z AC systémů zabudovaný obvod s řízeným usměrňovačem s funkcí PFC, který transformuje střídavé napětí z distribuční sítě NN na stejnosměrné napětí, kterým je dobíjena baterie elektromobilu. PFC je proces, kdy dochází ke kompenzaci účinníku $\cos\varphi$, z čehož plyne, že odebíraný výkon nezpůsobuje v síti takové ztráty jako by tomu bylo bez této korekce. Pro ochranu před nebezpečným dotykovým napětím, pro všechny AC sítě musí tento zdroj splňovat také podmínku galvanického oddělení napájecí sítě s obvody vozidla, pro DC sítě není nutností (DC zdroje se již předpokládají odděleny). Konektory pro napájení baterií elektromobilů mají obdobné parametry, ovšem v některých částech světa se mírně liší. Například v USA a Japonsku je to 240 V a 30 A. V Kanadě pak 240 V a 40 A. V Evropě jsou konektory na 230 V a 15 A nebo třífázových 400 V a 32 A, stejně tak i v Austrálii.

Pro rychlejší nabíjení, tzv. „DC fast charge“ (DCFC) existují nabíjecí stanice, které jsou schopny dobíjet elektromobil ze sítí vysokého napětí.

Kromě přenosu výkonu dochází při spojení konektoru s rychlonabíjecí DC stanicí ještě k přenosu datového pomocí sběrnice CAN. To zajišťuje především bezpečnost mezi stanicí a vozidlem, jelikož systém vozidla hlásí stanici aktuální napětí, stav rozvážení baterie a teplotu baterie. Dále taktéž stejnosměrné napětí a maximální proud, který může nabíjecí stanice dodávat vozidlu. [6]

Pro představu, CHAdeMO jako nejrozšířenější standard nabíjení, má po světě již přes 30 tisíc stanic. Největší podíl, téměř polovina z nich se nachází na evropském kontinentě, v Japonsku jich je přes 7 tisíc a v Severní Americe přes 4 tisíce. V České republice je v současné době 50 stanic (k dubnu 2020). [7]

Do budoucna plánuje CHAdeMO spustit stanice s dobíjecím výkonem 900 kW – 1.5 kV a 600 A.

1.3 Analýza současných řešení vozidel BEV

Problémem této části práce je to, že výrobci si své údaje o elektromobilech velmi střeží. Z tohoto důvodu je problematické vyhledat detailní technické specifikace těchto vozidel.

1.3.1 Tesla Model S

Model S začala Tesla vyrábět již v roce 2012. První model disponoval výkonem motoru 285 kW a kapacitou baterie 40 kWh. V průběhu let se tento model nepřetržitě vyvíjel a posouval vpřed. Výsledkem práce vznikl až současný model se 100 kWh baterií a výkonem 568 kW již při aplikaci dvou motorů namísto jednoho na začátku produkce Modelu S.

Pro detailnější popis byl zvolen typ P85D, který se na trh dostal koncem roku 2014. Číslovka 85 reprezentuje kapacitu baterie v kWh. Písmeno D na konci poukazuje na to, že má tento typ pohon všech kol, tedy anglicky AWD – All-Wheel-Drive, tedy náhon na obě dvě nápravy. Zadní pohonná jednotka sestávající se ze dvou motorů je oproti předešlému typu nahrazena menší, čímž je docíleno ušetření prostoru a hmotnosti. Třetí motor je umístěn mezi předními koly, jak je naznačeno na obr. 1.



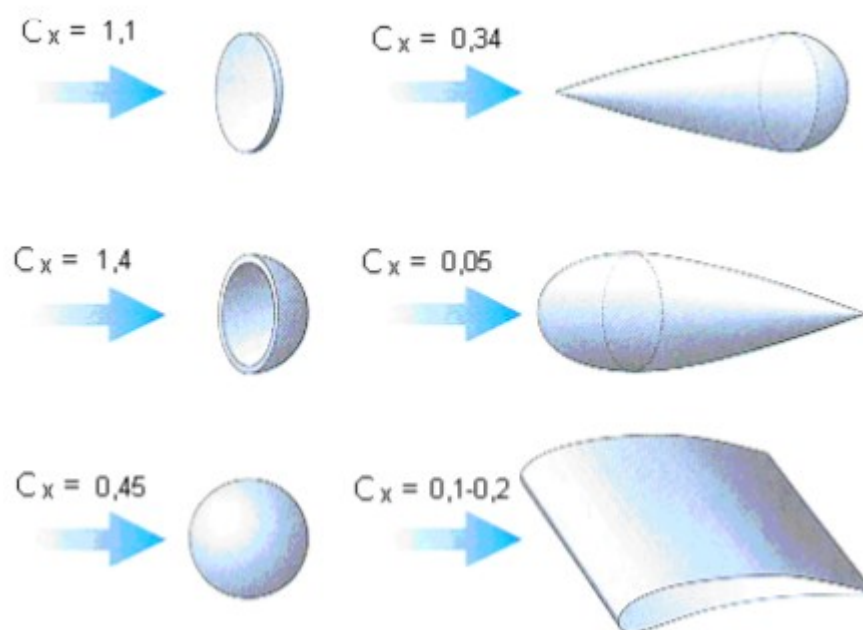
Obr. 1: Umístění motorů na vozidle Tesla Model S P85D (převzato z [8])

Ve srovnání s dřívějšími verzemi zůstává výkon zadní jednotky stejný, ovšem přední motor zvyšuje výkon tohoto typu oproti dřívějším typům s pouhým zadním pohonem o přibližných 50 %. V důsledku to znamená zlepšení zrychlení i maximální rychlosti vozidla. Konkrétní hodnoty jsou zaznamenány v tab. 1 v závěru této kapitoly. Převodovka má jeden převodový stupeň v poměru 9.73:1. [8]

V roce 2012 začala Tesla vyrábět 60 kWh baterii s dojezdem 335 km. 85 kWh baterie, kterou disponuje právě typ P85D, má dojezd již 407 km, respektive 480 km, dle typu testu,

který byl při měření použit.

Zde je zajímavé uvést srovnání s konkurenčním Nissanem Leaf, který bude taktéž popsán v další části práce. Baterie Tesly obsahuje dvojnásobnou hustotu energie, než je tomu u asijského výrobce, ovšem dojezd Tesly je v porovnání více než dvojnásobný. Důvodem je to, že Model S má nižší odporový koeficient (nejnižší mezi elektromobily – 0,24), nižší hmotnost, vyšší účinnost převodovky i motoru a lepší hodnotu valivého odporu. Odporový koeficient vyjadřuje závislost odporu prostředí na tvaru vozidla. [9], [10]



Obr. 2: Hodnoty odporového koeficientu C_x v závislosti na tvaru (převzato z [10])

85 kWh baterie váží dohromady 540 kg. Skládá se ze 7104 článků lithium-iontové baterie uložené v 16 modulech spojených do série (obr. 3). 14 z nich je ve spodní rovinné části a 2 ve přední části. V každém modulu je pak 6 skupin, z nichž každá obsahuje 74 článků, které jsou spojeny paralelně. Těchto 6 skupin je spolu vzájemně v daném modulu propojeno sériově. Jsou zde použity modifikované články firmy Panasonic, které obsahují nikl-kobaltovo-hlíníkovou katodu. Tento článek je značený „18650“, což udává průměr článku 18 mm a výšku 65 mm. Kapacita tohoto článku se pohybuje v rozmezí od 1500 do 3600 mAh. Tento typ se taktéž používá v bateriích některých notebooků či v elektronických cigaretách. Jeho hustota se pohybuje zhruba kolem 270 Wh/kg. V pozdější době Tesla zvýšila účinnost článků, nyní již s označením 21700 (průměr 21 mm, výška 70 mm). Baterie měla pak výslednou účinnost o 10 až 15 % vyšší než u předešlých článků 18650. To zapříčinilo snížení cen u následujících elektromobilů této značky jako například Model 3

sedan. [12], [13], [14]

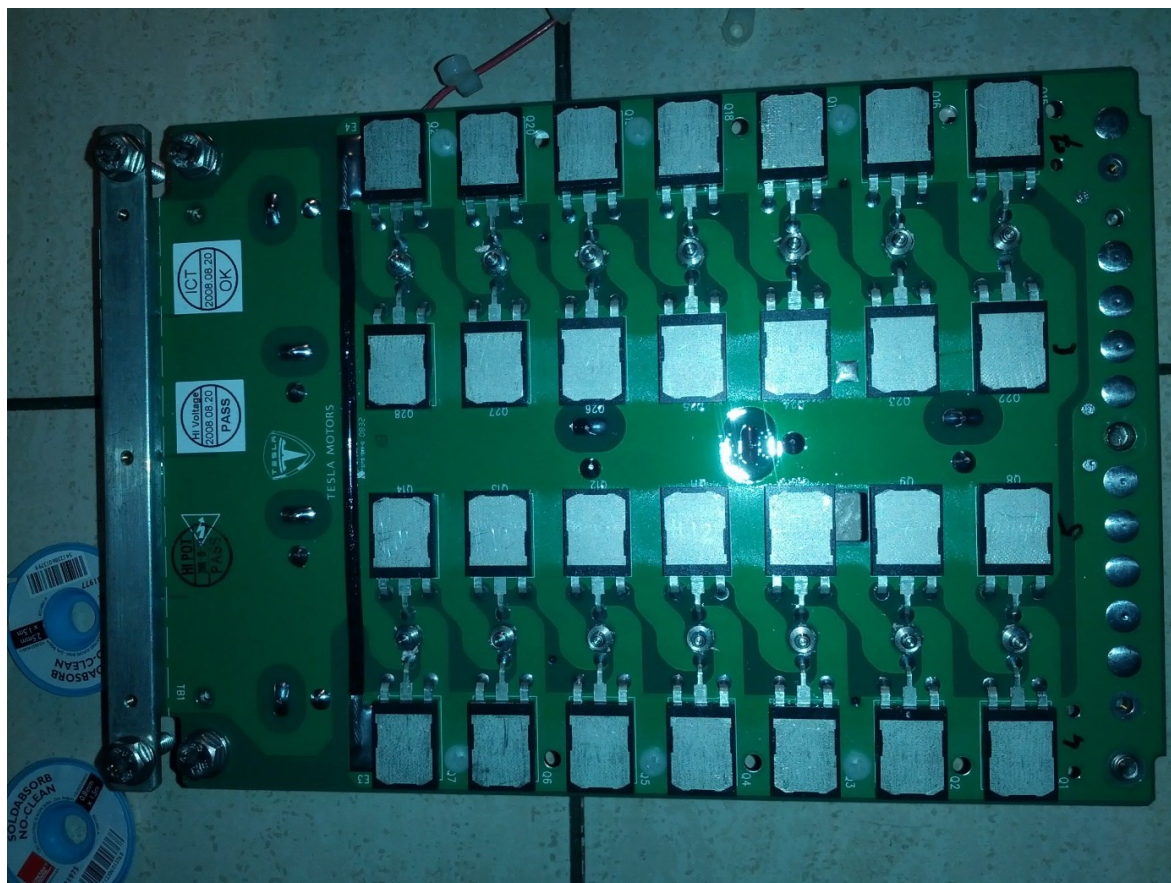


Obr. 3: Baterie vozidla Tesla Model S (převzato z [11])

Jak již bylo uvedeno, baterie pokrývá téměř celý spodek elektromobilu, konkrétně je to prostor mezi nápravami. Samozřejmě je to nejtěžší část vozidla, a proto se těžiště vozu nachází ve výšce pouhých 46 cm. Z těchto faktorů plynou následující výhody – boční zrychlení až 0.9 g, vysoká ochrana proti převrácení, zvýšení tuhosti prostoru pro cestující a tím pádem vyšší pasivní bezpečnost vozidla, rychlá výměna baterie za účelem údržby [15].

V souvislosti s bateriemi je třeba zmínit i nabíjecí cykly. Nabíjecí port se nachází v levé zadní části vozidla. Tesla po celém světě vyvinula síť rychlých nabíjecích stanic zvaných „superchargers“, která umožňují rychlé a snadné dobití vozidla. Tato síť poskytuje dobíjení s napájením 480 V. Za 20 minut se baterie nabije na 50 %, za 40 minut na 80 % a za 75 minut na plné nabití baterie. Tesla umožňuje a také doporučuje primární dobíjení v domácnosti. To z důvodu lepší životnosti baterie, která díky malému nabíjecímu výkonu není tak tepelně namáhána. Baterie tak výrazně neztrácí na své kapacitě jako je tomu u rychlonabíjecích stanic. „Domácí“ nabíjení je podporováno pomocí konektorů, které umožňují nabíjení až při 40 A. Tesla také vydala redukci pro nabíjení ze stanic podléhajícím standardu CHAdeMO.

Z cenových důvodů se využívají dvouúrovňové trojfázové střídače napětového typu (VSI) s SiC MOSFET tranzistory. Tato volba zajišťuje kvalitní odvod tepla a také snadné zapojení. [16]



Obr. 4: Větev střídače vozidla Tesla Model S (převzato z [16])

Tab. 1: Shrnutí hlavních parametrů vozidla Tesla Model S P85D

Dojezd EPA	407 km
Dojezd NEDC	480 km
Max. výkon motoru	568 kW
Hmotnost	2 239 kg
Kapacita baterie	85 kWh
Max. točivý moment	931 Nm
Zrychlení 0-100 km/h	3.3 s
Max. rychlost	249 km/h
Převodovka	1 rychlostní stupeň
Převodový poměr	9.73:1
Doba nabíjení do 50 %	20 min
Doba nabíjení do 80 %	40 min
Doba nabíjení do 100 %	75 min
Cenové rozpětí (2018)	87000-130000 \$

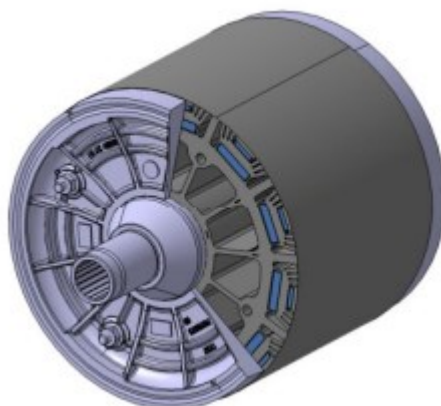
Tab. 2: Porovnání hlavních parametrů jednotlivých typů vozidel Tesla Model S

Tesla Model S	RWD	P85D	P100D
Dojezd EPA	224 km	407 km	507 km
Dojezd NEDC	-	480 km	613 km
Max. výkon motoru	285 kW	568 kW	568 kW
Kapacita baterie	40 kWh	85 kWh	100 kWh
Max. točivý moment	430 Nm	931 Nm	931 Nm
Zrychlení 0-100 km/h	-	3.3 s	2.4 s
Max. rychlost	180 km/h	249 km/h	249 km/h
Datum zahájení výroby	2012	listopad 2014	listopad 2017

1.3.2 BMW i3

BMW svůj model i3 vyrábí ve dvou variantách – hybridní i elektrické. Tato práce se bude zabývat pouze elektrickou verzí. Mezi roky 2014 a 2016 vyrábělo BMW svůj model BEV s 60 Ah (22,6 kWh) baterií, v roce 2017 se již začal model vyrábět s baterií o kapacitě 94 Ah (33 kWh). Koncem roku 2018 BMW vylepšilo kapacitu své baterie již na 120 Ah (42,2 kWh).

BMW ve svém vozidle i3 používá narozdíl od Tesly synchronní motor, konkrétně hybridní synchronní motor, což je modifikace synchronního motoru s permanentními magnety. Je to taktéž první motor, který si automobilka BMW sama navrhla a vyrobila. Tento motor zajišťuje vysoký reluktanční moment a poskytuje tak vysoký výkon v horním rozsahu otáček. Další výhodou je vysoká účinnost v širokém pracovním prostoru. Konstrukce motoru je znázorněna na obr. 5. Obsahuje dvouvrstvé uspořádání magnetů, což způsobuje zlepšení tvaru sinusového indukovaného napětí. Nachází se na něm 6 pólpárů, čímž se dosáhne snížení hmotnosti jha. Tento motor má maximální moment 250 Nm, který je konstantní do 4800 otáček za minutu (což odpovídá frekvenci 80 Hz, z čehož vychází úhlová rychlost motoru 160π rad/s a z toho maximální výkon 125 kW), rozsah napětí 250 až 400 V a maximální proud fází 400 A. Celková hmotnost motoru se pohybuje kolem 65 kg a je chlazen kapalinou. Na vozidle BMW je uložen na zadní nápravě. Narozdíl od Tesly má tak pouze jeden motor. Ten dosahuje výkonu 125 kW. [17] [18]



Obr. 5: Konstrukce synchronního motoru vozidla BMW i3 (převzato z [17])

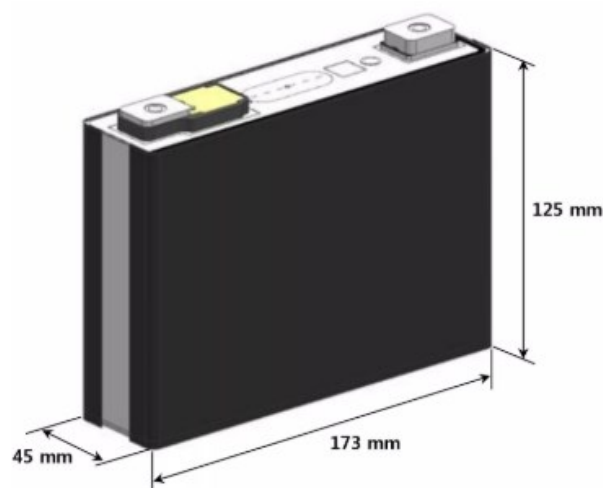
Co se týče převodovky, je na tom BMW i3 úplně stejně, taktéž zde najdeme pouze jeden rychlostní stupeň, jako u většiny elektromobilů.

Kapacita baterie se u německé značky vyvíjela od 60 Ah, přes 94 Ah, až k současně zveřejněné hodnotě 120 Ah. S těmito hodnotami vychází dojezd z původních 130 km z roku 2014 na aktuálních 246 km dle testů EPA. Dle evropského NEDC dosahuje i3 dojezd 260 km. BMW používá ve svých vozech lithium-iontové baterie. Skládají se z osmi modulů, přičemž každý z nich obsahuje 12 článků. Toto rozdělení je výhodné v tom, že při selhání jednoho modulu funguje vozidlo stále na ty zbývající. Všechny články jsou zapojeny sériově, žádný paralelně. Bateriový komplex vyplňuje typicky opět podlahu vozidla mezi nápravami. [19]

V případě verze baterie o 94 Ah, obsahuje články s pojmenováním NCM 111 (někdy taktéž NCM 333) – obr. 7. Tyto články vyvinula firma Samsung. Označení NCM 111 indikuje, že katoda je ze třetiny tvořena niklem, ze třetiny kobaltem a ze zbývajících třetiny manganem. Hustota energie těchto článků dosahuje 174 Wh/kg, což je o téměř 100 Wh/kg nižší hodnota než u Tesly. Po 4600 nabití při teplotě 25 °C si články drží 80 % své počáteční kapacity. To je teplota, při které baterie pracuje nejlépe a má nejvyšší životnost [20].



Obr. 6: Baterie vozidla BMW i3 (převzato z [21])



Obr. 7: Článek baterie NCM 111 (převzato z [22])

Navýšením kapacity na 120 Ah zůstala velikost, tedy i hmotnost stejná. To odpovídá kapacitě v kWh reálné hodnotě 42.62 (96 článků \times 120 Ah \times 3.7 V). Tato verze má kombinovanou spotřebu 13.1 kWh na 100 km. Akumulátor již nevyužívá stejné články jako předchozí verze, ale nové vylepšené NCM 622. Katoda obsahuje 60 % niklu, 20 % kobaltu a 20 % manganu. Anoda se skládá z většiny z grafitu kombinovaným křemíkem pro zvýšení hustoty energie. [23], [24], [25]

Další směřování BMW ve vývoji baterií se upíná k typu NCM 811. Ty by měly mít stejnou energetickou hustotu, avšak měly by snižovat výrobní náklady, hlavně z důvodu snížení použití drahého kobaltu [25].

BMW i3 umožňuje jízdu při třech možných režimech – Comfort, Eco Pro a Eco Pro+ mód. Comfort mód je základní režim, přičemž Eco Pro navyšuje dojezd zhruba o 12 % docílený regulací výkonu při rozjezdu. Eco Pro+ dosahuje maximálního možného dojezdu zvýšeného o 24 % oproti Comfort módu, což je zajištěno snížením maximální rychlosti na 90 km/h a přepnutím elektronických zařízení jako je topení nebo klimatizace do módu šetřícího energii. [26]

Dobíjení i3 je možné několika způsoby. První možností je dobíjení z běžné zásuvky. Při rychlém nabíjení ze střídavé sítě s podporou až 32 A lze dosáhnout nabití z 0 % do 80 % za méně než tři hodiny. Další možností jsou veřejné stejnosměrné nabíjecí stanice, kde z nuly na 80 % kapacity lze dosáhnout za 30 min. [27]

Tab. 3: Shrnutí hlavních parametrů vozidla BMW i3

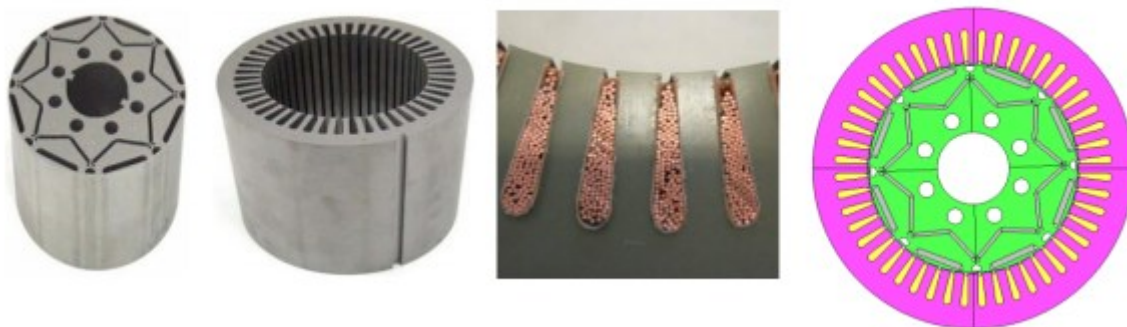
Dojezd EPA	246 km
Dojezd NEDC	260 km
Max. výkon motoru	125 kW
Hmotnost	1345 kg
Kapacita baterie	120 Ah/ 42,2 kWh
Max. točivý moment	250 Nm
Zrychlení 0-100 km/h	7.3 s
Max. rychlost	150 km/h
Převodovka	1 rychlostní stupeň
Převodový poměr	9.665:1
Doba nabíjení do 80 % (50 kW DC)	45 min
Doba nabíjení do 80 % (BMW iWallbox 11 kW, 16 A, 380 V)	3 hod 10 min
Doba nabíjení do 80 % (BMW iWallbox 3,7 kW, 16 A, 240 V)	9 hod 40 min
Doba nabíjení do 80 % (domácí zásuvka 2,4 kW, 10 A, 240 V)	15 hod
Cenové rozpětí (2018)	od 31 000 \$

1.3.3 Nissan Leaf

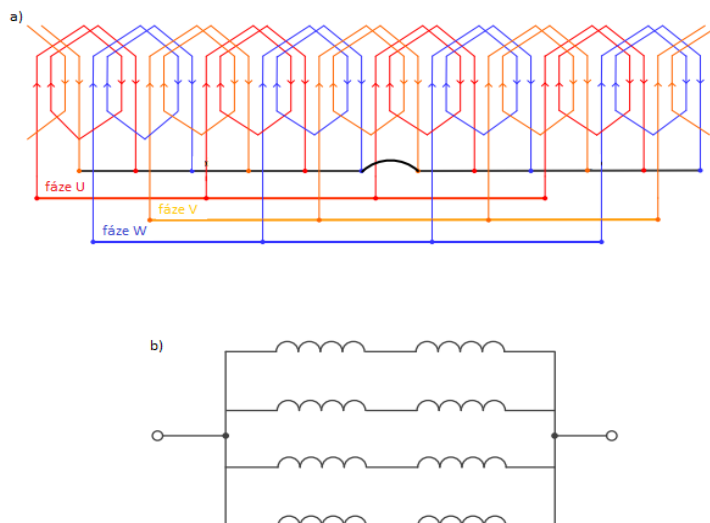
Nissan započal svou výrobu elektromobilu Leaf již v roce 2010. První verze tohoto vozidla obsahovala 80 kW motor a 24 kWh lithium-iontovou baterii, která zaručovala dojezd až 175 km. Model Leafu z roku 2011 měl odporový koeficient 0.29. O dva roky později Nissan ohlásil snížení koeficientu o setinu na hodnotu 0.28.[28]

Narozdíl od předešlých vozidel, Nissan používá u aktuálně vyráběného modelu Leaf motor uložený na přední nápravě. Tu pohání synchronní motor s permanentními magnety o výkonu 110 kW, který dodává maximální moment o velikosti 320 Nm. Ten obsahuje 4 pólpáry.

Napětí na vinutí motoru se pohybuje do hodnoty 375 V. Maximální proud, který může téct fázemi motoru je 625 A. Na obr. 8 je vidět konstrukce motoru – rotor, stator, průřez vinutí statoru a celkový řez motorem. Spojení vinutí je zobrazeno na obr. 9. Pro třífázové spojení připadá na jednu fázi 8 cívek. Dvě cívky jsou vždy spojeny v sérii a tyto dvojice jsou spojeny paralelně se zbytkem sériových spojení – to platí pro jednotlivé fáze (obr. 9b). Na obr. 9a je schematicky znázorněno vinutí motoru. [29], [30]



Obr. 8: Konstrukce motoru vozidla Nissan Leaf (převzato z [29])



Obr. 9: Konstrukce vinutí motoru vozidla Nissan Leaf (převzato z [29])

Převodový systém vozidla má stejně jako u předešlých dvou pouze jeden rychlostní stupeň, tentokrát 7.94:1 [28].

Nissan využívá ve svých vozech Leaf u verze s 24 kWh baterií lithium-iontové baterie na bázi manganu. Mangan se v nich používá jako primární materiál katody. V nejnovější verzi 40 kWh baterie již využívá podobně jako BMW materiály nikl, mangan a kobalt. Tato verze článků je oproti té původní levnější a zajišťuje větší energetickou hustotu. Na obr. 10 je fotografie baterie Leafu, verze 24 kWh, která obsahuje celkem 48 modulů, přičemž

v každém z nich se nachází 4 články. Současná vylepšená verze baterie 40 kWh má poloviční počet modulů, avšak v každém z nich je již 8 článků. To znamená, že všechny baterie obsahovaly celkem 192 článků. Jak již bylo popsáno výše, při stejných rozměrech i hmotnosti se pomocí technologického vývoje a nových příměsí článků navýšila kapacita baterie [22]. Jmenovité napětí těchto článků je 3.65 V. Jsou 261 mm dlouhé, 216 mm široké a 7.91 mm vysoké. Jeden článek váží 914 g. Jeden z těch nejdůležitějších údajů je však jeho hustota – 224 Wh/kg. To je téměř o 50 Wh/kg méně, než čím disponuje Tesla a o více než 50 Wh/kg naopak více než BMW i3. Co se týče modulů, tak jeden (pro 40 kWh variantu) váží 8.7 kg, je dlouhý 300 mm, široký 222 mm a vysoký 68 mm. Výsledná reálná kapacita se pak spočítá jako počet modulů vynásobený napětím článků a kapacitě v Ah, tedy 56.3. Pronásobením těchto údajů vznikne výsledná hodnota 39.46 kWh [23].



Obr. 10: Baterie vozidla Nissan Leaf – 24 kWh (převzato z [31])

Dojezd Leafu s variantou 40 kWh baterie vychází dle testů EPA na 241 km. Podle evropského NEDC hodnota dokonce 378 km. Vzhledem k nepřilíživým hodnotám reality se často opovrhovaný NEDC test nahradil novým testem WLTP, dle kterého dojezd odpovídá hodnotě 285 km, což se testu EPA už přibližuje poměrně úctyhodně.

Automobil Nissan Leaf je možno dobíjet dvěma způsoby. Tím prvním je klasické dobíjení v domácnosti. Na počátku trvalo dobíjení celkové kapacity baterie více než dva dny, což je nepřijatelná hodnota pro rozvoj elektromobility. V současné době lze v domácnosti nabíjet pomocí „ChargePoint“, což je nabíječ umožňující napájení z 240 V. Za hodinu umožňuje dobít vozidlo na dojezd 40 km. Pro nabíjení typu „DC fast charging“ se baterie

nabíje na 80 % kapacity již za 30 minut. Nissan zároveň varuje, že při tomto častém nabíjení hrozí ztráta kapacity baterií zhruba o 10 % za deset let oproti běžnému dobíjení v domácnosti. [32], [33]

Tab. 4: Shrnutí hlavních parametrů vozidla Nissan Leaf [34], [35]

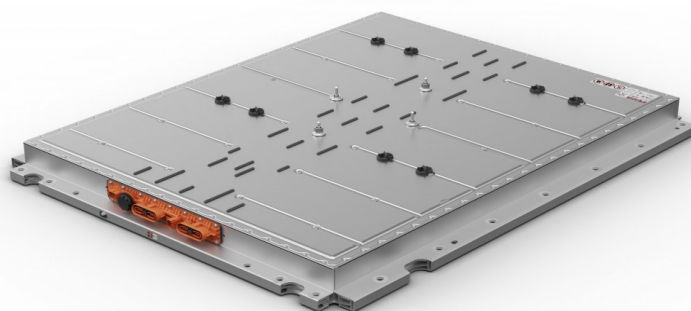
Dojezd EPA	241 km
Dojezd WLTP (náhrada za NEDC)	285 km
Max. výkon motoru	110 kW
Hmotnost	1557 kg
Kapacita baterie	40 kWh
Max. točivý moment	320 Nm
Zrychlení 0-100 km/h	7.9 s
Max. rychlost	144 km/h
Převodovka	1 rychlostní stupeň
Převodový poměr	7.94:1
Doba nabíjení z 3,6 kW nabíječe (240 V)	8 hodin
Doba nabíjení z 6,6 kW nabíječe (240 V)	4 hodiny
Cenové rozpětí (2018)	od 36 000 \$

1.3.4 Volkswagen e-Golf

Pro firmu Volkswagen byl model e-Golf první zkušeností s elektromobilními vozidly. Prvotní model byl prodáván s baterií o kapacitě 24.4 kWh a umožňoval dojezd až 190 km. V současné době VW prodává nejaktuálnější verzi s kapacitou 35.8 kWh, která zajistí delší dojezd až o 100 km, dle NEDC normy, oproti své předchozí verzi s nižší kapacitou. Maximální dosažitelná rychlost je 150 km/h. Výkon motoru je nastaven na 100 kW a točivý moment 290 Nm. Zrychlení závisí jako u předešlých automobilek na režimu, při kterém je auto provozováno. Při nejméně ekonomickém režimu se stlačí z 0 na 100 km/h pod 10 sekund, při neekonomičtějším je to až 19 sekund. Kombinovaná spotřeba dosahuje necelých 13 kWh/100 km [36], [37].

Převodovka e-Golfu je tradičně jako u většiny elektrovozidel jednostupňová. Motor je synchronní s permanentními magnety. Ten se nachází mezi předními koly vozidla. Je tedy tzv. „front-wheel drive“ - tedy s náhonem přední nápravy. [39]

VW používá ve svých vozech litium-ionové baterie, které stejně jako třeba Nissan Leaf chladí pouze vzduchem. Váha celého balení činí 344 kg. Jmenovité napětí baterie je 323 V. V balení se nachází celkem 264 článků, které společně tvoří právě onu hodnotu kapacity 35.8 kWh baterie (obr. 11).



Obr. 11: Baterie vozidla Volkswagen e-Golf (převzato z [38])

E-golf je možno nabíjet následujícími způsoby. Nejdéle trvající možnost je použití domácí zásuvky, kde při 1.2 kW jednofázovém AC nabíjení trvá 26 hodin do dobíjení elektromobilu na plnou kapacitu. Druhou možností je zakoupení tzv. Wallboxu, který umožní nabití již za 4 až 5 hodin. To je zajištěno 7.2 kW jednofázovým AC nabíjecím procesem. Třetí možností je nabití na veřejných místech, které je takřka obdobné jako druhá varianta. Poslední a zároveň nejrychlejší možností je nabíjení stejnosměrným proudem pomocí rychlonabíjecích stanic CCS, které dobíjí vozidlo trojfázovým stejnosměrným proudem o výkonu 50 kW, které trvá mezi 30 až 45 minutami na 80 % kapacitu nabití baterie [32].

Tab. 5: Shrnutí hlavních parametrů vozidla Volkswagen e-Golf

Dojezd EPA	až 200 km
Dojezd NEDC	až 300 km
Max. výkon motoru	100 kW
Hmotnost	1615 kg
Kapacita baterie	35,8 kWh
Max. točivý moment	290 Nm
Zrychlení 0-100 km/h (při normálním modu)	9.6 s
Max. rychlost	150 km/h
Převodovka	1 rychlostní stupeň
Doba nabíjení z 1,2 kW AC zásuvky	26 hodin
Doba nabíjení z 7,2 kW wallboxu	4-5 hod
Doba nabíjení do 80 % (CCS rychlonabíjecí stanice, 50 kW)	30-45 min
Cenové rozpětí (2018)	od 32 000 \$

1.3.5 Porovnání BEV vozidel

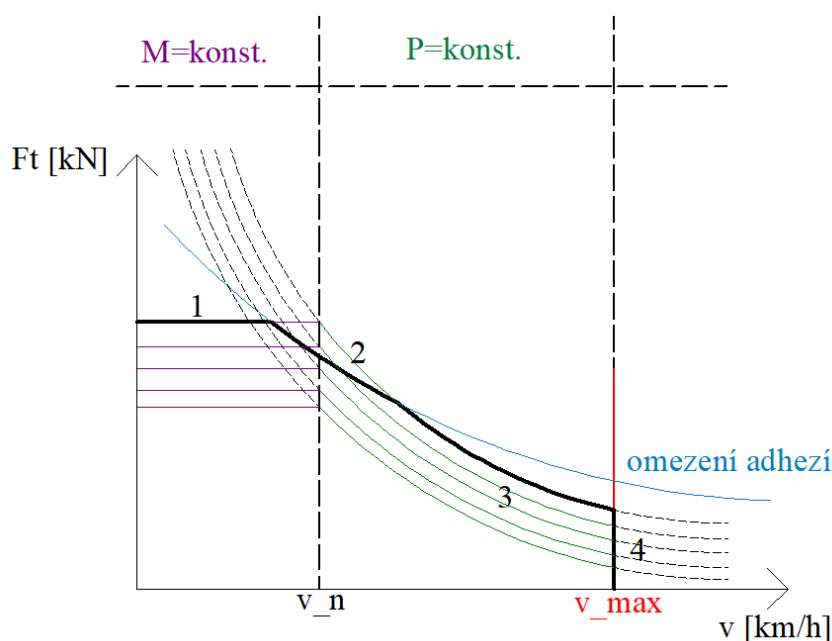
Tab. 6: Přehledné srovnání parametrů jednotlivých analyzovaných BEV vozidel

	Tesla Model S (P85D)	BMW i3 (120Ah)	Nissan Leaf (120 Ah)	VW e-Golf (35.8 kWh)
Dojezd EPA	407 km	246 km	241 km	200 km
Dojezd NEDC	480 km	260 km	285 km (WLTP)	300 km
Max. výkon motoru	568 kW	125 kW	110 kW	100 kW
Kapacita baterie	85 kWh	42,2 kWh	40 kWh	35,8 kWh
Max. točivý moment	931 Nm	250 Nm	320 Nm	290 Nm
Zrychlení 0-100 km/h	3,3 s	7,3 s	7,9 s	9,6 s
Max. rychlost	249 km/h	150 km/h	144 km/h	150 km/h
Datum zahájení výroby	listopad 2014	začátek 2018	začátek 2018	2017

Z tab. 6 lze vidět, že Tesla je v elektromobilitě v současné době na první příčce, a to co se týče všech parametrů. Model S však není Tesly nejnovějším elektromobilem – například Model 3 se pyšní ještě lepšími parametry – narozdíl od ostatních automobilek, které u ostatních typů svých vozů neoslňují nijak výrazně lepšími parametry jako je tomu u Tesly, která má před konkurencí značný náskok.

1.4 Trakční charakteristika elektrického vozidla

Trakční charakteristika je závislost tažné síly vozidla na jeho rychlosti. Obecná trakční charakteristika je vidět na následujícím obrázku 12.



Obr. 12: Trakční charakteristika elektrického vozidla

Tato charakteristika se dá rozdělit do několika oblastí, kde dochází zároveň k omezením trakční tažné síly. Důležitou informací je to, že tato charakteristika je pro každý trakční prostředek odlišná, a proto jednotlivé křivky mohou mít jiné poměrné hodnoty.

V první části grafu vyznačenou fialovou barvou zůstává moment na kole vozidla konstantní, během čehož se zvyšuje výkon. V této části je také tažná síla omezená maximálním proudem střídače. Ve druhé části grafu (zeleně) při dosažení jmenovitého bodu – tedy jmenovité rychlosti – se výkon udržuje konstantní a moment vozidla klesá. Tažná síla klesá hyperbolicky. Křivka tažné síly je ukončena maximální možnou rychlostí vozidla (červeně). Do těchto závislostí navíc zasahuje vliv adheze (modře), což je schopnost vozidla přenášet tečné síly mezi kolem a vozovkou z motoru. Je silně závislá na vnějších faktorech, mezi které patří zejména počasí. V důsledku těchto vlivů pak může při vyšší tažné síle docházet k prokluzu či smyku vozidla. V grafu jsou naznačeny křivky, které odpovídají různým převodovým poměrům vozidla. Vyšší tažná síla odpovídá vyššímu převodovému stupni.

Pro příklad je uvažována tažná síla pro nejvyšší znázorněný převodový stupeň. V oblasti značené „1“ je tažná síla omezená maximálním proudem. V oblasti „2“ se promítá do grafu vliv adheze, kterou je v této části omezena. V oblasti „3“ se tažná síla dostává pod vliv adheze a je omezena maximálním výkonem. V konečné fázi „4“ je charakteristika ukončena maximální rychlostí.

V souvislosti s trakční charakteristikou je potřeba zmínit termín střední zrychlení. To je hodnota zrychlení vozidla do jmenovitého bodu trakční charakteristiky, tedy v oblasti při maximálním momentu. Ta bývá vyšší pro sportovní auta a nižší pro městská. Taktéž jmenovitá rychlost souvisí s výkonem vozidla, kdy pro silnější vozy se jmenovitá rychlost zvyšuje, což je vyváženo většími ztrátami, a tak i menším dojezdem.

1.5 Trakční střídač

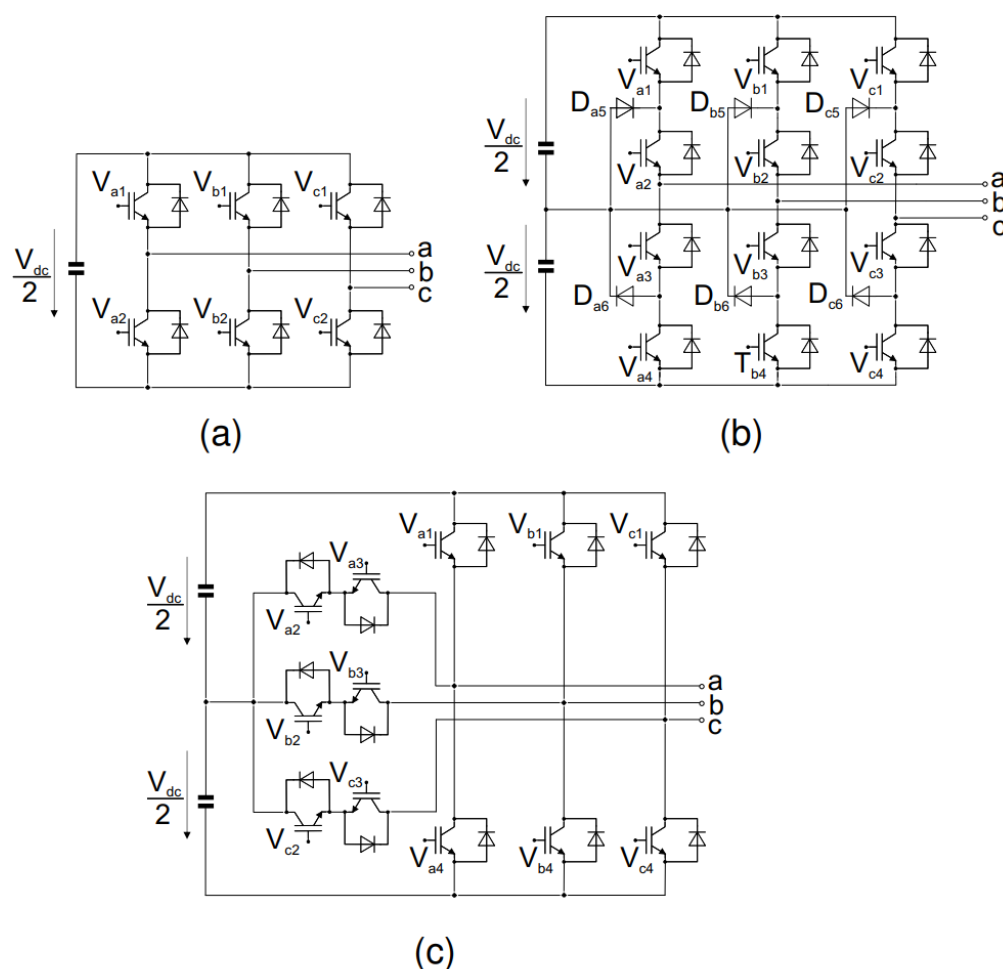
U BEV vozidel se nejčastěji objevují trakční střídače, která mají 3. úroňovou topologii. Na obr. 13 jsou typická zapojení střídačů.

Zapojení a) zobrazuje typický 2 - úroňový střídač, který nabývá mezi uzlem fáze a středem kondenzátoru (v případě, že je virtuálně rozdělen na dva sériové kondenzátory o velikosti $U_d/2$) dvou hodnot, a to $U_d/2$ kladné a záporné polarity. Tato hodnota bude značena U_{A0} . Při řízení střídače je potřeba dbát opatrnosti na to, aby nebyly ve stejnou dobu sepnuty oba tranzistory jedné fáze, což by zapříčinilo zkrat kondenzátoru. Tento střídač má oproti víceúroňovým zapojením snazší řízení, nižší počet součástek, a tím i nižší cenu.

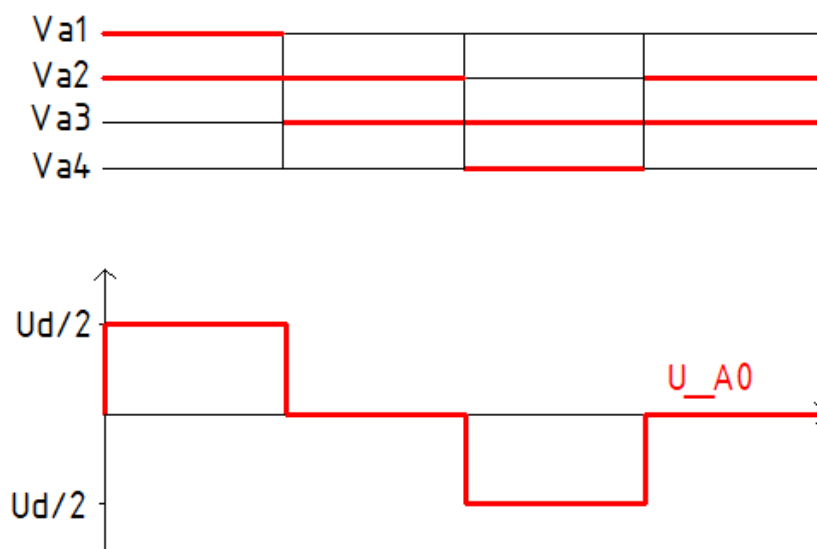
S tím samozřejmě souvisí i menší hmotnost.

Další zapojení znázorňuje topologii 3 - úroňové varianty s upínacími diodami (NPC inverter). Ta na rozdíl od první varianty generuje 3 hodnoty U_{A0} (proto 3 - úroňový). Kromě $Ud/2$ a $-Ud/2$ i hodnotu nulovou (viz spínací diagram – obr. 14). Pro tento střídač nesmí být sepnuté v jednu chvíli následující kombinace tranzistorů, což by opět vedlo ke zkratu baterie. Kombinace: $V_{a1}+V_{a2}+V_{a3}$, $V_{a2}+V_{a3}+V_{a4}$ a $V_{a1}+V_{a2}+V_{a3}+V_{a4}$. Obecně výhodou tříúroňových střídačů oproti dvouúroňovým je možnost zvýšené napěťové zatížitelnosti, snížený počet vyšších harmonických, a tedy i zlepšení celkového harmonického zkreslení THD.

Zapojení na obr. 13 c) zajišťuje obdobné vlastnosti jako varianta b) s rozdílem, že dosahuje vyšší účinnosti (převzato z [44]).



Obr. 13: Typické topologie střídačů: a) 2 - úroňové uspořádání, b) 3 - úroňové uspořádání s upínacími diodami, c) 3 - úroňové uspořádání T-článek (převzato z [44])



Obr. 14: Spínací diagram 3 – úrovnňové uspořádnání s upínacími diodami pro fázi A

1.6 Převodovka

Většina sériově vyráběných elektromobilů nemá více než jeden rychlostní stupeň. V současné době začínají někteří výrobci, jako například VW, experimentovat s využitím dvou rychlostních stupňů. Důvodem toho, proč elektromobily nemají převodovku, je ten, že elektrický motor má na rozdíl od spalovacího vysokou účinnost v širokém rozsahu otáček. To snižuje celkovou složitost i cenu elektromobilu. Při aplikaci více rychlostních stupňů se sice také zlepšuje efektivita jízdy, ale za cenu výrazných nákladů.

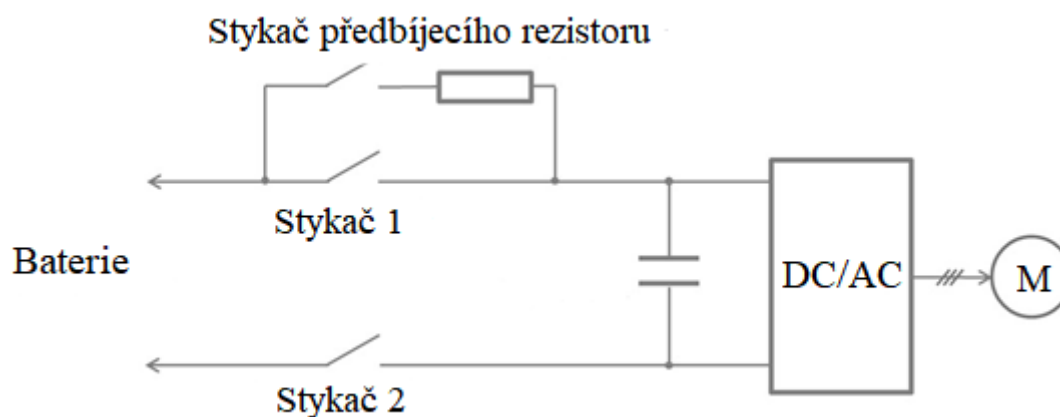
1.7 Ochranné prvky

IGBT nebo MOSFET tranzistory střídače jsou připojeny ke gate driverům obsahujícím desaturační obvody k ochraně proti jejich zničení nadproudem. Bezpečnostní obvod hlídá svorkové napětí tranzistoru a při přechodu do oblasti desaturace (nadproudu hlavního kanálu) dokáže řízeným vypnutím zabránit poškození či zničení součástky. Desaturačního stavu může součástka dosáhnout například ve chvíli, kdy dojde k vnitřnímu zkratu motoru. Během desaturace dochází k výraznému nárůstu proudu, který způsobuje přehřátí prvků. [50]

Vozidlo potřebuje pro svou činnost mnoho senzorů zajišťujících bezproblémový chod. Pro trakční pohon to jsou především senzory proudu, napětí a teploty. Řídící obvod baterie (BMS – battery management system) vysílá do vozidla stav o rozvážení napětí článků baterie, teplotě a o stavu nabití. Zároveň zabezpečuje, aby při nabíjení nebo vybíjení baterie nedošlo k překročení maximálních přípustných hodnot. S rostoucími

výkonovými požadavky baterie roste i požadavek na proudový rozsah senzorů. Měření proudů může být realizováno dvěma možnostmi. První je vložení předřadného odporu do obvodu, na kterém se detekuje úbytek napětí, který se dále izoluje izolovaným zesilovačem. Požadavky na tyto rezistory jsou především nízká hodnota odporu (50 mΩ až 500 mΩ) a její přesnost a spolehlivost. Druhá možnost měření proudu je pomocí elektromagnetického pole vytvořeného protékajícím proudem na bázi Hallova senzoru.

Mezi napěťový střídač a baterii je zapojen stykač s paralelním předbíjecím obvodem v podobě rezistoru, který omezuje proudové špičky při sepnutí. Schéma tohoto obvodu je znázorněno na obr. 15.



Obr. 15: Předbíjecí obvod stykače mezi baterií a střídačem (převzato z [51])

Každá trakční baterie je také chráněna DC pojistkou. Součástí ochranných obvodů elektrického vozidla je také měření izolačního odporu hlavních pólů vůči kostře vozidla. Pro případný náraz vozidla se zavádí ochranný prvek, tzv. pyroswitch, což je patrona pro nevratné destruktivní přerušení stejnosměrného proudu.

2 Simulační model

Cílem této části práce je získat simulační model vybraného vozidla s reálnými parametry, provést simulaci jízdy a zjistit výkonový profil tohoto zelektrizovaného vozu na uvažované trati. Vozidlem, které bylo pro tuto práci zvoleno, je Mazda 6. Všechny hodnoty, s kterými je v další části práce počítáno, odpovídají reálným číslům.

2.1 Pohybové rovnice

Základem dynamiky vozidla jsou pohybové zákony. Tím nejdůležitějším je Newtonův zákon:

$$F = m \cdot a \text{ [N, kg, m/s}^2\text{]} \quad (1)$$

V trakci se jedná o akcelerační sílu (nebo tzv. urychlující) F_a , která je dána rozdílem tažné síly F_t vozidla a silou od jízdnic F_o a traťových F_s odporů:

$$F = F_a = F_t - F_o - F_s \quad (2)$$

Síla F_a je potřeba ještě doplnit o koeficient součinitele rotačních částí vozidla ϑ , který je proměnný a zahrnuje momenty setrvačnosti veškerých rotujících částí vozidla. Pro jednoduchost se uvádí u osobních vozidel hodnota tohoto koeficientu v rozmezí 1.04 až 1.07. V této práci je uvažována hodnota tohoto koeficientu $\vartheta_{RH} = 1.05$ [–].

$$F_a = m \cdot a \cdot \vartheta_{RH} \quad (3)$$

Z rovnic (2) a (3) tedy lze vypočítat zrychlení vozidla $a(t)$:

$$a(t) = \frac{F_a(t)}{m \cdot \vartheta_{RH}} = \frac{F_t(t) - F_o(t) - F_s(t)}{m \cdot \vartheta_{RH}} \quad (4)$$

Koeficient rotačních částí ukazuje, jak setrvačné momenty rotujících částí ovlivňují (zpomalují) rozjezd a brždění vozidla. [40], [41]

Derivace zrychlení a vyjadřuje aktuální rychlost $v(t)$:

$$v(t) = v_0 + \int_0^t a(t)dt \text{ [m/s, m/s}^2\text{]} \quad (5)$$

A derivace rychlosti vyjadřuje ujetou dráhu $s(t)$: [40]

$$s(t) = s_0 + \int_0^t v(t)dt \text{ [m, m/s]} \quad (6)$$

2.2 Jízdní a traťové odpory

Jízdní odpor je taková síla F_o , která působí proti pohybu vozidla a zpomaluje tak jeho pohyb. Nejčastěji se vyjadřuje ve tvaru polynomu:

$$p_o(v) = a + bv + cv^2 \text{ [‰, km/h]} \quad (7)$$

Koeficienty a , b , c se pro každé vozidlo liší a jsou získány měřením jízdního odporu vozidel. Koeficient a zahrnuje odporovou složku suchého tření, b kapalinového tření a c odpor vzduchu. Koeficient b někdy zůstává zanedbán z důvodu jeho malého zásahu do výsledné hodnoty odporu. Z rovnice (7) plyne, že jízdní odpor je funkcí závislosti rychlosti vozidla. [40]

Pro zvolený automobil jsou koeficienty následující (v závorce udány pro srovnání koeficienty konkurenční Tesly Model S – verze 75D [43]): [42]

$$a = 13.472 \text{ (16.782)}$$

$$b = 0.107 \text{ (0.052)}$$

$$c = 0.0175 \text{ (0.089)}$$

Zatěžovací síla od jízdních odporů působící na vozidlo se počítá jako:

$$F_o = \frac{p_o}{1000} m \cdot g \text{ [kN, ‰, t, m/s}^2\text{]} \quad (8)$$

Traťové odpory jsou další síly, které ovlivňují tažnou sílu. V případě stoupání působí proti této síle, naopak při klesání působí v jejím směru. Tyto odpory se dělí na dvě hlavní skupiny – odpor stoupání a odpor oblouku. Odpor oblouku je v této práci zanedbán vzhledem ke skutečnosti, že pro osobní vozidla nejsou tyto hodnoty nikterak zásadní oproti ostatním

působícím silám. Odpor stoupání se zjistí ze sklonu trati, který se udává v promile. [40]

$$F_s = \frac{s\%}{1000} m \cdot g \text{ [kN, ‰, t, m/s}^2\text{]} \quad (9)$$

2.3 Návrh trakční baterie

Trakční baterie je jednou z nejdůležitějších výzbrojí veškerých elektrovozidel. Její omezená rozměrnost a technologický vývoj bateriových článků jsou omezujícími faktory k dosažení vyšší celkové kapacity, a s tím i souvisejícího dojezdu. Její konstrukční návrh taktéž ovlivňuje jízdní vlastnosti vozidla, jelikož baterie zasahuje do výsledného těžiště. V této kapitole je nastíněn hrubý návrh baterie, její chlazení a z toho plynoucí důležité hodnoty rozměrů a hmotnosti celého paketu.

Pro návrh byly vybrány články lithium-iontové, které ve svých vozech používá například Tesla, popsána v kapitole 1.3.1. Jsou to články s průměrem 18 mm, výškou 65 mm, udávané jmenovité napětí článku 3.65 V a kapacita 2 500 mAh.

Následující návrh baterie je s ohledem na požadavek napětí baterie 400 V a kapacitu 50 kWh. Při sériovém spojení článků platí, že celkové napětí je součtem napětí jednotlivých článků, tedy:

$$\frac{400 \text{ V}}{3.65 \text{ V}} = 109,59 \Rightarrow 110 \text{ článků} \Rightarrow 401.5 \text{ V} \quad (10)$$

V sérii je uvažováno 110 článků, které na výstupu dávají 401.5 V. Tyto sériově spojené články mají ovšem celkovou kapacitu rovnou jednomu článku, tedy 2 500 mAh. Proto jsou k této sériové větvi potřeba přidat další větve spojené spolu paralelně k navýšení celkové kapacity. Převod z mAh na kWh jedné větve:

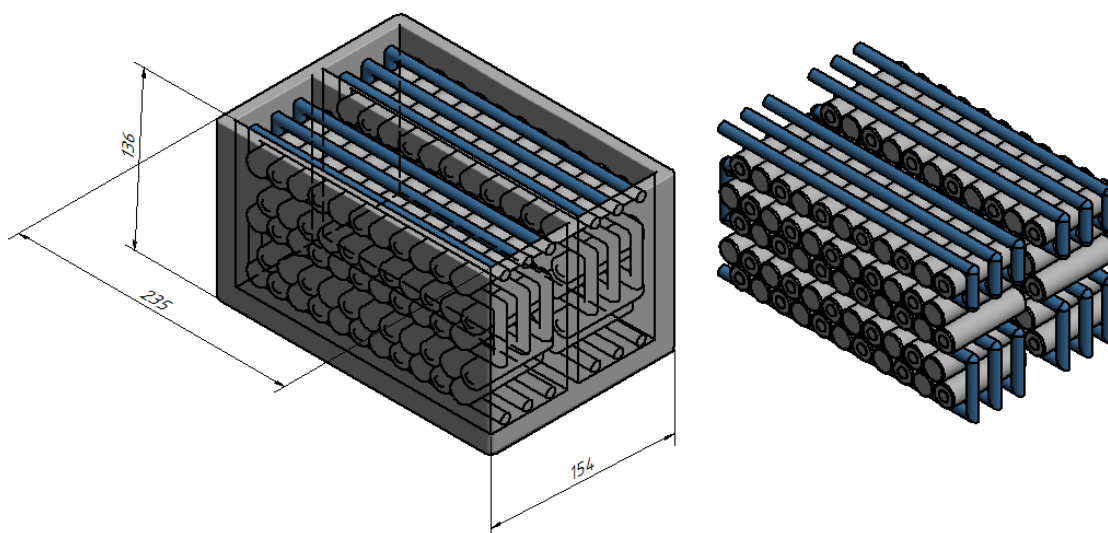
$$\frac{2500 \text{ mAh} \cdot 401.5 \text{ V}}{1000} = 1.00375 \text{ kWh} \quad (11)$$

Rovnice (11) dává představu o kapacitě v kWh jedné větve – 1.00375 kWh. Z toho lze jednoduše získat počet paralelních větví pro požadavek:

$$\frac{50 \text{ kWh}}{1.00375 \text{ kWh}} = 49.813 \Rightarrow 50 \text{ větví} \Rightarrow 50.1875 \text{ kWh} \quad (12)$$

Celková kapacita baterie činí 50.1875 kWh a skládá se z celkem z 50 větví, z nichž každá obsahuje 110 článků. Z toho plyne požadavek na 5 500 článků pro celou trakční baterii. Tato baterie byla rozdělena na 50 stejných modulů obsahujících každý 110 článků spojených sériově. Možností, jak řadit jednotlivé články do modulů je však více. Některé jsou co do prostoru přívětivější, některé jsou výhodné z důvodu lepšího chlazení. Při návrhu (obr. 16 – jeden modul) je respektován požadavek na co nejnižší těžiště vozidla.

Chlazení trakční baterie výrazně ovlivňuje její životnost. Udržuje se v rozmezí od 20 do 40 °C, je-li to v dané situaci možné. Nejčastějšími variantami chlazení bývá chlazení vzduchem a nepřímé chlazení vodou. Přímé chlazení spočívá v přímém kontaktu článků s chladicí kapalinou. Tato varianta se však u sériově využívaných vozidel nevyužívá. [45] V tomto návrhu bylo vybráno nepřímé chlazení, a to pomocí kovových trubek protékáných chladicí kapalinou.



Obr. 16: Zjednodušený návrh jednoho modulu trakční baterie

Výška jednoho modulu dle zhotoveného modelu vychází 136 mm. Rozměry v ose X a Y činí 235 a 154 mm, což zabírá 0.036 m². Součet všech 50 modulů vozidla tedy činí 1.81 m². To je dostatečný prostor pro to, aby se moduly nemusely skládat na sebe, čímž je zajištěno

nižší těžiště vozidla.

Váha jednoho článku 18650 se rovná přibližně 45 g. To ve výsledku znamená hmotnost 247.5 kg samotných článků. Moduly bývají v dnešní době součástí podvozků a slouží tak zároveň i ke zpevnění, což celkovou hmotnost baterie dále zvyšuje. Kovové chladič trubky při těchto rozměrech váhově vycházejí z jejich počtu, délky a hustoty materiálu kolem 40 kg na celou baterii.

Tento návrh je pouze teoretický. V praxi se při návrhu článků v sérii uvažuje nikoliv se jmenovitou hodnotou napětí článku, ale s hodnotou maximální, která je u typu 18650 4.2 V, z čehož plyne, že v sérii bude zapojeno o několik článků méně.

2.4 Clarkova transformace

Parkova transformace umožňuje přepočítání veličin z třífázového souřadného systému (a, b, c) do souřadného systému statoru (x,y). Následující vyjádřené rovnice pro proud (13, 14, 15, 16, 17) platí i pro napětí.

$$i_{sx} = i_{sa} \quad (13)$$

$$i_{sy} = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{sa} + 2i_{sb}) \quad (14)$$

Pro přepočítání veličin ze systému (x,y) do (a, b, c) se užívá inverzní Clarkova transformace. [46]

$$i_{sa} = i_{sx} \quad (15)$$

$$i_{sb} = -\frac{1}{2}i_{sx} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{sy} \quad (16)$$

$$i_{sc} = -\frac{1}{2}i_{sx} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{sy} \quad (17)$$

2.5 Parkova transformace

Parkova transformace umožňuje přepočítání veličin ze stacionárního souřadného systému statoru (x, y) do souřadného systému (d, q) rotujícím obecně rychlostí ω . Obdobně jako u

Clarkovy transformace platí vztahy i pro napětí. [47]

$$i_{sd} = i_{sx} \cdot \cos \vartheta + i_{sy} \cdot \sin \vartheta \quad (18)$$

$$i_{sq} = i_{sy} \cdot \cos \vartheta - i_{sx} \cdot \sin \vartheta \quad (19)$$

ϑ je úhel, který charakterizuje natočení systému (d, q) vůči systému (x, y) a je určen z úhlové rychlosti otáčení ω . Nabývá hodnot od nuly do 2π .

$$\vartheta = \int_0^t \omega(t) dt \quad (20)$$

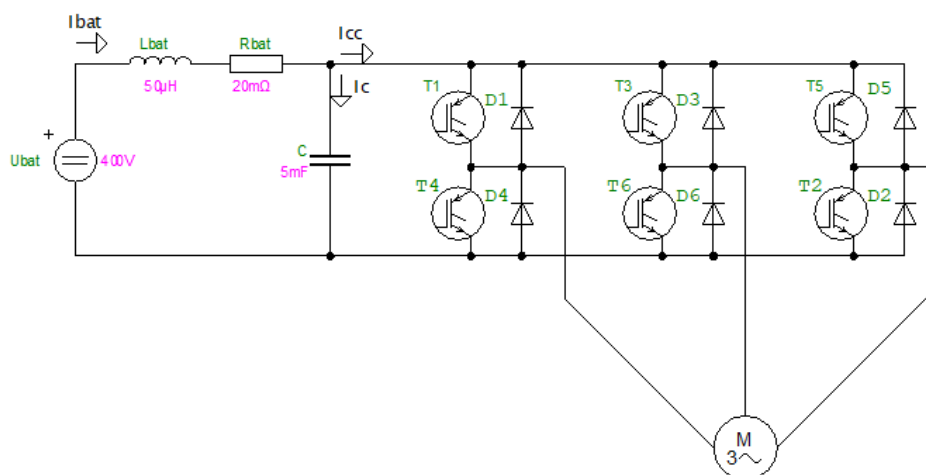
Podobně jako u Clarkovy transformace fungují inverzní vztahy i zde, proto inverzní Parkova transformace vypadá následovně.

$$i_{sx} = i_{sd} \cdot \cos \vartheta - i_{sq} \cdot \sin \vartheta \quad (21)$$

$$i_{sy} = i_{sd} \cdot \sin \vartheta + i_{sq} \cdot \cos \vartheta \quad (22)$$

2.6 Obvod trakční baterie

Při simulace bylo použito náhradní schéma trakční baterie dle obr. 17 reprezentující ztráty v baterii.



Obr. 17: Obvod reprezentující trakční baterii a trakční střídač

Rovnice pro výpočet napětí kondenzátoru a stejnosměrného proudu baterie mají po aplikaci Kirchhoffových zákonů následující tvar:

$$\frac{du_c}{dt} = \frac{i_c}{C} = \frac{i_{bat} - i_{cc}}{C} \quad (23)$$

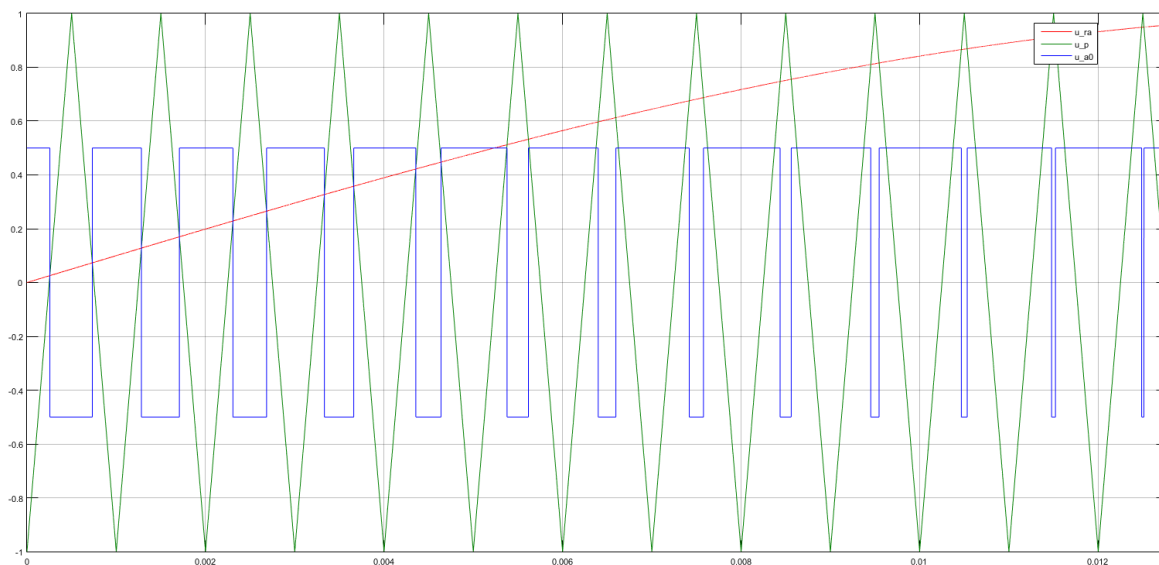
$$\frac{di_{bat}}{dt} = \frac{u_{bat} - u_c - R_{bat} \cdot i_{bat}}{L_{bat}} \quad (24)$$

Důležitým parametrem elektrických vozidel je dodávaný výkon baterie, který se z předešlých dvou vypočtených hodnot rovná:

$$P_{bat} = u_c i_{bat} \quad (25)$$

2.7 Řízení střídače

Pro řízení střídače bylo využito algoritmu sinusové pulsní šířkové modulace, která je založena na porovnávání referenčního signálu se signálem pily. V tomto případě byla použita frekvence pily 10 kHz. Výstupem jsou řídicí impulsy na tranzistory střídače. Frekvence pily má za následek zvlnění výsledného momentu motoru. Čím je větší, tím je zvlnění momentu menší za cenu nárůstu spínacích ztrát v tranzistorech a motoru. Princip komparace signálů je znázorněn na obr. 18.



Obr. 18: Princip komparace referenčního sinusového signálu (červeně) se signálem pily (zeleně) a výstup ve formě impulsů na tranzistory jedné větve střídače

Výsledná dvouhodnotová velikost pulsů nabývá hodnot $U_c/2$ a $-U_c/2$, což odpovídá sepnutí horního, respektive dolního tranzistoru ve větvi střídače. Impulzy pro fázi B mají obdobný průběh, avšak referenční sinusový signál je o 120° posunut vůči fázi A. Stejně tak fáze C je posunuta o 240° oproti fázi A.

2.8 Matematický model PMSM

Výstupem napěťového střídače jsou fázová napětí pro stator, která jsou přes Clarkovu a Parkovu transformaci převedena na napětí v souřadném systému (d,q). Ty společně s mechanickou rychlostí motoru vstupují do bloku matematického modelu PMSM, kde probíhá výpočet proudů systému (d,q) - i_{sd} a i_{sq} dle následujících vztahů: [48]

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \frac{u_d}{L_d} + \omega_m \cdot pp \cdot \frac{L_q}{L_d} i_d - i_d \frac{R_s}{L_d} \quad (26)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = \frac{u_q}{L_q} - \omega_m \cdot pp \cdot i_d \cdot \frac{L_d}{L_q} - \omega_m \cdot pp \cdot \frac{\Phi_{PM}}{L_q} - i_q \frac{R_s}{L_q} \quad (27)$$

2.9 Výpočet momentu PMSM a tažné síly

Ze známých hodnot proudů v systému (d,q) je již možno vypočítat moment motoru PMSM: [48]

$$M_{PMSM} = \frac{3}{2} \cdot pp [(L_d - L_q) i_{sd} i_{sq} + \Phi_{PM} \cdot i_{sq}] \quad (28)$$

V praxi bývají hodnoty L_d a L_q relativně podobné. U PMSM s magnety na povrchu se tyto dvě indukčnosti rovnají. Z rovnice 28 lze vidět důvod, proč se proud i_{sq} říká momentotvorná složka, proud i_{sd} se nazývá tokotvornou složkou. Pro výpočet tažné síly je potřebné převést moment motoru na mechanický moment na hřídeli automobilu:

$$M_{mech} = M_{PMSM} \cdot i \cdot \eta_{prev} \quad (29)$$

A z mechanického momentu lze přes poloměr kola dopočítat tažnou sílu:

$$F_t = \frac{M_{mech}}{r_k} \quad (30)$$

Úhlová rychlost motoru je jednoznačně určena rychlostí automobilu, a proto z ní lze dopočítat úhlovou rychlost motoru ω_m :

$$\omega_m = \frac{v \cdot i}{r_k} \quad (31)$$

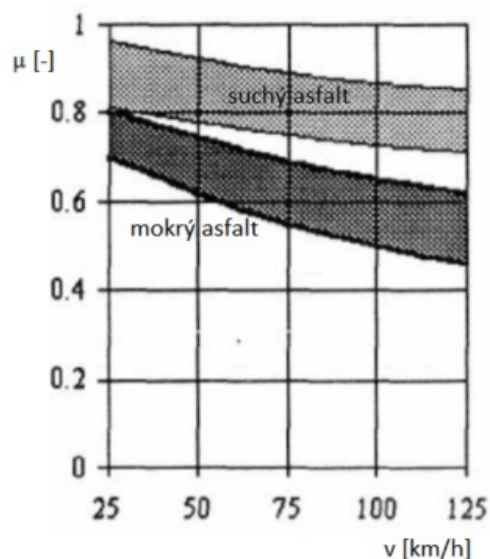
2.10 Omezení adheze

V simulaci je realizován blok omezující tažnou sílu adheze. Při překročení určité meze tažné síly dochází k prokluzu kol a je proto nezbytné tuto sílu udržet pod mezí zajišťující správnou přilnavost pneumatik k vozovce. Ona mez závisí především na materiálech, které spolu přijdou do kontaktu. Nejčastějším kontaktem bývá v železniční trakci styk kolo-kolejnice, kdy koeficient adheze μ dosahuje přibližně hodnot v rozmezí od 0.1 až 0.3 v závislosti na rychlosti a je získána z měření pomocí Curtius-Knifflerovy rovnice.

Ze znalosti, že adheze je poměr maximální tečné síly ku svislé zatěžovací síle vozidla, lze odvodit vztah pro maximální tažnou sílu v závislosti na adhezi (rovnice 32).

$$F_{t-max} = \mu \cdot m \cdot g \quad (32)$$

V automobilové trakci koeficient adheze při styku pneumatika – asfalt nabývá výrazně vyšších hodnot (obr. 19). Velikost tohoto koeficientu je v této práci nastavena lineární funkcí od $\mu = 0.9$ při 0 km/h až po $\mu = 0.7$ při 150 km/h, což odpovídá suché trati. V případě výpočtů pro mokrou trať lze v bloku adheze tyto hodnoty změnit.

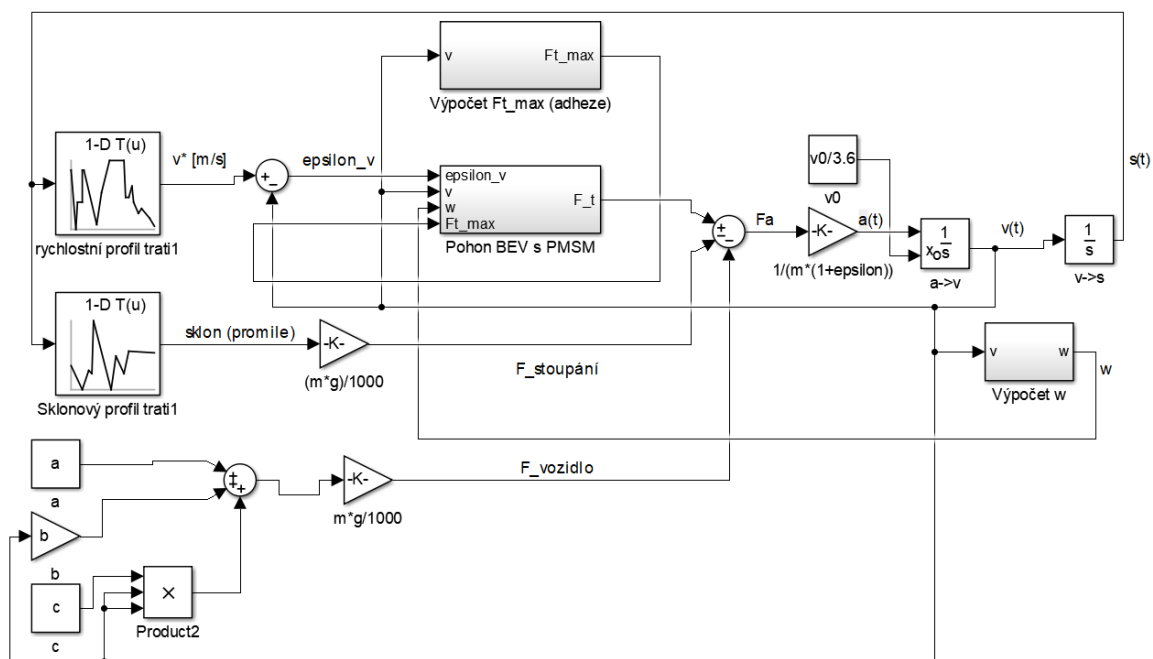


Obr. 19: Velikost koeficientu adheze μ v závislosti na rychlosti pro suchý a mokrý asfalt (převzato z [49])

Koeficient adheze je silně závislý na vnějších vlivech, především na počasí, proto je rozsah jeho hodnot v praxi poměrně značný. Krom počasí jsou dalšími faktory ovlivňující adhezi stav pneumatik, struktura vozovky a její znečištění. [40]

2.11 Vektorové řízení pohonu s PMSM

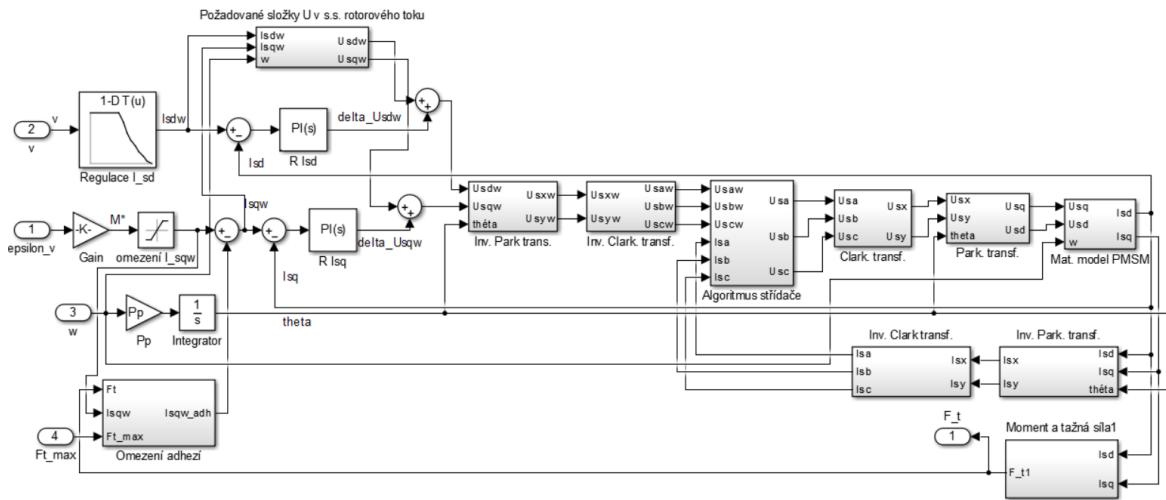
Vektorové řízení je jedním ze způsobů řízení elektrického pohonu. Je založené na výpočtu požadované složky napětí v souřadném systému (d, q), které střídač vnucuje spínáním svých tranzistorů motoru. V tomto konkrétním případě byl zvolen algoritmus pro regulaci proudů i_{sd} a i_{sq} . Blokové schéma řízení pohonu včetně s PMSM včetně trakční mechaniky je znázorněno na obr. 20 (příloha 1) a 21 (příloha 2).



Obr. 20: Simulační schéma výpočtu trakční mechaniky

2.11.1 Zadání vstupních proudů systému (d, q)

Vstupní informací vstupující do řízení pohonu vozidla je rychlostní profil trati. Požadovaná rychlost je porovnávána se skutečnou rychlostí a na základě jejich rozdílu zadává odchylka rychlosti ϵ_v požadavek momentu motoru – složka i_{sq}^* . Výstupem řízení motoru je tažná síla zmenšená (případně zvětšená v určitých částech trati v závislosti na sklonu) o zatěžovací síly od vozidlových a traťových odporů (kapitola 2.2). Rozdílem tažné síly a zatěžovacích sil trati a od vozidla vyjde výsledná akcelerační síla, z které lze dopočítat zrychlení, rychlost i ujetou dráhu vozidla (kapitola 2.1).



Obr. 21: Schéma vektorového řízení pohonu s PMSM

Během rozjezdu automobilu je z důvodu ochrany před proudovým přetížením střídače a motoru nasycen regulátor proudu I_{sq} , stejně tak je nasycen i regulátor proudu I_{sd} , během čehož je motor plně nabuzen. Při dosažení jmenovitého bodu dojde k odsycení regulátoru proudu složky d a se zvyšující se rychlostí vozidla tato složka klesá – odbuzování motoru. Při dosažení požadované rychlosti dojde k odsycení regulátoru proudu složky q, která v této chvíli nastaví hodnotu proudu odpovídající zátěžnému momentu jízdních odporů. Požadavek na velikost i_{sq} je navíc omezen adhezním limitem (kapitola 2.10), který nedovoluje této složce překročit její hodnoty, aby se zabránilo nechtěnému prokluzu kol.

2.12 Výpočet požadovaných složek napětí v souřadném systému (d, q)

Požadované proudy souřadného systému (d, q) se přepočítávají na požadovaná napětí v témže systému. [48]

$$u_{sd}^* = R_s i_{sd}^* + L_d \frac{di_{sd}^*}{dt} - p p \omega_m L_q i_{sq}^* \quad (33)$$

$$u_{sq}^* = R_s i_{sq}^* + L_q \frac{di_{sq}^*}{dt} + p p \omega_m (L_d i_{sd}^* + \Phi_{PM}) \quad (34)$$

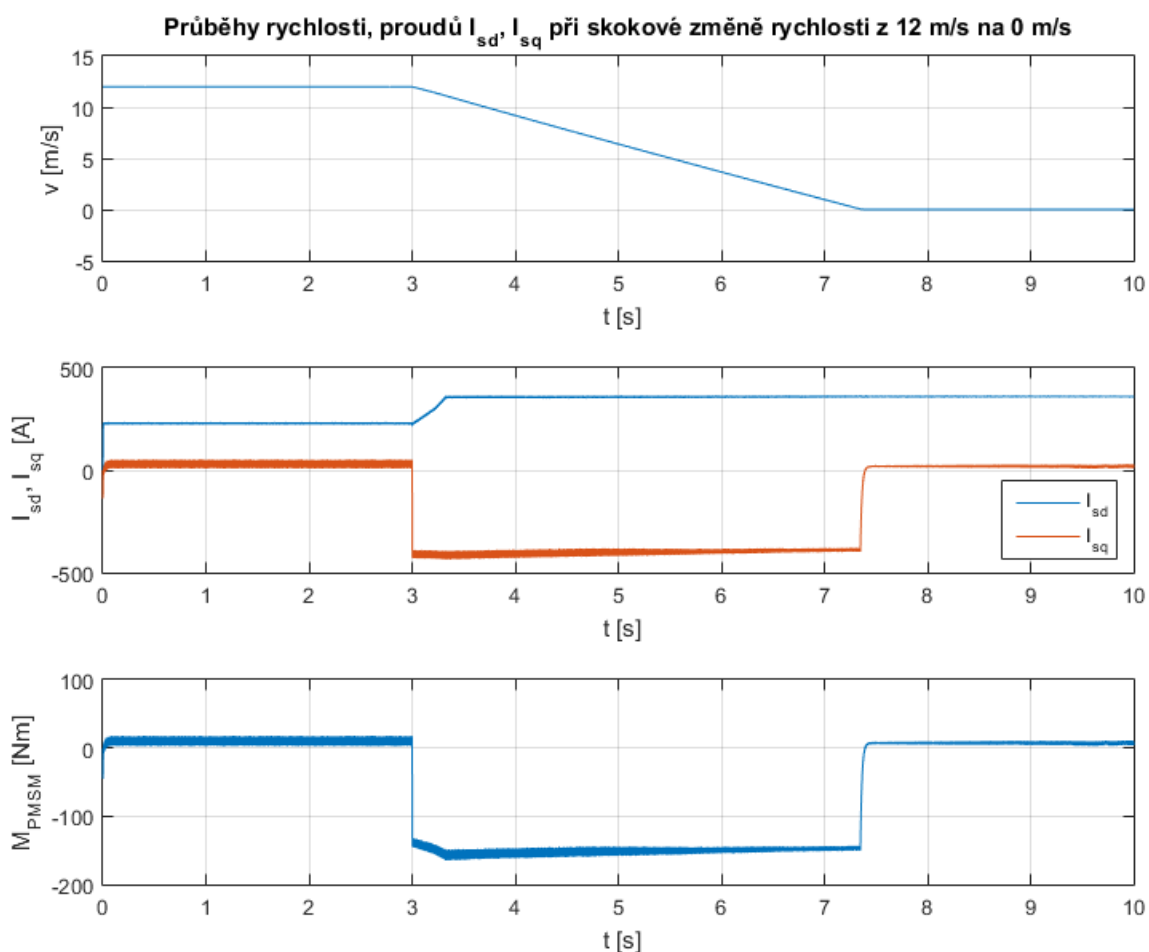
3 Výsledky simulací

3.1 Odezva systému na skokovou změnu rychlosti

Na obr. 22 je znázorněna odezva systému na jednotkovou změnu rychlosti z 12 m/s na 0 m/s.

$i_{sd-sat} = 360 \text{ A}$, $i_{sq-sat} = 400 \text{ A}$, $i = 10$, $P_{ps} = 1 \text{ kW}$, jízdní odpory: $a = 13.472$, $b = 0.107$, $c = 0.0175$, $m = 1800 \text{ kg}$.

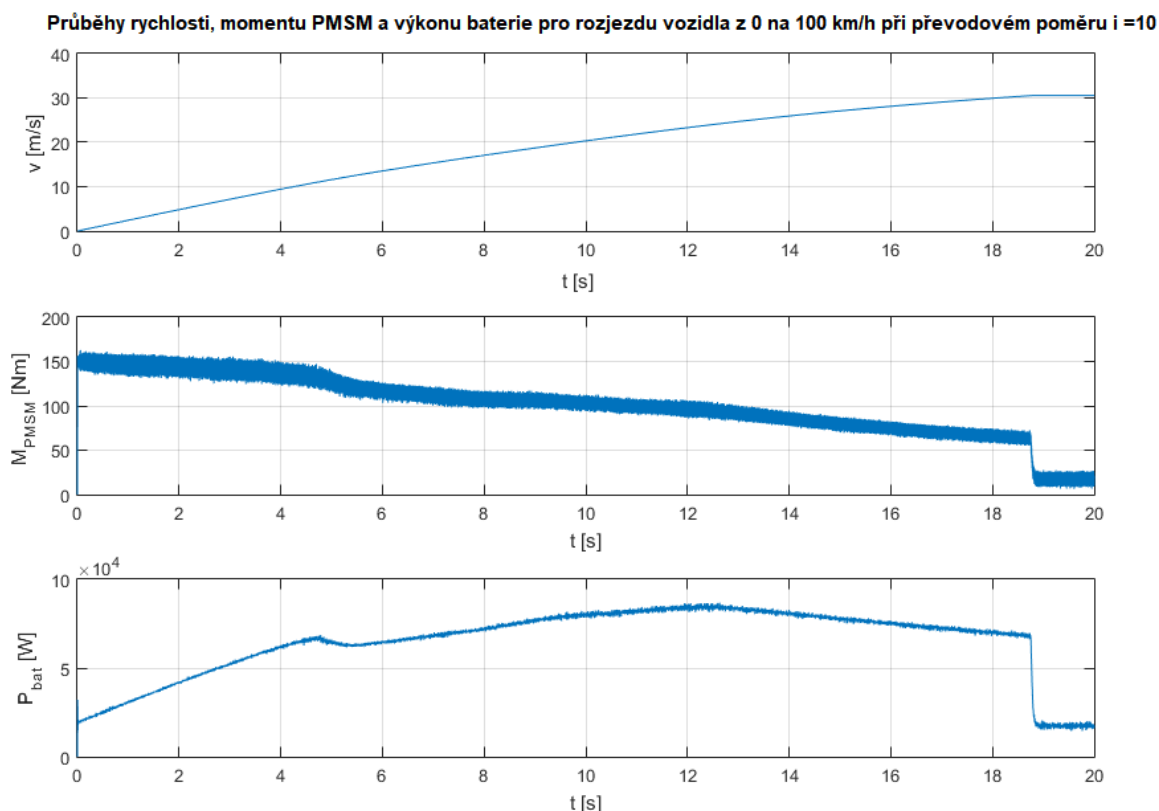
V počátku simulace je vozidlo ve stavu jízdy v rychlosti 12 m/s. Při této rychlosti je částečně odbuzen regulátor proudu i_{sd} . V čase $t = 3 \text{ s}$ dojde ke skokové změně požadavku rychlosti z 12 m/s na nulu. V tomto čase dochází ke změně polarit proudu i_{sq} v důsledku záporné regulační odchylky rychlosti. Při snižování rychlosti se nabuzuje regulátor složky i_{sd} až do jmenovité rychlosti, od které složka proudu i_{sd} dosahuje maximální hodnoty. Strmost zpomalení vozidla se dá regulovat změnou velikosti saturevaného proudu s ohledem na omezení adhezí. Moment motoru je silně závislý na proudu složky q , dle rovnice č. 28.



Obr. 22: Průběhy rychlosti, proudů složek (d, q) a momentu motoru po skokové změně rychlosti z 12 m/s na 0 m/s v čase 3 sekundy

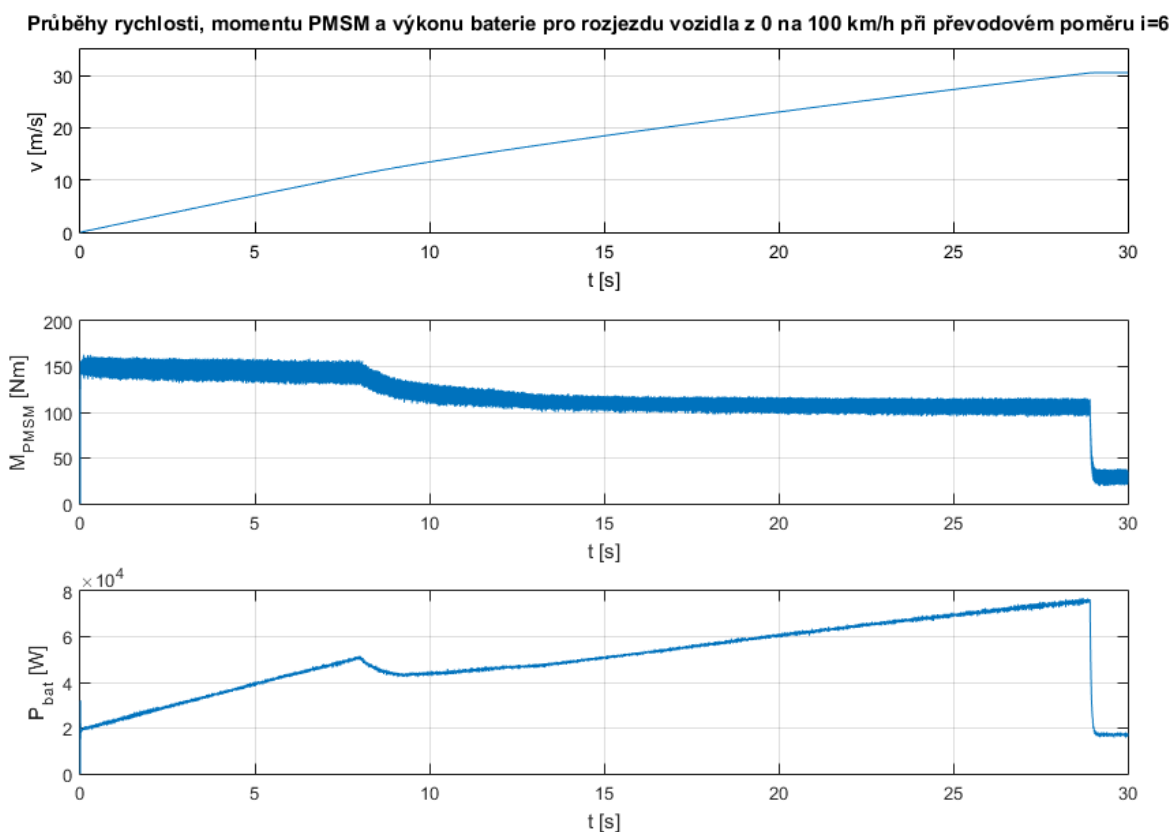
3.2 Rozjezd vozidla z 0 na 100 km/h

Parametr zrychlení z 0 na 100 km/h je základním parametrem charakterizujícím vozidlo. Proto byl podroben simulační model tomuto ověření. Rozjezd probíhá po rovné dráze, síla od jízdních odporů sklonu je tedy nulová. Parametry omezení proudu $i_{sq-sat} = 400$ A, $i_{sd-sat} = 360$ A, $m = 1800$ kg, $P_{ps} = 1$ kW, jízdní odpory: $a = 13.472$, $b = 0.107$, $c = 0.0175$. Pomocná spotřeba zahrnuje veškerý odběr elektrické energie mimo trakční pohony, především topení nebo/a klimatizace, světla. Výsledky simulace jsou zobrazeny na obr. 23.



Obr. 23: Průběhy rychlosti, momentu PMSM a výkonu baterie při rozjezdu vozidla z 0 na 110 km/h pro převodový poměr $i = 10$ a hmotnost vozidla $m = 1800$ kg

Z obr. 23 vychází parametr zrychlení z 0 na 100 km/h (27.8 m/s) 15.6 sekundy pro $i = 10$. Složka i_{sq} je nastavena na maximální hodnotu 400 A omezenou saturačním limitem. Tato složka je zadávána regulační odchylkou rychlosti. Druhá složka i_{sd} odpovídající buzení je při rozjezdu z nulové rychlosti také maximální až do hodnoty jmenovité rychlosti – přibližně 40 km/h. Od této rychlosti dochází ke snižování proudu složky d. Při dosažení požadované rychlosti – 110 km/h – se sníží proud složky q na hodnotu odpovídající zátěžnému momentu vlivem cca nulové regulační odchylky rychlosti. Během tohoto rozjezdu nebylo dosaženo adhezní meze.



Obr. 24: Průběh rychlosti, momentu PMSM a výkonu baterie při rozjezdu vozidla z 0 na 110 km/h pro převodový poměr $i = 6$ a hmotnost $m = 1800$ kg

Na obr. 24 je zobrazen případ pro rozjezd vozidla při převodovém poměru $i = 6$. Oproti předešlému příkladu na obr. 23 dochází k pomalejšímu rozjezdu vozidla, ale je umožněno dosáhnout vyšší požadované rychlosti.

Tab. 7: Doba rozjezdu a maximální dosažená rychlost elektromobilu v závislosti na rozdílné hmotnosti vozidla a rozdílném převodovém poměru

Převodový poměr [-]	Hmotnost [kg]	Doba do 100 km/h [s]	Maximální rychlost [km/h]
6	1600	22.2	194
	1800	25.6	189
	2000	28.9	184
8	1600	16.4	165
	1800	18.8	163
	2000	21.1	160
10	1600	13.8	142
	1800	15.6	140
	2000	17.5	137

V tabulce č. 7 je porovnán vliv hmotnosti a převodového poměru na dobu zrychlení z 0 na 100 km/h a maximální dosažitelnou rychlost. Parametry simulace: $i_{sq-sat} = 400$ A, $i_{sd-sat} = 360$ A, jízdní odpory: $a = 13.472$, $b = 0.107$, $c = 0.0175$, $sklon = 0$ ‰, $P_{ps} = 1$ kW

3.3 Spotřeba při konstantní rychlosti

Simulační model byl podroben jízdě při konstantní rychlosti po rovné trase s uvažovanou spotřebou pomocných pohonů 1 kW. Zároveň byla nastavena hmotnost vozidla na 2 tuny, a to z důvodu porovnání spotřeby s Nissanem Leaf, jehož hmotnost je 2020 kg.

Parametry simulace: $i_{sq-sat} = 400$ A, $i_{sd-sat} = 360$ A, $m = 2000$ kg, jízdní odpory: $a = 13.472$, $b = 0.107$, $c = 0.0175$, $sklon = 0$ ‰, $P_{ps} = 1$ kW

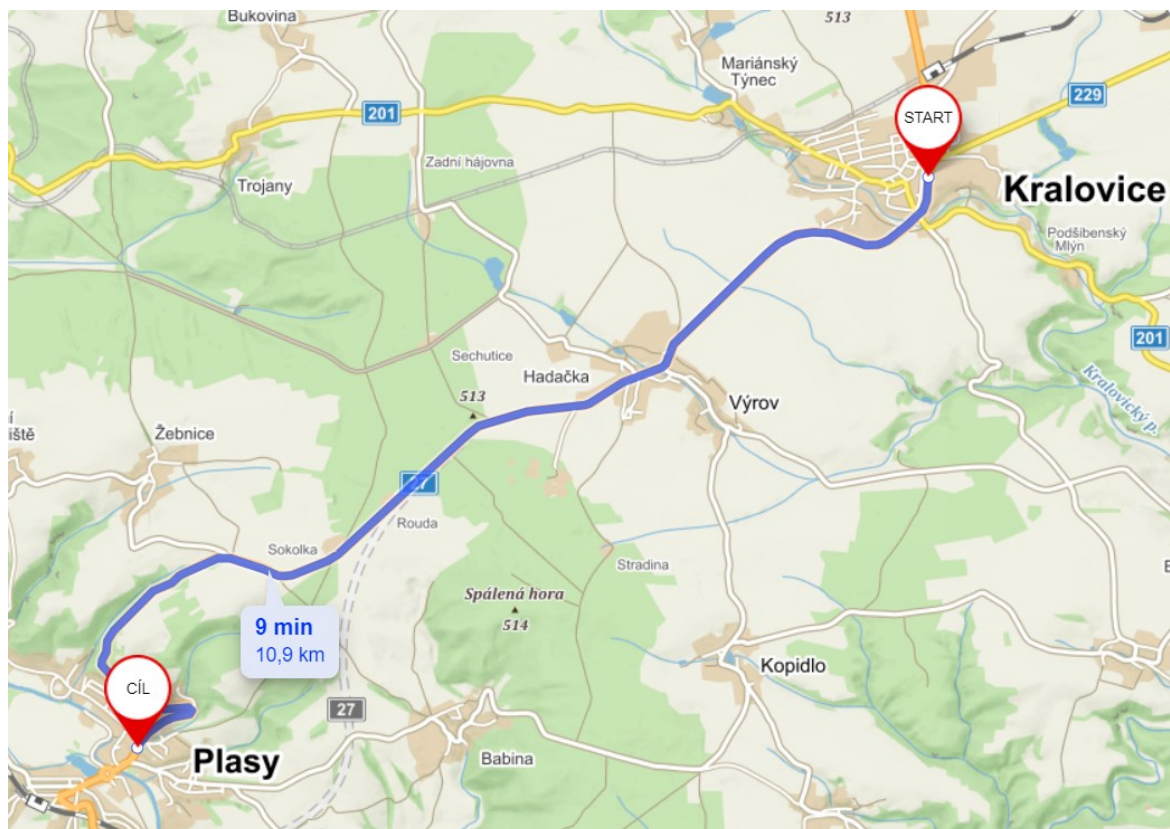
Tab. 8: Srovnání spotřeby uvažovaného vozidla o hmotnosti 2000 kg se spotřebou Nissanu Leaf o stejné hmotnosti (údaje o Nissan Leaf – převzato z [52])

	Nissan Leaf	Simulační model
Rychlost [km/h]	Spotřeba [kWh/100 km]	Spotřeba [kWh/100 km]
60	12.8	12.8
70	13.3	14.0
80	15.2	15.0
90	16.3	16.6
100	18.1	18.1
110	22.0	20.1

Z tabulky vyplývá, že spotřeba modelu s reálně měřeným Nissanem Leaf je takřka totožná.

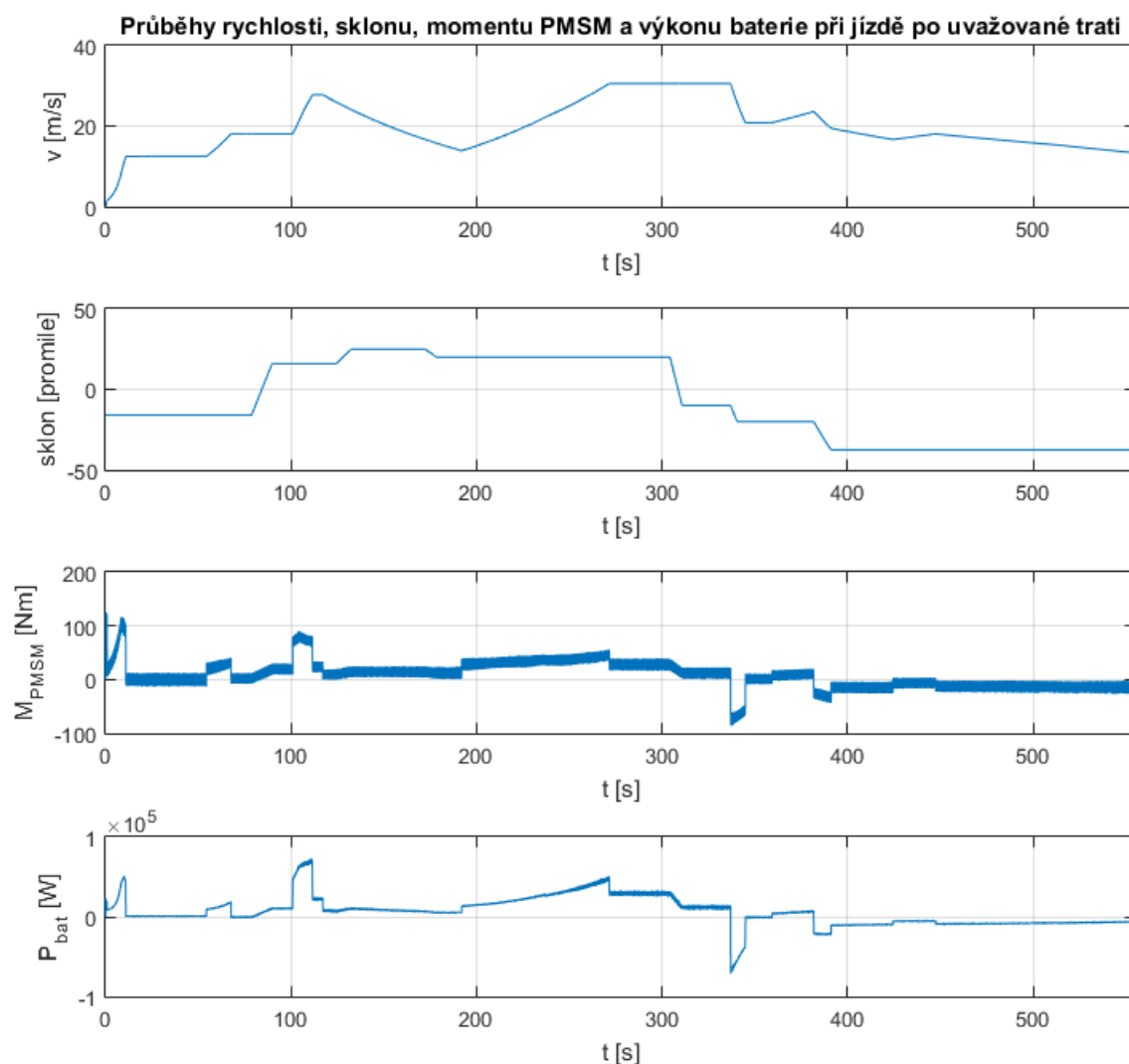
3.4 Simulace jízdy po uvažované trati

Při simulaci byla vybrána trať mezi městy Kralovice a Plasy. Jedná se o 10.9 km dlouhou trať s počáteční nadmořskou výškou 449 m. n. m a koncovou 322 m. n. m. Z důvodu doby výpočtu simulace byl zvolen krok výpočtu $2 \cdot 10^{-5}$ s. Při jízdě byl použit příkon pomocné spotřeby 1 kW. Tato spotřeba se výrazně mění v závislosti na počasí a komfortu cestujících a ovlivňuje tak celkový dojezd vozidla.



Obr. 25: Zvolená trasa simulace mezi městy Kralovice – Plasy (převzato z [53] – mapy.cz)

Na obr. 26 je výstup simulace při $i_{sq-sat} = 400 A$ a $m = 1800 kg$. Z průběhů lze vidět, že při konstantní rychlosti při nulové regulační odchylce rychlosti například v čase 30 sekund a 300 sekund je zátěžný moment odlišný. To je způsobeno velikostí jízdních odporů, které stoupají dle kvadratické rovnice s parametrem rychlosti (kapitola 2.2). V čase 340 sekund je vidět regenerativní brzdění, kdy je dodávána energie zpět do baterie. To je způsobeno změnou polaritu proudu momentotvorné složky q . V závěru jízdy od sekundy 390 až do konce simulace probíhá po celou dobu rekuperace energie, což je způsobeno tím, že závěrem této trasy je dlouhý úsek klesání se sklonem 37.5 ‰, což odpovídá 3.75 ‰ sklonu profilu tratě.



Obr. 26: Průběh rychlosti, sklonu, momentu PMSM a výkonu baterie v průběhu jízdy vozidla na trati Kralovice–Plasy

Parametry simulace pro průběhy z tabulky č. 9: $i_{sd-sat} = 360 \text{ A}$, $m = 1800 \text{ kg}$, jízdní odpory: $a = 13.472$, $b = 0.107$, $c = 0.0175$, $P_{ps} = 1 \text{ kW}$

Tab. 9: Srovnání parametrů doby zrychlení vozidla z 0 na 100 km/h a spotřeby vozidla na uvažované trati Kralovice-Plasy v závislosti na změně i_{sq-sat}

$i_{sq-sat} [\text{A}]$	Doba zrychlení 0-100 km/h [s]	Spotřeba [kWh/100 km]
300	23.5	10.2
400	15.6	10.2
600	11.8	10.3

Tab. 9 ukazuje, že s narůstajícím omezujícím proudem i_{sq-sat} dochází k výraznému

poklesu doby do dosažení rychlosti 100 km/h. Na vliv spotřeby vozidla na daném rychlostním a sklonovém profilu trati výrazný vliv nemá (popsáno v závěru).

Tab. 10: Vliv hmotnosti vozidla na jeho spotřebu na uvažované trati Kralovice-Plasy

Hmotnost [kg]	Spotřeba [kWh/100 km]
1600	9.0
1800	10.2
2000	11.3

4 Závěr

V první kapitole práce bylo cílem pojednat o současných řešeních trakčních pohonů v BEV vozidlech. V této etapě bylo problematické sehnat detailní odborné informace o elektromobilech, až na výjimku Tesly, která je cílem mnoha výzkumů. V této pasáži jsem shrnul trakční komponenty známých výrobců BEV.

Druhá část se zabývá vysvětlením principů trakční mechaniky, elektrických strojů a řízení a vytvořením simulačního programu se zadáním simulace jízdy elektromobilu na dané trati Kralovice–Plasy s uvažovaným reálným sklonem (parametr trati lze libovolně měnit). V této kapitole jsem shrnul postup pro tvorbu pohybových rovnic vozidla. Dále jsem nastínil princip výpočtů traťových a vozidlových odporů, které jsou nutné pro kvalitní simulaci jízdy vozidla. V tomto bodě by při detailnějším rozboru mohlo dojít navíc k přidání odporu v oblouku, který však nemá na výsledný odpor takový vliv jako uvažované odpory. V podkapitole trakční baterie jsem přidal jednoduchý návrh baterie založené na článcích 18650 s odhadem její hmotností.

V poslední kapitole byly uvedeny výsledky simulací a práce byla rozdělena na tři hlavní podkapitoly charakterizující jízdní vlastnosti vozidla. Tou první byl rozjezd vozidla z 0 km/h na 100 km/h, která se zabývala vlivem hmotnosti vozidla a převodového poměru na tento cyklus. V dalším bodě došlo k porovnání spotřeby simulovaného vozidla se spotřebou udávanou pro Nissan Leaf pro konstantní hodnoty rychlosti po rovné dráze. Byly to rychlosti od 60 km/h do 110 km/h s krokem 10 km/h. V tabulce v této kapitole je vidět, že spotřeba simulovaného vozidla je takřka totožná ve všech rychlostech. Vliv hmotnosti vozidla na celkovou spotřebu na zvoleném úseku byl pozorován ve třetí bodě. S hmotností vozidla roste i spotřeba (kWh/100 km) – to je fyzikálně zapříčiněno vozidlovými odpory, které jsou závislé na hmotnosti vozidla. Jízdní odpory snižují akcelerační sílu, obdobně jako síly od traťových odporů do stoupání. Součástí této části je i porovnávání vlivu velikosti maximálního proudu i_{sq-sat} (momentové složky saturovaného proudu) při stejné hodnotě tokotvorné složky proudu. Zde bylo konstatováno, že spotřeba elektromobilu na zvolené trati má minimální závislost na maximálním proudu i_{sq-sat} . To je způsobeno i tím, že zvolený rychlostní profil trati je mírný. Při agresivnější jízdě, a zvláště na náročnější trati, by byla výrazněji využita složka proudu q , která by zapříčinila výraznější rozdíly ve spotřebě vozidla. To by mohlo být námětem pro rozšíření této práce do budoucna, kdy by se v závislosti na velikosti proudu složek i_{sd} a i_{sq} pozorovala spotřeba vozidla při odlišných režimech jízdy jako jsou prudší rozjezdy a brždění. Zároveň je možno současný simulační

model vyzkoušet na odlišných tratích, jako je dálniční a městský provoz, které mají zcela odlišný rychlostní profil než zvolená trasa.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Battery Electric Vehicles, BEV, EVs, HEVs, BHEV. [online]. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.evgo.com/why-evs/types-of-electric-vehicles/>
- [2] So what's the difference between a PHEV, EV, and HEV anyways? [online]. 2019 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.currentautomotive.com/so-whats-the-difference-between-a-phev-ev-and-hev-anyways/>
- [3] *What to Expect in New Connectors* [online]. 2019 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: http://www.fveaa.org/fb/Level3Charging_279.pdf
- [4] *CHAdEMO releases the latest version of the protocol enabling up to 400KW* [online]. 2018 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.chademo.com/chademo-releases-the-latest-version-of-the-protocol-enabling-up-to-400kw/>
- [5] *EV charging stations and modes: International standards* [online]. 2014 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/271419949_EV_charging_stations_and_modes_International_standards
- [6] Technology Overview [online]. c2013-2020 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.chademo.com/technology/technology-overview/>
- [7] *Chademo Association* [online]. c2013-2020 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://chademo.com/>
- [8] *Tesla Model S P85D: Dual motors, AWD, 691 hp, 3.2 to 60* [online]. 2014 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.roadandtrack.com/new-cars/news/a6358/first-look-tesla-model-s-p85d-dual-motor/>
- [9] *Elon Musk: Tesla boss on EVs with 500-mile range and colonies on Mars* [online]. 2014 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.autoexpress.co.uk/tesla/87943/elon-musk-tesla-boss-on-evs-with-500-mile-range-and-colonies-on-mars>
- [10] PRACHAŘ, Roman. *Jízdní odpory vozidel* [online]. Brno, 2010 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=33556. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, ústav soudního inženýrství.
- [11] *Tesla Supports Recycling Over Reuse for Electric Vehicle Batteries* [online]. 2016 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.waste360.com/waste-reduction/tesla-supports-recycling-over-reuse-retired-electric-vehicle-batteries>
- [12] List of battery sizes. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA):

- Wikimedia Foundation [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_battery_sizes#Lithium-ion_batteries_\(rechargeable\)](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_battery_sizes#Lithium-ion_batteries_(rechargeable))
- [13] *Figure 1: Energy densities of lithium-ion batteries and ionic conductivities of lithium electrolytes.* [online]. c2020 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.nature.com/articles/nenergy2016141/figures/1>
- [14] *Understanding Tesla's lithium ion batteries* [online]. 2017 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://evannex.com/blogs/news/understanding-teslas-lithium-ion-batteries>
- [15] *Tesla Model S: So Safe, It Broke NHTSA's Testing Equipment* [online]. 2013 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://www.thecarconnection.com/news/1086364_tesla-model-s-so-safe-it-broke-nhtsas-testing-equipment
- [16] *In a Tesla model S, there is no IGBT packaging trick* [online]. c2017 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.pntpower.com/on-tesla-electric-vehicles-semiconductor-packaging/>
- [17] *THE HYBRID-SYNCHRONOUS MACHINE OF THE NEW BMW i3 & i8* [online]. 2014 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: http://hybridfordonscentrum.se/wp-content/uploads/2014/05/20140404_BMW.pdf
- [18] *BMW i3 – Elektrická revoluce* [online]. 2014 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/test-bmw-i3-elektricka-revoluce-79318>
- [19] *2019 BMW i3 gets a 42 kWh battery* [online]. 2018 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://pushevs.com/2018/09/28/2019-bmw-i3-gets-a-42-kwh-battery/?fbclid=IwAR10uHzL7ttSkwFrp0pdlH6Gjnb_3hqX6U1OrlfUO4Zx90z_7EuowXPxDj0
- [20] *Samsung SDI 94 Ah battery cell full specifications* [online]. 2015 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://pushevs.com/2018/04/05/samsung-sdi-94-ah-battery-cell-full-specifications/>
- [21] *BMW i3 má nově 33kWh baterii a dojezd 200 km* [online]. 2016 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/bmw-i3-ma-nove-33kwh-baterii-dojezd-200-km>
- [22] *More details on the Samsung SDI 94 Ah battery cell* [online]. 2017 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://pushevs.com/2017/02/20/details-samsung-sdi-94-ah-battery-cell/>
- [23] *Smart Battery Systems for Energy Storage* [online]. 2016 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: http://www.samsungsdi.com/upload/ess_brochure/Samsung%20SDI%20brochure_EN.pdf
- [24] *2019 BMW i3 120Ah* [online]. 2018 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.topspeed.com/cars/bmw/2019-bmw-i3-120ah-ar182747.html>

- [25] *SK Innovation to start producing NCM 811 battery cells soon* [online]. 2017 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://pushevs.com/2017/09/02/sk-innovation-start-producing-ncm-811-battery-cells-soon/>
- [26] *The BMW i3 with Range Extender* [online]. c2014 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20140526035300/http://www.bmwusa.com/Standard/Content/Vehicles/2014/i3/BMWi3RangeExtender/Features_and_Specs/BMWi3RangeExtenderSpecifications.aspx
- [27] *CONVENIENT ELECTROMOBILITY – ANYTIME, ANYWHERE: Charging the BMW i3* [online]. c2013 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20130921015553/http://www.bmw.co.uk/en/new-vehicles/bmw-i/i3/2013/charging.html>
- [28] Nissan Leaf. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Nissan_Leaf?fbclid=IwAR3LD8f3Zl7mxl8JUgxVikG0K5AfqPGiZy3TNLgNs453NMw-sJ1eWkYWcj4
- [29] RONG, Yang. *ELECTRIFIED VEHICLE TRACTION MACHINE DESIGN WITH MANUFACTURING CONSIDERATIONS* [online]. Hamilton, Ontario, 2016 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://macsphere.mcmaster.ca/bitstream/11375/20895/2/Yang_Rong_2016December_Ph.D..pdf?fbclid=IwAR21K31bVLBDzpSMSPWMze_9E8eZ1Dgwk6wA5fPL7orAnFCVv1N0LQ7B1wY. Disertační práce. McMaster University. Vedoucí práce Dr. Ali Emadi, Dr. Stephen Veldhuis.
- [30] *2018 NISSAN LEAF SPECS: At a Glance: 2018 Nissan LEAF* [online]. 2017 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://evobsession.com/2018-nissan-leaf-specs/?fbclid=IwAR3Yxf5CrkMMVvmTJnNHZ2DMrk5sPxKGqfqdNU-ilW18nnnKe--beHNWsh8>
- [31] *Nissan starts new program to replace old LEAF battery packs* [online]. 2018 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://electrek.co/2018/03/26/nissan-leaf-battery-pack-replacement-program>
- [32] *Three Ways to Charge the Next-Generation Nissan LEAF* [online]. c2020 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://www.chargepoint.com/blog/three-ways-charge-next-generation-nissan-leaf/?fbclid=IwAR20Ig5P6K-cDWpq9M_CEPviDot71H3AWfPGNpPdk0lWzt7WfzTha6aTK08
- [33] *ChargePoint Launches Smart Home Charging Station to Make EV Driving*

- 'Simple' [online]. 2015 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/new-products-attempt-to-make-ev-charging-more-convenient?fbclid=IwAR37xDIBI6eAg7iR6TtfIn0OJDwebowJ1Gh4kRzjLMOTFoiW2YW3K0citK0#gs.DV5cjMc>
- [34] Nissan LEAF [online]. c1995-2020 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.guideautoweb.com/en/makes/nissan/leaf/2019/specifications/s/>
- [35] Rozlučte se s NEDC, je tu WLTP! Nový Nissan Leaf ujede 285 km [online]. 2018 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/rozlucete-se-s-nedc-je-tu-wltp-novy-nissan-leaf-ujede-285-km>
- [36] Test Volkswagen e-Golf (35,8 kWh): postupná "e-voluce" [online]. 2019 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://elektrickevozy.cz/clanky/test-volkswagen-e-golf-358-kwh-postupna-e-voluce>
- [37] Volkswagen e-Golf [online]. c2020 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://ev-database.org/car/1087/Volkswagen-e-Golf>
- [38] Here's the battery pack behind VW's global electric-vehicle push [online]. c2020 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://www.greencarreports.com/news/1118974_heres-the-battery-pack-behind-vws-global-electric-vehicle-push
- [39] HOLEČEK, Petr. *Elektromobilita Volkswagen* [online]. [cit. 2020-06-15].
- [40] DANZER, Jiří. *Elektrická trakce 1: Přehled problematiky* [online]. 2. 2018 [cit. 2020-06-15].
- [41] PRACHAŘ, Roman. *Jízdní odpory vozidel* [online]. Brno, 2010 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=33556. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství. Vedoucí práce Tomáš Rochla.
- [42] *Benchmarking and Hardware-in-the-Loop Operation of a 2014 MAZDA SkyActiv 2.0L 13:1 Compression Ratio Engine* [online]. 2016 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-10/documents/2016-01-1007-benchmark-hil-operat-2014-mazda-skyactiv-2.0l.pdf>
- [43] *Roadster Efficiency and Range* [online]. 2008 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.tesla.com/blog/roadster-efficiency-and-range?redirect=no>
- [44] *Comparison of Topologies for the Main Inverter of an Electric Vehicle* [online]. c2014 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.tf.uni-kiel.de/etit/LEA->

download/publications/2014/2014_pcim_finalpaper_public.pdf

[45] *Cooling electric vehicles: LITHIUM-ION BATTERY PACKS & METHODS OF COOLING THEM* [online]. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z:

https://www.dober.com/electric-vehicle-cooling-systems#electric_vehicle_cooling_systems.tf.uni-kiel.de/etit/LEA-

download/publications/2014/2014_pcim_finalpaper_public.pdf

[46] ZEMAN, Karel, Zdeněk PEROUTKA a Martin JANDA. *Automatická regulace pohonů s asynchronními motory*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2007. ISBN 978-80-7043-350-8.

[47] KOLÍNSKÝ, Vladimír. *Pulzační složky momentu synchronního motoru s vnitřními permanentními magnety - simulační studie* [online]. Plzeň, 2015 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z:

<https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/18633/1/BP.pdf>. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta Elektrotechnická. Vedoucí práce David Uzel.

[48] LEPKA, Jaroslav. *MODERNÍ METODY BEZSNÍMAČOVÉHO ŘÍZENÍ POHONŮ S PMSM MOTOREM* [online]. Brno, 2017 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z:

https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=162464.

Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a telekomunikačních technologií. Vedoucí práce Pavel Václavek.

[49] MIKULEC, Roman. *Systémové srovnání měření adheze vozovky* [online]. Brno, 2015 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z:

<https://adoc.tips/systemove-srovnani-meni-adheze-vozovky.html>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství. Vedoucí práce Stanislav Tokař.

[50] *Ochrana IGBT v pohonných systémech a systémech obnovitelných zdrojů energie* [online]. 2012 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z:

<https://www.dps-az.cz/soucastky/id:11965/ochrana-igbt-v-pohonnych-systemech-a-systemech-obnovitelnych-zdroju-energie>

[51] *Automotive High-Voltage Contactors for Electric Drives* [online]. 2018 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.rutronik.com/article/detail/News/automotive-high-voltage-contactors-for-electric-drives/>

[52] WAGER, Guido, Jonathan WHALE a Thomas BRAUNL. Driving electric vehicles at highway speeds: The effect of higher driving speeds on energy consumption and driving range for electric vehicles in Australia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2016, **63**, 158-165 [cit. 2020-06-17]. DOI: 10.1016/j.rser.2016.05.060.

ISSN 13640321. Dostupné z:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032116301721>

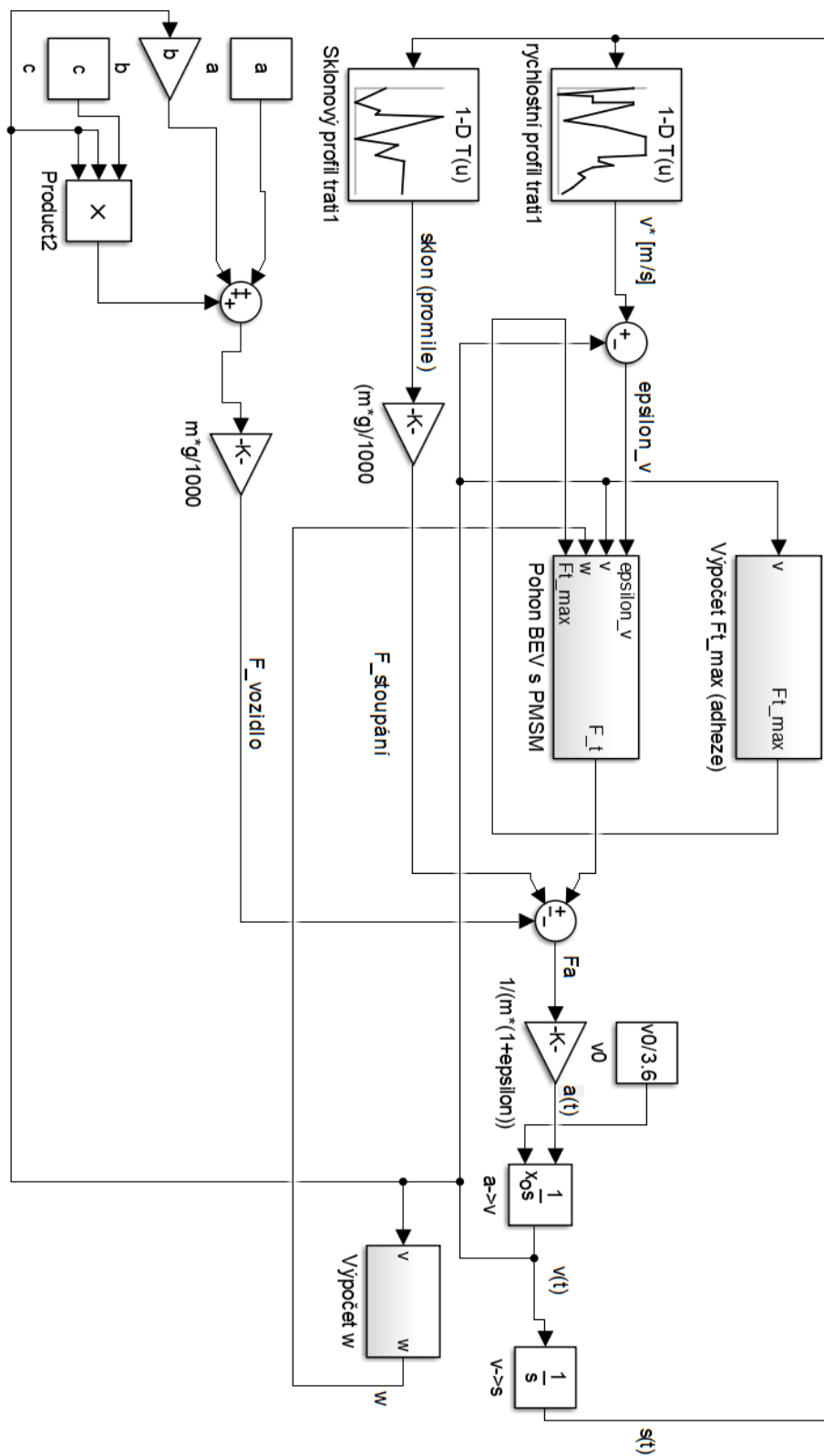
[53] Kralovice-Plasy. *www.mapy.cz* [online]. c2020 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z:

<https://mapy.cz/zakladni?planovani->

[trasy&x=13.4440761&y=49.9636538&z=13&rc=9eTfqxXRQd9e2y2xXDuE&rs=ward&rs=ward&ri=14195&ri=8347&mrp=%7B%22c%%3A111%7D&xc=%5B%](https://mapy.cz/zakladni?planovani-trasy&x=13.4440761&y=49.9636538&z=13&rc=9eTfqxXRQd9e2y2xXDuE&rs=ward&rs=ward&ri=14195&ri=8347&mrp=%7B%22c%%3A111%7D&xc=%5B%22)

Příloha 1

Obr. 20: Simulační obvod trakční mechaniky



Příloha 2

Obr. 21: Simulační schéma vektorového řízení pohonu s PMSM

